

KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR SUATU PENDEKATAN KOMPREHENSIF

Iyos Subki

Badan Tenaga Atom Nasional

PENDAHULUAN

Isyu utama tentang reaktor nuklir atau Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) yang banyak dibicarakan dalam media massa dan kalangan organisasi profesi meliputi 3 hal, yaitu :

1. paparan radioaktifitas dan efeknya terhadap manusia dan lingkungan
2. pengelolaan sampah radioaktif tingkat tinggi
3. keselamatan PLTN

Dengan terjadinya kecelakaan nuklir Three Miles Island unit-2 (TMI-2) di Amerika Serikat tahun 1979 dan kecelakaan nuklir Chernobyl unit-4 di Rusia tahun 1986 ini, maka kiranya tepat untuk memusatkan perhatian pada topik no.3 yaitu keselamatan reaktor nuklir.

Prestasi keselamatan industri nuklir, hingga terjadinya kecelakaan Chernobyl-4, telah mengumpulkan pengalaman sebanyak 3800 tahun-reaktor tanpa menimbulkan cedera ataupun kematian terhadap manusia disebabkan oleh radiasi ataupun kecelakaan nuklir. Prestasi keselamatan ini terutama merupakan hasil daripada penerapan yang ketat falsafah keselamatan berlapis, kriteria dan standar yang berkualitas tinggi.

Kecelakaan nuklir di Chernobyl-4 di Rusia yang telah membawa korban 31 orang meninggal dan 200 orang sakit radiasi seolah menghapus citra dan prestasi luar biasa industri di luar Rusia. Tak sebarang boleh berpuas diri dengan keadaan ini dan segala usaha secara konseptual perlu dilaksanakan untuk meningkatkan keselamatan industri nuklir dan bahkan keselamatan industri lainnya di luar nuklir.

Dari Reaktor /Safety Study WASH-1400 (Rasmussen 1975) telah ditunjukkan dan diramalkan dengan tepat kecenderungan berikut :

- a. resiko terhadap masyarakat timbul dari kecelakaan yang meliputi pelelehan bahan bakar
- b. pelelehan teras reaktor menimbulkan beban termik dan tekanan terhadap struktur isolasi (containment)

- c. sikuensi kecelakaan yang dominan terutama disebabkan oleh kehilangan pendingin tingkat kecil (small loss of coolant accident), transien, dan interaksi sisten. LOCA besar tidak menimbulkan potensi bahaya yang besar
- d. keandalan sisten keselamatan teknologi belum tinggi, dan ini didominasi oleh kesalahan manusiawi serta gangguan pada penyetesan dan pemeliharaan.
- e. produksi dan ledakan H₂ didalam struktur isolasi.

Kecelakaan nuklir di TMI-2 dan Chernobyl-4 meskipun berbeda skala akibatnya, telah di identifikasikan oleh studi WASH-1400. Sedangkan penanggulangannya dapat dilaksanakan dengan penerapan falsafah pertahanan berlapis secara konsisten.

Falsafah Pertahanan Berlapis dapat dilukiskan sebagai terdiri atas 3 eselon.

Eselon pertama:

1. desain sisten yang sehat dan konstruksi, operasi dan pemeliharaan dengan standar kualitas yang tinggi,
2. Q.A. program,
3. toleransi yang tinggi terhadap kerusakan komponen,
4. komponen dan bahan yang teruji,
5. instrumentasi dan kendali yang berlapis (redundant).

Eselon kedua:

sistem proteksi jika terjadi kegagalan komponen ataupun kesalahan manusiawi,

1. sisten penghenti reaktor otomatis,
2. sisten deteksi kegagalan,
3. sumberdaya darurat yang berlapis,
4. sisten pendingin panas sisa.

Eselon Ketiga:

menambah ambang keselamatan, memberikan perlindungan pada penduduk dan lingkungan bila terjadi kegagalan pada eselon kesatu dan atau eselon kedua,

1. struktur isolasi dengan beton pratekan setebal 130 cm dan
2. sistem pendingin darurat (ECCS), akan mendinginkan teras bila terjadi kehilangan pendingin.

Peranan struktur isolasi (containment) pada kedua kecelakaan nuklir di atas sangat menentukan ditinjau dari segi akibatnya terhadap keselamatan lingkungan. Pada kecelakaan TMI-2, dimana berbagai cacat sistem dan kesalahan manusiawi telah terjadi tapi karena struktur isolasi berfungsi dengan efektif maka akibatnya terhadap lingkungan dan kesehatan sama sekali tidak ada.

Sebaliknya pada kecelakaan Chernobyl-4 dimana terdapat cacat desain, komponen dan kesalahan manusiawi, akibatnya sangat berat dan merupakan malapetaka, disebabkan terutama karena tidak adanya struktur isolasi.

Terdapat perbedaan tingkat keselamatan yang menyolok antara PLTN di luar Rusia terutama setelah perbaikan-perbaikan pasca TMI-2, dengan PLTN di Rusia khususnya tipe RBMK.

Perbaikan-perbaikan pada sistem keselamatan dilaksanakan secara komprehensif dengan penerapan falsafah pertahanan berlapis terhadap : desain, perangkat keras maupun aspek ergonomik. Dengan perbaikan-perbaikan yang kontinyu dan penerapan hasil penelitian dan pengembangan, tingkat keselamatan industri nuklir sekarang merupakan salah satu yang tertinggi di dunia.

2. FALSAFAH PERTAHANAN BERLAPIS

Seperti telah ditetapkan dalam pendahuluan salah satu landasan yang terpenting di bidang keselamatan nuklir adalah : Falsafah Pertahanan Berlapis. Konsepsi inilah sebenarnya yang memberikan landasan bagi kriteria disain dan operasional yang komprehensif bagi keselamatan nuklir. Baik yang meliputi perangkat keras, perangkat lunak, maupun aspek interaksi manusia-mesin. Konsep ini pula yang membawa kearah pemikiran konstruksi struktur isolasi (containment) sebagai penghalang terakhir dan penghalang inilah yang menyelamatkan TMI-2 dari suatu malapetaka. Untuk kepentingan analisis kecelakaan

TMI-2 dan Chernobyl-4 maka falsafah di atas dapat dirumuskan dengan lebih sederhana sebagai berikut :

- Lapis 1. KUALITAS : dalam disain, konstruksi, operasi dan pemeliharaan, sehingga cacat ditekan sekecil mungkin dan keselamatan dapat dijamin.
- Lapis 2. SISTEM PROTEKSI REAKTOR : untuk menghentikan reaktor secara otomatis bila ambang keselamatan berkurang.
- Lapis 3. SISTEM KESELAMATAN : untuk mempertahankan pendinginan teras dan melaksanakan fungsi keselamatan pada waktu terjadi gangguan.
- Lapis 4. STRUKTUR ISOLASI : sistem struktur isolasi dan sistem pendingin darurat untuk menghalangi paparan radioaktivitas jika sistem keselamatan lainnya gagal mempertahankan integritas teras.

Sebenarnya masih ada lapis ke 5 yaitu perencanaan keadaan darurat yang menyangkut karyawan dan penduduk sekitar PLTN.

Dari konsepsi di atas jelas bahwa masalah keselamatan nuklir harus ditinjau secara menyeluruh dan tidak hanya menekankan satu aspek saja, misalnya penekanan yang berlebihan terhadap kesalahan manusiawi. Kesalahan manusiawi harus diatasi dan dapat diatasi melalui :

- a. disain sistem yang lebih handal dan lebih pemaf (forgiving)
- b. menggunakan sistem bantuan operasi (computerized operational aids)
- c. peningkatan latihan bagi operator.

3. ANALISIS KECELAKAAN TMI-2

Pada waktu dilaksanakan pekerjaan pemeliharaan, pompa catu utama (mainfeed water pump) mati. Pompa darurat dijalankan akan tetapi katupnya tertutup. Dari sini dapat dilihat aspek kesalahan manusia dan juga aspek kelemahan di bidang instrumentasi untuk pemantauan, yang menyebabkan katup sistem catu darurat yang tertutup tidak diketahui oleh operator.

Karena air catu (feed water) kedalam pemangkit uap berhenti maka perpindahan panas dari sistem primer berhenti dengan akibat temperatur dan tekanan dala reaktor terus meningkat.

Hal ini menyebabkan katup pengaman (PORV) terbuka secara otomatis, untuk menghindari kelebihan tekanan. Akan tetapi ternyata katup pengaman tetap terbuka dan menimbulkan kebocoran kecil (SLOCA). Karena tidak ada indikator maka operator tidak menyadari bahwa katup pengaman gagal menutup kembali.

Disini juga terdapat kesalahan instrumentasi. Pada waktu yang hampir bersamaan reaktor berhenti (shutdown), dalam hal ini sistem proteksi reaktor berfungsi dengan sempurna dan reaktor di shutdown 8 detik setelah pompa catu lepas dari jaringan.

Sistem tekanan pada sistem primer terus menurun dan hal ini menjalankan sistem pendingin darurat secara otomatis. Akan tetapi operator menurunkan aliran sistem pendingin darurat karena mengira sistem pembangkit tekanan (pressurizer) telah penuh air.

Hal ini sebenarnya disebabkan oleh karena terjadinya pendidihan dalam teras. Operator akhirnya menemukan bahwa katup-katup air catu tertutup dan karenanya membukanya 8 menit sesudah terjadinya kondisi transien. Karena terjadinya pendidihan dalam teras, pompa-pompa primer bergetar secara berlebihan oleh karenanya pompa primer semuanya dihentikan dan ini merupakan suatu kesalahan yang besar dan akan menyebabkan kerusakan terhadap elemen bakar.

Perlu dicatat pula bahwa TMI-2 menggunakan ONCE THROUGH STEAM GENERATOR (OSTIG) yang mempunyai kapasitas air yang kecil karenanya mempunyai sifat transien yang cepat.

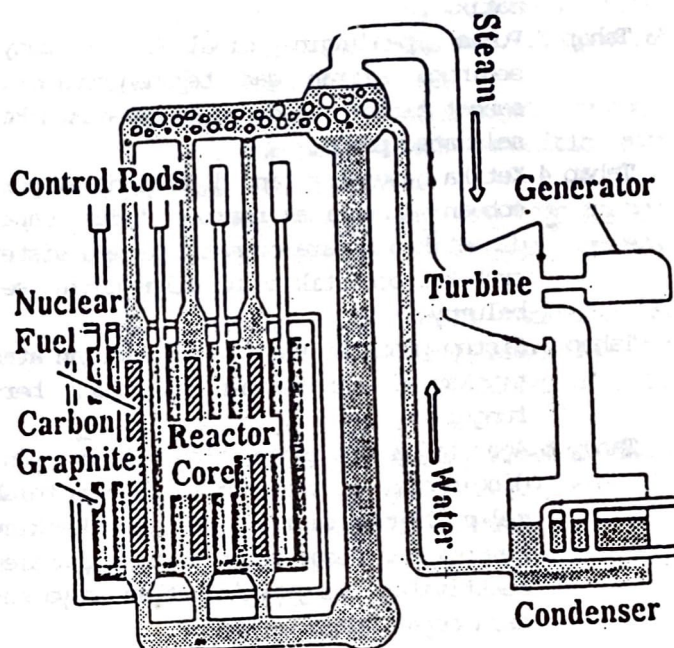
Jadi dapat disimpulkan disini bahwa aspek-aspek disain dalam instrumentasi pembangkit uap (OSTIG) dan sistem kendali pembangkit uap mempunyai kelemahan-lekeman, dilain pihak terjadi pula kesalahan evaluasi dari para operator yang disebut JUDGMENT ERROR.

Hal lain yang dapat kita pelajari ialah bahwa di dalam keadaan darurat dan situasi tidak menentu seharusnya operator tidak melakukan intervensi terhadap operasi otomatis dari sistem keselamatan. Dari pengalaman TMI-2 telah banyak diambil langkah-langkah untuk memperbaiki sistem keselamatan PLTN. Khususnya dalam sistem pencegahan pelelehan bahan bakar, sistem pemantauan dan sistem instrumentasi dengan memperhatikan faktor manusiawi (ergonomika) di bidang sistem instrumentasi telah dikembangkan apa yang disebut computerized operational aids (COA) yang bertujuan untuk memperbaiki informasi bagi operator yang bekerja di kamar kendali.

4. ANALISIS KECELAKAAN CHERNOBYL-4

PLTN REMK-1000 adalah suatu sistem reaktor air mendidih dalam kanal-kanal bahan bakar yang terbuat dari Zr-Nb dan dikelilingi oleh moderator grafit.

Sistem kendali, sistem proteksi dan sistem isolasi pada reaktor REMK-1000 kurang banyak diketahui. Dari gambar struktural REMK-1000 tidak punya struktur isolasi (containment).



Gambar Skematik reaktor Chernobyl

Dari segi keselamatan maka sistem ini mempunyai kapasitas panas yang kecil mengingat bahwa moderator grafit lebih merupakan sumber panas daripada heatsink, masalahnya akan lain kalau grafit diganti dengan air atau air berat dalam kondisi dingin.

Karena moderator grafit maka reaktor merupakan sistem yang termoderasi sempurna, sehingga air didalam kanal pendingin akan lebih merupakan penyerap neutron, maka jika pendingin dalam kanal menyerap habis akan terjadi transien reaktivitas dan reaktor akan naik dayanya dengan cepat. Ini juga yang disebut koefisien reaktifitas yang positif (positive void coefficient).

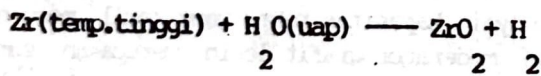
Ini semua dapat dianggap sebagai kelemahan disain ditinjau dari segi fisika reaktor. Untuk mengatasinya diperlukan sistem kendali yang kompleks dan mempunyai respons yang cepat, atau diadakan perbaikan disain terhadap teras.

Kecelakaan Chernobyl-4 terjadi ketika dilaksanakannya percobaan untuk menentukan sifat-sifat transien dari turbogenerator. Untuk melaksanakan ini terlebih dahulu sistem pendingin darurat dilumpuhkan.

Tahap-tahap selanjutnya :

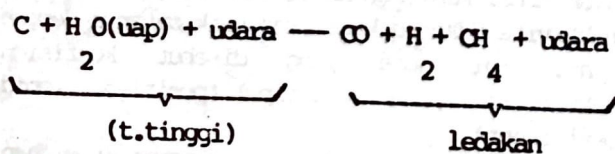
- Tahap 1. Operator menggerakkan batang kendali melewati batas sehingga sistem proteksi reaktor tidak bekerja.
- Tahap 2. Daya reaktor diturunkan sangat rendah sehingga sulit dikendalikan secara otomatis.
- Tahap 3. Pompa pendingin dijalankan semuanya sehingga aliran dan tekanan meningkat sangat tinggi dan dapat membahayakan keselamatan pompa.
- Tahap 4. Ketika generator yang dipakai dalam percobaan dihentikan reaktor tidak dapat dihentikan secara otomatis karena sistem proteksi otomatis telah dilumpuhkan sebelumnya.
- Tahap 5. Sistem proteksi reaktor didasarkan atas tingkat air dan tekanan uap tidak berfungsi.
- Tahap 6. Agar tidak terganggu oleh sistem pendingin darurat operator sebelumnya telah melumpuhkan sistem ini. Dengan demikian kemungkinan besar telah terjadi transien reaktivitas yang meningkatkan daya secara cepat tanpa terkendali.

Kekurangan pendingin pada kanal pendingin (karena menguap) akan menyebabkan temperatur kanal yang terbuat dari zirkonium meningkat dengan cepat dan dapat menimbulkan reaksi :



Selanjutnya reaksi hidrogen dengan oksigen hasil radiolisis akan menimbulkan ledakan yang dapat memecahkan kanal-kanal pendingin.

Reaksi selanjutnya adalah terpaparnya uap air yang panas kedalam grafit yang bertemperatur tinggi dan dapat menimbulkan ledakan kimia.



5. ANALISIS

Kalau kita analisis kejadian di atas maka dapat dilihat bahwa memang terdapat kesalahan manusia. Hanya soalnya adalah manusia yang mana yang

salah itu !
 Manajer ?
 Disainer ?
 atau Operator ?

Dalam hal RBMK-1000 kemungkinan terbesar adalah kesalahan manajer yang mengizinkan suatu sistem PLTN untuk percobaan-percobaan trivial dengan resiko tinggi. Kesalahan lain adalah pada disainer yang merancang teras besar dan koefisien reaktivitas positif dengan segala resikonya. RBMK-1000 adalah reaktor yang tidak pemaaf.

Operator mungkin pula telah melaksanakan kesalahan, sebab didalam situasi yang kacau dan mendesak judgment bisa salah. Hal ini adalah suatu hal yang wajar !. Masalahnya kita harus dapat menghindarinya baik dengan kebijaksanaan yang tepat, sistem ergonomik (COA) dan latihan di bidang diagnosis.

Disamping itu hal yang lebih penting adalah membangun PLTN dengan falsafah keselamatan yang benar dan standar kualitas yang tinggi hingga bersifat "forgiving" dan karenanya tidak akan menghukum manusia karena kekeliruan kecil seorang operator.

6. PELAJARAN DARI KECELAKAAN TMI-2 DAN CHERNOBYL-4

- a. Dari kedua kecelakaan nuklir diatas ternyata struktur isolasi (containment) sebagai pertahanan lapis terakhir menentukan perbedaan yang menyolok antara TMI-2 yang tidak menimbulkan akibat apapun terhadap kesehatan manusia dan Chernobyl-4 yang telah menimbulkan malapetaka.
- b. Seperti telah ditunjukkan dalam laporan Rasmussen WASH-1400 dan dinyatakan oleh kecelakaan TMI-2 dan Chernobyl-4, risiko terbesar terhadap lingkungan dan sistem adalah terjadinya pelelehan bahan bakar dan kerusakan teras reaktor. Meskipun reaksi fisi telah berhenti, tapi panas yang terjadi karena pemanasan radiasi gamma dari produk fisi dapat melelehkan bahan bakar. Disinilah perhatian utama harus dikerahkan untuk menyelamatkan teras reaktor dengan sistem pendingin panas sisa yang berkeandalan tinggi. Dengan selamatnya bahan bakar dan teras reaktor maka produksi H₂ juga tidak akan terjadi. Sistem penyelamat teras ini telah berkembang pesat dan dilandasi atas prinsip alamiah dan sistem keselamatan teknologi.
- c. Kecelakaan didahului oleh kehilangan pendingin skala kecil (small loca), transien dan inter-aksi sistem.

Bantuan diagnosis kepada operator dalam kondisi ini sangat penting dan menentukan bagi keselamatan sistem.

Sistem bantuan operasional (computerized operational aids-COA) melaksanakan pemantauan memberikan informasi yang terpenting bagi operator, menganalisis tanda bahaya (alarm signals), menentukan kejadian, menganalisis akibatnya dan memberi arahan bagi tindakan operator.

Berbagai sistem telah dikembangkan seperti SPDS-Safety Parameter Display System, DASS-Disturbance Analysis and Surveillance System, STAR-Storungsanalyse-rechner dan PODIA-Plant Operation by Displayed Information and Automation.

d. Kecelakaan Chernobyl-4 menunjukkan pula bahwa reaktor harus mempunyai watak keselamatan yang inheren, sehingga kita mempunyai sistem yang "forgiving" terhadap kekeliruan operator. Jadi teras reaktor harus dirancang sesuai dengan prinsip ini.

Reaktor Chernobyl-4 tidak mempunyai sifat-sifat di atas :

dalam koefisien reaktifitas positif (positive coefficient) dapat menaikkan daya yang cepat, kapasitas pendingin yang kecil mempertinggi kemungkinan pelelehan bahan bakar dan grafit dalam teras dengan uap panas dapat menimbulkan ledakan yang dahsyat.

Struktur isolasi biasa mungkin tak mampu menahan ledakan demikian.

KESIMPULAN

1. Dengan menerapkan secara konsisten falsafah pertahanan berlapis, kriteria dan standar yang tinggi dalam konstruksi, operasi dan pemeliharaan PLIN, maka keselamatan PLIN dapat dijamin.
2. Dalam disain PLIN sifat fisis yang membawa watak keselamatan yang inheren harus mendapatkan perhatian utama agar diperoleh sistem yang "forgiving".
3. Sistem penyelamat teras yang dapat mencegah pelelehan bahan bakar adalah "conditio sine qua non" bagi setiap PLIN. Sistem ini tidak saja mampu mencegah ancaman bagi kesehatan manusia tapi juga mencegah kerugian ekonomi.
4. Sistem bantuan operasional (computerized operational aids) mempertinggi keandalan dan keselamatan PLIN dan sangat membantu dalam mencegah kekeliruan operator.
5. Tidak dapat disangkal bahwa perbaikan dalam kebijakan operasi, prosedur operasi dan peningkatan latihan personal operasi dapat memberikan sumbangan yang penting bagi keselamatan PLIN.