

BAB II
DARI BOM SAMPAI PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA NUKLIR

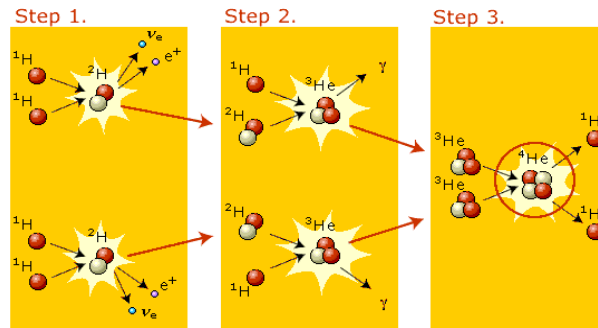
A. Pemanfaatan Energi Nuklir

Energi nuklir telah dimanfaatkan di alam raya selama bermilyar-milyar tahun dari semenjak kelahirannya. Adalah reaksi fusi nuklir yang membuat Matahari serta bintang-bintang di jagat raya bercahaya. Sayangnya sejarah energi nuklir dimulai dari sisi kelam untuk menciptakan senjata nuklir pemusnah masal. Amerika Serikat menggunakan energi nuklir pada Perang Dunia II untuk mengembangkan bom atom berdasarkan reaksi fisi. Hasilnya Jepang menyerah tanpa syarat akibat dijatuhkannya bom atom di Hiroshima dan Nagasaki. Kemudian dikembangkan bom hidrogen berdasarkan reaksi fusi yang memiliki daya rusak yang lebih besar. Setelah Perang Dunia II, energi nuklir dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik dalam suatu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Awalnya PLTN dibangun untuk kepentingan militer, dalam bentuk reaktor nuklir terapung yang dipasang pada kapal selam peluncur rudal, kapal induk dan kapal perang jelajah. Setelah berhasil membuat reaktor nuklir untuk keperluan militer, perusahaan seperti Westinghouse kemudian membangun PLTN untuk pembangkitan listrik di kota-kota besar. Walaupun sekarang hanya reaktor fisi yang digunakan di dunia, namun reaktor fusi akan menjadi sumber energi di masa depan yang kini masih dalam proses penelitian.

A.1. Energi Matahari

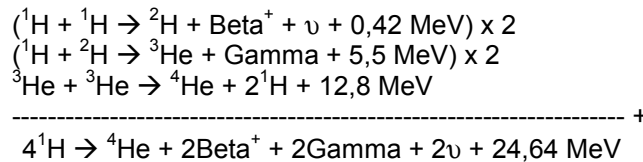
Matahari adalah pelita sumber cahaya yang memancarkan energi surya ke Bumi dan juga ke planet lain di tatasurya. Energi matahari yang setiap hari dipancarkan adalah energi nuklir hasil reaksi fusi atau reaksi penggabungan beberapa inti atom ringan (hidrogen) menjadi inti atom yang lebih berat (helium). Reaksi penggabungan di Matahari baru dapat terjadi pada kondisi ekstrim yaitu suhu yang sangat tinggi, tekanan yang besar dan bahan bakar yang melimpah, sehingga Matahari terlihat sebagai bola gas pijar yang menyilaukan. Kondisi ekstrim dalam reaksi fusi diperlukan untuk mengatasi gaya tolak menolak Coulomb dari muatan proton yang terdapat dalam inti hidrogen. Hidrogen adalah bahan bakar dari Matahari. Para ahli astronomi dan astrofisika memperkirakan bahwa unsur-unsur kimia yang terdapat di matahari adalah 80 persen gas hidrogen, 19 persen gas helium dan sisanya kurang lebih 1 persen terdiri atas unsur-unsur oksigen,

magnesium, nitrogen, silikon, karbon, sulfur, besi, sodium, kalsium, nikel serta beberapa unsur lainnya. Unsur-unsur kimia tersebut bercampur menjadi satu dalam bentuk gas sub atomik yang sangat panas yang disebut "plasma". Perhitungan yang lebih teliti menyimpulkan bahwa daerah pada Matahari yang cukup panas untuk dapat menghasilkan reaksi fusi termonuklir hanyalah daerah yang mencakup 10 persen dari total hidrogen dalam Matahari.



Gambar 2.1 - Bagan reaksi fusi tiga tahap di Matahari

Panas termonuklir hasil reaksi fusi berantai di Matahari dilakukan dalam tiga tahap seperti pada persamaan berikut:



Tahap pertama adalah penggabungan dua inti hidrogen (${}^1\text{H}$) menjadi deuterium (${}^2\text{H}$) yaitu isotop hidrogen yang memiliki dua proton (nomor massa 2), tahap kedua adalah penggabungan inti hidrogen dengan deuterium hasil tahap pertama menjadi isotop helium (${}^3\text{He}$) dengan nomor massa 3, dan tahap ketiga penggabungan isotop helium menjadi partikel alpha atau inti helium (${}^4\text{He}$) yang disertai dengan pancaran sejumlah partikel elementer dan energi. Pembakaran termonuklir mengakibatkan empat inti hidrogen bergabung menjadi satu inti helium dengan melepaskan dua positron (Beta^+), dua sinar gamma dan dua neutrino (ν), disertai energi sebesar 24,64 MeV. Setiap detiknya Matahari membakar 600 juta ton atom hidrogen dan hasilnya adalah dibangkitkannya suhu di inti Matahari lebih dari 14 juta derajat Celcius. Suhu di permukaan matahari jauh lebih rendah yaitu sekitar 5.000 – 6.000 derajat Celcius. Pada permukaan matahari terdapat daerah yang suhunya hanya sekitar 4.000 derajat Celcius yang relatif lebih dingin dibandingkan daerah lain pada permukaan Matahari. Bagian ini tampak lebih gelap

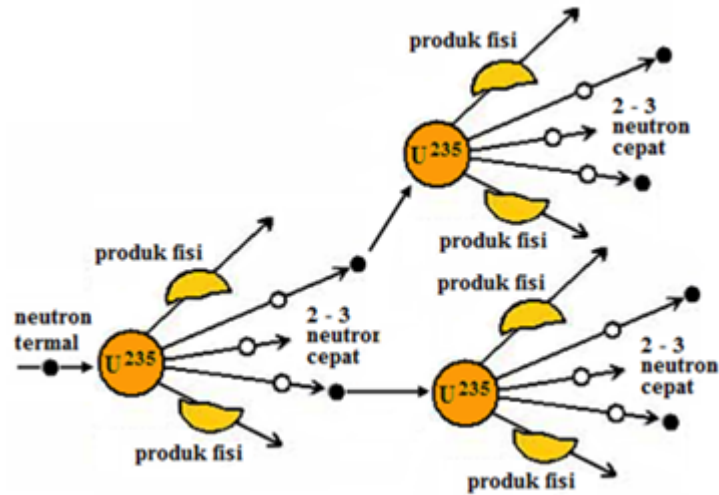
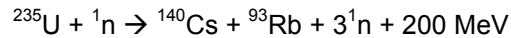
dibandingkan daerah sekitarnya dan disebut bintik-bintik Matahari (*sunspots*). Adanya bintik-bintik pada permukaan Matahari menyebabkan timbulnya badai dan gejolak lidah api (*flare*) yang disertai dengan keluarnya partikel berkecepatan tinggi. Fenomena ini mempengaruhi magnetik Bumi sehingga menyebabkan gangguan pada komunikasi radio dan membuat jarum kompas berputar liar. Gangguan di atas tidak mengesalkan kenyataan bahwa energi Matahari yang menyebabkan adanya kehidupan di Bumi.

A.2. Bom Atom Uranium

Sebulan setelah Perang Dunia II pecah, tepatnya 2 Agustus 1939, ilmuwan besar, Albert Einstein, mengirim surat kepada Presiden AS pada waktu itu, Franklin Delano Roosevelt, yang mengabarkan bahwa Nazi Jerman tengah giat memurnikan uranium alam untuk mengembangkan bom jenis baru yang kekuatannya berjuta-juta kali lipat bahan peledak konvensional trinitro toluena (TNT). Menurut Einstein, seharusnya Amerika bisa mendahului mengembangkan bom tersebut sebelum Jerman berhasil memperolehnya. Tidak lama setelah surat Einstein diterima, Presiden AS menggelar suatu proyek rahasia dengan nama sandi "Manhattan" di bawah pimpinan Brigadir Jenderal Leslie R. Groves. Seratus ribu orang dipekerjakan pada pabrik-pabrik yang dibangun di Hanford, Washington, Oak Ridge, Tennessee, dan di laboratorium utama di Los Alamos, New Mexico yang luasnya mencapai 20.000 hektar. Mereka bekerja di bawah pengawasan Robert Oppenheimer, seorang ahli fisika nuklir beserta timnya yang terdiri dari ilmuwan terkenal seperti Enrico Fermi, Leo Szilard, Stanislaw Ulam dan Nicholas Metropolis. Tugas mereka adalah merancang dan membangun bom atom pertama di dunia sebelum didahului pihak Jerman.

Penciptaan bom atom diilhami penemuan empat ilmuwan Jerman, yakni Otto Hahn, Lise Meitner, Fritz Strassman, dan Otto Frisch. Pada tahun 1939, mereka menemukan fenomena reaksi fisi bahwa inti atom berat yang bersifat radioaktif bisa dibelah menjadi atom-atom lebih ringan dengan menembakkan sebuah neutron. Neutron adalah zarah yang tidak bermuatan sehingga dapat dengan mudah berinteraksi dengan inti atom yang bermuatan positif, karena tidak menimbulkan gaya tolak menolak Coulomb. Reaksi fisi atau pembelahan merupakan kebalikan dari reaksi fusi atau penggabungan. Reaksi fisi adalah proses pembelahan inti atom akibat menyerap neutron dan menghasilkan atom-atom baru yang bermassa lebih kecil dengan memancarkan sejumlah neutron dan energi. Dalam eksperimen dilakukan dengan menembak isotop U-235 dengan neutron termal yaitu neutron yang bergerak sangat lambat dengan kecepatan sekitar 2,2 km/s atau energi sekitar 0,025 eV. Saat neutron diserap inti uranium maka inti tersebut akan tereksitasi dan menjadi tidak stabil kemudian akan pecah menjadi dua atom lebih kecil, seperti: Ba, Kr, Zr, Te, Sr, Cs, I, La dan Xe sambil melepaskan

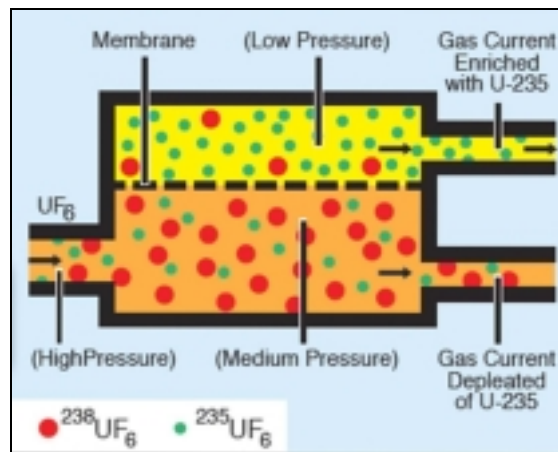
energi yang sangat besar disertai 2-3 neutron. Contoh reaksi fisi U-235 yang dapat terjadi adalah:



Gambar 2.2 – Reaksi fisi Uranium-235

Neutron yang dipancarkan dari hasil reaksi fisi disebut neutron cepat dengan kecepatan sekitar 20.000 km/s atau mempunyai energi kinetik sekitar 2 MeV. Agar reaksi dapat terjadi secara berantai maka neutron cepat hasil reaksi fisi harus dapat diserap oleh atom-atom U-235 yang lain. Akan tetapi karena daerah interaksi efektif atauampang lintang fisi U-235 untuk neutron cepat adalah rendah yaitu sekitar 2 barn ($1 \text{ barn} = 1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$), maka kemungkinan diserapnya adalah kecil. Neutron termal memilikiampang lintang fisi sekitar 583 barn atau 291 kali lebih besar dari neutron cepat, maka lebih mudah diserap oleh U-235. Kecepatan neutron cepat harus diturunkan dahulu menjadi kecepatan neutron termal, untuk itu diperlukan media khusus yang disebut moderator. Sebagai moderator adalah atom dengan nomor massa kecil, memilikiampang lintang hamburan neutron besar danampang lintang serapan neutron kecil, misalnya: air, air berat (D_2O) atau grafit. Selain itu, neutron hasil pembelahan bahan fisil, bergerak ke segala arah dengan kecepatan tinggi, akibatnya dapat lolos keluar dari sistem. Agar neutron tidak keluar dari sistem dan dapat diarahkan kembali untuk dimanfaatkan pada proses fisi berikutnya, maka di sekeliling sistem dipasang bahan pemantul neutron yang disebut reflektor. Sebagai bahan reflektor yang baik adalah unsur-unsur yang mempunyaiampang lintang hamburan yang besar danampang lintang serapan neutron yang kecil, misalnya berilium atau grafit.

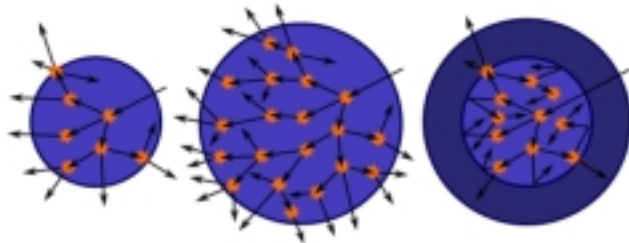
Projek Manhattan menjajaki seluruh teknik yang tersedia untuk memproduksi bahan peledak bom atom yaitu isotop U-235 yang berasal dari alam atau plutonium-239 (Pu-239) yang tidak tersedia di alam tetapi harus dibuat di reaktor. Masalah yang dihadapi adalah bagaimana memperoleh bahan fisis U-235 dalam jumlah yang cukup besar, karena dari setiap 25.000 ton bijih uranium yang ditambang, hanya menghasilkan 50 ton metal uranium. Kemudian sebagian besar metal uranium (99,274%) adalah isotop U-238 yang bersifat fertil tidak dapat langsung membelah. Kandungan isotop U-235 di alam sangat kecil hanya 0,705%. Untuk itu harus dilakukan pengkayaan yaitu meningkatkan kandungan isotop U-235 dari uranium alam. Pengkayaan uranium bukan perkara mudah apalagi untuk bom atom yang membutuhkan pengkayaan tinggi. Karena sifat-sifat kimia yang sama, maka tidak mungkin dilakukan pemisahan isotop U-235 dari isotop U-238 secara kimia. Karena pemisahan secara kimia sukar dilakukan, maka dilakukan pemisahan unsur U-235 dari U-238 secara fisika, antara lain: pemisahan dengan difusi gas, pemisahan secara elektromagnetik dalam *cyclotron*, pemisahan dengan sentrifugal gas (*gas centrifuge*) dan pemisahan isotop dengan laser (*atomic vapor laser isotope separation*).



Gambar 2.3 – Pengkayaan uranium dengan teknik difusi gas

Pengkayaan uranium pada Proyek Manhattan menggunakan teknologi difusi gas yang dilakukan dalam 4000 tahap secara bertingkat, bertempat di pabrik pengkayaan Oak Ridge. Ini adalah penerapan teknologi yang paling penting di Proyek Manhattan. Pertama, melalui proses pemanasan dan kimia, metal uranium (U_3O_8) dikonversi menjadi senyawa uranium heksafluorida UF_6 yang berbentuk gas. Pemisahan dilakukan berdasarkan perbedaan massa molekul gas $^{238}UF_6$ dengan gas $^{235}UF_6$ yang relatif sangat kecil. Dengan melewati kedua campuran gas tersebut

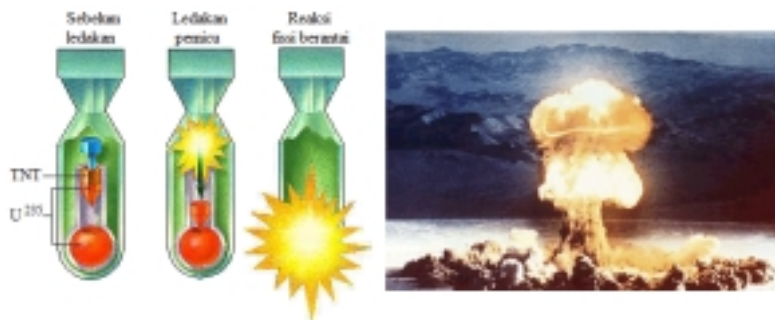
melalui membran berpori, perbedaan massa gas mengakibatkan perbedaan kecepatan difusi. Oleh karena perbedaan massa antara kedua molekul gas tersebut sangat kecil maka perbedaan kecepatan difusinya pun kecil. Setelah melewati membran terjadi kenaikan kecil konsentrasi $^{235}\text{UF}_6$, sehingga hasil pengayaan harus dilewatkan lagi pada membran berikutnya. Agar diperoleh $^{235}\text{UF}_6$ dengan kadar cukup tinggi maka harus dilakukan proses difusi secara berulang-ulang melalui ribuan sekat membran secara bertingkat. Setelah melewati sekitar empat ribu sekat maka kadar $^{235}\text{UF}_6$ meningkat dengan kemurnian di atas 90%. Kemudian $^{235}\text{UF}_6$ dikonversi kembali menjadi metal oksida $^{235}\text{UO}_2$ dalam bentuk uranium yang diperkaya tinggi (*High Enriched Uranium*) untuk digunakan sebagai bahan bom atom.



Gambar 2.4 – Meningkatkan massa kritis bahan fisil

Agar bom atom dapat meledak maka dibutuhkan bahan fisil dalam jumlah minimum sebanyak massa kritisnya. Massa kritis adalah jumlah terkecil bahan fisil yang dibutuhkan agar reaksi fisi berantai dapat terus berlangsung. Kekritisannya sendiri tergantung pada jenis bahan, tampang lintang fisi, tingkat pengkayaan, kerapatan bahan, bentuk bahan, suhu dan jenis bahan yang mengelilinginya. Bahan fisil berbentuk bola sempurna dapat menjadikannya superkritis. Mengubahnya dari bentuk bola akan mengurangi reaktivitas dan menjadikannya subkritis. Peningkatan suhu bahan fisil akan menambah kecepatan neutron sehingga mengurangi tampang lintang fisi dan tampang lintang serapan bahan. Jika melapisi massa kritis dan mengelilinginya dengan reflektor neutron, maka jumlah masa kritis yang dibutuhkan akan berkurang. Bahan reflektor yang umum digunakan adalah logam berilium. Penggunaan campuran (*tamper*) bahan pelapis padat seperti U-238 (*depleted uranium*) akan meningkatkan efisiensi bahan pada reaksi fisi. Campuran U-238 di dalam bom tidak berfungsi sebagai reflektor neutron, tetapi membelah karena berinteraksi dengan neutron cepat sehingga menghasilkan lebih banyak lagi neutron. Massa kritis bahan fisil U-235 berbentuk bola dan berkerapatan normal pada pengkayaan 90% adalah 52 kg dan diameter 17 cm, sedangkan untuk bahan fisil Pu-239 adalah 10 kg dan diameter 9,9 cm. Pada tingkat pengkayaan 20%, massa kritis U-235 adalah 400 kg, dan pada tingkat pengkayaan 15%, masa kritis U-235 adalah 600 kg.

"Little Boy" yaitu bom atom uranium yang dijatuhkan di kota Hiroshima pada tanggal 6 Agustus 1945 adalah jenis *gun-type assembly method*. Bahan fisil dirancang mencapai massa superkritis dengan menabrakkan sebutir bahan subkritis terhadap butiran lainnya seperti prinsip senjata api konvensional (*the "gun" method*). *Little Boy* menggunakan uranium diperkaya kurang dari 90% dengan massa kritis 64 kg (50 kg uranium diperkaya 89% dan 14 kg uranium diperkaya 50%). Inti uranium disimpan dalam bentuk bola dengan diameter 20 cm. Keseluruhan diameter bom adalah 71 cm, panjang 3 m dan berat 4.000 kg. Uranium dibagi menjadi dua bagian yang dirancang sedemikian rupa agar bagian yang satu dengan bagian yang lain dapat saling bertabrakan. Peledak konvensional (TNT) digunakan sebagai pemicu untuk menciptakan gelombang kejut. Agar ledakan bisa optimal, maka detonator TNT harus disinkronkan dengan reaksi fisi. Hal ini merupakan bagian tersulit dari bom atom. Gelombang kejut yang dihasilkan menyebabkan U-235 mencapai kondisi superkritis. Penggunaan berilium sebagai reflektor neutron telah meningkatkan daya ledak menjadi lebih besar yaitu setara dengan 2,5 kali massa kritisnya.



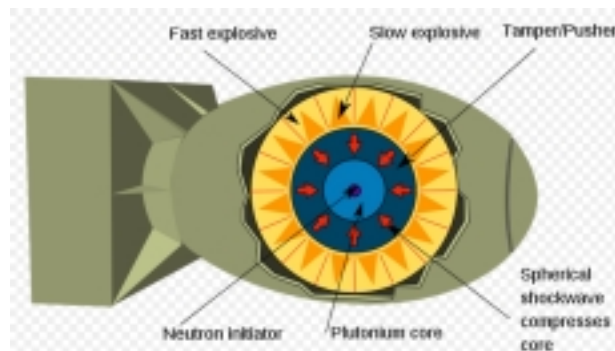
Gambar 2.5 – Bagan prinsip dasar bom uranium dan efek ledaknya

Pada tanggal 6 Agustus 1945, pukul 8.15 pagi, "*Little Boy*" dijatuhkan di atas Hiroshima dari pesawat pembom jenis Boeing B-29 yang dipiloti Kolonel Paul Tibbets, Jr. Bom diledakkan secara otomatis menggunakan detonator ketinggian pada jarak 580 meter di atas permukaan tanah, agar menimbulkan kerusakan sebesar mungkin. Tantangan utama di semua rancangan senjata nuklir adalah memastikan sebanyak mungkin bahan fisil dikonsumsi sebelum senjata itu hancur. Semula diperkirakan energi yang dilepaskan sama dengan daya ledak 15.000 ton TNT, tetapi ternyata hanya setara dengan 5.000 ton TNT. Masalah ini disebabkan kurang dari 1 kg dari 64 kg U-235 yang dikonsumsi reaksi fisi berantai. Walaupun demikian, *Little Boy* telah menimbulkan cendawan debu dengan ketinggian 13,7 km akibat ledakan dahsyat seketika yang diikuti oleh kilatan api, gelombang kejut dan hembusan angin dengan kecepatan ratusan km per jam. Sebanyak

92.133 (66.000 menurut US Army) korban tewas dan hilang tergulung dalam hitungan detik dan 37.424 (69.000 menurut US Army) luka-luka. Demikian juga gedung-gedung, jembatan, dan semua instalasi, hancur tidak bersisa. Penggunaan bom atom oleh AS, menyebabkan militer Jepang mengalami pukulan telak dalam Perang Dunia II.

A.3. Bom Atom Plutonium

Berbeda dengan bom atom yang menggunakan isotop U-235, bom atom plutonium menggunakan isotop Pu-239 yang diperoleh dari U-238 yang diproses di dalam reaktor. Telah dijelaskan bahwa plutonium tidak tersedia di alam tetapi harus diproduksi di dalam suatu reaktor nuklir, sebagai hasil dari proses transmudasi U-238. Ketika U-238 menangkap neutron maka berubah menjadi U-239, sebagai suatu unsur yang tidak stabil yang akan meluruh menjadi neptunium-239, yang selanjutnya akan meluruh lagi menjadi Pu-239. Kemudian dilakukan pemisahan unsur-unsur secara kimia untuk mendapatkan Pu-239 murni yang merupakan logam berat, beracun, berwarna putih keperakan dan radioaktif. Mengingat uranium di alam terdiri dari 99,3% isotop U-238 dan hanya 0,7% isotop U-235, maka bom plutonium jelas lebih hemat dari segi bahan dasar U-238 dan tidak memerlukan proses pengayaan yang amat rumit seperti pada uranium. Dewasa ini teknik pengolahan ulang daur bahan bakar nuklir bekas (*spent fuel*) dengan proses PUREX (*plutonium reduction extraction*) adalah jauh lebih efisien memisahkan plutonium dari uranium sisa dan bahan hasil fisi lainnya, dibanding teknologi pemisahan plutonium pertama yang dikembangkan di Laboratorium Los Alamos.



Gambar 2.6 – Bagan prinsip dasar bom plutonium

Bom atom generasi kedua dengan bahan fisil Pu-239 dikenal sebagai bom atom jenis "*Implosion*" atau peledakan kedalam menggunakan bahan peledak kimia (TNT) sehingga bahan fisil mencapai tingkat kepadatan beberapa kali lipat dari nilai semula. Metoda *Implosion* dianggap lebih canggih dibandingkan metode *gun-type*. Dan juga penggunaan plutonium

sebagai bahan fisil hanya bisa dilakukan dengan metoda *Implosion*. Bom atom terdiri dari inti plutonium berbentuk bola yang dikelilingi bahan padat berupa bijih U-238 sebagai campuran pendorong (*Tamper/Pusher*). Antara detonator dan campuran pendorong ditempatkan reflektor neutron berilium atau aluminium, untuk meningkatkan massa kritis. Agar memberikan tekanan tinggi, dirancang sistem peledak berdaya tinggi berupa lensa-lensa peledak yang disusun dalam urutan peledak cepat dan peledak lambat yang akan menghasilkan ledakan gelombang kejut dalam bentuk bola. Sebagai pemacu digunakan detonator jenis EBR (*Exploding-Bridgewire Detonator*) yang ditemukan khusus untuk bom plutonium oleh Luis Alvarez dan Lawrence Johnston. EBR dapat memacu sejumlah ledakan secara bersamaan dengan penentuan waktu yang akurat. Efisiensi *Fat Man* yang besar disebabkan campuran mampat U-238 yang tidak mengalami fisi, tetapi dapat menahan perluasan ledakan yang menghentikan fisi selama beberapa ratus nanodetik

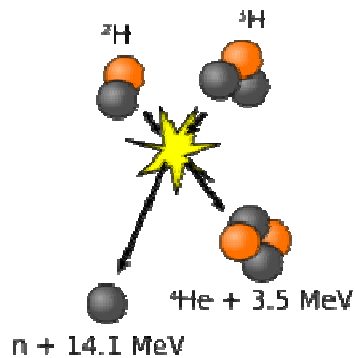
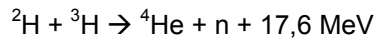


Gambar 2.7 – Bom Atom *Fat Man* yang dijatuhkan di Nagasaki

Bom atom Plutonium diberi nama "*Fat Man*" dijatuhkan di Nagasaki, kota pelabuhan penting terbesar di Jepang, pada tanggal 9 Agustus 1945, tiga hari setelah dijatuhkannya bom atom pertama di Hiroshima. *Fat Man* menggunakan 6,4 kg massa kritis Pu-239 yang diperkaya 90%. Bom tersebut mempunyai panjang 3,3 meter, diameter 1,5 meter dan berat 4.500 kg. Bom dijatuhkan dari pesawat jenis Boeing B-29 *Superfortress* "Bock's Car" yang dipiloti oleh Mayor Charles Sweeney dan meledak 43 detik kemudian pada ketinggian 469 meter dari permukaan tanah. Ledakan menyebabkan kerusakan setara dengan ledakan 22.000 ton TNT, membangkitkan panas sampai 3.900 derajat Celcius dan menyebabkan hembusan angin dengan kecepatan 1.005 km/jam. Ledakan menelan korban 25.677 (39.000 menurut US Army) tewas dan hilang seketika, dan 23.345 (25.000 menurut US Army) luka-luka. Pada akhir tahun 1945, akibat jatuhnya debu radioaktif berkelanjutan dan pengaruh radiasi lainnya maka jumlah korban mencapai 100.000 sampai 200.000 orang di Jepang yaitu akibat leukimia, kanker dan penyakit akut yang berkepanjangan.

A.4. Bom Hidrogen

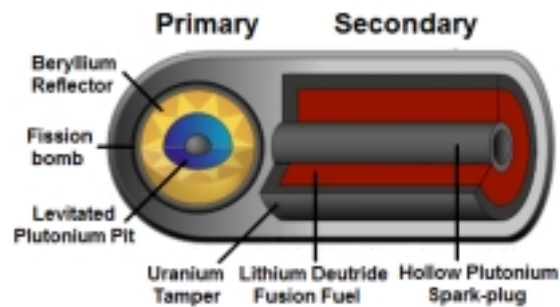
Berbeda dengan bom atom yang berdasarkan reaksi fisi, bom hidrogen memerlukan reaksi termonuklir atau reaksi bertingkat dari fisi kemudian ke fusi. Reaksi fusi nuklir adalah penggabungan isotop-isotop hidrogen (deuterium dan tritium) menjadi helium dan penggabungan ini baru dapat terjadi dalam kondisi yang teramat ekstrim. Sebagai contoh reaksi fusi di inti matahari terjadi pada suhu antara 14 - 20 juta derajat Celsius, tekanan gravitasi sekitar seperempat triliun atmosfer, serta kerapatan yang mencapai delapan kali kerapatan emas. Kondisi ekstrim inilah yang telah menjamin berlangsungnya penggabungan inti-inti hidrogen menjadi inti helium yang berlangsung secara berkesinambungan selama 5 milyar tahun. Tentu saja kondisi ekstrim seperti pada inti matahari sulit diperoleh secara normal di permukaan bumi, sehingga harus dicari suatu proses yang memungkinkan terjadinya kondisi ekstrim. Dalam kondisi ekstrim, reaksi fusi deuterium dengan tritium memiliki peluang lebih besar dibandingkan reaksi fusi deuterium dengan deuterium. Persamaan reaksi fusi bom hidrogen dapat ditulis sebagai berikut:



Gambar 2.8 - Reaksi fusi bom Hidrogen

Deuterium (${}^2\text{H}$) tambah tritium (${}^3\text{H}$) yaitu isotop-isotop atom hidrogen bergabung menghasilkan helium ditambah sebuah neutron serta melepaskan energi 17,6 MeV. Reaksi fusi ini dapat dicapai dengan metode "*radiation implosion*" yang dirancang oleh Edward Teller dan Stanislaw Ulam pada 9 Mei 1951 di Los Alamos. Gagasan pokok dari Ulam adalah menciptakan tekanan kejut untuk menaikkan suhu, dan Teller memanfaatkan radiasi sinar x untuk membangkitkan tekanan kejut. Maka dirancanglah perangkat untuk reaksi penggabungan deuterium dan tritium yaitu dengan meletakkan sebuah bom fisi dan bahan fusi (deuterium dan tritium) pada jarak berdekatan di

dalam sebuah wadah khusus yang kedap dan dapat memantulkan radiasi. Kanal radiasi digunakan untuk menyalurkan sinar x ke sekeliling bahan fusi di komponen bom hidrogen sekunder. Setelah bom fisi diledakkan, maka pancaran sinar gamma dan sinar x yang dihasilkan dari ledakan, disalurkan sebagai gelombang kejut untuk memampatkan bahan fusi dan memanaskannya ke suhu termonuklir. Energi tersebut kemudian diserap oleh plasma yang dihasilkan dari pemanasan busa plastik (*polystyrene*) di kanal radiasi, sehingga suhu plasma naik mencapai suhu inti Matahari dan tekanan plasma membesar seperti pada inti Matahari. Kondisi ekstrim ini memungkinkan terjadinya reaksi fusi termonuklir. Reaksi fusi akan menghasilkan neutron cepat dengan energi tinggi yang dapat membelah inti bahan *depleted uranium*.



Gambar 2.9 – Bagan dasar Bom Hidrogen

Bom hidrogen terdiri dari bagian primer dan bagian sekunder. Bagian primer adalah bom fisi yang intinya adalah bijih plutonium yang dikelilingi reflektor berilium untuk meningkatkan massa kritis. Sedangkan bagian sekunder adalah bahan fusi Lithium-Deutrida berbentuk selinder yang dibungkus *uranium tamper*. Sebuah batang plutonium berfungsi untuk pengapian (*spark plug*) yang akan memicu terjadinya reaksi fusi. Sebagai pemicu awal ledakan digunakan bahan peledak konvensional (TNT) berdaya ledak tinggi yang diberi detonator ketinggian. Sinar x yang dihasilkan dari reaksi fisi difokuskan melalui kanal radiasi ke komponen-komponen fusi bagian sekunder, melewati campuran U-238 dengan lithium sehingga terbentuk tritium sebagai bahan bakar reaksi fusi. Fungsi sinar x adalah meningkatkan kerapatan dan suhu bahan fusi ke kondisi ekstrim sehingga reaksi termonuklir dalam kondisi superkritis. Akibatnya terjadi ledakan bom hidrogen dalam waktu sepersepuluh detik dengan membentuk bola api raksasa dengan suhu yang sangat tinggi yaitu sekitar 300 juta derajat Celsius. Suhu yang sangat tinggi menyebabkan semua material di dalam bola api berubah wujud menjadi gas dan akibat perbedaan tekanan yang sangat tinggi maka pada akhirnya membentuk gelombang kejut. Kekuatan bom hidrogen ternyata

ribuan kali lebih besar dibandingkan bom atom hasil reaksi fisi dan menghasilkan neutron 24 kali lebih banyak.

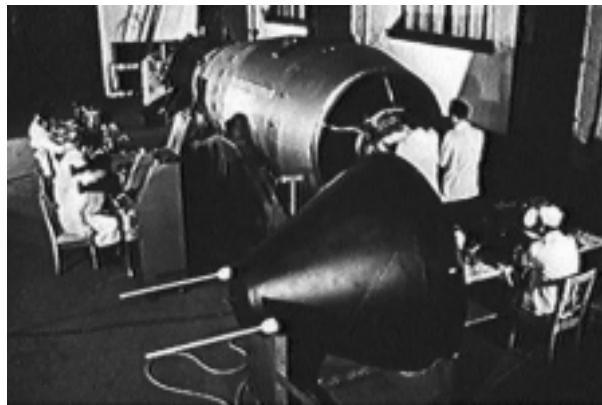


Gambar 2.10 – Uji coba bom hidrogen di Atol Bikini

Komputer ENIAC digunakan untuk menghitung pembakaran tritium dan deuterium dalam suatu reaksi fusi termonuklir, dan kemudian mensimulasikan ledakan bom hidrogen. Pada 1 Maret 1954, dilakukan uji coba bom hidrogen pertama yang diberi nama "*Castle Bravo*" di Atol Bikini, Kepulauan Marshal, Samudera Pasifik. Sebagai bahan fusi digunakan cairan deuterium yang menimbulkan ledakan dahsyat berkekuatan 14,1 megaton TNT. Sedetik setelah diledakkan, tercipta bola api dengan diameter 7 km. Bola api ini terlihat di Kwajalein atoll yaitu 450 km dari *ground zero*. Ledakannya meninggalkan kawah selebar 2 km dan kedalaman 75 meter. Dalam waktu semenit, jutaan ton pasir, batu karang, tumbuhan, dan fauna laut dalam radius 20 mil beterbangan membentuk cendawan raksasa. Bola api tersebut membakar langit sampai ketinggian 14 km dan diameter hingga 11 km. Dalam waktu kurang dari 10 menit meluas hingga ketinggian 40 km dan diameter 100 km (meluas 6 km permenitnya). Akibatnya sungguh mengerikan, setelah ledakan tiga Atol di Bikini, yakni Bokonijien, Aerokojlol dan Nam menghilang tidak terlihat lagi di atas permukaan laut. Sampah radioaktifnya mencemari wilayah seluas 7000 mil di lautan Pasifik termasuk pulau-pulau kecil seperti Rongerik, Rongelap, Utirik dan awak dari kapal Jepang Daigo Fukuryu Maru sehingga menuai kritik keras dunia internasional.

Sebagai pendatang baru, Uni Soviet tidak mau ketinggalan dalam perlombaan senjata nuklir. Uni Soviet mengembangkan bom hidrogen tiga bagian yang disebut "*Tsar Bomba*" yang dirancang oleh sebuah tim dipimpin J. Borisovich Khariton dengan anggota: Andrei Sakharov, Victor Adamsky, Yuri Babayev, Yuri Smirnov, dan Yuri Trutnev. Bom hidrogen tiga bagian ini,

seperti bom hidrogen lainnya, menggunakan bom fisi sebagai bagian primer untuk memicu reaksi termonuklir pada bagian sekunder, dan kemudian menggunakan energi dari ledakan yang dihasilkan untuk memicu termonuklir tambahan yang jauh lebih besar pada bagian tersier. Fakta menunjukkan bahwa "*Tsar Bomba*" memiliki tiga jenis bom dan bukan hanya satu jenis yang sangat besar. Awalnya bom tiga tahap ini dirancang berkekuatan 100 megaton TNT, akan tetapi oleh karena resiko kontaminasi radioaktifnya terlalu besar untuk dapat dikendalikan, maka daya ledaknya dikecilkan setengahnya. Untuk membatasi sampah radioaktif, pada bagian ketiga dipasang *tamper* dari timah dan bukannya *tamper* uranium sehingga dapat memperbesar reaksi fisi antara uranium dengan neutron hasil reaksi fusi. Diperkirakan 97% dari total energi yang dihasilkan berasal dari reaksi fusi. Ini berarti *Tsar bomba* adalah senjata nuklir paling "bersih" yang pernah dibuat, dan menghasilkan sampah radioaktif paling kecil.



Gambar 2.11 –Bom hidrogen tiga-bagian "*Tsar Bomba*"

Pada Oktober 1961, Soviet melakukan uji coba ledakan bom hidrogen tiga tahap yang disebut "*Tsar Bomba*". yang kekuatan setara dengan 50 megaton TNT atau 2200 kali lebih besar dari bom atom yang dijatuhkan di Nagasaki. Bom memiliki berat 27 ton, panjang 8 m, dan diameter 2 m yang diterbangkan ke lokasi pengujiannya oleh sebuah pesawat Tu-95V dengan pilot Mayor Andrei Durnovtsev. Tsar bomba di pasang pada sebuah parasut seberat 800 kg untuk menghambat laju jatuhnya agar pesawat masih dapat terbang menjauhi lokasi percobaan. Bom ini dijatuhkan dari ketinggian 10,5 km dan didesain untuk meledak pada ketinggian 4 km di atas permukaan tanah dengan menggunakan sensor barometrik. Tsar Bomba diledakkan pada 30 Oktober 1961 di atas Mityushikha Bay, Laut Artik. Ledakannya sangat luar biasa, menciptakan gelombang kejut dan bola api pada radius 100 km dari pusat ledakan, kilauan cahayanya sangat terang hingga terlihat pada jarak 1000 km. Pengamat bahkan masih bisa merasakan efek pulsa termal dari jarak 270 km.

A.5. Energi Nuklir untuk Kesejahteraan Manusia

Awalnya energi nuklir dimanfaatkan untuk membuat senjata nuklir yang telah menjadi senjata pemusnah masal abad ke-20. Dijatuhkannya bom atom di Hiroshima dan Nagasaki, menyebabkan Jepang menyerah tanpa syarat kepada Amerika Serikat pada Perang Dunia II. Era perang dingin, perlombaan senjata nuklir semakin gencar, terutama antara Amerika Serikat dan Uni Sovyet sebagai dua *super power* dunia. Banyak negara melakukan uji coba senjata nuklir sebagai bentuk unjuk gigi kekuatan militernya. Sejak 16 Juli 1945 sampai 23 September 1992, Amerika Serikat telah melakukan uji coba sebanyak 1054 bom atom dan bom hidrogen, diikuti oleh Uni Sovyet sebanyak 715 uji coba, kemudian Perancis 210 uji coba, Inggris dan Republik Rakyat Cina masing-masing 45 uji coba, India dan Pakistan masing-masing 6 uji coba. Untuk menghentikan perlombaan dan perlucutan senjata nuklir diantara lima negara nuklir (AS, Rusia, Perancis, Inggris, dan Cina) dan untuk mencegah negara-negara non-nuklir memperoleh senjata nuklir, maka pada tanggal 12 Juni 1968, sidang Majelis Umum PBB mengeluarkan traktat pencegahan penyebaran kepemilikan senjata nuklir yang disebut *Nuclear Non-Proliferation Treaty* (NPT). Traktat tersebut ditandatangani pada 1 Juli 1968 oleh negara-negara dunia dan 189 negara berdaulat telah menjadi negara pihak NPT.



Gambar 2.12 – Penanda tangan NPT

Berdasarkan ketentuan NPT, lima negara nuklir diizinkan tetap memiliki senjata nuklir, namun berkewajiban membicarakan upaya perlucutan arsenal nuklirnya. Selain itu, traktat ini memberikan hak penggunaan teknologi nuklir untuk maksud-maksud damai oleh negara pihak NPT sehingga ada tiga pilar yang didukung dalam traktat ini: (1) *non-proliferation*, (2) *disarmament*, (3) *the right to peacefully use of nuclear technology*. Empat negara bukan anggota NPT diketahui memiliki senjata nuklir. India, Pakistan dan Korea Utara telah melakukan uji coba dan menyatakan diri memiliki senjata nuklir, sedangkan Israel mengambil kebijakan diam yaitu tidak mengakui maupun tidak membatahnya. Korea Utara pada awalnya turut menyetujui traktat akan

tetapi melanggarnya dan kemudian mengundurkan diri pada tahun 2003. Pada 25 Mei 2009, Korea Utara telah sukses melaksanakan uji coba nuklir di bawah tanah. Para seismolog membenarkan bahwa uji coba itu menghasilkan gempa dengan kekuatan 4,5 skala Richter. Ini merupakan uji coba nuklir kedua setelah uji nuklir pertama pada Oktober 2006 yang mendorong dijatuhkannya sanksi internasional oleh Dewan Keamanan PBB terhadap Korea Utara. Ironisnya, Amerika Serikat yang menuduh Korea Utara dan Iran sedang mengembangkan senjata nuklir dan mengajak negara-negara lain menghentikannya, malah terus melakukan uji coba senjata nuklirnya dan sejak tahun 1997 telah melakukan 23 uji coba di gurun Nevada, Las Vegas.

Untuk mendukung penggunaan energi nuklir untuk tujuan damai dan kesejahteraan umat manusia, maka pada tahun 1957 dibentuk Badan Tenaga Atom Internasional atau *International Atomic Energy Agency* (IAEA) sebagai suatu organisasi dunia di bawah PBB, yang bertujuan memajukan dan mengembangkan penggunaan energi nuklir untuk maksud-maksud damai. Pada waktu ini anggotanya telah mencapai 104 negara. Selama lebih dari setengah abad IAEA mengordinasikan kerja sama nuklir internasional terutama bantuan kerjasama teknik untuk negara-negara berkembang, termasuk Indonesia. Dunia telah merasakan manfaat energi nuklir untuk kesejahteraan manusia di berbagai bidang kehidupan, seperti pangan, kesehatan, energi, dan industri. Energi nuklir dalam peralatan reaktor, iradiator dan akselerator diharapkan dapat menjawab masalah krisis global berupa keterbatasan produksi pangan, peningkatan kesehatan dan ketersediaan air minum. Teknik nuklir telah dikembangkan misalnya untuk mengendalikan populasi hama serangga lintas batas yang berbahaya bagi tanaman buah dan sayuran yaitu dengan meradiasi serangga jantan hingga mandul. Radiasi nuklir juga dapat dimanfaatkan untuk mutasi genetik sehingga diperoleh varietas pangan yang toleran terhadap kondisi sulit atau tahan terhadap penyakit tertentu. Radiasi pada bidang kedokteran untuk diagnosis fungsi ginjal, diagnosis dan terapi hipertiroid, dan terapi epidemi kanker khususnya di negara berkembang. Penggunaan perunut radioaktif antara lain untuk penelitian panas bumi, penentuan letak kebocoran pada bendungan, penyerapan unsur pada tanaman, pemetaan dan perbaikan manajemen sumberdaya air.

Peran energi nuklir untuk kesejahteraan manusia akan semakin penting, terutama untuk mengatasi tantangan pemenuhan kebutuhan pokok manusia akan sumber energi yang bersih akibat adanya pemanasan global. Pemanasan global adalah meningkatnya temperatur dunia dari tahun ke tahun karena terjadinya efek rumah kaca akibat bertambahnya konsentrasi emisi gas seperti karbondioksida (CO_2), sulfurdoksida (SO_2), metana (CH_4), nitro-oksida (NO_x) dan CFC di atas permukaan bumi. Efek rumah kaca mengakibatkan energi matahari terperangkap dalam atmosfer bumi dan meningkatkan suhu bumi. Dampaknya sangat luas dan serius bagi lingkungan seperti pelelehan es di kutub, kenaikan muka air laut, perluasan gurun pasir,

peningkatan hujan dan banjir, perubahan iklim, punahnya flora dan fauna tertentu, migrasi fauna dan timbulnya hama penyakit. Penyebab pemanasan global adalah penggunaan energi yang tidak ramah lingkungan, terutama di sektor industri dan transportasi. PLTN merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan karena tidak melepaskan debu yang mengandung logam berat atau gas buang ke lingkungan. Akibat pemanasan global membuat ilmuwan menyarankan agar penggunaan PLTN yang lebih aman dan efisien kembali dimaksimalkan. Energi nuklir saat ini menyumbang 16% dari kebutuhan listrik dunia didukung beroperasinya 439 PLTN dengan kapasitas total sekitar 360.064 Gwe. Indonesia sudah berencana membangun PLTN sejak tahun 1972 bersamaan dengan dibentuknya Komisi Persiapan Pembangunan PLTN untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia.

Sampai saat ini Indonesia belum berhasil membangun PLTN, sehingga belum ada sebahpun PLTN yang dapat dioperasikan untuk mengurangi beban kebutuhan listrik di Indonesia. Sebetulnya telah dilakukan beberapa studi yaitu studi lokasi, studi kelayakan, studi tapak, dan beberapa studi tambahan untuk mendukung studi kelayakan yang sudah dilakukan antara lain studi penyiapan "*Bid Invitation Specification*", studi pengembangan dan evaluasi tapak PLTN, studi perencanaan energi dan kelistrikan nasional dan studi pendanaan pembangunan PLTN yang dilaksanakan di bawah koordinasi BATAN dengan arahan dari Panitia Teknis Energi (PTE), Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral, dan dilakukan bersama-sama oleh beberapa instansi lain di Indonesia dan bantuan luar negeri dari IAEA, Itali, Amerika Serikat, Perancis dan Jepang. Hasil studi disimpulkan dari berbagai jenis energi yang tersedia untuk pembangkitan listrik di Indonesia dan dilihat dari sisi ketersediaan dan keekonomiannya, maka energi gas akan mendominasi penyediaan energi guna pembangkitan energi listrik, sekitar 40% untuk wilayah Jamali (Jawa, Madura dan Bali). Batubara akan muncul sebagai pemasok kedua setelah gas, yaitu sekitar 30% untuk wilayah Jamali. Sisanya sekitar 30% untuk akan dipasok oleh jenis energi yang lain, yaitu hidro, mikrohidro, geothermal dan energi baru dan terbarukan lainnya. Diharapkan energi nuklir dapat menyumbang sekitar 5-6% pada tahun 2025.

B. Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi berantai yang terkendali dan menjaga kesinambungan reaksi berantai tersebut. Walaupun bom atom maupun reaktor nuklir sama-sama bekerja berdasarkan reaksi berantai, akan tetapi laju kecepatan reaksi berantainya sangat berbeda. Pada bom atom seluruh reaksi berantai terjadi hampir bersamaan secara tidak terkendali sehingga menimbulkan ledakan, sedangkan di dalam reaktor nuklir, proses reaksi berantai dikendalikan dan berjalan lambat. Untuk mengendalikan reaksi berantai maka reaktor nuklir dilengkapi dengan batang kendali yang terbuat dari bahan yang memiliki tampang lintang serapan

neutron besar. Bahan seperti boron, cadmium dan gadolinium sering digunakan sebagai batang kendali karena efektif dalam menyerap neutron. Ketika batang kendali dimasukkan seluruhnya ke dalam teras reaktor, maka semua neutron akan terserap sehingga reaksi berantai berhenti. Dan sebaliknya jika batang kendali perlahan-lahan ditarik ke luar dari teras reaktor maka reaksi berantai akan berjalan kembali. Pada reaktor nuklir ada batang kendali yang bergerak lambat yang berfungsi sebagai pengatur jumlah neutron atau daya reaktor, dan ada batang kendali yang jatuh dengan cepat untuk menghentikan seketika operasi reaktor (*reactor scram*).



Gambar 2.13 – Reaktor nuklir pertama CP-1

Reaktor nuklir pertama disebut *Chicago Pile-1* (CP-1), dibangun di atas lapangan *squash* Universitas Chicago atas inisiatif Enrico Fermi sebagai bagian dari Proyek Manhattan. Disebut *Pile* (tumpukan) karena menggunakan tumpukan blok-blok grafit dengan kemurnian tinggi sebagai moderator yang diletakkan di antara lempengan butiran-butiran uranium. CP-1 menggunakan uranium diperkaya sebagai bahan bakar dan cadmium sebagai batang kendali penyerap neutron. CP-1 dibangun untuk penelitian memahami mekanisme reaksi fisi berantai dan untuk mengkaji kemungkinan memproduksi Pu-239. Tim ilmuwan yang dipimpin oleh Enrico Fermi berhasil mendemonstrasikan reaksi fisi berantai pertama di dalam reaktor CP-1, dan reaktor mencapai kekritisan pada pukul 3.25 sore, tanggal 2 Desember 1942. Kondisi kritis diperoleh dengan menarik keluar batang kendali sedikit demi sedikit, yang menyebabkan meningkatnya aktivitas neutron pada teras reaktor. Reaksi berantai berjalan selama 28 menit dan kemudian batang kendali dimasukkan kembali ke teras untuk mematikan reaktor. Oleh karena reaktor bekerja dengan daya relatif kecil maka tidak digunakan bahan pendingin. Pembangunan reaktor nuklir CP-1 ini menjadi tahap awal bagi pembangunan reaktor nuklir yang lebih besar yang digunakan untuk berbagai keperluan, baik untuk kepentingan militer maupun untuk perdamaian.

B.1. Klasifikasi Reaktor Nuklir

Keberhasilan demonstrasi reaktor nuklir CP-1 segera ditindak lanjuti Proyek Manhattan dengan membangun serangkaian reaktor nuklir gas-grafit sebagai sarana memproduksi Pu-239 untuk bahan bakar bom atom. Reaktor nuklir kemudian dikembangkan sebagai sumber energi untuk menggerakkan kapal selam, kapal jelajah dan kapal induk. Keunggulan kapal selam dan kapal induk bertenaga nuklir adalah dapat memasok energi dalam waktu lama, tanpa perlu berlabuh untuk mengisi bahan bakar. Lebih dari itu, kapal selam nuklir dapat menyelam selama berbulan-bulan tanpa perlu mengambil udara dari atas permukaan air karena kapal tersebut mempunyai cukup energi untuk memproduksi oksigen di bawah laut. Menurut sebuah sumber penelitian yang dikeluarkan di Prancis April 2002, kini di dunia sedikitnya terdapat 1.400 reaktor nuklir yang dibangun sejak 1954. Dari jumlah tersebut, untuk kepentingan sipil hanya 43% sedangkan sisanya 57% masih dominan digunakan untuk kepentingan sistem pertahanan militer. Jumlah itu terdapat antara lain dalam 220 kapal selam peluncur rudal, 250 kapal serang, 10 kapal induk, dan 14 kapal jelajah. Sebanyak 245 reaktor nuklir terapung dimiliki AS, Inggris, Prancis, Cina, dan Rusia di dalam 182 kapal perang.

Berdasarkan penggunaan energi nuklir untuk maksud-maksud damai, maka reaktor nuklir dapat diklasifikasikan menjadi tiga yaitu:

1. Reaktor Riset termasuk untuk uji bahan dan pelatihan
2. Reaktor Daya
3. Reaktor Produksi Radioisotop
4. Reaktor Fusi Eksperimental

B.1.1. Reaktor Riset

Reaktor riset adalah suatu reaktor yang dimanfaatkan untuk berbagai macam tujuan penelitian. Misalnya reaktor uji material yang digunakan secara khusus untuk uji iradiasi, reaktor untuk eksperimen fisika reaktor, reaktor riset untuk penelitian dengan menggunakan berkas neutron dan alat eksperimen kekritisan, reaktor untuk pendidikan dan pelatihan. Di antara reaktor-reaktor tersebut, yang disebut reaktor risetpun terdiri dari berbagai macam, misalnya reaktor untuk eksperimen berkas neutron dan uji iradiasi material, reaktor untuk eksperimen perisai, reaktor untuk uji pulsa dan lain-lain. Tipe-tipe reaktor riset antara lain tipe kolam berpendingin dan bermoderator air berat, tipe kolam berpendingin dan bermoderator air ringan dan tipe kolam berpendingin air ringan dan bermoderator air berat.

Di Indonesia terdapat tiga buah reaktor nuklir yang seluruhnya merupakan reaktor riset. Pertama adalah reaktor Triga-Mark II di Bandung, yang mencapai kekritisan pada tanggal 16 Oktober 1964 dengan daya

250 kW. Kemudian pada tahun 1971 dayanya ditingkatkan dari 250 kW menjadi 1000 kW, dan ditingkatkan lagi menjadi 2000 kW pada tahun 2000. Kedua adalah reaktor Kartini di Yogyakarta dengan daya 100 kW yang diresmikan pemakaiannya oleh Presiden RI pada tahun 1979. Setelah itu adalah Reaktor GA Siwabessy dibangun dikawasan Pusat Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Serpong yang mencapai kekritisannya pada bulan Juli 1987 dengan daya 30 MW. Di sekitar reaktor GA Siwabessy dibangun fasilitas litbang nuklir yang canggih untuk menunjang program pembangunan PLTN di Indonesia. Laboratorium penunjang antara lain untuk bidang metalurgi dan bahan bakar nuklir, bidang rekayasa, bidang keselamatan nuklir, bidang ilmu bahan, pengelolaan limbah nuklir dan produksi radioisotop dan radiofarmaka.

B.1.2. Reaktor Daya

Reaktor daya adalah reaktor yang digunakan untuk menghasilkan panas dan panas hasil fisi tersebut disalurkan untuk memutar turbin pembangkit listrik. Sebagian besar reaktor daya yang beroperasi dewasa ini adalah jenis Reaktor Air Ringan (*Light Water Reactor*) yang mula-mula dikembangkan di AS dan Rusia. Disebut Reaktor Air Ringan karena menggunakan H₂O kemurnian tinggi sebagai bahan moderator sekaligus pendingin reaktor. Reaktor ini terdiri atas Reaktor Air tekan (*Pressurized Water Reactor*) dan Reaktor Air Didih (*Boiling Water Reactor*) dengan jumlah yang dioperasikan masing-masing mencapai 52 % dan 21,5 % dari total reaktor daya yang beroperasi. Sisanya sebesar 26,5 % terdiri atas berbagai jenis reaktor daya lainnya terutama jenis reaktor gas. Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor*) sedang dikembangkan di beberapa negara untuk menaikkan rasio penggunaan uranium. Bahan bakar yang telah digunakan pada reaktor termal digunakan lagi di reaktor pembiak cepat, yaitu bahan bakar campuran plutonium (Pu-239) dengan uranium alam (U-238). Reaksi fisi terjadi antara plutonium dengan neutron cepat. Sedangkan pembiakan diperoleh dari reaksi tangkapan neutron cepat oleh U-238 yang kemudian meluruh menjadi Pu-239 yang bersifat fisi.

Selama sekitar 60 tahun, teknologi reaktor daya telah berkembang demikian pesat, sehingga saat ini terdapat cukup banyak jenis dan model reaktor daya termasuk reaktor daya generasi baru atau generasi ke-empat, yang diadopsi oleh IAEA INPRO yaitu :

- Pressurized Water Reactor (PWR)
- Boiling Water Reactor (BWR)
- Heavy Water Reactor (HWR/CANDU)
- Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR)
- High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR)
- Molten Salt Reactor (MSR)
- Super Critical Water Reactor (SCWR)

Reaktor temperatur tinggi dengan bahan pendingin gas (HTGR) semakin mendapat perhatian dewasa ini disebabkan keselamatan pengoperasiannya yang aman secara melekat (*inherent*), menghasilkan energi yang lebih ekonomis dan sebagai reaktor kogenerasi yang memanfaatkan keluaran panas dari reaktor tidak hanya untuk pembangkitan tenaga listrik, melainkan juga untuk produksi hidrogen dan desalinasi air laut. Pengembangan HTGR di Asia ditunjukkan dengan dibangunnya HTTR di Jepang dan HTR-10 di China. HTR-10 adalah reaktor riset temperatur tinggi menggunakan pendingin gas helium, moderator grafit, temperatur *outlet* 700 derajat Celcius dan daya termal 10 MW, yang dibangun dan dioperasikan oleh Universitas Tsinghua, Beijing, Cina. Bahan bakar yang digunakan adalah UO_2 dengan perkayaan 17% berbentuk bola-bola kecil (*spherical*). Dalam reaktor ini telah didemonstrasikan bahwa temperatur maksimum elemen bakar sebesar 1600 derajat Celcius tidak akan dapat terlampaui, dalam kecelakaan apapun.

B.1.3. Reaktor Produksi Radioisotop

Reaktor nuklir dapat digunakan untuk fasilitas iradiasi dalam memproduksi radioisotop bagi keperluan bidang kesehatan, industri, pertanian dan kegiatan penelitian serta pengembangan lainnya. Berbagai jenis radioisotop dari proses fisi maupun aktivasi dapat dihasilkan dengan reaktor, baik untuk keperluan medis, (Tc-99m, I-131), keperluan industri (Xe-33, Ar-41, Ir-192, Br-82), maupun untuk penelitian (P-32, I-125). Radionuklida teknesium-99m (Tc-99m) adalah bahan bertanda radioaktif yang disebut radiofarmaka yang paling banyak digunakan dalam kedokteran nuklir, misalnya untuk pemeriksaan fungsi ginjal. Bahan tersebut dimasukkan ke dalam tubuh pasien melalui suntikan intravena, kemudian diukur aktivitasnya di dalam ginjal menggunakan alat pendeteksi sinar gamma atau melalui teknik pencitraan dengan kamera gamma. Distribusi laju peluruhan tiap satuan waktu (radioaktivitas) sinar gamma di organ akan menunjukkan kondisi fungsi ginjal. Radiofarmaka bertanda Tc-99m dapat pula digunakan untuk mencari jejak terjadinya infeksi bakteri di dalam tubuh, misalnya bakteri tuberkulose. Aplikasi teknik nuklir dalam bidang kedokteran telah memberikan sumbangan yang berharga dalam diagnosis dan terapi berbagai jenis penyakit. Berbagai disiplin ilmu kedokteran seperti endokrinologi, nefrologi, kardiologi, neurologi, dan onkologi telah lama memanfaatkan teknik nuklir

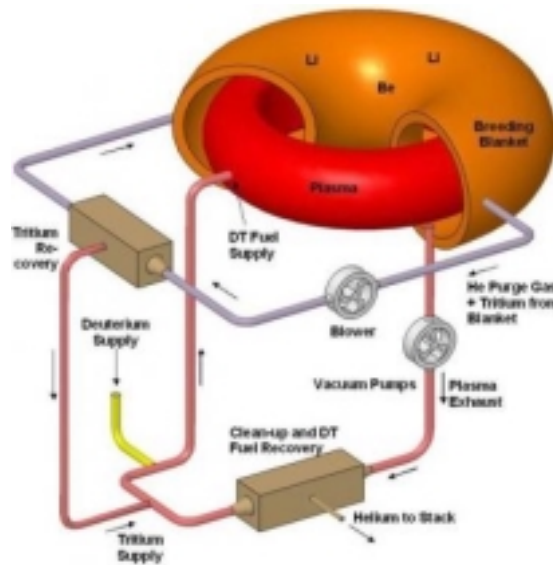
Di bidang industri, radioisotop sebagai pencari jejak dimanfaatkan di berbagai pengujian. Misalnya radioisotop dari jenis gas mulia yang sulit bereaksi Argon-41 (Ar-41) sebagai perunut gas yang digunakan untuk mengetahui dan menentukan letak kebocoran dalam suatu tangki proses atau suatu *heat exchanger*. Keberadaan radioisotop tersebut di luar jalur menunjukkan terjadinya kebocoran. Brom-82 (Br-82) dalam bentuk KBr adalah perunut cairan berbasis air yang digunakan untuk mengetahui adanya

dan menentukan letak kebocoran pada suatu bendungan, atau digunakan pula untuk menguji kebocoran pada tangki penyimpanan dan pipa penyalur. Keberadaan radioisotop ini dapat dicari jejaknya sambil bergerak dengan cepat, sehingga pipa transmisi minyak atau gas bumi dengan panjang ratusan bahkan ribuan km dapat dideteksi kebocorannya dalam waktu relatif singkat. Radioisotop I-125 banyak digunakan sebagai perunut untuk penelitian panas bumi. I-125 dibuat dengan mengiradiasi gas Xe-124 dengan neutron di tabung berkas, sedangkan radioisotop lainnya diiradiasi dalam teras reaktor.

Neutron termal dari reaktor nuklir dapat dimanfaatkan langsung untuk penyembuhan lewat penyinaran dengan berkas neutron yang disebut BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*). Pertama-tama pasien disuntik dengan konyugat boron-MAB setelah boron-MAB terlokalisasi dalam sel kanker, kemudian daerah tumor tersebut diiradiasi dengan berkas neutron termal yang berenergi sangat rendah (0,025 eV). Reaksi nuklir di dalam sel tumor dapat diatur sedemikian agar radiasi yang dihasilkan merupakan dosis terapi yang tepat bagi sel tumor, tetapi paparan radiasi pada jaringan sel normal sangat kecil sehingga tidak membahayakan jaringan sehat. BNCT adalah salah satu alternatif terbaru dalam penyembuhan kanker yaitu dengan menggabungkan keunggulan metoda kimoterapi dan metoda radioterapi. Banyak masalah yang tidak terpecahkan dengan metode konvensional, ternyata dapat dicari solusinya dengan teknik nuklir. Sehingga telah diakui bahwa teknik nuklir sangat berperan dalam penanggulangan berbagai masalah kesehatan, industri dan kesejahteraan manusia.

B.1.4. Reaktor Fusi Eksperimental

Sejumlah ilmuwan berpendapat bahwa reaktor fusi nuklir adalah sumber energi masa depan, karena bahan bakarnya berupa air tersedia melimpah, pengoperasiannya secara melekat sangat aman, dan menghasilkan limbah radioaktif yang amat kecil. Dewasa ini, pembangunan reaktor fusi masih dalam tahap eksperimen yang dimulai sejak tahun 1956 dengan penelitian sistem Tokamak oleh kelompok ilmuwan dari Institut Kurchatov di Rusia. Tokamak adalah sebuah mesin yang memproduksi medan magnet berbentuk torus (bundaran dengan lubang di tengahnya) untuk mengurung plasma yang dibangun untuk menyelidiki efisiensi pembakaran termonuklir dan mekanisme pengendalian plasma. Di dalam Tokamak terjadi reaksi fusi yaitu penggabungan antara dua isotop hidrogen yaitu inti deuterium dan inti tritium (D-T) pada suhu yang sangat tinggi. Deuterium dapat diekstraksi dari air melalui proses elektrolisa, sedangkan tritium tidak tersedia di alam karena bersifat radioaktif dengan waktu paruh sangat pendek (12,32 tahun), sehingga harus diproduksi melalui pembiakan lithium di dalam reaktor nuklir.



Gambar 2.14 – Reaktor fusi eksperimen Tokamak

Reaksi fusi di atas permukaan bumi baru dapat terjadi pada suhu 100 juta derajat Celsius atau 100 kali lebih panas dari suhu di inti Matahari, sehingga diperlukan daya eksternal yang amat besar untuk menghidupkan reaktor. Pada suhu setinggi itu, bahan bakar fusi akan menguap, bukan hanya menjadi gas tetapi langsung menjadi plasma D-T. Kontak langsung antara plasma dengan dinding reaktor akan mencemari plasma, menyebabkan pendinginan suhu dengan segera dan menghentikan proses fusi. Agar tidak terjadi kontak langsung maka dibutuhkan medan magnet super kuat yang dibangkitkan oleh suatu superkonduktor yang akan mengurung dan mempertahankan plasma tetap pada orbit lintasannya di dalam reaktor. Reaksi fusi D-T menghasilkan neutron yang akan diserap oleh dinding pertama Tokamak. Neutron yang diserap oleh dinding ini akan melepaskan sebagian besar energinya. Energi inilah yang akan digunakan untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Dinding ini juga digunakan untuk selimut pembiakan (*breeding blanket*) lithium menjadi tritium dan kembali diinjeksikan ke dalam plasma sebagai bahan bakar.

Keberhasilan penelitian Tokamak mendorong negara-negara Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat untuk membangun fasilitas penelitian termonuklir jenis tokamak. JET (*Joint European Torus*) adalah fasilitas penelitian termonuklir negara-negara Eropa yang diprakarsai oleh Euratom dan mulai beroperasi tahun 1983. Eksperimen JET pada tahun 1997 dengan medan magnet sebesar 4 Tesla telah berhasil mempertahankan pengurungan plasma dan menghasilkan daya fusi puncak sebesar 16,1 MW

selama 0,6 detik, akan tetapi seluruh fasilitas eksperimen mengkonsumsi daya jauh lebih besar yaitu sekitar 100 MW. Apabila didefinisikan faktor penguatan daya (Q) yaitu perbandingan antara daya fusi keluaran yang dihasilkan terhadap daya eksternal masukkan, maka eksperimen JET menghasilkan nilai Q jauh di bawah 1, artinya belum terjadi kondisi kembali pokok ($Q=1$) apalagi mencapai kondisi ideal.

Megaprojek eksperimen Tokamak terbesar di dunia yang disebut ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) mulai dibangun pada tahun 2008 di Cadarache Perancis, dan merupakan kerjasama internasional antara negara-negara Eropa, Jepang, Rusia, Amerika Serikat, Korea Selatan, RRC dan India. ITER dirancang untuk menghasilkan daya fusi sebesar 500 MW dipertahankan selama 1.000 detik, dengan Q lebih besar dari 5. Perakitan tokamaknya sendiri dijadwalkan dimulai tahun 2011 yang dibangun untuk menyelidiki efisiensi pembakaran termonuklir dan mekanisme pengendalian plasma. Jadi belum direncanakan untuk tujuan komersial untuk menghasilkan daya listrik. Proyek ITER lebih memfokuskan diri pada pembangunan superkonduktor terbesar di dunia, penguasaan teknologi *cryogenic*, pengembangan kerapatan tinggi, pembiakan tritium, pemanasan plasma, pengendalian jarak jauh, dan robotika. Reaktor fusi komersial diperkirakan baru beroperasi pada tahun 2050.

Selain itu para ahli tengah menempuh berbagai cara untuk menghasilkan reaksi nuklir fusi dingin (*cold fusion*) yaitu reaksi fusi yang terjadi pada suhu kamar. Pada tahun 1989, Martin Fleischmann dan Stanley Pons dari Universitas Utah melaporkan berhasil melakukan reaksi nuklir pada suhu kamar, yaitu terjadi pemanasan aneh pada sel elektrolitik selama proses elektrolisis air menggunakan elektrode palladium (Pd). Karena tidak terdapat penjelasan mengenai sumber, maka mereka membuat hipotesis bahwa panas berasal dari reaksi fusi nuklir deuterium. Laporan hasil mereka meningkatkan harapan adanya sumber energi murah. Akan tetapi sampai sekarang, eksperimen mereka tidak berhasil di reka ulang. Pada tahun 2004, Departemen Energi Amerika Serikat merekomendasikan pendanaan terhadap program energi rendah pada reaksi fusi nuklir, namun sejauh ini penelitian fusi dingin belum memberikan hasil yang menggembirakan. Kesimpulan kita masih banyak masalah yang harus dipecahkan para ilmuwan, sebelum reaktor fusi dapat beroperasi secara komersial. Sampai saat ini baru ada reaktor fisi yang dioperasikan secara komersial di seluruh dunia.

B.2. Reaktivitas Reaktor Nuklir

Reaktivitas adalah parameter yang digunakan untuk mengukur seberapa jauh pergeseran kekritisan suatu reaktor nuklir dari keadaan stabil atau keadaan operasi normal. Reaktivitas reaktor dapat dikendalikan dengan beberapa cara yaitu dengan menambah atau mengeluarkan bahan bakar

reaktor, menyisipkan masuk atau menarik keluar batang kendali dari teras reaktor, atau menambahkan bahan penyerap neutron dalam bejana reaktor. Reaktivitas selalu berhubungan dengan populasi neutron di dalam teras reaktor. Tingkat kestabilan reaksi fisi berantai di dalam teras reaktor disebut faktor multiplikasi neutron efektif (k):

$$k = \frac{\text{Populasi neutron pada satu generasi}}{\text{Populasi neutron generasi sebelumnya}}$$

Berdasarkan nilai faktor multiplikasi, ada 3 jenis keadaan teras reaktor, yaitu :

- a) $k > 1$: disebut keadaan superkritis, di mana populasi neutron terus bertambah secara eksponensial. Senjata nuklir dirancang untuk beroperasi pada keadaan ini.
- b) $k = 1$: disebut keadaan kritis, di mana populasi neutron dibuat tetap konstan. Reaktor nuklir beroperasi pada keadaan kritis kecuali jika akan menaikkan atau menurunkan tingkat daya reaktor.
- c) $k < 1$: disebut keadaan subkritis, di mana populasi neutron terus berkurang hingga reaktor padam karena reaksi fisi berantai tidak dapat dipertahankan.

Keadaan stabil tercapai bila $k = 1$. Dengan kata lain, reaktor yang kritis akan menghasilkan daya konstan karena jumlah populasi neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi dibuat berimbang dengan neutron yang hilang karena diserap bahan dan neutron yang bocor keluar teras reaktor. Jadi jumlah neutron dari satu generasi dibandingkan dengan neutron generasi sebelumnya adalah sama. Jika reaktor dalam keadaan subkritis di mana jumlah populasi neutron hasil reaksi fisi lebih kecil dari neutron yang hilang, sehingga populasi neutron terus berkurang secara eksponensial dan akhirnya reaktor padam. Reaktor superkritis maka neutron akan bertambah dengan cepat secara eksponensial dan jika tidak segera dihentikan maka dapat menimbulkan kecelakaan.

Ketika menggambarkan kinetika reaktor, dinamika reaktor dan keadaan operasi reaktor maka digunakan istilah reaktivitas (ρ) untuk memperlihatkan penyimpangan dari keadaan kritis ($k=1$):

$$\rho = \frac{k-1}{k}$$

Reaktivitas dapat dinyatakan dalam satuan persen (%), per mill (10^{-3}), pcm (10^{-5}), mk (milli k = 10^{-3}) atau dollar (\$). Dalam reaktor nuklir, nilai k beresilasi kecil dari sedikit kurang dari 1 ke sedikit lebih dari 1, terutama akibat pemanasan suhu bahan bakar yang menyebabkan pemuaihan dan mengurangi tampang lintang serap neutron. Reaktivitas negatif akibat pemanasan suhu bahan bakar harus dikompensasi dengan menarik batang

kendali sedikit demi sedikit keluar dari teras reaktor, sehingga reaktor menjadi kritis kembali. Terkait dengan tingkat kekritisan suatu reaktor, maka nilai ρ menyatakan sebagai berikut:

$$\rho = \begin{cases} \text{negatif, } k < 1, & \text{subkritis} \\ 0, & k = 1, \text{ kritis} \\ \text{positif, } k > 1, & \text{superkritis} \end{cases}$$

Kecelakaan reaktivitas (*Reactivity Initiated Accident*) adalah kecelakaan reaktor nuklir yang diakibatkan oleh terjadinya kenaikan laju reaksi fisi dan kenaikan daya reaktor yang tidak terkendali. Contohnya adalah kecelakaan PLTN Chernobyl pada 25 April 1986. Reaktor unit 4 direncanakan dipadamkan untuk perawatan rutin. Selama pemadaman berlangsung, teknisi akan melakukan pengujian kemampuan daya turbin agar sistem pendingin tetap bekerja sampai generator beroperasi kembali. Untuk mendapatkan hasil pengujian yang akurat, operator memilih mematikan beberapa sistem keselamatan, pilihan ini yang kemudian membawa malapetaka. Pada pertengahan pengujian, pemadaman harus ditunda selama sembilan jam akibat peningkatan permintaan daya di Kiev. Pada setiap reaktor nuklir, apabila reaktor selesai beroperasi atau tingkat dayanya diturunkan, maka di dalam batang bahan bakar akan terhimpun racun penyerap neutron, yaitu xenon (Xe-135) yang jumlahnya terus meningkat selama beberapa jam, dan setelah satu hari barulah jumlahnya akan menyusut. Jika reaktor dioperasikan kembali sebelum jumlah xenon menyusut maka timbul kesulitan untuk mengendalikan reaktor karena neutron akan diserap oleh racun Xe-135 .

Pada pukul 01.00 tanggal 26 April, daya reaktor menurun tajam, menyebabkan operator berusaha mengkompensasi rendahnya daya dengan menarik keluar semua batang kendali dan reaktor menjadi superkritis. Ketika pengujian dilakukan, hanya 8 batang kendali reaktor yang difungsikan, yang seharusnya 30 agar reaktor tetap terkendali. Ditambah lagi sistem pendingin darurat reaktor dimatikan. Kenaikan reaktivitas secara eksponensial, mengakibatkan kenaikan daya dan produksi panas secara berlebihan. Jika sistem keselamatan tetap aktif, maka reaktor segera dipadamkan (*shut-down*). Namun karena sistem pengaman tidak difungsikan maka terjadi akumulasi panas secara berlebihan yang mengakibatkan pelelehan kelongsong bahan bakar yang terbuat dari zirconium. Reaksi kimia antara zirconium dengan air pada suhu yang sangat tinggi, menyebabkan terjadinya ledakan hidrogen. Selain akibat kesalahan operator yang tidak mengikuti prosedur, kesalahan kedua adalah PLTN Chernobyl tidak dilengkapi dengan pengungkung sebagai salah satu syarat untuk menjamin keselamatan reaktor nuklir. Jika PLTN Chernobyl memiliki pengungkung maka pada waktu terjadi ledakan, zat radioaktif tetap di dalam pengungkung dan tidak akan ke luar menyebar ke mana-mana mengkontaminasi lingkungan.

Demikian pentingnya mengendalikan reaksi fisi berantai dalam suatu reaktor nuklir, maka reaktor nuklir harus didukung beberapa fasilitas yang disebut sebagai komponen reaktor, yaitu:

- Bahan bakar nuklir
- Moderator neutron
- Pendingin reaktor
- Batang kendali
- Reflektor
- Detektor
- Bejana dan perisai reaktor
- Penukar panas

B.3. Bahan Bakar Nuklir

Sampai saat ini baru ada reaktor fisi yang dioperasikan secara rutin di seluruh dunia, oleh karena itu yang disebut bahan bakar nuklir adalah semua jenis bahan yang digunakan untuk menghasilkan energi nuklir dari reaksi fisi. Terdapat dua jenis bahan bakar nuklir yaitu “bahan fisil” dan “bahan fertil”. Bahan fisil adalah suatu unsur atau atom yang langsung dapat memberikan reaksi pembelahan apabila unsur atau atom tersebut menangkap neutron, misalnya atom U-232, U-235, Pu-239, Pu-241. Sedangkan bahan fertil adalah suatu unsur atau atom yang setelah menangkap neutron tidak dapat langsung membelah, tetapi akan tereksitasi dan mengalami perubahan komposisi membentuk bahan fisil, misalnya U-238 dan Th-232. Jika U-238 menangkap neutron di dalam reaktor maka akan membiak menjadi Pu-239. Sedangkan Th-232 setelah menangkap neutron akan membiak menjadi U-233. Pada kenyataannya sebagian besar bahan bakar nuklir yang berada di alam adalah bahan fertil, sebagai contoh isotop uranium hanya 0,7% saja yang merupakan bahan fisil (U-235), selebihnya sebesar 99,3% adalah bahan fertil (U-238), sedangkan isotop thorium di alam 100% adalah bahan fertil Th-232. Hingga saat ini, bahan bakar nuklir yang umum digunakan adalah U-235 untuk reaktor termal dan Pu-239 untuk reaktor pembiak cepat.

Karena alasan fisis agar reaksi berantai dapat berlangsung secara berkelanjutan maka bahan bakar suatu reaktor dibuat dengan kadar isotop fisilnya lebih besar dari kondisinya di alam. Isotop yang demikian disebut sebagai isotop yang diperkaya. Namun agar uranium yang diperkaya tidak dapat digunakan sebagai bahan bom atom maka pengkayaan U-235 dibatasi hanya untuk pengkayaan rendah (*low enriched uranium*) yaitu sekitar 20% untuk bahan bakar reaktor riset, dan 3 – 5 % untuk bahan bakar PLTN. Akan tetapi ada yang langsung menggunakan uranium alam sebagai bahan bakarnya yaitu PLTN dengan moderator air berat (D_2O), seperti pada jenis

reaktor CANDU. Uranium adalah komoditas strategis. Penghasil bijih uranium terbesar di dunia adalah Kanada (28% produksi dunia) dan Australia (23%), kedua negara tersebut memasok lebih dari separuh jumlah kebutuhan uranium dunia. Sisanya dipasok dari Kazakhstan (16%), Rusia (8%), Niger (8%), Namibia (7%), Uzbekistan (6%), AS (6%), Ukraina (2%), RRC (2%) dan Afrika Selatan (1%). Proses daur bahan bakar nuklir dimulai dari penambangan bijih uranium, kemudian dilakukan pemurnian, konversi, pengayaan dan konversi ulang menjadi metal uranium. Metal uranium selanjutnya diubah menjadi bahan bakar nuklir melalui proses fabrikasi.

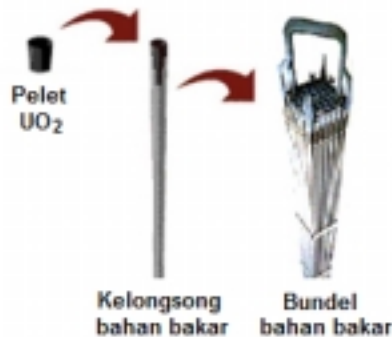


Gambar 2.15 – Proses fabrikasi bahan bakar nuklir

Bijih uranium dari pertambangan yang mengandung uranium dengan konsentrasi rendah digiling menjadi bubuk, direndam dalam larutan asam sulfat, disaring dan dikeringkan menjadi konsentrat uranium dalam bentuk bubuk kering berwarna kuning disebut “*yellow cake*”, yang mengandung unsur uranium U_3O_8 dengan kadar yang cukup tinggi, di samping masih mengandung unsur pengotor. Uranium alam biasanya dijual dalam bentuk *yellow cake*. Proses pemurnian dari unsur pengotor dilakukan dengan mengkonversi *yellow cake* menjadi metal uranium yaitu melalui proses pelarutan, pemurnian, re-ekstraksi dan pengendapan. Hasil endapan dikalsinasi-reduksi untuk mendapatkan U_3O_8 untuk proses pengayaan atau hasil endapan langsung dipanaskan dalam campuran argon/hidrogen pada suhu 700 C agar terbentuk UO_2 untuk bahan bakar reaktor CANDU. Sedangkan pada proses pengayaan, metal uranium U_3O_8 dikonversi menjadi senyawa uranium heksafluorida UF_6 yang berbentuk gas. Pengayaan uranium dilakukan untuk meningkatkan kadar U-235 pada gas UF_6 . Seperti sudah dibahas sebelumnya, proses pengayaan uranium adalah memisahkan isotop U-235 dari U-238 yang mempunyai sifat kimia sama, tetapi hanya berbeda massanya dimana U-235 lebih ringan 1,26%. Teknologi pemisahan uranium yang umum digunakan adalah metoda difusi gas dan metoda sentrifugal gas yang dilakukan secara bertingkat-tingkat.

Pabrik pengayaan uranium komersial hanya ada di AS, Rusia, Perancis, Inggris, Jerman dan Belanda. Pasar konversi uranium dari U_3O_8 menjadi UF_6 dikuasai oleh 5 perusahaan besar sebagai kartel negara-negara

nuklir untuk mengawasi dan mengendalikan penjualan uranium, dengan USEC (AS) dan MINATOM (Rusia) menguasai 75% cadangan UF_6 yang dilepas ke pasar internasional. Demikian juga industri pengkayaan uranium hanya dipasok oleh 4 perusahaan besar yaitu URENCO (Inggris, Jerman, Belanda), EURODIF (Perancis), MINATOM dan USEC. Perusahaan CNNC (China) dan JNFL (Jepang) juga melakukan pengkayaan, tetapi tidak melayani pasar internasional. USEC dan EURODIF menggunakan teknologi pengkayaan dengan difusi gas. MINATOM dan URENCO menggunakan teknologi pengkayaan dengan sentrifugal gas.

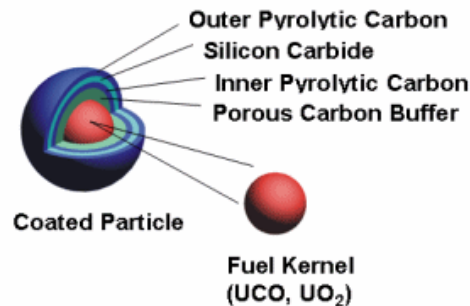


Gambar 2.16 – Perakitan bundel bahan bakar nuklir

Setelah proses pengkayaan maka dilakukan konversi balik yaitu mengubah UF_6 yang telah diperkaya rendah (*Low Enriched Uranium*) menjadi UO_2 dalam bentuk padatan berwarna hitam. Padatan UO_2 kemudian dicampur dengan pengikat organik dan dimampatkan menjadi pelet yang beratnya sekitar 10 gram akan tetapi menghasilkan energi sebanding dengan 30 ton batu bara atau 20.000 liter minyak. Selanjutnya pelet UO_2 dibakar dan menjalani proses sintering guna menghasilkan padatan dengan sedikit pori yang dimasukkan ke dalam kelongsong atau batang (*rod*) bahan bakar yang biasanya terbuat dari zirconium. Beberapa kelongsong bahan bakar kemudian disusun menjadi bundel bahan bakar. Bundel bahan bakar terdiri dari kelongsong bahan bakar yang dicampur dengan material struktural, bahan moderator atau bahan pemantul neutron. Proses ini disebut fabrikasi bahan bakar. Bundel bahan bakar kemudian dimasukkan ke dalam reaktor nuklir sebagai bahan agar terjadinya reaksi fisi berantai. Proses pembakaran (*burn-up*) dalam reaktor nuklir akan menghasilkan produk fisi dalam bahan bakar seperti lantanida, penyisipan produk fisi seperti palladium, pembentukan gelembung gas fisi seperti xenon dan kripton dan kerusakan bahan bakar akibat radiasi.

Konduktivitas panas uranium dioksida sangat rendah yang berimbas pada porositas dan nilai bakar. Bahan bakar biasanya dibuat dalam bentuk oksida atau paduan logam dan bahkan pada dasa warsa terakhir ini sudah

banyak dikembangkan dalam bentuk silisida. Contoh komposisi elemen bahan bakar yang banyak dipakai: UO_2 , U_3O_8 -Al, $UzrH$, U_3Si_2 -Al dan lain-lain. Tujuan utama bahan bakar nuklir dibuat dalam bentuk campuran panduan logam adalah agar diperoleh bahan bakar yang nilai bakarnya tinggi, titik lelehnya besar, penghantaran panasnya baik, tahan korosi, tidak mudah retak serta mampu menahan produk fisi yang terlepas. Akan tetapi jika uranium dioksida dicampur dengan thorium dioksida maka campuran tersebut akan meningkatkan konduktivitas panas, menambah umur pakai dan meningkatkan nilai bakar. Campuran bahan bakar UO_2 - ThO_2 juga mempunyai laju pelepasan gas fisi yang lebih rendah. Selain itu, thorium cukup banyak terdapat di alam dalam bentuk batuan mineral yang tercampur dalam batuan seperti torit, torianit, uranotorit dan sebagai monasit dalam granit. Kadar Thorium dalam batu-batuan tersebut berkisar antara 0,7 - 85% tergantung jenis batuannya. Monasit yang ditemui di pulau Bangka mempunyai kandungan thorium sekitar 3%.



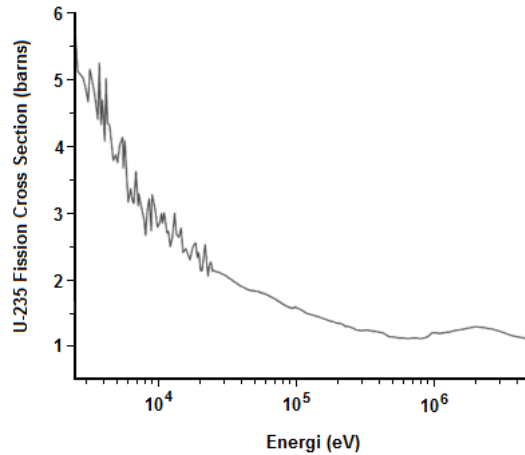
Gambar 2.17 –Bahan bakar nuklir jenis Triso

Bahan bakar reaktor generasi ke-empat seperti pada Reaktor Temperatur Tinggi (*High Temperature Reactor*) adalah lebih maju lagi yaitu berupa partikel-partikel kecil berbentuk bola dengan diameter sekitar 1 mm yang disebut TRISO (*tristructural-isotropic*). TRISO terdiri dari inti bahan bakar UCO , UO_2 atau campuran $UO_2 + ThO_2$ dengan pengkayaan 17% berbentuk bola dengan diameter sekitar 0,5 mm, dilapisi empat bahan pelapis. Lapisan pertama adalah bahan penyangga terbuat dari karbon berpori untuk menyerap gas-gas hasil fisi, dilanjutkan dengan lapisan kedua yaitu lapisan padat PyC (*pyrolytic carbon*), diikuti lapisan ketiga berupa keramik silikon karbon SiC (*silicon carbide*) untuk menahan produk-produk fisi yang dilepaskan pada suhu tinggi, dan terakhir sebagai lapisan terluar adalah lapisan padat PyC. Bahan bakar partikel TRISO dirancang tidak akan retak akibat tekanan pada suhu tinggi di atas 1600 derajat Celcius, sehingga bahan bakar ini aman digunakan karena tidak akan terjadi pelelehan bahan bakar walaupun pada skenario kecelakaan reaktor terburuk sekalipun.

B.4. Moderator Neutron

Moderator neutron adalah media yang digunakan untuk memperlambat kecepatan neutron, dari neutron cepat diubah menjadi neutron termal, agar reaksi fisi berantai dengan U-235 dapat terus berlangsung secara berkelanjutan. Seperti sudah dijelaskan sebelumnya bahwa dalam reaksi fisi, neutron yang dapat menyebabkan reaksi pembelahan adalah neutron termal. Neutron tersebut memiliki energi sekitar 0,025 eV pada suhu 27°C. Sementara neutron yang lahir dari reaksi pembelahan memiliki energi rata-rata 2 MeV, yang sangat jauh lebih besar dari energi termalnya, yang disebut neutron cepat. Moderasi adalah proses untuk mereduksi energi kinetik neutron yang bergerak bebas. Berdasarkan hukum kekekalan energi, pengurangan energi kinetik dilakukan dengan memindahkan energi gerak neutron ke bahan yang disebut moderator melalui proses tumbukan. Pengurangan energi kinetik berarti pengurangan kecepatan. Untuk menurunkan energi neutron dari 2 MeV ke 0,025 eV maka dibutuhkan rata-rata 18 kali tumbukan dengan atom hidrogen, 110 kali tumbukan dengan atom karbon dan 2100 kali tumbukan dengan U-238. Oleh karena itu syarat bahan moderator yang baik adalah atom dengan nomor massa kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar, tampang lintang serapan yang kecil, penghantar panas yang baik dan tidak korosif.

Bahan moderator yang umum digunakan di reaktor-reaktor yang beroperasi di dunia sekarang ini adalah: air ringan (75%), grafit (20%), air berat (5%). Air ringan (H_2O) digunakan sebagai moderator untuk uranium yang diperkaya, karena jika tidak neutron akan lebih banyak diserap U-238 yang fertil, dibandingkan bahan fisil U-235. Sedangkan air berat (D_2O) digunakan sebagai moderator pada reaktor CANDU yang menggunakan bahan bakar uranium alam. Jika menggunakan uranium alam, maka kadar kemurnian air berat sebagai moderator harus 99,75% yang tidak mudah untuk memprosesnya melalui metode elektrolisa berulang-ulang. Air berat sangat efektif untuk memperlambat neutron karena efisiensi moderasinya 75 kali lebih besar dari air ringan (*moderating ratio* $H_2O = 65$ sedangkan $D_2O = 4860$) Karbon dalam bentuk grafit atau karbon *pyrolytic* digunakan sebagai moderator pada reaktor RBMK dan reaktor *pebble-bed*. Oleh karena ditempatkan di bagian yang terpanas dalam teras reaktor, maka bahan moderator tidak korosif dan tidak boleh menguap. Selain itu moderator harus bebas dari pencemaran unsur-unsur penyerap neutron seperti boron.



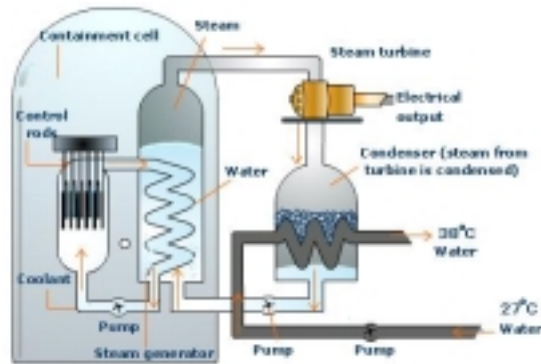
Gambar 2.18 – Penampang lintang fusi vs Energi

Pada reaktor generasi ke-empat digunakan moderator: berilium dalam bentuk metal yang penggunaannya terbatas karena harganya mahal dan beracun, Lithium-7 dalam bentuk garam florida yaitu campuran garam berium florida (FLiBe) digunakan sebagai moderator pada reaktor Molten Salt, dan uranium hibrida (UH₃) bentuk komposit logam uranium dengan hidrogen sebagai moderator reaktor jenis baru. Karbon *pyrolytic* yang digunakan sebagai moderator pada reaktor *pebble-bed* selain sederhana harganya pun murah. Bahan bakar nuklir dibungkus karbon *pyrolytic* dalam bentuk bulat, kira-kira seukuran bola tenis. Ruang antara bola berfungsi sebagai saluran. Reaktor beroperasi di bawah suhu pemanasan Wigner sehingga pada moderator karbon *pyrolytic* tidak terjadi akumulasi energi pemanasan Wigner akibat pergeseran struktur kristal karbon oleh bombardir neutron yang dapat menyebabkan terjadinya kebakaran.

B.5. Pendingin Reaktor

Pendingin reaktor adalah sarana pengangkut yang mengambil panas hasil fisi dari dalam elemen bakar untuk dipindahkan ke pembangkit listrik dalam suatu PLTN atau dibuang ke tempat lain atau ke lingkungan, sehingga tidak terjadi akumulasi panas yang berlebihan pada batang bahan bakar. Sesuai dengan fungsinya maka bahan yang baik sebagai pendingin adalah fluida yang koefisien perpindahan panasnya sangat baik. Persyaratan lain yang harus dipenuhi agar tidak mengganggu kelancaran proses fisi pada elemen bakar adalah pendingin juga harus memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, tampang lintang hamburan yang besar dan tidak korosif. Contoh fluida-fluida yang biasa dipakai sebagai pendingin adalah: H₂O, D₂O,

natrium cair, gas helium dan lain-lain Pada reaktor penelitian, yang diutamakan adalah pemanfaatan neutron hasil pembelahan untuk berbagai penelitian, iradiasi dan produksi radioisotop. Panas yang ditimbulkan dirancang sekecil mungkin, dan panas tersebut diangkut oleh fluida pendingin yaitu air ringan biasa, agar dapat dibuang ke tempat lain atau lingkungan. Agar tidak terjadi kontak langsung antara aliran pendingin yang terkontaminasi peluruhan radionuklida dengan lingkungan, maka pengambilan panas pada reaktor penelitian dilakukan dengan dua sistem pendingin terpisah, yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Pada sistem pendingin primer, panas yang berasal dari teras reaktor diangkut oleh air di sekitar teras dan dipompa oleh pompa primer menuju alat penukar panas (*heat exchanger*) yang terhubung ke sistem pendingin sekunder. Selanjutnya panas dari alat penukar panas dibuang ke lingkungan melalui menara pendingin oleh air dari sistem pendingin sekunder. Antara alat penukar panas, sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder tidak terjadi kontak langsung.



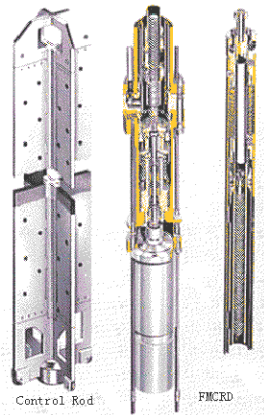
Gambar 2.16 – Sistem pendingin reaktor dua tingkat

PWR adalah jenis reaktor daya nuklir yang menggunakan air ringan biasa sebagai pendingin maupun moderator neutron. Pada PWR, panas yang timbul dari reaksi fisi dimanfaatkan untuk menghasilkan uap yang bersuhu dan bertekanan tinggi yaitu untuk memutar turbin pembangkit listrik. Oleh karena itu di sini tampak pentingnya alat penukar panas yang memungkinkan terjadinya perpindahan panas antara fluida secara efisien. Pada reaktor jenis PWR, aliran pendingin utama yang berada di teras reaktor bersuhu mencapai 325°C sehingga perlu diberi tekanan tertentu (sekitar 155 atm) oleh perangkat *pressurizer* agar air tidak dapat mendidih. Pemindah panas dilakukan oleh pembangkit uap yang akan memindahkan panas dari aliran pendingin primer ke aliran pendingin sekunder, yang kemudian mendidih menjadi uap dan menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik. Uap kemudian diembunkan di dalam kondenser dan dipompa kembali ke pembangkit uap sebagai aliran pendingin sekunder dan demikian seterusnya.

Pada reaktor BWR, uap yang digunakan untuk memutar turbin dihasilkan langsung oleh teras reaktor, sehingga hanya terdapat satu sirkuit aliran pendingin yang bertekanan rendah (sekitar 75 atm). Aliran pendingin tersebut dapat mencapai suhu 285°C dan mendidih di dalam teras menjadi uap. Uap yang dihasilkan mengalir menuju perangkat pemisah dan pengering uap yang terletak di atas teras kemudian menuju turbin-generator. Setelah menggerakkan turbin, lalu uap diembunkan di kondenser menjadi cairan pendingin, kemudian dipompa ke reaktor dan memulai siklus kembali seperti di atas. Cairan pendingin yang melalui teras reaktor akan mengalami kontaminasi oleh peluruhan radionuklida, maka turbin harus diberi perisai dan perlindungan radiasi sewaktu masa pemeliharaan. Kebanyakan zat radioaktif yang terdapat pada cairan pendingin berumur paro sangat singkat, misalnya N-16 dengan umur paro 7 detik, sehingga ruang turbin dapat dimasuki sesaat setelah reaktor dipadamkan.

B.6. Batang Kendali

Batang kendali berfungsi mengendalikan operasi reaktor dengan mengatur jumlah neutron yang menghasilkan fisi nuklir di dalam teras reaktor dapat sesuai dengan kondisi operasi yang dikehendaki. Selain hal tersebut, batang kendali juga berfungsi untuk memadamkan reaktor dan menghentikan reaksi fisi berantai. Sesuai dengan fungsinya, bahan batang kendali adalah material yang mempunyai tampang lintang serapan neutron yang sangat besar, dan tampang lintang hamburan yang kecil. Bahan seperti boron, cadmium dan gadolinium sering digunakan sebagai batang kendali karena efektif dalam menyerap neutron. Bahan-bahan tersebut biasanya dicampur dengan bahan lain agar diperoleh sifat yang tahan radiasi, titik leleh yang tinggi dan tidak korosif.



Gambar 2-17 – Batang kendali reaktor nuklir

Prinsip kerja pengaturan operasi adalah dengan jalan memasukkan dan mengeluarkan batang kendali ke dan dari teras reaktor. Batang kendali didesain sedemikian rupa agar secara otomatis dapat keluar-masuk teras reaktor. Jika jumlah neutron di dalam teras reaktor melebihi jumlah yang diizinkan (kondisi superkritis), maka batang kendali dimasukkan ke dalam teras reaktor untuk menyerap sebagian neutron agar tercapai kondisi kritis. Jika batang kendali dimasukkan, maka sebagian besar neutron akan diserap, yang berarti populasi neutron di dalam reaktor akan berkurang dan kemudian padam. Batang kendali akan dikeluarkan dari teras reaktor jika jumlah neutron di bawah kondisi kritis (subkritis), untuk mengembalikan reaktor ke kondisi kritis yang diizinkan. Pertambahan atau penurunan populasi neutron berkait langsung dengan perubahan daya reaktor.

B.7. Reflektor Neutron

Neutron yang keluar dari pembelahan bahan fisil, berjalan dengan kecepatan tinggi ke segala arah. Karena sifatnya yang tidak bermuatan listrik maka gerakannya bebas menembus medium dan tidak berkurang bila tidak menumbuk suatu inti atom medium. Karena sifat tersebut, sebagian neutron dapat lolos keluar teras reaktor, atau hilang dari sistem. Keadaan ini secara ekonomi berarti kerugian, karena neutron tersebut tidak dapat digunakan untuk proses fisi berikutnya. Untuk mengurangi kejadian ini, maka sekeliling teras reaktor dipasang bahan pemantul neutron yang disebut reflektor, sehingga neutron-neutron yang lolos akan bertahan dan dikembalikan ke dalam teras untuk dimanfaatkan lagi pada proses fisi berikutnya.

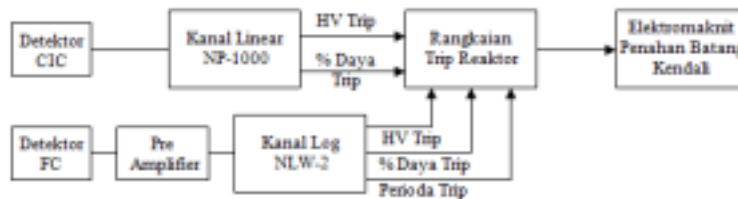


Gambar 2.18 – Reflektor neutron sekeliling kolam reaktor

Bahan-bahan reflektor yang baik adalah unsur-unsur yang mempunyaiampang lintang hamburan neutron yang besar, dan tampang lintang serapan yang sekecil mungkin, serta tidak korosif. Bahan-bahan yang sering digunakan antara lain: berilium, grafit, parafin, air, D₂O. Bahan grafit yang telah diproses menjadi karbon *pyrolitic* telah digunakan sebagai reflektor dan bahan moderator pada Reaktor Temperatur Tinggi. Sifat intrinsik bahan ini sangat mendukung untuk persyaratan sebagai komponen moderator dan reflektor reaktor termal pada temperatur tinggi. Sifat-sifat tersebut antara lain: tampang lintang absorpsi neutron relatif rendah ($\sigma_a=0,0853$ barns), tampang lintang hamburan neutron tinggi ($\sigma_s=4.800$ barns), kekuatan mekanik yang baik pada temperatur tinggi ($\rho=140$ kg/cm³) dan sifat termal yang baik pada temperatur tinggi.

B.8. Detektor

Detektor adalah komponen penunjang yang mutlak diperlukan di dalam reaktor nuklir karena perangkat ini merupakan indera pendeteksi bagi sistem keselamatan reaktor (*reactor safety system*). Sistem keselamatan reaktor atau disebut juga sistem proteksi reaktor direalisasi secara *hardwired*, yaitu pada bagian pengukuran parameter, bagian pengambilan keputusan dan bagian aktuasi tindak keselamatan. Parameter keselamatan yang dipertimbangkan adalah : daya reaktor, periode reaktor, keberadaan sumber neutron standar di dalam teras dan tegangan tinggi detektor FC (*Fission Chamber*). Semua informasi tentang kejadian fisis di dalam teras reaktor, yang meliputi populasi neutron, laju pembelahan, suhu dan lain-lain hanya dapat dilihat melalui detektor yang dipasang di dalam teras.



Gambar 2.19 – Bagan detektor sistem keselamatan reaktor

Daya reaktor diukur secara tidak langsung yaitu melalui pengukuran besaran fluks neutron rata-rata yang sebanding dengan daya. Fluks neutron rata-rata diukur dengan detektor CIC (*Compensated Ionization Chamber*) melalui kanal daya penguat linier. Monitor daya dari tingkat aras sumber neutron (*neutron source level*) hingga daya operasi diukur oleh dua unit kanal daya logaritmis/kanal daya jangkau lebar (*wide range power channel*) yang merupakan sistem *hardwired* analog berbasis mikroprosesor. Kedua kanal daya logaritmis tersebut dihubungkan dengan detektor neutron FC sebagai sistem pencacah dan sistem campbell.

Parameter keselamatan ditampilkan secara kontinu oleh panel indikator daya reaktor secara *hardwired* dengan meter analog. Penampilan parameter keselamatan dilakukan juga secara grafik pada layar monitor komputer pembantu yang menampilkan juga kendali daya dan posisi batang kendali. Hasil ukur parameter keselamatan tersebut dipantau oleh sistem *hardwired* dalam kanal daya jangkauan lebar dan kanal daya linear untuk mengetahui apakah besarnya melampaui besaran yang ditetapkan. Jika besaran tersebut dilampaui maka sistem keselamatan akan mengaktifkan sistem trip reaktor.

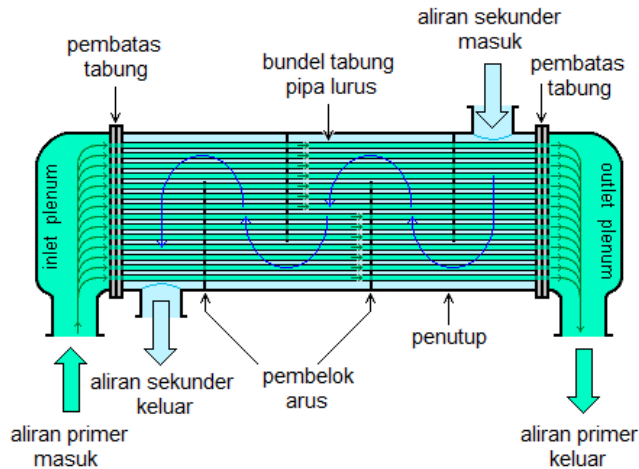
B.9. Bejana dan Perisai Reaktor

Bejana atau tangki reaktor berfungsi untuk menampung fluida pendingin agar teras reaktor selalu terendam di dalamnya. Bejana tersebut selain harus kuat menahan beban, maka harus pula tidak korosif bila berinteraksi dengan pendingin atau benda lain di dalam teras. Bahan yang bisa digunakan adalah: aluminium dan *stainless steel*.

Perisai reaktor berfungsi untuk menahan radiasi yang lolos dari teras reaktor agar tidak menerobos keluar sistem reaktor yang dapat membahayakan lingkungan. Karena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat potensial, maka diperlukan suatu sistem perisai yang dibuat mengelilingi teras reaktor. Pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat. Beton diketahui sangat efektif menyerap radiasi dan menahan zat radioaktif sehingga digunakan sebagai bahan perisai.

B.10. Penukar Panas

Penukar panas (*heat exchanger*) adalah suatu alat yang memungkinkan terjadinya perpindahan panas antara fluida secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak antara fluida, baik terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung. Akan tetapi untuk pendingin reaktor nuklir harus ada pemisah yaitu antara fluida pendingin primer yang langsung berhubungan dengan zat radioaktif dengan fluida pendingin yang lain (sekunder) yang berasal dari lingkungan alam sekitar. Perangkat penukar panas merupakan komponen penunjang yang berfungsi sebagai sarana pengalihan panas dari pendingin primer, yang menerima panas dari bahan bakar nuklir, untuk diberikan pada fluida pendingin sekunder. Dengan sistem pengambilan panas tersebut maka integritas komponen teras akan selalu terjamin. Pada jenis reaktor tertentu, terutama jenis PLTN, penukar panas juga berfungsi sebagai fasilitas pembangkit uap.

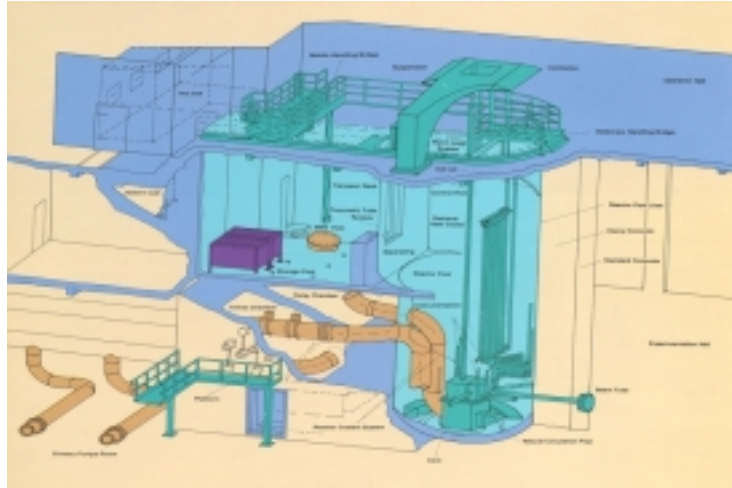


Gambar 2.20 – Bagan perangkat penukar panas

C. Reaktor Riset Serba Guna G.A. Siwabessy

Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy (RSG-GAS) adalah reaktor riset yang menggunakan air ringan sebagai pendingin dan moderator yang mampu menghasilkan daya termal 30 MW dan fluks neutron cukup tinggi ($2,5 \times 10^{14}$ n/cm²s), sehingga sangat sesuai sebagai sarana iradiasi untuk produksi radio isotop, pengembangan elemen bakar dan komponen reaktor, penelitian dalam bidang sains materi dan berbagai litbang lain dalam bidang industri nuklir. RSG-GAS dirancang dan dibangun oleh Interatom GmbH dari Republik Federasi Jerman. Bangunan sipil dan prasarana fisik dikerjakan oleh kontraktor dalam negeri. Pembangunan reaktor serba guna berlangsung sekitar empat tahun, yaitu sejak tahap dimulainya pembangunan gedung pada bulan Mei 1983 sampai reaktor mulai beroperasi pada bulan Agustus 1987. Reaktor mencapai kritis pertama pada bulan Juli 1987 dan kemudian RSG-GAS diresmikan oleh presiden RI pada tanggal 20 Agustus 1987. Akhirnya pada bulan Maret 1992 dicapai operasi reaktor pada daya penuh 30 MW.

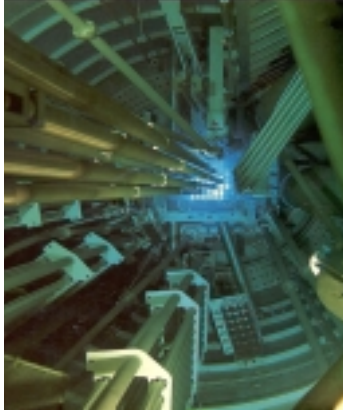
RSG-GAS merupakan peralatan utama BATAN dalam melaksanakan litbang dan pemanfaatan iptek nuklir di Indonesia. Bagian terpenting dari RSG-GAS terdiri dari: (1) kolam dan teras reaktor; (2) fasilitas eksperimen, (3) sistem instrumentasi & kendali reaktor; (4) sistem pendingin reaktor; dan (5) peralatan monitor radiasi.



Gambar 2.21 – Bagan reaktor riset RSG-GAS

C.1. Kolam dan Teras Reaktor

Reaktor serba guna merupakan reaktor jenis kolam, dengan teras reaktor yang terdiri dari 40 perangkat elemen bahan nuklir, 8 perangkat elemen kendali, beberapa tempat iradiasi dan elemen reflektor. Kesemuanya ini tersusun dalam matriks 10 x 10 larikan. Perangkat elemen bakar reaktor serba guna terdiri dari 21 pelat elemen bakar yang disusun membentuk satu perangkat. Masing-masing pelat mengandung bahan bakar uranium dalam bentuk uranium oksida (U_3O_8Al) dengan kerapatan $2,96 \text{ g/cm}^3$ dan pengkayaan U-235 sebesar 19,75 %, termasuk kategori bahan bakar uranium pengkayaan rendah. Supaya fluks neutron mencapai optimum, teras reaktor dikelilingi oleh 2 blok berilium dan beberapa larikan elemen berilium sebagai reflektor. Pada blok berilium bermuara 6 tabung berkas neutron (*beam tubes*). Pada konfigurasi teras seperti ini reaktor serba guna dapat mencapai tingkat daya sebesar 30 MW termal dan fluks neutron termal pada fasilitas iradiasi sebesar $2,5 \times 10^{14} \text{ neutron/cm}^2\text{s}$.



Gambar 2.22 – Kolam air dan radiasi Cerenkov

C.2. Fasilitas Eksperimen

Untuk mengoptimalkan pemanfaatan RSG-GAS, maka disediakan fasilitas eksperimen sebagai berikut:

- Fasilitas iradiasi untuk produksi radioisotop bagi keperluan medis, industri dan litbang lainnya.
- Fasilitas eksperimen berkas neutron untuk pengembangan ilmu bahan (SANS, HRSANS, Powder diffractometer, dll.).
- Fasilitas Analisis Pengaktifan Neutron (NAA) untuk mendukung pengukuran pencemaran lingkungan (udara, air sungai dll.).

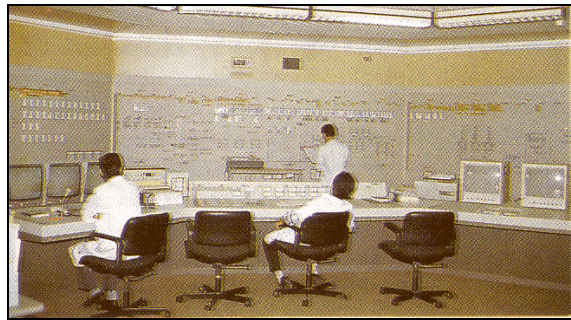
C.3. Sistem Instrumentasi & Kendali Reaktor

Sistem Instrumentasi dan Kendali RSG-GAS terdiri dari bagian-bagian yang dapat diklasifikasikan dalam tiga kelompok:

1. Sistem keselamatan reaktor (*reactor safety system*);
2. Sistem kendali dan pemantauan daya reaktor (*non-safety related system*);
3. Sistem informasi proses (*process information system*).

Sistem keselamatan reaktor atau disebut juga sistem proteksi reaktor direalisasi secara *hardwired*, yaitu pada bagian pengukuran parameter, bagian pengambilan keputusan dan bagian aktuasi tindak keselamatan. Parameter keselamatan yang dipertimbangkan adalah: daya reaktor, periode

reaktor, keberadaan sumber neutron standar di dalam teras dan tegangan tinggi detektor FC (*Fission Chamber*).



Gambar 2.23 - Ruang kendali utama RSG-GAS

Sistem kendali dan pemantauan disusun secara modular menggunakan PLC (*Programmable Logic Controllers*) SIMATIC S5 sehingga memudahkan untuk pengembangan dan perawatannya. PLC merupakan sistem digital yang dirancang untuk keperluan pengendalian suatu proses yang bekerja secara otomatis seperti pada *primary cooling system, primary purification & warm water layer system, control rod system & reactor closed-loop control*.

C.4. Sistem Pendingin

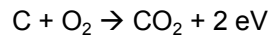
Sistem pendingin reaktor dirancang untuk membuang panas yang timbul di dalam teras reaktor sebagai akibat terjadinya reaksi fisi. Dengan adanya sistem pendingin reaktor, suhu di dalam teras dan reflektor dijamin aman dan tidak membahayakan reaktor. Panas yang dilepas di dalam teras dan reflektor diambil oleh sistem pendingin primer dan kemudian dipindahkan ke sistem pendingin sekunder dengan melewati penukar panas (*heat exchanger*). Selanjutnya panas dibuang ke atmosfer lingkungan dengan menggunakan menara pendingin yang terdapat pada sistem pendingin sekunder. Untuk menjaga kondisi air pendingin primer, sistem ini dilengkapi dengan sistem purifikasi atau pemurnian air.

C.5. Peralatan Monitor Radiasi

RAS-GAS dilengkapi peralatan monitor radiasi yaitu *Beta aerosol monitoring system* dan *Alpha beta aerosol monitoring system* menggunakan PLC yang dibuat Prof. Dr. Berthold (Germany) yang dilengkapi *Real Time Clock* dan sistem penanggalan.

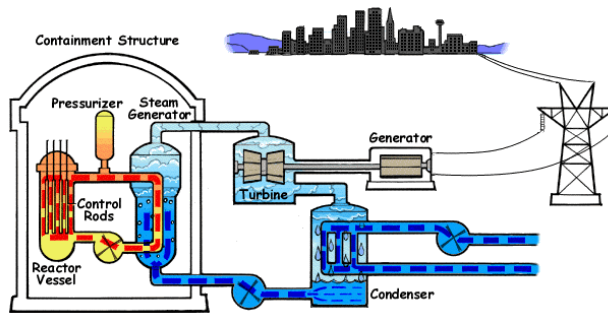
D. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) bekerja tidak ubahnya seperti prinsip kerja dari sebuah pembangkit listrik tenaga uap yang memanfaatkan pembakaran minyak, gas alam atau batubara untuk memanaskan air menjadi uap. Perbedaan utama antara PLTN dengan Pembangkit listrik konvensional adalah terletak pada penggunaan bahan bakar yang akan menghasilkan panas. Kebanyakan PLTN saat ini menggunakan uranium sebagai bahan bakar dan menghasilkan panas akibat reaksi fisi berantai. Sedangkan pembakaran bahan bakar fosil dilakukan melalui reaksi kimia. Energi yang dihasilkan dari pembakaran batubara, dapat dituliskan sebagai berikut:



Energi yang dilepas adalah 2 eV dalam bentuk energi kinetik CO_2 yang relatif kecil dibandingkan hasil reaksi fisi. Sebagai perbandingan, dalam 1 gram U-235 terdapat $25,6 \times 10^{20}$ atom. Setiap atom dalam reaksi fisi melepaskan energi sebesar 200 MeV, sehingga 1 gram ^{235}U dapat melepaskan energi sebesar $51,2 \times 10^{22}$ MeV atau $81,92 \times 10^9$ Joule ($1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$). Secara teoritis energi panas yang dikeluarkan dari reaksi pembelahan 1 kg U-235 setara dengan energi pembakaran 2400 ton batubara. Selain itu dalam pengoperasiannya, pembangkit listrik berbahan bakar fosil menghasilkan polutan dan gas CO_2 , SO_2 atau NO_x yang dapat menimbulkan hujan asam dan peningkatan pemanasan global. Sedangkan PLTN dianggap ramah lingkungan karena tidak membebaskan asap atau debu yang mengandung logam berat yang dibuang ke lingkungan.

Enrico Fermi untuk pertama kalinya, pada tanggal 2 Desember 1942, berhasil mendemonstrasikan reaksi fisi nuklir berantai yang merupakan cikal bakal reaktor nuklir. Dua tahun kemudian, reaktor nuklir skala besar pertama di dunia dibangun di Hanford, Washington, Amerika Serikat, yang digunakan untuk keperluan militer yaitu memproduksi Pu-239 sebagai bahan peledak bom atom, sedangkan daya termal yang dihasilkan berupa energi panas tidak digunakan. Pada tanggal 20 Desember 1951, berhasil dibangkitkan listrik pertama dari energi nuklir dari prototipe reaktor nuklir daya pertama di dunia dibangun di Argonne National Laboratory, Chicago, Amerika Serikat, dengan nama Experimental Breeder Reactor 1 (EBR1) yang saat itu berhasil menyalakan empat buah bola lampu. Reaktor ini dibangun untuk membuktikan bahwa pembiakan bahan bakar nuklir dapat dilaksanakan dengan memakai plutonium sebagai bahan bakar. PLTN pertama dibangun di Obninsk, Rusia dan mulai beroperasi pada tanggal 17 Juni 1954 dengan kapasitas 5 MW dengan disain yang mirip dengan tipe RBMK yang ada di Chernobyl.



Gambar 2.24 – Bagan PLTN jenis PWR

PLTN Shippingport di Amerika Serikat yang mulai beroperasi pada bulan Desember 1957 adalah jenis Reaktor Air Tekan (PWR - *Pressurized Water Reactor*) berdaya besar yang semata-mata dibangun untuk tujuan komersial. Pada mulanya jenis reaktor PWR dikembangkan untuk penggerak kapal selam oleh perusahaan Westinghouse dan laboratorium pemerintah Amerika Serikat (*Oak Ridge National Laboratory*). Nautilus adalah salah satu produk kapal selam bertenaga nuklir jenis PWR yang beroperasi dari tahun 1954 sampai tahun 1980. Berbekal keberhasilan membuat reaktor untuk kapal selam, perusahaan Westinghouse kemudian membangun PLTN Shippingport untuk pembangkitan listrik di pelabuhan dengan daya 100 MWe. PWR adalah reaktor daya yang paling banyak digunakan di dunia dewasa ini. Menurut data IAEA Agustus 2007, dari 438 PLTN yang ada saat ini sebanyak 265 (60,5%) adalah dari jenis PWR, kemudian baru jenis lainnya seperti Reaktor Air Didih (*boiling water reactor*) dan kemudian Reaktor Air Berat (*heavy water reactor*).

Sesuai bagan PLTN jenis PWR di atas, PLTN terdiri dari dua bagian: (1) Sistem pemasok uap nuklir (*nuclear steam supply system*); dan (2) Instalasi pendukung (*balance of plant*) di mana terdapat turbin uap dan generator. Dalam sistem pemasok uap nuklir terdapat bejana reaktor (*reactor vessel*) dan pembangkit uap (*steam generator*). Sistem pemasok ini juga dilengkapi dengan alat pengontrol tekanan (*pressurizer*) yang dipakai untuk mempertahankan tekanan sistem pendingin primer. PWR memanfaatkan prinsip sistem siklus tertutup yaitu terdapat konstruksi sistem pendinginan primer (siklus reaktor) dan sistem pendingin sekunder (siklus uap) yang terpisah. Ini berarti bahwa bahan pendingin dalam siklus reaktor yang bersifat radioaktif dipisahkan dari siklus uap di turbin-generator. Tujuannya adalah untuk lebih mengungkung material radioaktif agar tidak menyebar keluar dari reaktor. Listrik yang dibangkitkan oleh turbin uap dan generator adalah listrik tiga fasa. Melalui transformator penaik tegangan, energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban. Kondensor berfungsi untuk mengembunkan dan mengembalikan uap yang sudah dipakai penggerak turbin ke bentuk fase cair.

Pompa aliran pendingin (*coolant pumps*) digunakan untuk sirkulasi sistem pendingin primer maupun sistem pendingin sekunder. Seperti sudah kita ketahui, energi yang dihasilkan dari reaksi fisi dalam teras reaktor dipakai untuk memanaskan air pendingin primer. Pada sistem primer, air tidak diperbolehkan mendidih dengan cara memberi tekanan yang cukup tinggi (157 kg/cm^2). Dengan bantuan pompa pendingin primer, air pendingin bertekanan tinggi dan bertemperatur tinggi ($325 \text{ }^\circ\text{C}$) dari sistem primer dialirkan ke pipa-pipa dalam alat pembangkit uap. Setelah melepaskan energi panasnya pada pembangkit uap, air ini kemudian dialirkan kembali ke bejana reaktor. Pada pembangkit uap, panas dialihkan ke pendingin sistem sekunder sehingga sistem sekunder berubah dari fase cair menjadi uap. Temperatur uap di sistem sekunder pada saat reaktor beroperasi adalah 280°C dan tekanannya 62 kg/cm^2 . Uap yang dihasilkan dari sistem pendingin sekunder selanjutnya dialirkan untuk menggerakkan turbin. Perputaran turbin akan menggerakkan dinamo generator untuk membangkitkan listrik.

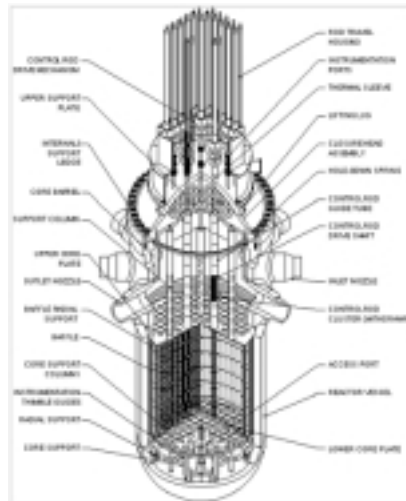
Uap panas yang ada di ruang turbin kemudian dialirkan ke kondenser untuk diembunkan menjadi bentuk cair dan selanjutnya air hasil kondensasi dialirkan kembali ke pembangkit uap dengan bantuan pompa sekunder. Sistem instalasi pendukung berfungsi memindahkan panas dan mengubah sebagian panas menjadi usaha mekanis untuk menggerakkan turbin berdasarkan perbedaan temperatur. Demikian seterusnya listrik dibangkitkan oleh panas yang dihasilkan selama masih ada reaksi fisi nuklir antara uranium dengan neutron. Sistem pendinginan untuk proses kondensasi uap panas dilakukan dengan mengalirkan air pendingin pada kondensor yang dapat diambil dari air sungai atau air laut. Air pendingin ini bersirkulasi dalam sistem pendingin sekunder yang sama sekali tidak berinteraksi dengan zat radioaktif, sehingga tetap aman bagi lingkungan ketika dilepas keluar. Untuk menjaga agar tidak terjadi pemanasan yang berlebihan dari air sungai atau air laut maka dibangun menara pendingin (*cooling tower*) pada bangunan PLTN.

D.1. Bejana Reaktor

Teras reaktor diletakkan dalam bejana terbuat dari *stainless steel* yang berfungsi untuk menampung cairan pendingin agar teras reaktor selalu terendam di dalamnya. Di dalam reaktor disusun gabungan perangkat bahan bakar dan batang kendali dalam bentuk kluster. Pada bagian atas teras terdapat pengarah dan penggerak batang kendali. Di sekitar teras terdapat bafel teras dan perisai termal teras. PWR menggunakan air sebagai pendingin sekaligus moderator. Air banyak digunakan sebagai moderator karena neutron akan kehilangan sebagian energinya saat bertumbukan dengan molekul-molekul air. Selain mempunyai kemampuan memoderasi neutron yang baik, air juga digunakan sebagai pendingin. Dengan digunakannya air sebagai moderator dan pendingin maka ukuran teras reaktor menjadi lebih kecil. Inilah yang menyebabkan reaktor air ringan lebih

kecil dan kompak apabila dibandingkan dengan reaktor jenis gas dan reaktor jenis air berat.

Sebagai contoh adalah perangkat bahan bakar dengan penampang lintang bujur sangkar yang terdiri dari susunan 17×17 (= 289) batang bahan bakar. Dalam bejana reaktor terdapat 1 buah teras reaktor, 24 buah pengarah bahan batang kendali dan 9 buah kisi. Pada bagian atas dan bagian bawah teras terdapat nosel. Batang bahan bakar terbuat dari pelet uranium oksida dengan pengayaan rendah hasil proses sinter. Pelet bahan bakar dimasukkan ke dalam kelongsong zirkalloy-4. Kedua ujung kelongsong ditutup dengan tutup zirkalloy-4 yang dilas. Pada bagian atas di dalam kelongsong dipasang per penekan yang terbuat dari stainless-steel. Bagian di dalam kelongsong bahan bakar diisi gas helium. Pada batang bahan bakar ini terdapat ruang pada bagian atas yang disebut plenum. Di antara pelet bahan bakar dan kelongsong terdapat celah, dengan demikian hasil-hasil reaksi fisi yang berbentuk gas yang keluar dari pelet bahan bakar uranium dapat tertampung pada dua ruang tersebut (plenum dan celah). Selain untuk menampung gas hasil fisi, kedua ruang tersebut dirancang untuk dapat mengakomodasi pemuaian logam maupun gas yang akan menghasilkan kenaikan tekanan.



Gambar 2.25 – Konstruksi bejana tekan PWR

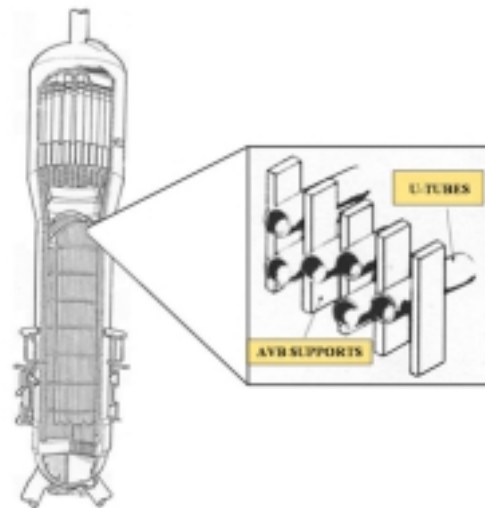
D.2. Pembangkit Uap

Pembangkit uap adalah penukar panas yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap oleh panas yang dihasilkan dari teras reaktor. Pada PLTN jenis PWR, pembangkit uap ditempatkan antara sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Perpindahan panas terjadi dengan

disertai perubahan fase di sistem pendingin sekunder, dari fase cair menjadi fase gas (uap/steam), yang selanjutnya uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin. Sedangkan pada sistem pendingin primer tidak terjadi perubahan fase yaitu tetap pada fase cair. Pembangkit uap dibagi atas dua jenis yaitu: Pembangkit uap sekali-lewat (*once-through steam generator*) dan Pembangkit uap tabung U (*U-Tube steam generator*). Pembangkit uap tabung U berisi 3.000 sampai 16.000 tabung, sehingga tinggi pembangkit uap PLTN komersial dapat mencapai 21 meter dan beratnya antara 650 sampai 800 ton.

Mekanisme perubahan fase sistem pendingin primer ketika melalui tabung-tabung aliran pada pembangkit uap dapat dibagi menjadi tiga kelompok:

1. Aliran cairan fase tunggal (*single phase liquid*);
2. Aliran campuran dua fase (*liquid vapor mixture*);
3. Aliran uap fase tunggal (*single phase vapor*).



Gambar 2.26 - Pembangkit uap jenis Tabung U

Jenis pembangkit uap tabung U, seperti yang ditunjukkan pada gambar 26, terdiri dari dua buah bagian yang tergabung dengan suatu bagian *evaporator* dan sebuah bagian drum uap (*steam drum*). Bagian *evaporator* terdiri dari alat penukar panas (*heat exchanger*), sementara bagian drum uap menyimpan peralatan pemisah kelembaban (*moisture separators*). Bagian drum uap terletak pada bagian atas dari pembangkit uap. Air pendingin reaktor mengalir masuk ke dalam *channel head*, melalui *Inconel tabung U* dan kembali ke *channel head*. Sebuah pelat penyekat membelah *channel head* menjadi bagian-bagian *inlet* dan *outlet*. Sebuah lubang akses untuk inspeksi

dan pemeliharaan tersedia dalam masing-masing bagian dari *channel head*. Tabung tersebut disangga silih berganti oleh pelat-pelat pendukung horizontal yang ditempatkan untuk memungkinkan aliran campuran uap dan air.

Aliran air diumpun secara langsung masuk ke dalam bagian *preheater* dan dipanasi hingga hampir mencapai suhu jenuh sebelum memasuki bagian *boiler* dekat bagian atas *preheater*. Campuran air dan uap mengalir ke arah atas melalui kumpulan tabung dan masuk ke dalam drum uap. Alat pemisah kelembaban meresirkulasikan aliran melalui *annulus* yang terbentuk oleh inti dan pembungkus kumpulan tabung. Air yang diresirkulasikan tersebut juga mengalir melalui ruang di bawah bagian *preheater* yang tersedia untuk mengisolasi penutup tabung dari air umpan yang lebih dingin.

Pada sistem pembangkit uap PLTN PWR yang menggunakan pengolah air sekunder (*secondary water treatment*), terjadi peningkatan konsentrasi Natrium Fosfat secara terlokalisir di daerah sekitar pipa perpindahan panas yang dapat mengakibatkan korosi pada pipa tersebut. Hal ini menyebabkan terjadinya masalah perembesan air pendingin primer ke air sekunder. Antisipasi biasanya dilakukan dengan memberikan bahan kimia bersifat volatil (seperti hidrasin) ke dalam air sistem pendingin sekunder pada pembangkit uap. Untuk itu diperlukan pengujian keandalan pembangkit uap setelah dilakukannya antisipasi tersebut.

D.3. Sistem Pengontrol Tekanan

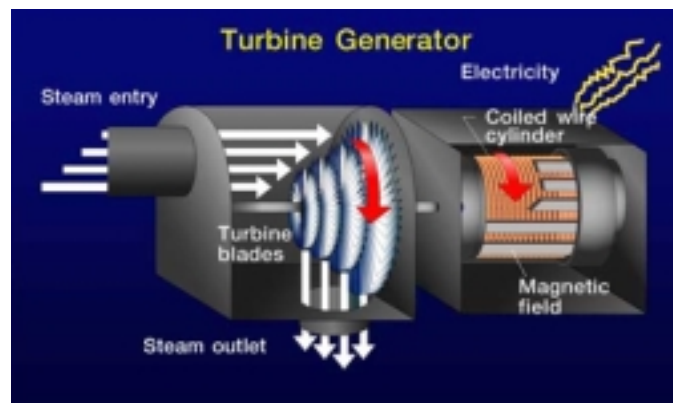
Sistem pengontrol tekanan (*pressurizer*) dipakai untuk mempertahankan tekanan sistem pendingin primer. Sistem ini terdiri atas sebuah tangki yang dilengkapi dengan pemanas listrik dan penyemprot air. Jika tekanan dalam teras reaktor berkurang, pemanas listrik akan memanaskan air yang terdapat di dalam tangki pengontrol tekanan sehingga terbentuklah uap tambahan yang akan menaikkan tekanan dalam sistem pendingin primer. Sebaliknya apabila tekanan dalam sistem pendingin primer bertambah, maka sistem penyemprot air akan mengembunkan sebagian uap sehingga tekanan uap berkurang dan sistem pendingin primer akan kembali ke keadaan semula. Tekanan pada sistem pendingin primer dipertahankan pada posisi 150 atm untuk mencegah agar air pendingin primer tidak mendidih pada suhu sekitar 300 derajat Celcius. Pada tekanan udara normal, air akan mendidih dan menguap pada suhu 100 derajat Celcius.

D.4. Turbin dan Generator

Seluruh pembangkit listrik menggunakan turbin untuk menggerakkan generator. Fungsi turbin adalah mengubah energi uap tekanan tinggi menjadi

energi mekanik dalam bentuk putaran poros dari rotor turbin. Perubahan dilakukan dalam dua tahap yaitu pertama pada bagian yang kecil untuk turbin tekanan tinggi dan setelah melalui pemisah kelembaban yang kedua adalah pada bagian lebih besar untuk turbin tekanan rendah. Sistem pendukung turbin berfungsi untuk mengendalikan jumlah uap yang dimasukkan ke dalam turbin, menjaga uap tetap di dalam turbin dan menjaga turbin terhadap kesalahan mekanik maupun elektrik. Sistem ini dilengkapi keran hidrolik untuk mengatur jumlah uap yang masuk ke turbin yang diawali keran penutup kemudian keran pengatur. Keseimbangan antara massa uap yang melewati turbin dan masa uap pada pembangkit uap dihitung berdasar proses siklus Rankine yang dapat dihitung menggunakan program komputer.

Oleh karena poros turbin digandeng dengan poros generator akibatnya gerakan turbin itu akan menyebabkan pula gerakan generator. Generator berfungsi mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Proses pembangkitan listrik pada generator menggunakan prinsip induksi elektromagnetik yang diperkenalkan oleh Michael Faraday tahun 1831 yaitu apabila terjadi perpotongan medan magnet dengan penghantar, maka pada penghantar akan timbul gaya gerak listrik. Di sini putaran mekanik dari turbin diubah menjadi listrik arus bolak-balik oleh generator. Bagian utama generator adalah magnet permanen dan kumparan yang diputar oleh rotor turbin sehingga menyebabkan perubahan garis gaya magnet. Karena dihubungkan dengan cincin geser maka perputaran kumparan menimbulkan gaya gerak listrik induksi yang dapat diperbesar dengan cara memperbanyak lilitan kumparan. Proses ini dikenal sebagai pembangkit listrik.



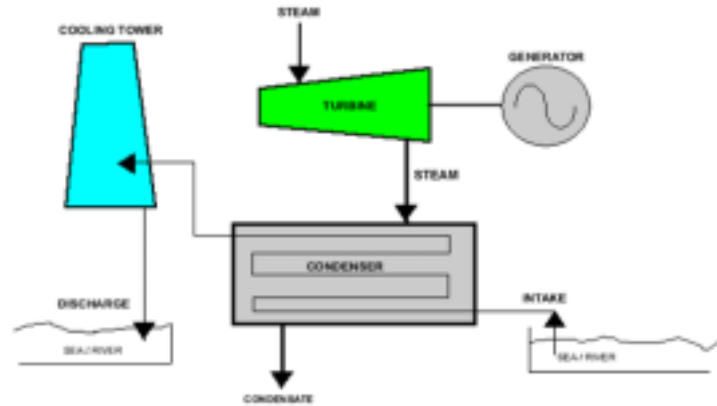
Gambar 2.27 – Turbin uap dan generator pembangkit listrik

Listrik yang dibangkitkan oleh generator adalah listrik tiga fasa dengan tegangan antara 6-20 kV. Dengan bantuan transformator penaik tegangan (*step-up transformer*) tegangan tersebut dinaikkan menjadi 150-500 kV. Energi listrik ini kemudian dikirimkan melalui saluran transmisi

bertegangan tinggi menuju pusat-pusat beban penerima. Peningkatan tegangan dimaksud untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus rendah dan berarti mengurangi rugi panas (*heat loss*) i^2R yang menyertainya. Ketika saluran transmisi mendekati pusat beban, tegangan tersebut diturunkan menjadi tegangan menengah, melalui transformator penurun tegangan (*step-down transformer*) menjadi tegangan subtransmisi 70 kV dan dari Gardu Induk menuju trafo distribusi diturunkan lagi menjadi 20 kV. Tegangan distribusi primer di pusat-pusat beban diturunkan menjadi tegangan rendah 220/380 V yang akhirnya oleh pihak pemakai, energi listrik ini diubah lagi menjadi bentuk energi terpakai lainnya seperti energi penggerak motor, lampu penerangan, peralatan pendingin, dan sebagainya.

D.5. Kondensor

Kondensor berfungsi kebalikan dari pembangkit uap yaitu mengubah fase uap pada sistem pendingin sekunder menjadi fase cair. Uap panas yang masuk ke turbin seluruhnya adalah fase uap. Setelah dialirkan untuk menggerakkan turbin maka yang keluar berupa campuran fase uap dan fase cair. Hal tersebut terjadi karena penurunan enthalpi fluida ketika melewati turbin, akibat konversi energi termal menjadi energi kinetik penggerak turbin. Sebelum sistem pendingin sekunder diumpankan kembali ke pembangkit uap, maka campuran tersebut harus diubah seluruhnya menjadi fase cair. Proses perubahan fase tersebut dilakukan di dalam kondensor yang akan mengembunkan uap yang sudah dipakai menjadi air dan kemudian dialirkan kembali ke pembangkit uap. Fluida yang bersirkulasi dalam sistem pendingin sekunder sama sekali tidak berinteraksi dengan zat radioaktif, sehingga tetap aman bagi lingkungan ketika dilepas ke luar. Pada waktu PLTN beroperasi, suhu pada kondensor naik cepat, sehingga mengakibatkan kondensor menjadi panas. Untuk mendinginkan kondensor bisa digunakan air, tapi harus dalam jumlah besar. Hal inilah yang menyebabkan PLTN dibangun dekat dengan sumber air yang banyak seperti di tepi sungai atau tepi pantai. Untuk menjaga tidak terjadi pemanasan yang berlebihan dari air sungai atau air laut maka dibangun menara pendingin (*cooling tower*) pada bangunan PLTN.



Gambar 2.28 - Prinsip kerja kondensor

Menara pendingin adalah perangkat untuk melepaskan panas yang terbentuk di kondensor ke atmosfer bumi. Perangkat ini diperlukan agar tidak terjadi pemanasan berlebih-lebihan terhadap sumber air yang digunakan sebagai sistem pendingin kondensor. Kondensasi dilakukan dengan menyemprotkan air pendingin kondensor ke menara pendingin sehingga terjadi penguapan. Proses evaporasi inilah yang menyebabkan terlihat asap berwarna putih keluar dari menara pendingin. Air yang sudah agak dingin kemudian dipompa kembali ke luar ke lingkungan.