

FAQ tentang Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

PERTANYAAN :

BAGAIMANAKAH HUBUNGAN ANTARA ENERGI NUKLIR DENGAN FENOMENA PEMANASAN AKIBAT GAS KARBONDIOKSIDA (CO₂)

JAWABAN RINGKAS

Strategi pengurangan emisi gas CO₂ dapat dilakukan antara lain dengan diversifikasi sumber pembangkit listrik, peningkatan efisiensi energi, penghematan energi, dan pengembangan teknik pengelolaan gas CO₂ misalnya dengan proses pemadatan. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tidak melepaskan gas CO₂ seperti halnya pembangkitan listrik berbahan bakar minyak bumi, sehingga dapat menekan emisi gas CO₂. Data tahun 1993 menunjukkan negara-negara dunia mengkonsumsi minyak bumi untuk pembangkit listrik sekitar 609 juta kilo liter (kl) yang menghasilkan listrik sekitar $2,0934 \times 10^{15}$ kWh.

JAWABAN RINCI

1. Di atmosfer bumi terdapat berbagai gas seperti CO₂, metan, freon, dll. Gas ini berfungsi seperti kaca pada rumah kaca yaitu pada satu sisi meneruskan sinar matahari dan pada sisi lain menyerap radiasi panas permukaan bumi sehingga udara menjadi panas. Jika gas efek rumah kaca (greenhouse gas) tersebut semakin meningkat jumlahnya, maka panas yang dilepaskan dari bumi ke angkasa akan terhalang, sehingga suhu udara bumi secara keseluruhan meningkat dan menimbulkan masalah pemanasan global. **Gambar 1** menunjukkan jumlah emisi gas CO₂ di dunia.

Apabila suhu udara meningkat akan menyebabkan permukaan air laut juga meningkat sebagai akibat pemuaian air laut dan pelelehan gletser. Hal ini menyebabkan daratan di wilayah pantai akan terendam air, dan hal ini berpengaruh terhadap ekosistem dan pertanian. Seandainya kondisi seperti ini terus berlanjut, sampai dengan akhir abad 21, suhu udara rata-rata seluruh bumi akan bertambah sekitar 3°C, dan menurut perhitungan, permukaan air laut akan bertambah tinggi kira-kira 65 cm. (IPCC, laporan 3)

2. Lebih dari 50% jumlah emisi gas rumah kaca adalah CO₂ yang hampir seluruhnya dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi dan gas alam (**Gambar 3**). Masalah pemanasan global ini disebabkan oleh meluasnya produksi dan konsumsi bahan bakar.

Di dalam kondisi dunia yang sangat bergantung kepada bahan bakar fosil, upaya untuk menekan pemakaian bahan bakar ini diperkirakan akan sangat mempengaruhi perekonomian dan kehidupan dunia. Masyarakat dunia harus berhadapan dengan masalah yang sulit yaitu menghentikan pemanasan global dengan menekan pemakaian bahan bakar fosil sambil tetap menjaga pertumbuhan energi.

3. Tiap negara di dunia memikirkan cara untuk mengurangi emisi gas CO₂ yang merupakan penyebab utama pemanasan global. Dalam konferensi khusus di Toronto sebagai kelanjutan Toronto Summit (Juni 1988) telah dideklarasikan: "Sampai dengan tahun 2005 jumlah emisi gas CO₂ harus berkurang 20% dari jumlah emisi saat ini, dan pengurangan ini dicapai melalui penghematan energi 10% dan penggantian bahan bakar 10%".

Pada Arsh Summit (Juli 1989) dideklarasikan: "PLTN diakui mempunyai peranan penting karena dapat mengurangi efek gas rumah kaca".

Pada konferensi Menteri Lingkungan Hidup Sedunia di Belanda (November 1989) dikeluarkan Deklarasi Nordbeik yang mengatakan bahwa untuk terus menunjang pertumbuhan ekonomi dunia secara stabil, negara-negara industri maju harus segera menstabilkan emisi gas CO₂ dan gas efek rumah kaca lainnya.

4. Konsumsi energi dunia termasuk negara-negara berkembang saat ini terus meningkat, mengakibatkan pemanfaatan bahan bakar fosil terus meningkat sehingga sangat sulit untuk mempertahankan emisi gas CO₂

pada tingkat saat ini.

5. Ada beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk mengurangi emisi yaitu pengendalian emisi gas CO₂ dan efek gas rumah kaca lainnya, pembuatan sumber penyerap CO₂ seperti hutan dan lain-lain, penelitian dan pengembangan teknologi serta kerjasama internasional. Misalnya pemanfaatan PLTN karena tidak melepaskan gas CO₂, NO_x dan SO_x.

PERTANYAAN :

MUNGKINKAH PLTN DIBANGUN DI DARATAN JAUH DARI PANTAI?

JAWABAN RINGKAS

Beberapa syarat yang penting untuk lokasi pembangunan PLTN adalah stabilitas dan kekuatan tanah, tersedianya suplai air dalam jumlah yang besar.

JAWABAN RINCI

Syarat-syarat lokasi pembangunan PLTN ditunjukkan pada Gambar 1.

1. Apabila PLTN dapat dibangun di daratan di sekitar tempat tinggal konsumen, hal ini akan sangat praktis karena jarak transmisi tidak panjang. Namun, karena beberapa alasan, pembangunan PLTN di daratan (jauh dari laut) sangat sulit dilakukan.
2. PLTN di negara Jepang, dibangun di daerah yang memiliki batuan dasar yang kuat yang menghadap ke laut. PLTN memerlukan air dalam jumlah yang banyak yang digunakan untuk mendinginkan uap, yang sebelumnya digunakan untuk memutar turbin. Di Jepang, karena tidak adanya sungai-sungai besar yang mampu menyuplai air dalam jumlah banyak secara kontinu, maka sebagai gantinya digunakanlah air laut. Sehingga, lokasi yang menghadap ke laut merupakan salah satu syarat untuk pembangunan PLTN.
3. Sebagai salah satu tindakan keselamatan, digunakan lahan yang cukup luas untuk menjamin keselamatan penduduk di sekitar lokasi PLTN, seandainya terjadi suatu kecelakaan yang diasumsikan meskipun kecelakaan tersebut dalam kenyataannya tidak akan terjadi. Untuk mengupayakan prioritas keselamatan bagi penduduk yang tinggal di sekitar lokasi PLTN berdasarkan petunjuk pengawas pembangunan PLTN, maka diperlukan lokasi pembangunan dengan jarak tertentu dari pemukiman penduduk. Sehingga, suatu reaktor yang di dalamnya terdapat bahan bakar nuklir, dipertimbangkan untuk dibangun di lokasi yang berjarak lebih dari beberapa ratus meter dari permukiman penduduk.
4. Seperti halnya pabrik pada umumnya, pembangunan PLTN memerlukan suatu tanah yang luas. Misalnya PLTN Fukushima II yang berdaya 4400 MW memerlukan lahan sebesar 1,5 juta meter persegi. Karena itu, dalam kenyataannya, pembangunan PLTN di daratan yang jauh dari pantai sangat sulit dilakukan.
5. Kalau begitu, apakah PLTN tidak bisa dibangun di daratan yang jauh dari pantai pada masa mendatang? Keuntungan dari pembangunan PLTN di sekitar daerah perkotaan adalah dekatnya jarak antara produsen listrik dengan konsumen, sehingga biaya transmisi listrik sangat murah.

Selain itu, panas dari reaktor nuklir dapat digunakan untuk memasok air panas di perkotaan, dan untuk pembuatan air bersih dari air laut. Salah satu contohnya, saat ini telah beroperasi PLTN Bilibino di Rusia, yang digunakan untuk menyuplai air panas.

Dengan tujuan pemanfaatan seperti ini, dibuat desain dan pengembangan reaktor nuklir mini dan sedang untuk menyuplai baik listrik maupun panas. Di masa mendatang, kemungkinan akan dibangun PLTN dengan daya sekitar beberapa puluh MW di sekitar kota.

6. Sehubungan dengan kondisi lahan pembangunan PLTN, sejak awal pengembangannya, Amerika Serikat

memikirkan cara pembangunan PLTN di daerah reklamasi di lautan. Di Jepang pun saat ini dilakukan riset tentang cara pembangunan PLTN yang terapung di laut dan di bawah tanah. Lembaga riset pembangkit listrik Jepang, tengah memikirkan tempat pembangunan PLTN selain pada batuan dasar. Untuk itu saat ini sedang dilakukan penelitian untuk mengembangkan teknologi baru, seperti:

- Teknologi pembangunan PLTN di tanah lembut (misalnya padang pasir), dan tanah yang lebih lembut dari batuan dasar.
- Teknologi pembangunan PLTN terapung di laut, dan teknologi pembangunan PLTN di dalam tanah.

GAMBAR



Syarat lokasi PLTN

Sumber: <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/1502010101.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Syarat lokasi pembangunan PLTN

PERTANYAAN :

DARIPADA MEMBANGUN SEBUAH PLTN BESAR, APA TIDAK LEBIH BAIK MEMBANGUN PLTN KECIL TAPI BANYAK?

JAWABAN RINGKAS

Untuk membangun suatu PLTN, lokasi yang akan digunakan mempunyai beberapa batasan seperti batuan dasar yang kuat. Di antara ketentuan-ketentuan yang sudah baku seperti ini, apabila dicari tempat-tempat yang memenuhi kriteria tersebut, ternyata tidak banyak lokasi yang bisa digunakan untuk membangun PLTN. Selain itu, ada kecenderungan bahwa biaya pembangkitan listrik pada pembangkit listrik skala besar lebih murah dibandingkan skala kecil. Pembangkit listrik merupakan suatu usaha yang memiliki fungsi sosial yang tinggi, sehingga dari sisi ekonomi, untuk menyuplai listrik dengan harga murah, dibangunlah pembangkit listrik skala besar di daerah-daerah yang sangat terbatas.

JAWABAN RINCI

1. Di Jepang, dalam menentukan lokasi pembangunan PLTN, perlu dipikirkan hal-hal sebagai berikut, 1) lahan yang luas, 2) batuan yang kuat dan stabil, 3) tersedianya air pendingin dalam jumlah yang besar.
2. Mengenai lokasi untuk PLTN, berdasarkan petunjuk penilai pembangunan PLTN, diperlukan lahan yang cukup luas untuk menjamin keselamatan penduduk di sekitar lokasi PLTN, seandainya terjadi suatu kecelakaan yang diasumsikan meskipun kecelakaan tersebut dalam kenyataannya tidak akan terjadi. Tetapi, di sekitar kota-kota besar, karena terdapat banyak gedung, harga tanah mahal, perlu banyak tempat untuk evakuasi, maka sangat sulit untuk mendapatkan tanah yang luas. Perlunya tanah yang kuat dan stabil adalah karena diperlukannya suatu desain yang tahan gempa.
3. Jepang merupakan negara gempa, desain tahan gempa untuk PLTN diwajibkan menerapkan standar 3 kali lipat dari bangunan pada umumnya. Sehingga bangunan PLTN harus didirikan di atas batuan. Kebanyakan lokasi di daerah perkotaan dan sekitarnya memiliki batuan dasar yang lemah, maka lokasi tersebut tidak cocok sebagai lokasi pembangunan PLTN.
4. Selain itu, suatu PLTN memerlukan air dalam jumlah yang banyak yang digunakan sebagai pendingin. Berbeda dengan negara-negara di Eropa dan Amerika, Jepang tidak memiliki sungai yang besar, sehingga untuk pembangunan PLTN dipilih daerah yang menghadap ke laut.
5. Dengan demikian, lokasi pembangunan PLTN di Jepang sangat terbatas. Untuk meningkatkan efisiensi suplai listrik, di tempat-tempat yang terbatas ini dibangun PLTN dalam skala besar. Selain itu, dari sisi biaya, harga dasar per kWh untuk PLTN besar lebih murah, misalnya untuk 4 buah pembangkit berdaya masing-masing 1100MW seharga sekitar 9 yen. Di samping itu, penanganan limbah dan bahan bakar bekasnya pun, lebih efektif bila dilakukan di daerah yang terpusat.

Dari semua hal tersebut, dapat disimpulkan bahwa dari sisi lahan dan efisiensi, ekonomi, keselamatan dan lainnya, pembangunan PLTN skala besar tidak bisa dihindari.

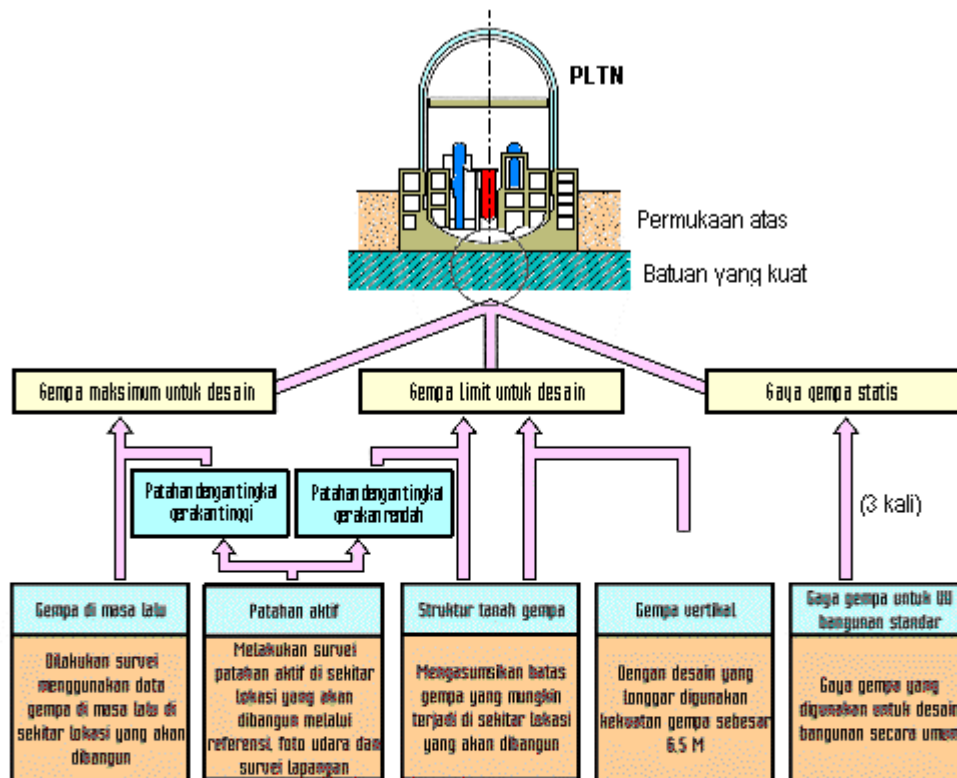
GAMBAR:



Syarat lokasi PLTN

Sumber: <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/bic015/15020101001.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Syarat lokasi pembangunan PLTN



Patahan dengan tingkat gerakan tinggi: selama 10000 tahun bergerak sebesar lebih dari 10 m

Gempa paling kuat untuk desain
(Gempa standar, S_1)

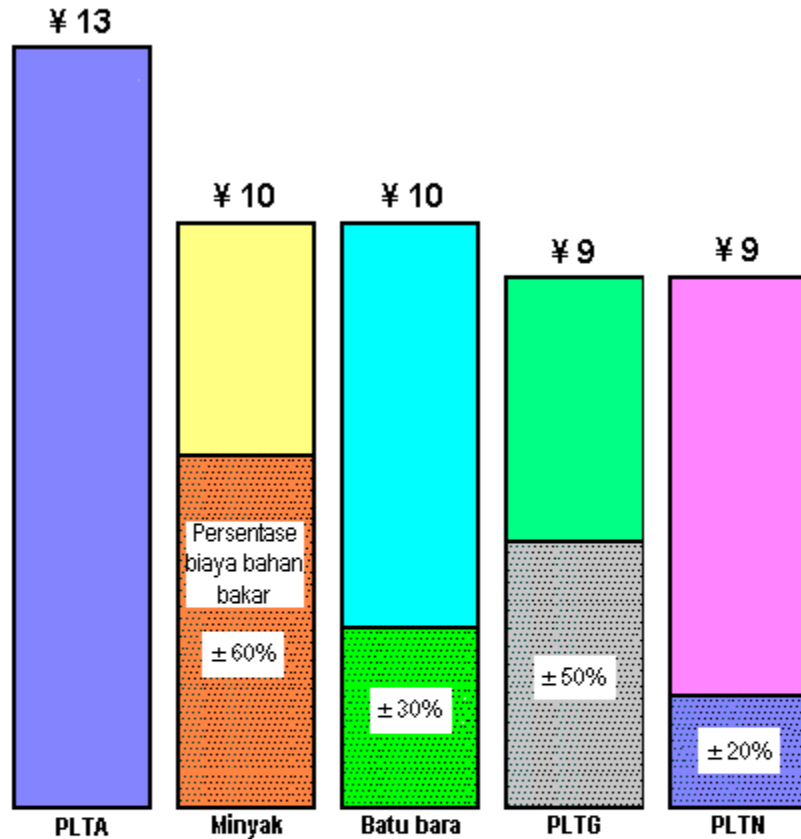
Gempa maksimum yang diprediksi berdasarkan patahan dan data terjadinya gempa besar di lokasi sekitar PLTN

Gempa limit untuk desain
(Gempa standar, S_2)

Gempa yang lebih besar daripada gempa paling kuat, yaitu yang memprediksi patahan, gempa paling kuat, berkekuatan 6,5 M dan sumbernya berjarak 10 km

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020102/03.gif> (Sep. 2003)

Gambar 2. Patahan dengan tingkat gerakan tinggi



Catatan:
 Nilai tukar US \$ 1 = ¥ 124,8
 Untuk harga dasar PLTN m meliputi biaya kerbagaai pengolahan limbah

Pembangkit Listrik	Daya	Umur
PLT A	10 ~ 40 MW	40 tahun
Minyak	4 x 600 MW	15 tahun
Batu bara	4 x 600 MW	15 tahun
PLT G	4 x 600 MW	15 tahun
PLT N	4 x 1100 MW	16 tahun

Harga dasar pembangkitan listrik per 1 kW

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15H50200102N04.gif> (Sep. 2003)

Gambar 3. Harga dasar pembangkitan listrik per 1 KW

PERTANYAAN :

APA PERBEDAAN ANTARA PLTN CHERNOBYL DENGAN PLTN AIR RINGAN?

JAWABAN RINGKAS

Struktur reaktor nuklir Chernobyl terdiri dari batang kendali dan pipa bertekanan (kanal bahan bakar) yang berisi bundel bahan bakar dan di sekitarnya disusun moderator yang terbuat dari grafit, dan di dalam kanal bahan bakar mengalir air ringan sebagai pendingin. Reaktor air ringan dengan tipe BWR dan PWR, keduanya memiliki struktur dengan bundel bahan bakar dan batang kendali berada di dalam bejana tekan. Di dalam bejana tekan air ringan yang berfungsi sebagai moderator sekaligus sebagai pendingin disirkulasikan.

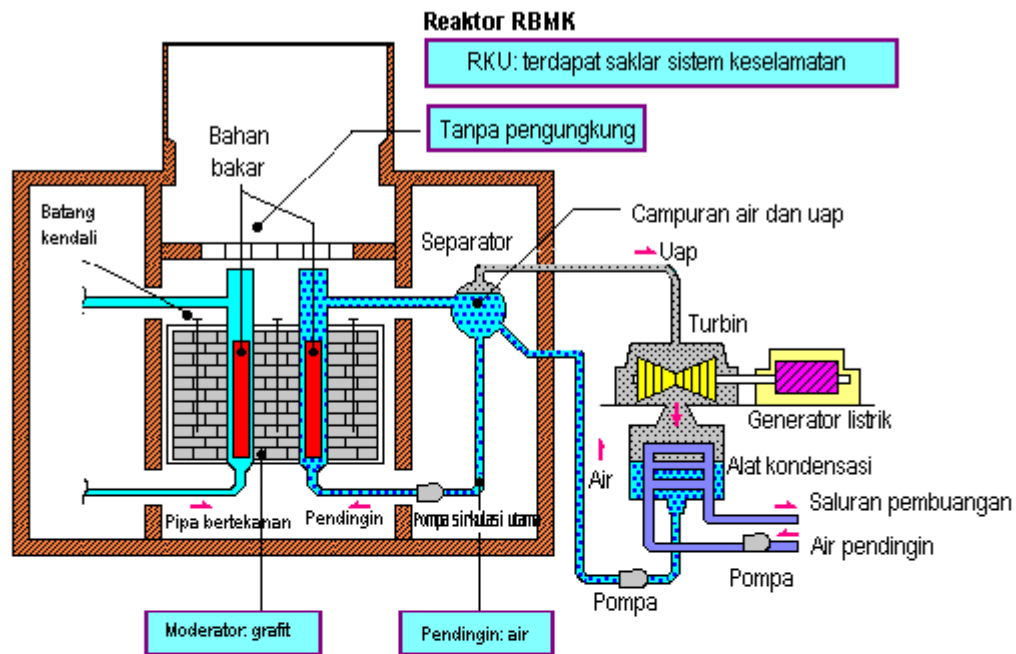
Pada saat terjadi kondisi abnormal selama operasi, kecepatan jatuh batang kendali ke dalam teras saat pemancungan daya (scram) pada reaktor Chernobyl sangat lambat dibandingkan dengan reaktor air ringan.

Pada saat terjadi kecelakaan pun, agar zat-zat radioaktif tidak terlepas ke lingkungan, PLTN air ringan diberi pengungkung, sedangkan reaktor Chernobyl tidak memiliki pengungkung.

JAWABAN RINCI

1. PLTN Chernobyl merupakan reaktor yang dikembangkan oleh bekas Uni Soviet yang merupakan reaktor kanal (tipe RBMK, LWGR) dengan grafit sebagai moderator dan air ringan sebagai pendingin. Konsep reaktor Chernobyl ditunjukkan pada Gambar 1. Pendingin reaktor yang berupa air ringan dialirkan dengan pompa ke dalam kanal bahan bakar (pipa bertekanan berisi bundel bahan bakar). Pendingin menjadi panas dan mendidih mengalir ke atas menuju separator (*steam drum*). Uap kering yang telah dipisahkan dialirkan ke turbin untuk membangkitkan listrik. Uap yang dikeluarkan dari turbin selanjutnya dikondensasi menjadi air kembali dan air dikembalikan ke separator dengan pompa.
2. Grafit yang merupakan moderator reaktor disusun mengelilingi kanal bahan bakar. Batang kendali yang berada di tengah-tengah blok grafit, dinaikturunkan untuk mengendalikan reaktor. Kecepatan memasukkan batang kendali ke dalam teras reaktor Chernobyl saat terjadi pemancungan daya sangat lambat (kira-kira 20 detik) dibandingkan dengan reaktor air ringan (sekitar 2 detik). Selain itu, teras reaktor Chernobyl hanya diletakkan di dalam bangunan yang terbuat dari beton, namun tidak mempunyai struktur pengungkung reaktor.
3. Reaktor air ringan, terdiri dari 2 jenis yaitu PWR dan BWR, keduanya menggunakan air ringan sebagai moderator sekaligus pendingin. Skema masing-masing reaktor tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Bundel bahan bakar dan batang kendali pada reaktor jenis ini semuanya diletakkan di dalam bejana tekan.
4. Pada reaktor BWR bahan pendingin yang menguap setelah dipanaskan akan dipisahkan oleh separator yang berada di bagian atas bejana tekan menjadi uap dan air. Selanjutnya hanya uap saja yang dialirkan ke turbin untuk membangkitkan listrik.
5. Pada reaktor PWR, bahan pendingin di dalam bejana tekan (pendingin primer) akan menjadi bersuhu tinggi dan bertekanan tinggi, dan akan diteruskan ke pembangkit uap primer. Di dalam pembangkit uap ini pendingin primer memanaskan dan menguapkan air pendingin sekunder. Uap dari pendingin sekunder ini dialirkan ke turbin untuk membangkitkan listrik. Baik PWR maupun BWR memiliki pengungkung untuk mencegah terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan yang dihasilkan pada teras saat terjadi kecelakaan.

GAMBAR:

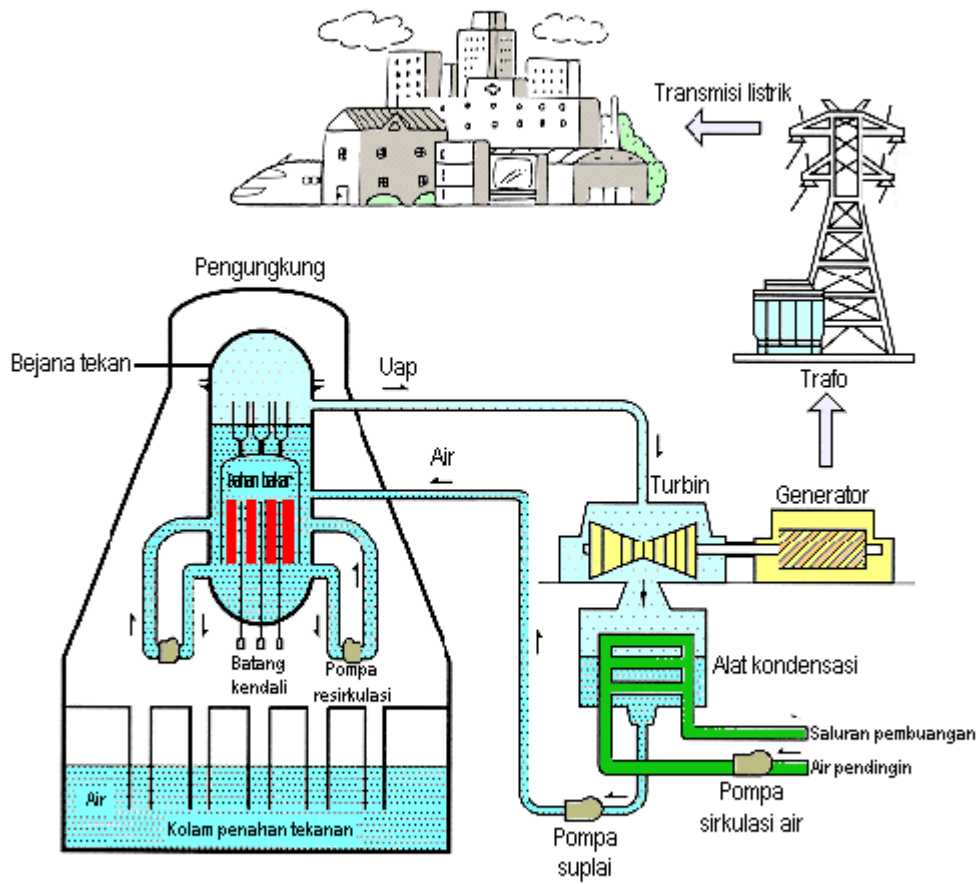


	Reaktor PWR dan BWR	Reaktor RBMK
Kendali melekat	Ada	Kadangkala tidak berfungsi
Pendingin	Air	Air
Moderator	Air	Grafit
Alat keselamatan	Interlock	Mudah terlepas
Pengungkung	Ada	Tidak ada

Struktur Reaktor Chernobyl

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020103/01.gif> (Sep. 2003)

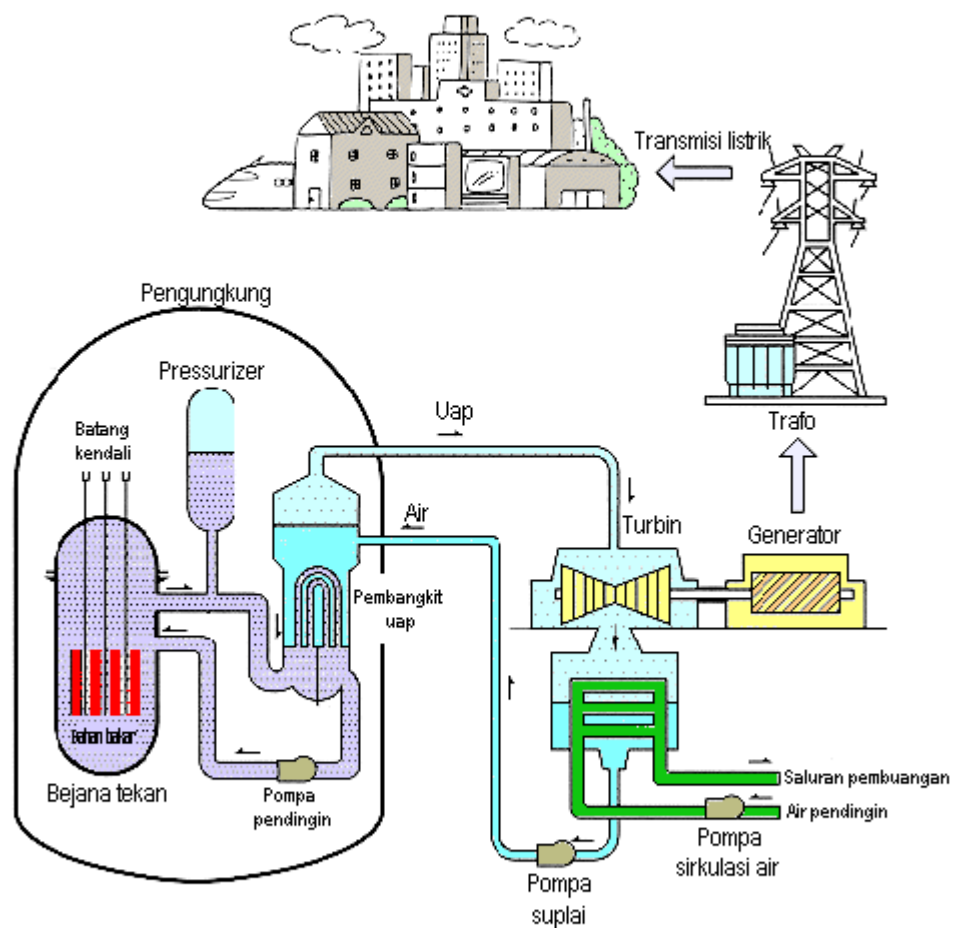
Gambar 1. Struktur reaktor Chernobyl



Struktur reaktor BWR

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020103/02.gif> (Sep. 2003)

Gambar 2. Struktur reaktor BWR



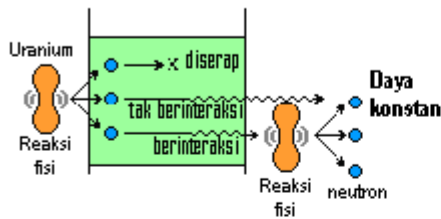
Struktur reaktor PWR

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/1502010303.gif> (Sep. 2003)

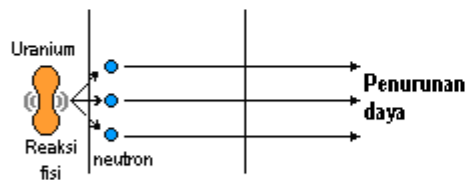
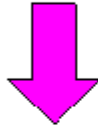
Gambar 3. Struktur reaktor PWR

Reaktor air ringan

Reaktivitas void: minus
Pendingin dan moderator: air

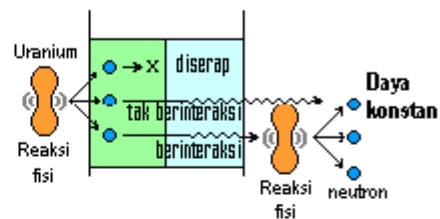


Bila air berkurang

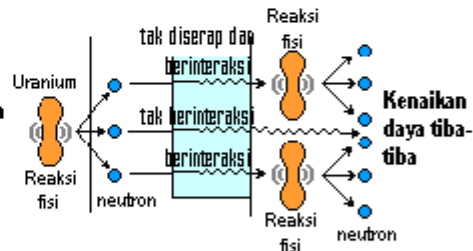


Reaktor Chernobyl

Reaktivitas void: plus
Pendingin: air Moderator: grafit



Bila air berkurang



Perbedaan kendali melekat antara reaktor air ringan dengan reaktor Chernobyl

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020103/04.gif> (Sep. 2003)

Gambar 4. Perbedaan kendali melekat antara reaktor air ringan dengan reaktor Chernobyl

PERTANYAAN :

APA KEISTIMEWAAN/KELEBIHAN DARI BWR DAN PWR?

JAWABAN RINGKAS

BWR dan PWR memiliki perbedaan struktur, mekanisme penggerak batang kendali, suhu pendingin, tekanan reaktor dan lainnya. PWR memiliki pembangkit uap, sementara BWR tidak. Dari perbedaan ini, BWR memiliki struktur yang lebih sederhana, namun pengungkungan radiasi diperlukan sampai pada ruang turbin.

JAWABAN RINCI

PWR dan BWR memiliki perbedaan yang besar dalam proses mengubah panas yang timbul di dalam reaktor untuk menghasilkan uap. Pada BWR, air yang dipanaskan di dalam teras (bejana tekan) langsung mendidih dan menjadi uap. Di dalam separator pada bagian atas bejana tekan, uap ini dipisahkan dari bagian airnya, selanjutnya dialirkan ke turbin (Gambar 1).

Pada PWR, air yang dipanaskan di dalam teras (air pendingin primer) tidak mendidih di dalam teras, melainkan dalam kondisi bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi dialirkan ke luar dari bejana tekan, dan dikirim ke pembangkit uap. Di dalam pembangkit uap air pendingin sekunder dipanaskan dengan panas dari air pendingin primer yang keluar dari bejana reaktor dan berubah menjadi uap (Gambar 2).

BWR berhubungan langsung dengan turbin sehingga tidak memiliki saluran pipa untuk air pendingin sekunder. Pada PWR, air pendingin primer bersuhu dan bertekanan tinggi mengalir ke pembangkit uap selanjutnya kembali lagi ke dalam teras tanpa mengalami pendidihan. Selain itu terdapat saluran air pendingin sekunder yang mengalirkan uap dari pembangkit uap ke turbin. Saluran air pendingin primer dan sekunder tidak saling berhubungan sehingga membentuk dua buah *loop* yang berbeda (Gambar 3).

Jadi, dua tipe reaktor ini memiliki perbedaan dalam hal perlengkapan dan kondisi operasi seperti di bawah ini:

Jenis Reaktor	Pembangkit uap	Pressurizer	Separator	Tekanan bejana
BWR	Tidak ada	Tidak ada	Berada di bagian atas bejana	70 atm, 285°C
PWR	Ada	Ada	Terdapat di dalam pembangkit uap	157 atm, 320°C

Untuk BWR, materi yang bersifat korosif pada pipa dan bejana tekan teraktivasi oleh neutron dan tercampur di dalam uap air, sehingga penanganan radiasi mencakup area yang luas mulai dari gedung reaktor sampai gedung turbin.

Untuk PWR, radiasi tidak mencapai bagian turbin karena pendingin primer dan sekunder dipisahkan oleh pembangkit uap. Ini merupakan salah satu kelebihannya, walaupun pembangkit uap disusun oleh banyak pipa kecil penghantar panas yang adakalanya mengalami korosi dan retak.

Selain pembangkit uap, terdapat perbedaan pompa yang mengalirkan air pendingin ke dalam bejana tekan. Di dalam BWR yang digunakan adalah pompa resirkulasi, sedangkan pada PWR pompa pendingin primer.

Pompa resirkulasi adalah alat untuk memudahkan pengendalian daya dan untuk meningkatkan kapasitas. Di dalam PWR, air yang telah melewati pembangkit uap akan kembali ke bejana tekan. Alat untuk mengalirkan air ini adalah pompa pendingin primer. Pada daya yang sama (1100MWe) BWR membutuhkan 2 buah pompa, sedangkan PWR 4 buah pompa.

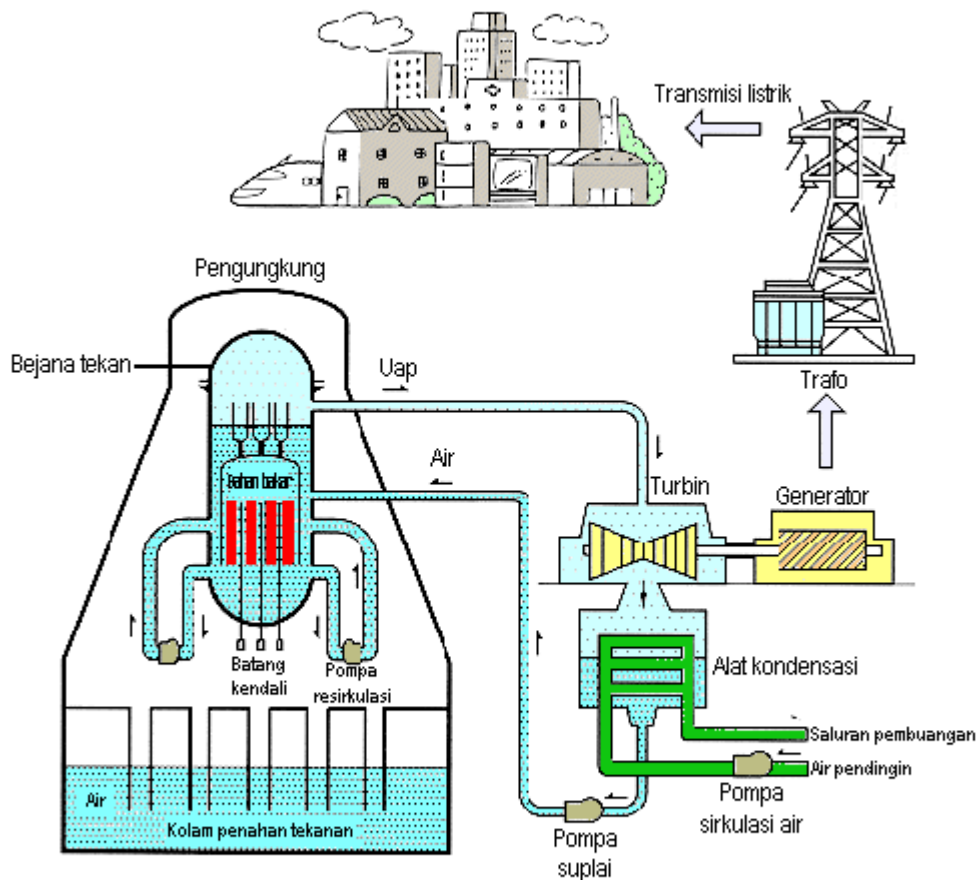
Selain perbedaan tersebut di atas, terdapat juga perbedaan pada teras, batang bahan bakar, batang kendali dan lainnya. Bundel bahan bakar BWR ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan bundel bahan bakar PWR ditunjukkan pada Gambar 5.

Di dalam PWR bahan bakar tersusun secara rapat sehingga untuk menghasilkan daya yang sama hanya memerlukan volume sekitar setengah dari BWR, namun karena tekanannya tinggi maka dinding bejana tekan PWR lebih tebal daripada BWR.

Sebaliknya, BWR memiliki teras dengan volume yang lebih besar daripada PWR karena di dalamnya terdapat separator, pompa jet dan lainnya.

Untuk batang kendali, pada PWR dimasukkan dari bagian atas, sedangkan BWR dimasukkan dari bagian bawah.

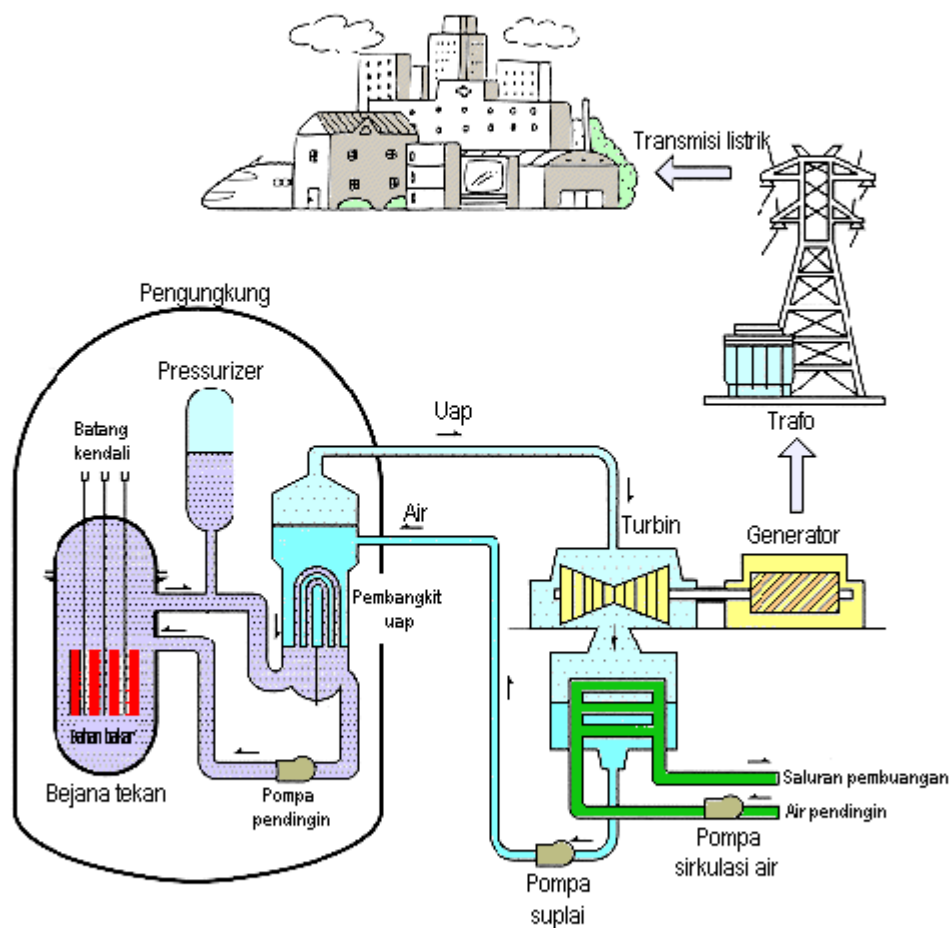
GAMBAR/TABEL :



Struktur reaktor BWR

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020103/02.gif> (Sep. 2003)

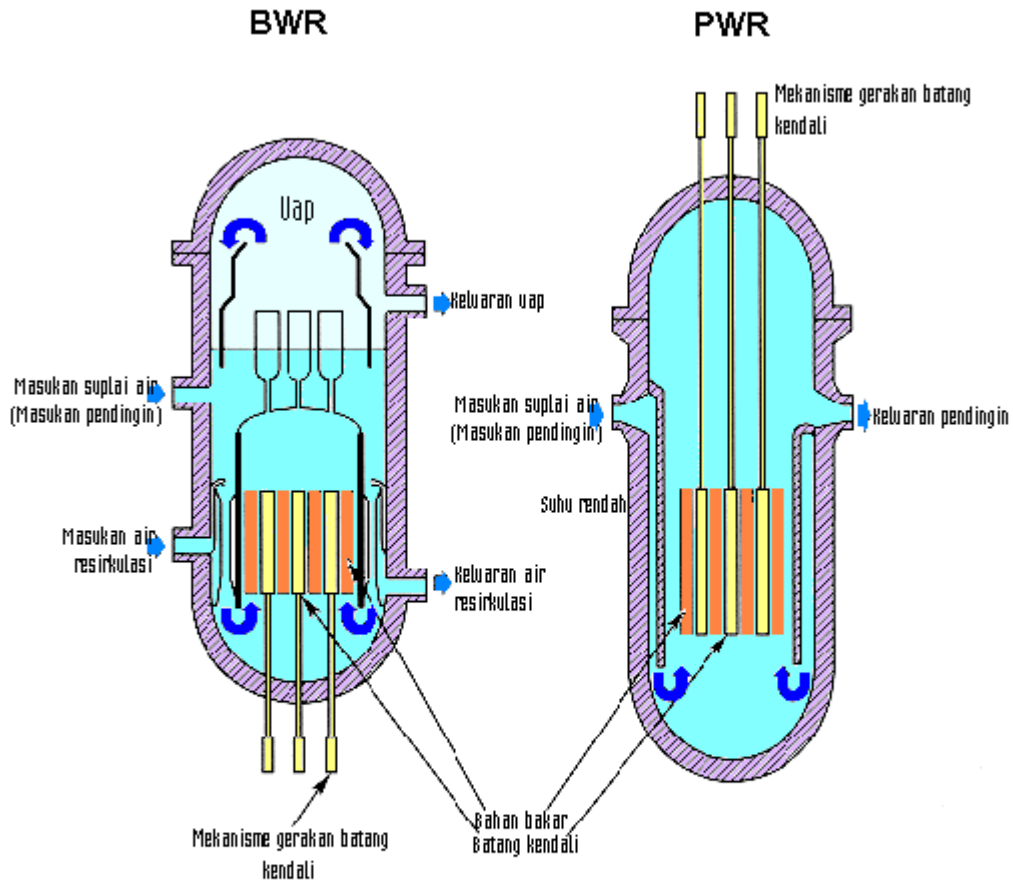
Gambar 1. Skema Reaktor BWR



Struktur reaktor PWR

Sumber: <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15H5020103/03.gif> (Sep. 2003)

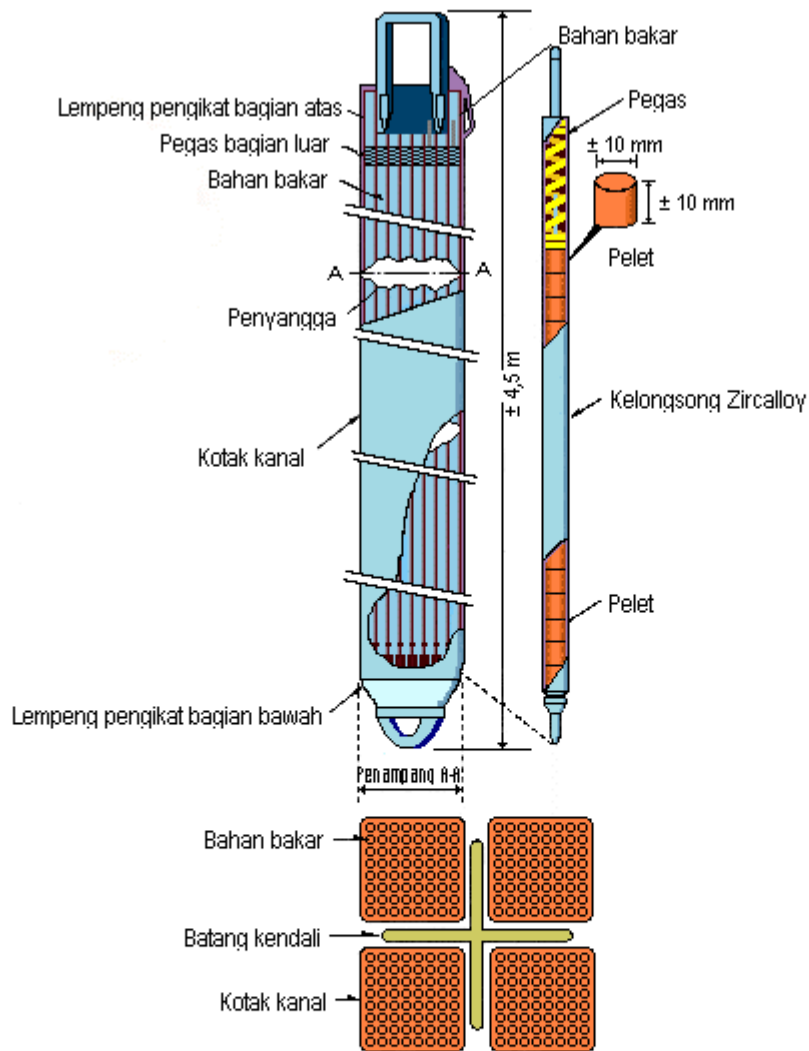
Gambar 2. Skema Reaktor PWR



Perbandingan bejana tekan BWR dan PWR

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/1502010403.gif> (Sep. 2003)

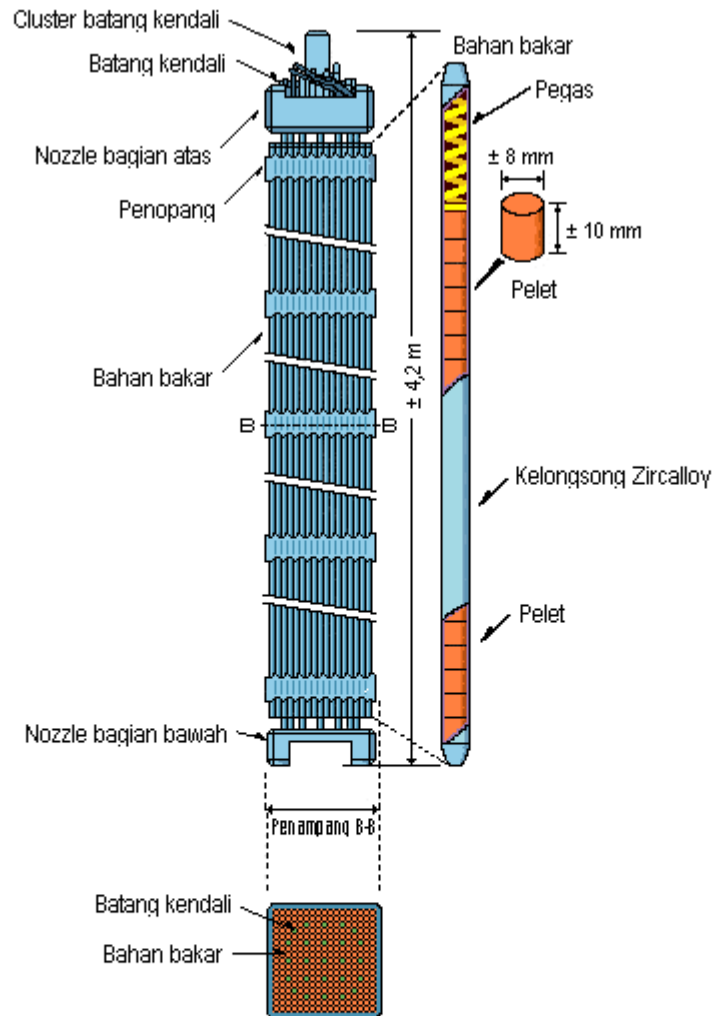
Gambar 3. Perbandingan bejana tekan PWR dengan BWR



Struktur bundel bahan bakar reaktor tipe BWR

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020104/04.gif> (Sep. 2003)

Gambar 4. Struktur bundel bahan bakar BWR



Struktur bundel bahan bakar reaktor tipe PWR

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020104/05.gif> (Sep. 2003)

Gambar 5. Struktur bundel bahan bakar PWR

PERTANYAAN :

Jumlah panas yang dihasilkan oleh 1 gram U-235, setara dengan konsumsi listrik untuk satu keluarga selama berapa bulan?

JAWABAN RINGKAS

Apabila 1 gram U-235 bereaksi fisi seluruhnya, maka dihasilkan energi sekitar 19,8 milyar kalori. Seandainya energi ini terjadi di dalam teras reaktor PLTN, maka kira-kira setara dengan konsumsi satu rumah tangga selama 30 bulan.

JAWABAN RINCI

Cara menghitung:

- (1) 1 buah atom U-235, bila mengalami reaksi fisi akan menghasilkan energi sebesar (dikonversi ke daya listrik) $202\text{MeV} \times (1,602 \times 10^{-13}[\text{J/MeV}]) \times (2,778 \times 10^{-7} [\text{kWh/J}]) = 8,990 \times 10^{-18}\text{kWh}$
- (2) Jumlah atom yang terdapat di dalam 1 gram U-235
Berat 1 atom U-235 = 235,1 amu (amu : satuan massa atom)
 $1\text{g} : 235,1 \text{ amu} = 2,562 \times 10^{21} \text{ atom}$
- (3) Jumlah panas 1 gram U-235 (dikonversikan ke daya listrik) = (1)X(2)
 $(8,990 \times 10^{-18} \text{ kWh}) \times (2,562 \times 10^{21}) = 23.032 \text{ kWh}$
- (4) Daya listrik yang dihasilkan 1 gram U-235
Dengan asumsi efisiensi 34%, dan konsumsi listrik rata-rata 1 rumah tangga sebesar 264 kWh/bulan, maka $23.032\text{kWh} \times 0,34 = 7.830\text{kWh (e)}$
 $7.830\text{kWh} : 264\text{kWh/bulan} = 29,7 \text{ bulan}$
 $29,7 \text{ bulan} : 12 \text{ bulan/tahun} \approx 2 \text{ tahun } 6 \text{ bulan}$

Jadi 1 gram U-235 yang mengalami reaksi fisi seluruhnya akan setara dengan konsumsi listrik rata-rata 1 rumah tangga selama sekitar 30 bulan.

PERTANYAAN:

APABILA KOMPONEN PLTN MENGALAMI PENUAAN SECARA BERSAMAAN, APAKAH HAL INI AKAN MENYEBABKAN PENINGKATAN KEMUNGKINAN TERJADINYA KECELAKAAN SECARA DRASTIS?

JAWABAN RINGKAS

Dalam pemilihan bahan untuk komponen konstruksi reaktor nuklir, dipilih bahan yang mempunyai ketahanan yang memadai untuk berbagai kondisi beban, temperatur dan lingkungan. Selain itu, untuk negara maju seperti Jepang, pemeriksaan menyeluruh (*overhaul*) secara berkala, perawatan, perbaikan dan penggantian komponen dilakukan secara teliti, sehingga sangat kecil kemungkinan terjadinya penuaan komponen dalam waktu bersamaan.

JAWABAN RINCI

1. Pada dasarnya pemilihan bahan dan komponen reaktor harus mengikuti suatu standar yang telah ditentukan. Di negara Jepang yang mempunyai banyak PLTN, Kementerian Industri dan Perdagangan Internasional telah menetapkan panduan (*code*) no 501 tentang "Standar Rekayasa Konstruksi PLTN". Di dalam panduan tersebut ditetapkan petunjuk dan aturan dalam pemilihan bahan, perancangan dan pengujiannya. Dalam perencanaan pemanfaatan material untuk sebuah konstruksi PLTN, baik dalam hal pemilihan jenis bahan maupun jenis alat yang akan dibuat ditetapkan dengan ketentuan desain yang lebih kuat, lebih baik dan dapat diterima oleh aturan perizinan yang ada. Tetapi pada kenyataannya tidak terdapat ketentuan yang jelas tentang rentang waktu pemakaian alat dan kaitannya dengan perubahan umur dari suatu alat pada waktu pembuatan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemeriksaan dan pengawasan terhadap setiap komponen dari degradasi karena penuaan.
2. Dengan semakin lamanya waktu penggunaan komponen, maka komponen tersebut akan mengalami penuaan sebagai akibat dari perubahan material yang menua. Proses terjadinya penuaan dari suatu komponen atau alat bergantung pada lingkungan tempat komponen atau alat tersebut berada. Kondisi lingkungan akan mempengaruhi material komponen yang menghasilkan proses penuaan. Gambar 1 menunjukkan kondisi kerusakan bahan karena korosi.

Bahan untuk membuat komponen dipilih secara khusus berdasarkan karakteristiknya. Sebagian besar bahan tersebut berupa baja paduan rendah, stainless steel, baja karbon dan logam paduan berbasis nikel. Masing-masing logam digunakan untuk membuat komponen sesuai dengan sifat dasarnya. Faktor utilisasi atau operasional yang dapat menyebabkan penuaan komponen di antaranya adalah kelelahan mekanik, tekanan termal (*thermal stress*) dan lain sebagainya. Semua faktor penuaan ini tidak hanya terjadi pada komponen PLTN, tetapi juga terjadi pada komponen pabrik lain. Masalah ini dapat ditangani dengan mudah berdasarkan pengalaman selama ini.

Faktor lingkungan yang dapat mempengaruhi penuaan komponen dalam PLTN di antaranya adalah radiasi partikel neutron hasil reaksi fisi, sinar gama, lingkungan pendingin air, serta temperatur tinggi dari pendingin. Di antara faktor tersebut, radiasi partikel neutron, temperatur dan tekanan pendingin air adalah faktor yang terjadi hanya di reaktor nuklir. Radiasi partikel neutron akan menyebabkan kerapuhan logam bahan bejana tekan, sedangkan temperatur dan tekanan yang tinggi mudah menimbulkan korosi dan erosi pada pipa penyalur pendingin.

3. Degradasi material karena penuaan dapat saja terjadi karena kombinasi dari faktor lingkungan dan faktor utilisasi komponen. Dua faktor ini kemudian akan menimbulkan retak korosif, degradasi korosif atau *irradiation assisted stress corrosion cracking* (IASCC). IASCC pada PLTN kini menjadi perhatian. Struktur pendukung teras reaktor banyak menerima paparan partikel neutron dengan kecepatan tinggi. Hal ini akan menyebabkan terjadinya perubahan unsur penyusun logam dan selanjutnya unsur yang berubah tersebut menjadi pengotor dalam logam yang menjadikan logam terdegradasi. Selain itu, sinar gama yang diterima bahan struktur pendukung teras reaktor juga akan menyebabkan perubahan potensial listrik dan karena logam tersebut

berada pada lingkungan air bertemperatur dan bertekanan tinggi, maka bahan tersebut akan terserang korosi dan menimbulkan retakan yang disebut IGSCC (*Intergranular Stress Corrosion Cracking*).

4. Sambungan las pipa saluran pendingin BWR yang dibuat dari bahan stainless steel austenite banyak mengalami retakan katagori IGSCC. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, fenomena IGSCC pada sambungan las tersebut disebabkan karena pada saat terjadi pengelasan, pemanasan menyebabkan butir karbon dalam baja berubah menjadi kristal, sehingga menurunkan daya tahan korosinya. Fenomena ini telah dapat diatasi dengan pengembangan *stainless steel* dengan kandungan karbon rendah. Walaupun demikian interaksi faktor lingkungan yaitu air bertemperatur dan bertekanan tinggi dengan radiasi, akan menjadi faktor penyebab penuaan yang sangat kompleks dan tidak terduga. Oleh karena itu hal tersebut harus tetap dipertimbangkan dengan seksama. Faktor lingkungan bekerja mempengaruhi proses penuaan secara lambat.
5. Sejak PLTN mulai dioperasikan, harus dilakukan pencegahan terhadap kegagalan fungsi maupun kecelakaan. Agar sistem selalu berada pada kondisi handal dan aman untuk dioperasikan perlu dilakukan pemeriksaan yang seksama. Pemeriksaan tersebut meliputi:

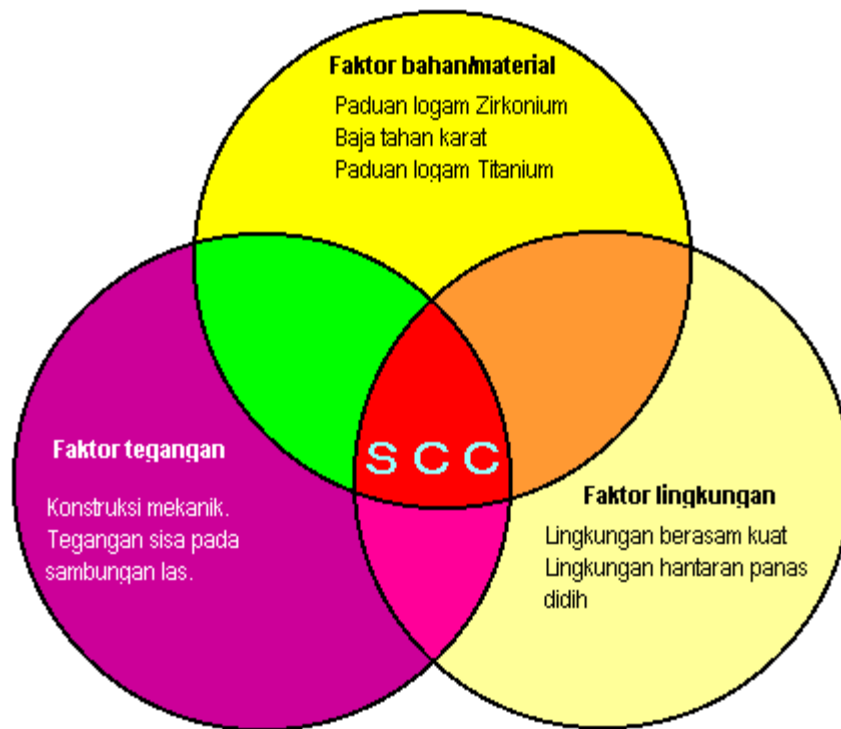
- (1) Pengawasan dan perawatan satu tahun sekali secara periodik.
- (2) Perawatan berdasarkan evaluasi data operasional dan perawatan.
- (3) Perawatan berdasarkan adanya informasi persoalan yang timbul baik di dalam maupun dari luar negeri.

Kegiatan perawatan pencegahan (*preventive maintenance*) diharapkan dapat menangani masalah penuaan komponen secara dini. Oleh karena adanya perawatan pencegahan yang harus dilakukan secara seksama, maka dengan itu pula teknik inspeksi terhadap proses penuaan berkembang. Teknik inspeksi tersebut meliputi:

- (1) Inspeksi melalui pengambilan sampel komponen utama
- (2) Inspeksi melalui pengambilan sampel komponen yang mengalami penuaan
- (3) Analisis umur sisa komponen
- (4) Umpan balik untuk implementasi perencanaan perawatan

Melalui riset penuaan, pengembangan bahan, pengembangan metode inspeksi penuaan, dan perawatan pencegahan diharapkan komponen PLTN semakin andal dan kecelakaan yang dipicu oleh penuaan komponen secara bersamaan dapat dicegah.

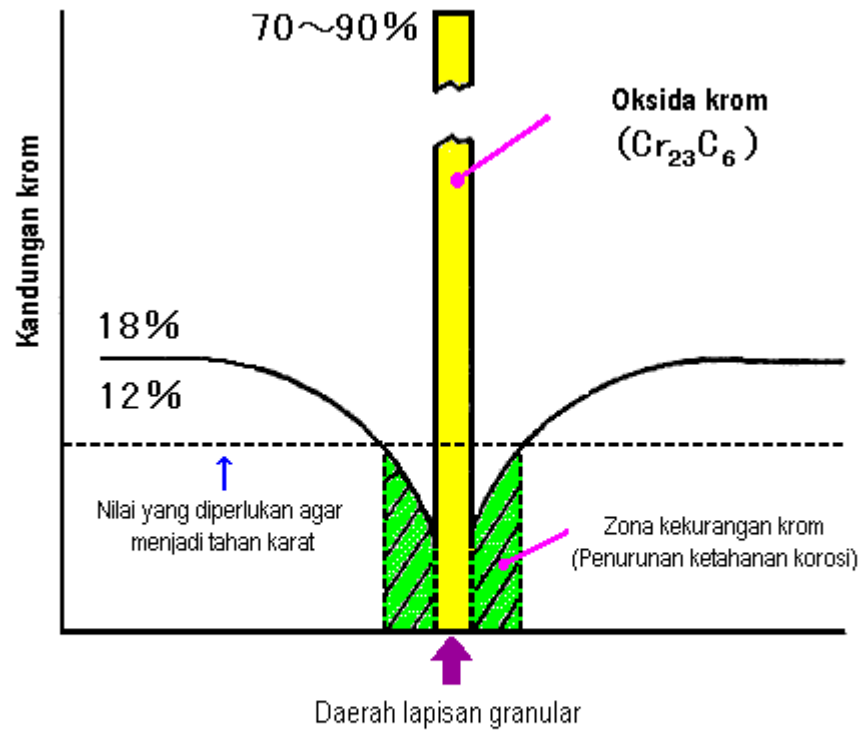
GAMBAR :



Kondisi penyebab keretakan tegangan korosi

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020201/01.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Kondisi penyebab retakan korosif



Penyebab penurunan sifat tahan karat pada lapisan granular

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020201/02.gif> (Sep. 2003)

Gambar 2. Faktor kristalisasi sebagai penyebab degradasi daya tahan terhadap karat

PERTANYAAN:

MENURUT INFORMASI, PADA SAAT KECELAKAAN PLTN CHERNOBYL SISTEM KENDALI MELEKAT (SELF CONTROL) TIDAK BEKERJA, JIKA DEMIKIAN:

- (1) APAKAH HAL TERSEBUT JUGA AKAN TERJADI PADA REAKTOR YANG SEKARANG SEDANG BEROPERASI?
- (2) APA YANG TERJADI PADA KECELAKAAN THREE MILE ISLAND (TMI)?

JAWABAN RINGKAS

Pada saat reaktor nuklir beroperasi, oleh karena suatu sebab daya reaktor dapat meningkat. Pada kebanyakan reaktor, daya tidak dapat meningkat secara bebas karena ditahan oleh sifat alami reaktor yang disebut sistem kendali melekat. Mekanisme yang mendukung sifat kendali melekat ini adalah koefisien reaktivitas Doppler (koefisien temperatur bahan bakar) yang negatif, koefisien temperatur pendingin dan moderator, dan koefisien *void*. Semua koefisien ini saling berkaitan dan menghasilkan reaktivitas teras negatif yang menahan peningkatan daya secara bebas. Untuk PLTN Chernobyl, pada daya rendah reaktor ini mempunyai koefisien reaktivitas uap yang sangat positif (nilai reaktivitas besar dan positif). Oleh karena itu, pada daya rendah, reaktor Chernobyl mempunyai reaktivitas teras reaktor yang positif dan besar. Dengan kata lain, pada daya rendah, reaktor Chernobyl tidak memiliki sifat kendali melekat. Sedangkan reaktor yang banyak beroperasi di luar Rusia mempunyai koefisien reaktivitas yang negatif pada setiap tingkat daya reaktor. Reaktor dari PLTN TMI yang bertipe reaktor air ringan juga mempunyai sifat kendali melekat dengan koefisien reaktivitas negatif. Kecelakaan di TMI bukan disebabkan karena sifat kendali melekatnya, tetapi oleh karena pelanggaran aturan operasional dan kesalahan pengambilan keputusan oleh operator. Di samping itu terbukti terdapat kelemahan dalam desainnya.

JAWABAN RINCI

1. Dalam pengoperasian PLTN, oleh karena suatu sebab, daya reaktor meningkat. Mekanisme yang terjadi pada inti atom akan menahan kenaikan daya tersebut. Reaktor seperti ini disebut reaktor dengan koefisien reaktivitas negatif, dan sifat reaktor yang dapat menahan kenaikan daya disebut sebagai sifat kendali melekat atau sifat kendali inheren. Adanya sifat ini menyebabkan reaktor menjadi mudah untuk dikendalikan dan dengan demikian keandalan dan keselamatan operasi pun dapat dipastikan.

Koefisien reaktivitas teras reaktor timbul karena beberapa penyebab, yaitu kenaikan temperatur bahan bakar (koefisien Doppler), kenaikan temperatur pendingin dan moderator (koefisien temperatur moderator) dan kenaikan jumlah *void*/lowong (koefisien lowong).

Koefisien Doppler selalu bernilai negatif, tidak bergantung pada tipe reaktor. Oleh karena itu jika terjadi kenaikan daya reaktor, koefisien ini akan memberikan sumbangan reaktivitas negatif, yaitu bersifat menekan dan melawan kenaikan daya. Sementara itu, koefisien temperatur pendingin dan moderator serta koefisien lowong (*void coefficient*), dalam reaktor air ringan nilainya negatif, tetapi koefisien ini dalam reaktor tipe lain dapat saja bernilai positif. Untuk tipe reaktor selain reaktor air ringan (reaktor dengan air sebagai bahan pendingin dan moderator), efek reaktivitas pendingin harus dievaluasi secara terpisah. Jika kombinasi efek reaktivitas dari koefisien Doppler yang negatif dengan koefisien-koefisien reaktivitas secara keseluruhan menghasilkan koefisien reaktivitas teras reaktor yang negatif, maka reaktor akan memiliki sifat sistem kendali melekat.

2. Kasus reaktor Chernobyl (Gambar 2)

Reaktor Chernobyl adalah reaktor air didih bermoderator grafit (RBMK) yang dikembangkan oleh Uni Soviet. Dalam teras reaktor berupa susunan blok grafit terdapat pipa tekan yang berisi bahan bakar dan air pendingin yang mendidih (pendidihan air pendingin terjadi pada bagian atas pipa). Reaktor RBMK ini, terutama pada daya rendah, memiliki koefisien *void* pendingin yang sangat positif sehingga dari aspek pengendalian cenderung tidak stabil pada daya rendah. Dan kombinasi koefisien reaktivitas yang ada menghasilkan koefisien reaktivitas teras positif, sehingga reaktor tidak memiliki sifat kendali melekat. Oleh karena itu dengan adanya pelanggaran

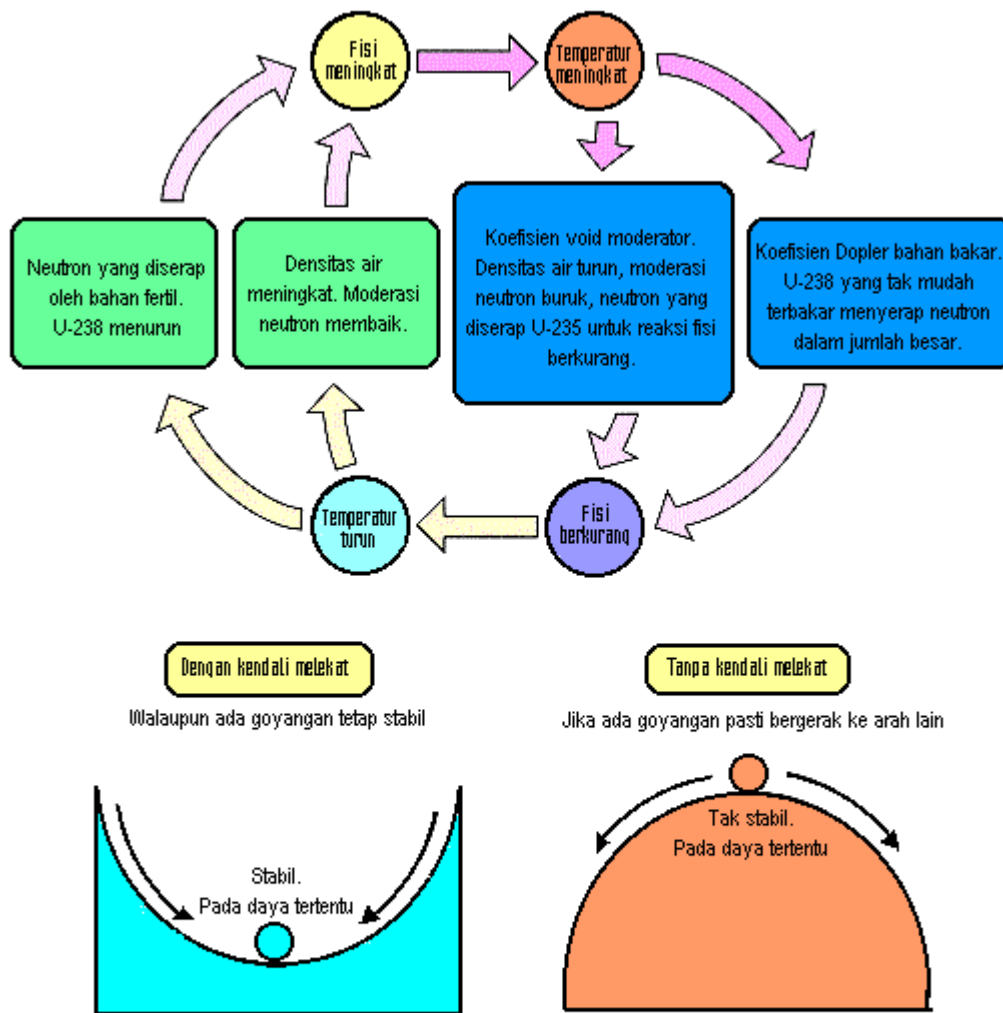
operasional, yaitu mematikan sistem pancung (*scram*) otomatis pada saat pengoperasian reaktor daya rendah dan melakukan pemadaman reaktor mendadak secara manual melalui penyisipan batang kendali yang kecepataannya tidak memadai (20 detik untuk penyisipan batang kendali secara penuh), maka kenaikan daya menjadi tidak terkompensasi (tertahan) sehingga menimbulkan kecelakaan besar di reaktor Chernobyl.

3. Gambar 2 memperlihatkan kasus pada reaktor negara Barat yang banyak dioperasikan. Reaktor tipe negara Barat yang banyak beroperasi pada saat ini adalah tipe reaktor air didih dan reaktor air tekan. Reaktor ini mempunyai koefisien reaktivitas negatif pada semua tingkat daya, atau reaktor tersebut memiliki sistem kendali melekat. Selain itu, sistem proteksi keselamatan *interlock* (saling kunci) tidak memungkinkan terjadinya pemutusan kendali pancung otomatis pada reaktor ini, dan reaktor mempunyai sistem pemberhentian reaktor mendadak yang cukup memadai (waktu penyisipan penuh batang kendali ke dalam teras hanya berkisar 2 detik).

4. Kasus pada PLTN Three Mile Island (TMI) (Gambar 3)

Reaktor TMI adalah reaktor tipe air tekan seperti kebanyakan reaktor air tekan yang saat ini beroperasi. Reaktor ini mempunyai sistem kendali melekat karena koefisien reaktivitasnya negatif. Kecelakaan terjadi pada saat pompa pasokan air ke pembangkit uap terhenti, sedangkan pompa cadangan bekerja tetapi katup pada sisi luaran pompa tertutup. Pada saat itu operator mengambil keputusan yang salah dengan mematikan pompa penggerak pendingin darurat bertekanan tinggi dari sistem pendingin teras darurat (sistem untuk mendinginkan bahan bakar reaktor pada kondisi darurat), sehingga terjadilah kecelakaan TMI yang disebabkan oleh kesalahan operator dan kurangnya fasilitas pendukung. Jadi substansi kecelakaan TMI sama sekali berbeda dengan kecelakaan yang terjadi pada Chernobyl.

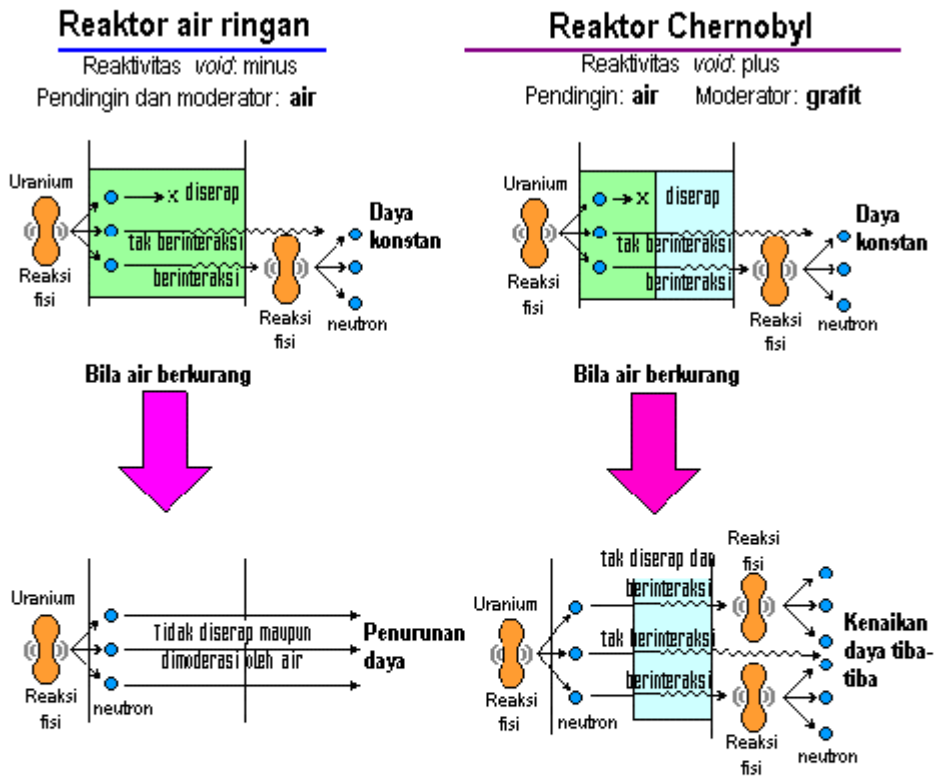
GAMBAR :



Keselamatan inheren reaktor nuklir (sifat kendali melekat)

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020202/01.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Sistem keselamatan inheren reaktor (sistem kendali melekat)



Perbedaan sistem kendali melekat antara reaktor tipe Chernobyl dan reaktor negara blok Barat

Sumber: <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020202.02.gif> (Sep. 2003)

Gambar 2. Perbedaan sistem kendali melekat antara reaktor Chernobyl dengan reaktor negara Barat yang banyak beroperasi di Jepang

Sebagai penyebab awal kecelakaan adalah berhentinya pompa pemasok utama air ke pembangkit uap. Pada saat itu kebetulan katup luaran pada pompa cadangan tertutup. Operator mengambil keputusan yang keliru yaitu melakukan pemadaman sistem injeksi tekanan tinggi pada ECCS. Akibat kesalahan manusia/operator dan fasilitas yang kurang memadai terjadi kecelakaan hebat.

Penyebab kecelakaan

- 1 Reaktor dioperasikan pada kondisi katup luaran pompa cadangan sistem pemasok air pembangkit uap dalam keadaan tertutup. (Pelanggaran prosedur operasi)
- 2 Katup pembebas tekanan hanya bekerja pada tekanan tinggi (membuka) tetapi tidak bekerja (menutup) pada tekanan rendah. (Fasilitas tidak memadai). Operator juga tidak berusaha menutup katup tersebut. (Kesalahan mengambil keputusan)
- 3 Operator beranggapan di reaktor masih banyak air. Oleh karena itu ECCS dimatikan dan pasokan air berkurang. (Operator keliru mengambil keputusan)
- 4 Pada tahap pendinginan, operator mematikan satu pompa primer yang tersisa. (Operator keliru mengambil keputusan)
- 5 Pengisolasian bejana pengungkung tidak memadai. Pipa penyalur air masuk dan keluar dari bejana pengungkung tidak terisolasi. Oleh karena itu sebagian zat radioaktif yang terkandung di dalam bejana pengungkung sempat terlepas ke lingkungan. (Fasilitas tidak memadai)

Penyebab kecelakaan pada PLTN Three Mile Island

Sumber: <http://mnext-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020202/03.gif> (Sep. 2003)

Gambar 3. Penyebab kecelakaan PLTN Three Mile Island

PERTANYAAN:

PADA PLTN DILAKUKAN PEMERIKSAAN BERKALA YANG BAIK, TETAPI BAGAIMANA MENGANTISIPASI KESALAHAN MANUSIA?

JAWABAN RINGKAS

Untuk mengantisipasi kesalahan operator (kesalahan manusia), PLTN dirancang sedemikian rupa sehingga jika terjadi kesalahan operator PLTN tidak akan mengalami kecelakaan besar. Di samping itu untuk mengurangi persoalan yang timbul akibat kesalahan manusia, pemerintah terus mendorong pelaksanaan litbang terkait.

JAWABAN RINCI

1. PLTN, sejak dari izin pembangunan, persetujuan rencana pembangunan, pelaksanaan pembangunan hingga pengoperasian harus mengikuti dan memenuhi regulasi yang sangat ketat. Demi adanya kepastian keamanan dan keselamatan PLTN, maka semua prosedur tersebut ditetapkan sebagai suatu kewajiban mutlak yang harus dipenuhi. Setelah beroperasi, operator PLTN diwajibkan untuk melakukan perawatan-pemeriksaan berkala setiap tahun (Gambar 1).
2. Dalam rangka memastikan keselamatan, PLTN dirancang sedemikian rupa sehingga mempunyai kemampuan gagal-aman (*fail-safe*), misalnya dengan adanya fasilitas pemadaman otomatis yang selalu menjaga reaktor pada kondisi aman. Dengan adanya kemampuan ini, jika operator PLTN melakukan kesalahan atau penyimpangan dari prosedur operasi yang telah ditetapkan, maka PLTN tidak akan terpengaruh secara signifikan. Selain itu dalam PLTN dirancang pula sistem saling-kunci (*interlock system*) yang mencegah operator melakukan penyimpangan terhadap prosedur operasional, yaitu dengan cara mengunci modus-modus operasional yang melanggar prosedur.

Apabila operator PLTN ternyata melakukan penyimpangan prosedur operasi karena sistem saling-kunci tidak berfungsi, maka sistem peringatan dini akan berfungsi dan kemudian secara otomatis sejumlah batang kendali masuk ke dalam teras reaktor sehingga reaktor padam dengan aman.

3. Pencegahan kesalahan operasional dan kesalahan pengambilan keputusan operator PLTN diusahakan juga melalui desain konsol/panel kendali yang mempertimbangkan faktor *human engineering* (ergonomics) berdasarkan pengalaman operasi yang lama dari pembangkit listrik tenaga termal lain. Misalnya, panel indikator yang mudah untuk dilihat, urutan letak saklar yang mudah dijangkau dan mudah dioperasikan dengan tepat, lampu peringatan yang dapat dibedakan dengan warna dan suara sesuai dengan tingkat kepentingannya. Selain itu dengan bantuan teknologi komputer maju, operator dapat mengetahui kondisi sistem PLTN secara tepat, apakah PLTN dalam kondisi anomali operasional atau dalam kondisi kecelakaan. Dengan dasar pengetahuan kondisi PLTN yang tepat, operator dapat mengambil keputusan tindakan operasional yang tepat.
4. Antisipasi terhadap kesalahan manusia dari sudut manajemen operasi PLTN dilakukan dengan: (1) Berdasarkan undang-undang yang berlaku, setiap PLTN memiliki penanggungjawab, yang mempunyai kewajiban memberi petunjuk dan konsultasi terhadap hal penting dalam pemeliharaan keselamatan PLTN; (2) Penanggungjawab PLTN memiliki wewenang penuh untuk melaksanakan tugas dan kewajibannya; (3) Operator dan perawat PLTN harus mendapat pendidikan dan latihan yang memadai untuk meningkatkan kemampuan mereka, misalnya dengan pelatihan menggunakan simulator PLTN untuk menghadapi contoh kasus yang sering terjadi; (4) Juklak operasi dan perawatan PLTN ditulis secara ringkas dan mudah difahami, dan pada bagian yang mudah disalahartikan harus diberi tanda yang mencolok sehingga mudah dimengerti dan diingat.
5. Agar keselamatan operasi PLTN tetap terjaga, salah satu cara pencegahan kesalahan operasional adalah seleksi tenaga operator. Dalam seleksi ini dipilih tenaga operator yang pandai, memiliki tingkat percaya diri tinggi dan bertanggung jawab. Operator yang terpilih harus mendapat pendidikan dan pelatihan yang memadai, termasuk pelatihan dalam berbagai kondisi operasi reaktor (operasi normal, kecelakaan serta darurat) dengan

menggunakan fasilitas simulasi khusus pada institusi pelatihan. Dengan diklat operator yang baik, maka kesalahan operator dapat dicegah.

6. Untuk meningkatkan keandalan dan keamanan operasi reaktor dilakukan beberapa pendekatan untuk mencegah kesalahan manusia, misalnya pendekatan dari segi ergonomi, psikologi, pendidikan dan kesehatan. (Tabel 1).
7. Di berbagai negara maju, seperti Jepang, telah dilakukan litbang ergonomik. Untuk mengantisipasi timbulnya kesalahan manusia telah dibuat panduan prosedur yang membimbing petugas untuk menemukan kasus dan kondisi yang mengarah kepada kesalahan manusia. Langkah-langkah yang harus dikerjakan oleh petugas atau penanggungjawab jika timbul masalah yang disebabkan oleh faktor manusia antara lain:
 - Menyelidiki dan memeriksa masalah yang timbul dengan rinci
 - Mencari jawaban dari “Mengapa kesalahan tersebut dapat terjadi”
 - Menemukan, mengevaluasi dan menganalisis penyebab masalah yang masih belum jelas dan tersembunyi
 - Memberikan rekomendasi solusi yang efektif (solusi yang memberi efek positif)Temuan semua langkah di atas dapat menjadi informasi untuk mencegah terjadinya masalah yang serupa.

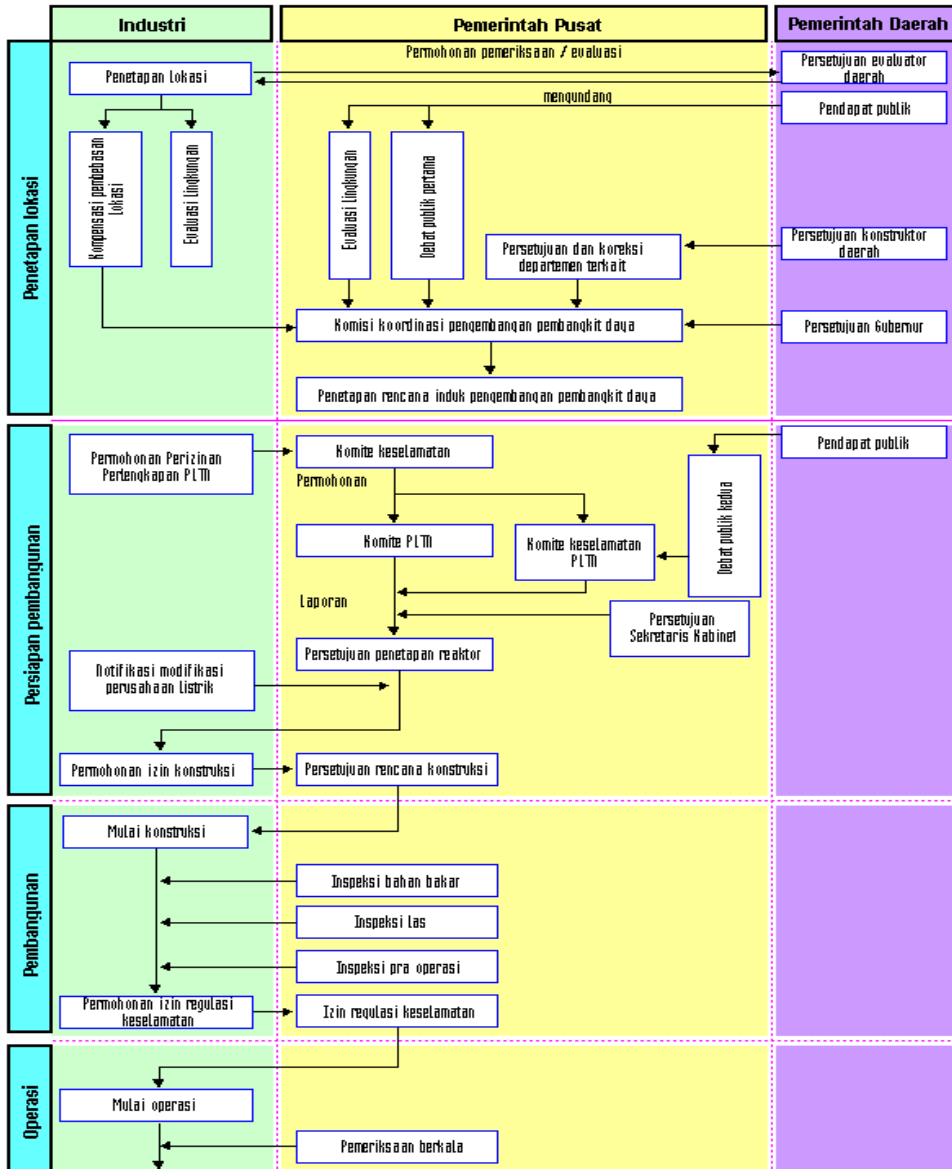
TABEL/GAMBAR :

KEGIATAN PENELITIAN YANG BERKAITAN DENGAN KESALAHAN MANUSIA (*HUMAN ERROR*) DI JEPANG

A. Bidang Penelitian Faktor Manusia: JAERI	
1. Ketentuan	Kegiatan penelitian faktor manusia berkaitan dengan fasilitas pada PLTN yang termasuk dalam lingkup keselamatan negara
2. Lokasi	Tokai, Propinsi Ibaraki
3. Waktu	1 - 1 - 1993
4. Substansi penelitian	<ul style="list-style-type: none"> ● Pengembangan metode evaluasi interaksi manusia dan mesin ● Pengembangan metode evaluasi keandalan manusia ● Klasifikasi sifat ego dan perasaan manusia
B. Faktor Manusia: Yayasan Teknik PLTN	
1. Ketentuan	Kegiatan penelitian faktor manusia pada PLTN nasional
2. Lokasi	Distrik Pelabuhan, Tokyo
3. Waktu	1 - 10 - 1988
4. Substansi penelitian	<ul style="list-style-type: none"> ● Karakter orang Jepang di pabrik internasional ● Permodelan terhadap perilaku manusia ● Penetapan metode evaluasi sistem keandalan dengan mempertimbangkan faktor manusia
C. Pusat Riset Faktor Manusia: Yayasan Riset Pembangkit Listrik Pusat	
1. Ketentuan	Kegiatan penelitian dengan fokus faktor manusia pada pekerjaan listrik di PLTN
2. Lokasi	Komae, Tokyo
3. Waktu	1 - 7 - 1988
4. Substansi penelitian	<ul style="list-style-type: none"> ● Permodelan perilaku manusia pada pekerja PLTN ● Pembuktian dan penetapan metode evaluasi sistem keandalan yang berkaitan dengan faktor manusia ● Evaluasi dan analisis terhadap data faktor manusia dalam hal ketekunan/kesungguhan mengoperasikan alat ● Informasi pangkalan data publik

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020204/01.gif> (Sep. 2003)

Tabel 1. Konsep mekanisme litbang terkait dengan kesalahan manusia



Prosedur perencanaan hingga pengoperasian PLTN

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020204/02.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Prosedur PLTN hingga pengoperasiannya

PERTANYAAN:

MUNGKINKAH KECELAKAAN PLTN CHERNOBYL DAPAT TERJADI PADA PLTN TIPE NEGARA BARAT?

JAWABAN RINGKAS

PLTN tipe negara Barat yang sekarang ini banyak beroperasi adalah tipe reaktor air tekan dan reaktor air didih. Kedua tipe PLTN ini mempunyai sifat kendali melekat, dengan demikian secara logika reaktor dalam PLTN ini tidak akan beroperasi tanpa terkendali seperti yang terjadi pada reaktor di PLTN Chernobyl. PLTN tipe Chernobyl adalah salah satu tipe PLTN yang dikembangkan oleh bekas Uni Soviet (banyak beroperasi di negara blok Timur) dan diketahui mempunyai cacat desain. Pada reaktor Chernobyl, jika reaktor sedang beroperasi pada daya rendah, dan pada saat itu oleh karena suatu sebab (sengaja maupun tak sengaja) daya meningkat, maka reaktivitas reaksi fisi juga semakin besar, dan daya meningkat tak terkendali. Oleh karena sifat yang kurang baik ini, dalam prosedur pengoperasian reaktor Chernobyl terdapat banyak aturan pengoperasian daya rendah, misalnya dilarang mengoperasikan reaktor pada daya rendah pada rentang waktu yang lama dan lain sebagainya. Kecelakaan besar pada reaktor Chernobyl terjadi karena operator melanggar beberapa prosedur operasi, dan kesalahan tersebut menimbulkan kecelakaan yang besar. Pada saat kecelakaan Chernobyl, daya reaktor meningkat tak terkendali, dan kemudian tekanan uap air dalam pipa tekan reaktor secara mendadak meningkat, sebagai akibatnya terjadi ledakan. Ledakan ini melemparkan zat radioaktif yang ada dalam reaktor ke udara dan menyebarkan zat tersebut ke lingkungan di sekitar reaktor.

JAWABAN RINCI

Di Jepang dilakukan eksperimen mengenai kecelakaan Chernobyl⁽¹⁾ yang tidak pernah akan terjadi di Jepang (Gambar 1).

Reaktor Chernobyl (Gambar 2) adalah reaktor yang dirancang oleh bekas Uni Soviet dan mempunyai karakteristik berupa ketidakstabilan pada operasi daya rendah. Kelemahan utama desain keselamatan dari reaktor ini adalah koefisien reaktivitas void yang positif pada daya rendah. Upaya peningkatan daya sedikit saja pada saat reaktor beroperasi pada daya rendah akan menyebabkan peningkatan jumlah uap yang membawa pada peningkatan daya reaktor secara drastis.

Kelemahan ini, setingkat dengan cacat, sangat mencolok dan tidak mungkin bisa lolos dari komisi keselamatan di negara Barat yang pengawasannya ketat seperti Jepang. Oleh karena itu, untuk menutupi kekurangan ini, disusun aturan dan pembatasan terhadap kondisi operasional reaktor.

Pada saat itu, dengan tujuan melakukan suatu eksperimen⁽¹⁾, reaktor dioperasikan pada daya rendah dalam rentang waktu yang lama. Pada kondisi ini tanda peringatan berbunyi dan seharusnya operator menyisipkan masuk batang kendali pengaman (yang menjamin reaktor dapat berhenti dengan aman) ke dalam teras reaktor, tetapi sebaliknya yang dilakukan operator adalah menarik ke luar batang kendali dari dalam teras reaktor, dan mem"by-pass" rangkaian sistem pemancung daya otomatis. Dengan demikian operator telah melakukan banyak kesalahan dan penyimpangan prosedur operasi (Gambar 4). Penyimpangan prosedur ini menyebabkan kenaikan daya reaktor secara drastis, sehingga panas yang timbul merusak pipa tekan yang berisi bahan bakar yang selanjutnya menyebabkan lonjakan besar volume uap air dan produksi gas hidrogen. Akhirnya terjadi ledakan karena tekanan yang melonjak. Ledakan ini melemparkan reruntuhan teras reaktor yang mengandung zat radioaktif ke luar reaktor serta menyebarkan zat tersebut ke lingkungan.

Berbeda dengan reaktor Chernobyl, reaktor tipe Barat yang banyak beroperasi pada saat ini mempunyai sifat kendali melekat⁽²⁾. Sifat ini akan menekan atau melawan kenaikan daya yang timbul (Gambar 5 dan 6). Dengan berpedoman pada prosedur operasi, reaktor akan tetap stabil pada semua tingkat daya, dan tidak akan mudah mengalami lonjakan daya drastis yang tak terkendali.

Pada PLTN sekarang, untuk menghindari kesalahan manusia dalam mengambil keputusan dan mengoperasikan alat, semua sistem penting yang terkait dengan keselamatan seperti sistem pemancung daya reaktor darurat, dirancang untuk bekerja secara otomatis tanpa campur tangan manusia.

Selain itu, pendidikan dan pelatihan operator juga dilakukan secara cermat. Di dalam pendidikan dan pelatihan operator, operator dididik dengan menggunakan simulator, sehingga reaktor dalam berbagai kondisi dapat disimulasikan secara berulang-ulang. Dengan demikian kemampuan operator meningkat dan operator tidak mudah melakukan kesalahan mengambil tindakan.

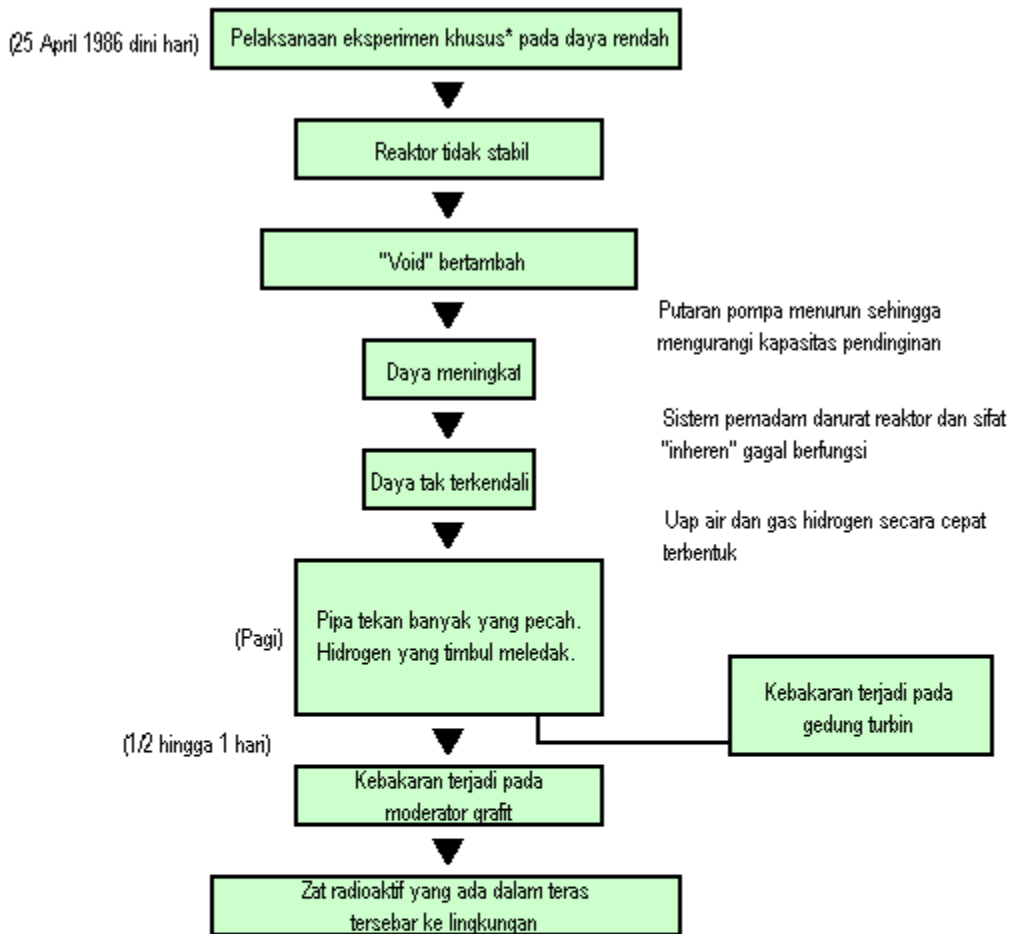
Berdasarkan uraian di atas dapat diketahui bahwa kecelakaan Chernobyl tidak mungkin terjadi pada PLTN buatan negara blok Barat yang banyak beroperasi pada saat ini.

Sehubungan dengan kecelakaan Chernobyl, pemerintah Rusia telah melakukan usaha antisipasi dan perbaikan terhadap reaktor seperti yang di Chernobyl yang saat ini masih beroperasi. Dalam usaha tersebut pemerintah Rusia melengkapi fasilitas reaktor yang dapat menahan kenaikan daya mendadak serta memperkuat diklat operator reaktor. Selain itu semua rencana pembangunan reaktor tipe Chernobyl dihentikan, dan sebagai gantinya dirancang tipe reaktor air ringan baru yang dapat disejajarkan dengan PLTN dari negara blok Barat, yaitu reaktor tipe VVER.

Penjelasan:

1. Eksperimen untuk mengetahui besar daya yang dapat dimanfaatkan dari turbin jika permintaan daya dari beban tiba-tiba berhenti.
2. Apabila reaktivitas fisi meningkat, maka daya reaktor meningkat, kerapatan moderator neutron (berupa air) menurun (koefisien densitas moderator). Akibat selanjutnya, volume uap meningkat sehingga kecepatan neutron tidak diperlambat (tak termoderasi). Oleh karena itu neutron menjadi tidak mudah terserap oleh U-235 dan reaksi fisi menurun (koefisien void, negatif). Mekanisme lain (koefisien Doppler, negatif) yaitu jika temperatur U-238 dalam bahan bakar meningkat maka neutron menjadi mudah diserap (tanpa reaksi fisi) dan fraksi neutron yang diserap U-235 yang menghasilkan reaksi fisi berkurang (reaksi fisi berkurang). Gabungan dari semua mekanisme ini membentuk suatu sifat yang disebut sifat kendali melekat, dengan karakter utama menahan peningkatan daya reaktor.

GAMBAR :



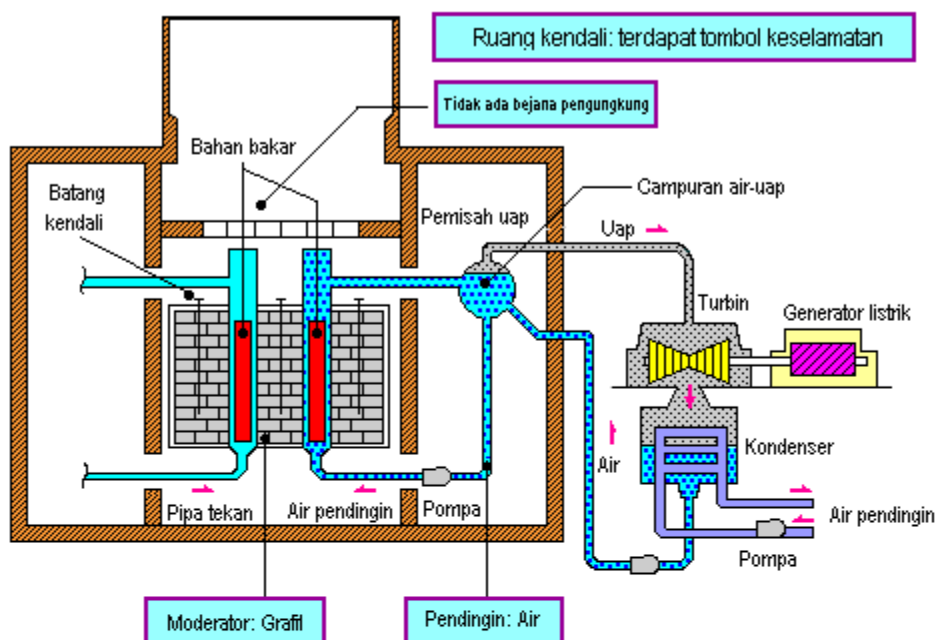
* Eksperimen khusus untuk mengetahui berapa daya listrik yang akan dihasilkan oleh putaran turbin pembangkit listrik jika permintaan listrik dari luar terhenti.

Kronologi kecelakaan PLTN Chernobyl

Sumber: <http://next-atn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/01.gif> (Sep. 2003)

Gambar 1. Kronologis terjadinya kecelakaan pada PLTN Chernobyl

(Reaktor pendingin air mendidih moderator grafit, RBMK)



	Reaktor tipe blok barat	PLTN Chernobyl
Sifat kendali melekat	Ada	Pada kondisi tertentu menghilang
Pendingin reaktor	Air	Air
Moderator neutron	Air	Grafit
Perangkat keselamatan	Sistem saling-kunci	Mudah dilepas
Bejana pengungkung	Ada	Tidak ada

Konstruksi PLTN Chernobyl

Sumber: <http://mext-atrn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/02.gif> (Sep. 2003)

Gambar 2. Konstruksi PLTN Chernobyl

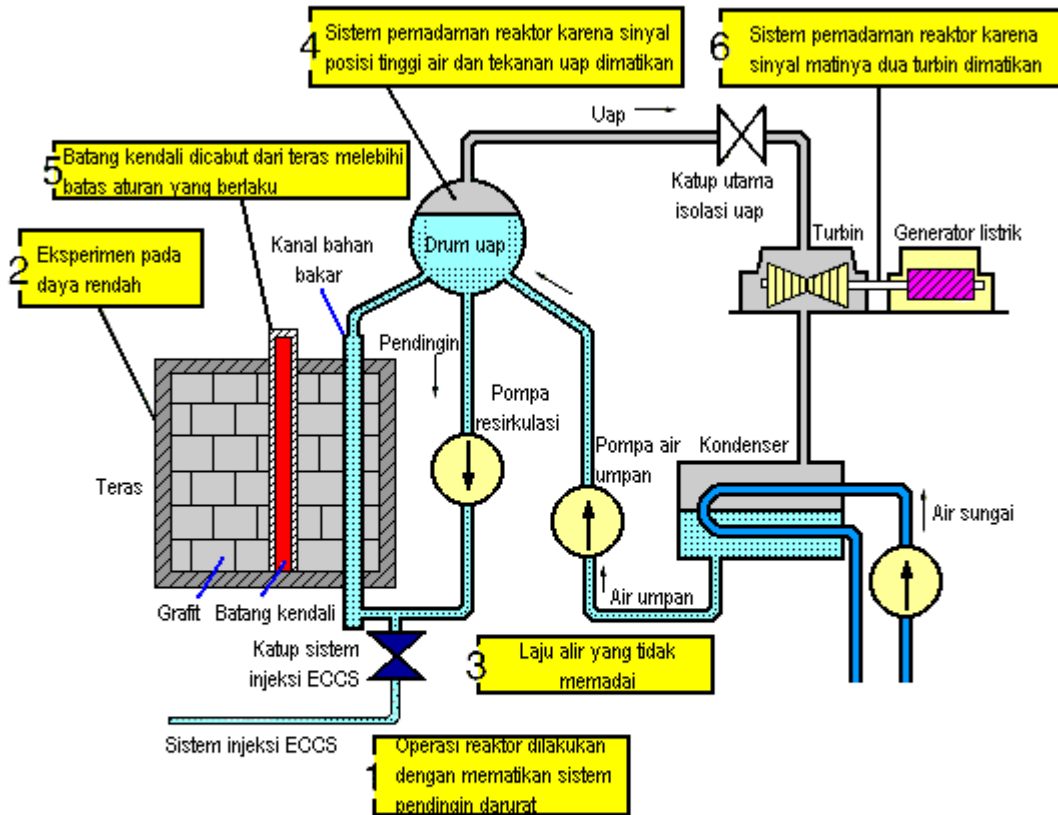
LEMAHNYA BUDAYA KESELAMATAN

PROBLEM DESAIN	PELANGGARAN ATURAN OLEH OPERATOR	PROBLEM MANAJEMEN OPERASI
<ul style="list-style-type: none">* Tidak ada bejana pengungku* Mudah mengurangi perlengkapan keselamatan* Reaktor mempunyai sifat: pada daya rendah, jika dalam pendingin timbul uap maka daya akan naik (koefisien void positif)	<ul style="list-style-type: none">* Menarik batang kendali melebihi peraturan yang berlaku* Mengoperasikan PLTN tanpa ECCS (ECCS dimatikan)* Eksperimen dilakukan pada daya relatif rendah. Pada daya rendah (20% dari daya penuh) PLTN tidak stabil. Karena itu dilarang mengoperasikan reaktor secara kontinu pada daya rendah.	<ul style="list-style-type: none">* Supervisor bukan pakar reaktor nuklir* Melakukan eksperimen khusus tanpa prosedur yang benar dan tidak ada pertimbangan yang berkaitan dengan sifat-sifat PLTN secara utuh.* Pertimbangan terhadap antisipasi keselamatan yang tidak memadai.

PENYEBAB KECELAKAAN PLTN CHERNOBYL

Sumber: <http://next-abn.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/03.gif> (Sep. 2003)

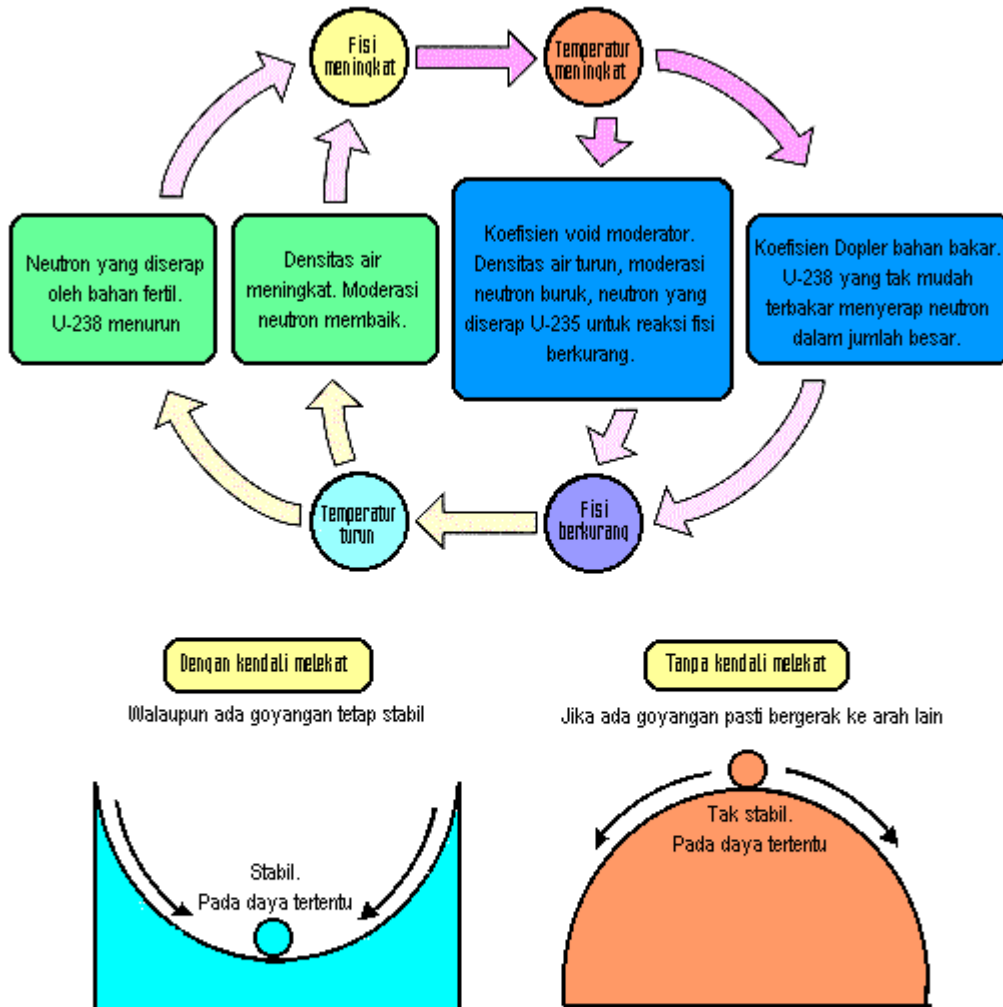
Gambar 3. Penyebab terjadinya kecelakaan PLTN Chernobyl



Pelanggaran operator pada saat terjadinya kecelakaan PLTN Chernobyl

Sumber: <http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/04.gif> (Sep. 2003)

Gambar 4. Penyimpangan prosedur oleh operator pada saat kecelakaan PLTN Chernobyl



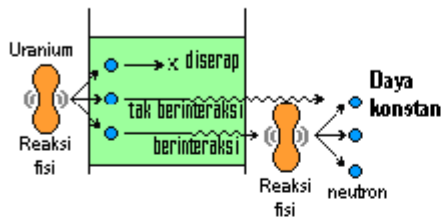
Keselamatan inheren reaktor nuklir (sifat kendali melekat)

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/05.gif> (Sep. 2003)

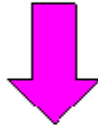
Gambar 5. Sistem keselamatan melekat PLTN (sifat kendali melekat)

Reaktor air ringan

Reaktivitas void: minus
Pendingin dan moderator: air

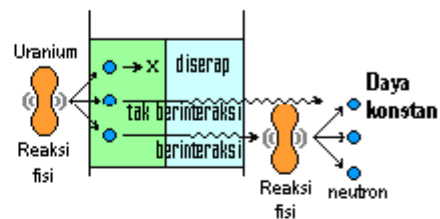


Bila air berkurang

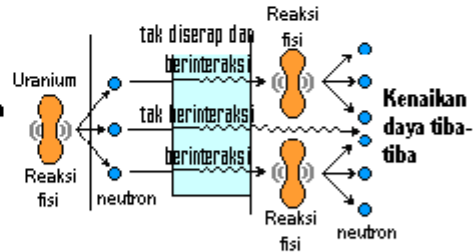


Reaktor Chernobyl

Reaktivitas void: plus
Pendingin: air Moderator: grafit



Bila air berkurang



Perbedaan sistem kendali melekat antara reaktor tipe Chernobyl dan reaktor negara blok Barat

Sumber: <http://next-atm.jst.go.jp/atomica/pict/15/15020205/06.gif> (Sep. 2003)

Gambar 6. Perbedaan sifat kendali melekat antara reaktor tipe Chernobyl dan desain Barat