

ASPEK KESELAMATAN REAKTOR

Oleh :

Ir. Soleh Somadiredja
BATAN PUSAT

Abstrak

Instalasi PLTN memiliki 2 aspek keselamatan yang perlu dijaga, yaitu keselamatan PLTN-nya sendiri karena untuk pembangunannya diperlukan investasi modal yang besar, dan aspek keselamatan manusia yang perlu dilindungi dengan beroperasinya PLTN tersebut. Uraian dalam prasaran ini dikhususkan pada aspek yang kedua. Uraian dilakukan melalui potensi bahaya yang terkandung didalam zat-zat radioaktif yang dihasilkan PLTN, cara penahanannya dan pembatasan dalam hal pelepasannya ke alam lingkungan, dalam keadaan operasi normal maupun bilamana timbul kecelakaan. Uraian diakhiri dengan falsafah keselamatan reaktor yang perlu dimasukkan dalam program PLTN melalui pembuatan peraturan-peraturan keselamatan PLTN.

1. PENDAHULUAN

Sebelum dilakukan pembangunan PLTN diperlukan dipenuhinya persyaratan tertentu yang berhubungan dengan berbagai aspek yang akan dibawakan oleh beroperasinya sesuatu PLTN. Pada dasarnya dalam hal ini ada 2 aspek :

1. Aspek keselamatan instalasi.

PLTN harus memenuhi persyaratan teknis bangunan serta peralatannya, yaitu harus dapat beroperasi dengan baik dalam segala keadaan yang mungkin. Ini disebabkan karena PLTN merupakan suatu instalasi yang sangat mahal harganya. Sehingga bila oleh sesuatu sebab PLTN terpaksa berhenti, operasinya ini akan mendatangkan kerugian yang besar.

2. Aspek keselamatan personil dan penduduk.

PLTN memiliki bahaya laten dalam bentuk radiasi nuklir yang bilamana tidak terkendalikan dapat membahayakan personil (petugas di PLTN) maupun penduduk sekitarnya. Oleh karena itu diperlukan usaha-usaha pengamanan bahaya radiasi tersebut.

Aspek Keselamatan Instalasi.

Beberapa persyaratan dapat dikemukakan di sini :

1. Tidak terpengaruh oleh gangguan alam seperti gempa bumi, tornado (untuk Amerika Serikat), banjir dan sebagainya.
2. Setiap gangguan dari dalam (yang berhubungan dengan beroperasinya PLTN) tidak akan menyebabkan kerusakan instalasi yang berarti.

Aspek Keselamatan Personil dan Penduduk.

Umumnya persyaratan dalam hal ini adalah adanya batas tingkat radioaktivitas yang diperbolehkan lepas keluar yaitu ditempat dimana personil atau penduduk berada. Secara ideal memang diinginkan agar sama sekali tidak ada pelepasan isotop-isotop radioaktif ke luar, akan tetapi bilamana ini dijadikan patokan maka biaya pembangunan PLTN akan menjadi tinggi. Bandingkan saja misalnya dengan mengharuskan pemilik-pemilik mobil membuat perlengkapan yang akan menang-

kap asap yang dilepaskan oleh mobil tersebut.

Beberapa catatan dari peraturan-peraturan pengamanan instalasi dan personil.

Pada umumnya bagi penggunaan bahan-bahan yang mengandung isotop radioaktif terdapat peraturan-peraturannya. Yaitu dimulai dengan permintaan izin dari pembangunan/penggunaan fasilitas tersebut sampai kepada izin operasi. Permintaan izin harus disertai dengan suatu uraian dari cara bekerjanya instalasi tersebut berikut uraian pengamanannya dimana yang terakhir ini termasuk kedalam design dari instalasi. Uraian yang berhubungan dengan pengamanan dari instalasi disebut Safety Analysis Report (SAR). Setelah uraian design dan SAR dari instalasi yang bersangkutan dipelajari oleh instansi yang berwenang maka bisa diputuskan apakah instalasi tersebut diperbolehkan atau tidak pembangunannya. Pembangunan dari PLTN, yang juga merupakan instalasi yang menggunakan isotop radioaktif sebenarnya terkena oleh peraturan ini. Akan tetapi, bagi PLTN akan diperlukan peraturan khusus.

Meskipun isotop-isotop radioaktif ini dihasilkan PLTN hanya sebagai hasil sampingan saja (dari tujuan utama menghasilkan daya listrik), akan tetapi isotop radioaktif yang dihasilkan ini akan menjadi bertambah banyak dengan lamanya beroperasi PLTN. Jadi aktivitasnya akan menjadi sangat tinggi, jauh di atas instalasi pemakai isotop pada umumnya.

Indonesia dewasa ini sudah memiliki peraturan bagi penggunaan isotop radioaktif, akan tetapi belum untuk instalasi semacam reaktor (penelitian maupun tenaga). Dewasa ini sudah ada instalasi nuklir di Indonesia di mana didalamnya terjadi reaksi berantai (yaitu suatu reaksi yang biasa terjadi di dalam reaktor yaitu pada reaktor TRIGA MARK II di Bandung dan Assembly Subkritis di Yogyakarta. Assembly Subkritis bukanlah merupakan reaktor penuh, karenanya reaksi berantai perlu dibantu dengan sumber neutron dari luar. Kedua instalasi ini dibangun oleh Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) instansi yang disertai wewenang oleh Pemerintah untuk melaksanakan dan mengawasi penggunaan zat radioaktif. Dalam penggunaannya tersebut masalah pengamanannya langsung diadakan oleh tenaga-tenaga ahli dari instansi tersebut, atas ketentuan di luar negeri/internasional.

Pada dasarnya untuk pengamanan terhadap bencana alam, bisa disamakan dengan persyaratan pada bangunan-bangunan besar, demikian juga pengamanan terhadap bahaya sabotase bisa diadakan sistim penjagaan seperti halnya untuk bangunan instalasi penting.

Oleh karena itu pembahasan selanjutnya akan dibatasi pada bahaya yang berasal dari dalam instalasi PLTN sendiri.

II. KESELAMATAN REAKTOR

Proses yang terjadi di dalam reaktor, disebut proses nuklir dari jenis pembelahan inti (proses fissi), proses capture (penangkapan neutron oleh bahan-bahan umumnya didalam reaktor) dan scattering (neutron bertabrakan dengan inti atom sesuatu bahan).

Dalam ketiga macam proses tersebut akan dilepaskan neutron dan sinar-sinar alpha, beta dan gamma. Sinar-sinar ini dilepaskan oleh isotop-isotop yang menjadi radioaktif setelah mengalami proses nuklir tadi. Sinar-sinar alpha dan beta jarak lintasnya tidak begitu jauh dari atom radioaktif yang bersangkutan dan mudah diserap, karena itu selama isotop radioaktif ini tidak masuk kedalam badan (melalui pernafasan atau makanan) maka tidak membahayakan. Bahaya yang langsung

datangnya adalah dari sinar neutron dan gamma, yang memiliki daya lintas di udara yang sangat panjang. Hanya dengan sistim shielding (tabir) sinar neutron bisa dibatasi untuk berada dalam lingkungan shielding, sehingga tidak bisa membahayakan personil (petugas reaktor, apalagi tempat di luar reaktor). Sinar neutron ini dihasilkan melalui proses fisi. Proses fisi itu sendiri terjadi di dalam teras (core) reaktor. Sehingga asalkan teras diberi tabir yang baik neutron tak akan keluar. Radiasi sinar alpha, beta dan gamma yang sangat berbahaya adalah yang berasal dari produk fisi. Selama produk fisi ini bisa ditahan di dalam fuel elemen oleh atom lainnya dan oleh cladding, yaitu selaput logam yang menutupi seluruh bagian luar fuel elements, maka tidak akan ada bahaya keluar. Akan tetapi selama operasi reaktor maka bisa terjadi cladding rengat dan banyak produk fisi keluar dari fuel element, khususnya yang berbentuk gas bisa keluar dengan difusi, akan tetapi tidak terus ke udara luar, melainkan memasuki daerah cooling circuit atau aliran loop zat pendingin yang keseluruhannya juga tertutup di dalam sistim yang terdiri dari pipa dan heat exchanger atau condensor (pada BWR). Bila karena sesuatu sebab, ada kebocoran pada circuit pendingin ini, maka produk fisi masih bisa tertahan oleh sistim ventilasi dari gedung reaktor, yang oleh sistim detektor ruangan (monitor) kenaikan radioaktivitas dapat segera diketahui dan diadakan tindakan pengamanan personil. Demikianlah tindakan pengamanan yang sudah berada di dalam design PLTN itu sendiri, yaitu untuk keadaan reaktor berjalan dengan normal. Apakah reaktor bisa mengalami keadaan tidak normal? Berkat ada sistim pengamanan dan sistim kendali dari reaktor, keadaan tidak normal pada PLTN tidak pernah terjadi. Meskipun demikian di dalam design reaktor masih diadakan perlengkapan-perengkapan/sistim tambahan untuk mengamankan PLTN dari keadaan tidak normal tersebut. Perlengkapan sistim tambahan ini akan tergantung dari jenis reaktornya dari PLTN yang bersangkutan. Bagaimana halnya dengan elemen-elemen bahan bakar sebagai sumber dari isotop-isotop radioaktif?

Sesudah jangka waktu tertentu, setelah cukup masanya untuk dikeluarkan dari reaktor karena tidak dapat mengeluarkan daya panasnya lagi melalui proses fisi, akan dikeluarkan dan diamankan. Ini termasuk kedalam pekerjaan waste management, suatu istilah yang digunakan pada pekerjaan pembuangan sampah radioaktif umumnya.

Demikianlah secara singkat timbulnya zat-zat radioaktif didalam PLTN dan caranya menghindarkan bahaya yang dapat ditimbulkannya.

Di atas sudah dikemukakan segi-segi bahaya dan pengamanannya dilihat dari segi teknis.

Di dalam sejarah pembangunan PLTN di negara-negara yang sudah maju (Amerika Serikat dan Inggris) maka untuk reaktor-reaktor yang pertama kali dibangun memang belum ada peraturan-peraturan dari pemerintahnya. Pengamanan terhadap kemungkinan timbulnya bahaya langsung, dibuatkan oleh tenaga-tenaga ahli yang bertanggung jawab dalam pembangunannya. Baru kemudian peraturan-peraturan dapat disusun secara lengkap dan terperinci. Hingga sekarang penggunaan tenaga atom di seluruh dunia sudah memasuki tahun ke-32, dan peraturan-peraturannya sudah banyak terkumpul, sehingga dapat digunakan untuk bahan pemikiran guna dijadikan dasar bagi penyusunan peraturan untuk Indonesia.

Sumber bahaya Secara Kwantitatif

Dalam paragraf 3 tadi disebutkan bahwa berkat adanya cara design dari

PLTN yang baik, maka PLTN-PLTN telah mampu beroperasi dengan memuaskan ditinjau dari segi hasil teknik pengamanannya, atau dengan lain perkataan keadaan normal dari PLTN bisa terjamin. Dapatkah PLTN mengalami keadaantidak normal sehingga menimbulkan bencana terhadap manusia dan benda-benda lain di lingkungannya ?

Secara kuantitatif besarnya ancaman dari reaktor adalah berasal dari besarnya tingkat radioaktivitas yang terkandung di dalam reaktor bersamaan dengan produksi panas yang disebabkan.

Radioaktivitas tinggi yang dimiliki oleh produk-produk fisi oleh sistem proteksi bisa ditahan agar tidak membahayakan. Demikian juga produksi panas yang disebabkan oleh produk fisi senantiasa didinginkan oleh zat pendingin. Bila usaha penjagaan teknis terhadap kedua hal tersebut tidak mengalami gangguan maka keamanan operasi reaktor bisa dijaga. Bila oleh sesuatu sebab, penjagaan-teknis (engineering safetyguard) gagal maka akan timbul :

Penyebaran zat-zat radioaktif yang berintensitas tinggi, yang besarnya tergantung dari Massa Operasi PLTN dihitung dari keadaan permulaan ketika teras reaktor masih bersih (clean - core).

PLTN dengan daya 500 MW listrik setelah operasi 1 tahun (keadaan maximum bahwa reaktor mengandung produk fisi sebelum penggantian bahan bakar) akan mengandung produk fisi :

$$500 \text{ MWe} \times \frac{100}{30} \frac{(\text{MWth})}{\text{MWe}} \times 365 \text{ hari} = 5 \times 10^5 \text{ MW hari.}$$

ekivalen dengan 1/2 ton produk fisi atas dasar ekivalensi 1 MW hari = 1 gr produk fisi.

Produk fisi ini terbagi dalam sekitar 200 isotop, 2 diantaranya, yaitu I-131 dan Sr-90 adalah paling berbahaya. Zat ini sangat mudah menguap (jadi gas) untuk pengaruh I-131 dapat diturunkan sebagai berikut.

$$I_{(\text{indium})} \text{ SA} = \frac{A_{\text{Ra}} \cdot T_{\text{Ra}}}{A_x \cdot T_x} \text{ (cig)}$$

$$\frac{2,26 \times 10^2 \times 1,65 \times 10^3 \times 365}{1,31 \times 10^2 \times 8,3} = 100 \times 10^3 \text{ Ci/gr.}$$

$$= 100 \text{ Ci/mg.}$$

Sinar yang dipancarkan beta dan gamma.

10 mg I (1000 Ci) yang dilepaskan, dalam keadaan cuaca dingin (gas sukar naik) dan kecepatan angin lemah (Pasquill jenis1), maka dispersi ke atmosfer produk fisi yang berbentuk gas, akan sukar, yang dapat menyebabkan produk fisi Iodine :

Jarak (mil)	1/4	1/2	3/4	1	2	5
Dose (rad)	1150	350	180	115	43	12

Maka dengan batas timbulnya "radiation sickness" (muntah dan sebagainya) sekitar 100 rad, proteksi jarak pertama sebesar 1 mil adalah suatu ukuran dari ke-

mampuan kebocoran sebesar 1 mgJodium dari suatu PLTN (permukaan tanah) yang dapat membahayakan.

Atas dasar ancaman dari kemungkinan kebocoran zat-zat radioaktif ini, bagaimanapun kecilnya, maka di Amerika Serikat telah diusulkan Kriteria penempatan PLTN atas dasar keselamatan radiologi melalui ketentuan "Exclusion area" (Lampiran I).

Seperti sudah dikemukakan PLTN dengan daya 500 MWe, setelah 1 tahun operasi akan menghasilkan $\frac{1}{2}$ ton produk fisi yang terbagi dalam sekitar 200 jenis isotop-isotop, yang paling berbahaya adalah I-131 dan Sr-90. Masing-masing isotop setelah PLTN beroperasi beberapa lama, akan berada dalam tingkat saturasinya.

Komposisi masing-masing isotop adalah seperti yang dinyatakan dengan gambar-gambar "lekukan". Sedangkan tingkat aktivitasnya tercantum dalam Tabel-1.

Misal I-131 pada saat shut-down (reaksi nuklir berhenti) memiliki aktivitas jenis I-131 25 k Ci/MW thermis, atau untuk PLTN dengan ukuran 500 MWe memiliki aktivitas 37500 kCi = $3,75 \times 10^7$ Ci dari I-131 saja atau seluruhnya sekitar 10^9 Ci.

Dalam hal ini perlu dicatat perbedaan antara bahaya yang terkandung didalam produk fisi serta bahaya efektif yang bisa timbul. Yang terakhir ini berhubungan dengan masalah probabilitas. Meskipun probabilitas ini, baik dilihat dari arah tidak semua produk fisi berbentuk gas sehingga mudah disebarkan oleh angin, maupun dari arah pengamanan teknik, adalah rendah, akan tetapi penaksirannya secara kuantitatif akan diperlukan untuk menaksir kemungkinan bahayanya.

Bahaya maximum yang bisa timbul (maximum credible accident) bagi LWR dianggap oleh Amerika Serikat sebagai pecahnya sistim primair, yang menyebabkan teras reaktor meleleh dan produk fisi (gas) bisa keluar. Dalam hal ini bejana tekan tidak perlu pecah. Bila kelemahan terdapat pada bejana tekan, maka zat pendingin (H_2O) akan hilang keluar dan teras akan meleleh. Berdasarkan design dan konstruksinya sebegitu jauh tak pernah terjadi pecahnya bejana tekan. Jadi satu-satunya sumber terjadinya pelepasan produk fisi secara besar-besaran adalah bila bahan bakar didalam teras reaktor akan meleleh. Bahan bakar ini meleleh disebabkan produk fisi yang radioaktif tersebut senantiasa melepaskan tenaga panas sehingga meskipun reaktornya sudah dimatikan (shut-down), tetap memerlukan pendinginan. Untuk pendinginan darurat dari bahan bakar ini diadakan "sistim pendinginan teras darurat" (Emergency core cooling system). Jadi selama ECCS bisa berfungsi dengan baik maka pelepasan produk fisi besar-besaran tak akan pernah terjadi.

Jelaslah bahwa masalah keberhasilan dari ECCS adalah kunci dari keselamatan reaktor yang terakhir. Oleh karena hal inilah di Amerika Serikat telah timbul perdebatan yang sengit diantara "Union of Concerned Scientists" di satu pihak dengan USAEC dan "Manufacturer" di lain pihak.

Sebegitu jauh sebagai akibat dari perdebatan ini ada beberapa perubahan design dari sistim reaktor, misalnya diameter element bahan bakar dibuat lebih kecil.

Kembali kepada kemungkinan timbulnya bencana yang disebabkan oleh adanya PLTN, maka hal ini telah menjadi bahan pemikiran di seluruh dunia, terutama dengan alasan bahwa peradaban perlu ditunjang oleh tenaga listrik.

Pemanfaatan tenaga matahari dan fusi masih dalam jangka waktu yang terlalu lama, sedangkan minyak bisa dibatasi pada keperluan industri dan transport, sehingga tinggal pada batu bara dan nuklir. Jadi berarti mau tidak mau suatu waktu PLTN akan dibangun ditempat-tempat yang dewasa ini belum menggunakannya.

SISTIM PENJAGAAN TERHADAP PENYEBARAN ISOTOP RADIOAKTIF KELUAR DARI REAKTOR.

Secara keseluruhannya maka terdapat pertahanan rangkap secara sebagai berikut :

Pertahanan I : Atom-atom yang berada dalam batang bakar dan selongsong (= cladding) untuk menahan produk fisi berada di situ, agar tidak memasuki sitim aliran zat pendingin.

Pertahanan II : Sistim aliran zat pendingin yang tertutup dan selalu dimonitor. Zat pendingin ini dapat mengandung isotop radioaktif dari produk fisi (misal kerusakan pada selongsong) dan dari aktivasi zat pendingin dan impurities oleh sinar neutron. Aktivitas yang berasal dari kebocoran sistim primer dan sisa pembersihan filter, biasanya di bawah 10 Ci/tahun, sedangkan bila ada tritium (dihasilkan dari aktivasi D_2O pada reaktor HWR) bisa sampai 1,000 Ci/tahun. Pembuangannya dengan cara waste management.

Pertahanan III : Sistim Containment.

Sistim ini dimaksudkan sebagai batas terkontrol terakhir. Sistim ini mengalami perkembangannya dan kini dikenal 3 sistim.

1. Pressure Containment
2. Pressure Supresion Containment,
3. Multiple Containment.

Pertahanan IV : J a r a k.

Seperti diketahui sekali zat radioaktif yang berbahaya (misalnya I-131) dapat keluar dari PLTN betapapun kecilnya akan dapat membahayakan penduduk bila berada pada jarak terlalu dekat. Berkat adanya penjagaan teknis serta sistim monitoring maka hingga kini tak pernah terjadi kebocoran zat radioaktif keluar PLTN dalam kwantita yang melebihi batas yang diperkenankan. Oleh karena itu ada juga negara yang mempunyai kebijaksanaan membangun PLTN ditempat yang dekat dengan pusat penduduk, dengan mengadakan pengamanan-pengamanan teknis seperlunya.

Falsafah untuk keselamatan PLTN

Seperti sudah dikemukakan PLTN bukan saja harus dijaga supaya tidak sampai menyebarkan zat-zat radioaktif yang dihasilkannya keluar, akan tetapi juga harus dijaga jangan sampai mengalami kerusakan betapapun kecilnya, karena investasinya yang besar. Oleh karena itu keselamatan reaktor harus dimasukkan kedalam Program PLTN, dengan cara tindakan pengaturan (= Regulatory

Control), yang mempunyai kekuatan setidak-tidaknya setingkat dengan Peraturan Pemerintah, yang mencakup segala usaha yang diperlukan untuk memberikan keyakinan bahwa segala peralatan PLTN dapat berfungsi secara memuaskan. Untuk itu maka diperlukan :

1. Design PLTN memenuhi persyaratan (termasuk persyaratan kualitas peralatan).
2. Konstruksi dilaksanakan sesuai dengan design.
3. Hasil Test memberikan hasil sesuai dengan daya yang tertera didalam design.
4. PLTN dijalankan didalam batas seperti yang ditentukan didalam design.

BAHAN BACAAN.

1. H.W. HECKSTALL – SMITH : “Atomic Radiation dangers”, 1958.
2. GLASSTON & SESONSKE : “Nuclear Reactor Engineering”, 1967.
3. D.W. CRANCHEI : “Safety and Siting of Nuclear Power Plant” dan bahan-bahan kursus lainnya pada Kursus Teknologi Nuklir IV, Lucas Heights, 1968.
4. Majalah Atomic Energy in Australia, October 1970, Juli – October 1971, Juli 1973.
5. Symposium IAEA 1973; “Principles and Standard of Reactor Safety”.
6. U S A E C :
“Reactor Safety Study” Wash – 1400, 1974.
7. Workshop Perundang-undangan Tenaga Atom, 6 – 8 Juli 1970.
8. Dr. TAN A FORBES : “The Nuclear Debate – A Call to Reason”. 1974.
9. JAMES S. MOORE: “Why Nuclear Power Plants are Safe”, 1973.
10. SOLEH SOMADIREDDA : Segi Persiapan Reaktor Daya, Seminar Tenaga Nuklir Yogyakarta, 1970.

LAMPIRAN :

ASPEK KESELAMATAN REAKTOR.

USAEC (= United States Atomic Energy Commission) menetapkan agar kandidat lokasi memenuhi syarat Kriteria lokasi yang didasarkan pada 3 daerah yang mengelilingi instalasi reaktor, berturut-turut :

1. Daerah pemencilan (= exclusion area)

Yaitu daerah pertama (yang langsung) mengelilingi reaktor. Pemilik reaktor mempunyai wewenang untuk menentukan semua aktivitas di dalam daerah ini termasuk pemindahan orang-orang dan barang-barang dari daerah ini. Penempatan (penghunian) secara menetap di dalam daerah ini adalah terlarang.

2. Daerah dengan jumlah penduduk sedikit.

Yaitu daerah kedua, yang pada gilirannya mengelilingi daerah pertama tadi. Peraturan USAEC tidak menyatakan kepadatan penduduk maksimum maupun jumlah penduduk seluruhnya yang berada di dalam daerah tersebut, akan tetapi secara umum menyatakan bahwa dalam keadaan kecelakaan harus bisa dimungkinkan melakukan tindakan-tindakan pengamanan yang diperlukan. Kota terbesar di dalam daerah ini dibatasi dengan jumlah penduduk sebesar 25.000 orang.

3. Jarak terhadap pusat tempat penduduk

Yaitu jarak dari reaktor ke perbatasan terdekat dari pusat tempat penduduk yang berpenghuni lebih dari 25.000 orang.

Kriteria letak reaktor tersebut tadi selanjutnya menyetakan ketentuan-ketentuan berikut untuk masing-masing daerahnya :

A. Daerah pemencilan harus sedemikian rupa ukurannya sehingga seseorang yang berada pada titik di perbatasannya di dalam 2 jam segera setelah terjadinya M.C.A. yang dipostulasikan, tidak akan menerima dosis radiasi di atas 25 rem untuk seluruh badan, atau di atas 300 rem kepada thyroid untuk radiasi dari Jodium.

B Daerah populasi rendah harus berukuran sedemikian rupa sehingga seseorang yang berada di perbatasan luarnya yang terkena awan radiasi dari terjadinya M.C.A., selama dalam waktu berada di situ, tidak akan menerima radiasi dalam jumlah yang dibatasi seperti pada A di atas.

C. Jarak ke pusat populasi sekurang-kurangnya harus $1\frac{1}{2}$ kali ini jarak dari reaktor ke batas luar dari daerah populasi rendah. Bila ada kota-kota yang sangat besar maka jarak yang lebih besar dapat diperlukan dengan pertimbangan kemungkinan radiasi total yang mengenai seluruh penduduk.

CHARACTERISTICS OF IMPORTANT FISSION PRODUCT NUCLIDES

Nuclides of Short Half-life. Tabel.1.

Nuclide	Half life	Activity in kCi/ MW thermal power		Melting point °C	Boiling point °C	Volatility	Radiological hazard	
		At shut down	1 Day after shut down					
Br 83	2,3h	0,3	0	- 7,3	59	Highly volatile	External whole body, radiation moderate hazard	
	84	32 min	6	0	- 7,3			
	85	3 min	8	0	- 7,3			
	87	56 s	15	0	- 7,3			
Kr 83 m	114 min	3	0	-157,3	-153	Gaseous	External radia- slight health hazard	
	85 m	4,4 h	8	0,2	-157,3			-153
	87	78 min	15	0	-157,3			-153
	88	2,8 h	23	0,1	-157,3			-153
	89	3 min	31	0	-157,3			-153
	90	33 s	38	0	-157,3			-153
I 131	8 d	25	23	113,6	183	Highly volatile	Internal irradi- ation of thyroid, high radio toxic- ity	
	132	2,3 h	38	0	113,6			183
	133	21 h	54	25	113,6			183
	134	52 min	63	0	113,6			183
	135	6,7 h	55	4,4	113,6			183
	146	86 s	53	0	113,6			183
Xe 131 m	12 d	0,3	0,3	-111,9	-108	Gaseous	External radia- tion slight health hazard	
	133 M	2,3 d	1	0,7	-111,9			-108
	133	5,3 d	54	47	-111,9			-108
	135 m	15,6 min	16	0	-111,9			-108
	135	9,2 h	25	4	-111,9			-108
	137	3,9 min	48	0	-111,9			-108
	138	17 min	53	0	-111,9			-108
	139	41 s	61	0	-111,9			-108
Te 127 m	105 d	0,5	0,5	450	997	Moderately volatile	External radia- tion slight health hazard Health hazard from I 132 daugh- ter. External radia- on moderate health hazard	
	127	9,4 h	2,9	0,5	450			997
	129 m	34 d	2,3	2,3	450			997
	129	72 min	9,5	0	450			997
	131 m	30 h	3,9	2,2	450			997
	131	25 min	26	0	450			997
	132	77 h	38	31	450			997
	133 m	63 min	54	0	450			997
	133	2 min	54	0	450			997
	134	44 min	63	0	450			997
	135	2 min	55	0	450			997

(bersambung)

BEBERAPA PENGERTIAN DALAM BESARAN DAN SATUAN SINAR RADIOAKTIF.

A. SATUAN DASAR :

Bilamana ditinjau dari sebab adanya radiasi, yaitu karena adanya disintegrasi atom-atom sesuatu zat radioaktif, maka kita mempunyai satuan disintegrasi (banyaknya atom lama yang berubah menjadi atom baru) persekon :

C U R I E :

$$1 \text{ Curie} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ disintegrasi per sek.}$$

Sebenarnya satuan ini berasal dari ukuran kemampuan zat radium berdisintegrasi, yaitu :

- Banyaknya atom yang berdisintegrasi untuk zat radium sebanyak 1 gram setiap 1 sekon adalah $3,7 \cdot 10^{10}$.

Bersamaan berdisintegrasinya atom-atom radioaktif, maka dilepaskanlah sinar radioaktif. Dalam hal ini banyaknya particle atau photon radioaktif yang diradiasikan tidaklah perlu sama dengan banyaknya atom yang berdisintegrasi.

Bila sinar radioaktif dinilai atas kemampuannya menghasilkan ionisasi gas, maka kita mempunyai istilah **exposure** (= kuat penyinaran). Satuan dari kuat penyinaran adalah Rontgen dimana 1 Roentgen adalah,,

- kuat penyinaran yang dapat mengioniseer udara dengan STP, atau Standard Temperature and Pressure, yaitu : Temp 0° .

Tekanan 760 mm Hg.

dan volume 1 cm^3 yang ekivalen dengan massa 0,001293 gram, dengan menghasilkan muatan sebesar 1 satuan listrik elektrostatik (E.S.U) dari kedua jenis.

Dalam berbagai besaran/satuan kita dapat menurunkan dengan hasil :

HASIL IONISASI OLEH 1 ROENTGEN

Keadaan S.T.P.	Vol. 1 cm^3	Massa 1 kgr.
Besar muatan listrik	$1 \text{ e.s.u.} = \frac{1}{3} \cdot 10^{-9} \text{ C}$	2,58 C
Banyak pasangan ion	$2,083 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^{15}$

Perhitungan di atas didasarkan pada hasil ionisasi dari sinar radioaktif, dalam hal ini sinar-X. Selain dari pada itu kita dapat menghitung besarnya enersi yang diberikan oleh sinar radioaktif terhadap benda atau materi yang dikenalnya.

Maka kita mempunyai satuan rad (= radiation absorbed dose), dimana 1 rad adalah enersi sebesar 100 erg. yang diserap oleh per gram benda, atau :

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr.}$$

Dengan mengambil hubungan enersi untuk menghasilkan sepasang ion sebesar 32,5 ev., maka 1 roentgen akan ekivalen dengan 83,8 erg. Kadang-kadang juga digunakan angka enersi ionisasi 34 ev./ion.

Akibat radiasi terhadap jaringan tubuh akan berlainan dengan terhadap Udara.

W _{ev.} /ion	R o e n t g e n			
	Udara	STP	Jaringan lunak	
32,5	83,8		93	
34	87,7		98	

Untuk tujuan proteksi radiasi, untuk berbagai sinar digunakan rumus :

$$R E M = Q.F. \times rad$$

dimana R E M satuan dari dose ekuivalen dan Q. F. adalah Quality Factor (sebutan lain R B E = Relative Biological Effectiveness).

R a d i a s i	Q.F.
Sinar-X, gamma, elektron dan beta dengan E _{max} 30 keV	1,0
Sinar beta E _{max.} 30 keV	1,7
Neutron Thermal	3
Neutron cepat dan proton sampai 10 MeV	10
P a r t i k e l	10
Heavy recoil nuclei	20

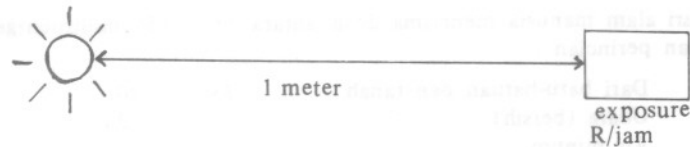
Berikut ini batas penyinaran yang boleh diterima oleh seseorang (berdasarkan terbitan ICRP No. 9, September 1969).

B a g i a n B a d a n.	Maximum Permissible Dose (MPD). Untuk dewasa yang kena radiasi pada waktu bekerja (pegawai fasilitas atom)	Batas Dosis (= Dose Limit) untuk Umum
Gonad, red bone,mar-row (whole body, Uniformly irradiated).	3 rem/13 minggu 5 rems/tahun atau bilamana perlu 5 (N - 18) rem N = usia dalam tahun	0,5 rem/ tahun
Kulit, tulang	15 rem/13 minggu 30 rem/tahun	3 rem/tahun

Thyroid	15 rem/13 minggu 30 rem/tahun	3 rem/tahun khusus anak kurang dari 16 tahun : 1,5 rem/tahun.
Tangan dan lengan Kaki	40 rem/13 minggu 75 rem/tahun	7,5 rem/tahun
Bagian badan lainnya	8 rem /13 minggu 15 rem/tahun	1,5 rem/tahun

B. HUBUNGAN ANTARA KUAT DISINTEGRASI (CURIE) DENGAN DOSIS SINAR-SINAR RADIOAKTIF (ROENTGEN).

Source (Ci)



ada hubungan melalui Γ = spesifik gamma ray constant, di antara bilangan yang menunjukkan besarnya R/jam pada jarak 1 meter dari source sebesar 1 Ci.

Untuk isotope sederhana di mana 1 disintegrasi menghasilkan 1 foton sinar gamma dengan enersi hV.

Maka 1 sek, 1 Ci source memancar $3,7 \times 10^{10}$ foton (bila tiap integrasi disertai 1 partikel atau foton), di mana intensitas sinar per cm^2 pada jarak 1 meter adalah:

$$\frac{3,7 \times 10^{10}}{4 \pi (100)^2} \frac{\text{foton}}{\text{cm}^2 \text{ sek.}} \quad \text{atau} \quad 1,059 \times 10^9 \frac{\text{foton}}{\text{Cm}^2 \text{ jam Ci}}$$

kemudian exposure X (R/jam):
(Catatan exp. = dose rate)

$$X = \left[\phi \cdot h\nu \cdot (\mu/\rho)_{\text{udara}} \right] \frac{1}{86,9} \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}}$$

$$X = 1,059 \times 10^9 h\nu \times (\mu/\rho)_{\text{udara}} \frac{1}{86,9} \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}}$$

ini adalah specific gamma ray constant atau

$$\Gamma = 19,5 \cdot h\nu \cdot (\mu/\rho)_{\text{udara}} \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}}$$

Bagaimana bila 1 disintegrasi memancarkan beberapa foton? Harus dihitung

tiap $h\nu$ untuk foton yang bersangkutan.

Untuk Co-60, yang memancarkan 2 γ dengan enersi 1,17 dan 1,33 pada decay-nya.

$$\begin{array}{rcl}
 h\nu & = & 1,17 \text{ MeV} \qquad \Gamma = 0,613 \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}} \text{ meter} \\
 & & \\
 & = & 1,33 \text{ MeV} \qquad \Gamma = 0,676 \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}} \text{ meter} \\
 & & \hline
 \Gamma_{\text{total}} & = & 1,29 \frac{\text{R}}{\text{jam Ci}} \text{ meter}
 \end{array}$$

Untuk penggunaan praktis ada tabel dari Γ .

C. RADIASI DARI BENDA-BENDA ALAM MAUPUN BUATAN.

Untuk mendapatkan gambaran yang jelas tentang tingkat kekuatan radiasi yang disebabkan oleh benda-benda radioaktif :

1. Dari alam manusia menerima dosis antara 77 - 156 milliroentgen/tahun, dengan perincian :

Dari batu-batuan dan tanah :	23	-	90
Udara (bersih)			2
Air minum			-
Dari badan kita sendiri			24
Dari sinar kosmis	28	-	40
			<hr/>
Total	77	-	156

2. Radiasi yang disebabkan oleh benda-benda buatan manusia :

Bangunan : umumnya mengandung bahan-bahan radioaktif yang terdapat pada bata atau batu-batuan yang digunakan antara 10 - 30 mr/tahun.

Tambang : tambang pitchblende (bahan mentah dari uranium) : 30 x dari MPD.

Cat luminous, instrument board pada kapal terbang: memberikan radiasi pada pilotnya sebesar 1300 mr/tahun, untuk waktu terbang secara normal.

Dial arloji : 40 mr/tahun (- sampai 100 mr/hari untuk bahan cat yang mengandung 1 microgram radium).

Kedokteran : chest X-ray : 100 mr (cara photographic).
1000 mr (fluorescent screen method).

Lethal dose : dianggap 450 r (dikenal dengan sebutan "LD-50" yang artinya separuh dari orang-orang yang kena sinar dengan kekuatan 450 r akan meninggal).

D. PENGETAHUAN PENJAGAAN DIRI YANG PRAKTIS UNTUK SINAR-SINAR RADIOAKTIF.

Intensitas (kekuatan radiasi per satuan luas) dari suatu sumber berbentuk titik berbanding terbalik dengan jarak pangkat dua. Dengan demikian intensitas akan cepat menurun pada jarak yang bertambah.

Pemakaian tabir (shielding) dapat memperlemah intensitas radiasi :

Sinar alpha adalah sinar dari partikel-partikel alpha yang masing-masing bermuatan listrik positif 2 satuan elektron, dan masa 4 a.m.u.

Sinar beta, adalah sinar partikel-partikel beta, yaitu elektron.

Sinar gamma, adalah sinar elektromagnetis.

Sinar neutron, adalah sinar dari partikel-partikel neutron, yang tidak bermuatan, mempunyai massa satu a.m.u.

Sinar-sinar alpha dan beta adalah sinar-sinar yang lemah yang bisa ditahan cukup dengan lapisan kulit luar saja. Sinar-sinar ini akan berbahaya bilamana bahan-bahan radioaktif yang menyinarakan sinar ini dapat memasuki tubuh kita, yaitu yang terutama dengan cara pengisapan udara radioaktif di lab-lab, dan meminum air yang contaminated (dalam udara isotope radioaktif Argon 41 dan dalam air strontium 69, max. permissible air concentration yang mengandung A-41 adalah 10^{-3} microcurie/liter). Argon yang ada di udara adalah Argon-40, Argon -41 timbul karena neutron capture. Untuk menghindarkan konsentrasi tinggi dari Argon pada udara, harus sistim ventilasi yang baik.

Sinar gamma, sebagai gelombang elektromagnetis dalam berkas kecil akan diserap (absorbed) sebagai sinar (foton) tanpa merusak bahan penyerap.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

Akan tetapi ada kemungkinan terjadi pengrusakan bahan yang dikenainya melalui:

1. Efek fotoelektris, elektron dari atom dilepaskan oleh foton. Biasanya terjadi untuk energi gamma yang rendah dan Z bahan yang tinggi.
2. Hamburan Compton. Cocok untuk $1 \text{ MeV} \leq E_\gamma \leq 5 \text{ MeV}$ pada Z bahan yang tinggi.
3. Produksi pasangan positron - elektron cocok untuk $E > 1,02 \text{ MeV}$, disini foton hilang dan sebagai gantinya timbul partikel positron dan elektron yang bisa menimbulkan efek sekunder.

Dibandingkan dengan sinar alpha dan beta, maka sinar gamma ini memiliki jarak lintasan yang panjang. Jadi bukan saja memberikan bahaya internal (bila ada didalam tubuh) tapi juga external. Oleh karena itu untuk menahan sinar gamma yang langsung perlu diadakan shielding. Demikian juga dengan sinar neutron.

Akibat Radiasi pada tubuh manusia. MANUSIA.

Berdasarkan pengetahuan selama dipakainya teknik nuklir umumnya, maka kecepatan dosis 2,5 milli-rem atau 20 millirem per hari kerja. yang diterima se-jam

lama bertahun-tahun tidak mengakibatkan apa-apa. Untuk keadaan kecelakaan radiasi dengan dosis tinggi (dalam waktu pendek) mungkin ditimbulkan akibat-akibat berikut :

Dosis (rem)	Akibat klinis yang mungkin.
0 - 25	Tak tampak akibat apa-apa
25 - 100	Sedikit perubahan pada darah, tapi tak terlihat akibat lain.
100 - 200	Muntah-muntah antara 5 - 50% dalam masa 3 jam, disertai kelelahan dan kehilangan nafsu makan. Perubahan pada darah yang cukup banyak. Kecuali pada sistim pembentukan darah maka penyembuhan kembali dalam semua hal bisa dalam beberapa minggu.

DISKUSI

SOEHIRNO :

Saya ingin mengajukan pertanyaan orang awam : Apakah reaktor PLTN bisa meledak seperti bom atom ? Apa kemungkinan ini diperkirakan/diperhitungkan sebagai keadaan tidak normal ?

SOLEH SOMADIREDDA :

Jenis pertanyaan ini sering dikemukakan baik di kita maupun di luar negeri. Secara teori dan dari pengalaman hingga kini tidak mungkin terjadi peristiwa meledaknya reaktor yang berasal dari bahan bakar uranium. Proses ledakan seperti bom atom terjadi bila reaktivitas (atau perbandingan jumlah neutron akhir dari 1 generasi terhadap generasi sebelumnya) naik dengan cepat. Untuk reaktor thermal bila karena sesuatu sebab reaktivitas naik tanpa terkendali maka bahan bakar U menjadi panas (karena produksi panas juga naik). Ini akan menyebabkan kenaikan suhu zat pendingin, bila zat pendingin berbentuk cair (atau air misalnya) kenaikan temperatur menyebabkan kerapatan (density) turun, yang akan mengakibatkan moderasi neutron berkurang, sehingga reaktivitas turun dan Reaktor berhenti. Bila temperatur naik dengan cepat satu-satunya akibat bahan bakar meleleh. Jadi termasuk kedalam kasus melelehnya bahan bakar. Bila meleleh maka bentuk volume akan lebih menyebar, jadi tidak cukup untuk berada dalam keadaan kritis, sehingga reaksi fisi berhenti, atau tidak akan sampai terjadi peristiwa ledakan. Kenaikan jumlah neutron dengan cepat tanpa terkendali atau yang disebut nuclear excursion termasuk kedalam kategori keadaan tidak normal.

NILOPERBOWO :

Selama histori dipakainya reaktor oleh umat manusia hingga kini apa sudah ada dibuat daftar failures/kecelakaan-kecelakaan yang pernah terjadi sehingga dapat ditarik pelajaran-pelajaran untuk tidak terulang lagi.

SOLEH SOMADIREDDA

Failures dalam hal berfungsinya sesuatu alat selalu ada laporannya baik yang dibuat oleh International Atomic Energy Agency maupun oleh beberapa negeri seperti Amerika Serikat. Laporan berbentuk terbitan-terbitan (judul : Reactors Operating Experience dsb.) Demikian juga selalu terdapat literatur-literatur baik text-book maupun terbitan periodis menjelaskan tentang kecelakaan dalam instalasi nuklir umumnya, tetapi sebegitu jauh tak pernah ada kecelakaan di suatu PLTN (reaktor untuk listrik).

APRILANI SOEGIARTO :

1. Harap dihilangkan seakan-akan saya meragukan integritas BATAN dengan pertanyaan saya tentang hak, wewenang & perundang-undangan Keselamatan Radiasi.
2. Standar exposure Radiasi semuanya diturunkan dari ICRP. Tetapi interpretasinya lain-lain. Misalnya Rusia, Amerika, Inggris,
 - a) Kira-kira Indonesia akan mengikut interpretasi yang mana ?
 - b) Apakah BATAN melakukan monitoring pada reaktor Trigamark baik udara, air maupun yang ada di sekelilingnya.

3. Satu sumber bahan radiasi lain di luar reaktor adalah "spent fuel reprocessing plant", di mana ini kira-kira akan diletakkan dalam hubungannya dengan PLTN.
4. Sejauh mana BATAN telah melakukan pengawasan terhadap penggunaan bahan radioaktif untuk keperluan pengobatan ?

SOLEH SOMADIREJJA :

1. Terima kasih
2. a. BATAN sedang menyusun ketentuan-ketentuan tentang ini.
2. b. Monitoring yang dilakukan pada lingkungan sekitar Pusat Reaktor Atom Bandung meliputi pengukuran tingkat radiasi dari tanah, air, udara dan tumbuh-tumbuhan sampai sejauh 2 km. Hal ini dilakukan secara periodik, bulanan dan sudah dimulai sejak reaktor belum beroperasi. Dengan demikian terdapat gambaran apakah ada pencemaran yang disebabkan oleh beroperasinya reaktor.
3. Tempat untuk "spent fuel reprocessing plant" saya kira dapat menyusul setelah tempat untuk PLTN ditentukan.
4. BATAN sudah membuat Peraturan Pemerintah No. 9 dalam hal ini, yaitu mengenai ketentuan meminta izin untuk penggunaan zat-zat radioaktif.

APRILANI SOEGIARTO :

Komentar :

Masalah berapa luas zone A, zone B, zone C itu memang sangat penting. Saya kira kita perlu mengambil patokan yang telah ada, lalu direvaluasi dengan keadaan di Indonesia, pengalaman BATAN sendiri. Di P. Jawa di mana tekanan penduduk telah begitu besar, adanya buffer zone yang begitu luas ada kemungkinan menjadi suatu masalah sosial yang eksplofif.

PETER E. HEHANUSSA :

Saya kurang setuju dengan pendapat anda bahwa zone-zone pengamanan didasarkan atas jarak yang kaku. Sebaiknya kondisi setempat (geofisika, geologi, sedimentasi, topografi) ikut diperhatikan. Dengan demikian zone-zone itu tidak perlu lingkaran-lingkaran konsentris dengan radius yang kaku/ketat.

SOLEH SOMADIREJJA :

Didalam naskah prasaran saya tidak dikemukakan jarak-jarak untuk sesuatu harga tertentu. Yang saya ambil adalah definisi jarak-jarak tersebut yang dianut Amerika Serikat. Dari definisi jelas bahwa jarak-jarak tersebut perlu diturunkan dari parameter-parameter yang berhubungan dengan penyebaran zat-zat radioaktif bila terjadi kecelakaan.

SUSANTO :

1. Apakah daerah pengamanan dapat didesign sebelum PLTN didirikan atau atas dasar pengalaman sesudah PLTN berdiri.
2. Bagaimana cara mendesign daerah pengamanan tersebut, apakah dengan standard yang diambil dari luar negeri dapat ditrapkan di sini, karena kon-

disi meteorologi dan kependudukan berbeda ?

3. Apabila dianggap suatu lingkaran, berapakah kira-kira besarnya radius untuk daerah A. ?

SOLEH SOMADIREDJA :

Karena pengalaman di luar negeri atas beroperasinya instalasi nuklir umumnya dan PLTN khususnya, maka dapat dipelajari peraturan-peraturan luar negeri dan disesuaikan dengan keadaan di Indonesia. Penentuan daerah pengamanan sebaiknya diadakan melalui Peraturan Pemerintah, sebelum PLTN yang pertama beroperasi.

S. MARTOSUDIRJO :

Dalam persoalan dan pengamanan reaktor unsur-unsur yang berhubungan dengan Hankam belum atau tidak disinggung. Apakah ini memang tidak perlu dibicarakan ataukah sebaiknya tidak dibicarakan disini ? Misalnya karena persyaratan-persyaratan yang khusus untuk sebuah PLTN dibandingkan terhadap instalasi daya konvensional. Juga pengaruhnya apabila terjadi peperangan. ?

SOLEH SOMADIREDJA :

Didalam penentuan lokasi PLTN di berbagai negara (karena ini yang segera tersedia untuk bisa dipelajari) memang terlihat beberapa segi yang perlu diikuti sertakan, selain masalah teknis ekonomis dan keamanan terhadap bahaya radiasi. Untuk faktor-faktor di luar tersebut di atas kiranya bisa diperkenalkan oleh para peserta lokakarya, ataupun nanti sesudah hasil-hasil lokakarya diterbitkan. Faktor-faktor yang baru muncul dapat dipertimbangkan untuk menjadi dasar juga bagi penentuan lokasi PLTN.