

## PERKEMBANGAN DESAIN PEMBANGKIT UAP PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR JENIS PWR

Tjipta Suhaemi\*, Djen Djen Djainal\*\*

\*Fakultas Teknik UHAMKA, Jalan Limau II Kebayoran Baru- Jakarta Selatan

\*\*PTRKN-BATAN, Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang Selatan

### ABSTRAK

**PERKEMBANGAN DESAIN PEMBANGKIT UAP PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR JENIS PWR.** 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, stress corrosion cracking, dan fatik. 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. Khususnya di Amerika Serikat 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, vertikal, kualitas uap yang tinggi, serta menunjukkan kemampuan pengoperasian dan efisiensi yang lebih baik.

Kata kunci : kinerja, pembangkit uap, pengembangan, PWR

### ABSTRACT

**DEVELOPMENT OF STEAM GENERATOR DESIGN OF PRESSURIZED WATER REACTORS.** *Development of steam generator design of pressurized water reactor has been studied and analyzed for understanding the reliability, performance, and compliance potential of steam generator. Steam generator functions as to produce steam to drive the turbine. Pressurized water reactors use water as moderator and enriched uranium as fuel. It is known from study that the degradation mechanism of steam generator in the pressurized water reactors are caused by fretting, wastage, stress corrosion cracking, fatigue. 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 primarily in United States.. 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, development, PWR*

### PENDAHULUAN

Sistem pembangkit uap (*steam generator*) merupakan bagian dari PLTN yang berfungsi untuk memindahkan panas dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder untuk menghasilkan uap yang berguna untuk menggerakkan turbin. Oleh karenanya 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. Berbagai problem yang terjadi pada sistem pembangkit uap antara lain disebabkan terjadinya *denting, wastage, pitting, stress corrosion crascking, fretting*, dan lain-lain.<sup>[1]</sup>

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. Dewasa ini ada sebanyak 265 buah PLTN PWR yang beroperasi dari total 441 buah PLTN di dunia.<sup>[2]</sup>

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 50 MWe untuk digunakan menggerakkan kapal selam Nautilus yang mulai dioperasikan tahun 1954 oleh Amerika Serikat, kemudian dibangun reaktor daya PWR pertama Shippingport (60 MWe). Kemudian PLTN jenis PWR dikembangkan lebih lanjut hingga saat ini dayanya mencapai 1400 MWe. Negara-negara yang mengembangkan PWR, antara lain Amerika Serikat, Perancis, Jerman, Rusia, Jepang, Korea Selatan.. PLTN jenis PWR Shippingport adalah PLTN pertama yang dibangun di Amerika Serikat, yang mulai menyalurkan listriknya pada tanggal 18 Desember 1957 ke daerah Pittsburgh, Pennsylvania.<sup>[3]</sup>

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 Shippingport yang berbasis teknologi PWR. 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 *propulsion 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 tabung *riser* dan *downcomer* sampai ke puncak penukar *reboiler*.<sup>4)</sup>

Sistem pembangkit uap ini pada dasarnya didesain untuk dapat dioperasikan 30 sampai 40 tahun. Namun dari beberapa pengamatan di lapangan banyak sistem pembangkit uap ini yang kurang berfungsi.<sup>[5,6]</sup> Sistem pembangkit uap senantiasa mengalami korosi, erosi dan pemakaian yang secara perlahan akan berdampak terhadap kinerja instalasi. Meskipun telah dilakukan kontrol kimiawi air

yang sempurna dan usaha untuk meningkatkan umur sistem pembangkit uap, degradasi tabung pada kebanyakan sistem pembangkit uap lebih cepat dari tingkat yang diperkirakan sebelumnya. Dewasa ini setiap tahun ada 3 buah sistem pembangkit uap reaktor PWR di Amerika Serikat yang diganti. Dari pengalaman pengoperasian PLTN jenis PWR di Jepang selama 20 tahun pertama sejak mulai beroperasinya PLTN pertama bulan Juli tahun 1966, terdapat problem pembangkit uap mencapai 40%.<sup>[7]</sup>

Selain itu 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 terkomplikasi 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.

Makalah ini membahas 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.

## KRITERIA KESELAMATAN DAN DESAIN PEMBANGKIT UAP PWR

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.

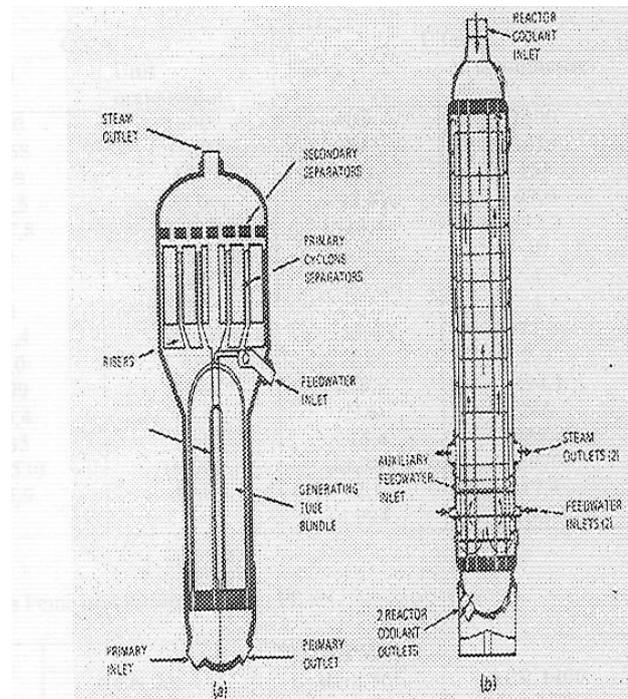
- Menjamin kebolehjadian rusaknya tabung sekecil mungkin pada kondisi operasi normal.
- Menjamin kebolehjadian hancurnya tabung pada kondisi kecelakaan serendah mungkin.
- Menjamin kebocoran primer ke sekunder selama operasi normal dan selama kejadian kecelakaan terpostulasi tetap konsisten dalam batas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

Pembangkit uap berfungsi untuk memindahkan energi panas dari loop primer ke loop sekunder. Ada dua jenis pembangkit uap yang digunakan dalam desain PWR sekarang, yaitu jenis *once through steam generator* (OTSG) dan U-Tube stem generator (UTSG). Pada masing-masing kasus, pendingin primer mengalir melalui tabung sedangkan air sekunder mengisi ruang yang berada di antara tabung-tabung dan *shell* (penyungkup) terluar. UTSG digunakan pada variasi PWR yang sangat luas dari Shippingport hingga desain terbaru 1300 MWe. Pendingin primer masuk dari bawah kiri, mengalir di dalam bundel tabung dalam area *hot leg*, terus melewati U-bend melalui cold leg, dan keluar pada outlet primer. Air umpan dimasukkan melalui annulus ke arah bawah, mengalir dengan arah yang berlawanan (*counter current*) di antara tabung-tabung U dan bergerak melalui daerah pembangkit uap di puncak. Campuran uap-air memasuki separator, uap diteruskan melalui nozel uap, sedangkan bagian air diresirkulasikan kembali ke arah bawah. [6,8]

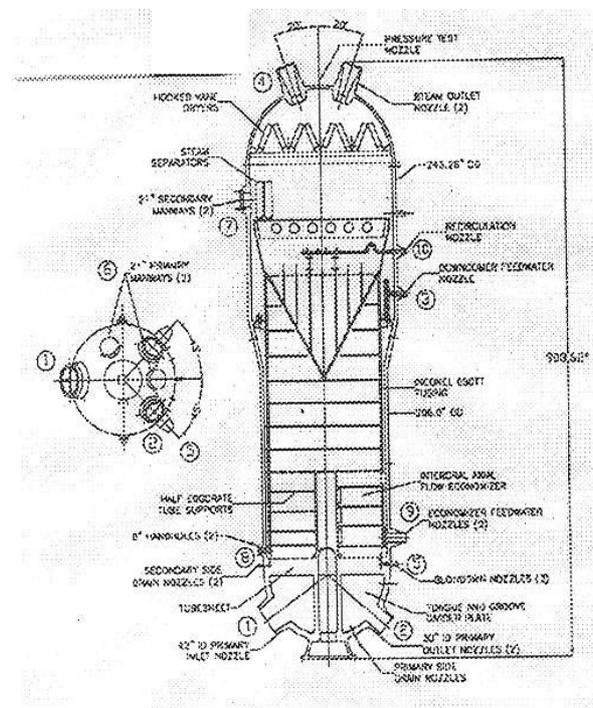
Desain PLTN Westinghouse menggunakan 4 pembangkit uap yang terpisah.. Masing-masing pembangkit uap tingginya 21 m berdiamter 4,5 m di bagian atas. Sistem PWR lainnya menggunakan 2, 3, atau 4 pembangkit uap dengan berbagai ukuran. Sistem Babcock & Wilcox menggunakan pembangkit uap satu arah (*once-through*). Pendingin primer masuk ke bagian atas pembangkit uap, lalu mengalir ke bawah melalui tabung yang lurus, dan keluar melalui dua outlet di bawah. Bagian yang bertekanan yang tinggi adalah *head hemisphere*, *tubesheet* dan tabung lurus di antara *tubesheet*. Air umpan memasuki pembangkit uap, mengalir ke bawah melalui annulus di dekat (sekitar) dinding mengalir ke atas di antara tabung-tabung, arah yang berlawanan untuk mengalir sepanjang dinding luar, dan keluar dari salah satu outlet uap. [6,8]

Perbandingan desain pembangkit uap jenis UTSG dan OTSG dapat dilihat pada Gambar 1. Data karakteristik contoh pembangkit uap jenis UTSG dan OSTG dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 2 dan gambar 2. memperlihatkan data pembangkit

uap desain PWR mutakhir yaitu APR 1400 yang didesain Korea Selatan..



Gambar 1. Pembangkit uap jenis UTSG dan OTSG [8]



Gambar 2. Pembangkit uap APR 1400 [19]

Tabel 1. Karakteristik Once Through Steam Generator (OTSG) dan U-Tube Steam Generator [6]

Item	OTSG		UTSG	
	Oconee 1	Unit maksimum	Surry	Westinghouse
Daya reaktor (MWe)	860	1300	822	1300
Output pans (MWth)	2568	3760	2441	3819
Tekanan sistem (bar)	149	153	153	153
Kec. Alir pendingin primer (10 <sup>6</sup> kg/h)	29,5	35,6	45,3	67,9
Suhu pendingin primer (°C)	317,8	329,7	318,7	332,0
Jumlah loop	2	2	3	4
Jumlah pompa	4	4	3	4
Jumlah pembangkit uap	2	2	3	4
Jumlah pembangkit uap	71,4	84,0	53,4	77,0
Tekanan desain sisi shell (bar)	5,0	7,4	4,8	7,9
Aliran uap pada beban penuh (10 <sup>6</sup> kg/h)	299	308	268,9	294,1
Suhu uap pada beban penuh (°C)	19,4	19,4	NA	NA
Superheat pada beban penuh (°C)	235	241	225,4	239,4
Suhu air umpan (°C)	15.530	16.000	13.388	6970
Jumlah tabung	15,9	15,9	22,2	17,4
Diameter tabung (mm)			4.784	7.665
Luas transfer panas (m <sup>2</sup> )				

Tabel 2. Data Parameter Sistem Pembangkit Uap Bererapa PLTN [9]

Parameter	PLTN PWR		
	UCN 3& 4 2825 MWt	System 80+ 3931 MWt	APR 1400 4000 MWt
Jumlah unit	2	2	2
Jenis	U-tube vertikal	U-tube vertikal	U-tube vertikal
Bahan Shell	Alloy 600	Alloy 690	Alloy 690
Tekanan sisi tabung, psia	2500	2500	2500
Suhu sisi tabung, °F	650	650	650
Aliran sisi tabung	60,75x10 <sup>6</sup>	82,9x10 <sup>6</sup>	83,3x10 <sup>6</sup>
Tekanan sisi shell, psia	1270	1200	1200
Suhu sisi shell, °F	575	570	570
Tekanan operasi, sisi tabung, nominal, psia	2250	2250	2250
Tekanan operasi, sisi shell, psia	1170	1100	1100
Tekanan uap, psia, pada daya penuh	1070	1000	1000
Suhu uap, °F, pada daya penuh	552,9	545	545
Aliran uap, lb/hr	6,365x10 <sup>6</sup>	8,82x10 <sup>6</sup>	8,975x10 <sup>6</sup>

## METODA

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 awal.
5. mempelajari berbagai pengalaman operasi pembangkit uap beberapa PLTN jenis PWR.

## PEMBAHASAN

Pembangkit uap yang tertua dan yang paling sederhana berbentuk boiler drum secara horizontal yang disebut boiler jenis Pot seperti terlihat pada Gambar 3. Model ini mulai digunakan untuk pembangkitan uap pada instalasi industri, lokomotif dan kapal uap. Model boiler ini mempunyai keterbatasan dalam tekanan dan ukuran. Jumlah uap yang dihasilkan mencapai 25.000 kg/jam dan tekanan 18 bar.. Dengan jangkauan kapasitas seperti itu, boiler ini menawarkan ongkos modal yang rendah, keandalan operasi, dan respon yang cepat terhadap perubahan beban dan tidak memerlukan

keterampilan kerja yang tinggi. 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 dan uap akan dipisahkan dari air oleh pemisahan alami pada *interface* uap-air. *Baffling* berfungsi untuk menyiapkan *downcomer* dan dari itu mengarahkan sirkulasi. Keterbatasan boiler jenis Pot ini terletak pada pemisahan permukaan uap yang bebas dari air yang menghasilkan kualitas uap dan kapasitas uap yang rendah. Boiler ini tidak mungkin untuk meningkatkan jumlah uap yang tinggi dan tekanan yang lebih tinggi.

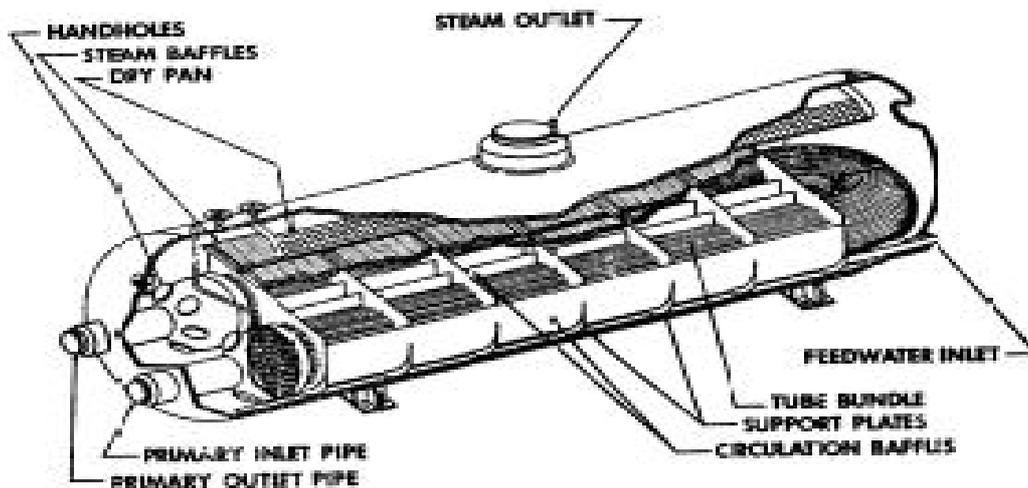
PLTN jenis PWR Shippingport adalah PLTN pertama yang dibangun di Amerika Serikat. PLTN ini termasuk yang pertama yang menghasilkan daya listrik 60 MWe. Tekanan uap diperoleh sebesar 600 psi pada daya penuh. Proyek Shippingport memberikan pengalaman berharga bagi teknologi PWR masa datang akan menuju tekanan uap yang mungkin lebih tinggi untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi biaya.<sup>[3]</sup>

Uap jenuh dipilih, karena telah dipertimbangkan tidak mungkin untuk membuat *superheat* uap 600 psi dengan suhu permukaan maksimum teras yang tersedia. Suhu maksimum diset pada 636 °F dengan basis data korosi zircaloy yang tersedia, dan persyaratan desain bahwa pendidihan pendingin di dalam teras selama kondisi tunak (*steady state*) normal perlu dicegah. *Superheater* pembangkit minyak tidak

diadopsi meskipun penggunaannya akan mengurangi biaya daya awal, dia tidak akan memberikan kontribusi pada teknologi reaktor.

Pembangkit uap Shippingport berbentuk *shell* dan tabung-tabung dengan pendingin reaktor di dalam tabung memanaskan air sekunder di dalam *shell*. Digunakan dua jenis pembangkit uap yang mempunyai tabung-tabung lurus maupun *U-bend*.. Penukar panas tabung lurus terdiri dari 2096 tabung steel, panjangnya 31 kaki dan berdiameter luar ½ inci. Tabung-tabung ini disusun dan dilas ke suatu lempeng tabung baja dan dikungkung dalam shell baja berdiameter 43 inci. Ujung-ujung porsi penukar panas dari unit mempunyai kepala (*head hemisferik*) dengan koneksi pipa 18 inci. *Steam drum* konvensional (boiler), difabrikasi seluruhnya dari baja karbon, berisikan 48 separator dan 20 pengering (*drier*) untuk mengurangi kandungan *moisture* dalam uap. Enam buah *downcomer* 8 inci dan 12 buah *riser* 8 inci menghubungkan penukar panas dengan *steam drum*.<sup>[3]</sup>

Setelah Shippingport dibangun PLTN berikutnya dengan daya yang lebih tinggi. Desain mutakhir adalah PLTN jenis PWR yang dikembangkan oleh Korea Selatan, yaitu APR 1400 dengan daya 1400 MWe. APR 1400 menggunakan pembangkit uap jenis *U-tube* vertikal, dengan tekanan uap didesain sebesar 1100 psia.<sup>[10]</sup>



Gambar 3. Boiler jenis Pot<sup>[4]</sup>

Dewasa ini ada dua jenis pembangkit uap yang banyak digunakan, yaitu jenis OTSG dan UTSG. Kelebihan OTSG dibandingkan UTSG untuk kapasitas yang sama adalah ukurannya yang kecil disebabkan pada OTSG tidak terdapat

pemisahan *moisture*. Dengan ukuran yang kecil tentunya memberikan *inventory* air sekunder yang rendah kira-kira seperenam dari *inventory* air UTSG. Korosi mungkin yang menjadi masalah pada OTSG karena air sekunder dievaporasisecara

sempurna, maka kimia air menjadi sangat penting. Semua PLTN hampir penuh mempunyai polishing kondensasi air, dan perlakuan kimia volatil air umpan. Perlakuan ini mencakup tambahan amonia untuk kontrol pH, dan hydrazine untuk kontrol oksigen. PLTN sistem Westinghouse dan Combustion menggunakan pembangkit uap tabung U (*U-tube steam generators*), Sistem Babcock & Wilcox menggunakan pembangkit uap satu arah (*once-through*).<sup>[6,8]</sup>

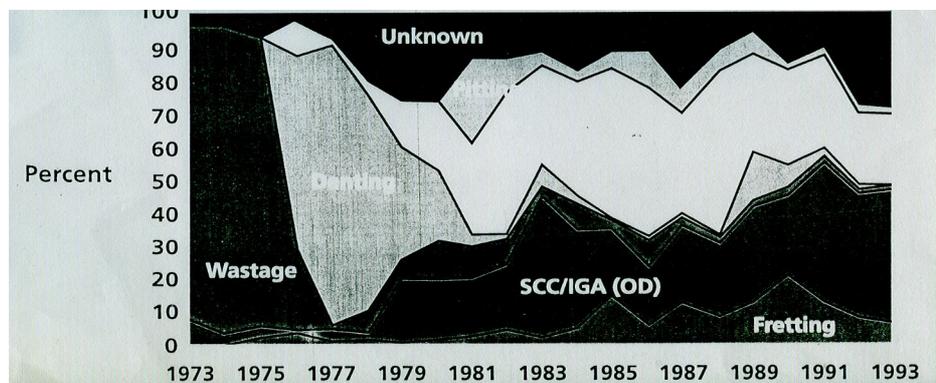
Sistem pembangkit uap pada dasarnya didesain untuk dapat dioperasikan 30 sampai 40 tahun. Namun dari beberapa pengalaman di lapangan banyak sistem pembangkit uap ini yang kurang berfungsi. Berbagai problem yang terjadi pada sistem pembangkit uap antara lain disebabkan terjadinya degradasi seperti *denting*, *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. Dalam Tabel 3 terlihat pengalaman kebocoran tabung pembangkit uap reaktor PWR. Kerusakan (*rupture*) tabung terjadi bila kebocoran tabung pembangkit uap melebihi dari kapasitas pompa

(*charging pump*). Sedangkan leak bila kebocoran masih dalam batas limit spesifikasi teknik, sebesar 1 gpm. Kebocoran 90 gpm dihasilkan lobang yang berdiameter kurang dari 1 inci, atau luasan 3 inci x ¼ inci.<sup>[10]</sup>

Gambar 4 menunjukkan prosentase penyebab degradasi pembangkit uap PLTN di Amerika Serikat antara tahun 1973-1993.<sup>[11]</sup> Terlihat bahwa reaktor PWR di Amerika Serikat banyak mengalami kegagalan tabung pembangkit uap. 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 penanggulangan.

Tabel 3. Pecahnya Tabung pembangkit Uap atau Kebocoran Besar<sup>[11]</sup>

NEGARA	PLTN	Daya (MWe)	Tanggal	Kebocoran maksimum (m <sup>3</sup> /h)
USA	Point beach 1	500	26-2-1975	30
USA	Surry 2	800	15-9-1976	75
Belgia	Doel 2	400	25-7-1979	50
USA	Prairie Island	500	2-10-1979	90
USA	Ginna	500	25-1-1982	170
USA	North Anna 1	940	15-7-1987	135
USA	North Anna 1	940	25-2-1989	17
USA	Mac Guire	1200	7-3-1989	120
Jepang	Mihama 2	470	9-2-1991	
USA	Palo Verde	1300	14-3-1993	80



Gambar.4 Prosentase penyebab degradasi pembangkit uap PLTN di dunia<sup>[12]</sup>

Ada dua faktor yang memberikan dampak menuju degradasi yaitu bahan tabung dan perlakuan panas tabung. Dua jenis bahan yang digunakan di USA adalah paduan Alloy 600 dan Alloy 690. Dua jenis perlakuan panas yang dilakukan terhadap bahan ini adalah meningkatkan karakteristik mekanik dan korosi adalah *mill annealing* dan *thermal treatment*. Berdasarkan laporan tahun 2003 dari 69 buah PLTN di Amerika Serikat terdapat 25 buah (36%) mempunyai pembangkit uap dengan tabung Alloy 600 *mill annealed*, 17 buah (25%) mempunyai pembangkit uap dengan tabung *thermally treated* Alloy 600, dan 27 buah (39%) dengan *thermally treated* Alloy 690.<sup>[13]</sup>

Pada desain awal, ketika semua pembangkit uap PLTN menggunakan *mill annealed* Alloy 600, terlihat bahwa penipisan dinding tabung pembangkit uap dominan disebabkan oleh kimia air. Selain itu yang menjadi perhatian adalah *denting* yang dihasilkan dari korosi dekat penyangga *carbon steel* dan timbulnya produk korosi di dalam *crevices* antara tabung-tabung dan pelat penyangga tabung. Degradasi pada tabung ini lebih lanjut memberikan dampak berupa retaknya tabung, dan inspeksi tabung yang lebih sering. Degradasi ini juga mengakibatkan pergantian pembangkit uap yang terbuat dari *mill annealed* Alloy 600. Pada awal tahun 1980-an penggunaan *thermally treated alloy 600* digunakan pada 17 buah PLTN. Sejak 1989 pergantian tabung maupun desain baru menggunakan *thermally treated* Alloy 690. Bahan ini lebih tahan terhadap pengaruh bahaya korosi, selain itu digunakan piringan penyangga tabung dari baja untuk meminimalkan terjadinya *denting*. Selain Inconel 690 digunakan pula Incoloy 800 untuk bahan pembangkit uap pada reaktor PWR. Dari hasil pengujian terlihat bahwa koefisien keausan pada alloy 690 lebih cepat empat kali dibandingkan dengan alloy 800. Perbedaan kecepatan keausan dipengaruhi oleh komposisi lapisan oksida. Lapisan oksida Incoloy 800 lebih protektif dibandingkan lapisan oksida Inconel 690 dalam air bersuhu tinggi. Kerugian keausan (*wear loss*) bertambah dengan berkurangnya konsentrasi oksigen dari permukaan.<sup>[14]</sup>

Pembangkit uap reaktor PWR merupakan penukar panas yang besar yang menggunakan panas dari pendingin primer untuk membuat uap pada sisi sekunder. Transfer energi termal terjadi dalam pembangkit uap dengan melewati satu cairan melalui tabung-tabung, dimana fluida lainnya (atau campuran gas dan fluida) dilewatkan melalui luaran tabung. Aliran silang (*cross-flow*) kecepatan tinggi sepanjang tabung mengindikasikan vibrasi tabung. Aliran vibrasi terjadi disebabkan kecepatan aliran yang tinggi dan *clearance* yang kecil antara tabung-tabung

dan penyangganya. Adalah sulit untuk menghilangkan vibrasi tabung. Jika amplitudo vibrasi menjadi lebih besar, kerusakan atau kegagalan berupa degradasi mekanik seperti fatik dan keausan dapat terjadi. Kondisi keausan (*wear*) tabung pembangkit uap adalah salah satu dari mekanisme degradasi parah pada PLTN.

Dari pengalaman pengoperasian PLTN jenis PWR di Jepang selama 20 tahun pertama sejak mulai beroperasinya PLTN pertama bulan Juli tahun 1966, terdapat problem pembangkit uap yang mencapai 40%. Untuk itu telah dilakukan upaya untuk menanggulangi permasalahan tersebut, antara lain dalam aspek pengoperasian dan desain serta persyaratan untuk meningkatkan kemampuan perawatan dan inspeksi. Dalam hal aspek pengoperasian, tindakan yang dilakukan seperti mengadopsi perlakuan volatile (AVT) untuk air sistem sekunder, dan pengoperasian hidrazine yang tinggi, injeksi asam borat, pembersihan air panas pada waktu shutdown yang terjadual, untuk mencegah serangan intergranular. Telah dilakukan pemilihan bahan paduan Inconel 690, pemantauan manufaktur bar antivibrasi, dan perbaikan desain.<sup>[7]</sup>

Pada tahun 2009 dilakukan pergantian 2 unit pembangkit uap dari San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS) unit 2, Southern California dilakukan oleh perusahaan Mitsubishi Heavy Industries (MHI). Pembangkit uap ini termasuk yang terbesar di dunia, yaitu berdiameter 7 meter dan berbobot 580 metric-ton. Dan terdiri dari 10.000 buah tabung perpindahan panas. Tabung pembangkit uap dengan luas permukaan lebih dari 10.000 m<sup>2</sup> per unit dan berdinding sangat tipis (1 mm) merupakan barrier (penghalang) pembangkit uap kedua dan ketiga. Kemudian tahun 2010 ini direncanakan pergantian pembangkit uap untuk SONGS unit 3. MHI telah manufaktur komponen PWR sejak kebangkitan PLTN di Jepang dan merupakan satu-satunya industri Jepang yang membuat pembangkit uap. Pembangkit uap untuk SONG ini lebih besar 1,5 kali dalam ukuran dan lebih berat dan mengandung hampir 3 kali jumlah tabung pembangkit uap. Pergantian komponen maupun pergantian pembangkit uap telah membantu memperpanjang umur operasi PLTN PWR baik di USA maupun Jepang.<sup>[15]</sup>

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.<sup>[16]</sup>

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, ukuran, 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 4 dapat dilihat karakteristik pembangkit uap beberapa PLTN jenis PHWR dan PWR yang menggunakan penyangga kisi kisi.<sup>(5,16)</sup>

Tabel 4. Pembangkit uap model PHWR<sup>[5,16]</sup>

PLTN	Jumlah Pembangkit Uap	Bahan Tabung	Tahun Operasi	Penyangga Tabung
PHWR Cernavoda-1	4	800	1995	Kisi SS
PHWR Cernavoda-2	4	800	196	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 Mc Guire 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 Mc Guire 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

Tentang perkembangan pembangkit uap PLTN jenis VVER 1500 yang dikembangkan Rusia, yang menjadi pertimbangan apakah memilih pembangkit uap secara vertical atau horizontal.. Pembangkit uap secara vertikal seperti digunakan pada PLTN lain pastilah mempunyai kelebihan dan kekurangan. Desain Rusia lebih menyukai pembangkit uap secara horozontal. Keuntungannya bahwa beban uap moderat pada permukaan evaporasi (0,2 – 0,3 m/sec) memberikan digunakannya skema pemisahan yang sederhana dengan catu dari moisture yang dibutuhkan pada uap adalah lebih andal.<sup>[18]</sup>

EPRI telah mendukung upaya yang dilakukan industri untuk meningkatkan keandalan

pembangkit uap. Setelah berumur 40 tahun, perlu dilakukan pergantian pembangkit uap. Sangat diperlukan pengontrolan kimiawi yang tepat. Jika ada penipisan (*thinning*) melebihi kriteria atau indikasi abnormalitas dalam tabung, maka tabung dilakukan *plugging*. *Plugging* akan mencegah air melewati tabung.

## KESIMPULAN DAN SARAN

Dari kajian dapat diketahui desain pembangkit uap PLTN jenis PWR 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. Pembangkit uap memerlukan manufaktur dan desain yang tinggi. 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. 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.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. RM. WILSON, *Steam Generator Design and Manufacture*, Westinghouse Nuclear Power Training Program, October 1994.
2. <http://www.world-nuclear.org/info/info32.html>, Nuclear Power Reactors. 2010
3. Naval Reactors Branch, Westinghouse Electric Corporation, Duquesne Light Company, *The Shippingport Pressurized Water Reactor*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc, Reading, Massachusetts, 1958.
4. STELLIGA, D.J., DYKE, J.M., *Nuclear Heated Steam Generators*, Canadian Electrical Association, Toronto, 1970.
5. P.M.HENDSBEE, et al, *First Non-EM Steam generator Replacement in US a Success*, Mc Graw Hill, USA, 1994.
6. S.J.GREEN, S.J., HETSRONI, G., *PWR Steam Generators*, International Multiphase Flow, Volume 21, 1995.
7. OKAZAKI, A., MATSUI, M., WATANABE, M., MINE, Y., UCHIYAMA, M., TAKABA, O., *Design Improvements of PWR Steam Generators Based on Operating Experiences*, Smart 11
8. KNIEF, R.A., *Nuclear Energy Technology*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
9. *Standard Safety Analysis Report*, APR 1400
10. *The Steam generator Rupture at Indian Point*, [sg\\_tube.htm](http://sg_tube.htm), 2010.
11. LIBMANN, J., *Elements of Nuclear Safety*, Institut De Protection Et De Surete Nucleaire, Les Ulis codex A, France.
12. DIERCKS, D.R., SHACK, W.J., MUSCARA, J., *Overview of Steam Generator Tube*

*Degradation and Integrity Issues*, Proceeding of the 24<sup>th</sup> Water REACTOR Safety meeting, Bethesda, MD, USA, October 21-23, 1996.

13. Fact Sheet on Steam Generator Tube Issues, 2010,
14. In-sup Kim, Jin-ki Hong, hyung-Nam Kim, Ki-sang Jang, *Wear Behaviour of steam Generator Tubes in Nuclear Power Plant Operating Conditions*, 17<sup>th</sup> International Conference on structural Mechanics in reactor Technology (SMIRT 17), Prague, Czech Republic, August 2003.
15. MHI complete delivery of 2 Replacement Steam Generators to California's Largest Electric Utility, 2010.
16. JAMES C SMITH, *How to Improve Steam Generator Reliability*, Nuclear Engineering International, Sutton-Surry, England, May, 1995.
17. DRAGUNOV, Y.G., LUKASEVICH, B.I., TRUNOV, N.H., KHARCHENKO, S.A., SOTSKOV, V.V., *PGV-1500 Steam Generator : New Problems and Solutions*, Atomic energy Vol. 99 No. 6, 2005

#### TANYA JAWAB

##### Pertanyaan :

Mengapa banyak terjadi penggantian tube pembangkit uap untuk PLTN PWR di USA? Dan banyak juga diganti dengan pembangkit uap jenis CANDU?

(Sri Sudadiyo, PTRKN-BATAN)

##### Jawaban :

Ada beberapa persoalan, terjadinya degradasi yang terlalu besar sehingga dilakukan plugging. Pada PWR digunakan sistem penyangga pelat, sedangkan CANDU menggunakan sistem penyangga kisi.