

KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR

Heryudo Kusumo

Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

**KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR.** Reaktor nuklir mengandung sejumlah besar bahan radioaktif yang dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan masyarakat. Oleh karena itu reaktor nuklir harus dirancang, dibangun dan dioperasikan sedemikian sehingga resiko terhadap masyarakat kecil. Dalam makalah ini akan dibahas secara singkat aspek teknis dari keselamatan reaktor meliputi: penghalang ganda terhadap pelepasan radioaktivitas, pertahanan berlapis, kemandirian dari sistem proses dan sistem keselamatan. Pengalaman operasi reaktor nuklir selama ini menunjukkan bahwa sistem keselamatan reaktor tersebut pada umumnya dapat mengatasi semua kecelakaan reaktor, sehingga kecelakaan ini tidak membahayakan kesehatan dan keselamatan masyarakat.

ABSTRACT

**NUCLEAR REACTOR SAFETY.** A nuclear reactor contains a large amount of radioactive material which could be a potential hazards to public health and safety. The plant therefore should be designed, built and operated so that the risk to the public is low. In this paper we will discuss briefly the technical aspects of nuclear reactor safety including: multiple barriers to release of radioactivity, defence in depth, independence of process and safety systems. Operating experiences of nuclear reactor show that the safety systems of nuclear reactor can cope all reactor accidents, so that these accidents cannot be hazard to public health and safety.

PENDAHULUAN

Masalah keselamatan reaktor nuklir akhir-akhir ini menjadi sorotan utama, akibat terjadinya kecelakaan nuklir pada reaktor komersial seperti PLIN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) TMI di Amerika pada tahun 1979, dan PLIN Chernobyl di Rusia belum lama ini. Dampak yang diakibatkan oleh kecelakaan tersebut sedemikian hebatnya, sehingga cukup menghambat perkembangan pemanfaatan tenaga nuklir untuk menghasilkan listrik di berbagai negara. Di beberapa negara maju seperti Jerman Barat dan Swedia, kegiatan dari pihak-pihak yang anti nuklir seperti the greenpeace (die grüne) semakin meningkat, terutama dalam bentuk demonstrasi menentang pembangunan PLIN.

Dampak kecelakaan nuklir ini, khususnya yang terjadi di PLIN Chernobyl - Rusia, sampai pula ke negara kita sehingga membuat BATAN (sebagai instansi yang berwenang dalam masalah tenaga atom) cukup sibuk menghadapi pertanyaan-pertanyaan dari berbagai pihak, baik dari kalangan resmi (seperti anggota DPR) maupun dari masyarakat, khususnya para wartawan. Kekhawatiran masyarakat berkisar antara kemungkinan sampainya debu radio aktif yang berasal dari Chernobyl ke Indonesia, baik karena terbawa angin, maupun karena terbawa pesawat terbang, turis yang berkunjung ke Indonesia, atau terbawa burung yang sedang bermigrasi ke negara kita. Bahkan ada yang berandai-andai, yaitu andaikan PLIN yang ada di

Philipina pada suatu saat mengalami kecelakaan nuklir seperti itu, apakah debu radioaktif yang dihasilkannya tidak membahayakan negara tetangganya termasuk Indonesia.

Untuk memberi penjelasan tentang apa yang sebenarnya terjadi dan membantah kekhawatiran yang berlebihan tersebut, BATAN menerbitkan beberapa brosur (press release) dan mengadakan jumpa pers beberapa kali.

Seperti diketahui, reaktor nuklir mengandung sejumlah besar bahan radioaktif yang apabila tidak ditangani dengan semestinya, dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan personil yang bekerja di reaktor maupun masyarakat yang bertempat tinggal di sekitar reaktor tersebut. Oleh karena itu keselamatan reaktor harus mendapat perhatian utama dalam membangun, merancang dan mengoperasikan reaktor, agar personil reaktor dan penduduk tidak menerima dosis radiasi yang dapat membahayakan kesehatan dan keselamatannya.

Dalam makalah ini akan dibahas secara singkat bahaya potensial dari suatu reaktor nuklir, prinsip dasar keselamatan reaktor meliputi: penghalang ganda terhadap pelepasan radioaktivitas, pertahanan berlapis, kemandirian dari sistem proses dan sistem keselamatan. Selanjutnya dibahas pula kecelakaan reaktor yang mungkin terjadi selama reaktor itu beroperasi. Pembahasan dibatasi untuk reaktor daya atau PLTN. Dijelaskan pula secara singkat resiko suatu reaktor nuklir dibandingkan dengan resiko yang diakibatkan oleh kecelakaan lain, di mana resiko kematian yang diakibatkan oleh kecelakaan reaktor ternyata jauh lebih kecil dari pada kecelakaan lainnya. Hal ini disebabkan karena pada umumnya reaktor nuklir mempunyai sistem pengamanan yang ketat dan berlapis-lapis.

#### BAHAYA RADIASI POTENSIAL PLTN

Radiasi dapat menimbulkan kerusakan pada tubuh manusia, yaitu melalui ionisasi atau terpecahnya ikatan kimia. Radiasi dapat berasal dari sumber di luar tubuh maupun dari zat radioaktif di dalam tubuh (terhirup melalui pernafasan atau melalui makanan). Dari berbagai macam radiasi (alfa, beta, gamma dan neutron), radiasi beta dan gamma memegang peranan penting karena daya tembusnya yang besar. Efek biologi yang timbul akibat penyebaran radiasi oleh tubuh diklasifikasikan berdasarkan efek somatik, yaitu efek yang timbul pada individu yang terkena radiasi, dan efek genetik atau efek turunan, yaitu efek yang timbul pada turunannya akibat terjadi perubahan gen pada orangtuanya.

Bila terjadi penyinaran radiasi terhadap seluruh tubuh yang besarnya lebih dari 400 rem (atau 4000 kali dosis radiasi latar belakang tahunan), barulah dapat berakibat fatal terhadap tubuh dan mungkin dapat menimbulkan penyakit akibat radiasi. Pada dosis yang lebih rendah, penyinaran radiasi mungkin dapat menyebabkan meluasnya kanker dan efek genetik, di mana kemungkinan ini akan berkurang bila dosis berkurang. Radiasi pada dosis rendah dapat menimbulkan kerusakan pada jaringan hidup. Walaupun demikian, tubuh mempunyai daya tahan dan mekanisme tertentu untuk memperbaiki kerusakan akibat radiasi tersebut.

Batas dosis radiasi yang boleh diterima oleh pekerja radiasi adalah 5000 mrem per tahun, sedangkan anggota masyarakat 500 mrem per tahun. Dosis radiasi latar belakang rata-rata di dunia ini besarnya berkisar antara 50 - 100 mrem per tahun. Di beberapa tempat di dunia dosis radiasi latar belakang besarnya bisa beberapa kali di atas harga tersebut, bahkan di Kerala (India) dosis latar belakang ini besarnya mencapai 2000 mrem per tahun. Walaupun demikian, penduduk yang tinggal disitu bisa mengadaptasinya sehingga mereka sehat-sehat saja.

Bahaya radiasi utama dari suatu PLTN berasal dari hasil pembelahan yang bersifat radioaktif. Hasil belahan ini terdiri dari radio nuklida berumur pendek dan radionuklida berumur panjang, yang biasanya tetap berada di dalam elemen bakar selama operasi normal PLTN. Radionuklida ini barulah dapat terlepas ke lingkungan apabila terjadi kecelakaan nuklir yang parah, di mana elemen bakar tersebut meleleh. Tabel 1 berisi daftar radionuklida umur pendek yang penting ditinjau dari segi fisika kesehatan / proteksi radiasi. Sebenarnya masih banyak radionuklida lain dengan umur paruh pendek, tetapi karena peranannya kurang penting ditinjau dari segi fisika kesehatan, radionuklida tersebut tidak dibahas disini. Dari tabel ini terlihat bahwa radionuklida I (Iodine) memegang peranan penting, karena sifatnya yang mudah menguap sehingga ia dapat merupakan sumber radiasi externa maupun interna jika terhirup melalui pernafasan dan berkumpul di kelenjar gondok. Selain itu, dari isotop I yang merupakan unsur-unsur dengan radiotoksitas tinggi, maka I-131 adalah isotop terpenting karena umumnya paling panjang. Radionuklida lainnya seperti Br, Kr, Xe, dan Te kurang berbahaya dibandingkan dengan I-131 karena umur paruhnya pendek dan bahayanya terhadap kesehatan kecil sampai sedang. Tabel 2 berisi radionuklida umur panjang yang penting ditinjau dari segi fisika kesehatan.

Dari tabel ini terlihat bahwa Kr-85 adalah isotop yang kurang berbahaya dibandingkan dengan radionuklida lain sedangkan radionuklida lainnya cukup berbahaya terhadap kesehatan manusia.

#### PRINSIP DASAR KESELAMATAN REAKTOR

Prinsip dasar keselamatan reaktor yang diterapkan dalam merancang sistem keselamatan reaktor bertujuan untuk mencegah terjadinya kecelakaan nuklir dan memperkecil akibat potensialnya. Adapun prinsip dasar keselamatan reaktor dapat dibagi menjadi tiga, yakni :

- a. Penghalang ganda terhadap terlepasnya radioaktivitas ;
- b. Pertahanan berlapis; dan
- c. Kemandirian dari sistem proses dan sistem keselamatan.

Di bawah ini ketiga prinsip dasar keselamatan reaktor tersebut akan dibahas secara singkat, disertai dengan beberapa contoh sederhana untuk memudahkan pemahaman.

##### a. Penghalang Ganda

Dalam reaktor nuklir ada sejumlah penghalang fisik terhadap terlepasnya radioaktivitas ke lingkungan. Ditinjau dari segi keselamatan masyarakat, setiap penghalang fisik saling menunjang satu sama lain dan masing-masing dirancang, dibuat dan dijaga agar sesuai dengan standar kualitas tertinggi dan prinsip keteknikan, sehingga dapat diandalkan selama kondisi operasi normal dan kondisi kecelakaan. Penghalang fisik terhadap radioaktivitas ini terdiri dari :

- 1) Matriks bahan bakar yang merupakan penghalang pertama.

Bagian terbesar hasil belahan radioaktif tetap tertahan di dalam kisi-kisi bahan bakar (>99%), dan hanya sebagian kecil saja yang dapat terlepas dari kisi bahan bakar dengan cara difusi. Hasil belahan ini akan tetap tertahan dalam bahan bakar pada temperatur operasi. Jika suhu bahan bakar mendekati titik lelehnya, maka hasil belahan radioaktif ini barulah dapat lolos dari bahan bakar.

- 2) Kelongsong bahan bakar yang merupakan penghalang kedua.

Untuk suatu PLTN, pada umumnya kelongsong ini terbuat dari paduan logam Zirkonium (zircalloy). Celah antara kelongsong dan bahan bakar berisi zat radioaktif yang terlepas dari bahan bakar dengan cara difusi. Bila kelongsong ini retak atau rusak, barulah zat radioaktif tersebut dapat terlepas dari kelongsong.

3) Sebagai penghalang ketiga adalah sistem pendingin reaktor yang terdiri dari pipa, pompa, pembangkit uap, pendingin, dan lain-lain. Seluruh sistem pendingin ini komponennya dibuat dan dipasang sesuai dengan standar kualitas tertinggi. Selama proses pembuatan dan selama umur operasi reaktor, sistem pendingin ini diinspeksi secara kontinyu dengan menggunakan teknik mutakhir.

- 4) Penghalang keempat adalah perisai biologi yang terbuat dari beton berat dengan kerapatan nominal 3,6 gram/cm<sup>3</sup>.
- 5) Sebagai penghalang kelima adalah sistem penyangkang reaktor yang terdiri dari pelat baja dan beton setebal 2 meter yang kedap udara. Di Jerman Barat, sistem penyangkang ini dirancang sedemikian sehingga dapat menahan tubrukan pesawat tempur.

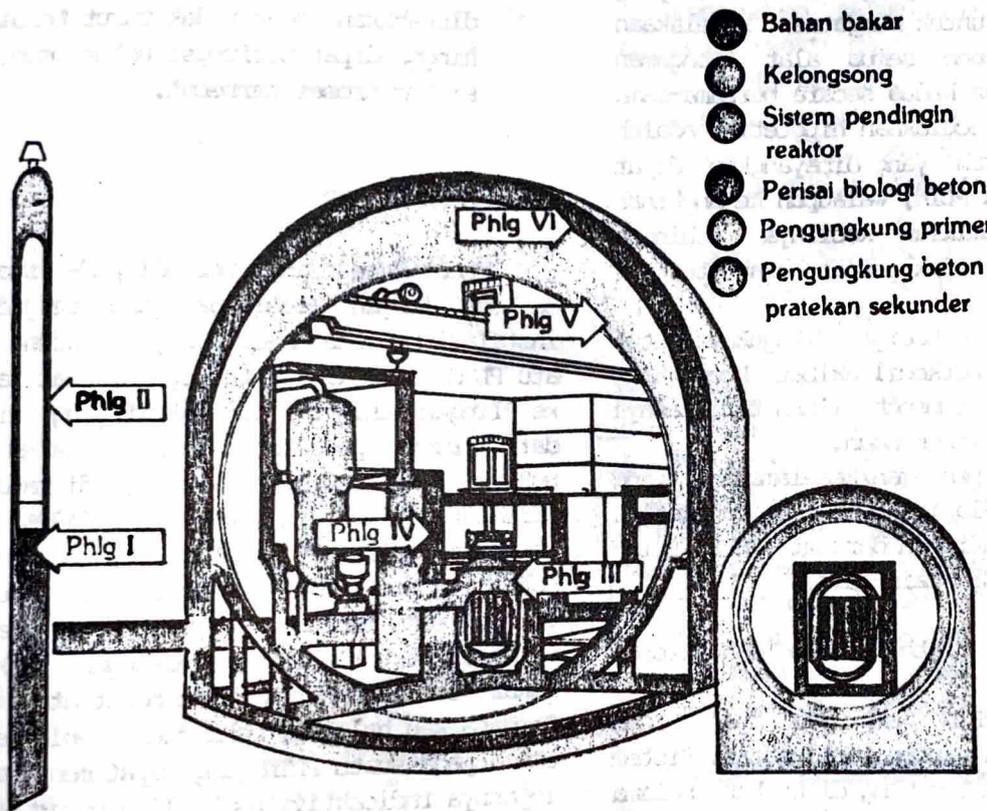
##### b. Pertahanan Berlapis

Disain keselamatan suatu PLTN dewasa ini menganut konsep keselamatan tiga tingkat, atau sering disebut konsep "pertahanan berlapis". Batas antara ketiga tingkat keselamatan ini tidak dapat ditentukan dengan tegas, tergantung dari jenis reaktornya. Pada dasarnya konsep pertahanan berlapis ini dapat diuraikan sebagai berikut :

- 1) Lapisan keselamatan pertama, yaitu : reaktor dirancang, dibangun dan dioperasikan sesuai dengan ketentuan keselamatan yang sangat ketat, mutu yang tinggi, dan teknologi mutakhir.

Lapisan keselamatan pertama ini ditujukan untuk memperoleh keselamatan maksimum yang dapat diandalkan selama operasi normal PLTN, dengan toleransi maksimal untuk tidak bekerjanya sistem. Penerapan lapisan keselamatan pertama ini lebih ditekankan pada pemakaian standar kualitas tertinggi terhadap disain sistem dan komponen, pemilihan bahan, pembuatan komponen, pembangunan reaktor, prosedur perawatan dan pengujian, operasi reaktor, serta pemanfaatan pengalaman operasi untuk memperoleh keandalan operasi reaktor.

- 2) Lapisan keselamatan kedua, yakni: diupayakan bahwa kecelakaan masih akan terjadi walaupun disain, pembangunan maupun operasi reaktor sudah dilaksanakan dengan cermat. Untuk ini PLTN dilengkapi dengan sistem pengamanan/keselamatan yang digunakan untuk mencegah dan mengatasi akibat-akibat dari semua kecelakaan



Gambar 1 : Penghalang Ganda pada PLTN

yang mungkin dapat terjadi selama umur PLTN. Lapisan keselamatan kedua ditujukan untuk mencegah meluasnya kondisi operasi abnormal ke suatu kondisi kecelakaan sebagai akibat dari kesalahan operator atau kegagalan peralatan.

Contoh sistem yang termasuk dalam lapisan keselamatan kedua adalah : sistem penghenti reaktor otomatis (SCRAM), sistem penbuangan panas sisa, sistem pendingin cadangan, sumber daya listrik darurat, dan lain-lain.

- 3) Lapisan keselamatan ketiga, yaitu PLTN dilengkapi dengan sistem pengamanan tambahan yang dapat diandalkan untuk mengatasi kecelakaan hipotesis, di mana semua alat pengamanan lapisan pertama dan kedua secara bersama-sama tidak bekerja. Kecelakaan hipotetis adalah kecelakaan terarah yang dibayangkan dapat terjadi pada suatu PLTN, walaupun kemungkinan terjadinya sedemikian kecilnya sehingga dapat dikatakan tidak pernah akan terjadi selama umur PLTN.

Lapisan keselamatan ketiga ditujukan untuk mencegah dan memperkecil akibat kecelakaan hipotesis yang dapat menghasilkan terlepasnya radioaktivitas ke lingkungan.

Contoh sistem pengamanan/keselamatan yang termasuk dalam lapisan keselamatan ketiga adalah: sistem pendingin darurat (ECCS), sistem pengungkung, dan lain-lain.

#### c. Kemandirian dari Sistem Proses dan Sistem Keselamatan

Pada umumnya PLTN mempunyai dua macam sistem proses dan sistem keselamatan. Sistem proses adalah sistem yang digunakan selama operasi normal PLTN, sedangkan sistem keselamatan tidak digunakan/ diperlukan selama operasi normal. Sistem keselamatan hanya berfungsi selama kondisi abnormal dengan tujuan untuk mencegah, menghalangi dan memperkecil akibat kecelakaan.

Selama operasi normal, kemungkinan dapat terjadi kegagalan pada sistem proses sehingga diperlukan sistem lain untuk menggantikannya. Sistem pengganti ini disebut sistem keselamatan. Sistem keselamatan ini haruslah tidak boleh mengalami kegagalan yang sama dan pada saat yang sama dengan sistem proses, sehingga ia menjadi tidak efektif pada saat diperlukan. Oleh karena itu sistem keselamatan dibuat agar mandiri dari sistem proses, di mana dalam hal ini sistem proses dan sistem keselamatan harus berbeda dalam :

- 1) Prinsip operasinya. Misalnya : bila sistem proses dijalankan oleh sumber listrik PLN,

maka sistem keselamatan dijalankan oleh sumber listrik dari diesel generator.

- 2) Komponen-komponennya. Misalnya : salah satu atau sebagian komponen sistem keselamatan (seperti pompa, katub, dll) tidak boleh berfungsi juga sebagai komponen sistem proses.
- 3) Lokasi fisiknya. Misalnya : bila sistem proses terletak di ruang A, maka sistem keselamatan terletak di ruang B, dll. Hal ini penting karena bila terjadi kebakaran pada sistem proses, maka sistem keselamatan yang berada di ruang lain dapat diusahakan agar tidak turut terbakar sehingga dapat berfungsi untuk menggantikan sistem proses tersebut.

#### KECELAKAAN NUKLIR

Kecelakaan yang terjadi pada suatu PLTN berbeda dengan kecelakaan yang terjadi dalam instalasi konvensional lainnya, karena pada suatu PLTN dimungkinkan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan. Zat radioaktif yang dihasilkan dari proses pembelahan inti di dalam reaktor nuklir sangat besar jumlahnya, di mana bagian terbesar dari zat radioaktif ini (>99%) akan tetap berada didalam elemen bakar, asalkan elemen bakar itu memperoleh pendinginan yang cukup. Oleh karena itu agar sejumlah besar radioaktivitas dapat terlepas ke lingkungan, maka elemen bakar tersebut harus rusak berat atau meleleh. Berdasarkan hal ini, maka jenis-jenis kecelakaan utama pada suatu PLTN yang dapat menyebabkan terlepasnya radioaktivitas ke lingkungan telah lama diketahui. Semua lokasi di mana bahan bakar nuklir berada, dan besarnya radioaktivitas di setiap tempat dalam PLTN dapat diketahui dengan mudah.

Tabel 3 berisi tempat-tempat yang penting bagi radioaktivitas dalam suatu reaktor nuklir, yang sebagai contoh diambil PLTN jenis LWR dengan daya 1000 MWe. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa radioaktivitas terbesar ternyata terdapat di dalam teras reaktor.

Bahan bakar merupakan sumber panas walaupun reaktor telah berhenti beroperasi (shutdown). Hal ini disebabkan karena hasil belahan radioaktif yang meluruh di samping mengeluarkan sinar radioaktif ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , atau  $n$ ), iapun melepaskan tenaga. Panas peluruhan ini besarnya kira-kira 7% daya total reaktor pada saat reaktor berhenti beroperasi, selanjutnya menurun sampai  $\pm 2\%$  setelah 10 menit, dan  $\pm 1\%$  setelah 2 jam. Setelah 1 hari, laju panas peluruhan tinggal  $\pm 0,05\%$ .

Untuk menghindarkan agar tidak terjadi pelelehan pada bahan bakar, maka panas peluruhan ini harus dibuang. Untuk ini PLIN dilengkapi dengan suatu sistem pembuangan panas peluruhan.

Tabel 4 berisi daftar kecelakaan yang mungkin terjadi dalam suatu reaktor nuklir. Dengan sendirinya masih terdapat kecelakaan lain yang tidak dibahas disini karena kurang penting dibandingkan dengan kecelakaan di atas. Dari kecelakaan-kecelakaan ini dipilih kecelakaan terparah yang dijadikan landasan dalam merancang sistem pengamanan reaktor. Kecelakaan ini disebut kecelakaan landasan disain (DBA = Design Basis Accident). Pemulihan ini didasarkan pada keyakinan bahwa, bila sistem pengamanan reaktor dapat mengatasi bahaya dan akibat dari kecelakaan reaktor terparah, maka dapat dipastikan sistem pengamanan tersebut dapat mengatasi bahaya dan akibat dari kecelakaan reaktor yang kurang parah atau ringan. Untuk suatu PLIN, kecelakaan akibat kehilangan pendingin (LOCA = Loss of Coolant Accident) biasanya dianggap sebagai DBA. Pada kecelakaan ini diuraikan bahwa pipa pendingin utama terpancung sehingga air pendingin bercampur uap menyembur keluar. Akibatnya teras reaktor tidak berisi pendingin, sehingga panas yang dihasilkan dari reaksi pembelahan tetap berada dalam teras. Temperatur elemen bakar akan naik terus sehingga melampaui titik lelehnya, sehingga zat radioaktif hasil belahan lolos keluar. Apabila sistem pengamanan reaktor tidak bekerja, maka zat radioaktif ini dapat terlepas ke lingkungan sehingga membahayakan keselamatan dan kesehatan penduduk yang bertempat tinggal di sekitar PLIN.

Untuk mengatasi kecelakaan ini, PLIN dilengkapi dengan sistem pendingin darurat (ECCS) yang dapat mendinginkan teras reaktor sehingga tidak terjadi pelelehan bahan bakar. Di samping itu PLIN dilengkapi pula dengan sistem penghenti reaktor secara otomatis (SCRAM), yang secara otomatis menghentikan reaksi pembelahan berantai di dalam teras reaktor. Sebagai penghalang terakhir terhadap radioaktivitas yang mungkin terlepas dari elemen bakar, PLIN dilengkapi dengan sistem pengungkung.

Reaktor Chernobyl-Rusia yang mengalami kecelakaan baru-baru ini, ternyata tidak mempunyai sistem pengungkung seperti yang terdapat pada PLIN negara Barat. Akibatnya zat radioaktif terlepas ke lingkungan sehingga menimbulkan kematian pada belasan orang dan ratusan orang cedera.

Kecelakaan yang sama terjadi pada PLIN TMI - Amerika, tetapi pada kecelakaan ini sama sekali tidak ada orang yang meninggal atau cedera. Hal

ini disebabkan karena PLIN TMI mempunyai sistem pengungkung yang dapat menahan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan, sehingga tidak membahayakan masyarakat yang berada di sekitar PLIN.

#### RESIKO PLIN

Sekarang timbul pertanyaan, dengan telah diterapkannya prinsip keselamatan reaktor, "Benarkah PLIN tersebut aman?". Jawabannya adalah: "Belum tentu!". Seperti diketahui, reaktor nuklir mengandung sejumlah besar zat radioaktif yang sewaktu-waktu dapat terlepas ke lingkungan melalui suatu kecelakaan nuklir, walaupun kemungkinannya sangat kecil. Timbul pertanyaan berikutnya, "Bagaimanakah ukuran keamanan dari suatu reaktor nuklir atau instalasi nuklir lainnya?".

Sebagai indikator keamanan/ keselamatan dari suatu instalasi nuklir yang saat ini umum digunakan adalah istilah "resiko terhadap penduduk", yang dinyatakan dalam bentuk besarnya angka kematian per tahun, kerusakan barang per tahun, orang yang terluka per tahun, dan lain-lain. Dengan sendirinya sangat sulit untuk menentukan besarnya resiko dari suatu instalasi atau kegiatan lainnya. Salah satu cara penentuan besarnya resiko adalah dengan mengumpulkan data statistik kematian, luka, atau kerusakan barang dari berbagai jenis kecelakaan. Dari cara ini dapat dihitung secara sederhana resiko kematian perorangan sebagai berikut :

$$R = \frac{\text{Jumlah kematian per tahun akibat kecelakaan}}{\text{Jumlah total penduduk}}$$

Di Amerika, resiko perorangan rata-rata akibat semua kecelakaan adalah  $6 \times 10^{-6}$  kematian per orang per tahun. Resiko kecelakaan dapat dibagi sesuai dengan penyebabnya, seperti terlihat dalam tabel 5. Dari tabel ini terlihat bahwa kecelakaan yang disebabkan oleh kendaraan bermotor menghasilkan resiko tertinggi, yaitu sebesar  $3 \times 10^{-4}$  per orang per tahun; sedangkan kecelakaan nuklir (untuk 100 reaktor) hanya menghasilkan  $3 \times 10^{-9}$  kematian per tahun.

Berdasarkan hasil penelitian tentang pendapat umum rakyat Amerika, resiko lebih besar dari  $10^{-3}$  kematian per tahun per orang tak dapat diterima, dan harus dilakukan tindakan-tindakan untuk mengurangi resiko yang ditimbulkan oleh penyebabnya. Resiko antara  $10^{-3}$  -  $10^{-6}$  masih dapat diterima, tergantung dari situasi dan kondisi. Khusus untuk PLIN, resiko yang dapat

diterima oleh penduduk yang tinggal di sekitar reaktor adalah  $10^{-7}$  kematian per orang per tahun atau lebih kecil.

Faktor lain yang sangat mempengaruhi adalah frekuensi kejadian dari masing-masing kecelakaan. Sebagai contoh, ada kecelakaan yang sering terjadi tetapi hanya sedikit memakan korban jiwa (misalkan kecelakaan lalu lintas); sebaliknya ada kecelakaan yang jarang terjadi, tetapi sekali terjadi akan memakan korban ribuan jiwa (misalnya kebocoran gas beracun di Bhopal-India). Dalam hal ini biasanya kecelakaan yang sering terjadi berakibat lebih kecil daripada kecelakaan yang jarang terjadi.

Gambar 2 dan 3 berisi grafik frekuensi (kejadian /tahun) terhadap jumlah kematian untuk berbagai kecelakaan yang disebabkan oleh manusia dan oleh alam. (Reactor Safety Study, USNRC, 1975). Dari gambar ini terlihat bahwa untuk 100 PLIN, baik frekuensi maupun akibat yang ditimbulkannya jauh lebih kecil dibanding dengan dengan kecelakaan lain. Walaupun demikian, orang masih saja mengkhawatirkan tentang keamanan PLIN, dan malahan sering timbul demonstrasi menentang pembangunan PLIN.

#### PENUTUP

Demikianlah dalam makalah ini telah dibahas secara singkat aspek teknis keselamatan reaktor meliputi : penghalang ganda terhadap radioaktivitas, pertahanan berlapis, kemandirian dari sistem proses dan sistem keselamatan.

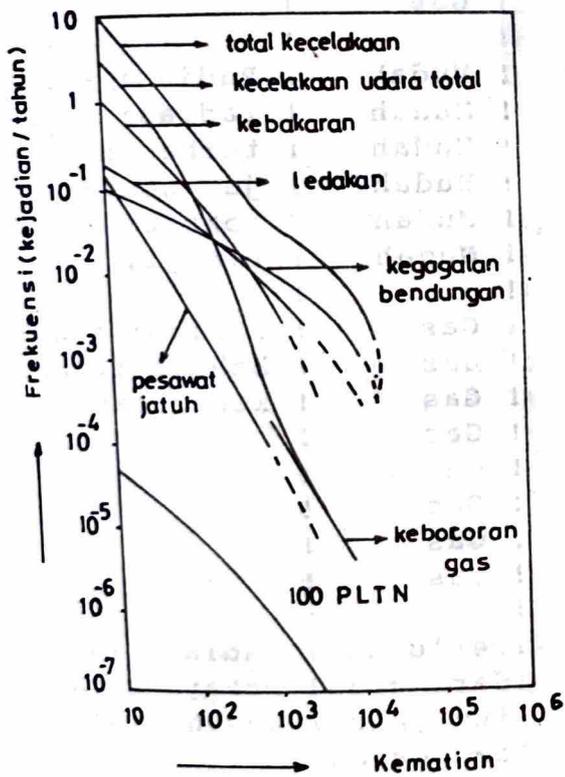
Oleh karena adanya persyaratan keselamatan yang ketat dan sistem keselamatan yang berlapis-lapis pada suatu PLIN, pengalaman operasi PLIN selama ini menunjukkan bahwa pada umumnya sistem keselamatan tersebut dapat mengatasi semua kecelakaan PLIN, sehingga tidak terjadi kecelaka-

an radiasi yang berakibat fatal maupun efek radiasi yang serius terhadap manusia.

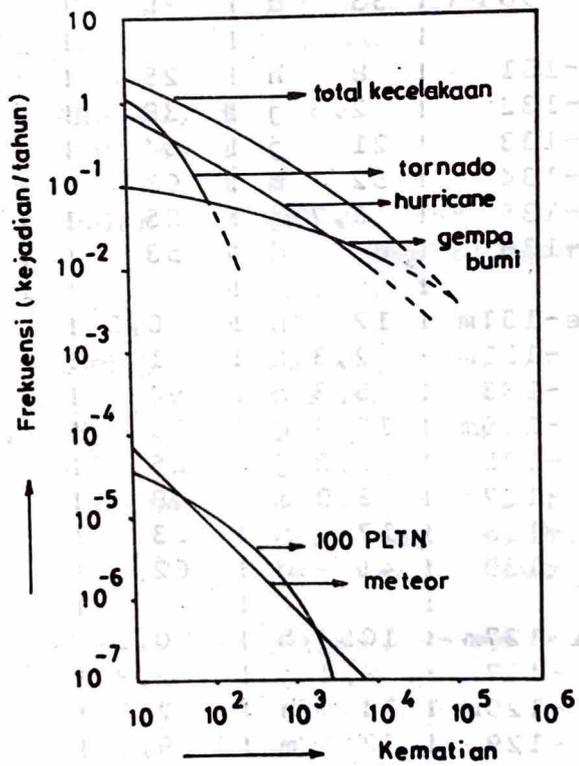
Perkecualian terhadap hal ini terjadi pada kecelakaan PLIN Chernobyl-Rusia, dimana pada kecelakaan tersebut belasan orang meninggal dunia dan ratusan orang cedera. Hal ini disebabkan karena PLIN itu tidak mempunyai sistem pendukung seperti pada PLIN negara barat umumnya. Dari kecelakaan ini sangat diambil hikmahnya, yakni oleh karena PLIN mengandung sejumlah besar zat radioaktif, maka PLIN tersebut harus mempunyai sistem pengamanan/keselamatan yang berlapis-lapis. Selain itu, terhadap PLIN tersebut harus dilakukan pengawasan terus-menerus, baik selama tahap disain, pembangunan, maupun selama operasinya, agar PLIN itu tidak membahayakan keselamatan dan kesehatan personil maupun penduduk yang bekerja/berada di sekitar PLIN.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. V.G. Snell: "Safety of CANDU Nuclear Power Stations"; AECL, July 1980.
2. Kuliah DR.H.T.Daw pada Kursus Metode Inspeksi pada Instalasi Nuklir, BATAN, Jakarta, Maret 1983.
3. Moh. Ridwan Cs: "Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir"; BATAN, Jakarta, 1980.
4. "Nuclear Reactor Safety and Related Topics"; AECL, September 1979.
5. "Guidance on Introduction of Nuclear Power"; Technical Report Series, IAEA, Vienna, 1981.
6. Proc. on "Industrial Participation in the Implementation of a Nuclear Power Programmes" BATAN, Jakarta, 1981.
7. "Reactor Theory and Power Reactors"; IAEA-SMR-44, ICTP, Trieste, 1980.
8. "Musibah Chernobyl, Analisis Kecelakaan dan Dampaknya"; BATAN, Jakarta, Mei 1986.



Gambar 2 : Frekuensi dari Kejadian yang disebabkan oleh manusia v.s. jumlah kematian.



Gambar 3 : Frekuensi dari Kejadian yang disebabkan oleh Alam v.s. kematian

Tabel 1. Karakteristik Isotop Hasil Belahan dengan Umur Pendek yang Penting

Isotop	Umur Paruh	Aktivitas (kCi/MW) Shut-down	11 hr setelah Shut-down	Sifat Penguapan	Sifat Fisika Kesehatan
Br-83	2.3 j	3	0	Mudah	Radiasi eksterna
-84	32 m	6	0	Mudah	seluruh tubuh,
-85	3 m	8	0	Mudah	bahaya terhadap
-87	56 d	15	0	Mudah	kesehatan sedang
Kr-83m	114 m	3	0	Gas	Radiasi eksterna
-85m	4,4 j	8	0,2	Gas	bahaya terhadap
-87	78 m	15	0	Gas	kesehatan kecil.
-88	2,8 j	23	0,1	Gas	
-89	3 m	31	0	Gas	
-90	33 d	38	0	Gas	
I-131	8 h	25	23	Mudah	Radiasi eksterna
-132	2,3 j	38	0	Mudah	radiasi interna
-133	21 j	54	25	Mudah	terhadap kelen-
-134	52 m	63	0	Mudah	jar gondok, radio
-135	6,7 j	55	4,4	Mudah	toksitas
-136	86 d	53	0	Mudah	tinggi.
Xe-131m	12 h	0,3	0,3	Gas	Radiasi eksterna
-131m	2,3 h	1	0,7	Gas	bahaya terhadap
-133	5,3 h	54	47	Gas	kesehatan kecil.
-135m	15,6 m	16	0	Gas	
-135	9,2 j	25	4	Gas	
-137	3,9 m	48	0	Gas	
-138	17 m	53	0	Gas	
-139	41 d	62	0	Gas	
Te-127m	105 h	0,5	0,5	Terlepas	Radiasi eksterna
-127	9,4 j	2,9	0,5	dari uran	bahaya terhadap
-129m	34 h	2,3	2,3	ium yang	kesehatan sedang
-129	72 m	9,5	0	teroksida	
Te-131m	30 j	3,9	2,2	si.	
-131	25 m	26	0	Terlepas	Bahaya terhadap
-132	77 j	38	31	dari uran	kesehatan ber-
-133m	63 m	54	0	ium yang	asal dari anak
-133	2 m	54	0	teroksida	luruh I-132.
-134	44 m	63	0	si.	Radiasi eksterna
-135	2 m	55	0		bahaya terhadap
					kesehatan sedang

Sumber :

Tabel 2 : Karakteristik Isotop Hasil-Belahan dengan Umur Paruh Panjang yang Penting.

Isotop	Umur Paruh	Aktivitas (kCi/MW)		Sifat Penguapan	Sifat Fisika Kesehatan
		1 hr setelah Irr.	5 th setelah Irr.		
Kr-85	10,4 t	0,12	0,62	Gas	Bahaya terhadap kesehatan kecil
Sr-89 -90	54 h	39	39	Sedang	Bahaya interna terhadap tulang dan paru-paru.
	28 t	1,2	6,0	Sedang	
Ru-106	1,0 t	5	10	Dalam bentuk oksida mudah menguap (RuO-3, RuO-4)	Bahaya interna terhadap ginjal dan saluran kencing.
Cs-137	33 t	1,1	5,3	Mudah	Bahaya interna terhadap seluruh tubuh.
Ce-144	282 h	30	50	Sedikit	Bahaya interna terhadap tulang, dan paru-paru.
Ba-140	12,8 h	53	53	Sedang	Bahaya interna terhadap tulang dan paru-paru.

Sumber :

Tabel 3. Kandungan Radioaktivitas dalam PLTN LWR 1000 Mwe

L o k a s i	Kandungan Total (Curie)			Keterangan
	Bahan bakar	Celah	Total	
Teras reaktor	$8,0 \times 10^9$	$1,4 \times 10^8$	$18,1 \times 10^9$	Aktivitas 1/2 jam setelah shutdown.
Kolam penyimpanan bahan bakar bekas (maksimum)	$1,3 \times 10^9$	$1,3 \times 10^7$	$11,3 \times 10^9$	Aktivitas 2/3 muatan teras (1/3 dgn peluruhan 3 hari, 1/3 dgn peluruhan 150 hari).
Kolam penyimpanan bakar bekas (rata-rata)	$3,6 \times 10^8$	$3,8 \times 10^6$	$13,6 \times 10^8$	Aktivitas 1/2 muatan teras (1/6 dgn pel. 150 hari 1/3 dgn pel. 60 hari).
Wadah pengangkut bahan bakar	$2,2 \times 10^7$	$3,1 \times 10^5$	$12,2 \times 10^7$	Aktivitas 7.e.b. PWR, atau 17 e.b. BWR dgn. pel 150 hari.
Penggantian bahan bakar	$2,2 \times 10^7$	$2 \times 10^5$	$12,2 \times 10^7$	Aktivitas 1.e.b. dgn pel. 3 hari.
Tangki penyimpanan limbah gas	-	-	$6,3 \times 10^4$	-
Tangki penyimpanan.	-	-	$19,5 \times 10^1$	-

Sumber :

Tabel 4. Kecelakaan yang Mungkin Terjadi pada Reaktor Nuklir.

1. Kehilangan buangan panas oleh sistem pendingin reaktor :
  - 1.1. Hilangnya pendingin akibat kegagalan katub
  - 1.2. Kerusakan pada sistem pendingin primer
  - 1.3. Gagalnya pompa primer dan hilangnya aliran
  - 1.4. Tersumbatnya aliran pada sebuah rakitan bahan bakar.
2. Kehilangan buangan panas oleh sistem pendingin sekunder :
  - 2.1. Gagalnya sistem pendingin sekunder.
3. Anomali pemasukan reaktivitas dan distribusi daya :
  - 3.1. Kecelakaan startup yang menghasilkan pemasukan reaktivitas berbentuk gerigi
  - 3.2. Masuknya air dingin
  - 3.3. Kegagalan batang kendali
  - 3.4. Masuknya elemen bakar dengan cepat dalam reaktor kritis
  - 3.5. Banjirnya fasilitas eksperimen
  - 3.6. Gagalnya eksperimen dalam teras
  - 3.7. Kekritisian selama penanganan bahan bakar
  - 3.8. Kegagalan batang kendali untuk SCRAM
  - 3.9. Operasi dengan batang pengatur halus yang tidak semestinya.
4. Kehilangan pendingin reaktor :
  - 4.1. Kehilangan pendingin teras total (LOCA)
5. Pelepasan radioaktivitas dari subsistem atau komponen :
  - 5.1. Pelelehan elemen bakar
  - 5.2. Kegagalan kelongsong elemen bakar
  - 5.3. Kegagalan sistem pengungku reaktor
  - 5.4. Kehilangan pendingin selama pemindahan bakar bakar
  - 5.5. Kegagalan sistem pemurnian air pendingin
  - 5.6. Kegagalan peralatan eksperimen.
6. Kehilangan daya listrik.
7. Kesalahan operator.
8. Kecelakaan lain seperti : gempa bumi, banjir, kebakaran, dll.

Tabel 5. Resiko Perorangan Yang Diakibatkan oleh Berbagai Penyebab.  
( Dihitung untuk penduduk Amerika pada tahun 1969)

Jenis Kecelakaan	Jumlah Kematian	Kebolehjadian kematian per orang per tahun
1. Kendaraan bermotor	55.791	$3 \times 10^{-4}$
2. J a t u h	17.827	$9 \times 10^{-5}$
3. Kebakaran/terbakar	7.451	$4 \times 10^{-5}$
4. Tenggelam	6.181	$3 \times 10^{-5}$
5. Keracunan	4.516	$2 \times 10^{-5}$
6. Tertembak	2.309	$1 \times 10^{-5}$
7. M e s i n (1968)	2.054	$1 \times 10^{-5}$
8. Angkutan air	1.743	$9 \times 10^{-6}$
9. Pesawat terbang	1.778	$9 \times 10^{-6}$
10. Kejatuhan benda	1.271	$6 \times 10^{-6}$
11. Kesetrum listrik	1.148	$6 \times 10^{-6}$
12. Kereta api	884	$4 \times 10^{-6}$
13. Tersambar petir	160	$5 \times 10^{-7}$
14. Angin ribut (tornado)	91	$4 \times 10^{-7}$
15. Angin topan (hurricane)	93	$4 \times 10^{-7}$
16. Kecelakaan lain	8.695	$4 \times 10^{-5}$
17. Seluruh kecelakaan		$4 \times 10^{-4}$
18. Kecelakaan Nuklir (untuk 100 reaktor)	0	$6 \times 10^{-9}$
		$3 \times 10^{-9}$

Sumber : Rasmussen