

BAB II

RIWAYAT PERKEMBANGAN PLTN DAN STATUS PLTN DEWASA INI

Proyek Manhattan

Secara kebetulan Perang Dunia ke-II meletus di Eropa tidak lama setelah penemuan pembelahan inti. Maka di antara para ilmuwan timbul kekhawatiran bilamana Hitler berupaya mengerahkan para ilmuwan Jerman untuk memanfaatkan reaksi berantai pembelahan inti U²³⁵ untuk digunakan dalam suatu bom. Bom yang demikian itu tentunya akan amat dahsyat daya hancurnya, karena demikian besar energi terkonsentrasi yang dalam sekejap dapat lepas.

Karena itu muncul sebuah petisi dari sejumlah ilmuwan Amerika Serikat yang ditanda-tangani oleh pemenang hadiah Nobel bidang fisika Albert Einstein kepada Presiden Roosevelt. Petisi tersebut ditindak-lanjuti dengan serangkaian kegiatan ilmiah yang di antaranya adalah berhasilnya kekritisan tercapai dalam reaktor nuklir pertama (“tumpukan balok grafit”) di bekas lapangan squash di bawah lapangan bola Universitas Chicago (seperti telah dikemukakan dalam Bab II di atas). Keberhasilan ini segera ditindak-lanjuti oleh Presiden Roosevelt dengan membentuk suatu proyek yang bertujuan untuk menghasilkan senjata atom sebelum senjata tersebut dikembangkan oleh Jerman dalam Perang Dunia ke-II. Proyek tersebut diberi nama Proyek Manhattan¹.

Proyek ini mengalihkan penemuan ilmiah dan percobaan laboratorium ke skala industri dan dipimpin oleh Jenderal Leslie Groves dari Angkatan Darat Amerika Serikat dengan sebuah kelompok ilmuwan di bawah kepemimpinan Dr. Robert J. Oppenheimer. Di antara kelompok ilmuwan itu terdapat Enrico Fermi asal Italia dan Leo Szilard asal Hongaria yang beberapa tahun sebelumnya telah pindah dari Eropa.

Masalah yang dihadapi Proyek Manhattan adalah: bagaimana mendapatkan bahan bakar fisil murni dalam jumlah yang cukup dalam waktu sesingkatnya. Menurut pendapat para ilmuwan hanya ada dua peluang: pertama ialah memisahkan isotop U²³⁵ dari uranium yang didapat dari alam, yang kadar U²³⁵nya amat rendah. Padahal dengan cara kimiawi hal tersebut tidak dapat dilakukan, karena isotop uranium semuanya memiliki perilaku kimiawi yang sama. Kedua ialah bagaimana mendapatkan isotop Pu²³⁹ dalam jumlah yang cukup dalam waktu yang sesingkatnya, padahal isotop tersebut tidak terdapat dalam alam. Ia harus dihipun dengan mengubah U²³⁸, yang cukup banyak tersedia, menjadi Pu²³⁹. Ini dapat terjadi di dalam reaktor nuklir seperti telah diterangkan di atas. Ketika itu reaktor nuklir baru saja terbukti dapat diciptakan dan dioperasikan, tinggal dibangun dalam skala besar.

¹ Nama yang sebenarnya adalah Manhattan Engineering District.

Kedua peluang tersebut ditempuh oleh Proyek Manhattan. Pemisahan isotop U^{235} dilakukan dengan metode difusi gas UF_6 : perbedaan massa molekul gas antara $U^{238}F_6$ dengan $U^{235}F_6$ membuat difusi gas uranium yang dilewatkan melalui sekat-sekat berlubang akan menghasilkan perbedaan dalam kecepatan berdifusi, sekalipun disadari bahwa perbedaan kecepatannya sangat kecil (hanya karena perbedaan massa antara kedua molekul dengan sma 352 dan 349^2). Setelah melampaui ribuan sekat-sekat maka kadar $U^{235}F_6$ akan meningkat, dan akhirnya dapat diperoleh gas $U^{235}F_6$ dengan kadar yang cukup tinggi, melebihi 90 %. Secara keseluruhan proses ini disebut pengayaan uranium, jadi uranium alam diubah menjadi uranium yang kaya dengan U^{235} . Maka dibangunlah pabrik pengayaan uranium pertama di dunia³ dengan memakai proses difusi gas yang ditujukan khusus untuk menghasilkan bahan bom atom U^{235} . Produksi U^{235} cukup untuk menghasilkan bahan senjata atom pertama yang dijatuhkan di Hiroshima pada tanggal 6 Agustus 1945⁴.

Cabang kedua Proyek Manhattan adalah menggunakan desain reaktor nuklir yang baru diciptakan di Universitas Chicago, yang mencapai kekritisian pada tanggal 2 Desember 1942.

Keberhasilan penciptaan reaktor nuklir ini segera ditindak-lanjuti oleh Proyek Manhattan dengan pembangunan serangkaian reaktor nuklir gas-grafit dengan uranium alam sebagai bahan bakar, grafit sebagai bahan moderator dan gas helium sebagai bahan pendingin. Batang-batang bahan bakar nuklir dengan kandungan 99,7% U^{238} dalam beberapa waktu mengalami perubahan komposisi sehingga sebagian (kecil) U^{238} berubah menjadi Pu^{239} setelah menangkap neutron di dalam reaktor. Setelah itu batang-batang tersebut dapat diproses secara kimia untuk mendapatkan Pu^{239} yang murni. Pada tanggal 16 Juli 1945 sudah tersedia cukup Pu^{239} untuk melakukan percobaan ledakan nuklir pertama di Alamogordo (gurun Nevada), dan kemudian tersedia cukup bahan untuk senjata bom atom kedua yang dijatuhkan di Nagasaki pada tanggal 9 Agustus 1945.

Lomba Lomba Usai Perang Dunia ke-II

Selesai Perang Dunia ke-II perkembangan politik dunia berlanjut dengan perseteruan antara dua kubu politik: kapitalis dan komunis, atau Barat dan Timur. Masing-masing mendapatkan julukan "blok". Munculnya gerakan kemerdekaan di sejumlah bekas negara koloni di Asia dan Afrika memunculkan adanya blok ketiga, yaitu negara-negara berkembang yang bergabung dalam Blok Asia Afrika. Namun politik dunia didominasi oleh pertikaian kedua blok tadi, diwarnai oleh persaingan rayuan Blok Barat dan Blok Timur terhadap Blok Asia Afrika.

² Masing-masing molekul memiliki energi kinetik yang sama, sesuai rumus $\frac{1}{2}mv^2$

³ Proses pengayaan uranium dengan teknologi gas centrifuge yang lebih murah baru tersedia tahun 1960an.

⁴ Para pencipta bom begitu yakin akan keberhasilan ciptaannya ini, bom atom tak diuji terlebih dahulu. Namun sudah diketahui hasil percobaan dengan bahan Pu^{239} .

Dalam situasi dunia yang tak menentu, persaingan Barat-Timur melahirkan lomba yang mengerikan: siapa yang dapat memiliki senjata paling ampuh. Setelah terbuktinya kedahsyatan bom atom, baik Amerika Serikat beserta sekutunya maupun Uni Sovyet berlomba menciptakan bom-bom atau senjata yang lebih dahsyat lagi. Reaksi nuklir fusi diselidiki dan ditempuh untuk menghasilkan senjata pamungkas⁵. Reaktor nuklir dikembangkan untuk digunakan dalam kapal selam dan kapal induk, karena keunggulannya dapat lama digunakan/berlayar tanpa berlabuh untuk pengisian bahan bakar atau udara, berkat padatnya energi yang dihasilkan reaksi fisi. Peluang untuk memanfaatkan energi nuklir sebagai sumber energi untuk pembangkitan listrik pun disadari, namun kesempatan untuk itu harus menunggu dibukanya tabir rahasia yang menyelimuti perkembangan teknologi nuklir.

Semula reaktor nuklir untuk keperluan ketenagaan dikembangkan untuk digunakan sebagai mesin penggerak kapal selam nuklir, karena ‘pembakaran’ bahan bakar nuklir tidak memerlukan udara (oksigen). Kapal selam nuklir dapat menyelam selama masa lama (berbulan-bulan) tanpa perlu mengambil udara dari atas permukaan air.

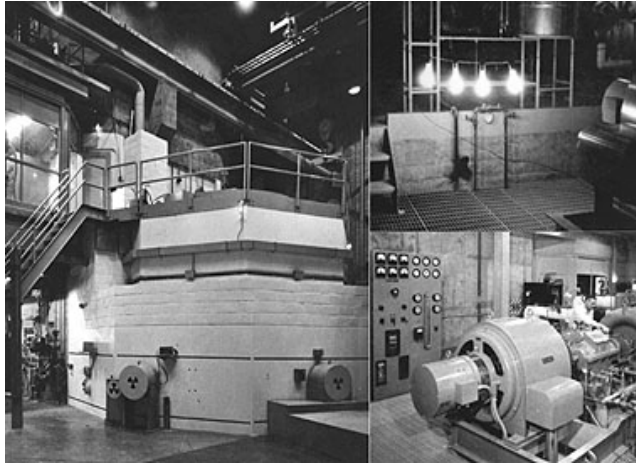
Dalam rangka pengembangan reaktor untuk kapal selam ini Amerika Serikat menempuh dua jalur, keduanya memakai uranium yang diperkaya supaya reaktor bisa dibuat kompak (volume kecil) dan memakai air biasa sebagai moderator dan pendingin. Jenis reaktor air tekan dikembangkan oleh Westinghouse dan jenis reaktor air dididih dikembangkan oleh General Electric. Kapal selam nuklir pertama Amerika Serikat bernama “Nautilus, selesai tahun 1954 dan mulai beroperasi tahun 1955.

Listrik Nuklir Pertama

Sebelumnya di Argonne National Laboratory, Chicago, telah dibangun reaktor biak percobaan, yaitu Experimental Breeder Reactor-I. Reaktor ini dibangun untuk membuktikan bahwa pembiakan bahan bakar nuklir dapat terlaksana dengan memakai plutonium sebagai bahan bakar. Di sinilah dibangkitkan listrik pertama dari energi nuklir pada tanggal 20 Desember tahun 1951, tetapi hanya untuk pasokan lokal (mula-mula hanya empat bola lampu).

Di bawah ini dikutipkan dua buah gambar foto. Sebelah kiri adalah gambar reaktor cepat EBR-I dan gambar sebelah kanan adalah pembangkit listrik beserta empat buah bola lampu yang listriknya berasal dari pembelahan inti.

⁵ Reaksi nuklir fusi adalah reaksi penggabungan inti, seperti misalnya antara tritium dan deuterium: ${}_1^3\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + \text{neutron}$ dengan energi yang lepas sebesar 17,6 Mev. Karena naskah ini ditujukan untuk pencerahan PLTN maka perkembangan aplikasi reaksi fusi untuk senjata nuklir tidak diuraikan.



Gambar 28. Foto reaktor pembiak percobaan EBR-I (kiri) dan empat bola lampu yang listriknya dari energi reaktor tersebut, tercapai pada tanggal 20 Desember 1951.

Riwayat PLTN

PLTN pertama dibangun di Obninsk Uni Sovyet dan mulai beroperasi pada tanggal 27 Juni tahun 1954 dengan kapasitas 5 MW, yang kemudian ditingkatkan menjadi 10 MW. Disain reaktor nuklir ini mirip dengan tipe RBMK yang ada di Chernobyl; hingga tahun 2007 ini masih ada 12 PLTN jenis RBMK ini beroperasi di Rusia dan negara Eropa Timur lain.

PLTN Calder Hall di Inggris mulai beroperasi tahun 1956 dengan kapasitas 37 MW, dinyatakan sebagai PLTN pertama berskala komersial. Ia dibangun dengan moderator grafit dan gas CO₂ sebagai pendingin teras. Kapasitasnya ditingkatkan secara berangsur sampai pernah mencapai 196 MW. Operasi dihentikan pada tanggal 31 Maret 2003.

PLTN Shippingport di Amerika Serikat adalah tipe PWR (*pressurized water reactor* atau reaktor air tekan) pertama yang mulai operasi tahun 1957 pada daya 60 MW. Ia dijuluki PLTN pertama yang semata-mata dibangun untuk tujuan komersial, karena PLTN Calder Hall di Inggris digunakan juga untuk produksi plutonium sebagai bahan bom atom. PLTN ini berhenti beroperasi pada tanggal 1 Oktober 1982 setelah 25 tahun. Pada tahun 1985 dimulai dekomisioning dan selesai tahun 1988. Tipe reaktor PWR inilah yang saat ini paling banyak beroperasi di dunia ketimbang jenis lainnya seperti BWR (*boiling water reactor* atau reaktor air mendidih) atau HWR (*heavy water reactor* atau reaktor air berat).

Pemesanan PLTN secara besar-besaran di Amerika Serikat terjadi pada tahun 1966 – 1968, yaitu sebanyak 20000 MW tiap tahun, sebagian terbesar terdiri dari jenis PWR dan BWR, keduanya hasil pengembangan dari disain reaktor kapal

selam AS. Beberapa negara industri lainnya juga membangun PLTN, yaitu Perancis (jenis grafit-gas seperti di Inggris), Jepang (jenis Calder Hall), Jerman dan Swedia (kedua negara ini jenis PWR dan BWR).

PLTN juga dibangun di negara berkembang, yang pertama mulai beroperasi di Tarapur, India tahun 1969 dari jenis BWR dengan pemasok: General Electric (GE) dari Amerika Serikat, dan yang kedua bernama Kanupp (Karachi Nuclear Power Plant) dari jenis HWR dengan pemasok: Atomic Energy of Canada Limited (AECL) dari Kanada di Karachi, Pakistan, diresmikan pada tahun 1971.

Dengan perkembangan tersebut di atas, jumlah PLTN di dunia dalam tahun 1970 mencapai 90 dengan kapasitas seluruhnya 16500 MW.

Perjanjian Larangan Penyebaran Teknologi Senjata Nuklir, NPT 1968

Sementara itu RRC berupaya juga untuk membuat senjata nuklir. Dalam bulan Oktober tahun 1964 RRC berhasil mengadakan uji-coba ledakan nuklir yang terpantau oleh negara Blok Barat maupun Blok Timur. Perkembangan ini mendorong negara nuklir, yaitu negara yang sudah memiliki kemampuan senjata nuklir, untuk mencegah negara lain memperoleh kemampuan tersebut. Maka dalam tahun 1968 melalui Badan Tenaga Atom Internasional dicetuskan sebuah perjanjian larangan penyebaran senjata nuklir disebut Non-Proliferation Treaty. Semua anggota PBB dihimbau untuk turut-serta dalam perjanjian tersebut yang mengikat anggota peserta NPT untuk tidak mengalihkan teknologi yang berkaitan dengan senjata nuklir dari dalam ke luar negeri ataupun sebaliknya. Sebagai imbalan bagi negara yang belum memiliki teknologi senjata nuklir, peserta NPT diberi janji berupa kemudahan untuk mendapatkan alih-teknologi PLTN dari negara nuklir. Sebaliknya negara nuklir berjanji akan mengurangi persediaan senjata nuklir menuju perdamaian dunia yang bebas dari ancaman senjata nuklir. Ketika NPT mulai berlaku Indonesia turut menanda-tangani NPT di tahun 1970 dan kemudian meratifikasi NPT di tahun 1978. Keikut-sertaan Indonesia ini berlandaskan yang tersurat di dalam Pembukaan Undang-undang Dasar 1945, yaitu untuk ikut serta memelihara perdamaian dunia.

Gerakan Lingkungan dan Kemudian Gerakan Anti-Nuklir

Sejak usainya Perang Dunia ke-II perkembangan dalam bidang pertanian di Amerika Serikat mulai menggunakan bahan pembasmi hama yaitu pestisida, khususnya DDT. Penggunaan secara besar-besaran mencemaskan para ahli biologi dan ekologi yang menengarai ikut terbasminya kehidupan fauna dan flora lainnya. Di antaranya seorang ilmuwan bernama Rachel Carson yang akhirnya menulis buku *The Silent Spring*, terbit di tahun 1963. Maka lahirlah gerakan lingkungan hidup yang bertujuan untuk melindungi alam dan mendukung pelestariannya dari penggunaan zat-zat kimia tanpa semena-mena.

Dengan dimulainya komersialisasi pembangunan PLTN di Amerika Serikat maka timbul pula kecemasan terhadap bakal meluasnya pengoperasian PLTN sehingga mulailah bermunculan unjuk-rasa dan demonstrasi menentang proyek-proyek pembangunan PLTN. Alasan yang dikemukakan adalah keselamatan operasi reaktor nuklir, penanganan dan pengamanan limbah nuklir, dan kemungkinan sabotase serta pembajakan.

Perkembangan Penting 1973 – 1974

Selama tahun 1973-1974 terjadi beberapa peristiwa penting yang bersangkutan dengan masalah energi dunia dan energi nuklir.

Di Amerika Serikat Komisi Tenaga Atom mulai tahun 1973 memberlakukan ketentuan bahwa pengelola PLTN berkewajiban memasang seperangkat perlengkapan yang disebut **ECCS** (*emergency core-cooling system* atau **sistem darurat pendinginan teras reaktor**), yaitu perangkat yang dipasang di dalam bejana tekan yang memungkinkan teras reaktor disemprot air sewaktu keadaan darurat, dengan tujuan untuk mencegah pelelehan teras reaktor. Sebabnya ialah: PLTN yang sudah beroperasi beberapa bulan sudah “menyimpan” di dalam batang-batang bahan bakar sejumlah zat radioaktif hasil-belahan proses reaksi berantai nuklir; dan bilamana operasi reaktor terhenti dan pendinginan bahan bakar juga ikut terhenti, maka ada peluang terjadinya pelelehan batang-batang bahan bakar nuklir karena gejala radioaktivitas tidak bisa dihentikan dan akan berjalan terus. Karena itu pula bilamana operasi PLTN terhenti ia harus tetap mendapatkan pasokan listrik, dan karena itu setiap PLTN disyaratkan memiliki cadangan pembangkit listrik mandiri, minimal 3 sampai 4 pembangkit diesel yang masing-masing mampu menyediakan listrik yang diperlukan. Mengapa 3 sampai 4 pembangkit diesel cadangan ? Karena tersedianya pasokan listrik mutlak diperlukan, dan ada kemungkinan pembangkit mengalami kerusakan dan harus direparasi, serta kemudian apabila satu mesin sedang bekerja lalu mengalami kegagalan maka harus tersedia pembangkit yang dapat dihidupkan.

Dalam tahun 1973 terjadi Krisis Minyak (harga minyak internasional melonjak 3 sampai 4 kali lipat) sebagai akibat embargo yang diberlakukan oleh negara-negara Arab di Timur Tengah terhadap ekspor minyak ke Amerika Serikat, hal mana dipicu oleh dukungan Amerika Serikat kepada Israel yang menyerang dan memasuki wilayah Palestina dan Jordan.

Dalam tahun 1974 di Amerika Serikat terbit sebuah laporan yang dikenal dengan No. WASH-1400 yang menyajikan hasil Studi PRA⁶ (*probabilistic risk assessment*) yang dilakukan oleh sebuah tim yang diketuai oleh Prof. Rasmussen dari M.I.T. Laporan tersebut berkesimpulan antara lain bahwa insiden nuklir yang peluang terjadinya paling besar adalah suatu rangkaian kejadian seperti yang

⁶ Disebut juga probabilistic safety analysis disingkat PSA, studi ini menggunakan metodologi yang sampai sekarang masih digunakan oleh Nuclear Regulatory Commission di Amerika Serikat.

kemudian terjadi pada PLTN Three Mile Island-2 pada tahun 1979, dan secara numerik peluang insiden nuklir seperti itu adalah sebesar 10^{-4} /tahun. Di sini perlu dicatat bahwa dalam perkembangan selanjutnya peluang tersebut dapat diperkecil dengan perbaikan keandalan peralatan dan komponen-komponen perlengkapan sedemikian rupa sehingga kini peluang ini menjadi jauh lebih kecil, sekitar 10^{-6} /tahun.

Pengelolaan bidang tenaga nuklir di Amerika Serikat sejak tahun 1946 sampai tahun 1974 dilakukan oleh Atomic Energy Commission (AEC) yang langsung bertanggung-jawab kepada Presiden. Di pihak legislatif bidang tenaga nuklir dibina oleh sebuah komisi bersama DPR dan Senat, yaitu Joint Atomic Energy Commission. Mulai tahun 1954 perusahaan swasta diperkenankan membangun instalasi nuklir dengan AEC sebagai badan pengawas, dan pembangunan PLTN berkembang mulai tahun 1960an. Akibat fungsi pengawasan menjadi beban berat bagi AEC, mulai tahun 1974 Kongres Amerika Serikat memutuskan untuk membubarkan Atomic Energy Commission dan menyerahkan fungsi promosi pengelolaan energi nuklir ke sebuah badan baru bernama Energy Research and Development Administration (ERDA yang kemudian pada tahun 1977 tugas dan fungsinya diserahkan kepada Departemen Energi yang baru dibentuk) dan memisahkan fungsi regulasi dan inspeksi (pengawasan) atas kegiatan tenaga nuklir ke suatu komisi mandiri yang disebut Nuclear Regulatory Commission (NRC).

Sebagai reaksi terhadap Krisis Minyak tahun 1973-74 dalam tahun 1974 Perancis mengumumkan bahwa pasokan listrik selanjutnya akan dipenuhi dengan membangun PLTN jenis PWR dengan meninggalkan desain PLTN jenis GCR. Perancis sudah memiliki pabrik pengayaan uranium dengan teknologi difusi gas di Pierrelatte untuk keperluan militer sehingga pasokan bahan bakar PWR terjamin.

Program pembangunan PLTN dibarengi program pengembangan industri nuklir. Serangkaian PLTN dibangun di beberapa lokasi dengan sedikitnya empat satuan PLTN di setiap lokasi, sehingga dalam jangka waktu duapuluh tahun Perancis berhasil menyelesaikan pembangunan 59 satuan PLTN. Dengan cara duplikasi dan replikasi manufaktur komponen dan biaya konstruksi maka biaya pembangunan PLTN dapat ditekan dan sebagai hasilnya Perancis sejak lama nyaris 80 persen listriknya dipasok dengan tenaga nuklir. Dewasa ini Perancis berperan sebagai pengeksport tenaga listrik utama di Eropa.

Di tahun 1974 India mengadakan percobaan ledakan nuklir, kemungkinan dalam rangka upaya untuk memperkuat pertahanannya (setelah RRC mengadakan percobaan ledakan nuklir dan juga diterima sebagai anggota tetap PBB dalam Dewan Keamanan). Hal ini bahkan berakibat pengetatan alih teknologi nuklir dari negara industri ke negara berkembang dan penghentian alih teknologi nuklir ke India dan Pakistan yang bukan peserta NPT (Non-Proliferation Treaty) atau Perjanjian Larangan Penyebaran Senjata Nuklir.

India mengadakan percobaan ledakan nuklir dengan menyatakan hal tersebut untuk tujuan damai. Salah satu kemungkinannya adalah ledakan di bawah permukaan tanah, misalnya, untuk mengupayakan pengurusan cadangan mineral

yang ditemukan, dengan cara mengalirkan cairan zat asam ke dalam rongga yang terlebih dahulu dibentuk oleh ledakan nuklir, dan kemudian memompa larutan mineral ke atas. Namun di balik pernyataan itu orang berpikiran bahwa niscaya ada pula tujuan militer dan politik. Buktinya hingga kini belum ada penerapan ledakan nuklir untuk menambang bijih mineral, di Amerika Serikat sekalipun⁷.

Tenyata percobaan itu telah memicu negara-negara nuklir untuk lebih memperketat lagi alih teknologi nuklir. Dibentuklah Kelompok Pemasok Nuklir (Nuclear Suppliers Group) dari antara negara industri yang menetapkan syarat-syarat bagi calon penerima alih teknologi: selain syarat politik seperti keikutsertaan dalam perjanjian NPT juga persyaratan ekonomi (memperberat persyaratan kredit ekspor dengan memperpendek tenggang waktu pembayaran dan jangka waktu angsuran dan pelunasan).

Akibat perkembangan ini, maka pembangunan PLTN di negara berkembang semakin terhambat.

Insiden Three Mile Island-2

Pada tanggal 28 Maret 1979 terjadi kecelakaan dalam reaktor PLTN Three Mile Island-2 di Harrisburg, Pennsylvania, Amerika Serikat. Akan tetapi tidak berakibat korban jiwa maupun cedera ataupun pemaparan radiasi (yang berarti) terhadap penduduk sekeliling. Namun timbul dampak psikologis yang besar disertai trauma yang dalam terhadap sebagian anggota masyarakat, dan bahkan sempat terjadi pengungsian. (Mengenai kecelakaan ini dibahas lebih rinci dalam Bab VI Keamanan, Keselamatan dan Keserasian Nuklir Dengan Lingkungan.)

Walaupun tidak ada korban jiwa ataupun cedera dan pengelola PLTN mengalami kerugian finansial yang besar akibat reaktor tak dapat digunakan lagi, peristiwa kecelakaan ini ada juga hikmahnya. Sistem keselamatan operasi reaktor jenis PWR dan BWR ditinjau ulang dan diupayakan untuk disempurnakan. Hal ini menyebabkan regulasi pembangunan PLTN diubah, dan ini berakibat pada tertundanya penyelesaian pembangunan sejumlah PLTN yang sudah berjalan baik di Amerika Serikat maupun di beberapa negara lain seperti Mexico dan Argentina.

Pengkajian ulang penerapan standar keselamatan reaktor nuklir berdampak terhadap seluruh industri nuklir, khususnya terhadap kegiatan pemasok teknologi PLTN.

Para pemasok jenis reaktor lainnya⁸: PWR, BWR, dan HWR kesemuanya menyempurnakan disain reaktor, terutama dengan memperhitungkan sifat *inherent safety* dan menerapkan *passive design*. Perangkat keselamatan direkayasa sedemikian rupa sehingga gejala alamiah lebih banyak dimanfaatkan, seperti

⁷ Kendala utamanya adalah bijih-bijih mineral menjadi radioaktif apabila terkena ledakan nuklir.

⁸ TMI-2 adalah desain PWR dari Babcock & Wilcox; yang lainnya adalah Westinghouse dan Combustion Engineering. Pemasok BWR adalah General Electric, sedang HWR adalah AECL dari Kanada. Pemasok PLTN di Eropa juga ada dan ikut terkena dampaknya.

misalnya gravitasi dan konveksi. Dengan demikian mengurangi keperluan untuk intervensi manusia (operator) dan peralatan elektronik.

Peninjauan kembali masalah keselamatan nuklir sebagai akibat insiden Three Mile Island-2 berdampak terhadap proyek PLTN yang ketika itu sudah dalam tahap konstruksi dan berakibat pada penundaan pembangunan PLTN dalam tahun 1980an. Namun jumlah PLTN yang beroperasi pada tahun 1980 mencapai 253 dan kapasitas terpasang mencapai 135.000 MW di 22 negara, dan sejumlah 230 proyek PLTN dalam tahap konstruksi dengan kapasitas listrik sekitar 200.000 MW. Ternyata kemudian bahwa pada tahun 1990 kapasitas terpasang bertambah 165000 MW pada tahun 1990.

Sementara itu harga minyak internasional mulai menurun dari tingkat harga tertinggi yang dicapainya dalam tahun 1980 sebesar \$36,83/bbl⁹ sebagai akibat Arab Saudi memacu produksi minyaknya dengan tujuan untuk merebut pangsa pasar dunia. Resesi ekonomi dunia pada awal tahun 1980an telah menurunkan permintaan dunia akan minyak dan harga yang tinggi telah menumbuhkan produksi minyak di beberapa negara bukan anggota OPEC seperti Mexico, Inggris, Norwegia dan Malaysia. Perebutan pangsa pasar berlangsung terus hingga anjloknya harga minyak internasional pada bulan Februari 1986. Harga rata-rata minyak tahun 1986 menjadi \$14,43/bbl¹⁰.

1986 Kecelakaan Chernobyl-4

Pada tanggal 26 April 1986 terjadi kecelakaan nuklir terparah di dunia. Namun sesungguhnya, sebagaimana hasil analisis yang telah dilakukan sejak terjadinya kecelakaan, kejadian ini adalah akibat dua faktor, yaitu kekurangan dalam desain PLTN (tanpa kubah pengungkung), dan kesengajaan para operator PLTN Chernobyl-4 yang rupanya kurang memahami sifat/perilaku jenis reaktor RBMK dan konsekwensinya terhadap operasi reaktor.

Kekurangan-paham mengenai sifat reaktor jenis RBMK ditambah dengan tingkah-laku ceroboh dan tidak bertanggungjawab para operator reaktor nuklir Chernobyl-4 dengan memutuskan rangkaian elektronik untuk pemadaman darurat reaktor, hal-hal inilah penyebab utama dua kali ledakan pada Chernobyl-4¹¹.

Selain itu, Uni Sovyet menerapkan falsafah yang berbeda dari yang diterapkan di Barat di mana disyaratkan pembangunan kubah pengungkung untuk menahan terlepasnya zat radioaktif dan radiasi apabila terjadi sesuatu yang tidak diinginkan (misalnya zat radioaktif keluar dari reaktor). Ledakan kimia yang terjadi

⁹ Ini adalah harga rata-rata tertinggi dalam satu tahun; ia setara dengan \$90,46/bbl menurut nilai \$ tahun 2006 (sumber: BP).

¹⁰ Setara dengan \$26,45 menurut nilai \$ tahun 2006. (BP)

¹¹ Ledakan yang terjadi pada Chernobyl adalah ledakan kimia yang melibatkan hidrogen akibat reaksi kimiaawi kelongsong logam zircon dengan air pendingin, bukan ledakan nuklir (misalnya akibat reaksi berantai) yang mustahil terjadi di dalam reaktor nuklir

pada Chernobyl-4 memporak-porandakan bangunan reaktor dan terlepaslah debu radioaktif ke udara sampai mencemari manca-negara¹².

Peristiwa ini sangat tragis. Lebih kurang 116000 penduduk sekitar Pripyat terpaksa diungsikan karena tingkat pencemaran zat radioaktif yang cukup tinggi. Zat radioaktif pun tersebar sampai ke Eropa Barat dan untuk beberapa bulan minum susu tidak diperkenankan di beberapa negara Eropa Barat. Korban meninggal hingga kini tercatat 60 orang, sebagian besar adalah sukarelawan yang berupaya memadamkan api kebakaran di gedung reaktor tetapi terkena dosis radiasi berlebih. (Mengenai kecelakaan ini diuraikan lebih rinci dalam Bab VI Keamanan, Keselamatan dan Keserasian Dengan Lingkungan.)

Sejak kejadian pada tahun 1986 itu sistem keselamatan reaktor nuklir tipe RBMK telah disempurnakan dan diterapkan dalam PLTN jenis ini, dan sebenarnya hingga tahun 2007 ini masih ada 12 satuan PLTN RBMK yang beroperasi membangkitkan listrik secara aman di Rusia dan negara bekas Uni Sovyet lainnya.

Perkembangan Tahun 1990an

Pada tahun 1990 kapasitas 390 PLTN dunia mencapai lebih dari 300000 MW. Dengan demikian, sekalipun telah terjadi kecelakaan Chernobyl-4 jumlah kapasitas PLTN yang beroperasi pada tahun 1990 telah meningkat dengan 165000 MW dari kapasitas tahun 1980. Namun pada awal tahun 1990-an terjadi perkembangan teknologi yang memunculkan gas sebagai pesaing berat, yaitu tersedianya pusat listrik *combined-cycle* yang memungkinkan turbin gas untuk memutar generator listrik dan selanjutnya gas buangnya digunakan untuk membangkitkan uap yang juga memutar turbin uap dan turut memutar generator listrik. Dengan kombinasi dua jenis turbin maka sistem secara keseluruhan mencapai nilai efisiensi termal yang tinggi: di atas 60 persen.

Untuk menghadapi persaingan dari gas, yang selain ketika itu relatif masih murah harganya juga pusat listrik *combined cycle* dapat dibangun sampai komisioning dalam waktu kurang dari tiga tahun, para pemasok reaktor nuklir berupaya mengurangi biaya modal pembangunan PLTN dengan penyederhanaan desain, misalnya mengurangi banyaknya komponen dan panjangnya pipa-pipa, memperkecil volume desain bangunan sehingga memperkecil material yang digunakan, serta dengan mempersingkat waktu konstruksi. Selain itu diupayakan juga standardisasi desain PLTN sehingga memungkinkan perolehan lisensi dengan cepat.

Dengan upaya penyempurnaan sistem keselamatan dan produksi komponen yang diawasi secara ketat, hasil kajian PSA sekarang telah berhasil memperkecil peluang kejadian insiden seperti TMI-2 dari semula 10^{-4} /tahun menjadi sekitar 10^{-6} /tahun.

¹² Jelas seandainya ada kubah pengungkung tidak akan terjadi penyebaran zat radioaktif ke luar. Namun harus diakui biaya konstruksi kubah akan sangat mahal untuk reaktor bermoderator grafit (yang berukuran fisik besar).

Untuk menjaga agar pemberitaan mengenai peristiwa, kejadian, insiden atau kecelakaan nuklir dapat dengan cepat disebar-luaskan kepada masyarakat tanpa menimbulkan keresahan bahkan kekhawatiran, maka oleh IAEA telah ditetapkan suatu klasifikasi peristiwa penyimpangan yang diterima semua negara. Setiap peristiwa atau kejadian dapat ditetapkan ke dalam salah satu dari tujuh tingkatan terdiri atas dua golongan : Peristiwa nuklir (Nuclear incidents) atau Kecelakaan Nuklir (Nuclear accidents). Peristiwa nuklir terdiri dari tiga kategori, yaitu Peristiwa tidak normal (skala 1), Peristiwa biasa (skala 2), dan Peristiwa serius (skala 3). Selanjutnya, yang setingkat lebih serius adalah Kecelakaan nuklir tanpa risiko terhadap lingkungan (skala 4). Kemudian Kecelakaan nuklir dengan risiko terhadap lingkungan (skala 5). Bila lebih gawat lagi, maka termasuk kategori Kecelakaan nuklir serius (skala 6), dan yang paling parah adalah Kecelakaan nuklir besar (skala 7).

Dalam riwayat operasi PLTN komersial selama ini, yaitu 1954 sampai 2007, hanya terjadi satu kali kecelakaan skala 5, yaitu Three Mile Island-2 pada tahun 1979, dan satu kali kecelakaan skala 7, yaitu Chernobyl-4 pada tahun 1986. Kecelakaan nuklir lainnya juga hanya terjadi satu kali, yaitu termasuk skala 4 pada PLTN Saint Laurent pada tahun 1980 di Perancis, dan skala 3 pada PLTN Vandellos di Spanyol pada tahun 1989.

Berkenaan dengan terjadinya berbagai kecelakaan ini maka para anggota IAEA sepakat untuk mengadakan Konvensi tentang Kewajiban untuk Melaporkan Keadaan Darurat. Selain dari itu untuk menghindari simpang siur dalam pemberitaan mengenai kecelakaan nuklir yang terjadi dalam lingkungan PLTN, IAEA menetapkan penggolongan kejadian atau kecelakaan dengan memberi skala pada setiap golongan. Penggolongan terbagi atas delapan kejadian atau kecelakaan, sebagaimana terlukis dalam bagan berikut.

| | |
|---|--|
| 7 | Major accident (maximum credible accident) |
| 6 | Serious accident |
| 5 | Accident with off-site risk |
| 4 | Accident without off-site risk |
| 3 | Serious incident |
| 2 | Incident |
| 1 | Anomaly |
| 0 | Deviation, no safety relevance |

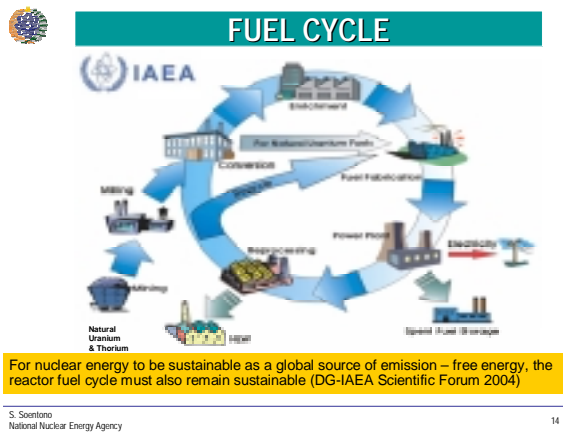
Gambar 29. Bagan Skala Kecelakaan Nuklir IAEA.

Pada tahun 2000 kapasitas 434 PLTN dunia mencapai 349000 MW.

Daur Bahan Bakar Nuklir

Daur bahan bakar nuklir cukup panjang dan secara ringkas dapat dilukiskan dengan gambar di bawah ini. Terdapat dua pilihan, yaitu daur terbuka dan daur tertutup. Untuk keduanya, dimulai dari bagian kiri bawah (lihat gambar) dengan tambang uranium dan diteruskan ke bagian kanan bawah ampai ke PLTN. Ada dua alternatif jalur: pertama bagi PLTN jenis LWR (PWR dan BWR), bahan hasil pemurnian uranium dijadikan (konversi) terlebih dahulu gas UF₆, lalu dikirim ke pabrik pengayaan untuk memperkaya kadar uranium-235 menjadi 3-4 persen. Kemudian dikonversi kembali menjadi oksida uranium untuk dibuat menjadi perangkat bahan bakar di pabrik pembuatan bahan bakar. Jalur alternatif adalah uranium langsung dibentuk menjadi oksida dan dikirim ke pabrik bahan bakar, khusus untuk daur PLTN HWR yang tidak memerlukan perkayaan uranium.

Kemudian untuk daur terbuka, sesudah penggunaan di dalam PLTN, daur bahan bakar berakhir di tempat penyimpanan bahan bakar (paling bawah kanan). Untuk daur tertutup, dilanjutkan ke pengolahan-ulang, penyimpanan limbah tingkat tinggi dan pendauran-ulang bahan fisil kembali ke pabrik pembuatan bahan bakar.



Gambar 30. Daur bahan bakar nuklir: terbuka dan tertutup.

Daur bahan bakar nuklir di atas dilukiskan dengan cara lain di halaman 67 (lihat Gambar)

Jenis-jenis Reaktor Nuklir dan Generasi-generasi PLTN

Singkatan PLTN mengikuti kebiasaan PLN yang menyebut pembangkit atau stasiun listrik dengan istilah “pusat listrik”, disusul dengan kata-kata yang merujuk sumber energinya. Jadi PLTN adalah pusat listrik tenaga nuklir.

PLTN adalah salah satu jenis pusat listrik tenaga uap atau PLTU, yang terdiri atas PLTU-bb (batubara), PLTU-m (minyak), PLTU-g (gas), dan PLTN. Uap dibangkitkan di dalam boiler atau pembangkit uap dan disalurkan ke turbin-uap yang memutar generator (pembangkit listrik).

Dalam PLTN jenis BWR (boiling water reactor), reaktor nuklir adalah “boiler”nya: uap dibangkitkan di dalam reaktor nuklir dan disalurkan langsung ke turbin uap. Kemudian uap beralih ke kondensor di mana ia didinginkan menjadi air kembali, dan lalu dipompa kembali ke reaktor. Daur primer di dalam BWR ini daur langsung: Air di dalam bejana reaktor nuklir bertekanan sekitar 70 atm. Sedang air di dalam daur sekunder yang mendinginkan uap dalam kondensor adalah air dalam daur terbuka dan berasal dari laut atau sungai yang besar.

Bahan bakar nuklir terdapat di dalam batang-batang yang berorientasi berdiri di dalam bejana-tekan. Saat reaktor beroperasi, batang-batang tersebut memanasi air di sekelilingnya, yang dialirkan ke atas. Dalam hal ini, air berfungsi “mendinginkan” batang-batang bahan bakar dan mencegah pelelehan. Sebagian dari air, menjadi uap karena dipanasi oleh batang-batang bahan bakar nuklir.

Dalam PLTN jenis PWR (pressurized water reactor), pembangkitan uap terjadi di dalam alat pembangkit uap (steam generator) yang mengalihkan panas dari daur primer ke daur sekunder yang kedua-duanya terpisah. Daur primernya adalah air bertekanan sangat tinggi yang mengalir (dipompa) dari reaktor nuklir dan setelah melewati pembangkit uap mengalir kembali ke reaktor nuklir. Daur sekundernya adalah air yang dijadikan uap di dalam pembangkit uap dan kemudian disalurkan ke turbin uap, dan setelah menjadi air kembali di dalam kondensor, lalu dipompa kembali ke pembangkit uap. Air di dalam daur primer PWR bertekanan sekitar 150 atm dan suhu keluar dari reaktor sekitar 300 derajat Celsius.

Bahan bakar nuklir PWR berbentuk batang-batang dan secara fisik (hampir) sama dengan bahan bakar BWR dan memiliki fungsi yang sama yaitu memanasi air. Sementara air di dalam bejana tekan memiliki fungsi ganda, yaitu sebagai moderator yang memperlambat kecepatan neutron hasil fisi¹³ dan “mendinginkan” batang-batang bahan-bakar nuklir.

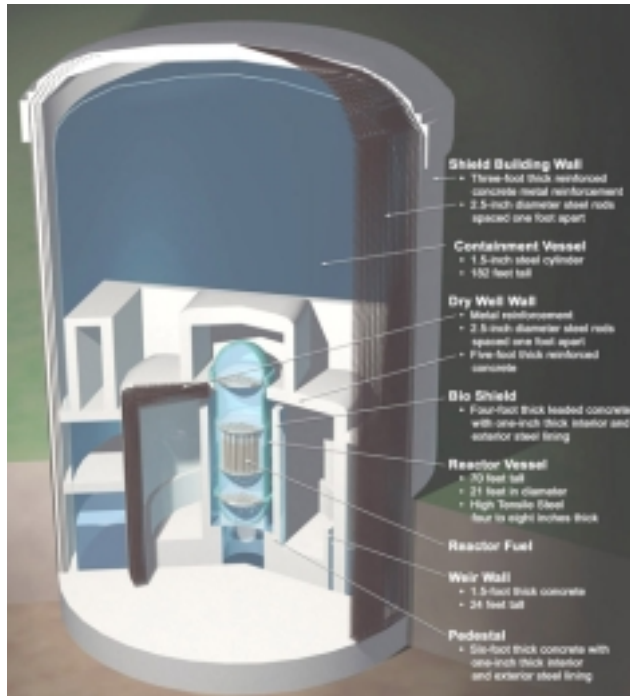
Keterangan di atas dibuat agar para pembaca mengetahui bahwa sesungguhnya tidak ada perbedaan prinsip antara PLTN dengan PLTU lainnya dalam hal pembangkitan uap. Bedanya hanya dalam “pembakaran” bahan bakar: pada pembakaran bahan bakar fosil, energi pembakaran dihasilkan dari reaksi kimia karbon (batubara) atau hidrokarbon (minyak atau gas) dan oksigen dengan “api pembakaran” memanasi tabung-tabung berisi air yang dijadikan uap; pada pembakaran uranium, energi dialihkan dari batang-batang bahan-bakar ke air (yang menjadi panas, dan sebaliknya air mendinginkan batang-bahan-bakar) yang disalurkan ke pembangkit uap untuk memanasi tabung-tabung daur sekunder yang berisi air untuk dijadikan uap. Andaikata kita bisa melihat ke dalam reaktor nuklir saat ia beroperasi, yang tampak hanyalah cahaya putih-kebiruan yang disebut radiasi Cerenkov, dan secara samar tampak pula batang-batang bahan-bakar.

¹³ Agar peluang ditangkap U^{235} jauh lebih besar ketimbang bila kecepatannya tinggi.

Sekitar 5 cm dari batang-batang bahan-bakar tidak ada cahaya Cerenkov: selebihnya yang tampak adalah isi (air) bejana.

Jadi dalam reaktor nuklir tidak ada hal-hal yang bersifat misteri ataupun gaib. Kenyataannya, reaksi nuklir tidak tampak: yang tampak (radiasi Cerenkov) adalah yang timbul akibat gerak-cepat elektron ke luar dari batang-batang bahan-bakar. Ini karena hasil-belah (fission products) uranium pada umumnya adalah radioaktif dan pemancar sinar beta (elektron).

Perbedaan lain ialah dalam potensi bahaya terhadap tubuh manusia. Reaktor nuklir yang beroperasi mengeluarkan banyak radiasi neutron dan sinar gamma, keduanya mudah tembus materi. Neutron berasal dari pembelahan inti (tidak semua tertangkap lagi oleh uranium), dan sinar gamma berasal dari pembelahan inti dan dari peluruhan zat radioaktif hasil-belahan yang terperangkap di dalam batang bahan bakar. Karena itu reaktor nuklir ada di dalam bejana baja tebal dan selalu dikelilingi perisai beton yang tebal (beton khusus yang berat-pekak setebal 2 – 3 meter). Air dalam bejana dan tebal bejana baja (yang 20-25 cm, untuk menahan tekanan tinggi air) masih belum cukup untuk menahan pancaran neutron dan sinar gamma. Karena itu diperlukan perisai beton.



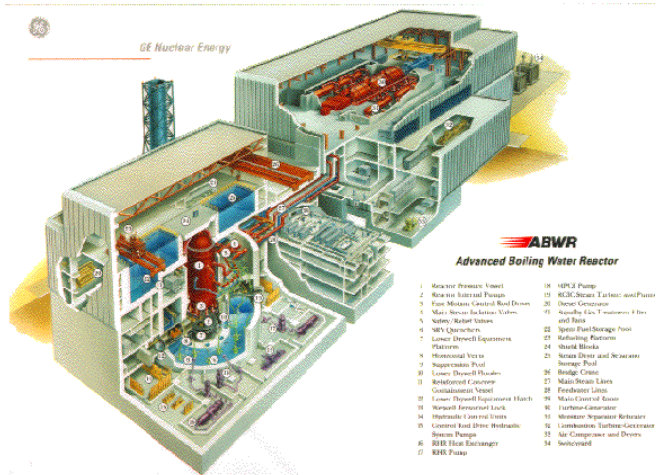
Gambar 31. Bangunan reaktor nuklir di dalam PLTN dengan bejana tekan dan beton pelindung (gambar ini diulang di halaman 68) [www.americansforamericanenergy.org].

Reaktor nuklir yang berhenti beroperasi pun masih mengandung potensi bahaya yang cukup besar. Karena hasil-belah uranium tetap tersimpan di dalam batang-batang bahan-bakar dan semuanya radioaktif, yaitu pemancar sinar beta dan sinar gamma, dengan waktu-paroh yang amat beragam, dari sekonan sampai ratusan tahun. Batang bahan-bakar uranium ada di dalam reaktor sampai tiga tahun lamanya (setiap tahun sepertiga bahan bakar diganti). Pada awalnya mengandung uranium yang diperkaya dengan U^{235} sebanyak 3 sampai 4 persen. Setelah tiga tahun uraniumnya mengandung U^{235} hanya sedikit di bawah 1 persen dan ada tambahan Pu^{239} dan Pu^{240} .

Namun perlu diingat bahwa bahan uranium bersama hasil-belahnya tetap tertahan di dalam batang bahan-bakar. Jadi, sekalipun ada potensi bahaya, bahaya ini dapat dikendalikan. Jika reaktor nuklir berhenti beroperasi, zat-zat radioaktif yang dipancarkan dari hasil-belahan uranium masih sedemikian tinggi aktivitasnya sehingga apabila batang bahan-bakar tidak didinginkan (atau tidak mendapatkan aliran pendinginan) maka batang dapat meleleh (dari panas yang dihasilkannya sendiri). Karena itu, sekalipun reaktor tidak lagi beroperasi, aliran pendinginan tetap harus dijalankan. Berarti pompa air pendingin primer harus tetap bekerja, dan pasokan listrik harus tetap ada.. Kalau operasi reaktor berhenti, tentunya tidak ada lagi reaksi berantai dan pancaran sinar neutron dari reaktor pun berhenti.

Baik reaktor nuklir jenis PWR maupun jenis BWR harus menjadwalkan sekitar satu bulan sampai enam minggu dalam setiap tahun untuk penggantian bahan bakar. Sepertiga dari antara perangkat bahan bakar diganti, sehingga dalam tiga tahun seluruh bahan bakar diganti. Diperlukan waktu sekitar satu bulan karena bagian atas bejana baja harus dibuka dan perangkat bahan bakar harus diangkat satu per satu dengan memastikan seluruh perangkat tetap ada di bawah permukaan air. Jangka waktu satu bulan ini juga dimanfaatkan untuk keperluan perawatan rutin seluruh perlengkapan yang ada di dalam PLTN seperti peralatan ECCS, pressurizer, pompa-pompa dan katup-katup.

Reaktor nuklir jenis PWR adalah yang terbanyak dibangun dan dioperasikan di berbagai negara. Jenis kedua terbanyak adalah jenis BWR; berikut ini desain terbaru jenis ini.



Gambar 32. Skema potongan PLTN jenis terbaru yaitu ABWR seperti yang terkena gempa 6,8 skala Richter di Kashiwazaki-Kariwa bulan Juli 2007.

Yang ketiga adalah jenis PHWR atau HWR yang banyak digunakan di Kanada, India dan juga sebagian PLTN di Korea Selatan, Cina dan Pakistan. Berbeda dengan PWR dan BWR, di mana batang-batang bahan bakar nuklirnya bersikap berdiri vertikal di dalam reaktor, dalam HWR batang bahan bakarnya lebih pendek: hanya sekitar 50 cm dan bersikap tidur terlentang (horisontal) di dalam tabung-tabung bertekanan tinggi yang panjangnya sekitar 4 meter. Satu perangkat bahan bakar terdiri atas sekitar 30 batang bahan bakar dan di dalam satu tabung tekan ada 8 perangkat disusun memanjang.

Salah satu keuntungan reaktor HWR adalah bahwa pengisian ulang bahan bakar dapat dilakukan sambil reaktor nuklir tetap beroperasi. Sehingga reaktor dapat beroperasi 24 jam sehari dan hanya berhenti karena terpaksa (misalnya ada penyimpangan operasi). Hal ini dimungkinkan berkat air berat bertekanan ada di dalam tabung tekan. Dari antara ratusan tabung tekan, salah satunya dapat dibuka dan satu perangkat bahan bakarnya diganti. Tetapi untuk ini diperlukan alat khusus penggantian perangkat bahan bakar.

Jenis-jenis reaktor lain masih cukup banyak ragamnya: dua yang cukup dikenal adalah GCR dan RBMK. PLTN pertama yang dibangun di Inggris dan Perancis adalah dari jenis GCR atau gas-cooled reactor dan sebenarnya dibangun bukan hanya untuk pembangkitan listrik tetapi juga untuk produksi plutonium guna keperluan militer. Karena moderatornya grafit maka bangunan reaktor PLTN jenis ini berukuran besar. Inggris bertahan dengan PLTN jenis ini; upaya perbaikan desain dilakukan dengan mengembangkan jenis advanced gas-cooled reactor (AGR) yang memakai uranium diperkaya sebagai bahan bakar. Sebaliknya Perancis mulai tahun 1974 meninggalkan desain ini dan selanjutnya membangun PLTN jenis PWR. PLTN jenis RBMK adalah desain Rusia (waktu itu masih Uni

Sovyet) dan merupakan PLTN pertama yang beroperasi di Obninsk pada tahun 1954. Desain ini menggunakan grafit sebagai moderator dan air sebagai pendingin yang disalurkan melalui tabung-tabung bertekanan tinggi. Setelah ternyata desain ini bermasalah pada tahun 1986, kini sudah ditinggalkan; namun masih ada sejumlah 12 PLTN jenis ini yang beroperasi sampai sekarang dengan modifikasi seperlunya supaya lebih aman daripada sebelumnya.

Nuklir Mulai Dipertimbangkan Lagi Sekitar Tahun 2000

Setelah lama pembangunan PLTN praktis terhenti, mulai tahun 2000 terlihat tanda-tanda di Amerika Serikat dan di Eropa energi nuklir bakal mendapatkan perhatian lagi. Secara umum, berkurangnya pembangunan PLTN dianggap masyarakat awam sebagai akibat dari persepsi tentang bahaya yang mungkin timbul akibat operasi reaktor nuklir, atau dari belum terpecahkannya masalah pengelolaan limbah nuklir, atau dari terlampau mahalannya ongkos pembangkitan listrik nuklir, atau dari pertimbangan kemungkinan penyelewengan bahan nuklir untuk digunakan sebagai bom nuklir, atau dari suatu kombinasi beberapa pertimbangan ini. Pandangan yang demikian itu sebenarnya agak keliru.

Dari segi investor atau perusahaan listrik, PLTN sebenarnya masih dianggap menjanjikan. Namun sejak kenaikan harga minyak tahun 1979-1980 ternyata laju-tumbuh permintaan energi dan listrik dunia telah mulai melandai. Jika permintaan energi sebelum tahun 1980 berkisar 5 persen/th, maka sesudah tahun 1980 ternyata hanya sekitar 3 persen/th atau kurang. Apabila permintaan listrik sebelum tahun 1980 berkisar sekitar 7 persen/th, maka sesudah tahun 1980 ternyata hanya sekitar 5 persen/th atau kurang. Dengan demikian kebutuhan akan kapasitas baru memang tidak seperti sebelum tahun 1980. Lagipula perekonomian dunia mengalami resesi yang berkepanjangan akibat kenaikan harga minyak internasional. Jadi permintaan akan kapasitas baru memang berkurang dan industri nuklir berhasil memperbaiki kinerja PLTN yang ada (kenaikan faktor beban), sehingga kapasitas nuklir baru juga seakan-akan tersedia.

Selama tahun 1990-an muncul pesaing baru bagi PLTN, yaitu mulai digunakannya teknologi baru berkat perkembangan teknologi mesin pesawat jet, yakni turbin gas. Maka dibangunlah PLTU-G daur ganda (combined-cycle) yang memakai pembangkit listrik yang diputar oleh turbin gas, kemudian gas buang dimanfaatkan untuk membangkitkan uap yang memutar turbin uap yang juga memutar pembangkit listrik. Dengan demikian nilai efisiensi termal bisa mencapai 60 persen. Ketersediaan gas dengan harga yang relatif murah menjadikan PLTU-G sebagai pembangkit yang ramai dibangun, apalagi dapat selesai dibangun dalam waktu kurang dari tiga tahun dengan biaya modal yang jauh lebih rendah (\$500/kW) ketimbang PLTU-bb (sekitar \$1000/kW) apalagi PLTN (di atas \$1500/kW).

Selain itu, khusus di Amerika Serikat di mana banyak terdapat sumber batubara di bagian barat sedang kebutuhan listrik banyak terdapat di bagian timur,

industri pertambangan batubara berhasil menjalin kerjasama dengan perusahaan angkutan kereta-api khas batubara dan dengan mitra perusahaan listrik di timur Amerika Serikat melalui kontrak jangka panjang. Harga batubara dapat ditekan dan batubara tetap menjadi sumber energi pembangkitan listrik yang utama, yaitu tidak kurang dari 50 persen.

Dengan adanya persaingan keras dari PLTU-G dan PLTU-bb para pemasok PLTN berupaya untuk menyempurnakan desain PLTN dengan tujuan untuk mengurangi biaya modal. Maka muncullah apa yang disebut reaktor nuklir untuk PLTN generasi ketiga. Desain baru dengan menggunakan faktor inherent safety dan sifat alami seperti gravitasi dan konveksi diperbaiki lagi dengan mengurangi volume dan jumlah komponen serta cara-cara konstruksi yang lebih cepat. Desain baru ini diberi predikat 'A'; GE dan Toshiba keluar dengan desain ABWR dan Westinghouse dengan Mitsubishi keluar dengan desain APWR. Di Eropa pun tidak ketinggalan: Siemens-KWU bergabung dengan Framatome yang kini menjadi bagian dari Areva, keluar dengan desain EBWR.

Para investor juga percaya bahwa PLTN dapat dibangun lebih murah ketimbang sebelumnya, karena standarisasi dan lain-lain penyempurnaan dalam disain. Di Jepang telah selesai dibangun PLTN generasi ketiga, yaitu Kashiwazaki-6 dan 7 (yang terkena gempa tektonik berkekuatan 7,9 skala Richter dalam bulan September 2007) selesai tahun 1996. Di Finlandia mulai tahun 2000 dilakukan studi kelayakan ekonomi PLTN dan pada tahun 2003 diambil keputusan untuk membangun PLTN ke-4 di Olkiluoto dengan desain EBWR. Pembangunan PLTN tersebut dimulai pada tahun 2005. Namun di Amerika Serikat dan negara Eropa lainnya para investor juga masih belum yakin bahwa proyek pembangunan PLTN tidak bakal terhambat karena aksi demo dan protes atau pengaduan ke pengadilan oleh para LSM, hal mana dapat memperlambat konstruksi dan mempertinggi biaya modal. Faktor inilah yang menjadi penghambat utama investasi proyek PLTN baru di negara industri hingga saat ini.

Sekitar tahun 2000 timbul kesadaran bahwa dunia amat sulit melepaskan ketergantungan pada energi fosil, baik minyak bumi, gas alam maupun batubara. Hal ini telah mendorong beberapa pejabat dan petinggi lembaga internasional seperti OECD dan IEA di Paris untuk membuat pernyataan mengenai pentingnya energi nuklir turut diperhitungkan apabila dunia berhasrat untuk mengurangi dampak pemanasan global dari emisi CO₂. Demikianlah pernyataan para petinggi OECD¹⁴ dan IEA: Sekjen OECD dan Direktur Eksekutif IEA, yang tugasnya melayani kepentingan negara industri. Namun para politisi se-olah-olah tidak menghiraukan berbagai himbauan tersebut.

Selain itu, gerakan lingkungan hidup akhir-akhir ini mengalami perpecahan di dalam tubuhnya, karena sebagian sudah mengubah sikapnya terhadap energi nuklir. Bahkan beberapa tokoh lingkungan kini menganggap energi nuklir termasuk ramah lingkungan. **Dr. Patrick Moore**, salah seorang pendiri Greenpeace,

¹⁴ Sekretaris Jenderal OECD Donald J. Johnston menyatakan pada bulan Maret 2005 bahwa energi nuklir unsur yang kritis dalam upaya memperlambat peningkatan kadar CO₂ di udara. "Jika diabaikan, bisa menjadi malapetaka."

sejak pertengahan 1980an sudah mengubah pendiriannya mengenai energi nuklir. “*There is now a great deal of scientific evidence showing nuclear to be an environmentally sound and safe choice.*” Moore says. He says his former colleagues at Greenpeace are unrealistic in their call for a phasing out of both coal and nuclear power worldwide....”*There are simply not enough available forms of alternative energy to replace both of them together. Given a choice between nuclear on the one hand and coal, oil, and natural gas on the other, nuclear energy is by far the best option as it emits neither CO₂ nor any other air pollutants.*””

(Greenspirit Strategies dari <http://greenspiritstrategies.com/D151.cfm>)

Terjemahan bebasnya sebagai berikut. “Kini terdapat banyak bukti ilmiah yang menunjukkan bahwa nuklir itu pilihan yang ramah lingkungan dan aman”, demikian Moore. Ia mengatakan bahwa mantan rekan-rekannya di Greenpeace tidak realistis dalam menyuarakan supaya baik batubara maupun nuklir dihentikan perannya di seluruh dunia. “Secara gamblangnya, tidak ada cukup energi alternatif tersedia untuk menggantikan kedua-duanya. Bila diminta memilih antara nuklir di satu pihak dan batubara, minyak dan gas bumi di lain pihak, maka nuklir adalah pilihan yang jauh lebih baik karena ia tidak mengeluarkan emisi CO₂ atau pencemar lainnya”.

Dr. James Lovelock, salah seorang tokoh lingkungan, demikian pula “*One of the most eloquent advocates of nuclear energy is James Lovelock, the British scientist who created the Gaia hypothesis, which holds that Earth is, in effect, a self-regulating organism. “I am a Green, and I entreat my friends in the movement to drop their wrongheaded objection to nuclear energy,” Mr. Lovelock wrote last year, adding: “Every year that we continue burning carbon makes it worse for our descendents. ... Only one immediately available source does not cause global warming, and that is nuclear energy.”* Terjemahannya sebagai berikut. “Salah seorang penganjur ulung energi nuklir adalah James Lovelock, ilmuwan Inggris yang menciptakan hipotesa Gaia, yang berpandangan bahwa Bumi sesungguhnya sebuah organisme yang mengendalikan/mengatur diri. ‘Saya seorang Hijau, dan saya menyarankan kepada kawan-kawan sesama gerakan untuk meninggalkan penolakan terhadap energi nuklir yang keliru,’ tulis beliau tahun lalu, menambahkan: ‘Setiap tahun kita meneruskan pembakaran karbon akan memperburuk keadaan bagi keturunan kita Hanya satu sumber energi yang segera tersedia yang tidak menyebabkan pemanasan global, ialah energi nuklir.’”

Sebagai tindak lanjut kebijakan energi yang dicetuskan oleh Presiden Bush pada tahun 2000, Kongres Amerika Serikat akhirnya menerbitkan undang-undang kebijakan baru pada tahun 2005 yang antara lain menyajikan insentif berupa keringanan perpajakan atas produksi listrik dan jaminan atas biaya modal bagi 8 PLTN baru yang (akan) dibangun. Insentif ini dipandang perlu karena di kacamata investor masih melekat ketakutan akan terjadi demo yang dapat menghambat atau memperlambat konstruksi PLTN dan berakibat pada kenaikan biaya modal pembangunan PLTN.

Berikut ini adalah tabel yang menyajikan jumlah-jumlah PLTN yang beroperasi menurut negara serta rencana pembangunan PLTN yang sudah ada.

Tabel 2. PLTN di Dunia Menurut Negara 2006-07 dan Kebutuhan Uranium

| 17 October 2007 | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-----|------------------------------------|-------|--|------|---------------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------|
| | PEMBANGKI TAN LISTRIK NUKLIR 2006 | | PLTN BEROPERASI Oktober 2007 | | PLTN DALAM KONSTRUKSI Oktober 2007 | | PLTN DALAM RENCANA Oktober 2007 | | PLTN DIUSULKAN Oktober 2007 | | KEBUTU- HAN URANI- UM 2007 |
| | Milyar kWh | % e | uml | We | Juml | MWe | uml | MWe | uml | MWe | ton U |
| Argentina | 7.2 | 6.9 | 2 | 935 | 1 | 692 | 1 | 740 | 1 | 740 | 135 |
| Armenia | 2.4 | 42 | 1 | 376 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | 51 |
| Bangladesh | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 0 |
| Belarus | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 0 | 0 | 0 |
| Belgium | 44.3 | 54 | 7 | 5728 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1079 |
| Brazil | 13.0 | 3.3 | 2 | 1901 | 0 | 0 | 1 | 1245 | 4 | 4000 | 338 |
| Bulgaria | 18.1 | 44 | 2 | 1906 | 0 | 0 | 2 | 1900 | 0 | 0 | 255 |
| Canada* | 92.4 | 16 | 18 | 12595 | 2 | 1540 | 4 | 4000 | 2 | 2200 | 1836 |
| China | 51.8 | 1.9 | 11 | 8587 | 5 | 4540 | 30 | 32000 | 86 | 68000 | 1454 |
| Czech Republic | 24.5 | 31 | 6 | 3472 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1900 | 550 |
| Egypt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | 0 |
| Finland | 22.0 | 28 | 4 | 2696 | 1 | 1600 | 0 | 0 | 1 | 1000 | 472 |
| France | 428.7 | 78 | 59 | 63473 | 1 | 1630 | 0 | 0 | 1 | 1600 | 10368 |
| Germany | 158.7 | 32 | 17 | 20339 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3486 |
| Hungary | 12.5 | 38 | 4 | 1826 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 254 |
| India | 15.6 | 2.6 | 17 | 3779 | 6 | 2976 | 10 | 8560 | 9 | 4800 | 491 |
| Indonesia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 0 | 0 | 0 |
| Iran | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 915 | 2 | 1900 | 1 | 300 | 143 |
| Israel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1200 | 0 |
| Japan | 291.5 | 30 | 55 | 47577 | 2 | 2285 | 11 | 14945 | 1 | 1100 | 8872 |
| Kazakhstan | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 300 | 0 |
| Korea DPR (North) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 950 | 0 | 0 | 0 |
| Korea RO (South) | 141.2 | 39 | 20 | 17533 | 2 | 2000 | 6 | 7600 | 0 | 0 | 3037 |
| Lithuania | 8.0 | 69 | 1 | 1185 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3200 | 134 |
| Mexico | 10.4 | 4.9 | 2 | 1310 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 257 |
| Netherlands | 3.3 | 3.5 | 1 | 485 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 112 |
| Pakistan | 2.6 | 2.7 | 2 | 400 | 1 | 300 | 2 | 600 | 2 | 2000 | 64 |
| Romania | 5.2 | 9.0 | 2 | 1310 | 0 | 0 | 2 | 1310 | 1 | 655 | 92 |
| Russia | 144.3 | 16 | 31 | 21743 | 7 | 4920 | 8 | 9600 | 20 | 18200 | 3777 |
| Slovakia | 16.6 | 57 | 5 | 2064 | 2 | 840 | 0 | 0 | 0 | 0 | 299 |
| Slovenia | 5.3 | 40 | 1 | 696 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | 145 |
| South Africa | 10.1 | 4.4 | 2 | 1842 | 0 | 0 | 1 | 165 | 24 | 4000 | 332 |
| Spain | 57.4 | 20 | 8 | 7442 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1473 |
| Sweden | 65.1 | 48 | 10 | 9086 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1468 |
| Switzerland | 26.4 | 37 | 5 | 3220 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1000 | 575 |

17 October 2007

| | PEMBANGKITAN LISTRIK NUKLIR 2006 | | PLTN BEROPERASI Oktober 2007 | | PLTN DALAM KONSTRUKSI Oktober 2007 | | PLTN DALAM RENCANA Oktober 2007 | | PLTN DIUSULKAN Oktober 2007 | | KEBUTUHAN URANIUM 2007 |
|-----------------------|----------------------------------|-----------|------------------------------|----------------|------------------------------------|---------------|---------------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|------------------------|
| | Milyar kWh | % e | Uml | We | Juml | MWe | Uml | MWe | Uml | MWe | ton U |
| Thailand | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4000 | 0 |
| Turkey | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4500 | 0 |
| Ukraine | 84.8 | 48 | 15 | 13168 | 0 | 0 | 2 | 1900 | 20 | 27000 | 2003 |
| United Kingdom | 69.2 | 18 | 19 | 11035 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2021 |
| USA | 787.2 | 19 | 104 | 99049 | 0 | 0 | 7 | 10180 | 25 | 32000 | 20050 |
| Vietnam | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2000 | 0 |
| DUNIA** | 2658 | 16 | 439 | 372,002 | 33 | 26,838 | 94 | 101,595 | 222 | 193,095 | 66,529 |
| | milyar kWh | % e | Jum | MWe | Jum | MWe | Jum | MWe | Jum | MWe | ton U |
| | PEMBANGKITAN LISTRIK NUKLIR 2006 | | PLTN BEROPERASI 2007 | | PLTN DALAM KONSTRUKSI | | PLTN DALAM RENCANA | | PLTN DIUSULKAN | | KEBUTUHAN URANIUM 2007 |

Sumber :

Data reaktor : WNA (17/10/07). IAEA- untuk produksi listrik nuklir dan prosentase dari seluruh listrik (% e) 5/07. WNA: Pasaran BB Nuklir Dunia (skenario acuan) - U. Termasuk teras pertama PLTN baru.

Beroperasi = Terhubung dengan jaringan

Dalam konstruksi = beton sdh dicor, atau sedang dalam renovasi;

Dalam rencana = Sdh disetujui, atay dana tersedia, diharapkan beroperasi dalam 8 tahun, atau konstruksi sudah berjalan jauh tetapi tertunda tanpa kepastian,

Diusulkan = Maksud sdh jelas tetapi belum ada kepastian. Untuk PLTN dalam rencana atau diusulkan, angka MWe adalah gross,

TWh = Terawatt-jam (milyar kilowatt-jam),

MWe = Megawatt netto (listrik bukan termal),

kWh = kilowatt-jam.

NB: 66,529 tU = 78,458 t U₃O₈

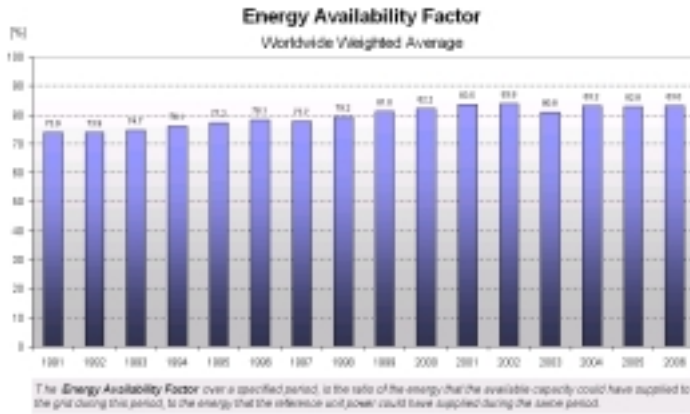
* Untuk Canada, angka 'dalam konstruksi' adalah 2 PLTN Bruce A yg tertunda.

** Jumlah seluruh dunia termasuk 6 PLTN beroperasi di Taiwan dengan kapasitas total 4884 MWe, yang membangkitkan listrik 38.3 billion kWh dalam th 2006 (20% dari listrik Taiwan). Taiwan memiliki dua PLTN dalam konstruksi dengan kapasitas 2600 MWe.

Catatan: Tabel di atas dimutakhirkan oleh WNA setiap dua bulan. Dapat diakses di url: <http://www.world-nuclear.org/info/reactors.html>

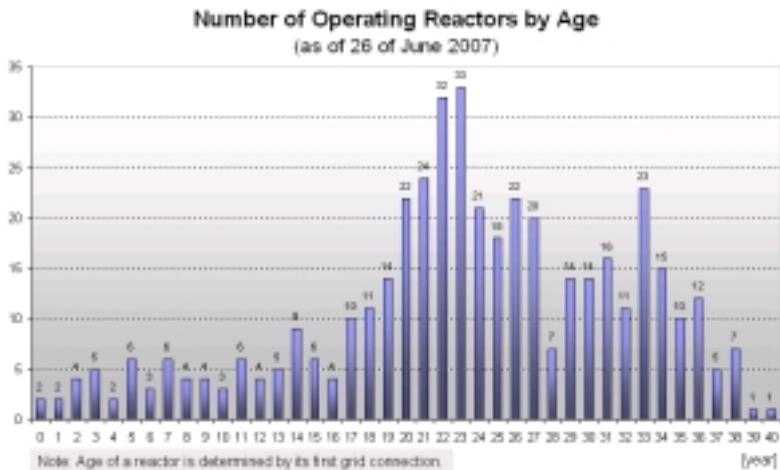
Sebagai badan PBB yang paling berkopeten di bidang energi nuklir, IAEA menyajikan data mengenai PLTN dunia melalui website-nya, baik perkembangan tahunan maupun data setiap PLTN termasuk kinerja, operasi, maupun tanggal mulai konstruksi, mulai beroperasi maupun berhentinya operasi komersial. Informasi ini dapat diperoleh dari url sebagai berikut : <http://www.iaea.org/programmes/a2/index.html>

Berikut ini salah satu grafik yang disajikan oleh IAEA yang memperlihatkan kinerja PLTN sedunia. Grafik ini mengenai rata-rata ketersediaan energi PLTN seluruh dunia yang tampak mengalami peningkatan tahun demi tahun.



Gambar 33. Grafik rata-rata ketersediaan energi seluruh PLTN dunia menurut tahun

Gambar selanjutnya adalah grafik mengenai jumlah PLTN di seluruh dunia menurut usianya. Tampak sudah ada yang berusia 39 dan 40 tahun.



Gambar 34. Jumlah PLTN yang beroperasi di seluruh dunia menurut usianya; sebagian di antaranya sudah mendapatkan izin operasi hingga 60 tahun.

IAEA juga menyusun perkiraan tahunan perkembangan kapasitas terpasang PLTN di dunia, dan yang terbaru sudah terbit. Tabel berikut menyajikan perkiraan hingga tahun 2030.

Tabel 3. Perkiraan Perkembangan Kapasitas PLTN Dunia 2006-2030 (GWe)

| Tahun | 2006 | 2010 | 2020 | 2030 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Perkiraan rendah | 369,7 | 378 | 425 | 447 |
| Perkiraan tinggi | | 385 | 525 | 691 |

Sumber: IAEA, Oktober 2007

Angka-angka tersebut sudah termasuk perkiraan untuk Asia Tenggara dan Pasifik sebesar 0,9 – 7,4 Gwe untuk tahun 2030.