

ANALISIS KINERJA OPERASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE LWR DI JEPANG

(Priyanto Joyosukarto, Nurlaila)¹⁾

Abstrak

ANALISIS KINERJA OPERASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR TIPE LWR DI JEPANG. Suatu analisis telah dilakukan terhadap data kinerja operasi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) LWR di Jepang selama kurun waktu beberapa tahun terakhir. Analisis tersebut dimaksudkan untuk memperoleh gambaran keunggulan kinerja operasi PLTN LWR di Jepang, khususnya dibanding PLTN sejenis di berbagai negara maju, sekaligus mengambil manfaat dari pengalaman Jepang di dalam memanfaatkan energi nuklir sebagai sumber energi listrik yang aman, andal, kompetitif, dan ramah lingkungan. Analisis dilakukan terhadap tiga aspek operasi PLTN yaitu teknis, ekonomi, dan lingkungan, yang mencakup beberapa parameter kinerja operasi, antara lain: faktor kapasitas, tingkat pemadaman paksa, jumlah insiden dan kegagalan, biaya produksi listrik, serta produksi limbah radioaktif padat, dan emisi gas CO₂. Selanjutnya dilakukan perbandingan faktor kapasitas dan *scram rate* PLTN yang beroperasi di berbagai negara maju. Pencapaian faktor kapasitas di atas 75% dan *scram rate* di bawah 0,6 per reaktor-tahun, menunjukkan keunggulan PLTN LWR Jepang dibanding PLTN serupa di beberapa negara maju termasuk PLTN HWR di Kanada yang menerapkan "on-load refuelling". PLTN juga telah membuktikan sebagai pembangkit listrik termurah (9 Yen/kWh), dan telah pula berperan penting di dalam upaya pengurangan emisi gas rumah kaca, khususnya CO₂. Kinerja yang tinggi ini dipandang sebagai bukti empiris teruji dari teknologi PLTN LWR Jepang yang merupakan hasil implementasi yang konsisten dari "Program Perbaikan dan Standardisasi LWR" yang dimulai tahun 1975. Hasil analisis ini dapat menjadi masukan berguna bagi pemerintah Indonesia atau berbagai pihak terkait yang berperan melakukan penilaian terhadap berbagai teknologi PLTN yang saat ini tersedia di pasar global sebagai persiapan introduksi PLTN di Indonesia.

Abstract

ANALYSIS ON THE OPERATION PERFORMANCE OF THE JAPANESE LWR TYPE NUCLEAR POWER PLANTS. An analysis has been conducted on the operation performance of the Japanese LWR-type Nuclear Power Plants (NPPs) during the last several years. This analysis is intended to draw the general profile of the excellency of the Japanese LWR-type NPPs especially in comparison with the plants being operated in another advanced countries, as well as to take advantage from the Japanese experiences in utilizing nuclear energy as a safe, reliable, competitive, and environmentally benign electricity energy sources. Analysis is started from three operation aspects, i.e. technical, economic, and environment, which covers the following performance parameters, i.e. capacity factor, *scram rate*, incident/failure, generation cost, as well as solid radioactive waste and CO₂ gas production. Additionally, this performance is compared with the NPPs being operated in other advanced countries in term of capacity factor and *scram rate*. The achievement of capacity factor more than 75% and *scram rate* less than 0.6 per reactor-year shows that Japanese LWR NPP performance surpasses those from the other advanced countries, even the Canadian PHWR CANDU which incorporates on-load refueling. Nuclear energy yields the cheapest electricity generation cost (9 Yen/kWh), besides contributing significant role in the reduction of CO₂. This performance achievement is recognized as the proven empirical evidence for the excellency of Japanese NPP technology which has been resulted from the consistent implementation of the "LWR Improvement & Standardization Program" started in 1975. The result of this analysis might become a valuable input to the Government of Indonesia and to the other related parties which might get involved in selecting the NPP technology currently available in the global market prior to the NPPs introduction in Indonesia.

¹⁾ Bidang Partisipasi Industri Nuklir P2EN-BATAN

I. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) jenis air-ringan (*Light Water Reactor, LWR*) saat ini merupakan jenis PLTN yang paling banyak beroperasi di dunia. Teknologi LWR ini telah dikembangkan sejak awal tahun lima puluhan. PLTN *Shippingport* merupakan PLTN LWR tipe air-tekan (*Pressurized Water Reactor, PWR*) pertama yang digelar pada tahun 1951 di Amerika Serikat. Sejak saat itu, seiring dengan semakin meningkatnya kebutuhan listrik dunia, pembangunan PLTN terus meningkat disertai dengan beberapa penyempurnaan dalam bidang desain, manufaktur, konstruksi, dan operasi.

Sampai akhir 1997, terdapat 437 buah PLTN beroperasi di tiga puluh negara dengan total kapasitas terpasang 352 GW(e), dengan pangsa produksi listrik dunia sekitar 17%, dan total pengalaman operasi lebih dari 9.800 tahun-reaktor.¹⁾ Dari sejumlah itu, 78% adalah tipe LWR yang meliputi PWR (57%) dan BWR (21%). Beberapa produsen PWR antara lain: Westinghouse, Mitsubishi, Babcock & Wilcox, Framatome, dan ABB-CE. Beberapa produsen BWR antara lain: General Electric, Toshiba/Hitachi. Teknologi LWR yang teruji ini juga masih terus dikembangkan dan disempurnakan ke arah kematangan.

Sejalan dengan Kebijakan Umum Bidang Energi, Pemerintah Indonesia telah mempertimbangkan pentingnya introduksi PLTN untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional yang terus meningkat. Dalam Studi Tapak dan Studi Kelayakan pembangunan PLTN di Indonesia yang dilaksanakan oleh NEWJEC (1991-1995), berbagai jenis PLTN produksi berbagai pabrik telah dikaji kelayakannya untuk dibangun di Indonesia, dimana PLTN tipe LWR merupakan salah satu obyek studi. Salah satu kesimpulan dari studi ini menyatakan bahwa PLTN tipe PWR, BWR, dan PHWR CANDU dengan daya antara 600-700 MWe dipandang layak untuk dibangun di Indonesia.²⁾ Meski teknologi LWR produksi berbagai pabrik telah teruji, tetapi untuk diintroduksikan di Indonesia masih dipandang perlu dilakukan analisis secara detail terhadap sejarah operasinya di berbagai negara.

Tulisan berikut membahas hasil analisis terhadap kinerja operasi PLTN LWR yang beroperasi di Jepang selama beberapa tahun operasi, utamanya antara tahun 1984 sampai 1994. Obyek analisis meliputi tiga aspek operasi, yaitu teknis-keselamatan, ekonomi, dan lingkungan, yang mencakup beberapa parameter kinerja operasi antara lain: faktor kapasitas, *scram rate*, dosis ekuivalen, jumlah *event* dilaporkan, biaya produksi listrik, serta produksi limbah radioaktif dan gas CO₂. Akan dibedakan kinerja operasi PLTN PWR dan BWR, tapi bila data tidak lengkap maka keduanya akan dicakup ke dalam LWR. Untuk memperoleh gambaran keunggulan global, selanjutnya dilakukan perbandingan antara faktor kapasitas dan *scram rate* PLTN Jepang dengan PLTN yang beroperasi di berbagai negara. Data operasi PLTN diambil dari berbagai publikasi yang diterbitkan oleh berbagai institusi, antara lain IAEA, JEPIC, CRIEPI, MITI, NUPEC, dan TEPCO yang tersedia sampai akhir 1999.

Urutan bahasan dimulai dari pendahuluan, metode analisis, dan peta pembangkitan listrik tenaga nuklir di Jepang. Selanjutnya, diikuti dengan bahasan hasil analisis untuk semua parameter kinerja operasi, dan diakhiri dengan kesimpulan.

II. METODE ANALISIS

Terhadap data operasi PLTN-LWR yang diperoleh dari beberapa publikasi dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Pemilahan dan pemisahan data operasi ke dalam tiga aspek kinerja operasi, yaitu : teknis-keselamatan, ekonomi, dan lingkungan. Bila data lengkap, dibedakan antara PLTN PWR dan BWR.
 - a. Aspek teknis-keselamatan mencakup : Faktor Kapasitas, *Scram Rate*, Dosis Ekuivalen Rata-rata, dan Jumlah *Event* Dilaporkan.
 - b. Aspek ekonomi hanya mencakup biaya produksi listrik, yang di dalamnya tercakup bahasan tentang pangsa biaya bahan bakar nuklir dan biaya konstruksi.
 - c. Aspek lingkungan mencakup produksi limbah padat radioaktif dan pengurangan produksi gas CO₂.
2. Interpretasi data operasi dan pengkajian secara rinci terhadap faktor-faktor yang melatarbelakangi data operasi.
3. Perbandingan data operasi yang relevan dengan peraturan yang berlaku atau rekomendasi institusi terkait.
4. Pengkajian kinerja global dengan membandingkan faktor kapasitas dan *scram rate* PLTN yang beroperasi di berbagai negara.
5. Pengambilan kesimpulan kinerja operasi.

III. PETA PEMBANGKITAN LISTRIK TENAGA NUKLIR DI JEPANG

Di Jepang, kegiatan pembangkitan, transmisi, distribusi, dan penjualan listrik dilakukan oleh sepuluh perusahaan listrik swasta yang telah mendapatkan hak otonomi untuk melaksanakan kegiatan-kegiatan tersebut di wilayah masing-masing. Kesepuluh perusahaan tersebut beserta tipe PLTN yang dioperasikan adalah sebagai berikut : Tokyo (BWR), Hokkaido (PWR), Tohoku (BWR), Hokuriku (PWR), Chubu (BWR), Kansai (PWR), Chugoku (BWR), Shikoku (PWR), Kyushu (PWR), dan Okinawa (tidak mengoperasikan PLTN). Disamping kesepuluh perusahaan tersebut, terdapat satu perusahaan yang hanya membangkitkan listrik saja akan tetapi tidak melakukan kegiatan transmisi, distribusi dan penjualan. Perusahaan tersebut adalah *Japan Atomic Power Company* yang mengoperasikan empat buah PLTN, yaitu Tokai-1(GCR), Tokai-2 (BWR), Tsuruga-1(PWR), dan Tsuruga-2 (BWR). Jumlah PLTN LWR beroperasi pada akhir tahun 1998 adalah 55 buah terdiri dari BWR sebanyak 30 buah dan PWR sebanyak 25 buah.³⁾

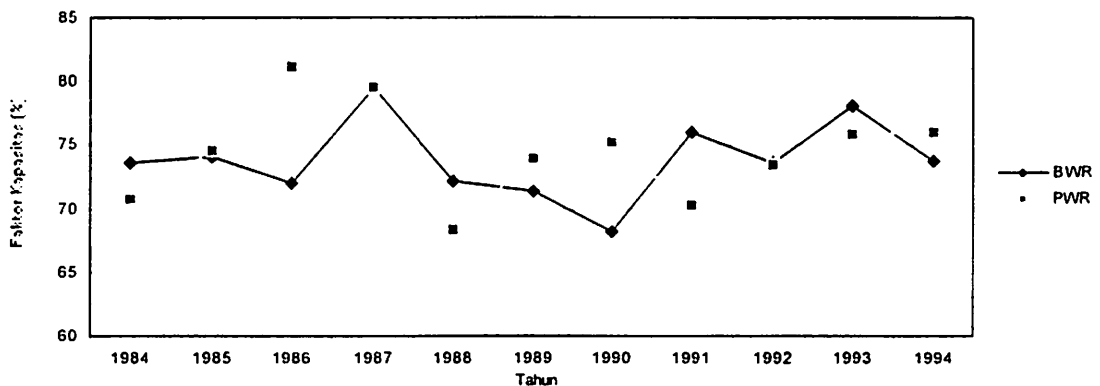
Komposisi pembangkitan listrik di Jepang terdiri dari kombinasi antara pembangkit tenaga air (konvensional dan *pumped storage*), pembangkit tenaga termal (panas bumi, batubara, LNG, dan minyak), dan pembangkit tenaga nuklir. Pangsa produksi ketiga jenis pembangkit tersebut pada tahun fiskal 1997 berturut-turut 9,0%, 51,9%, dan 39,1%.⁴⁾

IV. ANALISIS PARAMETER KINERJA OPERASI

IV. 1. Aspek Teknis-Keselamatan

IV. 1. 1. Faktor Kapasitas

Faktor Kapasitas sebuah pembangkit listrik didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah produksi listrik nyata terhadap seluruh jumlah produksi listrik yang seharusnya dapat dilakukan bilamana pembangkit beroperasi penuh selama satu tahun (8760 jam). Besarnya faktor kapasitas ini sangat ditentukan oleh lamanya waktu inspeksi periodik dan terjadinya pemadaman operasi karena gangguan dan kegagalan sistem PLTN. Kecenderungan perubahan faktor kapasitas PLTN LWR antara 1984 - 1994 ditunjukkan pada gambar 1.⁵⁾



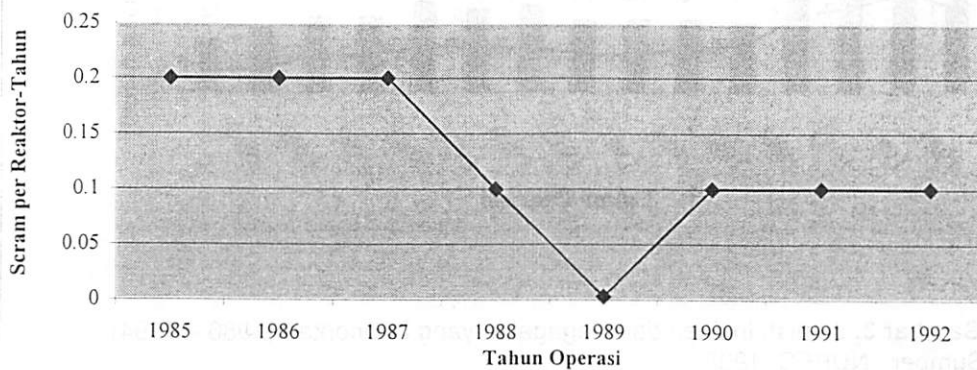
Gambar 1. Faktor Kapasitas PLTN LWR di Jepang (1984 – 1994)
Sumber : NUPEC, 1998

Berdasarkan Gambar 1 selama kurun waktu tersebut rata-rata faktor kapasitas berhasil dipertahankan di atas 70% bahkan untuk tahun 1993 angka tersebut mencapai 76,8%. Secara rinci, untuk BWR dan PWR faktor kapasitas yang tinggi ini dicapai pada 1993 dan 1994 yaitu masing-masing 78,1% dan 76,0%. Faktor kapasitas tertinggi masing-masing dicapai berkat pemendekan waktu inspeksi periodik dan penurunan jumlah insiden dan kegagalan selama operasi sebagai hasil penggunaan komponen dengan keandalan yang tinggi. Hal ini merupakan suatu prestasi mengingat faktor kapasitas pada tahun tujuh puluhan masih sangat rendah, yaitu antara 40%-50%, yang utamanya disebabkan oleh terjadinya *stress corrosion cracking* (SCC) pada BWR dan kegagalan tabung pembangkit uap pada PWR.

Stress corrosion cracking adalah gejala retak pada pipa dari bahan *austenitic stainless steel* yang diakibatkan oleh kondisi *static stress* pada lingkungan (pendingin) reaktif. Dua jenis penyebab yang lain dari retak pipa adalah variasi *cyclic stress* pada lingkungan *inert (fatigue)* dan variasi *cyclic stress* pada lingkungan yang korosif (*corrosion fatigue*). Gejala retak tersebut di atas banyak ditemui pada BWR di berbagai negara.⁶⁾ Gejala ini bisa diatasi dengan penggantian material, perbaikan metode pengelasan, dan penambahan Hidrogen ke dalam pendingin untuk mengurangi kadar Oksigen. *Corrosion* dan *fatigue* juga merupakan penyebab utama kegagalan pada tabung pembangkit uap, dimana dalam hal ini terjadi kerusakan yang mengakibatkan kebocoran pendingin dan uap dari sistem primer. Penyebab lain dari kegagalan pembangkit uap adalah *fretting*.

IV. 1. 2. Scram Rate

Yang dimaksud *scram rate* (tingkat pemadaman paksa) adalah penghentian operasi PLTN baik secara otomatis maupun manual karena adanya gangguan internal maupun eksternal, yang nilainya merupakan hasil bagi antara total jam pembangkitan dalam satu tahun terhadap jumlah *scram* dalam satu tahun. Seperti ditunjukkan pada Gambar 2, selama tahun operasi 1985-1992 *scram rate* pada PLTN LWR Jepang berhasil dipertahankan antara 0,2 - 0,1 kali/reaktor-tahun³⁾.



Gambar 2. Scram Rate PLTN di Jepang (1985 – 1992)
Sumber : TEPCO, 1993

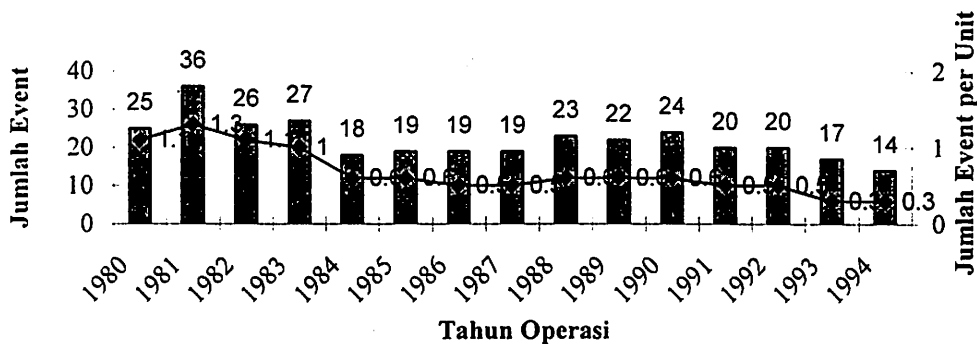
Rendahnya *scram rate* ini berkat diterapkannya berbagai langkah berikut.³⁾

1. Investigasi menyeluruh terhadap penyebab setiap *event*, dan mengimplementasikan berbagai upaya pencegahan
2. Menerapkan berbagai tindakan preventif yang didasarkan pada laporan *event* serupa dari dalam maupun luar negeri
3. Inspeksi dan perawatan yang detail selama inspeksi tahunan dengan penekanan pada perawatan preventif, dan

4. Peningkatan keandalan fasilitas melalui berbagai perbaikan teknis beragam sebagaimana diamankan dalam "Program Perbaikan dan Standardisasi LWR" yang dimulai tahun 1975.

IV. 1. 3. Jumlah Event Dilaporkan

Electricity Utility Industry Law dan Regulation of Nuclear Source Material, Nuclear Fuel Material and Reactor mengamanatkan bahwa setiap event (kejadian) di dalam fasilitas nuklir harus dilaporkan ke pihak berwenang, dalam hal ini MITI (*Ministry for International Trade and Industries*). Event di sini meliputi pemadaman operasi, baik secara otomatis maupun manual, penurunan daya operasi, kerusakan pada tabung pemindah panas pembangkit uap, atau jenis kerusakan yang lain. Selama kurun waktu 1984 - 1994 jumlah pelaporan tersebut berhasil dipertahankan pada level 0,6 sampai 0,3 per unit per tahun sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3. Dalam hal ini penghitungan jumlah unit PLTN beroperasi dilakukan pada akhir tahun fiskal, akan tetapi PLTN yang masih dalam tahap uji operasi pada akhir tahun tersebut juga diperhitungkan apabila diperkirakan akan terjadi gangguan.



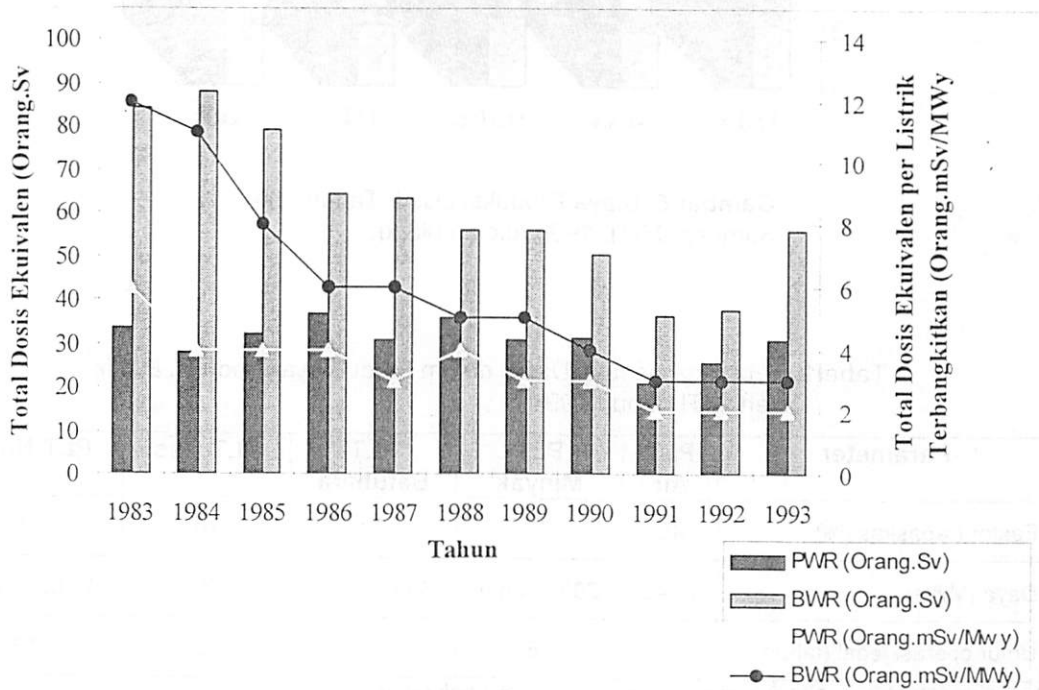
Gambar 3. Jumlah Insiden dan Kegagalan yang Dilaporkan (1986 – 1994)
Sumber : NUPEC, 1998

Insiden/kegagalan yang terjadi umumnya berkaitan dengan:

1. SCC pada pipa-pipa *stainless steel* (BWR)
2. *Thermal Fatigue Cracking* pada bejana tekan reaktor (BWR)
3. Kerusakan pada pompa resirkulasi pendingin (BWR)
4. SCC pada *control rod guide tube support pins and flexible pins* (PWR)
5. Pecah/retak pada tabung pembangkit uap (PWR)

IV. 1. 4. Dosis Ekuivalen Rata-rata

Dosis ekuivalen rata-rata (dalam satuan m.Sv) didefinisikan sebagai total dosis ekuivalen yang diterima oleh seluruh pekerja dalam satu tahun (m.Sv) dibagi total jumlah pekerja yang bekerja pada area radioaktif di dalam PLTN. Menurut rekomendasi ICRP, batas tertinggi yang diijinkan dari dosis ekuivalen tiap pekerja adalah 50 millisieverts (mSv, 1 Sv=100 rem) per tahun, sedangkan untuk anggota masyarakat adalah 1 mSv per tahun.⁶⁾ Gambar 4 menunjukkan kecenderungan penurunan total dosis ekuivalen rata-rata per jumlah listrik diproduksi, baik pada PWR maupun BWR mulai tahun operasi 1983 sampai 1993. Untuk PWR telah terjadi penurunan dosis ekuivalen rata-rata dari 6 menjadi 2 orang.mSv/MW, sedangkan pada BWR telah terjadi penurunan dari 12 menjadi 3 orang.mSv/MW. Pada tahun 1983, jumlah total pekerja 46629 orang dengan dosis ekuivalen rata-rata 2,6 mSv dan total kapasitas terpasang PLTN 18277 MW, sedangkan pada tahun 1993 terjadi kenaikan jumlah pekerja menjadi 68721 orang sementara dosis ekuivalen rata-rata turun menjadi 1,3 mSv dan total kapasitas terpasang PLTN 38376 MW. Penurunan dosis ekuivalen ini merupakan hasil dari promosi yang aktif terhadap upaya penurunan dosis ekuivalen yang diterapkan baik pada PLTN BWR maupun PWR yang meliputi beberapa item berikut: *crud reduction, decontamination, shielding, automatization and remote operation*, dan perbaikan berbagai komponen.³⁾

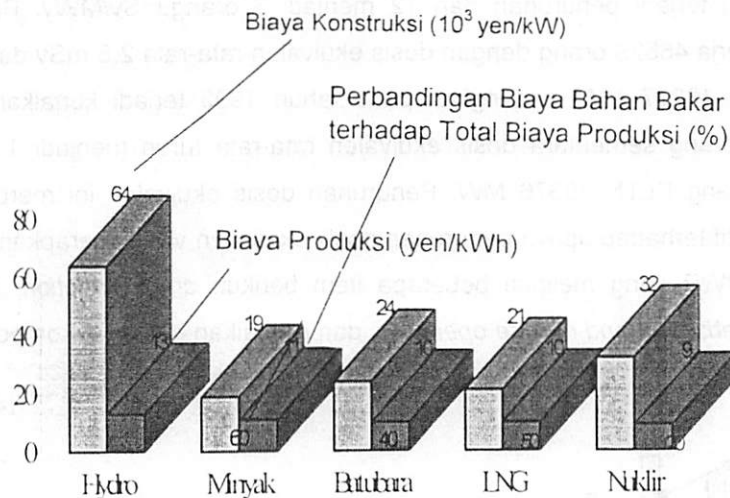


Gambar 4. Total Dosis Ekuivalen PLTN PWR dan BWR (1983 – 1993)
Sumber : NUPEC, 1998

IV. 2. Aspek Ekonomi

Seperti disebutkan di depan bahwa komposisi sumber tenaga pembangkitan listrik di Jepang terdiri dari panas bumi, air, minyak, batubara, gas alam, dan nuklir. Gambar 5

menunjukkan hasil studi biaya produksi listrik yang dilakukan oleh Kementerian Industri Perdagangan Internasional (MITI) tahun 1994, dengan menggunakan beberapa asumsi dasar sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Gambar 5 menunjukkan bahwa biaya produksi listrik pada PLTN menduduki posisi terendah, yaitu 9 yen/kWh. Biaya tersebut sudah memperhitungkan biaya siklus bahan bakar, biaya *decommissioning*, serta biaya pengolahan dan pembuangan limbah radioaktif. Sementara biaya produksi pada PLTA paling tinggi, yaitu 13 yen/kWh. Dalam kaitan dengan pangsa biaya bahan bakar terhadap biaya produksi, PLT minyak menduduki angka tertinggi, yaitu 60%, sementara tenaga nuklir hanya 20% (termasuk di dalamnya 10% biaya pembelian Uranium diperkaya).⁸⁾



Gambar 5. Biaya Produksi Listrik Tahun 1994
Sumber : MITI, 1996 (diolah ulang)

Tabel1. Beberapa Asumsi Dasar dalam Studi Biaya Produksi Listrik oleh MITI Tahun 1994⁸⁾

Parameter	PLT Air	PLT Minyak	PLT Batubara	PLT Gas	PLT Nuklir
Faktor Kapasitas (%)	45	70	70	70	70
Daya (MWe)	10-40	600 (4 unit)	600 (4 unit)	600 (4 unit)	1.100 (4 unit)
Umur operasi legal (tahun)	40	15	15	15	16

Catatan: Nilai tukar: 124,8 yen/dollar Amerika (antar bank tahun 1994)

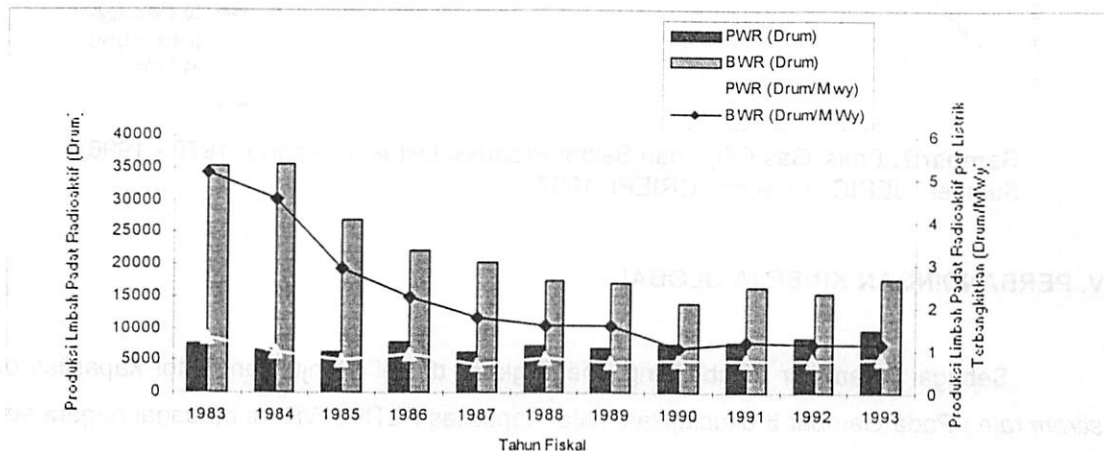
Sumber : MITI, 1996

IV. 3. Aspek Lingkungan

IV. 3. 1. Produksi Limbah Padat Radioaktif (drum/MWy)

Kecenderungan produksi limbah radioaktif padat dalam satuan m³ /unit PLTN ditunjukkan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar tersebut, pada awalnya BWR memproduksi

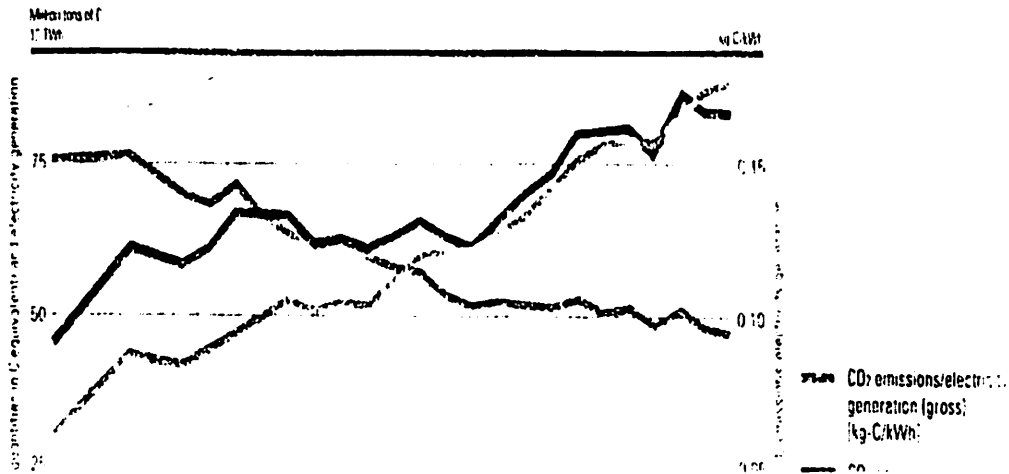
limbah relatif lebih banyak dibanding PWR. Namun dalam beberapa tahun terakhir ini produksi limbah padat kedua PLTN tersebut menunjukkan kecenderungan yang menurun sampai pada level 100 m³ untuk tiap PLTN. Menurunnya produksi limbah padat ini sebagai hasil dari langkah-langkah berikut: penggunaan pemadatan dengan bitumen dan plastik untuk mengkonsentrasikan limbah cair dan resin buangan, pembakaran limbah padat di dalam *incinerator* sebagai pengganti teknik pemadatan limbah di dalam drum, penggunaan teknik reduksi volume limbah dengan sistem pres, penggunaan *incinerator* suhu tinggi untuk membakar dan melelehkan beton, dan penggunaan insulator.³⁾



Gambar 6. Produksi Limbah Padat Radioaktif (1983 – 1993)
Sumber : CRIEPI, 1998

IV. 3. 2. Emisi Gas CO₂

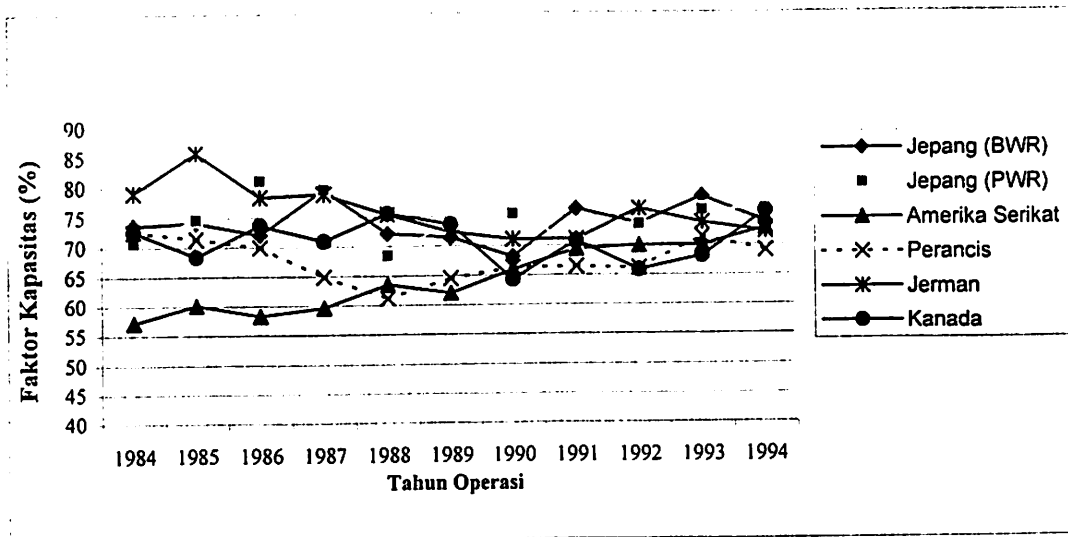
Pihak industri listrik di Jepang menyadari bahwa kegiatan produksi listrik menghasilkan kira-kira seperempat dari total produksi CO₂ nasional. Inisiatif untuk mengatasi masalah ini telah dimulai pada 1988, yang meliputi tiga langkah utama, yaitu: pencegahan produksi, penghilangan emisi, dan langkah institusional. Dalam hal ini, penggabungan berbagai sumber tenaga listrik yang dapat memberikan solusi keseluruhan yang optimal dari segi keamanan pasok, ekonomi, efisiensi, dan perlindungan lingkungan merupakan kebijakan yang perlu ditempuh. Pengoperasian PLTN merupakan salah satu konsekuensi dari kebijakan ini. Sebagai hasilnya, selama tahun 1970-1996, walaupun produksi listrik meningkat lebih dari 330% dari 300 TWh menjadi 1009,3 TWh, kenaikan emisi CO₂ dari sektor tenaga listrik berhasil ditekan sebesar 182% yaitu dari 45 juta ton setara karbon menjadi 80 juta ton setara karbon dengan menurunkan tingkat emisi CO₂ dari 0,15 kg-karbon/kWh menjadi 0,09 kg-karbon/kWh. Besarnya emisi gas CO₂ dari berbagai fasilitas pembangkit listrik ditunjukkan pada Gambar 7, yang merupakan hasil estimasi dari Pusat Riset Industri dan Kelistrikan Jepang (CRIEPI) tahun 1997.^{4, 9)}



Gambar 7. Emisi Gas CO₂ dari Sektor Produksi Listrik di Jepang (1970 - 1996)⁴⁾
 Sumber : JEPIC, 1999 dan CRIEPI, 1997

V. PERBANDINGAN KINERJA GLOBAL

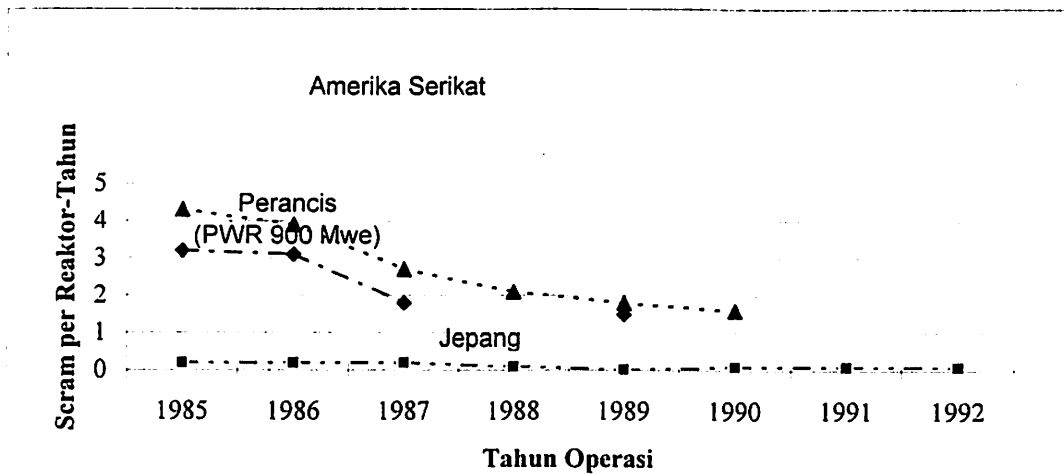
Sebagai parameter perbandingan kinerja global di sini ditunjukkan faktor kapasitas dan *scram rate*. Pada Gambar 8 ditunjukkan faktor kapasitas PLTN LWR di berbagai negara serta PLTN PHWR CANDU di Canada selama periode operasi 1984 sampai 1994.⁵⁾ Sedangkan pada gambar 9 ditunjukkan *scram rate* dari PLTN di berbagai negara.⁷⁾



Gambar 8. Faktor Kapasitas PLTN LWR di Berbagai Negara
 Sumber : NUPEC, 1998

Analisis terhadap Gambar 8 menunjukkan bahwa selama kurun waktu 1984 sampai 1994, bila diperhatikan nilai tertinggi dan nilai rata-rata faktor kapasitasnya, maka PLTN BWR produksi Jepang telah mencapai kinerja tertinggi yaitu dengan faktor kapasitas 78,1% (tahun 1993) dan rata-rata 74,8%, lebih tinggi dibanding PLTN PWR produksi Jepang yaitu 81,1% (tahun 1994) dan rata-rata 74,4% maupun PLTN LWR produksi Amerika yaitu 72,8% (tahun

1994) dengan rata-rata 65,4% maupun Perancis yaitu 72,6% (tahun 1984) dengan rata-rata 68,0% bahkan mengungguli PHWR CANDU yang menggunakan *on-load refueling* yaitu 84,6% (tahun 1994) dengan rata-rata 70,7%.



Gambar 9. Scram Rate di Beberapa Negara Tahun 1985-1992.
Sumber : TEPCO, 1993 dan NUPEC, 1998

Berkaitan dengan *scram rate*, seperti ditunjukkan pada Gambar 9, selama tahun operasi 1985-1992 *scram rate* pada PLTN LWR Jepang berhasil dipertahankan antara 0,2 - 0,1 kali/reaktor-tahun, jauh di bawah PLTN LWR Amerika (4,3 - 1,6 kali/reaktor tahun) dan PLTN Perancis (3,2-1,5 kali/reaktor tahun)). Hal ini menunjukkan bahwa keandalan operasi PLTN LWR Jepang lebih tinggi dibanding kedua negara tersebut.

Prestasi PLTN produk Jepang ini merupakan hasil dari Program "Perbaikan dan Standardisasi LWR" yang dimulai sejak tahun 1975, yang meliputi peningkatan keandalan, faktor kapasitas, pemendekan waktu inspeksi periodik, dan pengurangan paparan radiasi pekerja. Program peningkatan faktor kapasitas ditempuh melalui penggunaan material tahan terhadap gejala SCC, perbaikan pada pembangkit uap, perbaikan sistem penggerak batang kendali, dan perbaikan pada desain bahan bakar, dll.

VI. KESIMPULAN

Dari analisis data kinerja operasi PLTN LWR di Jepang selama beberapa tahun terakhir ini secara umum dapat disimpulkan bahwa kinerja operasi PLTN LWR di Jepang pada periode tersebut sangat tinggi, aman, andal, kompetitif, dan ramah lingkungan. Dari segi teknis dan keselamatan, PLTN LWR tersebut telah mencapai faktor kapasitas lebih dari 75% dan *scram rate* berhasil dipertahankan di bawah 0,2-0,6 kali per reaktor-tahun. Prestasi ini bahkan melampaui prestasi PLTN berbagai jenis yang dioperasikan di berbagai negara maju. Kinerja yang sangat tinggi ini merupakan hasil implementasi dari Program "Perbaikan dan

Standardisasi LWR" yang diterapkan baik pada PLTN PWR maupun BWR, dan yang dilaksanakan secara konsisten dan berkesinambungan sejak tahun 1975 sampai 1985, yang meliputi peningkatan keandalan, faktor kapasitas, pemendekan waktu inspeksi periodik, dan pengurangan paparan radiasi pekerja. Dalam hal jumlah events, berhasil dipertahankan pada level 0.3 - 0.6 per unit pertahun. Sedangkan untuk dosis ekuivalen rata-rata berhasil ditekan pada level di bawah 2 orang - Sv/unit. Dari segi ekonomi, PTLN menghasilkan listrik dengan biaya produksi termurah, yaitu 9 Yen per kWh sehingga tenaga nuklir merupakan sumber energi listrik yang sangat kompetitif. Dari segi kebersihan lingkungan, jumlah produksi limbah radioaktif padat juga menunjukkan kecenderungan yang menurun, yaitu . dari sekitar 500 m³ per unit pada tahun 1983 menjadi sekitar 100 m³ per unit pada tahun 1995. Tenaga nuklir juga telah memberikan kontribusi terhadap penurunan jumlah emisi gas CO₂ dari sektor pembangkitan listrik. Hal ini terlihat dari turunnya tingkat emisi CO₂ dari 0,15 kg-karbon/kWh menjadi 0,09 kg-karbon/kWh selama 1970 – 1996 sehingga meskipun emisi listrik meningkat lebih dari 330%, emisi CO₂ hanya meningkat 182 %.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, Power Reactor and Information System, Vienna, 1998
2. Laporan Studi Tapak dan Studi Kelayakan, Jakarta, 1995.
3. CRIEPI, Nuclear Power Station in Japan , edisi 1997, Tokyo, 1998.
4. JEPIC, Electric Power Industry in Japan 1998/1999, Tokyo, 1999
5. NUPEC, Nuclear Power Generation In Japan, September 1995, Tokyo, 1998.
6. PERSHAGEN, B., Light Water Reactor Safety, Pergamnon Press plc., New York, 1989.
7. TEPCO, TEPCO Nuclear Power Plants, Tokyo, 1993.
8. MITI, Nuclear Power Generation - Necessity and Safety, Tokyo, 1996.
9. CRIEPI Report No. 3, March 1997, Tokyo, 1997.