

Perkembangan Desain Pembangkit Uap Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Jenis PWR

Tjipta Suhaemi¹ & Djen Djen Djainal²

¹Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik,

Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Jakarta.

Jalan Limau II, Kebayoran Baru, Jakarta 12130. INDONESIA.

Telp: +62-21-7256659, Fax: +62-21-7256659, Hp.+6281310770089

Email: ft.uhamka@yahoo.com

²PTRKN-BATAN

Abstrak

Telah dilakukan kajian dan analisis perkembangan pembangkit uap pembangkit listrik tenaga nuklir jenis PWR untuk mengetahui keandalan, kinerja, dan potensi ketidaksesuaian pembangkit uap. Pembangkit uap termasuk salah satu sistem yang sangat penting dalam suatu pembangkit listrik tenaga nuklir, karena pembangkit uap berfungsi untuk menghasilkan uap yang diperlukan untuk menggerakkan turbin. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) jenis PWR adalah jenis reaktor daya yang menggunakan air sebagai moderator dan uranium diperkaya sebagai bahan bakar. Kajian pada penelitian sebelumnya tentang pembangkit uap ini adalah terjadinya mekanisme degradasi yang disebabkan oleh fretting, wastage, crack, dan fatik. Untuk meminimalisir degradasi tersebut dianjurkan untuk melakukan kegiatan perawatan yang konsisten. Kajian dilakukan dengan mengumpulkan data reaktor beserta sistem yang terkait dengan pembangkit uap dari PLTN jenis PWR. Dilakukan pula kajian terhadap kriteria dan persyaratan keselamatan, tinjauan terhadap perkembangan desain pembangkit uap, serta berbagai pengalaman pengoperasian PLTN jenis PWR. Pengalaman pengoperasian PLTN PWR menunjukkan kinerja yang cukup baik, dan sampai saat ini belum pernah ada PLTN jenis PWR yang mengalami kecelakaan fatal. Dilakukan pula pengkajian terhadap beberapa pembangkit uap PLTN jenis PWR di Amerika Serikat dan Perancis. Dari hasil bahasan dapat diketahui bagaimana desain pembangkit uap PLTN jenis PWR dikembangkan sejak desain pertama sampai desain terakhir. Dapat disimpulkan bahwa desain dan teknologi keselamatan dari pembangkit uap PLTN jenis PWR dikembangkan secara bertahap untuk memenuhi peningkatan keandalan. Dewasa ini desain pembangkit uap PWR telah dikembangkan lebih kompak, vertical, kualitas uap yang tinggi, serta menunjukkan kemampuan pengoperasian dan efisiensi yang lebih baik.

Kata kunci : kinerja, pembangkit uap, pengembangan, PHWR

Abstract

Evolution of steam generator design of pressurized water reactor has been studied and analysed for knowing the reliability, performance, and compliance potential of steam generator. Steam generator functions as to produce steam to drive the turbine. Pressurized heavy water reactors use water as moderator and enriched uranium as fuel. Study was done by collecting the data and system related to steam generator. It was also studied the review of safety criteria and requirements, development of design of steam generator, and various operation experience. From experiences of operation of pressurized heavy water reactor show the good performance, and until now no PWR anywhere has suffered a serious accident. It is also done the study with the steam generator of pressurized water reactor in Unites States and France. This paper outlines the evolution of steam generator design from the first design until the current design. It is concluded that the design and technology of steam generator were developed by evolution to follow safety principle and obtained reliability. The current steam generator design was compact, vertical, high steam quality, exhibit high efficient and robust operating capabilities.

Keywords: performance, steam generator, evolution, PWR

1 PENDAHULUAN

Sejak berakhirnya Perang Dunia II terjadi perkembangan yang sangat pesat dalam penelitian penggunaan reaksi nuklir. Hal ini ditandai dengan terjadinya lomba persenjataan nuklir, lomba pengembangan dan pembuatan kapal selam maupun kapal induk bertenaga nuklir. Untuk mengurangi perang dingin antara Blok Barat dengan Blok Timur, diselenggarakan pertukaran informasi ilmiah mengenai penelitian dan pengembangan nuklir. Salah satu yang terpenting adalah Atom for peace yang disampaikan Presiden Eisenhower di depan Sidang Majelis Umum PBB pada bulan Desember 1953 yang mengusulkan pemanfaatan nuklir untuk maksud damai termasuk penyediaan listrik. Empat tahun kemudian IAEA (International Atomic Energy Agency) sebagai bagian dari PBB dibentuk pada tahun 1957, dengan tujuan mempromosikan pemanfaatan nuklir untuk maksud damai dan menjamin agar pengembangan energi nuklir tidak digunakan untuk tujuan militer.

Cikal bakal reaktor nuklir yang pertama adalah Chicago Pile-1 di Amerika Serikat yang terdiri dari kisi kubus yang tersusun atas uranium dan grafit pada tahun 1942, diikuti oleh Kanada yang membangun reaktor ZEEP (zero Energy Experimental Pile) yang berbahan bakar uranium alam dan moderator air berat.

Sedangkan reaktor pertama yang menggunakan energi nuklir untuk pembangkitan listrik adalah reaktor jenis PWR (Pressurized Water reactor) dengan daya 5 MWe yang didirikan di Obninsk dekat Moskow pada tahun 1954. Kemudian diikuti dengan PWR berkapasitas 60 MWe untuk digunakan menggerakkan kapal selam Nautilus yang mulai dioperasikan tahun 1954 oleh Amerika Serikat, kemudian dibangun reaktor daya PWR pertama di Shipping Port (50 MWe).

Dalam makalah ini dibahas kajian pengembangan dan perkembangan sistem pembangkit uap pada pembangkit listrik tenaga nuklir jenis PWR. Kajian terhadap pembangkit uap PLTN jenis PWR ini dipilih disebabkan PLTN jenis PWR merupakan jenis reaktor yang paling banyak digunakan di

dunia. Sistem pembangkit uap (*steam generator*) merupakan salah satu sistem pembangkit listrik (PLTN) yang berfungsi untuk memindahkan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder guna menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin.

Pada awal penggunaan secara damai pembangkit daya nuklir yang pertama-tama di Amerika Serikat menggunakan boiler yang didasarkan pada desain boiler Angkatan Laut USA yang telah dikembangkan secara rahasia untuk propulsi submarine oleh perusahaan USA, seperti BW (USA), dan juga Combustion Engineering (CE) dan Foster Wheeler (FW). Karena perencana (desainer) mempunyai pengetahuan dan pengalaman dengan desain drum uap (*steam drum*) fossil, tentunya dipilih desain tersebut untuk pemisahan uap reaktor nuklir. Jadi boiler submarine Angkatan Laut USA terdiri atas satu set reboiler tabung U di dalam drum. Penukar panas ini dihubungkan melalui via tabung *riser* dan *downcomer* sampai ke puncak penukar *reboiler*.^[4]

Desain pembangkit uap untuk reaktor daya PWR yang pertama ini adalah sebuah boiler 20 MW yang ditiru dari pembangkit uap kapal selam nuklir USA 50 MW dan Pembangkit di Shipping Port yang berbasis teknologi PWR. Integritas sistem pembangkit uap PLTN penting untuk diperhatikan karena selain berfungsi menghasilkan uap juga berfungsi sebagai pemisah antara pendingin primer yang mengandung substansi aktif dengan pendingin sekunder. Integritas pembangkit uap dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain faktor desain, faktor manusia, faktor lingkungan, dan sebagainya. Faktor desain PLTN tentunya mencakup kemampuan dan keandalan komponen yang digunakan. PLTN selama beroperasi tentunya akan menyebabkan interaksi antara material/komponen dengan tegangan dan regangan (*stress and strain*), getaran, korosi, dsb.^[5]

Tabung pembangkit uap merupakan salah satu komponen pembangkit uap yang merupakan subyek terhadap adanya mekanisme degradasi akibat dari dioperasikannya pembangkit uap baik secara

mekanik maupun kimia yang bervariasi dari satu PLTN ke PLTN yang lain. Integritas tabung pembangkit uap perlu dijaga karena pembangkit uap merupakan fraksi yang besar dari *boundary* tekanan sistem primer, dan hal ini merupakan faktor penting untuk mencapai tujuan keselamatan. Kerusakan tabung pembangkit uap berpotensi menyebabkan kerusakan teras karena akan menghasilkan kebocoran pada sistem primer. Kebocoran yang disebabkan oleh hancurnya tabung dapat juga terkompikasi dengan kegagalan yang bukan berasal dari tabung pembangkit uap seperti malfungsi peralatan dan kesalahan operator. Begitu pula, kehancuran salah satu tabung bisa menyebabkan kerusakan tabung lainnya.

Sistem pembangkit uap ini pada dasarnya didesain untuk dapat dioperasikan 30 sampai 40 tahun. Namun dari beberapa laporan banyak sistem pembangkit uap dari berbagai jenis PLTN yang mengalami permasalahan dan kurang berfungsi sebelum waktunya. ^[6,7] Dibahas bagaimana perkembangan desain pembangkit uap sejak desain awal hingga desain pembangkit uap mutakhir, kajian mencakup kriteria dan persyaratan keselamatan, serta berbagai pengalaman pengoperasian PWR. Desain dan teknologi keselamatan dari pembangkit uap PLTN jenis PWR dikembangkan secara bertahap untuk memenuhi peningkatan keandalan. Dewasa ini desain pembangkit uap PWR telah dikembangkan lebih kompak, vertical, kualitas uap yang tinggi, serta menunjukkan kemampuan pengoperasian dan efisiensi yang lebih baik.

2 KRITERIA KESELAMATAN

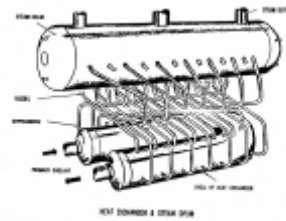
Tujuan keselamatan dasar untuk pembangkit uap adalah sebagai berikut :

- Menjaga agar resiko kerusakan teras sebagai akibat dari kerusakan tabung pembangkit uap berada dalam tingkat yang dapat diterima.
- Menjamin agar integritas tabung pembangkit uap terjaga dan memenuhi batas dosis yang telah ditetapkan.
- Menjamin kebolehdjadian rusaknya tabung sekecil mungkin pada kondisi operasi normal.

- Menjamin kebolehdjadian hancurnya tabung pada kondisi kecelakaan adalah serendah mungkin.
- Menjamin kebocoran primer ke sekunder selama operasi normal dan selama kejadian kecelakaan terpostulasi tetap konsisten dalam batas dosis yang diperuntukkan bagi pembatas (*boundary*) bertekanan.

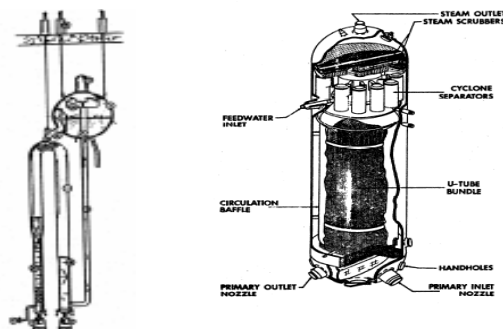
3 DESAIN PEMBANGKIT UAP PHWR

Desain pembangkit uap ini mirip dengan desain boiler yang terdapat pada kapal nuklir selam Savannah, PLTN Shipping Port dan PLTN Indian Point di Amerika Serikat.



Gambar 1 Penukar panas dan steam drum untuk NPD^[4]

Untuk reaktor Pickering mulai digunakan digunakan pembangkit uap jenis *vertical integral drum boiler* atau biasa disebut generator jenis *light bulb*.



Gambar 2 Pembangkit uap
Gambar 3 Vertical integral drum boiler^[4]
Douglas Point ^[4]

4 METODE PENGKAJIAN

Metoda pengkajian yang dilakukan dalam makalah ini adalah

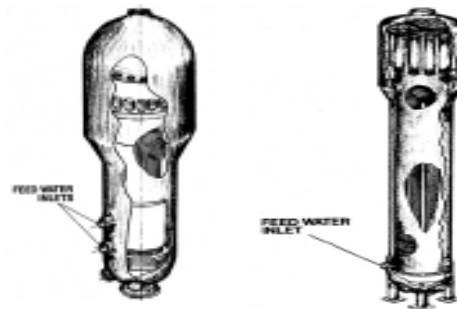
1. melakukan kajian desain pembangkit uap.
2. memahami tujuan keselamatan pembangkit uap.
3. mempelajari regulasi dan aturan yang diberlakukan untuk pembangkit uap.
4. mempelajari jenis dan kinerja pembangkit uap mulai dari desain NPD sampai desain CANDU mujtahir
5. mempelajari berbagai pengalaman operasi pembangkit uap beberapa PLTN PHWR dan PWR Milestone-2 di Amerika Serikat.

5 PEMBAHASAN

Pembangkit uap yang tertua dan yang paling sederhana berbentuk boiler drum secara horizontal yang disebut boiler jenis Pot seperti terlihat pada Gambar 4. Air primer masuk dan keluar melalui *head internal* dan *tube sheets* yang terpisah. Uap terbentuk di luar tabung dan naik ke permukaan di atas bundel tabung dimana uap akan dipisahkan dari air oleh pemisahan alami pada interface uap-air. *Baffling* berfungsi untuk menyiapkan *downcomer* dan dari itu mengarahkan sirkulasi. Lokasi pembentukan air umpan adalah sedemikian sehingga bercampur dengan air resirkulasi sebelum kontak permukaan pemanasan seperti di dalam pengalaman drum uap normal. Keterbatasan boiler jenis Pot ini adalah pemisahan permukaan uap yang bebas dari air yang menghasilkan kualitas uap dan kapasitas uap yang rendah.

Pada awalnya dipilih desain PWR Amerika Serikat, namun ada pertimbangan tentang siklus CANDU dan biaya/harga air berat cukup tinggi. Oleh karenanya diinginkan desain boiler untuk CANDU yang mempunyai luas permukaan transfer panas yang lebih rendah untuk mengkurangi volume air berat sebagai fluida pendingin primer. Untuk mengemas permukaan pemanasan ke luasan yang lebih kecil dan untuk menghasilkan panas KW lebih banyak dalam ruang dan ukuran lebih kecil, didesain pembangkit uap jenis *vertical integral drum boiler* atau biasa disebut generator jenis *light bulb*. Selain itu

dengan desain yang sedikit berbeda dengan desain untuk PWR (gambar 5), yaitu dengan memperbesar kecepatan fluida melalui tabung yang akan memberikan koefisien perpindahan panas yang lebih tinggi. Untuk itu dengan massa aliran yang tetap, kecepatan aliran dapat diperbesar dengan mengurangi luas aliran, yaitu dilakukan dengan mengurangi jumlah tabung. Dengan tabung yang lebih panjang diperlukan lebih banyak penyangga tabung, namun hal ini memungkinkan terjadinya *fretting* dan vibrasi lebih banyak. Untuk mengatasi persoalan tersebut didesain pembangkit uap dengan sirkulasi vertikal (*resirculating steam generator*, RSG boiler) dengan ekonomizer internal dan drum uap yang vertikal yang desainnya dapat dilihat seperti pada Gambar 7. Dewasa ini konfigurasi pembangkit uap jenis ini adalah yang paling banyak digunakan untuk reaktor PWR maupun PHWR.



Gambar 4a Vertical integral drum boiler

Gambar 4b Vertical integral drum boiler PWR^[9]
PHWR^[9]

Sistem pembangkit uap pada dasarnya didesain untuk dapat dioperasikan 30 sampai 40 tahun. Namun dari beberapa pengalaman di lapangan banyak sistem pembangkit uap ini yang kurang berfungsi. Berbagai problem yang terjadi pada sistem pembangkit uap antara lain disebabkan terjadinya degradasi seperti *denting*, *wastage*, *pitting*, *stress corrosion*, *cracking*, *fretting*, dll. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam desain pembangkit uap, yaitu tentang bundel

tabung, sistem penyangga tabung, desain separator uap/air, bahan pembangkit uap.

Tentang penyangga tabung berfungsi untuk mencegah vibrasi tabung, membuat *pressure drop* yang lebih rendah agar didapatkan aliran sirkulasi yang tinggi, dan menyangga tabung pembangkit uap. Ada dua jenis penyangga tabung yang digunakan pada reaktor PHWR, yaitu jenis grid kisi (*lattice grid*) dan jenis berbentuk piringan (*broached plate*). Gambar 8 menunjukkan kedua jenis penyangga tabung tersebut. Pada awalnya Pickering A menggunakan grid kisi, namun semua boiler pasca Pickering A seperti Bruce dan Darlington menggunakan *broached plate*. Sistem penyangga *broached plate* ini digunakan oleh BW USA untuk boiler nuklirnya..

Dari pengalaman boiler NPD terlihat adanya kebocoran sesudah dioperasikan beberapa lama, kebocoran tersebut disebabkan oleh *fretting* yang terjadi di daerah yang berhubungan dengan aliran *blowdown*. Pendidihan lokal dan *dryness* memicu terjadinya degradasi tersebut. Setelah diselidiki ternyata pelat penyangga dengan sisi paralel dan *clearance* yang kecil sekeliling tabung dapat memperburuk kondisi. Berkenaan tentang sistem penyangga tabung, dari data terungkap bahwa pada PLTN Bruce A, Pickering B dan Pont Lepreau terlihat degradasinya lebih besar dibandingkan dengan PLTN CANDU lainnya. PLTN ini menggunakan penyangga tabung berbentuk piringan yang terbuat dari baja karbon (*carbon steel broach*). Sedangkan pada PHWR lainnya digunakan penyangga tabung berbentuk kisi yang terbuat dari stainless steel (*SS lattice*). Untuk sistem penyangga tabung pada awalnya tetap dipilih jenis *broached hole plates* dan *scalloped bar U bend support system*. Namun berdasarkan percobaan dan penelitian, untuk sistem penyangga tabung akhirnya dipilih jenis *lattice grid*.

Hal ini didasari pula bahwa reaktor PWR di Amerika Serikat banyak mengalami kegagalan. Penyangga tabung berfungsi untuk menyangga tabung dan mencegah vibrasi tabung, dan membuat turunnya tekanan (*pressure drop*) air yang lebih rendah agar didapatkan aliran sirkulasi yang tinggi. Tabung di dalam bundel dipegang kuat oleh

broached plate dan dengan beban tekanan yang besar tersebut, bisa menekan tabung sehingga permukaan luar tabung bisa membengkok ataupun tergores (*scratch*). Masalah yang terdapat pada penyangga tabung model piringan adalah timbulnya endapan (*sludge*) pada sekitar daerah aliran. Kerusakan ini menyebabkan semua boiler harus di atur ulang dan *directed*. Jika penyangga grid kisi yang digunakan, kerusakan ini tidak akan terjadi, dengan desain ini tabung akan bebas mengembang. Penyangga yang berbentuk kisi membuat aliran sirkulasi lebih tinggi, lebih luwes, dan terminimalisirnya akumulasi endapan. Selain itu penyangga tabung jenis kisi ini memberikan kendali vibrasi yang lebih baik dan tidak ada keretakan.^[10]

Desain bejana vertikal integral yang didempatkan dihubungkan dengan puncak penukar

Untuk mencapai keandalan yang lebih tinggi, ketersediaan peralatan yang lebih baik, dan pengurangan dosis radiasi pekerja pengoperasian, maka dalam perkembangannya penggunaan komponen sisten dikurangi jumlahnya. Terlihat pada NPD hampir 100 katup per MW dalam sistem suplai uap, dan ini dikurangi menjadi 1 katup /MW di Bruce A dan Candu-6. Yang lain adalah pengurangan *non-welded joint* per unit, dari 4000 di NPD menjadi 3000 di Douglas Point dan 1000 di Pickering dan akhirnya 200 di di Candu-6.

Sepert terlihat pada Tabel 1 , untuk bahan tabung digunakan monel untuk Douglas Point dan Pickering. Bahan ini cukup baik untuk kondisi pendingin yang tidak mendidih. Inconel-600 digunakan di NPD dan Bruce, harganya lebih mahal dibandingkan dengan monel, tetapi tahan terhadap korosi, dan dalam lingkungan pendidihan adalah paling baik. Incaloy - 800 digunakan pada semua reaktor CANDU karena tahan terhadap serangan intergranular, dan mempunyai sifat yang sama dengan kondisi inconel namun mempunyai kelebihan yaitu tahan terhadap dan harganya yang lebih rendah.

PLTN *Pt Lepreau* menggunakan air laut untuk pendingin sekundernya. Pada PLTN ini diketahui ada sejumlah *wastage* yang keberadaannya bersama mekanisme *pitting*. Fosfat bertindak sebagai larutan buffer,

sehingga dapat menjaga perubahan pH, dan fosfat dapat menetralkan kondisi kimiawi akibat pengaruh air laut. Pengurangan *wastage* dapat dilakukan dengan mengendalikan konsentrasi fosfat dan rasio molar di dalam air, dan meminimalkan pengembangan *sludge pile* pada pembangkit uap dengan mengendalikan kimiawi sistem sekunder dan pengurusan (*sludge lancing*). Pengurangan suhu mungkin juga memberikan manfaat terhadap pengurangan *wastage*. Penipisan dinding tabung yang disebabkan oleh *wastage* pada umumnya lambat, mudah dideteksi dan dipantau. Untuk mencegah problem keselamatan yang serius akibat pengembangan *wastage*, perlu dilakukan pemantauan secara periodik dengan uji *eddy current* dan digabung dengan kriteria perbaikan yang memadai.

Salah satu pengalaman yang dialami oleh PLTN jenis PWR Milestone-2 di Amerika Serikat, degradasi yang terjadi pada pembangkit uap terlalu cepat dalam waktu sekitar 10 tahun sejak pertama dioperasikan tahun 1975. Pada tahun 1980-an timbul problem *pitting* yang terjadi di permukaan dalam tabung pembangkit uap, dan pada pertengahan 1980-an, korosi tabung telah sampai pada tingkat yang tak mungkin lagi ditoleransi. Ada 17.000 buah tabung di dalam dua unit sistem pembangkit uap yang disumbat (*plugged*). Selain itu terdapat pula kondisi penyangga tabung *carbon steel* yang kondisinya memburuk. Northeast Utilities (NU) sebagai pemilik PLTN tersebut mencari alternatif pengagulangan.

Didasarkan dari pengalaman dalam pengoperasian pembangkit uap PLTN jenis PHWR yang relatif sukses, perusahaan NU mengganti pembangkit uap PLTN Milestone 2 dengan pembangkit uap model PHWR, dan menunjuk Babcock dan Wilcox yang selama ini membuat sistem pembangkit uap PLTN PHWR Kanada untuk melaksanakan pergantian. Beberapa tahun sebelum dilakukan kontrak, perusahaan Babcock & Wilcox melakukan studi kemungkinan fitur desain sejumlah pembangkit uap PHW untuk digunakan pada PLTN jenis PWR. Kajian menyimpulkan bahwa terdapat banyak kesamaan desain baik dalam tata letak, ukursan, bahan, kondisi operasi, pembebanan dari kedua jenis PLTN tersebut. Didapatkan

pada pengalaman pengoperasian pembangkit uap PHWR yang relatif sukses, timbul pemikiran tentunya apa yang diterapkan pada PHWR juga dapat diaplikasikan pada PWR. Misalnya pembangkit uap PWR dapat dimodifikasi yang mencakup penyangga grid kisi. Dari Tabel 3 dapat dilihat karakteristik pembangkit uap beberapa PLTN jenis PHWR dan PWR yang menggunakan penyangga kisi kisi.^(2,6,10)

Tabel 1 Pembangkit uap model PHWR^[6,10]

PLTN	Jumlah Pembangkit Uap	Bahan Tabung	Tahun Operasi	Penyangga Tabung
PHWR Cernavod a-1	4	800	1995	Kisi SS
PHWR Cernavod a-2	4	800	1996	Kisi SS
PHWRWolsung 2	4*	800	1997	Kisi SS
PHWRWolsung 3	4*	800	1998	Kisi SS
PHWRWolsung 4	4*	800	1999	Kisi SS
PWR Ginna	2**	690 TT	1996	Kisi SS
PWR McGuire 1	4**	690 TT	1996	Kisi SS
PWR Catawba 1	4**	690 TT	1996	Kisi SS
PWR St Lucie 1	4**	690 TT	1997	Kisi SS
PWR McGuire 2	4**	690 TT	1997	Kisi SS
PWR Braidwood 1	4**	690 TT	1999	Kisi SS
PWR Byron 1	4**	690 TT	1999	Kisi SS

Keterangan :

* Didesain oleh B& W, diproduksi dengan kerjasama B&W dan Hanjung Korea Selatan

** Pergantian pembangkit uap PWR yang disuplai oleh B & W

6 SIMPULAN DAN SARAN

Dari kajian dapat diketahui desain pembangkit uap PLTN jenis PHWR dikembangkan sejak desain awal sampai desain terakhir. Desain pembangkit uap dikembangkan secara bertahap untuk memenuhi peningkatan keandalan. Berkenaan dengan keselamatan operasi PLTN, maka mempertahankan integritas tabung pembangkit uap merupakan hal yang sangat penting. Mekanisme kerusakan yang paling kritis pada pembangkit uap adalah antara lain *fretting*, *wastage*, *crack*, dan *fatik*. Untuk meningkatkan kinerja pembangkit uap perlu dilakukan upaya berupa strategi pengendalian perawatan dan perbaikan. Dari pengalaman desain pembangkit uap terlihat bahwa sistem penyangga tabung yang baik berperan penting dalam memperpanjang usia boiler. Penyangga tabung jenis kisi (*lattice bar*) dan luasan yang besar terbukti sukses dan tidak ada kegagalan yang dilaporkan akibat *dryout* dan vibrasi. Dari pengalaman pengoperasian PHWR diperoleh bahwa kegagalan pada salah satu atau beberapa tabung pada pembangkit uap PLTN jenis PHWR bukan merupakan kejadian yang serius. Perbaikan yang dilakukan dengan melakukan penyumbatan (*plugging*) pada tabung pembangkit uap PHWR hanya terjadi pada PHWR yang menggunakan penyangga grid berbentuk piringan. Model pembangkit uap yang mempunyai penyangga berbentuk kisi yang digunakan pada kebanyakan PHWR telah mulai banyak dipilih untuk menggantikan pembangkit uap PLTN jenis PWR di Amerika Serikat. Strategi perawatan pembangkit uap PLTN PHWR di Kanada dilakukan dengan pengaturan prosedur dan kebijakan pengoperasian peralatan dan sistem, pembatasan kebocoran yang terjadi akibat pengoperasian, pelaksanaan program inspeksi *in-service*, inspeksi periodik, dan program *fitness in service*. Program *fitness in service* seharusnya memberikan panduan rinci dan cukup, yang meliputi :Definisi code dan standar yang dapat diaplikasikan, Faktor keselamatan yang perlu dicakup, Besar parameter yang digunakan dalam analisis, Limit *shutdown* untuk kebocoran primer ke sekunder, dan persyaratan sensitivitas dan kecepatan respon untuk peralatan pemantauan kebocoran.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- [1] Suhaemi, T., *Review of Canadian Reactor Safety Philosophy and CANDU Reactor Safety Systems*, AECL-Candu Operations, Mississauga, 1987.
- [2] Anonim, *Heavy Water Reactors : Status and Projected Development*, Technical Reports Series no. 407, IAEA, Vienna, 2002.
- [3] <http://www.nuclearfaq.ca/dyke.htm>, steam generators for CANDU.
- [4] Stelliga, D.J., Dyke, J.M., *Nuclear Heated Steam Generators*, Canadian Electrical Association, Toronto, 1970.
- [5] RM. Wilson, *Steam Generator Design and Manufacture*, Westinghouse Nuclear Power Training Program, October 1994.
- [6] P.M.Hendsbee, et al, *First Non-EM Steam generator Replacement in US a Success*, Mc Graw Hill, USA, 1994.
- [7] S.J.Green and G. Hetsroni, *PWR Steam Generators*, International Multiphase Flow, Volume 21, 1995.
- [8] Jeffrey A Gorman, John E. Harris, David B. Lowenstein, *Steam Generator Tube Fitness for Service Guidelines*, Atomic Energy Control Board, Ottawa-Canada.
- [9] Dyke, J.M., Garland, W.J., *Evolution of CANDU Steam Generators- a Historical View*, CANTEACH, COG, Canada, 2006
- [10] James C Smith, *How to Improve Steam Generator Reliability*, Nuclear Engineering International, Sutton-Surry, England, May, 1995.
- [11] Anonim, *Generic Safety Issues for Nuclear Power Plants with Pressurized Heavy Water Reactors and Measures for Their Resolution*, IAEA-TECDOC-1554, IAEA, Vienna, June 2007.
- [12] Safety Series No. 50-P-2, *In-service Inspection of Nuclear*
- [13] *Power Plants*, IAEA, Vienna, 1991.