

BAB V

KEAMANAN, KESELAMATAN DAN KESERASIAN NUKLIR DENGAN LINGKUNGAN

Sebagai jenis atau bentuk energi yang diperkenalkan kepada masyarakat dunia secara dahsyat dan mengerikan melalui penjatuhan bom atom untuk mengakhiri Perang Dunia ke-II, sudah tentu banyak anggota masyarakat akan meragukan segi keamanan dan keselamatan dalam memanfaatkan energi nuklir. Keraguan dapat timbul karena beberapa hal:

Pertama adalah sinar radioaktif yang terkandung di dalam reaktor nuklir, dapatkah terjadi kebocoran dan bilamana hal itu terjadi apa yang bisa dilakukan ? Pertanyaan ini tentunya akibat pengetahuan umum mengenai ganasnya sinar-sinar radioaktif yang tidak kasat mata dan hanya dapat terdeteksi dengan bantuan peralatan khusus.

Hal kedua adalah operasi PLTN: apakah reaktor nuklir benar-benar dapat dioperasikan secara aman dan seberapa besarkah kemungkinan atau peluang terjadinya ledakan nuklir ? Ini menjadi masalah karena masyarakat umum sudah terlanjur memperoleh kesan bahwa baik reaktor nuklir maupun bom atom sama-sama bekerja atas dasar reaksi berantai pembelahan inti. Ditambah lagi dengan kenyataan telah terjadinya musibah Three Mile Island-2 pada tahun 1979 dan kecelakaan Chernobyl-4 pada tahun 1986.

Yang ketiga adalah mengenai pengelolaan limbah: bagaimanakah penyimpanan-akhir limbah radioaktif sebagai akibat dari penggunaan PLTN untuk pembangkitan listrik, dan adakah solusi atau pemecahannya ? Sekali lagi, masyarakat umum sudah mengetahui bahwa di antara zat-zat radioaktif yang ada di dalam reaktor nuklir ada yang memiliki sifat toksik dan sekaligus memiliki umur atau waktu paroh yang sangat panjang, sampai ribuan tahun, dan selama itu pula terus menerus memancarkan sinar radioaktif. Maka timbul pertanyaan, bukankah hal ini kita bakal mewariskan masalah besar bagi generasi penerus ?

Hal keempat adalah kecemasan masyarakat dunia tentang kemungkinan meluasnya pengetahuan pembuatan senjata nuklir sebagai akibat meluasnya pembangunan PLTN di dunia, bahkan timbul kekhawatiran mengenai dapat terjadinya aksi terror yang meledakkan bangunan PLTN dengan tujuan menyebarkan zat radioaktif atau yang berupaya untuk bahan bakar nuklir untuk pembuatan bom nuklir.

Semua pertanyaan dan permasalahan ini belum tuntas terjawab ketika PLTN mulai dibangun secara besar-besaran dalam tahun 1960an dan 1970an di Amerika Serikat, dan karena itu tidaklah mengherankan bahwasanya banyak pihak meragukan manfaat penggunaan PLTN untuk memasok tenaga listrik. Tetapi saat ini¹, tidak kurang dari 438 PLTN beroperasi secara aman, dan mestinya segi

¹ Naskah ditulis dalam tahun 2007

keselamatan sudah tidak diragukan lagi. Namun, orang tak bisa disalahkan kalau pada tahun 1960an masih merasa ngeri karena ingat dijatuhkannya bom atom pada tahun 1945 karena waktu itu baru 20 tahun berlalu, atau dewasa ini masih mengingat-ingat insiden Three Mile Island-2 pada tahun 1979 dan kecelakaan Cernobil-4 pada tahun 1986. Kedua peristiwa ini membuat citra PLTN sedemikian terpuruknya sehingga saat ini hanya beberapa negara yang 'berani' membangun PLTN.

Mari kita bahas satu per satu permasalahan tersebut di atas. **Yang pertama** ialah kemungkinan kebocoran zat radioaktif.

Kebocoran Zat Radioaktif

Zat radioaktif yang terbentuk di dalam reaktor nuklir adalah hasil-belah reaksi pembelahan inti yang dialami bahan bakar nuklir, terutama U^{235} dan Pu^{239} . Sebagian U^{238} juga mengalami reaksi pembelahan inti, tetapi jumlahnya tidak sebanyak U^{235} ataupun Pu^{239} (yang muncul di dalam bahan bakar nuklir karena penangkapan neutron oleh U^{238} yang berubah menjadi Pu^{239}). Hasil-belah ini semuanya terkandung di dalam matriks bahan bakar yang bentuk kimiawinya adalah UO_2 , yaitu oksida uranium, yang sebenarnya adalah suatu keramik. Sebagaimana diketahui, keramik adalah bahan yang dibuat dengan suhu tinggi dan merupakan benda yang amat pekat. Dengan demikian zat radioaktif hasil-belah tidak dapat pindah tempat dan tetap ada di dalam matriks bahan bakar UO_2 .

Bahan bakar itu berukuran sekitar garis-tengah 1 cm (mungkin lebih sedikit) dan berbentuk silinder seperti peluru disebut pellet. Pellet diletakkan di dalam kelongsong terbuat dari zircalloy, campuran logam zirkon dengan aluminium, sepanjang tiga sampai empat meter (bergantung pada desain reaktor). Kelongsong berisi pellet ini disusun dalam suatu perangkat bahan bakar nuklir yang terdiri atas sekitar duaratus batang kelongsong setiap perangkatnya. Di dalam reaktor nuklir PLTN jumlah perangkat bahan bakar nuklir bisa mencapai tigaratus lebih.

Hal yang perlu diketahui adalah bahwa seluruh pellet bahan bakar di dalam seluruh kelongsong dari semua perangkat bahan bakar nuklir, kesemuanya itu telah dibuat dan dikelola sedemikian rupa sehingga tidak ada satu pun yang cacat, dari mulai di pabrik pembuatannya sampai digunakan di dalam reaktor nuklir dan terus disimpan dalam kolam air setelah dipakai di dalam reaktor. Yang terdeteksi cacat sewaktu tahap pembuatannya tentunya tidak digunakan. Selama dalam tahap pembuatan tentunya dilaksanakan dengan pengawasan jaminan kualitas yang ketat. Dan hal ini wajib dilakukan dengan baik, untuk mencegah terjadinya kerugian besar seandainya terjadi kebocoran kelongsong sewaktu operasi reaktor².

Jadi radioaktivitas hasil-belah yang ada di dalam batang bahan bakar (di dalam kelongsong), akan tetap ada di dalam batang bahan bakar dan tidak akan

² Kerugian besar timbul karena operasi reaktor harus dihentikan, bejana tekan reaktor harus dibuka dan perangkat bahan bakar yang bocor harus diganti; proses ini memakan waktu sedikitnya tiga minggu. Selama itu tentunya tidak ada produksi listrik.

berpindah kemana-mana. Ia hanya berpindah bilamana batang bahan bakar itu dipindah, misalnya dari reaktor nuklir ke kolam tempat pendinginan atau penyimpanan.

Di sini perlu disampaikan bahwa ada juga radioaktivitas lain yang timbul di dalam saluran pendingin primer selama operasi reaktor: yaitu air pendingin itu sendiri menjadi radioaktif. Hal ini akibat inti oksigen O^{16} menyerap neutron dan mengeluarkan proton sehingga berubah menjadi N^{16} . Tetapi N^{16} ini menjadi radioaktif memancarkan sinar beta (zarah elektron) dengan waktu paroh yang singkat, yaitu 7,1 detik, dan ia kembali menjadi O^{16} . Sinar beta ini diserap dalam air pendingin.

Kemungkinan Ledakan Nuklir

Hal kedua mengenai operasi reaktor nuklir dalam PLTN adalah kerisauan mengenai kemungkinan terjadinya ledakan atau kecelakaan nuklir. Banyak orang menduga bahwa reaksi berantai yang terjadi di dalam reaktor nuklir adalah sama dengan reaksi berantai yang terjadi dalam bom atom yang meledak. Sebenarnya reaksi berantai itu tidak sama, juga tidak ‘serupa tetapi tak sama’ melainkan ‘serupa tetapi sangat berbeda’.

Perbedaannya dalam kecepatan terjadinya reaksi berantai. Dalam bom atom reaksi pembelahan inti (fisi) terjadi karena bahan fisilnya (U^{235} atau Pu^{239}) murni (90 persen lebih, hampir 100 persen). Neutron yang dikeluarkan dari reaksi fisi (dan langsung ditangkap lagi oleh bahan fisil) berkecepatan tinggi – dengan energi sekitar 1-2 Mev (juta elektron-volt).

Sedang dalam reaktor nuklir PLTN, bahan fisilnya hanya 3-5 persen U^{235} dan uranium selebihnya adalah U^{238} ; di dalam reaktor ada bahan moderator yang memperlambat kecepatan neutron sampai berenergi sekitar 0,03 ev. Pada energi rendah ini neutron berpeluang amat besar ditangkap lagi oleh U^{235} di dalam batang bahan bakar. Ini memang sifat U^{235} : peluang menangkap neutron lambat jauh lebih besar (200 kali) ketimbang menangkap neutron cepat.

Jika perbandingan energi (kinetik) neutron cepat dengan energi neutron lambat adalah hampir 100 juta (2 Mev/0,03 ev), maka perbandingan kecepatan neutron cepat dengan kecepatan neutron lambat adalah 10,000 (akar dari 100 juta), karena energi kinetik $= (1/2) * m * V^2$. Maka reaksi berantai reaktor nuklir berjalan 10,000 kali lebih lamban ketimbang reaksi berantai bom atom. Ini belum memperhitungkan jarak yang ditempuh oleh neutron di dalam reaktor nuklir yang cukup jauh ketimbang neutron di dalam bom. Penurunan energi kinetik neutron ini disebabkan ia berbenturan dengan inti bahan moderator (inti atom H dalam air) dan hal ini terjadi sedikitnya belasan kali (rata-rata 18 kali). Selain itu, sebagian kecil neutron yang dikeluarkan dari reaksi fisi, tergolong apa yang dinamai ‘neutron kasip’ [delayed neutron]. Ini lebih memperlambat lagi reaksi berantai dan bahkan mempermudah pembuatan instrumentasi untuk mengendalikan laju reaksi berantai.

Jenis atau macam kecelakaan nuklir dalam PLTN yang menjadi wacana hangat pada awal perkembangan PLTN sekitar tahun 1970 di Amerika Serikat adalah kemungkinan terjadinya *loss of coolant accident* atau LOCA. Ketika itu terbayang peluang pipa utama patah sehingga air bertekanan tinggi dalam bejana reaktor akan “muncrat” ke luar dan teras reaktor yang panas akan tersingkap dan meleleh. Inilah awal dari gejala yang mendapat julukan “*the China syndrome*” yaitu teras reaktor meleleh dan menembus ke bagian bawah bejana dan gedung reaktor. Namun para ahli akhirnya berpendapat bahwa peristiwa seperti itu hampir mustahil terjadi karena ketatnya pengawasan terhadap pembuatan bejana reaktor berikut pengelasan pipa saluran primer ke dan dari reaktor. Namun ada serangkaian kejadian beruntun yang dapat menimbulkan kerusakan terhadap teras reaktor hingga meleleh, dan serangkaian kejadian ini masuk dalam perhitungan analisis *probabilistic risk assessment* yang laporannya terbit tahun 1974³. Ternyata kemudian peristiwa semacam ini benar-benar terjadi pada bulan Maret tahun 1979, yaitu kecelakaan atau insiden Three Mile Island-2, yang dibahas lebih lanjut dalam Bab ini (lihat di bawah).

Kiranya “kecelakaan” seperti inilah yang masih dapat terjadi terhadap PLTN jenis air tekan, tetapi tidak ada korban jiwa ataupun cedera terhadap regu operator atau penduduk sekeliling. Terutama karena ada kubah pengungkung.

Semoga para pembaca sudah dapat diyakinkan dengan penjelasan di atas. Reaksi berantai di dalam reaktor nuklir PLTN memang terlalu lamban untuk bisa meledak seperti bom atom. Selain itu, di dalam reaktor terdapat terlalu banyak bahan lain seperti moderator, pendingin dan kelongsong bahan bakar; yang terpenting adalah tidak cukup bahan fisis U^{235} untuk memungkinkan ledakan nuklir.

Bom nuklir memerlukan bahan ledak nuklir murni U^{235} atau Pu^{239} yang cukup banyak, sebelum meledak terbagai atas dua atau lebih bagian terpisah, disusun dalam suatu konfigurasi yang memungkinkan dalam sekejap digabungkan menjadi satu dan melebihi titik kritis sehingga meledak, dan pada saat diledakkan disulut dengan penembakan neutron dari sumber neutron di dalam bom.

Sebaliknya di dalam reaktor nuklir PLTN bahan bakarnya hanya 3-4 persen U^{235} , dengan konfigurasi batang-batang panjang yang statis dan terdapat terlalu banyak bahan moderator yang memperlambat neutron sehingga mustahil dapat-ledak.

Berikut ini penjelasan tambahan mengapa reaktor nuklir jenis air tekan adalah jenis reaktor yang aman, dan dilanjutkan dengan pembahasan mengenai kecelakaan nuklir yang pernah terjadi, yaitu Three Mile Island-2 dan Chernobil-4.

³ Laporan dikenal dengan nomor WASH-1400 disusun oleh sebuah tim di bawah kepemimpinan Prof. Norman Rasmussen dari M.I.T. Laporan berkesimpulan bahwa peristiwa tersebut peluangnya (probability) adalah sekitar 10^{-4} /tahun. Dewasa ini, dengan perbaikan-perbaikan yang telah dicapai sejak insiden TMI-2 dan penyempurnaan keandalan peralatan komponen, peluang itu sudah dapat diturunkan menjadi 10^{-6} /th.

Sifat Aman Hakiki Reaktor Jenis Air

Pada reaktor nuklir jenis air seperti PWR, BWR atau PHWR, suatu reaksi berantai yang 'tak terkendali' (misalnya batang pengendali/penyerap neutron ditarik keluar teras) tidak akan mengkhawatirkan. Ini disebabkan ia memiliki sifat hakiki (inherent), yaitu cenderung mematikan sendiri reaksi berantai tersebut. Sifat ini disebut 'negative reactivity coefficient' atau koefisien reaktivitas negatif. Apabila reaksi berantai meningkat, maka ia cenderung untuk memadamkan-diri. Penjelasannya begini. Kalau reaksi berantai meningkat, maka batang bahan bakar akan memanas. Di sekeliling batang bahan bakar, air akan memuai dan bila berlanjut dapat sampai mendidih. Adanya pemuaiian dan pendidihan ini mengakibatkan air kurang efektif memperlambat neutron, dan jumlah neutron lambat menjadi berkurang. Selanjutnya jumlah neutron yang diserap oleh U^{235} akan berkurang, dan pada gilirannya jumlah reaksi fisi berkurang.

Sekalipun reaktor jenis air memiliki sifat hakiki untuk memadamkan-diri, pencipta reaktor nuklir tetap hati-hati dengan mensyaratkan dibangunnya bangunan kubah pengungkung reaktor untuk berjaga-jaga sekiranya zat radioaktif dapat lepas keluar dari reaktor. Selain itu pada tahun 1973 Komisi Tenaga Atom Amerika Serikat menambahkan persyaratan di pasanginya perlengkapan yang disebut "sistem pendinginan teras darurat" (emergency core-cooling system, disingkat ECCS) pada setiap reaktor nuklir dalam PLTN, yaitu perlengkapan yang dipasang di dalam reaktor untuk menyemprot teras bahan bakar reaktor yang secara otomatis bekerja bilamana terjadi penyusutan permukaan air di dalam reaktor⁴. (Hal ini diulas lebih lanjut di bawah.) Semua negara lain yang membangun reaktor nuklir jenis air tekan mengikuti contoh Amerika Serikat.

Sesungguhnya persyaratan untuk memasang sistem ECCS dapatlah dikatakan terutama bertujuan untuk melindungi perangkat keras reaktor nuklir itu sendiri, yaitu dalam upaya untuk menjamin tidak terjadinya pelelehan bahan bakar. Sedang untuk perlindungan penduduk atau masyarakat sekitar PLTN sudah ada kubah pengungkung yang bakal mencegah terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan.

Lain halnya dengan reaktor nuklir jenis RMBK yang dibangun di Chernobil. Batang bahan bakarnya memang serupa dengan reaktor nuklir jenis air: didinginkan oleh air yang dialirkan dalam tabung tekan yang berisi batang bahan bakar, tetapi moderatornya grafit (di luar tabung). Tabung-tabung tekan ada di dalam lubang-lubang dalam tumpukan grafit; sehingga reaktor ini bahan moderatornya adalah grafit dan pendingin batang bahan bakarnya adalah air bertekanan tinggi. Bilamana reaksi berantai meningkat, jumlah neutron yang diperlambat dalam grafit meningkat pula, dengan akibat neutron lambat meningkat jumlahnya. Reaksi berantai pun bertambah banyak. Keadaan demikian berakibat sistem ini memiliki koefisien reaktivitas positif. Sehingga para operator reaktor harus senantiasa yakin adanya cukup batang pengendali yang dapat dimasukkan ke

⁴ Peluang terjadinya peristiwa demikian itu memang ada, sebagaimana terbukti dalam insiden Three Mile Island-2 dalam tahun 1979).

dalam teras reaktor untuk memadamkan reaksi berantai. Selain itu para pencipta reaktor nuklir di Uni Sovyet tidak mensyaratkan dibangunnya kubah pengungkung bangunan reaktor nuklir; dan ternyata kemudian bahwa kelalaian ini memperparah dampak kecelakaan yang terjadi pada Cernobil-4 pada tahun 1986⁵.

Dua Kecelakaan Nuklir Terparah

Riwayat pengoperasian PLTN untuk pembangkitan listrik sampai saat ini sebenarnya baru berjalan 50 tahun. Dua peristiwa penting yang mencederai “wajah” nuklir untuk damai terjadi 20-28 tahun silam, yaitu insiden atau kecelakaan Three Mile Island-2 di Harrisburg, Pennsylvania, Amerika Serikat, pada bulan Maret 1979, dan kecelakaan Cernobil-4 di Pripyat, Ukraina (ketika itu bagian dari Uni Sovyet) pada bulan April 1986.

Kecelakaan Three Mile Island-2 tahun 1979

Kala itu peristiwa dimulai dengan kegagalan pompa pemasok air (ini adalah kegagalan tehnik pertama) pada daur sekunder. Seharusnya pasokan air tetap ada karena ada saluran pemasok air darurat. Ternyata katup pemasok air darurat masih dalam keadaan tertutup yang seharusnya sudah dibuka (ini adalah kesalahan pertama operator). Tanpa pasokan air dalam daur sekunder maka akibatnya berlanjut dengan peningkatan suhu dalam daur primer. Memanasnya air di dalam daur primer menyebabkan kenaikan tekanan dan terbukanya katup di atas alat penekan air (pressurizer) dan kemudian sistem darurat pendinginan teras reaktor (ECCS, lihat di atas) mulai bekerja. Kesalahan operator yang kedua yang berakibat gawat adalah mematikan sistem ECCS karena ada isyarat bahwa air mengalir ke luar terus dari pressurizer dan hal ini dianggapnya tekanan dalam bejana sangat tinggi, padahal, tanpa disadari oleh para operator, katup di atas alat penekan air dalam keadaan macet (tak dapat menutup kembali); ini adalah kegagalan tehnik kedua. Dimatikannya sistem ECCS ini berakibat pada terus mengalirnya air dari sistem primer sampai terungkapnya sebagian teras reaktor karena permukaan air di dalam bejana menyusut. Bagian teras yang terungkap meleleh dan reaktor tak dapat digunakan lagi.

Dalam insiden TMI-2 ini, operator reaktor salah menafsirkan bacaan/meter air dan justru mematikan ECCS, yang saat itu bekerja dengan baik sesuai dengan fungsinya ! Terjadilah pelelehan bahan bakar; untung hanya bagian atas teras reaktor (tetapi reaktor tak tertolong karena tak dapat digunakan lagi).

Pedoman operator reaktor nuklir jenis air sekarang sudah diubah: bila terjadi sesuatu kelainan dalam operasi reaktor, operator dilarang menjamah tombol-

⁵ Tidak mustahil pertimbangan “kelalaian” ini adalah masalah biaya. Reaktor nuklir dengan bahan moderator grafit mempunyai ukuran fisik yang besar, sehingga membangun kubah pengungkung akan menelan biaya yang besar.

tombol operasi reaktor paling sedikit selama 30 menit, dan jangka waktu itu digunakan untuk mempertimbangkan tindakan apa yang sebaiknya dilakukan guna mengatasi situasi yang telah timbul. Ini untuk mencegah salah-tafsir seperti yang terjadi pada insiden TMI-2.

Korban insiden TMI-2: tidak ada yang meninggal, tidak ada yang cedera; terjadi penglepasan zat radioaktif ke lingkungan akan tetapi tidak sampai menyebabkan paparan-lebih radiasi. Jelas kerugian material dan keuangan ada pada perusahaan listrik pemilik TMI-2. karena PLTN tak dapat berfungsi lagi. Selain itu ada sebagian penduduk sekitar Harrisburg yang menderita trauma akibat pemberitaan yang simpangsiur dan ada pula yang sempat mengungsi dari permukimannya. Berikut ini penuturan mengenai apa yang sesungguhnya terjadi dalam kecelakaan ini.

Peristiwa bermula dari gagalnya pompa pemasok air pada pembangkit uap tepat pukul 4:00 pagi pada tanggal 28 Maret 1979. Sebab kegagalan tidak jelas: apakah mekanik atau listrik. Ada sistem pemasok air tambahan yang mestinya dapat bekerja.

Ternyata ada satu kesalahan para operator, yaitu sistem pemasok air tambahan ke dalam daur sekunder tidak dapat menambah air karena katupnya tertutup. Ketika pengujian-ulang terakhir katupnya lupa untuk dibuka kembali. Akibatnya tidak ada uap yang dibangkitkan.

Karena berkurangnya air yang dijadikan uap dalam pembangkit uap, maka daur primer air yang mengalir dari dan ke reaktor menjadi semakin panas. Berkurangnya pasokan uap ke turbin uap menyebabkan turbin berhenti dan reaktor nuklir pun berhenti bekerja. Tetapi di dalam batang-batang bahan bakar zat radioaktif tetap meluruh dan menimbulkan panas dan tetap memerlukan pendinginan. Pompa sirkulasi daur primer tetap bekerja, tetapi suhu air semakin tinggi dan tekanan air meningkat. Ini menyebabkan katup di atas pressurizer (alat penekan air) membuka.

Suatu kesalahan dilakukan oleh kontraktor sewaktu membangun PLTN, yaitu rangkaian listrik, yang menandakan katup pressurizer sudah tertutup kembali, tidak dipasang (untuk mempercepat penyelesaian konstruksi). Akibatnya, sewaktu peristiwa kecelakaan terjadi, para operator tidak mengetahui bahwa katup pressurizer tidak menutup kembali. Lazimnya, katup terbuka hanya sementara dan segera setelah tekanan air menurun maka katup akan menutup-diri. Jadi air dari daur primer terus keluar dari sistem primer dan para operator tidak menyadari alasannya. Bahkan, karena sistem ECCS bekerja dengan baik dan terus menyemprot air ke arah teras, keluarnya air terus menerus dari sistem primer membuat para operator berkesimpulan bahwa terdapat kelebihan air di dalam sistem primer sehingga mereka memutuskan untuk mematikan ECCS.

Cernobil-4 tahun 1986

Peristiwa yang paling dahsyat dalam sejarah pengoperasian PLTN ini sebenarnya terjadi bukan pada saat operasi normal PLTN untuk pembangkitan listrik. Pada waktu itu para operator reaktor Cernobil-4 mendapat tugas untuk melakukan penyelidikan, menjelang dihentikannya operasi reaktor untuk perawatan rutin. Tugas tersebut bertujuan untuk mengetahui: pada saat reaktor beroperasi, andaikata saluran listrik (dari luar) ke dalam gedung reaktor seluruhnya padam, dapatkah reaktor dijalankan dengan memakai listrik yang dibangkitkannya sendiri, dan untuk berapa lama ?

Sebenarnya, hal ini bukan sesuatu yang mendesak untuk diketahui/dijawab. Bahkan tergolong suatu hal yang luar biasa: PLTN penghasil listrik yang mestinya bersifat komersial tetapi malah diperintahkan untuk melakukan suatu eksperimen. (Tetapi begitulah kenyataan di negara Uni Sovyet ketika itu yang diperintah semata-mata oleh kekuasaan.)

Menurut kenyataannya, ketika para operator siap untuk memulai eksperimen, mereka bahkan diminta untuk menunda dahulu percobaannya selama beberapa waktu, karena produksi listriknya masih dibutuhkan oleh sistem jaringaan.

Penundaan eksperimen tersebut ternyata menjadi salah satu sebab terjadinya kecelakaan. Dalam setiap reaktor nuklir, apabila reaktor selesai beroperasi atau tingkat dayanya diturunkan, maka dalam beberapa jam akan terhimpun di teras reaktor dalam batang-batang bahan bakar (bagian dari hasil pembelahan inti yang ada di dalam matriks bahan bakar) sejumlah zat penyerap neutron yang tergolong 'racun' dan yang memiliki waktu paroh sekitar 9 jam. Zat ini adalah nuklida ${}^6\text{Xe}^{135}$. Jumlah racun meningkat dalam beberapa jam, dan setelah satu hari barulah jumlahnya akan susut. Tetapi apabila reaktor dioperasikan lagi setelah dimatikan (atau dikurangi dayanya) untuk beberapa jam maka akan timbul masalah: kesulitan pengendalian reaktor, karena neutron akan diserap oleh racun kecuali jika batang kendali ditarik (hampir) keluar dari teras. Inilah keadaan reaktor nuklir Cernobil-4 di kala kecelakaan itu. Kerawanan pengendalian reaktor ini rupanya tidak disadari oleh para operator reaktor Cernobil-4. Ada yang kemudian menyatakan bahwa tampaknya pengetahuan mereka mengenai fisika reaktor yang khas jenis reaktor tersebut kurang memadai⁷.

Selain kerawanan pengendalian reaktor masih ada lagi sifat kekhasan jenis reaktor RBMK ini. Yaitu sifat memiliki koefisien reaktivitas yang positif: artinya bilamana daya reaktor meningkat maka reaktor cenderung untuk mempertinggi banyaknya reaksi fisi dan reaksi berantai. [Ini berbeda dengan sifat hakiki reaktor air (PWR, BWR, dan HWR) yang memiliki koefisien reaktivitas yang negatif seperti telah dikemukakan di atas. Yaitu bilamana daya reaktor meningkat maka

⁶ Harap perhatikan bahwa nomor massa 135 termasuk yang banyak dihasilkan dari pembelahan inti U^{235} (lihat pembahasan mengenai pembelahan inti di atas).

⁷ Para pembaca harap memaklumi bahwa penuturan mengenai kecelakaan ini merupakan ringkasan dari rangkaian kejadian yang sesungguhnya. Desain reaktor nuklir RBMK termasuk cukup rumit dan tidak digambarkan secara menyeluruh di sini. Namun secara teknis inti kejadiannya adalah seperti diuraikan.

jumlah reaksi fisi dan berantai cenderung berkurang atau menurun. Hal ini dikatakan sebagai sifat hakiki karena hukum alam: daya reaktor meningkat berarti batang bahan bakar semakin panas dan ini memanasi air di sekelilingnya. Air yang memuai berarti berat jenisnya turun sehingga menurunkan kemampuan memperlambat neutron⁸. Di samping itu, apabila batang bahan bakar memanasi dan suhunya naik, berarti pula daya tangkap uranium terhadap neutron juga menurun.]

Yang paling tragis adalah perilaku para operator Chernobil-4 waktu itu. Mereka ingin cepat selesai eksperimennya. Supaya tidak 'terganggu' (berhenti-operasi-berhenti-operasi) maka mereka mengambil jalan pintas yang fatal: semua batang kendali pengaman di-bypass ! Jelas hal ini melanggar peraturan. Ketika reaksi berantai meningkat, para operator tak dapat menguasai lagi, dan terjadi dua ledakan: pertama akibat uap bertekanan yang mendobrak "tutup" reaktor, dan kedua ledakan hidrogen yang timbul akibat reaksi kimia antara kelongsong zirconium dan air pendingin (yang sangat tinggi suhunya !). Zat radioaktif dari hasil-belahan U^{235} ikut dimuntahkan keluar dengan ledakan, tiga nuklida penting yang paling besar dampaknya adalah $_{53}I^{131}$ (waktu paroh 8,02 hari), $_{55}Cs^{137}$ (waktu paroh 30,07 tahun) dan $_{38}Sr^{90}$ (waktu paroh 28,79 tahun). Salah satu kekurangan dalam desain PLTN di Uni Sovyet adalah tidak adanya syarat untuk membangun kubah pengungkung bangunan reaktor, seperti halnya di negara-negara Barat.

Korban kecelakaan Chernobil-4: 31 orang meninggal, sebagian besar adalah anggota pasukan sukarelawan pemadam kebakaran yang terkena paparan-lebih radiasi⁹, pasukan sukarelawan yang terkena paparan-lebih tetapi tidak fatal, penduduk sekitar yang terpaksa mengungsi, lahan sekitar yang tidak dapat digunakan lagi untuk bercocok tanam, sejumlah anak kecil dan bayi yang lahir sekitar tanggal kecelakaan terancam terkena kanker thyroid (yang pada umumnya dapat disembuhkan dengan pengobatan), trauma dan penderitaan jiwa yang dialami penduduk sekitar, khususnya yang terpaksa mengungsi. Berikut ini foto PLTN Chernobyl-4 yang proak poranda.

⁸ Lebih jauh lagi, apabila air di sekitar bahan bakar mendidih maka akan timbul rongga gelembung, yang berarti menurunnya kemampuan air untuk memperlambat neutron, jadi mengurangi reaksi fisi.

⁹ Mereka meninggal dalam jangka waktu 3 bulan sesudah kecelakaan. Jumlah meninggal seluruhnya mencapai 56 orang, termasuk 9 orang anak yang terkena kanker thyroid dan tak tertolong. Jumlah sukarelawan yang terkena paparan-lebih radiasi selama 1986-87 sebanyak 350000 orang !



Gambar 38. PLTN Chernobyl-4 yang porak poranda pada tahun 1986.

Menurut hasil evaluasi terakhir, yang dibahas di dalam konferensi internasional yang diselenggarakan oleh berbagai badan internasional dalam tahun 2005, jumlah korban meninggal akibat kecelakaan Chernobyl-4 hingga saat itu adalah 56 orang, termasuk 9 anak yang terkena kanker tiroid (kelenjar gondok). Diperkirakan sekitar 4000 orang akan meninggal karena kanker yang disebabkan oleh pencemaran Chernobyl-4; akan tetapi hal ini akan sangat sulit dibedakan dari sejumlah sekitar 100000 orang penduduk sekeliling Chernobyl-4 yang meninggal karena kanker dari sebab-sebab lain. Kesimpulan yang diambil oleh “Chernobyl Forum” yang dibentuk pada tahun 2003 oleh IAEA bersama-sama organisasi multilateral lain seperti WHO, UNDP, UNEP, UNSCEAR, dll. sangat mungkin amat mengherankan pembaca. “Chernobyl Forum” berkesimpulan bahwa dampak kecelakaan ternyata jauh lebih kecil daripada diperkirakan semula oleh masyarakat ilmiah.

Walau bagaimana pun, seandainya PLTN Chernobyl-4 dilengkapi dengan kubah pengungkung, maka tidak akan timbul korban cedera ataupun jiwa, seperti misalnya pada PLTN Ulchin di Korea Selatan berikut ini.



Gambar 39. Sederet PLTN di Ulchin, Korea Selatan, dengan kubah pengungkung yang dapat menahan zat radioaktif.

Seperti telah disebutkan di atas, dewasa ini masih terdapat 12 PLTN jenis RBMK yang beroperasi di kawasan Eropa Timur. Semua reaktor itu telah mengalami perubahan dan perbaikan dari segi keselamatan operasi, termasuk perubahan perkayaan uranium bahan bakar yang telah ditingkatkan dari 1,8 persen menjadi 2,4 persen untuk menstabilkan operasi pada daya rendah. Bahkan ada ahli yang menyatakan bahwa kini kecelakaan seperti yang terjadi di tahun 1986 tidak dapat terulang kembali.

Bagi para pembaca yang berminat mendalami lebih lanjut kedua peristiwa tersebut di atas, dapat disimak tayangan yang ada di Website World Nuclear Association:

<http://www.world-nuclear.org/> . Carilah tulisan dan click pada “Information and Issue Briefs”, atau langsung ke : <http://www.world-nuclear.org/info/info.htm> Kemudian scroll ke bawah dan silahkan pilih topik di bawah “Plant Safety, Accidents”, di antaranya ada “Chernobyl Accident” dan “Three Mile Island 1979”.

Khusus mengenai Chernobyl-4, IAEA (Badan Tenaga Atom Internasional) menyelenggarakan pada tahun 1996 konperensi ilmiah yang mengkaji seluruh aspek kecelakaan serta dampaknya. Ringkasan (67 paragraf) dari hasil konperensi disajikan pada website IAEA sebagai berikut:

<http://www.iaea.org/worldatom/Programmes/Safety/Chernobyl/concls17.pdf>

Konperensi diulang lagi dalam tahun 2005 guna memperoleh kesimpulan mutakhir. Lapornya diterbitkan oleh IAEA dalam tahun 2006.

[Bagi Anda yang tertarik pada serba serbi energi nuklir, silahkan bookmark pada *website World Nuclear Association* judul “*Information and Issue Briefs*”: banyak topik yang menarik, ditulis secara obyektif dan semua tulisan dalam bahasa yang mudah dicerna. Topik dikelompokkan di bawah judul seperti: *Nuclear Power for Electricity, Radioactive Wastes, Other Aspects of Fuel Cycle, Radiation and Health, Plant Safety, Accidents, New Reactor Technology, Avoiding Weapons Proliferation, Resources & Uranium Market, Particular Countries* (mengenai program PLTN di tiap negara; Indonesia disebut-sebut di bawah topik ‘*Asia’s Nuclear Energy Growth*’ secara ringkas tetapi cukup akurat), *Mining & Environment, Climate Change, Non-Electricity Uses of Nuclear Energy*, dan *General Sundry*.]

Mengenai kecemasan masyarakat akan pengelolaan limbah nuklir, hal ini dibahas di bawah ini.

Mengenai hal keempat, kecemasan akan proliferasi teknologi senjata nuklir, akan dibahas dalam rangka pembahasan hukum internasional di dalam Bab VI dalam bagian tentang Aspek Hukum Pengembangan Nuklir.

Pengelolaan Limbah Nuklir

Masalah limbah nuklir sebagai akibat penggunaan PLTN untuk penyediaan tenaga listrik adalah masalah yang amat “serious” yang patut menjadi perhatian umat manusia. Sebagian anggota masyarakat berpendapat bahwa masalah tersebut sedemikian seriusnya sehingga bilamana belum ada penyelesaian tuntas mengenai pengelolaan limbah nuklir maka seyogyanya umat manusia jangan terburu-buru memakai PLTN. “Benar”kah pandangan dan sikap demikian ?

Industri nuklir adalah unik: yaitu satu-satunya industri yang melaksanakan pengamanan dan menangani keselamatan mulai dari hulu sampai ke ujung hilir. Semuanya dilakukan nyaris tanpa emisi gas buang ataupun limbah cair yang radioaktif ataupun berbahaya. Praktis tidak ada pembuangan ke lingkungan sekitar dari operasi pembangkitan listrik nuklir, setidaknya dari PLTN jenis air. Kalaupun ada yang lepas dari operasi normal (bahkan yang tidak normal seperti pada insiden TMI-2), waktu parohnya pendek dan cepat hilang. Limbah nuklir yang berpotensi membahayakan, seluruhnya masih di dalam bahan bakar bekas dan diamankan/disimpan, atau, apabila diproses-ulang guna memanfaatkan sisa bahan fisil, limbahnya dimampatkan dalam gelas (vitrikifikasi) dan diamankan/disimpan.

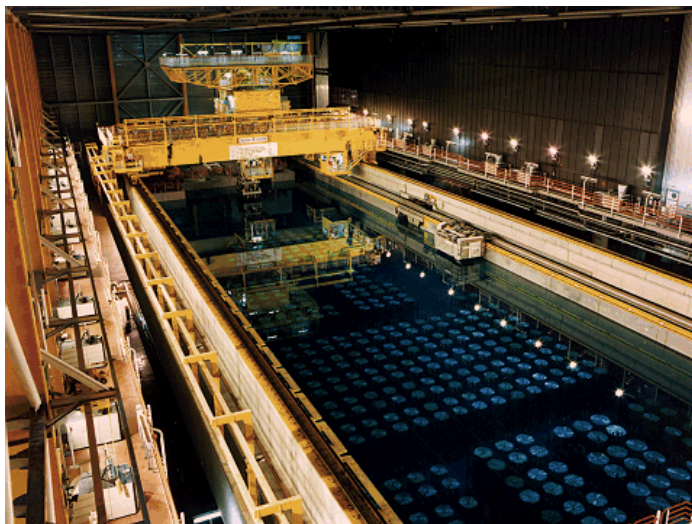
Limbah nuklir terdiri atas tiga kelompok atau kategori, menurut bahaya radiasinya: low-level, intermediate level, dan high-level. Yang tetap ada di dalam batang-batang bahan bakar nuklir adalah yang termasuk high-level.

Yang low-level pengelolannya serupa dengan yang terjadi di rumah-rumah sakit yang menggunakan zat-zat radioaktif untuk diagnosa atau analysis ataupun yang timbul akibat kegiatan riset di berbagai laboratoria di mana digunakan zat radioaktif ber-waktuparoh pendek. Barang-barang yang terkontaminasi umumnya terkena oleh zat radioaktif yang karena berumur pendek maka penanganan

limbahnya tidak menimbulkan masalah. Radiasinya cepat meluruh dan barang-barangnya dapat dicuci kembali dan dipakai lagi.

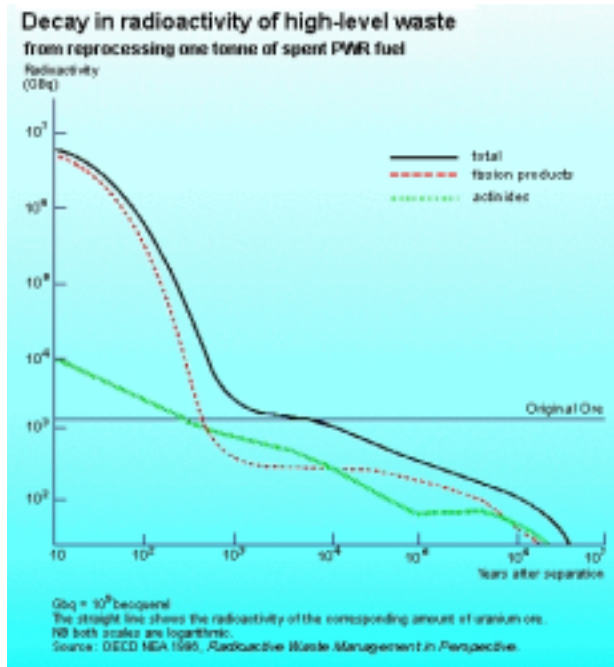
Yang intermediate-level dikelola secara lebih khusus dan di-isolasikan dari benda lainnya. Umumnya limbah ini berasal dari kegiatan operasional sehari-hari pada PLTN akibat misalnya kontaminasi di dalam air primer yang menjadi radioaktif ketika melewati teras reaktor. Kontaminasi radioaktif tersebut disaring dengan zat kimia resin sehingga tersaring dan melekat untuk kemudian menjadi limbah. Jika mungkin bisa dipadatkan dan/atau dimampatkan dan disimpan dalam tempat penyimpanan khusus. Bila mungkin bisa dipendam atau dikubur di tempat yang terisolasi. Apabila radiasi yang dipancarkan berdaya tembus besar, sinar gamma dengan energi tinggi misalnya, maka penanganannya memerlukan perisai pelindung.

Limbah yang berumur panjang dan paling berbahaya adalah hasil pembelahan inti yang semuanya masih terkungkung di dalam batang-batang bahan bakar, yang matriksnya adalah UO_2 , semacam bahan keramik yang keras. Hasil-belah dari pembelahan inti U^{235} ada yang berupa gas, tetapi terperangkap di dalam batang bahan bakar. Semua batang bahan bakar bekas dikelola dan dijaga, pada umumnya disimpan dahulu di dalam kolam air sampai keradioaktifannya sudah banyak meluruh. Berikut ini sebuah foto kolam tempat penyimpanan sementara bahan bakar bekas-pakai.



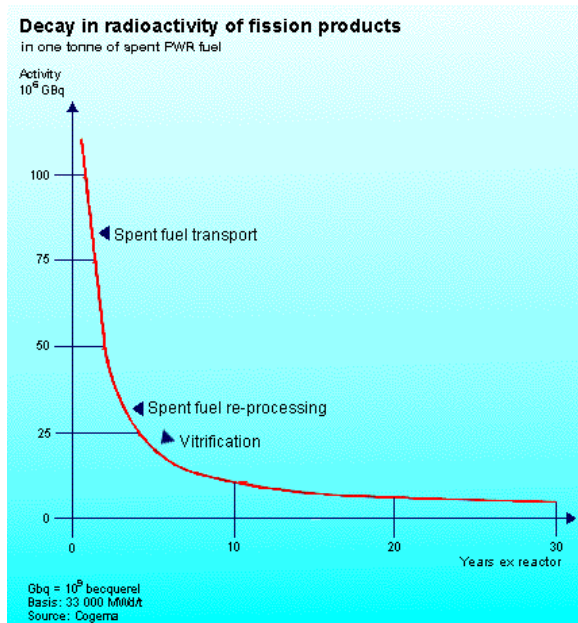
Gambar 40. Tempat penyimpanan sementara bahan bakar bekas-pakai di Amerika Serikat.

Semua batang bahan bakar bekas dari 104 PLTN di Amerika Serikat sampai saat ini masih tersimpan dengan terjaga di dalam kolam air. Menurut definisi «limbah», yaitu sesuatu yang tidak digunakan lagi, maka sesungguhnya bahan bakar bekas-pakai tidak termasuk limbah, karena di dalamnya masih ada yang dapat dimanfaatkan.



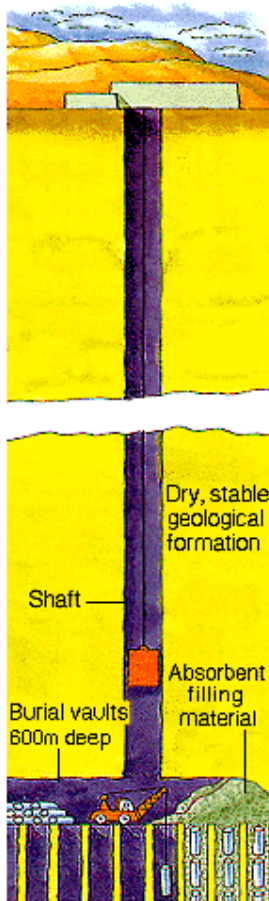
Gambar 41. Grafik peluruhan limbah nuklir tingkat tinggi.

Gambar di atas memperlihatkan grafik peluruhan limbah radioaktif tingkat tinggi hasil pengolahan ulang bahan bakar bekas-pakai. Hasil-belah telah menurun ke tingkat radioaktivitas bijih semula dalam waktu sekitar 500 tahun. Untuk memperlihatkan betapa cepatnya proses peluruhan, berikut ini adalah peluruhan radioaktivitas hasil-belah dalam waktu beberapa dekade.



Gambar 42. Grafik peluruhan radioaktivitas hasil-belah; setelah 20 tahun tinggal 6 persen dari tingkat semula.

Kebijakan yang dianut oleh Amerika Serikat sejak zaman Carter tahun 1977: bahan bakar nuklir bekas-pakai tidak boleh di-proses ulang. Kebijakan pemrosesan-ulang dipandang terlalu rentan terhadap aksi pembajakan dan terorisme. Kini sedang dibangun tempat penyimpanan bahan bakar bekas-pakai atau 'repository' di Gunung Yucca di negara bagian Nevada, yang diperkirakan akan selesai pada tahun 2016. Repository tersebut baru mulai dibangun sejak tahun 2005 karena sebelumnya ditentang oleh Gubernur Nevada. Selama ini bahan bakar bekas pakai disimpan sementara di beberapa tempat penyimpanan khusus dan dikelola oleh beberapa perusahaan listrik secara bekerjasama.



Gambar 43. Sketsa gagasan repositori dibuat 600 meter di bawah permukaan.

Gambar sketsa di atas melukiskan gagasan tempat penyimpanan bahan bakar bekas-pakai. Lokasi yang dipilih harus bebas aliran air bawah tanah dan berupa formasi geologi yang stabil. Kedalaman tempat penyimpanan lebih dari 500 meter dari permukaan tanah.

Lain lagi dengan kebijakan di Eropa (kecuali Finlandia, Swedia dan Spanyol yang mengikuti jejak Amerika Serikat, namun baru Finlandia yang sudah memiliki rencana membangun repository) dan Jepang: bahan bakar bekas boleh di-proses- ulang untuk memperkecil volume limbah seraya memanfaatkan uranium dan plutonium yang tersisa. Plutonium Pu^{239} terbentuk di dalam batang bahan bakar dari hasil penangkapan neutron oleh U^{238} (yang kandungan awalnya dalam batang bahan bakar sebanyak 96 persen) dan sebagian daripadanya telah mengalami

pembelahan inti dan sebagian lagi berubah menjadi Pu^{240} karena menangkap neutron lagi.

Bukti bahwa penyimpanan akhir limbah radioaktif dari reaktor nuklir dapat terlaksana dengan aman didapat dari penemuan Oklo, yaitu lokasi ditemukannya cadangan uranium di Gabon, Afrika Tengah. Cerita ini sangat mengesankan, sebagai berikut.

Gabon adalah salah satu produsen uranium yang tambangnya dikelola oleh perusahaan Perancis. Perancis adalah salah satu negara nuklir dunia yang pasokan listriknya hampir 80 persen bersumber dari energi nuklir. Karena itu sejak awal program nuklirnya mengusahakan tambang uranium di luar Perancis, terutama bekas jajahannya di benua Afrika, yaitu Niger (bukan Nigeria negara tetangganya yang bekas jajahan Inggris dan adalah produsen minyak) dan Gabon di Afrika Tengah.

Pada tahun 1972 para ilmuwan Perancis terperanjat menemukan bahwa kadar U^{235} yang didapaknya dari salah satu endapannya di Oklo, Gabon, ternyata hanya sekitar separoh daripada biasanya. Setelah diselidiki penyebaran uranium, mereka menarik kesimpulan bahwa di tempat tersebut telah terjadi reaksi berantai sehingga mengurangi kadar U^{235} . Dengan demikian maka di tempat tersebut telah bekerja reaktor nuklir alamiah yang meninggalkan hasil-belah dan uranium bersisa. Dari hasil pengukuran dipastikan bahwa reaktor nuklir alamiah tersebut bekerja kira-kira 1,7 milyar tahun lalu ketika kadar U^{235} masih sekitar 3 persen. Ditemukan 15 reaktor nuklir alamiah di lokasi Oklo tersebut yang diperkirakan bekerja selama sekitar satu juta tahun (kemungkinan tidak terus menerus).

Hal yang menakjubkan adalah bahwa hasil-belah dari reaktor nuklir alamiah itu ternyata tidak jauh menyebar dari reaktor. Plutonium yang terbentuk, misalnya, hanya bergeser lebih kurang 3 meter. Hal ini berkat sifat tanah berupa granit dan tanah liat yang ada di lokasi reaktor tersebut yang berhasil menahan sisa-sisa belahan nuklir di tempat, sekalipun diyakini terdapat air yang memperlambat neutron. Proporsi komposisi hasil-belah yang didapaknya juga mirip dengan proporsi dari hasil pemrosesan-ulang bahan bakar bekas-pakai dalam PLTN masa kini.

Dekomisioning

Salah satu upaya yang wajib dilakukan oleh negara pemilik PLTN adalah untuk memastikan diselenggarakannya kegiatan dekomisioning PLTN setelah usai masa manfaat PLTN. Dewasa ini sudah terjadi beberapa kali dekomisioning terhadap PLTN komersial maupun yang non-komersial.

Dekomisioning adalah suatu rangkaian kegiatan yang bertujuan untuk mengembalikan atau memulihkan lokasi bekas PLTN kepada keadaannya seperti sedia kala, sewaktu sebelum digunakan untuk pembangunan PLTN. Rangkaian kegiatan tersebut meliputi: (1) mengeluarkan bahan bakar bekas dan mengelola terus sesuai kebijakan yang dianut Pemerintah; (2) mengamankan peralatan dan

perlengkapan yang dapat dibongkar dan menyimpan ataupun memusnahkannya; (3) mengadakan dekontaminasi terhadap bangunan dan perlengkapan PLTN yang “tertanam” sehingga tingkat pemaparan radiasi dari sisa-sisa radioaktif mencapai tingkat minimal; (4) membongkar dan menghancurkan sisa bangunan dan perlengkapan dan memendamnya sampai rata dengan tanah; Kesemuanya itu merupakan pekerjaan yang besar dan menelan biaya yang cukup tinggi. Namun biaya tersebut dikeluarkan setelah minimal 40 tahun masa manfaat PLTN, yang masih mungkin diperpanjang lagi hingga 60 tahun, sehingga apabila dihitung menurut “present value” maka hanya menjadi proporsi yang kecil ketimbang biaya modal awal pembangunan PLTN. Diperkirakan biaya yang diperlukan berkisar antara 10 hingga 15 persen biaya modal awal PLTN, kecuali untuk PLTN bermoderator grafit yang berukuran fisik besar dan merobohkan grafit ter-iradiasi merupakan suatu pekerjaan yang banyak masalahnya.

Apabila reaktor nuklir atau bagian lain PLTN tak dapat dimanfaatkan lagi akibat kecelakaan atau musibah, maka dekomisioning haruslah disesuaikan dengan keadaan. Jadi tidak ada penyelesaian yang baku: tiap negara dapat menganut kebijakannya sendiri dan setiap PLTN memiliki pemecahannya sendiri. Apabila telah terjadi kecelakaan maka mungkin PLTN harus ditutup dan ditinggalkan selama beberapa dekade, menunggu sampai tingkat radioaktivitas sudah menurun dan baru kemudian dekomisioning dilanjutkan. Hal seperti ini terjadi pada PLTN TMI-2, yang dewasa ini masih dalam proses menunggu dekomisioning tahap akhir karena akan dilanjutkan bersamaan dengan dekomisioning TMI-1 yang akan beroperasi sampai tahun 2014. Bilamana kecelakaan yang terjadi amat parah, seperti kecelakaan Chernobil-4, maka penyelesaiannya adalah ditimbun dengan cukup bahan pelindung dan upaya pemulihan lahan tak dapat dilaksanakan.

Demikianlah maka sampai tahun 2005, menurut keterangan IAEA yang dikutip oleh WNA, 8 PLTN telah selesai tahap dekomisioning sampai lahan dipulihkan kembali, 31 PLTN masih dalam proses menuju ke pemulihan lahan, sebanyak 17 PLTN dalam proses pengamanan sementara, dan 30 PLTN pada tahap awal perontokan (dismantling) menuju ke pengamanan jangka panjang.

Aspek politik di bidang energi nuklir sedemikian kentalnya sehingga dua satuan PLTN Bulgaria harus ditutup dan dihentikan operasinya sebagai salah satu syarat masuknya Bulgaria ke dalam organisasi Masyarakat Eropa. Kedua PLTN itu sudah berusia 25 tahun dan PLTN-nya memang buatan Uni Sovyet, tetapi bukan tipe RBMK melainkan jenis air tekan PWR (oleh Uni Sovyet diberi julukan tipe VVER). Kedua satuan tersebut masing-masing berkapasitas 440 MW dan keduanya diharuskan diamankan melalui proses yang disebut dekomisioning. Dekomisioning tersebut diperkirakan akan menelan biaya \$AS 650 juta (nilai sekarang) dan memerlukan waktu bertahun-tahun.

Di lokasi yang sama, yaitu Kozlodui, Bulgaria mengoperasikan dua satuan PLTN lainnya berkapasitas 1000 MW dari jenis yang sama dan juga sama-sama buatan Uni Sovyet.

Sementara itu Lithuania juga mengalami nasib yang sama: untuk menjadi anggota Masyarakat Eropa dua PLTN yang dimilikinya harus ditutup, padahal

pangsa listrik nuklir di negara tersebut 72 persen. PLTN Ignalina-1 (1186 MW) beroperasi sejak tahun 1983 dan telah dihentikan pada akhir tahun 2004. PLTN kedua Ignalina-2 dengan daya sama beroperasi sejak 1987 dan tahun 2007 masih beroperasi.

Kelestarian Lingkungan

Masalah lingkungan utama yang dihadapi umat manusia dewasa ini adalah pemanasan global. Ini adalah akibat perkembangan selama satu setengah abad ini yang diawali dengan industrialisasi. Sinar matahari yang dipantulkan oleh bumi semakin lama semakin sedikit yang dapat lolos ke angkasa luar, berkat efek rumah-kaca. Sinar yang dipantulkan kebetulan gelombangnya lebih panjang daripada yang semula datang dari matahari dan diserap oleh gas-gas rumah-kaca, istimewa oksida karbon yaitu emisi dari hasil pembakaran energi fosil yang berakumulasi di atas permukaan bumi.

Sebagian besar emisi yang telah mengumpul ini adalah emisi dari negara maju yang mencapai tingkat industrialisasi tinggi.

Serangkaian konperensi tentang lingkungan hidup telah diselenggarakan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa sejak tahun 1972. Pada tahun 1987 telah terbit laporan berjudul *Our Common Future* atau disebut Laporan Brundtland yang mencanangkan gagasan Pembangunan Berkelanjutan, yaitu pembangunan yang meningkatkan taraf hidup masyarakat dunia tanpa mengurangi kesempatan generasi-generasi mendatang untuk menikmati hal yang sama. Kemudian pada tahun 1992 di Rio de Janeiro, Brazil, diselenggarakan Konperensi Lingkungan dan Pembangunan yang menerbitkan program kerja *Agenda 21*. Pada tahun ini juga PBB membentuk Komisi Pembangunan Berkelanjutan yang bersidang setiap tahun guna membahas pelaksanaan *Agenda 21*. Dalam tahun 1992 juga disepakati suatu Konvensi Kerangka untuk Perubahan Iklim yang disusun guna mengatasi masalah perubahan iklim yang disebabkan oleh emisi gas-gas rumah-kaca. Dan yang mulai berlaku pada tahun 1994. Ketentuan pelaksanaannya disepakati dalam suatu protokol di Kyoto pada tahun 1997, di mana negara-negara industri berikrar dan berjanji untuk mengurangi emisi gas rumah-kaca pada 2008-2012 sebanyak 5 persen dari tingkat emisi tahun 1990.

Akhir-akhir ini Panel Antar-Pemerintah untuk Perubahan Iklim (Inter-Governmental Panel on Climate Change atau IPCC) telah menarik kesimpulan bahwa gejala pemanasan global adalah benar-benar akibat perbuatan manusia. Sebelumnya terdapat banyak pihak yang menganggap bahwa hal tersebut belum terbukti, termasuk Amerika Serikat dan Australia yang menarik diri dari Protokol Kyoto. Sekarang Amerika Serikat secara keras berpendapat bahwa untuk mengatasi pemanasan global maka negara berkembang pun harus ikut serta dalam upaya mengurangi laju emisi gas rumah-kaca. Hal inilah yang antara lain akan dibahas dalam konperensi IPCC di Bali tanggal 3=14 Desember 2007.

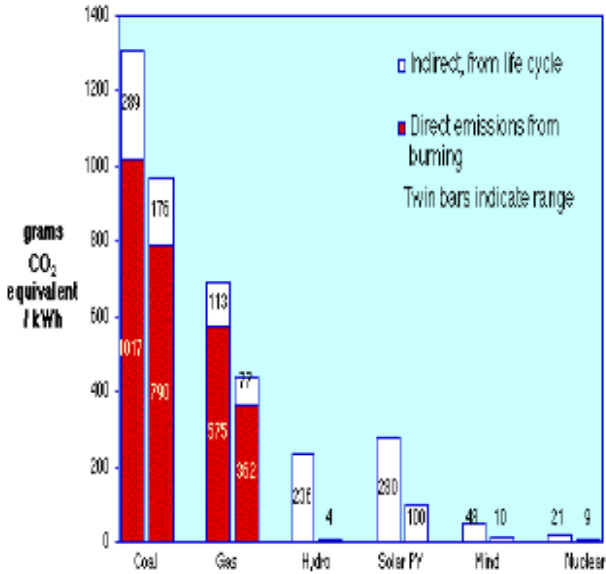
Pengurangan emisi karbon sulit dicapai oleh negara industri, apalagi oleh negara berkembang yang masih mengandalkan penggunaan energi fosil untuk meningkatkan taraf hidup. Beberapa pengecualian mungkin adalah Jerman dan negara Eropa Timur. Jerman sekarang adalah gabungan Jerman Barat dan Jerman Timur. Sebelum menikmati demokrasi Jerman Timur menggunakan peralatan yang tidak efisien seperti misalnya pembangkit listrik yang memakai batubara muda (lignit). Setelah Jerman bersatu banyak instalasi yang tidak efisien tersebut ditutup dan tak dipakai lagi, sehingga Jerman mendadak dapat meningkatkan efisiensi dan sekaligus mengurangi emisi karbon.

Demikian pula dengan negara Eropa Timur yang sekitar tahun 1990 mengalami perpecahan menjadi negara demokrasi karena bubarnya Uni Soviet. Sebagai akibat, negara-negara tersebut mengalami resesi ekonomi selama beberapa tahun karena memang memerlukan waktu untuk menyesuaikan diri dengan reformasi ekonomi. Akibat resesi ini maka permintaan akan energi menurun, dan baru belakangan ini mulai meningkat lagi.

Energi nuklir yang ramah lingkungan sebenarnya adalah bagian dari solusi masalah pemanasan global. Namun hingga kini hal tersebut belum diakui oleh forum internasional seperti PBB. Salah satu sebabnya adalah karena keanggotaan di dalam Komisi Pembangunan Berkelanjutan sebagian besar terdiri atas para wakil pemerintah dari negara anggota PBB dari bidang lingkungan hidup. Pemakaian teknologi nuklir dianggap sebagai bukan bagian pemecahan masalah, bahkan dipandang sebagai penghalang pembangunan berkelanjutan. Bukan saja dari segi masalah pengelolaan limbah nuklir yang dikatakan belum ada pemecahannya, tetapi juga adanya kemungkinan proliferasi nuklir.

Bahwasanya pemanfaatan energi nuklir adalah ramah lingkungan telah banyak diselidiki oleh lembaga-lembaga penelitian serta organisasi internasional. Berikut ini adalah bagan yang memperlihatkan hasil perbandingan emisi gas-gas rumah-kaca dari berbagai jenis sumber energi yang dihitung per kWh untuk keseluruhan daur bahan bakar setiap jenis energi. Tampak bahwa nuklir menghasilkan emisi sebanding dengan tenaga angin (karena pembangunan PLTN diperkirakan masih memakai energi fosil).

Greenhouse Gas Emissions from Electricity Production



Source: IEA 2000

Gambar 44. Grafik emisi gas rumah-kaca per kWh produksi listrik dari berbagai jenis energi, hasil penelitian di Eropa.

Berikut ini ditampilkan sebuah tabel yang memperlihatkan hasil penelitian mengenai dampak berbagai jenis sumber energi terhadap kesehatan penduduk sekeliling. Dampak ini tidak memperhitungkan pengaruh dari emisi gas rumah-kaca. Penelitian ini dihasilkan oleh Komisi Uni Eropa dalam suatu proyek penelitian berjudul ExternE. Pengaruh dari pemanfaatan energi nuklir termasuk yang paling kecil apabila dibandingkan dengan jenis energi lainnya.

Tabel 9. Biaya Eksternal yang Ditanggung Penduduk Sekitar

EXTERNAL COSTS

	Costs (mEcu/kWh)	Equivalent lives lost (per GWa)
Coal	5.3 – 15.0	37
Lignite	10	27
Oil	12	32
Gas	0.4 – 1.0	2
Wind	0.8 - 2.2	0.3
Hydro	2.3	0.8
Nuclear	0.4 - 2.5	1

Note: Externalities of greenhouse gas (GHG) emissions, i.e., of climate change not included

Source: Adapted from European Commission (1995)