

## KAJIAN KESELAMATAN PADA KECELAKAAN REAKTOR NRX CANADA DENGAN METODE PENDEKATAN HIRARKI PETER LEWYCYX

Nanang Triagung Edi Hermawan  
Institut Teknologi Bandung

### ABSTRAK

**KAJIAN KESELAMATAN PADA KECELAKAAN REAKTOR NRX CANADA DENGAN METODE PENDEKATAN HIRARKI PETER LEWYCYX.** Telah dilakukan analisa penyebab kecelakaan nuklir pada fasilitas *Nuclear Reactor eXperimental*(NRX) di negara Canada yang terjadi pada 12 Desember 1952. Rangkaian kejadian karena kesalahan manusia, kesalah fahaman komunikasi antara operator ditambah dengan desain yang kurang handal menyebabkan batang kendali secara mendadak bergerak keatas. Setelah daya bertambah dengan sangat cepat, operator berusaha untuk mematikan reaktor tetapi batang kendali tidak berhasil turun. Kejadian lanjut adalah bahwa kenaikan reaktifitas terjadi karena efek positif dari gelembung uap yang terbentuk. Reaktor berhasil dimatikan dengan memindahkan moderator tetapi reaktor terlanjur rusak. Produk fisi umur panjang hasil operasi reaktor keluar ke ruangan basement dibawah struktur reaktor. Reaktor NRX mengalami perbaikan selama kurang lebih dua tahun untuk kemudian dapat beroperasi lagi hingga tahun 1992.

Kata kunci:kecelakaan nuklir, reaktor nuklir eksperimen, penyebab kecelakaan.

### ABSTRACT

**SAFETY ASSESSMENT ON CANADA'S NRX REACTOR ACCIDENT BY PETER LEWYCYX HIERARCHY APPROACH METHOD.** Nuclear accident analysis of Nuclear Reactor eXperimental in Canada occurred at Nuclear Reactor eXperimental nuclear accident in Canada on December 12, 1952 have been done. A sequence of human mistakes, technical failure and and communication problem between operators combined with design deficiencies caused the inadvertent withdrawal of control rods After power excursion had begun, the reactor was scrambled but some control rods failed to react. Further increase reactivity occurred due to positive void coefficient. The reactor was shutdown by dumping the moderator. The reactor was destroyed and the long-lived fission products were carried down to the basement located under reactor structure. The NRX reactor then having maintenance for 2 years and it had been re-operated till to 1992.

Keywords: nuclear accident, nuclear reactor experiment, accidents root caused.

### PENDAHULUAN

Setiap teknologi yang diciptakan oleh manusia, disamping memiliki manfaat untuk meningkatkan kesejahteraan senantiasa disertai pula dengan risiko kegagalan. Risiko kegagalan merupakan akumulasi dari probabilitas terjadinya kegagalan yang dikalikan dengan konsekuensi atau tingkat keparahan yang ditimbulkannya<sup>[1]</sup>. Semakin tinggi tingkat kecanggihan suatu teknologi, maka konsekuensi tingkat keparahan yang mungkin timbul apabila terjadi kegagalan juga semakin besar. Upaya untuk menekan risiko dilakukan dengan menurunkan serendah mungkin tingkat probabilitas terjadinya risiko kegagalan.

Demikian halnya yang berlaku pada penggunaan teknologi nuklir. Tingkat keparahan apabila terjadi kecelakaan reaktor nuklir terparah bisa berdampak hingga di luar tapak, bahkan seperti kejadian

Chernobyl sampai antar benua. Namun demikian pengalaman pengoperasian PLTN lebih dari lima dekade telah membuktikan bahwa tingkat kehandalan reaktor nuklir telah mencapai  $10^{-6}$ . Ini berarti bahwa peluang terjadinya kecelakaan adalah satu untuk sejuta reaktor yang beroperasi.

Pasca Perang Dunia II, disamping masih diteruskannya perlombaan senjata berhulu ledak nuklir oleh Blok Barat dan Timur, teknologi nuklir mulai dikembangkan untuk tujuan damai seperti Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Reaktor nuklir yang pertama kali membangkitkan listrik adalah stasiun pembangkit percobaan EBR-I pada 20 Desember 1951 di dekat Arco, Idaho, Amerika Serikat. Pada 27 Juni 1954, PLTN pertama dunia yang menghasilkan listrik untuk jaringan listrik (*power grid*) mulai beroperasi di Obninsk, Uni Soviet. PLTN skala komersil pertama adalah Calder Hall di Inggris yang dibuka pada 17 Oktober 1956.<sup>[2]</sup>

Dalam perkembangan penerapan teknologi nuklir selalu dituntut adanya inovasi baru berkaitan dengan peningkatan unjuk kerjanya. Unjuk kerja yang dimaksud meliputi antara lain kapasitas, kehandalan, efisiensi sistem, serta tentunya tingkat keselamatan dan keamanan operasionalnya. Untuk mencapai hal tersebut, maka berbagai pihak senantiasa melakukan penelitian dan pengembangan teknologi nuklir. Dalam perjalanan penggunaan tenaga nuklir yang telah melampaui enam puluh tahun, beberapa pengalaman pahit terjadi dalam bentuk insiden maupun kecelakaan nuklir.

Dalam hal pemrosesan bahan nuklir terdapat lebih dari 22 kecelakaan yang disebabkan oleh kritikalitas bahan nuklir. Adapun berbagai kecelakaan nuklir yang berhubungan dengan reaktor terdapat kurang lebih 40 kejadian.<sup>[3]</sup> Kecelakaan yang tergolong paling parah dalam sejarah penggunaan tenaga nuklir adalah kecelakaan Chernobyl pada tahun 1986 di Ukraina.

Adanya kegagalan yang berakibat terjadinya kecelakaan nuklir sebagaimana tersebut merupakan pengalaman berharga untuk melakukan inovasi terhadap struktur, sistem, dan komponen guna meningkatkan unjuk kerja dan tingkat keselamatan di masa depan. Untuk lebih memberikan suatu gambaran terjadinya kecelakaan nuklir yang pernah terjadi sebagai salah satu cara pembelajaran, berikut akan dipaparkan mengenai kecelakaan *Nuclear Reactor eXperimental* (NRX) yang terjadi pada 12 Desember 1952 di Kanada.

Adapun tujuan dilakukannya analisa kronologi kecelakaan reaktor NRX, diantaranya adalah:

- Memberikan gambaran peristiwa yang melatar belakangi kecelakaan tersebut;
- Menganalisa penyebab utama pemicu kecelakaan; dan
- Memberikan sarana pembelajaran bagi perbaikan di masa depan.

Dalam penyusunan analisa keselamatan pada kecelakaan reaktor NRX ini dilakukan dengan metode diskriptif melalui studi pustaka dengan tahapan langkah meliputi pengumpulan literatur dan informasi pendukung, analisa, serta penyusunan laporan. Lingkup pembahasan dititikberatkan mengenai kronologi dan penyebab terjadinya kecelakaan yang dianalisa dengan pendekatan hirarki dari Peter Lewycky.

Pendekatan hirarki Peter Lewycky atau *hierarchical model of accident causes* merupakan analisa kegagalan suatu kecelakaan yang dilakukan dengan

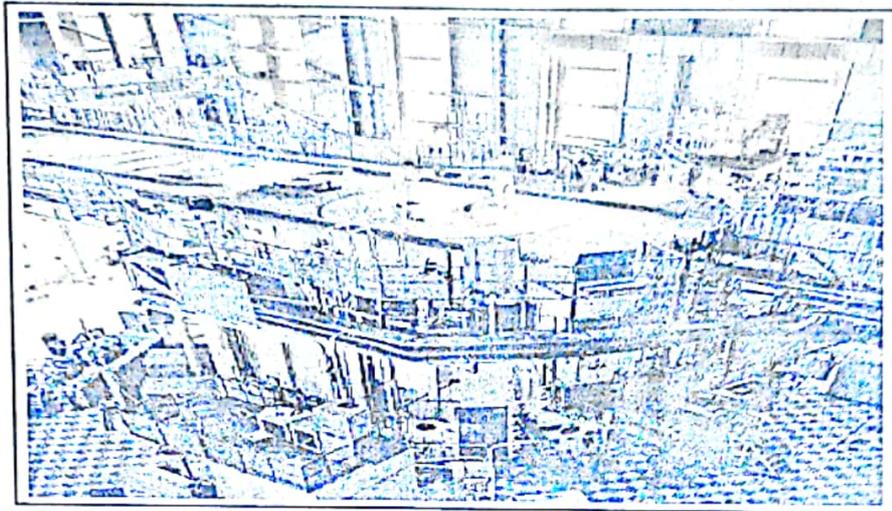
menelaah mekanisme kegagalan yang terjadi berdasarkan data dan bukti di lapangan. Berdasarkan data dan bukti tersebut dapat ditarik ke belakang untuk memperkirakan kondisi yang terjadi pada detik-detik menjelang dan saat terjadinya kegagalan. Kemudian dari kondisi tersebut nantinya dapat ditarik kesimpulan beberapa faktor ataupun faktor utama yang menyebabkan terjadinya kegagalan tersebut. Metode ini merupakan pendekatan deduktif untuk menelaah penyebab kegagalan secara cepat. Dengan demikian hasil analisa bersifat general dan kualitatif<sup>[4]</sup>.

Kecelakaan reaktor NRX di Kanada tercatat sebagai kecelakaan nuklir yang pertama pada fasilitas Reaktor Riset. Dengan melakukan analisa penyebab kejadian yang terjadi diharapkan suatu pembelajaran historis yang akan semakin memperkaya pengalaman operasional Reaktor Riset. Dengan demikian diharapkan di masa yang akan datang dapat menambah wawasan, sistem keselamatan dan keamanan operasional Reaktor Riset sehingga dapat dikembangkan secara lebih handal yang akan berdampak kepada tingkat kepercayaan publik terhadap manfaat Reaktor Riset yang lebih tinggi.

## DESKRIPSI NUCLEAR REAKTOR EXPERIMENTAL

*Nuclear Reactor eXperimental* (NRX) merupakan reaktor riset yang dibangun atas kerja sama Lembaga Riset Nasional Kanada (*Canada's Nuclear Research Council*, NRC) dengan pemerintah Amerika Serikat dan Inggris Raya dalam proyek pengembangan bom atom selama masa Perang Dunia II. Fasilitas laboratorium tersebut dibangun di Ottawa River, sekitar 200 km di atas Ottawa, tepatnya di Chalk River. Selain untuk penerapan senjata, NRC juga bertujuan untuk melakukan penelitian murni dan produksi energi secara komersial. Reaktor eksperimental milik NCR tersebut kemudian dikenal sebagai NRX dan mulai beroperasi pada 22 Juli 1947. Gambar 1 memperlihatkan sistem teras reaktor NRX.<sup>[5]</sup>

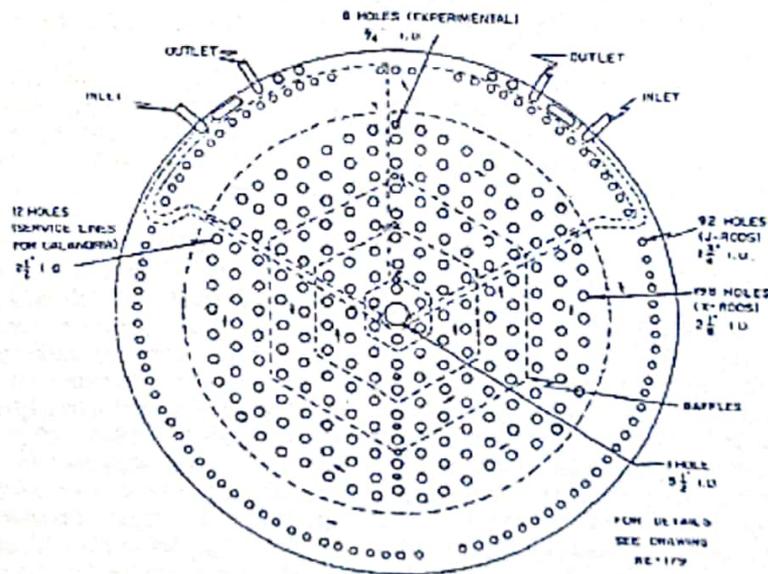
NRX tersusun atas silinder aluminium yang disebut sebagai kalandria, dengan diameter 8 m, tinggi kurang lebih 3 m dan sumbu silinder berorientasi vertikal. Kalandria tersebut diisi dengan 175 tabung kalandria yang tersusun secara heksagonal, dan diisi sampai dengan 14.000 liter air berat ( $D_2O$ ), gas helium dan lapisan pelindung (lihat Gambar 2).



Gambar 1. Reaktor NRX pada Chalk River Laboratory.

Fungsi gas helium adalah untuk mencegah terjadinya reaksi kimia antara air berat dengan udara. Gas helium dikondisikan pada tekanan konstan 3 kPa di atas tekanan atmosfer, termasuk pada saat

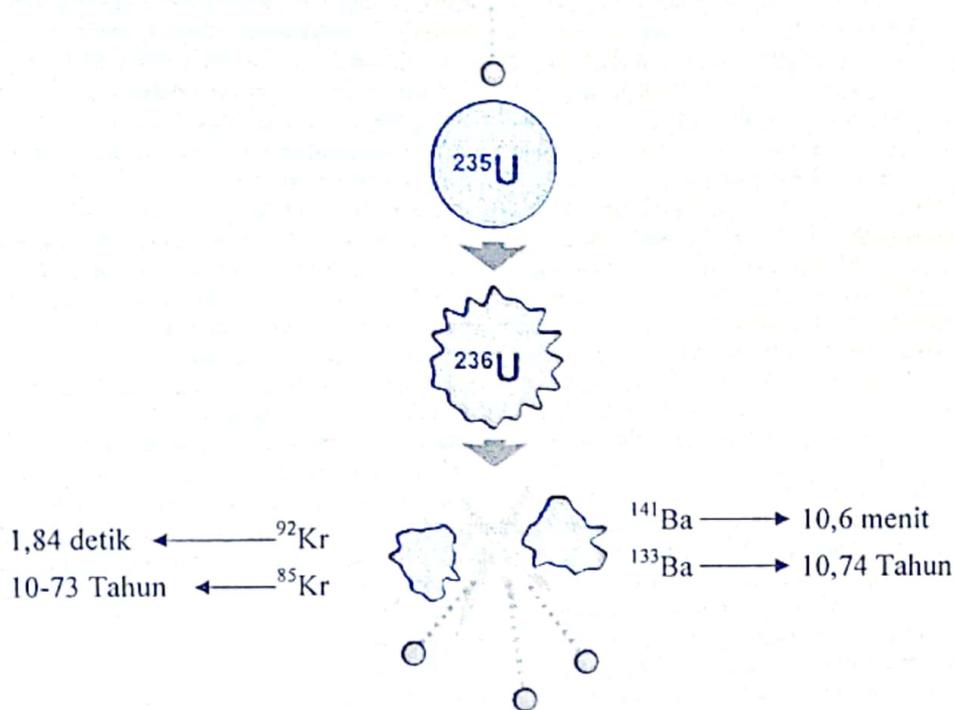
tingkat permukaan fluida dalam kalandria berubah. Hal ini dilakukan dengan cara menghubungkannya ke penampung gas helium eksternal dengan kapasitas mencapai  $40 \text{ m}^3$  [5]



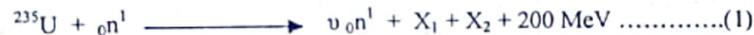
Gambar 2. Penampang teras reaktor NRX berbentuk heksagonal.

Air berat berfungsi sebagai moderator untuk reaksi nuklir berantai. Uranium alam terutama terdiri atas isotop U-238, yang menangkap neutron cepat tanpa menimbulkan pecahnya inti atom. Kurang dari 1% uranium alam terdiri atas U-235 yang apabila bertumbukan dengan neutron lambat akan meng-

hasilkan produk fisi yang radioaktif, neutron cepat dan sejumlah energi. Proses terjadinya reaksi pembelahan inti U-235 dapat dilihat pada Gambar 3, sedangkan proses reaksi fisi mengikuti persamaan reaksi (1).



Gambar 3. Salah satu Proses Reaksi Pembelahan Inti  $^{235}\text{U}$  dalam Teras Reaktor.



Keterangan:

- $^{235}\text{U}$  : Uranium diperkaya dalam bahan bakar nuklir
- $n^1$  : neutron termis(energi 0.025 eV)
- $\nu n^1$  : 2-3 neutron cepat(energi 2 MeV)
- $X_1 + X_2$  : produk fisi, antara lain Sr, Xe, I, dll.

Dalam reaktor NRX, digunakan uranium alam sebagai bahan bakar, dengan demikian neutron cepat produk fisi harus dimoderasi dengan air berat yang memiliki efisiensi tumbukan tinggi. Level air berat dalam kalandria dapat dipergunakan untuk membantu mengendalikan laju reaksi berantai, dan sekaligus keluaran energi reaktor. NRX didisain untuk memproduksi daya 20 MW, tetapi seringkali diset pada tingkat daya yang lebih rendah untuk tujuan percobaan.

Tabung kalandria NRX berisi batangan tabung bahan bakar berukuran 6 cm yang dapat dimasukkan dari atas ke dalam reaktor. Beberapa tabung kalandria kadang dipergunakan untuk memasukkan bahan lain ke dalam reaktor untuk diiradiasi sebagai bagian dari berbagai percobaan. Kebanyakan batangan tabung bahan bakar, berukuran panjang 3,1 m dan diameter 3,1 cm, serta bermassa 55 kg. Batang bahan bakar dibungkus dengan kelongsong almunium yang dipilih karena daya serapnya yang rendah terhadap neutron. Kelongsong almunium terdiri atas dua lapis yang dipisahkan aliran air

pendingin. Antara permukaan kelongsong luar dan dinding kalandria terdapat ruang kosong yang berisi udara. Sejumlah air sampai dengan 250 liter diambil dari sungai Ottawa sebagai pendingin batang bahan bakar setiap detiknya, dan aliran udara kurang lebih 8 kg/detik selalu diatur melalui tabung kalandria.[5] Dua belas tabung kalandria berisi batang kendali yang terbuat dari serbuk boron karbida dalam tabung baja, dapat dinaik-turunkan ke dalam reaktor selama pengoperasian. Apabila 7 batang kendali diturunkan penuh akan menyebabkan terhentinya reaksi berantai dan reaktor padam. Batang kendali dinaik-turunkan dari reaktor dengan sistem elektromagnetik. Apabila sistem magnet rusak batang kendali akan turun secara *gravity*, dimana sistem pneumatik dalam masing-masing batang kendali akan mendorong batang kendali turun dengan cepat memadamkan reaktor. Empat batang kendali dioperasikan secara bersamaan dan dikenal sebagai *safeguard bank*, delapan yang lainnya naik ataupun turun secara otomatis. Dua buah *safeguard bank* diaktifkan dengan dua tombol tekan pada panel utama di ruang kendali dan tombol tekan ke tiga diaktifkan magnet

untuk mengalihkan batang kendali ke sistem pneumatik. Akan tetapi tombol tekan untuk mengaktifkan sistem pneumatik guna mendorong batang kendali tersebut berada beberapa langkah agak jauh dari meja kendali utama.[5]

#### KRONOLOGI KECELAKAAN[5]

Pada hari kecelakaan reaktor NRX berada pada daya rendah. Percobaan dilakukan untuk menguji perbedaan reaktivitas pada bahan bakar baru dan bahan bakar yang telah teriradiasi. Beberapa tabung kalandria diputus dari sistem air pendingin bertekanan tinggi, satu tabung kalandria didinginkan hanya dengan udara, sedangkan yang lainnya dihubungkan ke sistem pendingin sementara. Kedalaman air berat dalam kalandria meningkat dari 2,6 menjadi 2,77 m.

Terdapat beberapa katup serial pada *basement* reaktor berhubungan dengan pengontrolan batang kendali sistem pneumatik. Beberapa diantara katup tersebut harus dilepas pegangannya agar katup tidak dapat dibuka. Akan tetapi operator membuat kesalahan dengan membuka tiga atau empat diantaranya. Hal tersebut menyebabkan tekanan udara bagian atas kalandria turun, dan tekanan udara pada bagian bawahnya naik yang mengakibatkan tiga atau empat batang kendali naik.

Naiknya batang kendali ditandai dengan menyalnya indikator lampu merah di ruang kendali. Supervisor menelepon operator di *basement* dan memerintahkannya untuk menghentikan pembukaan katup. Supervisor kemudian turun ke *basement*, menutup katupnya sendiri dan melakukan pengecekan tekanan udara.

Batang kendali seharusnya kembali ke dalam posisi di dalam kalandria, dan supervisor mengira mereka telah melakukannya. Hal tersebut terlihat dari tidak menyalnya lagi indikator lampu merah di ruang kendali. Meskipun pergerakan ke bawah batang kendali telah mampu memadamkan lampu indikator di ruang kendali, tetapi pada kenyataannya batang kendali belum sepenuhnya turun.

Supervisor kemudian menelepon asistennya yang berada di ruang kendali untuk menekan dua tombol yang akan mengalihkan batang kendali ke sistem pneumatik dan kemudian mengaktifkan tekanan udara untuk mendorong batang kendali turun. Akan tetapi ia memberikan informasi yang salah mengenai tombol yang seharusnya ditekan. Tombol yang harus ditekan adalah tombol untuk mengendalikan sistem pneumatik, tetapi keliru dengan tombol untuk menggerakkan *safeguard bank*. Asisten dapat melihat bahwa lampu indikator merah telah padam, ia mengira bahwa batang kendali telah masuk sepenuhnya ke dalam kalandria untuk menjaga reaktor tetap *shutdown*. Asisten berpikir bahwa perintah supervisor malah menggerakkan *safeguard bank*, ia kemudian menelepon supervisor

memberitahukan kesalahan tersebut, dan kemudian langsung meninggalkan telepon untuk menggapai tombol pengaktifan sistem pneumatik. Supervisor yang menerima telepon menyadari kekeliruannya, dan segera memperbaiki perintahnya. Akan tetapi asisten yang telah melepas gagang teleponnya tidak mendengar perintah tersebut.

Dengan sejumlah batang kendali hanya sebagian dalam posisi semestinya, penaikkan *safeguard bank* menyebabkan keluaran daya menjadi berlipat dua setiap dua detik. Asisten di ruang kendali mencatat kenaikan daya secara dramatis tersebut, kemudian mengaktifkan mekanisme pelepasan *safeguard bank* setelah kurang lebih dua puluh detik. Daya reaktor pada saat tersebut 0,1 MW.

Karena sistem pneumatik tidak teraktifkan, sistem tersebut tidak dapat mendorong keempat batang kendali *safeguard bank* ke dalam kalandria secara cepat. Meskipun gravitasi seharusnya dapat melakukannya secara pasif, namun tiga diantaranya tidak dapat jatuh dan yang ke empat jatuh dalam waktu yang lebih lambat daripada semestinya. Dengan demikian reaktor terus mengalami kenaikan daya, hingga dapat mencapai 20 MW.

Akan tetapi, hanya setelah 10 detik keluaran daya mencapai 17 MW, air biasa dalam tabung kalandria yang didinginkan dengan sistem pendingin sementara mulai mendidih, sehingga menurunkan kapasitas sistem pendingin. Daya mulai meningkat secara tajam. Hal tersebut diketahui di dalam ruang kendali, dan 14 detik selanjutnya, seseorang yang lain di ruang kendali mengaktifkan tombol untuk mulai membuang moderator air berat dari dasar kalandria. Daya reaktor meningkat selama sekitar 5 detik, dan mencapai puncak 80 MW. Pada saat permukaan moderator turun, reaksi fisi dalam reaktor terhenti dan tidak ada kenaikan daya lagi. Dua puluh detik kemudian, daya keluaran reaktor mencapai nol. Keseluruhan waktu dimana daya reaktor di atas 1 MW kurang dari 62 detik.

Akan tetapi keadaan kemudian bertambah buruk. Pengukur tekanan di ruang kendali menunjukkan bahwa tekanan gas helium di atas air berat dalam kalandria turun dengan drastis. Asisten reaktor berasumsi mungkin saluran gas tertutup, dan jika hal demikian yang terjadi, maka situasi bahaya dimana kalandria dapat meledak karena air berat yang dikosongkan. Asisten tersebut menghentikan pembuangan.

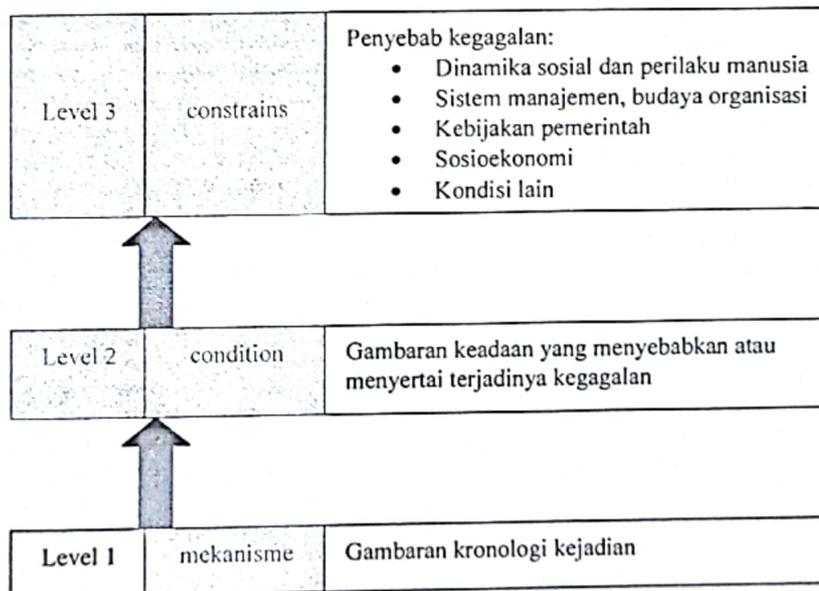
Di dalam reaktor, beberapa material di sekitar batang bahan bakar bahkan beberapa tabung kalandria meledak. Tidak hanya helium, tetapi hidrogen dan gas lain yang terbentuk oleh panas dan reaksi kimia dalam batang bahan bakar terlepas dari kalandria. Tampungannya gas terjatuh dan terlontar. Dengan tiadanya sumber tambahan helium untuk dimasukkan ke dalam kalandria, udara masuk sehingga terjadi ledakan yang disebabkan

bereaksinya hidrogen dengan oksigen dalam kalandria. Tidak seluruh struktur kalandria mengalami kerusakan, dan ledakan tersebut mengakhiri kecelakaan yang terjadi.

Untuk mendinginkan reaktor, sistem pendingin dengan air ringan tidak dimatikan. Semua air tersebut menjadi radioaktif, dan bocor melalui lantai gedung reaktor. Dalam beberapa hari kedalaman air mencapai 1 m, dan mengalir ke ruang penahan gas dan dua ruang lain yang berisi tangki penampungan air berat. Secara keseluruhan,  $4,5 \times 10^6$  liter terkontaminasi dan diperlukan waktu beberapa bulan untuk mendekontaminasinya. Kalandria dilepas, dikubur dan diganti dengan yang baru. Reaktor NRX mengalami perbaikan selama kurang lebih dua tahun untuk kemudian dapat beroperasi lagi hingga tahun 1992.

## PEMBAHASAN

Kecelakaan reaktor NRX pada tanggal 12 Desember 1952 merupakan kecelakaan nuklir yang pertama kali terjadi dalam sejarah pengoperasian reaktor nuklir. Kecelakaan tersebut terjadi karena naiknya kritikalitas reaktor secara berlipat ganda dalam waktu yang sangat singkat. Dalam hal ini, kenaikan kritikalitas disebabkan oleh ketiadaan batang kendali yang mencukupi dalam kalandria sebagai efek kegagalan sistem penggerak pneumatik dan berlanjut dengan pengaruh *positive void coefficient*. Apabila kronologi kecelakaan reaktor NRX tersebut dianalisa menurut pendekatan teori hirarki Peter Luwycky, maka dapat dijelaskan dengan mengikuti tingkatan sebagaimana digambarkan secara skematis menurut Gambar 4.



Gambar 1. Analisa Penyebab Kegagalan secara Bertingkat[4].

Adapun uraian lebih lanjut mengenai analisa masing-masing tingkatan dapat diuraikan sebagai berikut:

### a. Mekanisme(mekanisme)

Mekanisme atau kronologi kecelakaan yang terjadi adalah sebagaimana yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya. Kecelakaan terjadi saat NRX bekerja pada daya rendah. Terdapat sebuah tabung kalandria yang tidak didinginkan dengan air, tabung tersebut hanya didinginkan dengan udara.

### b. Kondisi(condition)

Level kedua ini menyatakan beberapa kondisi atau keadaan yang menjadikan kejadian di level pertama tersebut terjadi, diantaranya:

#### • Miskomunikasi

Telah terjadi kesalahan instruksi yang diberikan oleh supervisor reaktor kepada asistennya. Hal ini ditambah dengan kurang handalnya sistem komunikasi, serta posisi alat komunikasi yang berjauhan dengan meja kendali utama.

- **Tiadaanya Prosedur Kerja**  
Prosedur kerja tertulis yang bisa dibaca oleh setiap pihak yang terlibat dalam pengoperasian reaktor tidak ada, sehingga tidak ada panduan baku untuk pengoperasian reaktor dalam kondisi normal maupun untuk menangani kondisi abnormal dan kedaruratan.
  - **Kurangnya pelatihan**  
Kurangnya pelatihan, baik bagi supervisor reaktor maupun pekerja yang lain mengakibatkan sering dilakukannya tindakan antisipasi dan instruksi yang salah. Selain itu juga terjadi kesalahan intepetasi terhadap indikasi alat ukur dan keadaan sistem sebenarnya, yang berakibat pengambilan tindakan yang memicu kondisi abnormal lain.
  - **Kelemahan Disain Reaktor**  
Disain ruang kendali yang kurang ergonomis seperti letak peralatan komunikasi yang berjauhan dengan meja kendali utama.  
Struktur, sistem dan komponen kalandria permulaan yang menyebabkan reaktor memiliki reaktivitas positif pada daya rendah.  
Sistem *scram* reaktor yang bertumpu pada sistem pneumatik(sistem aktif) menyebabkan apabila terjadi kegagalan sistem pneumatik, maka sistem *scram* juga tidak dapat beroperasi.  
Sistem keselamatan reaktor secara keseluruhan belum menerapkan prinsip redundansi maupun diversifikasi alat untuk menunjang kehandalan sistem.  
Sistem desain dan *interlock* seharusnya dapat mencegah tindakan yang sengaja atau tidak disengaja yang dapat mempengaruhi unjuk kerja batang kendali.  
Sistem instrumentasi harus mampu mencatat posisi batang kendali *all the times*, termasuk posisi pada waktu *scram*.
- c. **Kendala(constrain)**  
Level terakhir ini menjadi batasan/kendala kenapa kondisi – kondisi tersebut di atas bisa muncul, hal-hal yang menjadi kendala antara lain :
- **Manajemen**  
Sistem pelatihan untuk semua personil belum tertata dengan baik sehingga masih banyak dijumpai pengambilan tindakan yang tidak tepat dan menjurus terjadinya kegagalan sistem. Demikian pula budaya keselamatan yang seharusnya menjadi prioritas utama, seringkali dikalahkan oleh kepentingan percobaan yang dimisikikan pihak militer. Hal tersebut menunjukkan masih rendahnya komitmen manajemen terhadap keselamatan.
  - **Sistem peraturan**  
Sistem peraturan perundang-undangan di masa itu kemungkinan belum mewajibkan dibuatnya

suatu standar spesifikasi teknis dan disain reaktor, juga mengenai kualifikasi personil yang terlibat dalam pengoperasian reaktor. Demikian halnya kewajiban untuk membuat prosedur kerja pengoperasian reaktor baik dalam kondisi normal, abnormal, maupun kedaruratan.

- **Kebijakan politik**  
Keadaan Pasca Perang Dunia II, masih diliputi suasana perang dingin antara Blok Barat dan Timur. Reaktor NRX pada awalnya merupakan kelanjutan program nuklir untuk persenjataan dengan hasil plutoniumnya. Kondisi ini kemudian berlanjut pada setiap percobaan rahasia yang dilakukan secara tertutup seringkali tidak dapat dipantau oleh pihak luar yang mempunyai kewenangan sebagai badan pengawas.

## KESIMPULAN

1. Kecelakaan reaktor NRX dipicu oleh kesalahan manusia, dalam hal ini miskomunikasi antara supervisor dengan asistennya.
2. Terjadinya miskomunikasi disebabkan oleh kurangnya pelatihan bagi setiap orang yang terlibat dalam pengoprasian reaktor maupun keterbatasan sarana komunikasi saat itu.
3. Ketiadaan prosedur kerja tertulis yang dapat dibaca oleh setiap operator, menyebabkan tidak adanya langkah kerja terstruktur untuk menangani suatu keadaan abnormal serta berakibat lebih lanjut terjadi kesalahan intepetasi terhadap suatu kejadian dan cara menindaklanjutinya.
4. Belum mapannya standar keselamatan untuk pengoperasian reaktor berimbas terhadap disain struktur, sistem dan komponen reaktor yang dibangun di masa itu.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Cox Sue dan Tait Robin, *Safety, Reliability and Risk Management: an Integrated approach*, edisi ke dua, hal.182., Butterworth-Heinemann, Singapura, 1998.
2. ...., Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir, <http://www.en.wikipedia.org>.
3. R Stratton William, *A Review of Criticality Accidents*, Nuclear Criticality Tech., NCIS, US DOE, DOE/NTC-04, March 1989.
4. Leveson, Nancy G., *Safeware System Safety and Computer, A Guide to Preventing Accidents and Losses Caused by Technology*, Addison-Wesley Pub. Company, New York, 1995.
5. Jedicke Pieter, *The NRX Incident*, <http://www.en.wikipedia.org>