

**ANALISIS DESAIN & KECELAKAAN  
REAKTOR CHERNOBYL  
( RBMK. 1000 )**

Oleh : Ir. Agus Budhie Wijatna \*)

### INTISARI

*Dalam proses rancang-bangun dan kereakayaan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, faktor keselamatan merupakan pedoman yang paling utama. Hal ini mengingat bahwa dalam reaktor nuklir terhimpun bahan bakar, penumpukan hasil belah yang radioaktif dan selama reaktor bekerja dalam teras terhimpun kalor yang sangat besar. Oleh karena itu sistem keselamatan yang dibuat harus mampu mencegah atau memperkecil risiko yang mungkin timbul dalam operasi normal maupun pada saat kecelakaan yang terparah sekalipun.*

*Konsep keselamatan terpasang ( inherent safety ), konsep hambatan ganda ( multiple barrier concept ), sistem penyelamat darurat ( engineered safeguards ) dan sistem peralatan cadangan merupakan sebagian dari faktor-faktor keselamatan yang perlu diperhitungkan.*

*Tingkat risiko dan penyebab kecelakaan pada reaktor Chernobyl (RBMK. 1000) merupakan contoh akibat diabaikannya faktor-faktor keselamatan tersebut di atas. Suatu kecelakaan yang menurut catatan sejarah pengoperasian reaktor merupakan kecelakaan terparah.*

### PENDAHULUAN

Reaktor Chernobyl (RBMK.1000) mirip dengan tipe reaktor air mendidih dengan grafit sebagai bahan mederator neutron.

Ditinjau dari sistem pendinginan teras reaktor, jenis reaktor ini mirip dengan tipe BWR (Boiling Water Reactor), perbedaannya bahwa di dalam BWR aliran pendingin ( $H_2O$ ) merendam seluruh teras reaktor atau mengalir di luar kelongsong-kelongsong bahan bakar dan sekaligus air berfungsi sebagai moderator, sedang dalam reaktor Chernobyl air hanya berfungsi sebagai pendingin dan untuk masuk ke teras reaktor aliran pendingin melewati pipa-pipa pembagi aliran (header) yang di dalamnya terdapat bahan bakar.

Namun jika ditinjau dari terdapatnya pemisahan bahan mederator dan sistem pendinginnya, reaktor Chernobyl mirip dengan tipe PHWR ( Pressurized Heavy Water Reaktor ), perbedaannya ialah bahwa PHWR menggunakan air berat ( $D_2O$ ) sebagai moderator dan sistem moderator disirkulasikan agar panas yang diterima dari

teras reaktor dapat dibuang melalui alat pemindah panas ( heat exchanger ), sedang pada reaktor Chernobyl moderator grafit dalam bentuk padat mengelilingi permukaan luar pipa-pipa tekan pembagi aliran. karena itu temperatur moderator grafit sangat tinggi  $700^{\circ}C - 1000^{\circ}C$ , keadaan ini mempunyai potensi yang sangat besar untuk menimbulkan kecelakaan.

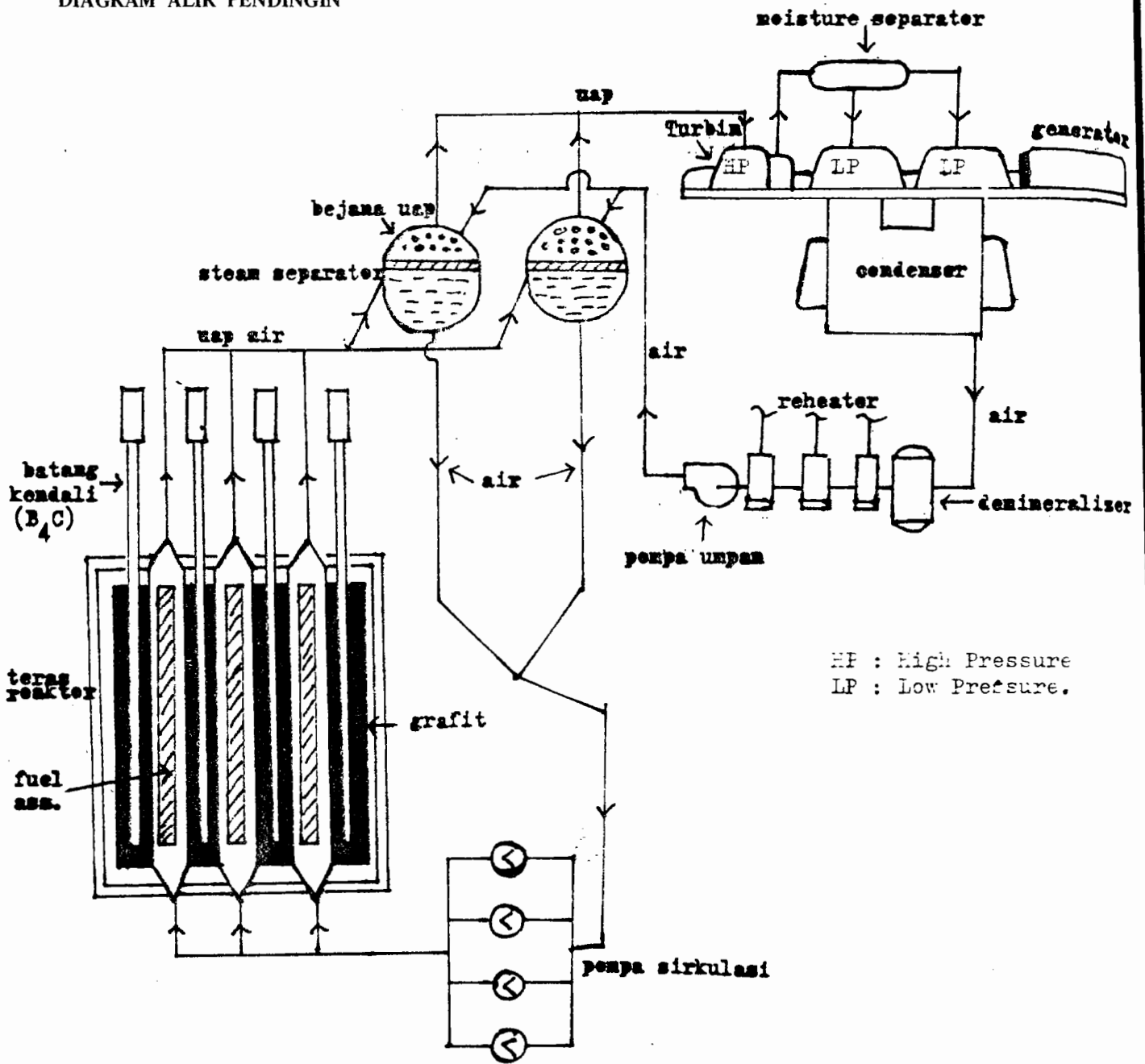
Di samping spesifikasi di atas, spesifikasi lainnya adalah tidak dibuatnya sistem kungkungan ( containment ) yang berfungsi sebagai penghalang terakhir bagi pelepasan zat radioaktif hasil reaksi pembelahan. Hal ini yang menyebabkan pada saat terjadi kecelakaan tingkat kontaminasi pada lingkungan sangat tinggi.

Dari uraian di atas nampak bahwa reaktor tipe Chernobyl sangat unit dan kompleks, dan ini mungkin yang menyebabkan belum adanya negara di luar Uni Soviet yang membangun PLTN seperti reaktor tipe Chernobyl tersebut.

---

\*) Anggauta staf pengajar Jurusan TN—FT.UGM.

DIAGRAM ALIR PENDINGIN



Gambar 1 menunjukkan satu kalang ( loop ) diagram alir pendingin reaktor Chernobyl ( RBMK. 1000 ) yang menggunakan prinsip satu daur dengan fluida H<sub>2</sub>O sebagai pendingin dan blok grafit sebagai moderator.

Air ringan yang digerakkan oleh 4 buah pompa sirkulasi (masing-masing mampu memindahkan air 7000 m<sup>3</sup>/jam), mengalir menuju teras reaktor dengan melewati 22 pembagi aliran (header). Aliran air yang terbagi ini kemudian masuk ke dalam pipa-pipa tekan di mana di dalamnya terdapat perangkat-perangkat bahan bakar (fuel assembly) reaktor. Panas yang dibangkitkan oleh bahan bakar reaktor digunakan untuk menaikkan temperatur air pendingin hingga mencapai titik didihnya. Keluar dari saluran pipa-pipa tekan, aliran uap air disatukan oleh "header" dan kemudian masuk ke dalam dua buah bejana uap (steam drums), di mana di dalamnya terdapat alat pemisah uap (steam separator). Uap jenuh (saturated steam) yang telah dipisahkan dari butir-butir air oleh "steam separator" mengalir menuju sistem turbogenerator yang terdiri dari sebuah turbin tekanan tinggi dan empat buah turbin tekanan rendah, sedang butir-butir air yang terkandung dalam uap dari "steam separator" disirkulasikan kembali ke teras reaktor melalui pompa-pompa sirkulasi. Uap dari turbin tekanan tinggi sebelum masuk ke turbin tekanan rendah dilewatkan ke alat pemisah butir-butir air (moisture separator) dan pemanas ulang (reheater). Putaran turbin kemudian digunakan untuk memutar generator listrik sehingga dihasilkan daya listrik. Sedang uap bekas dari turbin dialirkan ke kondensor yang didinginkan oleh air laut sehingga berkondensasi menjadi air lagi.

Pompa air umpan (feedwater pump) kemudian memompa air kondensat ke alat pembersih mineral (demineralizer) sehingga air kondensat yang mengalir ke teras reaktor sudah terbebas dari mineral-mineral pengotor (full flow purification). Sebelum masuk ke teras reaktor air kondensat dipanaskan secara bertahap oleh alat-alat pemanas (heater) yang mengambil panas dari sebagian aliran uap yang mengalir pada turbin tekanan tinggi dan turbin tekanan rendah. Air kemudian diumpankan lagi ke bejana uap dan dipompa oleh pompa-pompa sirkulasi untuk mengambil panas dalam teras.

Dengan demikian setiap kalang (loop) terdiri dari empat buah pompa sirkulasi dua bejana uap/dua alat pemisah uap, 22 "header" dan sebuah sistem turbogenerator yang mampu menghasilkan daya listrik 500 Mwe/kalang.

Dalam pengoperasiannya, satu unit reaktor Chernobyl memiliki dua kalang, jadi aliran pendingin dari reaktor

terbagi menjadi dua aliran secara paralel dengan pembangkitan panas total 3200 MWt dan menghasilkan daya listrik 1000 MWe. Beberapa data sistem pendingin reaktor Chernobyl tertera dalam Tabel 1.

Jumlah loop perunit	2
Data Bejana Uap	
Jumlah perunit	4
Diameter	2,3 m
Panjang	30,7 m
Tebal dinding	104 mm
Berat	200 ton
Tekanan	68,5 bar
Data Pompa	
Jumlah perunit	8
Debit tiap pompa	7000 m <sup>3</sup> /jam
Kecepatan	1000 rpm
Daya pompa total	55 MW
Berat pompa	100 ton
Data Pendingin	
Temperatur inlet	265° C
Tekanan inlet	78 bar
Temperatur outlet	289° C
Tekanan outlet	74 bar
Kualitas uap max	20 - 25 % berat
Bahan pipa sal pendingin (out of core)	Austenitic steel

Tabel 1. Data sistem pendingin dan perlengkapan penunjangnya.

## ANALISIS DESAIN TERAS

Reaktor Chernobyl (RBMK. 1000) menggunakan bahan bakar Uranium alam dengan pengkayaan (enrichment) sekitar 1,8 - 2,1 % U-235 dalam bentuk senyawa Uranium dioksida (UO<sub>2</sub>). Pengkayaan Uranium yang rendah ini dimungkinkan karena digunakannya grafit sebagai moderator.

Serbuk UO<sub>2</sub> dikompakkan dalam bentuk pil-pil (pellets) dengan diameter 11,7 mm dan panjang 15 mm, kemudian setiap 13 pil disusun secara axial membentuk batang bahan bakar yang kelongsongnya terbuat dari bahan Zirkonium - Nibium Alloy (Zr-Nb Alloy) dengan diameter luar kelongsong 13,6 mm & tebal kelongsong 0,9 mm. Zirkonium merupakan bahan yang mempunyai koefisien

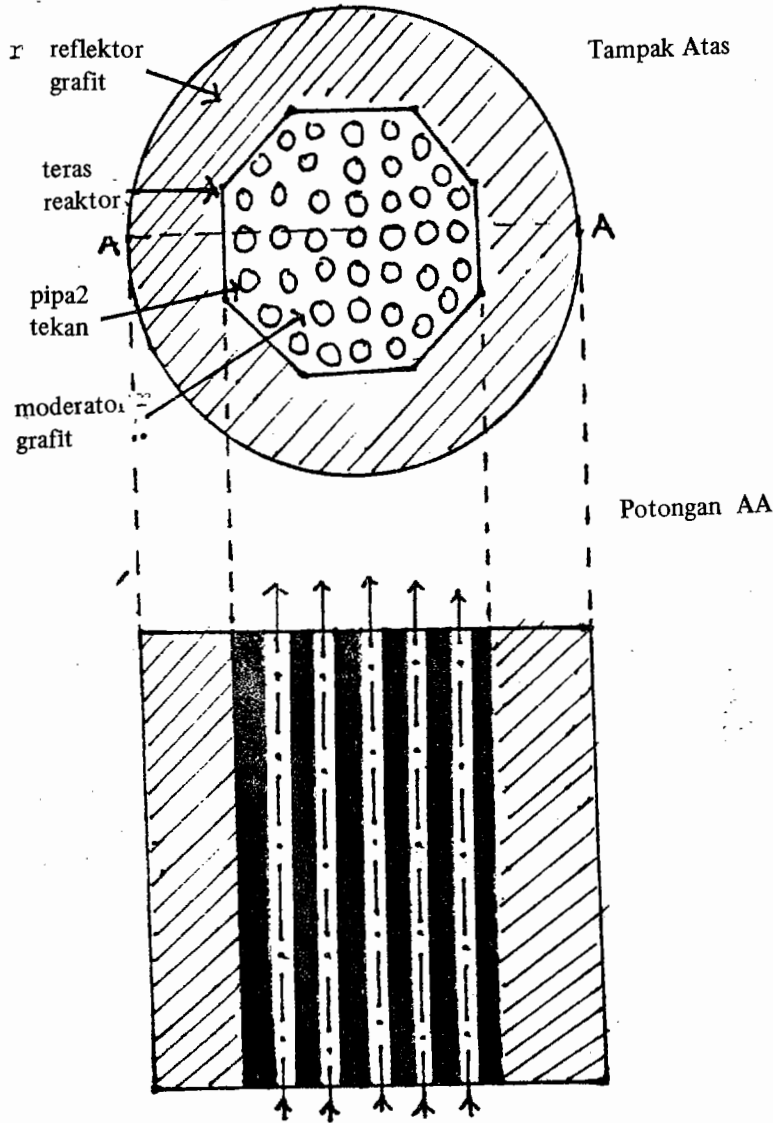
serapan neutron kecil dan mempunyai konduktivitas panas baik, sehingga penggunaan Zr sebagai kelongsong akan mempertinggi faktor ekonomi neutron dan mempertinggi efektivitas perpindahan panas dari bahan bakar ke pendingin.

Selanjutnya setiap 18 batang-bahan bakar disusun secara axial membentuk perangkat bahan bakar (fuel assembly) yang panjang totalnya 3644 mm & panjang aktive 3490 mm. Perangkat bahan bakar ini kemudian disusun menurut kisi oktagon yang terdiri dari 1693 saluran pipa-pipa tekan membentuk teras reaktor dan dikelilingi oleh grafit membentuk silinder tegak.

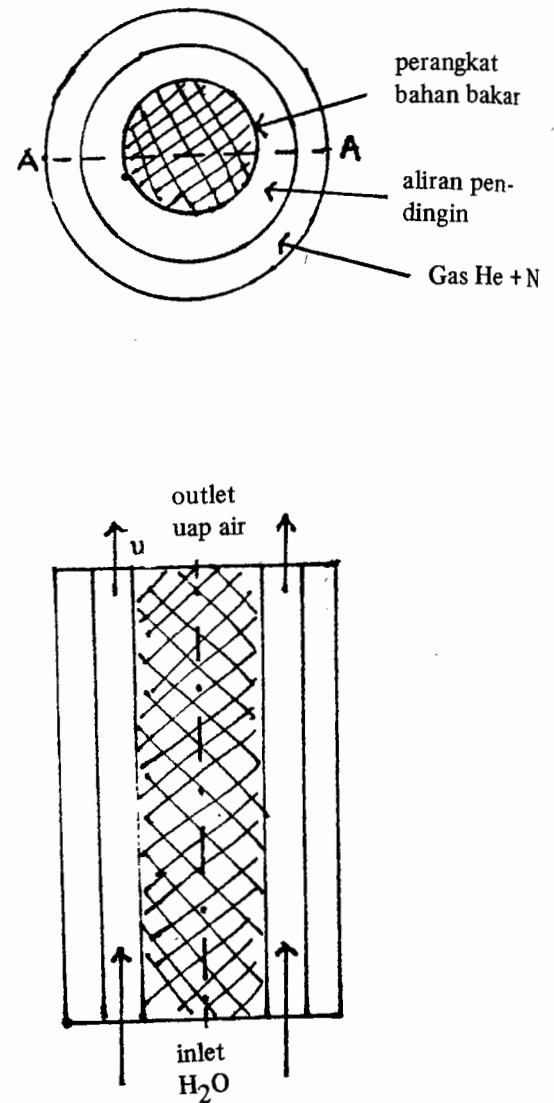
Di antara 1693 saluran pipa tekan tersebut, 170 saluran berfungsi sebagai pipa pengarah batang kendali yang terbuat dari Boron Carbida, 9 saluran kosong berfungsi untuk meratakan distribusi fluxneutron dan 1514 saluran diisi perangkat-perangkat bahan bakar di mana setiap saluran berisi 2 buah perangkat bahan bakar.

Untuk setiap teras reaktor memerlukan  $UO_2$  sebanyak 204 ton dengan "burn up" 18,5 MWd/kg.

Gambar susunan teras & perangkat bahan bakar disajikan dalam gambar 2.



Gambar 2.a. Teras reaktor dan pipa-pipa tekannya



Gambar 2.b. Pipa tekan dan perangkat bahan bakar.

## ANALISIS KEUNGGULAN & KELEMAHAN REAKTOR CHERNOBYL

Ditinjau dari segi fisika reaktor dan sistem keselamatannya, reaktor Chernobyl mempunyai keunggulan-keunggulan sebagai berikut :

- Kemampuan moderasi grafit adalah sangat baik. sehingga penggunaan grafit sebagai moderator dalam reaktor Chernobyl, menyebabkan kritikalitas reaktor pada daya 3200 MWt dapat dicapai hanya dengan pengkayaan bahan bakar 1,8 % - 2,1 %.
- Desain dari teras memungkinkan penggantian bahan bakar dalam kondisi reaktor beroperasi (on load refueling), sehingga waktu pengoperasian reaktor pertahunnya (plant factor) lebih panjang.
- Tidak digunakannya sistem kungkungan (containment system) sebagai lapisan penghalang terakhir, dari segi ekonomi memang memperkecil ongkos pembangunan. namun ditinjau dari segi keselamatan hal ini sangat berbahaya.
- Adanya 80% Helium + 20% Nitrogen yang mengisi ruang antara pipa yang dialiri pendingin dan moderator grafit akan memperkecil kehilangan panas (heat loss) sehingga mempertinggi efektifitas dan efisiensi pendinginan air pendingin serta mencegah teroksidasinya moderator grafit.

Sedang kelemahan-kelemahan reaktor Chernobyl adalah sebagai berikut, :

- Grafit yang berfungsi sebagai moderator tidak diinginkan, sehingga moderator grafit lebih merupakan sumber panas daripada sebagai "heatsink".
- Reaktor mempunyai koefisien reaktivitas positif (positive void coefficient of reactivity), hal ini disebabkan penggunaan grafit sebagai moderator akan menyebabkan neutron termoderasi secara sempurna, sehingga pada saat reaktor kehilangan pendingin (pendingin air dalam seluruh teras berubah menjadi uap;  $\sigma_a \text{ air} > \sigma_a \text{ uap}$ ) reaktivitas/daya reaktor akan naik dengan cepat.
- Reaktivitas positif tersebut harus diimbangi oleh sistem pancung (scram-system) yang mempunyai respon cepat dengan probabilitas gagal sekecil-kecilnya. Pada reaktor Chernobyl ternyata tidak dilengkapi dengan sistem pancung cadangan/darurat.
- Sistem pendingin teras darurat (ECCS, Emergency Core Cooling System) tidak dilengkapi dengan "spray cooling system", sehingga pada saat terjadi kecelakaan LOCA (Loss of Cooling Accident) teras

reaktor tidak dapat direndam oleh air dari ECCS. Sistem turbogenerator menggunakan konsep "Once through steam generator", sehingga kapasitas penggunaan uap rendah dan trasiyen daya cepat; kondisi ini sangat berbahaya, karena pada saat permintaan daya listrik turun, maka kapasitas penggunaan uap oleh turbin akan lebih rendah lagi, sehingga kalau tidak cepat diimbangi oleh penurunan batang kendali untuk menurunkan panas pembangkitan dalam teras reaktor akan menyebabkan sistem saluran pendingin mengalami "over heating & over pressure" yang pada akhirnya akan menyebabkan kelongsong-kelongsong bahan bakar meleleh.

Dari analisis di atas nampak bahwa desain reaktor Chernobyl (RBMK. 1000) sangat mengabaikan aspek-aspek keselamatan yang seharusnya dimiliki oleh setiap pembangkit listrik dengan tenaga nuklir.

## ANALISIS KECELAKAAN

Reaktor Chernobyl yang mulai beroperasi tahun 1978 - 1984 terdiri dari empat unit reaktor yang masing-masing mampu membangkitkan daya listrik sebesar 1000 MWe; di antara keempat unit reaktor tersebut, reaktor unit-4 mengalami kecelakaan pada tanggal 26 April 1986, pukul 01.23 waktu setempat.

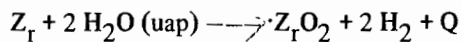
Kecelakaan terjadi pada saat dilakukan "maintenance" dan percobaan untuk menentukan sifat-sifat transien turbogenerator.

Pada saat kecelakaan terjadi reaktor dalam keadaan "shutdown" pada daya 7% dari tingkat daya nominalnya dan sistem pendingin darurat (ECCS) dilumpuhkan atau di non aktifkan agar ECCS tidak bereaksi pada saat dilakukan percobaan transien daya. Konsekuensi dari kondisi ini adalah tidak bekerjanya sistem proteksi reaktor dan pengendalian reaktivitas secara otomatis sulit dilakukan.

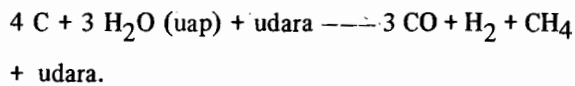
## TAHAP-TAHAP KECELAKAAN :

- Kecelakaan diawali dengan dihentikannya sistem turbogenerator, hal ini menyebabkan temperatur dan tekanan sistem pendingin naik dengan cepat.
- Sistem pemancung (shut down) otomatis & sistem ECCS yang seharusnya bekerja pada kondisi tersebut tidak dapat berreaksi karena sebelumnya sudah dilumpuhkan.

- Seluruh pendingin air berubah fase menjadi uap temperatur dan tekanan pipa-pipa tekan pembagi aliran yang terbuat dari bahan Zirkonium naik, sehingga menimbulkan reaksi eksoterm :



Hidrogen dan oksigen hasil radiolisa menimbulkan ledakan sehingga saluran pipa-pipa tekan pecah. Pecahnya saluran pipa tekan menyebabkan uap air masuk ke dalam moderator grafit dan timbul reaksi.



Ledakan kimia yang terjadi menyebabkan keluarnya isotop-isotop hasil belah yang radioaktif dan menyebabkan rusaknya teras reaktor dan gedung reaktor beserta fasilitas di dalamnya.

Dengan tidak dibuatnya sistem kungkungan (containment) zat radioaktif langsung terlepas ke lingkungan, sehingga menimbulkan kontaminasi di sekeliling stasiun pembangkit listrik tenaga nuklir tersebut.

Laporan IAEA yang dimuat dalam majalah Nuclear Engineering International terbitan Juni 1986 menyebutkan bahwa :

- Tercatat 2 orang meninggal, seorang akibat terkena uap air dan seorang lagi tertimpa pecahan material karena ledakan.
- 27 April 1986 dilakukan evakuasi penduduk dalam radius 30 km dari pusat reaktor, yaitu sekitar 90.000 orang.
- 204 orang termasuk operator menerima paparan radiasi antara 1 sampai 4 kali dari dosis ambang normal.

- 18 orang operator menerima dosis lebih dari 4 kali dari dosis ambang normal.

## KESIMPULAN

- \* Jika dibandingkan dengan kecelakaan-kecelakaan reaktor nuklir yang pernah terjadi, maka musibah Chernobyl adalah yang terparah, hal ini disebabkan tidak diperhatikan aspek-aspek keselamatan reaktor selama proses rancang-bangun, terutama mengenai falsafah pertahanan berlapis terhadap kemungkinan bocornya radiasi (Multiple barriers to release of radioactivity) baik pada kondisi operasi normal maupun kecelakaan.
- \* Di samping itu dalam proses rancang-bangun perlu dimasukkan sifat "Inherent Safety" misal sifat koefisien reaktivitas negatif, reaktor Chernobyl dirancang mempunyai sifat koefisien reaktivitas positif.
- \* Faktor kesalahan manusia (ergonomik) juga perlu dipertimbangkan dalam proses rancang-bangun.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Iyos Subki, M.Sc., "Keselamatan reaktor nuklir, suatu pendekatan komprehensif", seminar PLTN & Teknologi reaktor, Bandung 1986.
2. "RBMK. 1000 design & Chernobyl-the IAEA Visit"; Nuclear Engineering International; Vol. 31 No. 383-Juni 1986.
3. "Soviet Containment design & More die from effects of Chernobyl"; Nuclear Engineering International; Vol 31 No. 384 - Juli 1986.