

KAJIAN KESELAMATAN NUKLIR DALAM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

TJIPTA SUHAEMI, ITJEU KARLIANA

*Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15310, Banten
Telp, 021.7560912, Faks. 7560913*

Abstrak

IMPLEMENTASI KESELAMATAN NUKLIR DALAM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR.

Akhir-akhir ini krisis pasokan listrik di Indonesia sudah sangat sering terjadi, ditambah lagi dengan kenaikan harga minyak mentah dunia yang sudah di luar kemampuan, membuat Indonesia kelimpungan dalam memenuhi kebutuhan energi. Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu opsi yang ditawarkan untuk memenuhi kebutuhan energi yang meningkat di Indonesia. Namun masyarakat sangat khawatir terhadap keselamatan PLTN serta menolak pembangunan PLTN di Indonesia, padahal teknologi PLTN di dunia telah mencapai kedewasaannya sehingga tingkat keselamatan PLTN lebih tinggi. Pada makalah ini dibahas bagaimana aspek keselamatan diimplementasikan dalam desain dan pengoperasian, sehingga PLTN layak dijadikan opsi untuk pemenuhan kebutuhan energi dan listrik di Indonesia. PLTN telah didesain untuk dapat dioperasikan dengan aman dan selamat. Untuk meningkatkan kepercayaan dan diterimanya kehadiran PLTN oleh masyarakat dunia, maka dikembangkan pula desain PLTN mutakhir seperti PLTN jenis ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) dan PLTN jenis ACR (Advanced CANDU Reactor). Kedua jenis PLTN ini mempunyai tingkat keselamatan yang lebih tinggi dan teknologi yang mapan. Masyarakat tidak perlu mengkhawatirkan pembangunan PLTN di Indonesia, sebab desain PLTN cukup aman dan andal. Selain itu dalam menyongsong pembangunan PLTN, sosialisasi kepada masyarakat perlu dilakukan secara terus menerus, serta penyiapan SDM yang berkualitas mutlak sangat diperlukan.

Kata kunci : ABWR, ACR, keselamatan, nuklir, PLTN

Abstract

IMPLEMENTATION OF NUCLEAR SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANT. Currently the lack of electric energy supplies are almost existing all the year in Indonesia, and accompanied by the increasing of world oil prices, making Indonesia has to work hard for overcoming the energy needs. Development of nuclear power plant (NPP) is one option offered to follow the increased energy demand in Indonesia. The public people are aware to safety of NPP, while the NPP technology in the world has obtained maturity such that making the safety grade be higher. This paper discusses how the safety of NPP is implemented in design and operation, and the NPP development must be conducted for fulfilment of energy demand in Indonesia. The nuclear power plants are designed to be safe in their operation and safe in the event of any malfunction or accident. To improve the acceptance of nuclear power plant for public in the world, the advanced nuclear power plants has been developed, i.e. Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) and Advanced CANDU Reactor (ACR). Both of the NPP's have high reliability and proven technology. The public people can be assured that the development of nuclear power plant in Indonesia will be safe and reliable. To embark the development of nuclear power plant, socialization of nuclear power plant should be continuously conducted, and qualified manpower is essential and should be well performed..

Keywords : ABWR, ACR, Energy, safety, nuclear, nuclear power plant (NPP)

PENDAHULUAN

Energi mempunyai peranan penting dalam pencapaian tujuan sosial, ekonomi dan lingkungan untuk pembangunan berkelanjutan serta merupakan pendukung bagi kegiatan ekonomi nasional. Penggunaan energi di Indonesia meningkat pesat sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan pertambahan penduduk. Kebutuhan sumber energi yang cukup besar untuk keperluan pembangunan, tidak hanya untuk memproduksi dan mendistribusikan barang kebutuhan hidup sehari-hari tetapi juga untuk membangun industri yang meningkatkan kesejahteraan masyarakat dan bangsa.

Pada tahun-tahun terakhir ini krisis pasokan listrik di Indonesia sudah sangat sering terjadi. Jika tidak segera diatasi, krisis energi ini akan semakin parah dan bisa berimbas kepada sektor-sektor pembangunan dan ekonomi lainnya. Begitu pula telah disadari bahwa Indonesia bukan lagi negara yang mengekspor minyak, tetapi telah menjadi pengimpor minyak, sebab kebutuhan dalam negeri telah melebihi produktivitas minyak. Selain itu, ketergantungan pembangkit listrik pada minyak bumi mengakibatkan pembengkakan subsidi yang luar biasa besar saat ini mengingat kenaikan harga minyak dunia sudah di luar kemampuan kita untuk memprediksinya. Untuk mendukung program energi dan mengingat sumber daya migas yang terbatas dan kondisi sumber energi Indonesia yang ada dewasa ini, salah satu opsi yang ditawarkan adalah memilih pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Namun menanggapi rencana pembangunan PLTN, pada media massa banyak ditemukan artikel-artikel dari masyarakat yang tidak setuju pada pembangunan PLTN. Alasan yang ditampilkan adalah masih banyak alternatif energi lain seperti air, matahari, panas bumi, gas alam, dan batu bara. Alasan lain adalah ketakutan terhadap radiasi nuklir yang masih menjadi trauma masyarakat dunia akibat dahsyatnya dampak bom atom di Hiroshima dan Nagasaki yang dibom atom oleh Amerika Serikat dalam perang dunia kedua. Tragedi di kedua kota penting itu senantiasa menjadi alasan klasik adanya kekhawatiran orang-orang terhadap pemanfaatan energi nuklir apapun juga bentuknya.

Pada desain maupun pengoperasian suatu PLTN, aspek keselamatan merupakan prioritas utama sehingga harus dilakukan evaluasi dan pengembangan secara terus menerus. Filosofi dasar keselamatan nuklir yang dianjurkan oleh *International Atomic Energy Agency (IAEA)* mempunyai tujuan utama yaitu untuk melindungi pekerja, masyarakat dan lingkungan dari dampak berbahaya dari radiasi. Berbagai macam metoda dikembangkan untuk menilai kelemahan desain, mulai dari perhitungan deterministik, simulasi atau pengamatan eksperimental, sampai dengan penilaian secara probabilistik. Semua metoda ini digunakan dalam menilai desain suatu reaktor nuklir baik untuk penelitian atau pembangkit listrik. Berdasarkan kriteria keselamatan, desain PLTN mengantisipasi kondisi operasi dari kejadian abnormal sampai kecelakaan terparah. Untuk menjamin fasilitas dioperasikan dan aktivitas dilaksanakan sedemikian sehingga mencapai standar keselamatan yang tinggi, maka tindakan-tindakan yang harus diambil :

1. Mengendalikan paparan radiasi terhadap manusia dan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan.
2. Melarang kejadian yang sekiranya akan menuju kegagalan kendali terhadap teras reaktor nuklir, reaksi nuklir berantai, sumber radioaktif atau sumber radiasi lainnya.
3. Memitigasi konsekuensi dari setiap kejadian bila kejadian tersebut terjadi^[1,2].

Berdasarkan tujuan umum dan khusus keselamatan nuklir, maka dibuat kriteria desain umum PLTN dengan menggunakan prinsip keandalan yang tinggi, yang dapat menjamin bahwa kegagalan salah satu komponen/sistem tidak akan menyebabkan sistem keselamatan tidak bekerja. Fungsi keselamatan mensyaratkan bahwa untuk mencapai keselamatan yang memadai maka hal yang penting adalah memasukkan aspek keselamatan sebagai elemen yang melekat dalam proses desain keseluruhan. Karakteristik desain keselamatan dan pengoperasian PLTN antara lain : sistem dan komponen PLTN harus mempunyai kualitas dan keandalan yang tinggi dan dapat dioperasikan selama masa hidup instalasi.; semua fungsi keselamatan dari struktur, sistem dan komponen harus berfungsi berdasarkan peranannya masing-masing untuk ternjamin nya keselamatan. Beberapa asas yang

digunakan adalah asas *redundancy*, keragaman (*diversity*), kegagalan tunggal, independen, *fail safe*. Perpindahan panas ke suatu penampung panas akhir mensyaratkan bahwa tersedia suatu sistem yang mengambil panas sisa dari struktur, sistem dan komponen yang penting untuk keselamatan^[3,4,5].

Dalam makalah ini dicoba untuk dikaji segi-segi keselamatan dari suatu pembangkit listrik tenaga nuklir, filosofi keselamatan nuklir yang dianut saat ini dan seberapa jauh implementasinya pada pemanfaatan energi nuklir untuk membangkitkan energi nuklir dengan aman dan selamat. Ditinjau pula bagaimana konsep inovasi PLTN mutakhir diimplementasikan dalam desain PLTN maju. Pembahasan terutama dititikberatkan pada pengembangan PLTN maju jenis ABWR dan ACR-700.

Reaktor ABWR dan ACR merupakan inovasi PLTN maju untuk mencapai tingkat keselamatan yang lebih tinggi. Reaktor ABWR merupakan PLTN jenis BWR dimana penggunaan uap secara langsung dari sistem primer dialirkan langsung ke turbin generator. PLTN jenis ABWR merupakan PLTN maju berkapasitas besar (1350 MWe) pertama di dunia yang dibangun di Jepang, dan telah menunjukkan keandalannya yang tinggi.

Reaktor ACR-700 merupakan pengembangan dari desain reaktor PHWR jenis CANDU yang telah terbukti keandalannya. Pada reaktor ACR, air berat digunakan sebagai moderator dan air ringan digunakan sebagai pendingin, sedangkan reaktor CANDU-6 dan reaktor CANDU lainnya menggunakan air berat baik sebagai moderator maupun pendingin. PLTN CANDU menggunakan uranium alam dan tidak memerlukan proses pengkayaan (*enrichment*) lebih lanjut.

Bagi masyarakat Indonesia tentunya tidak perlu mengkhawatirkan pembangunan PLTN di Indonesia. Prinsip dan aspek keselamatan untuk menjamin pengoperasian PLTN yang aman dan selamat telah diimplementasikan pada desain PLTN. Desain PLTN mutakhir seperti ABWR dan ACR telah memberikan bukti keandalan yang tinggi. Selain itu bagi Indonesia yang sedang menyongsong pembangunan PLTN pertama di Indonesia, diperlukan upaya yang kuat untuk dapat melaksanakannya. Disampaikan pula dalam makalah ini beberapa pertimbangan untuk lebih

menyiapkan infrastruktur dan penyiapan SDM nuklir.

METODOLOGI

Metoda yang digunakan dalam kajian ini adalah dengan melakukan penelusuran pustaka, pengumpulan data sekunder, dan melakukan analisis perbandingan keselamatan dari PLTN yang diacu, dalam hal ini adalah pembangkit listrik tenaga nuklir jenis *Advanced Boiler Water Reactor* (ABWR) dan *Advanced CANDU Reactor* (ACR).

Jenis dan Karakteristik PLTN

Penggunaan energi nuklir di dunia yang dimulai pada tahun 1955 sampai sekarang terus meningkat menjadi 435 buah pada akhir tahun 2006. Gambaran kondisi PLTN di dunia baik dari segi jumlah dan jenis teknologinya disajikan pada Tabel 1. Dari data tersebut terlihat bahwa dari 435 unit PLTN yang beroperasi, yang terbanyak adalah jenis PWR sebanyak 264 unit (61%), sedangkan BWR sebanyak 93 unit (21%) dan PHWR sebanyak 42 unit (9,7%)^[6].

Tabel 1. PLTN yang Beroperasi Di Dunia^[6]

Jenis	Jumlah PLTN, status 31 Desember 2006		
	Beroperasi	Sedang dibangun	<i>Shutdown</i> Permanen
BWR	93	2	1
FBR	2	2	1
GCR	18	-	--
HTGR	-	-	-
HWGCR	-	-	-
HWLWR	-	-	-
LWGR	16	1	-
PHWR	42	18	-
PWR	264	6	4
SGHWR	-	-	-
Jenis lain	-	-	-
Total	435	29	6

Keterangan :

BWR : *Boiling Light Water and Moderated Reactor*, FBR : *Fast Breeder Reactor*, GCR : *Gas Cooled Graphite Moderated Reactor*, HTGR: *High Temperature Gas Cooled; Graphite Moderated Reactor*, HWGCR: *Heavy Water Moderated, Gas Cooled Reactor*, HWLWR : *Heavy Water Moderated, Boiling Light Water Cooled Reactor*, LWGR: *Light Water Cooled, Graphite Moderated Reactor*, PHWR: *Pressurized*

Heavy Water Moderated and Cooled Reactor, PWR : Pressurized Light Water Moderated and Cooled Reactor, SGHWR : Steam Generating Heavy Water Reactor.

Komponen utama PLTN adalah bahan bakar, moderator dan pendingin, sistem pembangkit uap, sistem keselamatan. Kombinasi dari komponen-komponen tersebut melahirkan variasi dari desain PLTN. Dewasa ini hanya tiga jenis PLTN yang menjadi perhatian dan dibangun secara komersial., yaitu jenis PWR, BWR dan PHWR. Jenis PLTN ini mempunyai keunggulan/kelebihan masing-masing, namun unsur-unsur kunci dan desain keseluruhan dari berbagai jenis PLTN itu pada umumnya adalah sama, misalnya bangunan turbin, generator, fasilitas perawatan, fasilitas administrasi, rumah pompa, dan struktur pendukung reaktor.

PLTN jenis PWR adalah jenis PLTN yang menggunakan air ringan (H_2O) sebagai moderator dan pendingin. PLTN jenis PWR menjaga agar pada siklus primer yaitu siklus pendingin menuju pembangkit uap dan kembali lagi ke teras reaktor, dijaga agar tidak mendidih. Pada siklus sekunder terjadi perubahan fase pendingin dari air, diubah menjadi uap yang memutar turbin dan selanjutnya diubah lagi menjadi air dengan pendinginan. Air hasil pendinginan ini kemudian diumpankan kembali ke pembangkit uap. Siklus pendingin yang mengubah uap yang turun dari turbin ini adalah pendingin tersier atau siklus pendingin yang ketiga. Peran pendingin pada siklus ini adalah kondenser. Kondenser mengubah uap menjadi air dengan pendingin.

Reaktor BWR sama seperti PWR yaitu mengandung teras dengan pendingin dan moderator menggunakan air ringan, namun tanpa sisi sekunder. Pendingin air mengalami pendidihan dalam bejana reaktor. Pada reaktor BWR, uap jenuh ditimbulkan di dalam reaktor, kemudian uap ini dikeringkan dan langsung dikirim ke turbin uap. Sistem ini mengatasi masalah besar dan mahal nya pembangkit generator uap sekunder. Ukuran teras dan bejana tekan pada BWR lebih besar dibandingkan PWR. Karena bagian atas bejana tekan digunakan untuk meletakkan pemisah uap dengan cairan pendingin, maka batang kendali

dimasukkan dari bawah dan digerakkan secara hidraulik.

PLTN PHWR merupakan PLTN yang menggunakan uranium alam sebagai bahan bakar dan air berat sebagai moderator dan fluida pendingin. Tidak ada perbedaan prinsip antara PWR yang menggunakan air ringan untuk pendingin dengan PLTN PHWR yang menggunakan air berat, kecuali dalam beberapa aspek di dalam desain teras reaktor dan teknologi keselamatan. Pada reaktor CANDU digunakan 2 macam sistem pemadaman (*shutdown*) yang berbeda jenis maupun lokasinya, digunakan pula *on power refuelling*, desain bundel bahan bakar sederhana yang mudah difabrikasi, dan sistem pendingin reaktor yang bebas dari kontrol reaktivitas secara kimia. PHWR mempunyai keandalan yang tinggi, karena faktor ketersediaan (*availability factor*) dan faktor kapasitas (*capacity factor*) yang tinggi.

Desain Mutakhir

Untuk meningkatkan kepercayaan dan diterimanya kehadiran PLTN oleh masyarakat, maka PLTN yang akan dibangun di masa mendatang haruslah memenuhi persyaratan dan mempunyai tingkat keselamatan yang lebih tinggi serta dapat bersaing secara ekonomis. PLTN tersebut merupakan PLTN Maju (*advanced nuclear power plants*). Ada empat parameter yang menjadi dasar pertimbangan dalam melakukan desain PLTN. Parameter pertama adalah keselaatan (*safety*), kedua adalah keandalan (*reliability*), ketiga adalah perawatan (*maintainability*), dan keempat adalah biaya (*cost*) Dengan demikian dapat diketahui bahwa kriteria pokok untuk PLTN Generasi Maju antara lain keunggulan teknis, aman dan akrab dengan pemakai (*user-friendly*), efisien, kompatibel/sesuai dengan lingkungan dan andal, keuntungan ekonomi, dapat bersaing dengan pembangkit listrik lain, pertimbangan biaya operasi dan perawatan, proteksi investasi, jadwal pembangunan yang realistis dan dapat dikendalikan, ketersediaan instalasi (*plant availability*). Perubahan yang menyolok dari desain PLTN maju adalah digunakannya sistem keselamatan inheren atau pasif yang tidak memerlukan intervensi maupun kontrol aktif untuk mencegah timbulnya kecelakaan dalam hal terjadinya malfungsi sistem maupun pengoperasian. Pengembangan

PLTN tersebut antara lain : ABWR oleh Jepang dan Amerika Serikat, OPR 1000 dan APR 1400 oleh Korea Selatan, PHWR CANDU dengan desain ACR-700 dan ACR-1000 oleh Kanada, reaktor EPR di Eropa..

Desain ABWR adalah merupakan pengembangan dari jenis BWR. Perbedaan konfigurasi dan spesifikasi umum antara ABWR dan BWR diberikan pada Tabel 2. PLTN ACR (*Advanced CANDU Reactor*) adalah merupakan pengembangan dari desain

reaktor CANDU-6 yang telah terbukti keandalannya. Salah satu inovasi reaktor ACR-700 yang dikembangkan dari desain reaktor CANDU-6 adalah pada air berat yang digunakan. Pada reaktor ACR-700, air berat digunakan sebagai moderator dan air ringan digunakan sebagai pendingin. Sedangkan pada reaktor terdahulu air berat digunakan sebagai moderator maupun sebagai pendingin. Konfigurasi dan spesifikasi umum antara CANDU-6 dan ACR diberikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Perbandingan Konfigurasi dan Spesifikasi Sistem^[7,8,9]

No.	Sistem	BWR-6	ABWR
1.	Daya listrik (MWe)	1100	1350
2.	Daya termal (MWth)	3293	3926
3.	Tekanan reaktor (kg/cm ²)	71,7	73,1
4.	Aliran uap (ton/jam)	6,41	7,48
5.	Suhu air umpan °C	215	215
6.	Aliran dalam teras (kg/jam)	48 x 10 ⁶	52 x 10 ⁶
7.	Jumlah perangkat bahan bakar	764	872
8.	Jumlah batang kendali	185	205
9.	Rapat daya teras rerata (kw/liter)	50,0	50,6
10.	Bejana tekan , diameter (m)	6,4	7,1
	Tinggi (m)	22,2	21,0
11.	Resirkulasi pendingin (jumlah pompa)	Pompa resirkulasi eksternal (2) <i>Jet pump</i> (2)	Pompa internal (1)
12.	Penggerak batang kendali		
	Normal	<i>Hydraulic locking piston drive</i>	<i>Fine motion electric motor drive (FMEMD)</i>
	<i>Scram</i>	<i>Hydraulic piston drive</i>	<i>Hydraulic piston drive electric motor sebagai back up</i>
13.	Sistem pendingin teras darurat	Div I. LPCI+LPCS Div II. LPCI+LPCI Div III. HPCS	Div I. RCIC+LPFL (RHR) Div II. HCPS+LPFL (RHR) Div III. HCPS+LPFL (RHR)
14.	Sistem pemindah panas sisa	2 divisi	3 divisi
15.	Bejana pengungkung primer	<i>Self-standing steel containment</i>	<i>Reinforced concrete steel containment</i>
	Siklus turbin	TC 6F-41" (<i>non-reheat</i>)	TC 6F-52" (<i>2-stage reheaters</i>)

Tabel 3 . Perbandingan Karakteristik CANDU-6 dan ACR^[10,11,12]

No.	Sistem	CANDU-6	ACR-700
1.	Daya listrik (MWe)	728/666	731/661
2.	Daya termal (MWth)	2064	1982
3.	Jumlah kanal bahan bakar	380	284
4.	Diameter bejana calandria (m)	7.6	5,2
5.	Jenis pendingin/ suhu pendingin °C	D ₂ O /290	H ₂ O / (303)
6.	Jenis moderator/ suhu moderator °C	D ₂ O / 68	D ₂ O / 80
7.	Jumlah dan tipe elemen bakar tiap bundel	37 CANDU-6	43 tipe CANFLEX
8.	Tekanan keluar dari <i>header</i> (MPa)	10	12
9.	Tekanan masuk ke <i>header</i> (MPa)	11,3	13,2
10.	Tekanan keluar dari <i>header</i> (°C)	310	325
11.	Tekanan keluar ke <i>header</i> (°C)	266	276,5

PEMBAHASAN

Untuk meningkatkan keselamatan PLTN, berbagai instansi riset dan energi di berbagai negara melakukan inovasi dan pengembangan teknologi PLTN. Badan riset tenaga listrik Amerika Serikat yaitu EPRI (*Electric Power Research Institute*) mengeluarkan dokumen persyaratan untuk ALWR (*Advanced Light Water Reactor*) yang bertujuan antara lain : peningkatan keselamatan, pemantapan status dan optimalisasi regulasi, program standarisasi, pengurangan biaya modal/operasi/perawatan. Dalam pelaksanaannya generasi terbaru dari PLTN yang telah dilisensi di USA dan Jepang mempunyai desain yang dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan dan memitigasi kemungkinan terjadinya kecelakaan. Sebagai tolok ukur digunakan "core damage frequencies (CDI)" sebagai suatu parameter terjadinya kecelakaan. Peluang terjadinya kecelakaan yang menimbulkan kerusakan teras untuk PLTN maju adalah sangat kecil, hal ini disebabkan adanya simplifikasi desain, redundansi, dan diversifikasi sistem keselamatan, mitigasi terhadap kecelakaan parah. Proyek reaktor berteknologi maju jenis PWR (APWR-1350 MWe) dan BWR (ABWR 1350 MWe) merupakan contoh reaktor ukuran besar yang telah dilaksanakan dalam rangka kerjasama antara Jepang dan Amerika Serikat^[13,14].

Sedangkan Eropa mengeluarkan kriteria sebagai syarat-syarat desain untuk LWR (*Light Water Reactor*) di masa datang dengan mempertimbangkan pasar dan harmonisasi di lingkungan negara Eropa dan memenuhi standar dan regulasi Eropa. Diharapkan meningkatnya penerimaan masyarakat dan meningkatnya daya saing ekonomi. Di Perancis dikembangkan PWR model N-4 (1400 MWe) yang merupakan turunan langsung dari jenis P-4 yang telah distandarisasi (1300 MWe). Model tersebut dapat mengurangi biaya 5% per kilowatt terpasang dibanding seri P-4. Di Jerman, pembangkit Convoy merupakan reaktor PWR dengan ukuran standar 1300 MWe. Keunggulan Convoy terletak pada manajemen proyek dan rekayasa yang terkait dengan konstruksinya. Untuk memenuhi ambisi sebagai pembuat dan pemasok reaktor terkemuka di dunia, Perancis dan Jerman melalui perusahaan

Framatom dan Siemens melakukan kerjasama melalui program reaktor NPI (Nuclear Power International). Reaktor yang ingin didesain adalah proyek EPR (*European Pressurized Water Reactor*) dengan target yang ingin dicapai adalah reaktor yang tingkat keselamatannya lebih tinggi dibandingkan dengan tipe N4 (Perancis) maupun jenis Convoy (Jerman), dan mempunyai karakter akrab dengan lingkungan, mudah digunakan, desain lebih sederhana, ongkos daya lebih murah, *burnup* bahan bakar tinggi, dan efisiensi termal tinggi. Implementasi dari proyek PLTN EPR sedang dibangun di Oikiluoto-Finlandia, dan unit dua di Flamanville – Perancis^[15,16,17].

Perkembangan dan pembangunan energi nuklir di Korea Selatan sangat fantastis. Korea Selatan menunjukkan kesuksesan dalam program penyediaan energi melalui pembangunan PLTN. PLTN pertama kali diperkenalkan pada tahun 1978, dewasa ini sudah mencapai 20 buah PLTN dengan kapasitas 17.716 MWe atau 27% dari total energi listrik. Korea Selatan sudah mempunyai kemampuan membangun PLTN dengan kemampuan sendiri. Kesuksesan Korea dipicu oleh adanya organisasi proyek nuklir yang efektif, pendekatan teknologi secara bertahap langkah demi langkah, dan partisipasi nasional dalam mendukung pembangunan dan pengembangan energi nuklir. Korea sedang mengembangkan desain reaktor OPR-1000 berkapasitas 1000 MWe (jenis PWR). Desain ini mempunyai spesifikasi umur 40 tahun, desain seismik 0,2 g, CDF < 10⁻⁵/RY, fleksibilitas dalam pengoperasian, peningkatan keselamatan, dan optimasi keekonomian. Juga sedang direncanakan proyek pengembangan APR 1400 (*Advanced Power Reactor*) dengan daya 1400 MWe. Reaktor APR 1400 diharapkan dapat bersaing dalam biaya, peningkatan fleksibilitas operasi dan peningkatan keselamatan, umur reactor 60 tahun, desain seismik 0,3 g, dan CDF < 10⁻⁵/RY^[18,19].

ABWR

Proyek reaktor berteknologi maju dan berukuran besar yang pertama diimplementasikan pada pembangunan Reaktor Kashiwazaki-Kariwa unit 6 dan 7 di Jepang dan dioperasikan pada tahun 1996 dan 1997. Reaktor ini adalah reaktor jenis ABWR (1356

MWe). Seluruh sistem reaktor ABWR ini mengalami peningkatan teknologi dan prosedur operasional, kinerja dan burnup yang lebih baik, *interface* manusia-mesin dengan komputer dan peningkatan latihan dengan simulator. Reaktor ini merupakan PLTN mutakhir dan modern pertama di dunia yang mempunyai kapasitas listrik netto yang tertinggi. Reaktor ABWR ini menggunakan sistem resirkulasi dengan pompa internal, mekanisme penggerakan batang kendali yang baik, tiga sistem pendinginan darurat, dan bejana pengungkung beton. Dengan desain ini diperoleh faktor ketersediaan yang meningkat, keselamatan yang lebih tinggi, reaktor yang lebih kompak dan mudah digunakan, dan sistem turbin yang efisien. Lihat Tabel 2 dan Tabel 4^[7,8,9].

Evolusi desain teras BWR dimulai dengan desain BWR-1. Kemudian evolusi BWR-1 menjadi BWR-2 dengan meningkatkan sistem siklus ganda menjadi siklus langsung (*direct cycle*), sehingga dengan desain ini dapat memperkecil kegagalan dan meningkatkan angka keselamatan serta menekan biaya komponen.

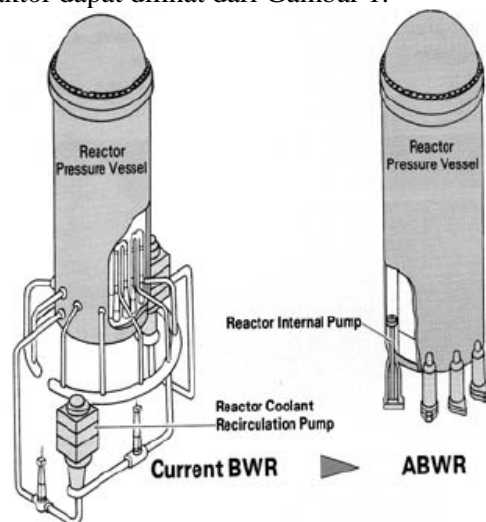
Kemudian sistem pendinginan teras darurat diubah dengan mempercepat kecepatan panas bahan bakar dengan mengganti injeksi pompa biasa menjadi sistem injeksi pompa jet (*jet-pump*) yang ditempatkan di antara *core shroud support* dan permukaan dalam bejana didih. Desain ini dinamakan BWR-3.

Kemudian ditingkatkan lagi menjadi BWR-4. Perubahan dilaksanakan dengan mengubah rapat daya teras dengan mengubah tipe bundel bahan bakar dari 40,74 kW/liter menjadi 49,16 kW/liter (model P/BP8x5R) selanjutnya ditingkatkan lagi menjadi 50,15 kW/liter (model GE4), dan 50,5 kW/liter (model GE5) dengan mengubah tipe bundel bahan bakar.

Kemudian BWR-4 menjadi BWR-5 dengan meningkatkan keselamatan pendingin teras darurat dan pemasangan instalasi *komponen valve flow control* pada sistem resirkulasi. Kemudian menjadi BWR-6 dengan peningkatan *jet-pump*, pemisah uap dan sistem ECCS, dan perubahan desain bundel bahan bakar.

Evolusi dalam hal sistem pembangkit uap nuklir, evolusi yang dilaksanakan dapat dijelaskan sebagai berikut. Sistem sirkulasi

pendingin reaktor ABWR mengadopsi pompa internal berjenis motor basah tanpa menggunakan *shaft seal*. Pompa resirkulasi pendingin reaktor pada desain sebelumnya terletak di luar bejana tekan (*reactor pressure vessel*, RPV), pada desain BWR dipasang di dalam bejana. Hal ini membuat berkurangnya pemipaan eksternal di luar bejana, yang tentunya memberikan peningkatan terhadap keselamatan dan pengoperasian reaktor. Teras reaktor akan tertutup dan terselubungi dengan air dalam hal terjadinya kejadian *loss of coolant accident* (LOCA). Pusat gravitasi ABWR akan menjadi lebih rendah dibandingkan BWR, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap gempa. Gambaran tentang pompa internal reaktor dapat dilihat dari Gambar 1.



Gambar 1. Pompa Internal Reaktor^[7]

Sistem penggerak batang kendali menggunakan sistem *fine motion control rod drive* (FMCRD). ABWR mengombinasikan fungsi FMCRD dimana dapat menggerakkan batang kendali menggunakan motor listrik sebagai tambahan terhadap penggerak piston secara hidrolik. Beberapa keuntungan antara lain adalah penggunaan kontrol secara lebih baik dan lebih mudah, memberikan kontribusi terhadap integrasi bahan bakar, dan waktu *start-up* lebih pendek dengan pengoperasian otomatis. Sistem hidrolik dioptimalkan dan disederhanakan dengan digunakannya 2 buah CRDM/akumulator dan mengeliminir sistem penonaktifan *scram*. (*scram discharge system*). Keandalan ditingkatkan dengan digunakannya diversifikasi dan redundansi metoda CRD, mekanisme pendeteksian secara penuh dan

Tabel 4. Evolusi Desain Beberapa Sistem BWR-6 dan ABWR

No.	Sistem	BWR-6	ABWR
1.	Sirkulasi air pendingin	Pompa sirkulasi di luar bejana tekan	Pompa sirkulasi di dalam bejana tekan tidak ada pipa resirkulasi bocor sebelum gagal
2.	Pendinginan teras tekanan tinggi	HPCS (<i>high pressure core system</i>) Pompa yang digerakkan motor (<i>motor-driven pump</i>) tergantung pada daya listrik AC HCPS RCIC pompa digerakkan turbin (<i>turbine-driven pump</i>) LPCI- pompa 3 MD	Sistem HPCF (<i>high pressure core flooder</i>) berdasar <i>motor driven pump</i> Tergantung pada daya AC-DC Sistem RCIC berdasar <i>turbin driven pump</i> untuk mengatasi transient dan LOCA (daya DC)
3.	Pendinginan teras tekanan rendah	SEHR (sistem pemindah panas) ada 2 pompa yang berkapasitas sama dengan pompa LPCI	3 LPFL <i>motor driven pump</i> daya AC
4.	Pencegahan tekanan lebih (<i>overpressure</i>)	16 SRV (<i>air operated dan spring loaded actuation</i>) Sistem manual dengan menggunakan	16 SRV (<i>air operated and spring oaded actuation</i>)SRV Sistem RHR (<i>residual heat removal</i>)
5.	Pengungkung	LPCI SEHR teraktuasi secara otomatis	menggunakan pompa LPFL (<i>low pressure flooder</i>) daya AC
6.	Kecelakaan dengan cara RPV dihilangkan tekanannya	Tidak ada sistem pasif	Tidak ada sistem pasif
7.	Tata letak sistem keselamatan	Seluruh sistem <i>makeup</i> ditempatkan di luar pengungkung. Pengoperasian tergantung dari sistem bantu yang terletak di luar gedung	Seluruh sistem <i>makeup</i> ditempatkan di luar pengungkung. Pengoperasian tergantung dari sistem bantu yang terletak di luar gedung

PLTN Jenis ACR

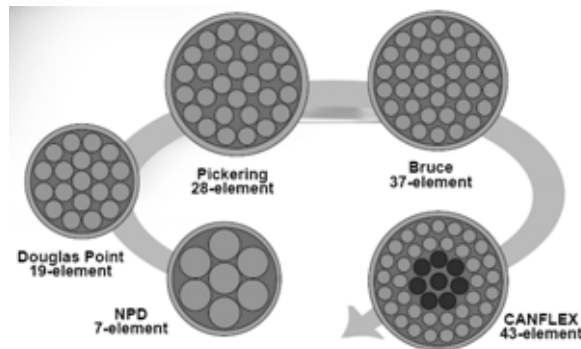
Salah satu inovasi reaktor PHWR adalah reaktor ACR-700. Sistem operasi ACR pada kondisi normal tidak banyak berbeda dengan desain CANDU 6 kecuali pada sistem pendinginnya. Desain CANDU sebelumnya menggunakan air berat baik sebagai moderator maupun pendingin, sedangkan pada desain ACR digunakan air berat sebagai moderator dan air ringan sebagai pendingin. Perubahan ini memberikan pengaruh yang besar untuk mencapai perubahan rancangan elemen bakar serta reaktivitas *void* pendingin negatif untuk berbagai kondisi operasi.

Rancangan sistem ACR lebih kecil dan sederhana dibandingkan dengan CANDU 6 namun dari segi teknologi lebih berkembang, demikian juga dengan tingkat keselamatan reaktor ini semakin tinggi. Reaktor ACR mempunyai beberapa kelebihan, yaitu dari segi ukuran reaktor ACR lebih kecil, bentuk lebih sederhana dan lebih efisien. Beberapa kelebihan antara lain adalah :

1. Efisiensi termal sistem yang lebih baik berkenaan dengan panas yang lebih tinggi
2. Penggunaan bahan bakar CANFLEX
3. Sistem struktur bangunan dengan sistem modul
4. Penggunaan air berat yang lebih sedikit
5. Umur reaktor lebih panjang (60 tahun)
6. faktor ketersediaan 90%
7. limbah lebih sedikit

Evolusi bahan bakar CANDU dapat dilihat dari Gambar 4. Desain awal bahan bakar NPD setiap bundle terdiri dari 7 elemen, menjadi 19 buah pada desain Douglas Point, 28 buah elemen pada Pickering, dan 37 buah elemen pada CANDU-6. Desain CANFLEX menggunakan 43 buah elemen yang mencakup perubahan jumlah elemen bakar pada setiap bundel, ukuran dan dimensi elemen bakar/bundel bahan bakar, dan usaha lainnya adalah untuk mengoptimalkan pengoperasian bahan bakar. Perubahan tersebut bertujuan untuk mendapatkan kenaikan rapat daya dan daya nominal yang lebih tinggi. Perbandingan

kisi tabung *calandria* dapat dilihat pada Gambar 5.

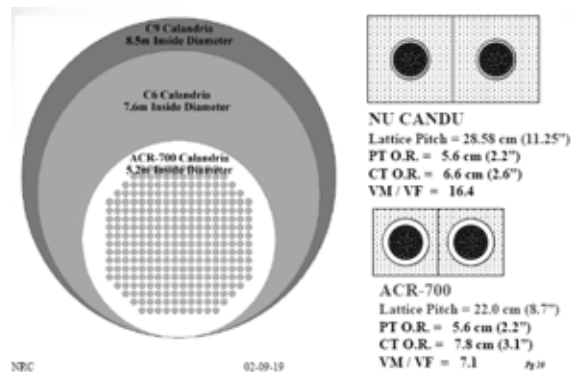


Gambar 4. Evolusi Elemen Bakar PHWR^[10]



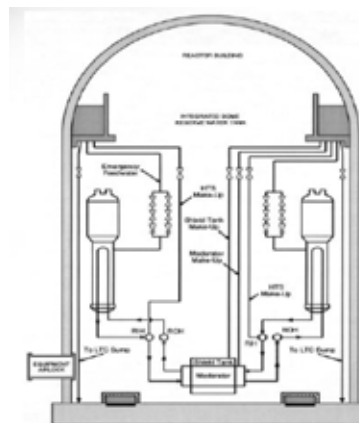
Gambar 5 Diagram Tabung *Calandria* CANDU dan ACR^[10]

Perubahan desain teras (bejana *calandria*) bertujuan untuk meningkatkan rapat daya dengan perubahan ukuran reaktor yang minimal dan memperoleh simplifikasi. Dengan kenaikan rapat daya akan mengurangi biaya dan berkurangnya jumlah air berat di dalam teras reaktor untuk setiap MWth. Terlihat jumlah air berat yang diperlukan untuk CANDU-6 Desain berkurang 3 kali dibandingkan reaktor NPD. Perbandingan ukuran bejana *calandria* antara ACR-700 dan CANDU-6 dapat dilihat dari Gambar 6. Diameter teras ACR-700 lebih kecil (5,2 m) dibandingkan CANDU-6 (7,6 m), sehingga volume bejana *calandria* mengalami pengurangan sebesar 60% dan penggunaan air berat berkurang sebesar 25%, memberikan dampak bahwa reaktor ACR lebih kecil dan efisien sehingga membutuhkan lahan jauh lebih kecil, dan lebih sederhana sehingga dari segi pembangunannya dapat menghemat 40% lebih murah dibanding CANDU 6.



Gambar 6. Perbandingan Ukuran *Calandria* PLTN CANDU^[10]

Pada reaktor ACR -700 terdapat sistem air cadangan, yang berfungsi sebagai air umpan darurat dan *backup* catu air ke moderator dan tangki perisai dalam hal terjadinya kecelakaan parah. Lihat Gambar 7. Sistem keselamatan terpadu untuk ACR didasarkan pada desain CANDU-6, yaitu terdiri dari sistem shutdown 1 (SDS 1), sistem *shutdown* 2 (SDS 2), sistem pendingin teras darurat (*emergency core cooling system*, ECCS), dan sistem pengungkung. Desain sistem ECCS lebih disederhanakan dibandingkan CANDU-6, hal ini disebabkan penggunaan pendingin air ringan dan *one way rupture discs*. Injeksi pendingin darurat tekanan tinggi dilakukan menggunakan akumulator. Sistem pendingin jangka panjang untuk resirkulasi pendingin dan pemindah panas jangka panjang, juga digunakan sebagai pendinginan reaktor untuk kejadian dan transien non-LOCA. Sistem pengungkung berfungsi untuk menjamin tidak akan terjadi pelepasan radioaktivitas dari reaktor ke masyarakat dan lingkungan.



Gambar 7. Sistem Air Cadangan Untuk ACR^[11]

Persiapan Pembangunan PLTN dan Penyiapan SDM Nuklir

Dengan adanya berbagai permasalahan dalam pasokan energi listrik konvensional dan terbatasnya bahan bakar minyak di Indonesia, mau tidak mau sudah saatnya PLTN harus dibangun. Masyarakat Indonesia tidak perlu khawatir dengan keselamatan PLTN, karena teknologi PLTN sudah semakin berkembang dan teknologi PLTN telah mencapai kedewasaannya. Begitu pula sosialisasi kepada masyarakat perlu lebih ditingkatkan agar masyarakat dapat menerima kehadiran PLTN. Program sosialisasi hendaknya dilakukan terus menerus, baik berupa program jangka pendek maupun jangka panjang melalui pendidikan. Tugas sosialisasi nuklir bukan hanya dilakukan oleh unit BATAN yang khusus menangani kehumasan saja, melainkan seluruh karyawan BATAN hendaknya menjadi ujung tombak pemasyarakatan PLTN.

Pembangunan infrastruktur nuklir dan penyiapan sumber daya manusia adalah mutlak untuk dilaksanakan. Keberadaan Reaktor Serba Guna dan Laboratorium Penunjang di kawasan PUSPIPTEK Serpong dimaksudkan untuk meningkatkan kemampuan BATAN dalam penggunaan teknologi nuklir untuk maksud-maksud damai. Namun akhir-akhir ini terlihat gejala mulai terbatasnya kader dalam tenaga nuklir sebagai pengganti tenaga ahli yang sudah memasuki masa purna bakti, berkurangnya pembinaan kader baru dengan tidak adanya lagi program teknik nuklir dan program yang terkait di beberapa universitas negeri serta terbatasnya dana untuk melaksanakan litbang dalam bidang nuklir. Untuk itu diperlukan revitalisasi lembaga penelitian beserta fasilitasnya khususnya dalam bidang nuklir, agar fasilitas nuklir mempunyai kinerja sesuai yang dikehendaki. Penyegaran kembali pengetahuan ketenaganukliran bagi karyawan yang terkait dengan industri nuklir mutlak diperlukan.

Sedangkan partisipasi nasional dalam setiap kegiatan pembangunan termasuk PLTN juga mutlak diperlukan. Masalahnya adalah bagaimana cara meningkatkan keikutsertaan industri nasional untuk mendukung pembangunan PLTN termasuk memaksimalkan penggunaan hasil industri lokal maupun jasa lokal demi perbaikan ekonomi Indonesia. Juga perlu dibangun kebersamaan antar organisasi

dan instansi baik pemerintah maupun swasta, untuk bersama-sama mendiskusikan pembangunan negara pada umumnya dan pembangunan PLTN pada khususnya, secara arif, terbuka, serta melihat wawasan masa depan demi untuk tercapainya kesejahteraan masyarakat dan negara. Semua pihak perlu bergandeng tangan, berat sama dipikul, ringan sama dijinjing, dalam melaksanakan rencana mencukupkan energi bagi keperluan masyarakat dan industri.

KESIMPULAN

Dari kajian di atas dapat disimpulkan bahwa keselamatan nuklir sudah diimplementasikan dalam desain PLTN, sehingga masyarakat tidak perlu khawatir dengan kehadiran PLTN. Untuk meningkatkan kepercayaan dan diterimanya kehadiran PLTN oleh masyarakat dunia, maka desain PLTN mutakhir telah dikembangkan lebih baik, seperti PLTN jenis ABWR dan ACR-700 mempunyai tingkat keselamatan yang lebih tinggi. Sudah saatnya Indonesia memiliki PLTN untuk menopang kebutuhan energi listrik yang cukup besar. Di samping itu untuk menyongsong pembangunan PLTN pertama di Indonesia, penyiapan sumber daya manusia dalam setiap kegiatan nuklir, sosialisasi pemasyarakatan nuklir, mutlak untuk dilaksanakan dan dipersiapkan dengan baik dan terencana. Perlu kesatuan langkah dan kebijakan disertai rasa kebersamaan dari semua pihak dalam menyongsong pembangunan PLTN di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, 1992, "The Safety of Nuclear Power, Safety Series No. 75-INSAG-5, IAEA, Vienna.
2. ANONIM, 2006, "Fundamental Safety Principles", IAEA Safety Standarrs No. SF-1, IAEA, Vienna.
3. ANONIM, 2000, "Safety of Nuclear Power Plants : Design", IAEA Safety Standarrs No. NS-R-1, IAEA, Vienna.
4. ANONIM, 1988, "Basic Safety Principle for Nuclear Power Plants", Safety Series No. 5-INSAG-3, IAEA, Vienna.
5. ANONIM, 2000, "Safety of Nuclear Power Plants : Operation", IAEA Safety Standarrs No. NS-R-2, IAEA, Vienna.

6. ANONIM, 2007, "Nuclear Power Reactor in the World, 2007 Edition", IAEA, Vienna.
7. ANONIM, "Advanced Boiling Water Reactor", TEPCO, Tokyo, Japan
8. ANONIM, "Advanced Boiling Water Reactor", Hitachi Ltd, Tokyo, Japan
9. ANONIM, "Advanced Boiling Water Reactor", Toshiba, Tokyo, Japan
10. YU, S., 2002, "An Overview of the ACR Design", Presented to US NRC, Office of Nuclear Reactor Regulation, September 25.
11. HEDGES, K., 1992, "The Advanced CANDU Reactor : Ready for the Emerging Market", ANES 2002 Symposium, Power Research Institute, Palo Alto- California, USA.
12. ANONIM, 2002, "SHeavy Water Reactors : Status and Projected Development", Technical Report Series No. 217, IAEA, Vienna.
13. ANONIM, 1992, "Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document", Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, USA.
14. ANONIM, 1989, "Advanced Water Reactor Technology", NEA Some Brief No. 5, June.
15. WILLIAM, W.A., et.al, 1995, "Advanced LWR Technology for Commercial Application, GE Nuclear Energy", San Jose, California.
16. WIESHEU, O., 1997, "The Future of Nuclear Energy", The EPR Project.
17. BACHER, P., et.al, 1997, "EPR from Utility Standpoint Safety of Future Nuclear Power Plant with Pressurized Water Reactor", The EPR Project.
18. LEE, M.K., 2002, "Past, Present, & Future of Nuclear Power Development in the World", Kongres Ilmu Pengetahuan Nasional IX, Jakarta, 20-22 Nopember.
19. LEE, U.C., et.al., 2007, "Korean Nuclear Power Technology for Nuclear Renaissance", May 14.