

EVALUASI KONDISI PIPA-PIPA ALAT PENUKAR PANAS JE01 BC02 REAKTOR GA SIWABESSY PASCA INSPEKSI

Santosa Pujiarta, Dede Solehudin Fauzi, Syafrul, Aep Saepudin Catur,
Bambang Murjati, Amril, Royadi
PRSG-BATAN

ABSTRAK

EVALUASI KONDISI PIPA-PIPA ALAT PENUKAR PANAS JE01 BC02 REAKTOR GA SIWABESSY PASCA INSPEKSI. Telah dilakukan evaluasi hasil inspeksi/ pemeriksaan pipa-pipa alat penukar panas JE01 BC02 reaktor GA Siwabessy (RSG-GAS) dengan tujuan untuk menentukan tindak lanjut atas kondisi pipa-pipa (*tubes*) terperiksa dan menjamin bahwa peralatan penukar panas dapat dioperasikan dengan aman. Pemeriksaan dilakukan dengan uji tak merusak (*NDT*) menggunakan metode arus pusar (*Eddy Current*). Hasil evaluasi menyatakan beberapa tube perlu mendapatkan perhatian pada pemeriksaan berikutnya, meskipun persentasenya masih sangat kecil kira-kira 10 %, yaitu pada tube yang mengalami cacat penipisan dan cacat cekungan. Hasil pengukuran ini masih dipengaruhi oleh adanya kotoran yang menempel pada dinding pipa sehingga hasil pengukuran menjadi kurang akurat. Beberapa pipa mengalami penyempitan oleh kerak atau sediment Kerak terbentuk akibat dari kualitas air pendingin sekunder yang kurang baik dan sistem bola pembersih pipa tidak berfungsi secara maksimal, Setelah kerak yang menempel dibersihkan, pipa-pipa penukar panas dapat difungsikan kembali. Alat penukar panas reaktor GA. Siwabessy masih berada dalam batas dan kondisi yang aman untuk dipergunakan hingga 5 tahun yang akan datang, sampai pada pemeriksaan berikutnya.

Kata kunci : Pipa-pipa, Alat penukar panas, Eddy Current

ABSTRACT

EVALUATION OF HEALTHINESS OF THE HEAT EXCHANGER TUBE OF JE01 BC02 INSTALLED AT THE GA. SIWABESSY REACTOR AFTER INSPECTION. Evaluation of healthiness of the heat exchanger tube of JE01 BC02 installed at the GA. Siwabessy reactor after inspection has been conducted. Purpose of this measure is to determine the corrective action, if any, of the tubes examinee and to ensure that the heat exchanger can be operated safely. Examination was conducted by the non-destructive testing (*NDT*) of Eddy Current methods. The evaluation results reveal that some heat exchanger tubes encountered minor wall thinning of approximately 10 % and dent defect. Attention should be taken in the next examination. It is deemed that the results may still be influenced by the presence of impurities deposited on the pipe wall causing improper measurement results. Some pipes experiencing constringency by a scale or sediment at which it is formed due poor quality of secondary cooling water and due cleaning system tubes ball malfunction. In order to refunctioning the tubes, a corrective action by cleaning the all suspected tubes have been take. Evaluation from the all measures implemented can be recognized that the heat exchanger is still safe be used up to 5 years or until the next inspection .

Key word : Tubes, Heat exchanger, Eddy Current

PENDAHULUAN

Peralatan penukar panas atau yang biasa disebut HE (*heat exchanger*) merupakan peralatan pendukung utama dalam proses pemindahan panas dari teras reaktor menuju ke lingkungan. Panas yang dibangkitkan dari teras akan dibawa oleh air pendingin primer dan dipindahkan menuju air pendingin sekunder melalui HE, selanjutnya panas dilepaskan kelingkungan dengan hembusan angin dari *blower* yang cukup besar pada menara air pendingin. Peralatan penukar panas yang terdapat di reaktor serba guna G.A Siwabessy terdiri dari 2 buah tabung alat penukar panas dan dirancang mampu

memindahkan total panas dari teras sebesar 32,400 MW.

Jenis dari alat penukar panas di RSG-GAS adalah jenis pipa dan cangkang posisi tegak (*shell and tube*), dimana air pendingin sekunder mengalir pada sisi pipa dan air pendingin primer mengalir pada sisi cangkang dengan arah aliran masuk dan keluar masing-masing pendingin berada pada sisi yang berlawanan arah (*2/2, counter flow*).

Pemeriksaan alat penukar panas sangat diperlukan untuk dapat mengetahui kondisi mekanis yang terkini, agar dapat dijamin kelanjutan dan keselamatan operasi. Petunjuk tentang pemeriksaan alat penukar panas terangkum di dalam buku

petunjuk perawatan dan perbaikan (*Maintenance and Repair Manual, MRM*)²⁾ dari sistem pendingin primer RSG-GAS. Pemeriksaan telah dilakukan pada tanggal 15 Mei 2013 sampai 4 Juni 2013 dengan cara uji tak merusak menggunakan metode arus pusar (*Eddy Current*). Tujuan pemeriksaan adalah untuk mengetahui kemungkinan penipisan dan mengukur besarnya penipisan pipa alat penukar panas pada sisi pendingin sekunder yang diakibatkan oleh korosi atau erosi pipa. Hasil pengukuran ketebalan pipa tersebut menunjukkan kualitas atau kondisi dari pipa penukar panas pada saat ini dan digunakan untuk menjamin keamanan pengoperasian dari alat penukar panas hingga pada pemeriksaan berikutnya.

Pipa dari peralatan penukar panas terbuat dari bahan baja austenitik (*austenitic steel*) 1.4541/DIN 17.440 setara dengan SS304/ANSI, dengan diameter luar 22 mm (\varnothing 7/8 inch) dan ketebalan 1 mm (0.04 inch). Pemilihan bahan tersebut dimaksudkan untuk mengurangi laju korosi pipa dan mudah di dekontaminasi.

DESKRIPSI SISTEM PENDINGIN SEKUNDER

Sistem pendingin sekunder RSG-GAS adalah merupakan media pelepasan panas terakhir pada instalasi reaktor, energi panas dari sistem pendingin primer dipindahkan menuju sistem pendingin sekunder melalui alat penukar panas yang selanjutnya dilepas ke udara oleh unit menara pendingin jenis *forced draft*. Terdapat 6 modul dalam 2 jalur (*train*) menara pendingin pada sistem pendingin sekunder. Menurut data spesifikasi disainnya sistem ini dilalui oleh air pendingin dengan suhu masuk 39,2 °C dan suhu keluar 32 °C, pada beban termal penuh (maksimum) sebesar 33000 kW. Air pendingin sekunder disirkulasikan

oleh 2 unit pompa dengan total laju alir sebesar 3900 m³/jam³⁾.

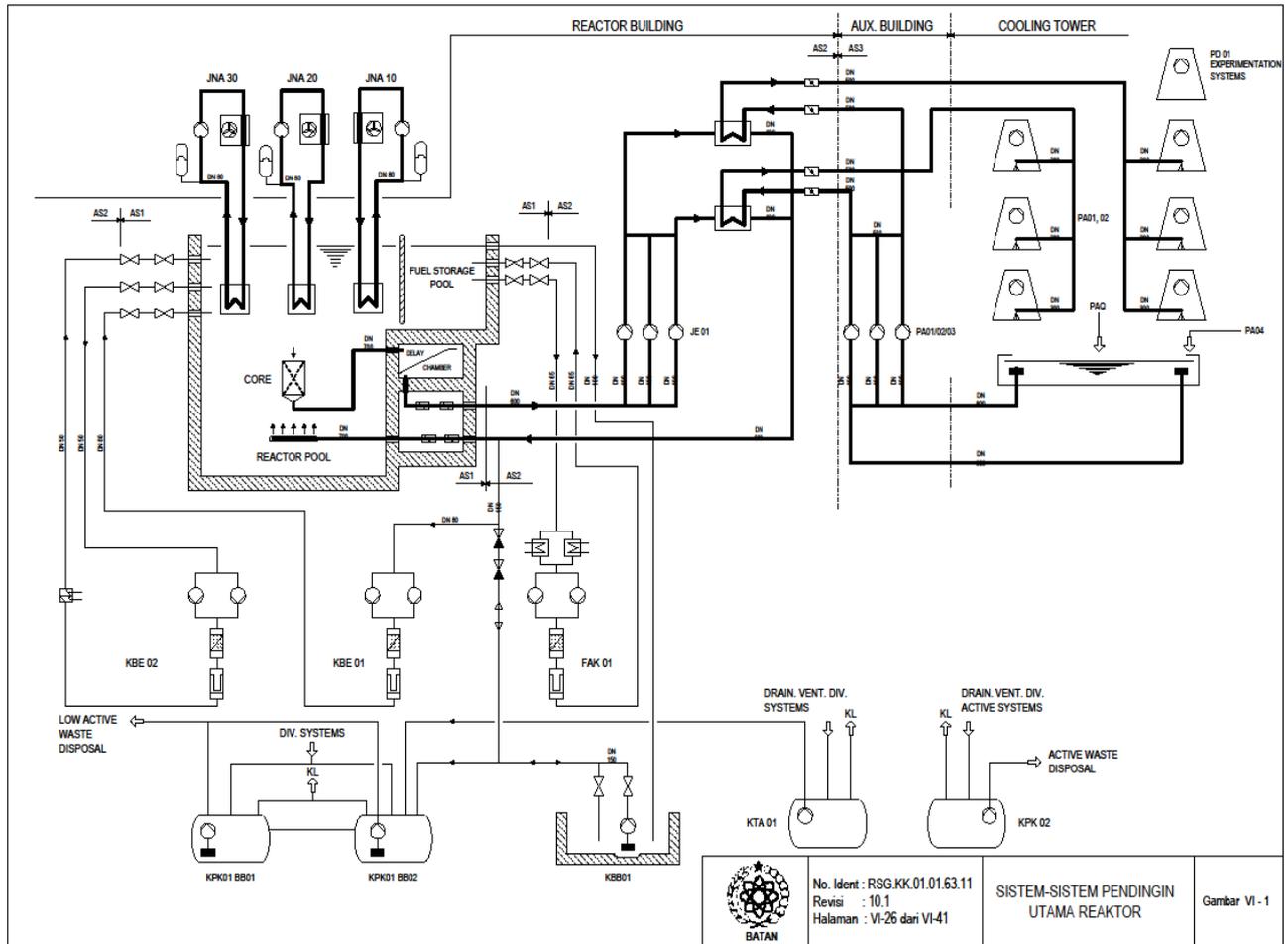
Pemipaan sistem pendingin sekunder terbagi menjadi 2 jalur, masing-masing jalur dilengkapi dengan sistem injeksi bahan kimia, sistem sirkulasi bola karet pembersih dan sebuah alat penukar panas. Ke dua jalur pemipaan di layani oleh 3 unit pompa sirkulasi dengan moda operasi 2 unit beroperasi dan satu unit berfungsi sebagai cadangan apabila terdapat gangguan pada saat pengoperasian.

Jalur pemipaan sistem pendingin sekunder yang berada di dalam gedung reaktor di buat dari bahan baja tahan karat sedangkan pada bagian di luar gedung menggunakan bahan baja karbon.

Sistem injeksi bahan kimia pada sistem ini dimanfaatkan untuk proses pengendalian kualitas air pendingin sehingga laju korosi pipa dapat dikendalikan pada tingkat yang aman sedangkan sistem sirkulasi bola karet digunakan untuk membersihkan pipa (*tube*) alat penukar panas dari kerak yang menempel.

Tabel 1. Data rancangan dari sistem pendingin sekunder.¹⁾

Rancangan tekanan	6 bar
Rancangan suhu	60 °C
Rancangan laju aliran	3900 m ³ /jam
Jumlah unit paralel	2 x 50 %
Jumlah pompa sirkulasi	3 x 50 %
Total head pompa	29 m
Daya motor pompa	220 kW
Rancangan beban panas total	33000 kW
Jumlah modul menara pendingin	6
Rancangan beban panas per modul	5500 kW
Suhu air masuk menara pendingin	39.2 °C
Suhu air keluar menara pendingin	32.0 °C
Suhu udara basah	28.0 °C



Gambar 1. Gambar skematik sistem pendingin reaktor GA.Siwabessy

DESKRIPSI ALAT PENUKAR PANAS (*HEAT EXCHANGER*)

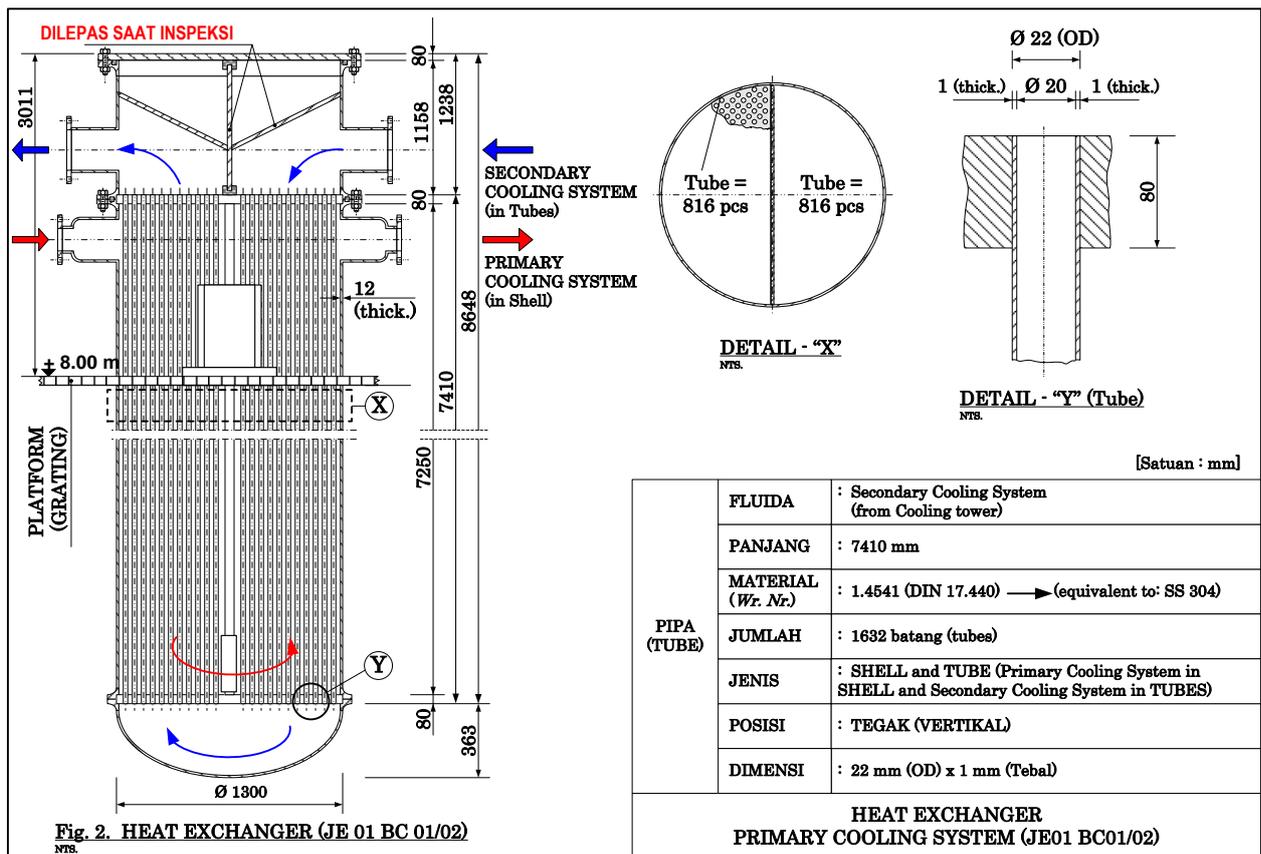
RSG-GAS mempunyai 2 unit alat penukar panas dan ditempatkan di ruang sel primer. Alat ini berfungsi untuk memindahkan panas yang dari sistem pendingin primer ke sistem pendingin sekunder. Masing-masing alat penukar panas dirancang dengan kemampuan memindahkan panas reaktor sebesar 50 % pada beban penuh yaitu pada daya 30 MW atau dengan moda operasi 2 x 50 %.

Tipe dari alat penukar panas adalah *multi-pass shell and tube* yang dipasang secara vertikal dengan sambungan pipa pendingin primer dan sekunder berada di bagian atas tabung penukar panas. Tipe alat penukar panas disebut dengan *multi-pass* karena terdapat dua jalur aliran di dalam tabung penukar panas, satu jalur berfungsi sebagai sisi masuk air pendingin sedangkan jalur yang lain berfungsi sebagai sisi keluar.

Komponen dari alat penukar panas terbuat dari bahan baja austenitik sama seperti yang digunakan pada pemipaan sistem pendingin primer. Didalam tabung penukar panas terdapat penyekat yang berfungsi untuk membagi alat penukar panas menjadi 2 bagian aliran sehingga air pendingin sisi masuk dan keluar tidak bercampur. Air pendingin primer mengalir ke sisi masukan penukar panas pada bagian atas tabung, kemudian mengalir kebawah melewati sisi *shell* dan kembali keluar melalui sisi keluaran yang berada pada bagian atas alat penukar panas. Sedangkan air pendingin sekunder mengalir melalui sisi masukan pendingin sekunder yang terletak di sebelah atas pipa masukan pendingin primer, kemudian turun kebawah melewati pipa-pipa penukar panas hingga penutup tabung sisi bagian bawah (*dishead*), selanjutnya kembali naik ke atas melewati pipa-pipa penukar panas pada sisi yang lain dan keluar melalui pipa keluaran yang terletak di bagian atas pipa keluaranair pendingin primer. (lihat gambar 2)

Tabel 2. Rancangan parameter dari alat penukar panas. ¹⁾

Tipe	Multi-pass, shell and tube, 2/2
Rancangan tekanan	10 bar
Rancangan suhu	60 °C
Kerapatan seal penyekat	10 ⁻³ mbar.l/s
Jumlah alat penukar panas (HE = heat exchanger)	2 x 50 %
Kemampuan memindahkan panas per HE	16200 kW
Suhu air pendingin primer pada sisi masuk HE	49 °C
Suhu air pendingin primer pada sisi keluar HE	40 °C
Kecepatan aliran massa air primer untuk setiap HE	430 kg/s
Suhu air pendingin sekunder pada sisi masuk HE	32 °C
Suhu air pendingin sekunder pada sisi masuk HE	40 °C
Kecepatan aliran massa air sekunder untuk setiap HE	485 kg/s
Tekanan operasi sisi masuk primer	1,4 bar
Tekanan operasi sisi keluar primer	0,9 bar
Tekanan operasi sisi masuk sekunder	0,4 bar
Tekanan operasi sisi keluar sekunder	0 bar
Kehilangan tekanan sisi shell (primer)	0,5 bar
Kehilangan tekanan sisi shell (sekunder)	0,4 bar
Luas permukaan perpindahan panas	780 m ²
Dimensi tube	Diameter 22 mm x 1 mm
Panjang tube	7410 mm
Jumlah tube per jalur	816 buah
Diameter luar shell	1300 mm
Panjang keseluruhan alat penukar panas	± 9000 mm



Gambar 2. Dimensi alat penukar panas reaktor GA. Siwabessy JE01 BC01/02

PERAWATAN ALAT PENUKAR PANAS

Alat penukar panas pada suatu reaktor nuklir menjadi peralatan yang sangat penting karena akan dipergunakan untuk memindahkan panas yang dibangkitkan akibat proses reaksi fisi di dalam teras, apabila peralatan ini tidak dapat berfungsi dengan baik untuk menjaga suhu di dalam teras maka dapat berakibat yang fatal. Oleh karena itu peralatan ini harus selalu dijaga dan dirawat untuk menjamin keselamatan pengoperasian reaktor nuklir. Fungsi lain dari perawatan adalah untuk memperpanjang usia peralatan dan dapat digunakan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya kerusakan pada peralatan, sehingga tidak terjadi kerusakan yang lebih besar.²⁾

Untuk mengetahui kemampuan perpindahan panas dari alat penukar panas dapat di pantau dari harga ΔT pada sisi masuk dan keluar penukar panas pada sisi pendingin sekunder, selanjutnya dihitung besarnya laju perpindahan panas yang terjadi dengan menggunakan rumus sebagai berikut;⁶⁾

$$Q = mC_p \times \Delta T \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

- Q = Panas yang dipindahkan
- m = massa air pendingin
- C_p = panas jenis air pendingin
- Δ T = selisih suhu air pendingin masuk dan keluar penukar panas

Untuk menjaga supaya peralatan penukar panas (HE) dapat berfungsi secara maksimal maka perlu dilakukan perawatan dan pemeriksaan yang akan dilakukan dalam kegiatan perawatan harian, 5 tahunan dan 10 tahunan. Dalam kegiatan perawatan harian dilakukan inspeksi secara visual dengan melihat dan memeriksa kekedapan sil dan *packing* pada setiap sambungan flange untuk mengantisipasi adanya kebocoran air pendingin, serta melakukan pemeriksaan getaran atau vibrasi pada alat penukar

panas dengan menggunakan tangan, hal ini untuk mengantisipasi adanya getaran yang berlebihan yang dapat berdampak retaknya sambungan pada alat penukar panas. Sedangkan pada perawatan 5 tahunan dilakukan pemeriksaan dengan test uji tekanan dan pemeriksaan bagian dalam *tube* alat penukar panas dengan membuka bagian atas dan bawah tabung penukar panas. Untuk pemeriksaan bagian dalam dilakukan dengan metode *Eddy Current* untuk mengetahui korosi dan kerusakan bagian *tube*.

Untuk perawatan 10 tahunan dilakukan sampling pemeriksaan sambungan las pipa dengan menggunakan metode radiography atau metode *Non Destructive Test* lainnya.²⁾

TATA KERJA PEMERIKSAAN PENUKAR PANAS

Untuk menjamin supaya program pengoperasian reaktor dapat berlangsung dengan lancar, aman dan selamat maka perawatan menjadi hal utama yang harus diperhatikan. Salah satu kegiatan perawatan adalah melakukan pemeriksaan bagian dalam pipa penukar panas yang dilakukan pada program perawatan 5 tahunan. Pada perawatan 5 tahunan dilakukan pemeriksaan pada bagian dalam *tube* ²⁾.

Di dalam kegiatan perawatan 5 tahunan yang dilaksanakan pada bulan Juni 2013, telah dilakukan pemeriksaan pipa penukar panas JE01 BC02 sisi pendingin sekunder dengan cara uji tak merusak menggunakan metode pengujian arus pusar *Eddy Current Test* untuk melihat kemungkinan terdapat cacat (*defect*) pada permukaan *tube* yang dapat berakibat kebocoran air pendingin primer menuju sistem pendingin sekunder .

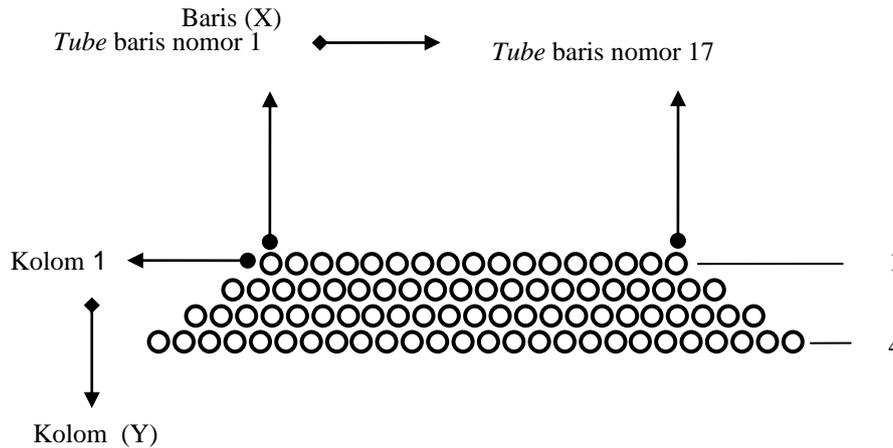
Adapun alat *Eddy Current* yang dipergunakan mempunyai spesifikasi seperti terlihat pada tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi alat *Eddy Current*.⁸⁾

Jenis instrumen	NORTEC 19-e II SPO-3196, Dual Frequency
Pabrik pembuat	STAVELEY, USA
Jenis probe/sensor	ECT Bobbin Probe, Differential Mode,
Diameter luar probe/sensor	19.5 mm
<i>Tube</i> standar kalibrasi	Material SS-304; I.D. 20 mm, Thickness 1mm

Pemeriksaan atau pengukuran ketebalan pipa penukar panas dilakukan secara berurutan. Penomoran dibuat menggunakan matrik kolom (Y) dan baris (X) dimulai dari sudut sisi kanan atas, kolom dihitung dari kanan ke kiri sedangkan baris

dihitung dari atas ke bawah. Urutan dari penomoran diperlihatkan pada Gambar 3. Penomoran ini perlu untuk mengantisipasi supaya tidak terdapat pipa yang terlewatkan dalam pemeriksaan.



Gambar 3. Metode penomoran Tube

Sebelum melakukan pengukuran peralatan perlu dikalibrasi. Dalam kalibrasi alat instrumen arus pusing digunakan bahan pipa yang mempunyai ukuran dan spesifikasi sama atau sesuai dengan bahan yang akan diukur yaitu menggunakan bahan pipa baja austenitik SS-304, diameter dalam (I.D) 20 mm, dan ketebalan 1mm. Hasil pengukuran kalibrasi selanjutnya disesuaikan/diplotkan pada grafik kalibrasi dan digunakan sebagai acuan dalam pemeriksaan. Kalibrasi alat serta pemeriksaan

menggunakan metode arus pusing (*Eddy Current*) mengacu pada standar *ASME Section V Article 8* ^{4,8)}.

Cacat pada permukaan dinding pipa penukar panas di klasifikasikan menjadi 5 bagian kelas atau tingkatan seperti ditunjukkan pada tabel 4. Masing-masing kelas menunjukkan besarnya kerusakan yang terjadi pada permukaan pipa. Jika kerusakan pada permukaan pipa telah mencapai kelas 3, maka dianjurkan untuk dilakukan penutupan pipa (*plugging*) atau penggantian pipa sehingga tidak terjadi kerusakan lebih lanjut.

Tabel 4. Klasifikasi kerusakan tube. ⁴⁾

Kelas atau Tingkatan kerusakan tube			
Kelas/Tingkatan	Range kerusakan permukaan sisi dalam pipa (%)	Range kerusakan permukaan sisi luar pipa (%)	Keterangan
1	0 - 20	0 - 20	
2	21-40	21-40	
3	41-60	41-60	
4	61-80	61-80	
5	81-100	81-100	

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan alat penukar panas adalah mutlak untuk dilakukan pada sebuah reaktor riset demi menjaga keamanan dan keandalan peralatan, sehingga segala resiko mengenai kerusakan, gangguan pengoperasian dan kecelakaan nuklir

dapat dihindarkan. Dari pemeriksaan 1632 buah tube diperoleh hasil sebagai berikut :

- a. 1 buah tube telah ditutup (*plugged*)
- b. 2 buah tube pada sisi masuk alat penukar panas mengalami cacat (*defect*) penipisan/korosi ± 10 % dan 4 buah tube pada sisi keluar mengalami cacat cekungan (*dent*) ± 10 % dengan rincian sebagai berikut:

Tabel 5. Data hasil pemeriksaan *Eddy Current Test* ⁸⁾

No.	Posisi row	Besarnya cacat	Posisi cacat	Jenis cacat
1	10 - 8	10 %	± 2,93 meter	Penipisan
2	19 - 16	10 %	± 1,95 meter	Penipisan
3	40 - 9	10 %	± 3,52 meter	cekungan
4	40 - 24	10 %	± 6,73 meter	cekungan
5	41 - 24	10 %	± 5,80 meter	cekungan
6	42 - 6	10 %	± 2,10 meter	cekungan

- c. 36 buah *tube* mengalami penyempitan akibat endapan yang menempel pada bagian dalam permukaan pipa. Dari hasil pemeriksaan secara keseluruhan telah disusun dalam Tabel 6, sedangkan gambar posisi pipa yang mengalami cacat dan pengecilan diameter ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.

Tabel 6. Resume hasil pemeriksaan *Eddy Current Test* JE01 BC02 . ^{4,8)}

Nomor Kode / seri Alat penukar panas	Kelas dan prosentase cacat Penipisan pada dinding pipa penukar panas						Di tutup	Cacat cekungan	TOTAL TUBE
	0 Tak terdeteksi	1 0-20 (<20)	2 21-40 (> 20)	3 41-60 (> 40)	4 61-80 (> 60)	5 81-100 (> 80)			
JE01BC02	1625	2	0	0	0	0	1	4	1632
%	99.57	0.12					0.06	0.25	100

Hasil pemeriksaan *Eddy Current* menunjukkan bahwa kondisi alat penukar panas di Reaktor G.A Siwabessy masih dalam kondisi yang baik dan layak untuk dioperasikan dalam rangka mendukung pengoperasian reaktor. Namun ada beberapa tube yang perlu mendapatkan perhatian pada pemeriksaan berikutnya, yaitu pada tube yang mengalami cacat penipisan dan cacat cekungan. Apabila pada pemeriksaan berikutnya terjadi peningkatan nilai prosentase cacat maka perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut, untuk kondisi sekarang karena masih sangat kecil (< 20 %) terdapat kemungkinan hasil pengukuran tersebut masih dipengaruhi oleh adanya kotoran yang menempel pada dinding pipa sehingga hasil pengukuran menjadi kurang akurat.

Dari hasil pengukuran *Eddy Current* terbukti bahwa tidak terdapat cacat atau kerusakan yang berarti pada pipa-pipa penukar panas yang dapat membahayakan pengoperasian alat penukar panas. Dan dari hasil pengukuran tersebut dapat dipergunakan sebagai acuan dalam kegiatan pengoperasian reaktor dan menjamin bahwa pipa penukar panas masih aman dan layak untuk dioperasikan hingga 5 tahun mendatang

Pada beberapa tube terbentuk endapan kerak yang berasal dari material terlarut yang berada didalam air pendingin sekunder. Pengendapan terjadi karena disebabkan oleh kualitas air pendingin yang kurang baik akibat dari pengendalian kualitas

air yang kurang maksimal dan laju air pendingin yang melambat pada daerah tertentu, sehingga memberikan kesempatan kepada material terlarut untuk menempel di dinding permukaan pipa. Selain itu pengendapan terjadi juga disebabkan oleh sistem bola pembersih pipa penukar panas tidak beroperasi secara maksimal, sehingga kerak senantiasa muncul dan berkembang pada daerah tertentu.

Namun endapan atau kerak yang menempel pada permukaan dalam pipa tidak dapat disebut sebagai cacat karena tidak menyebabkan penetrasi dinding pipa atau mengurangi integritas dinding pipa, tetapi dapat mengakibatkan terjadinya cacat korosi karena proses oksidasi pada permukaan pipa pipa yang tertutup⁷⁾. Dampak yang dapat ditimbulkan dengan adanya kerak yang menempel pada dinding pipa penukar panas adalah akan berkurangnya laju perpindahan panas akibat terjadinya penebalan pada dinding pipa tersebut. Sehingga dengan demikian pipa pada bagian tersebut dapat dikatakan masih baik dan tidak terdapat kerusakan, apabila pada dinding pipa tidak ditemukan korosi pada pemeriksaan menggunakan *Eddy Current*. Setelah dilakukan pembersihan kerak yang menempel pada dinding pipa penukar maka pipa dapat dipergunakan kembali sebagai penukar panas dengan kemampuan seperti semula

Pada waktu pemeriksaan ini juga telah dilakukan penggantian *packing* dan sil karet

penyekat, baik itu sil penyekat aliran masuk dan keluar air pendingin sekunder pada *secondary water chamber* dengan *bundle head*. Penggantian dilakukan karena sil karet telah mengeras dan sebagian mengalami kerusakan sehingga dimungkinkan terjadinya kebocoran air pendingin apabila dipasang kembali. Setelah perawatan dan pemeriksaan alat penukar panas selesai dilaksanakan dilakukan tes tekanan hidrostatik dan uji fungsi pengoperasian alat penukar panas. Hal ini untuk memeriksa sil perapat dan *packing* pada setiap sambungan apakah telah terpasang dengan benar, dan untuk mengantisipasi kemungkinan kebocoran air pendingin pasca pemeriksaan alat penukar panas. Pengujian hidrostatik dilakukan dengan menggunakan pompa pengisi tekanan pada pipa pendingin sekunder hingga 1,4 bar, sedangkan untuk uji fungsi dilakukan dengan mengoperasikan sistem pendingin sekunder selama 15 menit sambil diperiksa setiap sambungan pada alat penukar panas.⁷⁾

KESIMPULAN

Dari hasil kegiatan evaluasi data pemeriksaan alat penukar panas JE01 BC02 ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kerak atau endapan terbentuk karena kualitas air pendingin sekunder yang kurang baik dan sistem bola pembersih pipa tidak berfungsi secara maksimal, setelah kerak yang menempel dibersihkan, pipa-pipa penukar panas dapat difungsikan kembali.
2. Dari hasil pemeriksaan 1632 pipa-pipa penukar panas JE01 BC02, ditemukan 1 buah pipa telah ditutup (*plugged*), 2 buah pipa mengalami penipisan dinding pipa hingga 10% dan 4 buah pipa mengalami cacat cekungan (*dent*) sampai 10%
3. Alat penukar panas reaktor GA. Siwabessy masih berada dalam kondisi dan batas aman untuk dipergunakan hingga 5 tahun yang akan datang, meskipun 1 buah pipa penukar panas

telah ditutup (*plugged*) pada tahun 2006 karena mengalami penipisan yang cukup besar ($\pm 50\%$).⁹⁾

DAFTAR PUSTAKA

1. BATAN, "Laporan Analisis Keselamatan", LAK, Volume 1, Bab 6, Rev.10.1, No. Ident. RSG.KK.01.01.63.11, Serpong, Tahun 2011.
2. INTERATOM. GmbH, "*Primary Cooling System JE01*", *Maintenance and Repair Manual, Part II, Chapter 2.1*, Serpong, Tahun 1987
3. ANONIMOUS, "*Eddy Current Examination Method for Installed Non Ferromagnetic Heat Exchanger Tubing*", *ASME Section V Article 8, Appendix*, New York, USA, Tahun 2010
4. HASANUDIN, "Laporan Hasil Pemeriksaan *Eddy Current Test Tube Heat Exchanger JE01 BC02*", RSG-GA.Siwabessy, BATAN, Nomor Laporan : 3-ECT/ EMA/TEK/6/2013, Serpong, 10 Juni 2013
5. SRI NITISWATI, DKK," Pemeriksaan tabung penukar kalor E101 UUTR menggunakan *Eddy Current*", Abstrak, Serpong, Tahun 2005
6. DEAN A. BARTLETT, "*The Fundamentals of Heat Exchangers, American Institute of Physics*", <http://www.aip.org/tip/INPHFA/vol-2/iss-4/p18.pdf>, Tahun 1996,
7. SANTOSA PUJIARTA, "Laporan kegiatan pemeliharaan dan pemeriksaan alat penukar panas (JE01BC02) RSG-GAS", No. Ident.:RSG.SR.01.03.52.13, Serpong, tahun 2013
8. SUWIGNYO HADI, "Laporan Pemeriksaan Tube Heat Exchanger Item No. JE01 BC02 Dengan *Eddy Current Test*", Report No. 047/WTO/ET/VI/13, Serpong, Juni 2013
9. DJUNAIDI, "Pemeliharaan Tube-Side Penukar Kalor RSG-GAS Jangka Pendek Dan Jangka Panjang", Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir, ISSN 1978-0176, Yogyakarta, 21-22 November 2007.

