



TESIS-TM185400

**ANALISA PENIPISAN CONDENSER TUBE
BERDASARKAN DATA EDDY CURRENT**

**FATCHUR ROZAQ, ST
NRP. 2111750078011**

**DOSEN PEMBIMBING
Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Manajemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan



TESIS-TM185400

**ANALISA PENIPISAN CONDENSER TUBE
BERDASARKAN DATA EDDY CURRENT**

FATCHUR ROZAQ, ST
NRP. 2111750078011

DOSEN PEMBIMBING
Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD.

Program Magister
Bidang Keahlian Managemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

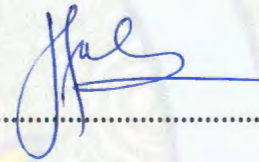
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
FATCHUR ROZAQ
02111750078011

Tanggal Ujian: 18 Januari 2020
Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:
Pembimbing:

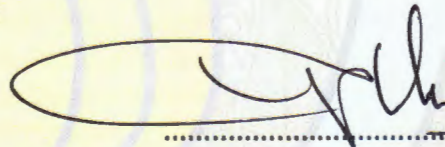
1. Fahmi Mubarak, S.T., MSc., Ph.D
NIP 197801152003121002



.....

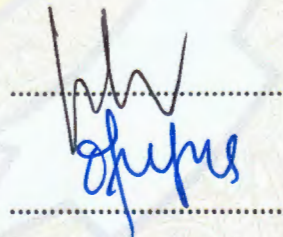
Penguji:

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo, M.Eng
NIP 1972004051997021001



.....

2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T.
NIP 197407032000031001

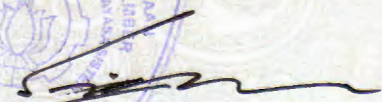


.....

3. Suwarno, S.T., MSc., Ph.D
NIP 198005202005011003

Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem




Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng., Sc.
NIP 196604021989031002



TESIS-TM185400

**ANALISA PENIPISAN CONDENSER TUBE
BERDASARKAN DATA EDDY CURRENT**

**FATCHUR ROZAQ, ST
NRP. 2111750078011**

**DOSEN PEMBIMBING
Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD.**

**Program Magister
Bidang Keahlian Managemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020**

Halaman ini sengaja dikosongkan



TESIS-TM185400

**ANALISA PENIPISAN CONDENSER TUBE
BERDASARKAN DATA EDDY CURRENT**

FATCHUR ROZAQ, ST
NRP. 2111750078011

DOSEN PEMBIMBING
Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD.

Program Magister
Bidang Keahlian Managemen Energi
Kerjasama PT. Indonesia Power
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri Dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
FATCHUR ROZAQ, ST
NRP: 2111750078016

Tanggal Ujian: 18 Januari 2020

Periode Wisuda: Maret 2020

Disetujui oleh:

Pembimbing:

1. **Fahmi Mubarak, ST, MSc, PhD.**
NIP. 197801152003121002

Penguji:

1. **Prof. Dr. Eng. Ir. Prabowo M.Eng.**
NIP. 1972004051997021001
2. **Dr. Eng.Sutikno**
NIP. 197407032000031001
3. **Suwarno PhD.**
NIP. 198005202005011003

Kepala Departemen Teknik Mesin dan Rekayasa Sistem

Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP. 196604021989031002

Halaman ini sengaja dikosongkan

Analisa Penipisan *Condenser Tube* Berdasarkan Data *Eddy Current*

Mahasiswa Nama : Fatchur Rozaq, ST
Mahasiswa ID : 2111750078011
Pembimbing : Fahmi Mubarak, ST, MSc, PhD.

ABSTRAK

Kondensor di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah peralatan penting yang berfungsi untuk mengubah uap dari keluaran turbin bertekanan rendah menjadi air agar dapat disirkulasikan kembali untuk mengisi boiler. Perawatan sangat diperlukan untuk menjaga kondisi kondensor agar dapat beroperasi sesuai dengan desainnya. Untuk mengetahui kondisi kondensor, terutama pada bagaian *tube*-nya maka dilakukan pengujian *eddy current* pada *tube condenser*. Data pengujian ini dapat digunakan untuk mengukur tingkat penipisan pipa kondensor yang terbuat dari bahan titanium murni *Grade 2*. Ketebalan awal *tube condenser* adalah 0,5 mm. Jika ditemukan *tube condenser* dengan ketebalan lebih dari 0,05 mm (mengalami tingkat penipisan 90%) maka *tube condenser* tersebut akan diplug untuk mencegah terjadinya kebocoran. Pada tahun 2019, dilakukan uji *eddy current* pada seluruh *tube condenser* di unit 1 PLTU Labuan, provinsi Banten untuk posisi inlet dan outlet pada sisi A dan sebagian *tube condenser* posisi inlet dan outlet pada sisi B. Hasil pengujian *eddy current* menunjukkan bahwa penipisan *tube condenser* dengan tingkat penipisan pipa $\geq 90\%$ adalah sebesar 52 pipa (1,46% dari total pipa).

Berdasarkan data sinyal *eddy current* yang diperoleh sepanjang *tube condenser*, diindikasikan terjadi penipisan pada sisi *outer diameter* (OD) yaitu sisi eksternal. Data menunjukkan bahwa penipisan pada sisi eksternal umumnya berada pada posisi daerah *support tube*. Hal ini menunjukkan bahwa penipisan ini terjadi karena proses keausan dalam jarak yang pendek. Kondisi ini sering disebut sebagai *fretting*. *Fretting* ini menyebabkan keausan pada eeksternal *tube condenser* secara perlahan akibat vibrasi turbulensi aliran uap yang mengalir pada area tersebut dan juga vibrasi akibat kondensasi uap ke air.

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan dengan memodelkan penampang *solid condenser* secara 2 dimensi untuk mempelajari aliran *steam* didalam kondensor. Parameter yang digunakan adalah kondisi beban *Turbine Maximum Continuous Rating* (TMCR) dengan *flowrate steam* sebesar 157.239 kg/s, luasan inlet 48 m², kecepatan masuk steam 5.46 m/s. Untuk inlet fluida air pendingin (air laut) diset pada temperatur masuk 30°C dan temperatur keluar sebesar 37°C. Dari hasil simulasi diperoleh kecepatan aliran uap tertinggi terjadi pada area sekitar konfigurasi *tube* bagian bawah dan turbulensi pada pinggir *tube*. Dengan perubahan *main steam flow* (dikarenakan ada kebocoran uap) dan temperatur air pendingin (dikarenakan adanya deposit) akan mengakibatkan kenaikan kecepatan dan turbulensi pada area yang sama.

Dengan menjaga kualitas dan jumlah uap yang masuk ke kondensor diharapkan turbulensi aliran uap akan dapat dikontrol dengan baik. Kualitas air laut yang masuk juga harus dijaga untuk mengurangi munculnya deposit pada *tube*

condenser. Hal tersebut penting untuk menjaga kondensor agar dapat bekerja dengan performa penuh.

Kata kunci : kondensor, pipa titanium, eddy current, fretting, *condenser tube*, CFD

Halaman ini sengaja dikosongkan

Thinning of condenser tube analysis through eddy current data collection

Mahasiswa Nama : Fatchur Rozaq, ST
Mahasiswa ID : 2111750078011
Pembimbing : Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD.

ABSTRACT

Condenser is one of many important equipment in a Steam Power Plant (PLTU). The condenser work to convert steam from low-pressure turbine back into water to be recirculated and reused in the boilers to produce steam. Maintenance of condenser is critical task to ensure the system can operate according to the design. Eddy current testing on the condenser tube is one of many method that can be use to assess the condenser condition. The result from this testing can be used to measure the thinning level of condenser tube which made from pure titanium grade 2. The initial thickness of the condenser tube is 0.5 mm and if eddy current measured a thickness value of less than 0.05 mm (thinning level of 90%), the condenser tube will be plugged to prevent seawater leakage. In 2019, an eddy current test was carried out on all condenser tubes in PLTU unit 1 Labuan, Banten province for the inlet and outlet positions on side A and half of the condenser tubes inlet and outlet positions on side B. The eddy current tests show about 52 tubes experiencing thinning level of $\geq 90\%$ (1.46% of total tubes).

Based on eddy current signal data obtained along the condenser tube, thinning occurs on the outer diameter (OD) side, namely the external side. Data shows that thinning on the external side is generally occur in the support tube area. This shows that this thinning happen because of the wear process in a short distance. This condition is often referred to fretting. This fretting causes slow wear on the external tube condenser due to vibration generated by turbulence steam flow and the condensation of steam to water.

Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations are performed by modeling a 2-dimensional condenser cross section to study the flow of steam in the condenser. The parameters being utilised are the Turbine Maximum Continuous Rating (TMCR) consition with steam flowrate of 157,239 kg/s, inlet area of 48 m², steam entry speed of 5.46 m/s. The seawater coolant inlet is set to a temperature of 30 °C and outlet temperature of 37 °C. The simulation generate highest steam flow velocity around the bottom tube configuration area, while the turbulence due to steam flow occurs at the edge of the tube. The change in the main steam flow (due to a steam leak) and the temperature of the cooling water (due to a deposit) will result in an increase in steam velocity and create and turbulence in the same area.

Ensuring the quality and controlling the amount of steam entering the condenser will minimize the appearance of turbulence steam. The seawater quality also need

to be controlled to minimize deposit formation in the internal area of condenser tube. This is essential to keep the condenser work with it full capacity.

Keywords : *condenser, titanium tube, eddy current, fretting, condenser tube. CFD*

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia, rahmat, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul “Analisa Penipisan *Condenser Tube* Berdasarkan Data *Eddy Current*”. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, do’a, dan dukungan dari beberapa pihak, maka penyusunan tesis ini tidak dapat berjalan sesuai harapan. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua: Bapak Muhyidin dan Ibu Dewi Asiyah, keluarga: Istri Taufika Kusuma, Amd, Anak Amira dan Khalisa yang senantiasa memberikan do’a, dorongan dan dukungan tanpa henti kepada penulis.
2. Dosen pembimbing Bapak Fahmi Mubarok, ST, MSc, PhD. yang telah memberikan saran, pencerahan, dan motivasi dalam proses penyelesaian tesis ini.
3. Bapak dan Ibu dosen Departemen Teknik Mesin ITS yang telah mendidik penulis selama masa perkuliahan.
4. Seluruh rekan – rekan program S2 Manajemen Energi KKIP yang ikut membantu dalam proses penulisan tesis ini.
5. Seluruh rekan-rekan Divisi Pengembangan Talenta Kantor Pusat PT Indonesia Power dan Staf Sekretariat Departemen Teknik Mesin atas segala bantuan dan dukungan selama menjalani program S2 Manajemen Energi.
6. Seluruh rekan – rekan kerja di Labuan OMU dan MSU bidang Services atas dukungan dan bantuannya dalam penyelesaian tesis ini.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per-satu atas segala bantuan serta dukungan untuk penyusunan tesis ini.

Selain itu penulis berharap semoga tesis ini dapat memberikan manfaat yang sebesar-besarnya.

Surabaya, Januari 2020

Fatchur Rozaq

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
ABSTRAK	iii
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian	3
BAB II KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Condenser Unit 1 PLTU Labuan</i>	5
2.1.1 Sistem Air Pendingin pada condenser (tube side)	4
2.1.2 Sistem Condenser (shell side)	5
2.2 <i>Literature Review condenser tube</i>	13
2.3 Titanium tube condenser	23
2.4 Condenser Tube failure	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram alir Penelitian	29
3.2 Studi literatur	30
3.3 Pemeliharaan condenser unit 1 PLTU Labuan	35
3.4 Metode Pengujian Non Destructive Test (NDT) Eddy current Condenser Tube	39

3.5 Data Awal Pengujian Material	41
3.6 Hasil Pengujian Sampel Material	45
3.7 Data sampel air pendingin kondensor	58
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN HASIL.....	59
4.1 Data pengujian eddy current condenser unit 1 PLTU Labuan	59
4.1.1 Hasil pengujian eddy current condenser unit 1 PLTU Labuan	59
4.1.2 Data signal eddy current.....	63
4.1.3 Identifikasi lokasi penipisan condenser tube.....	67
4.2 Simulasi numerik distribusi aliran 2D pada condenser.....	72
4.3 Root Cause Problem Solving (RCPS) penipisan condenser tube unit 1 PLTU Labuan.....	77
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	79
DAFTAR PUSTAKA	81
BIODATA PENULIS	83
LAMPIRAN.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tipe condenser unit 1 PLTU Labuan.....	5
Gambar 2.2 Piping and Instrument Diagram (P&ID) air pendingin dari laut menuju condenser.....	6
Gambar 2.3 Piping and Instrument Diagram (P&ID) air pendingin pada condenser.....	6
Gambar 2.4 Sistem laluan aliran air keluar dari condenser menuju laut kembali .	7
Gambar 2.5 Aliran air pendingin dan uap pada condenser unit 1 PLTU Labuan	10
Gambar 2.6 Drawing Condenser PLTU Labuan	11
Gambar 2.7 Kurva karakteristik condenser unit 1 PLTU Labuan.....	13
Gambar 2.8 Jumlah tube yang diplugged terhadap waktu operasi (Aronson Et al, 2013).....	14
Gambar 2.9 Tapproge Cleaning system pada condenser tube (Elshiekh Dafallah. Et al., 2009).....	16
Gambar 2.10 Scaling and fouling pada condenser tube akibat mineral air pendingin (Golovin. Et al., 2016).....	17
Gambar 2.11 Sampel Material Kerusakan condenser tube (H.M. Shalaby. Et al., 2011).....	18
Gambar 2.12 Optical Micrograph etsa area permukaan, menunjukkan bahwa kehilangan TiH pada internal dan eksternal permukaan yang berlubang, Jauh dari permukaan (a) dan dekat dengan permukaan (b), struktur α mengandung acicular atau grains (200x)., (H.M. Shalaby. Et al., 2011).....	19
Gambar 2.13 SEM micrograph tube surface berlawanan dengan area yang berlubang, menunjukkan a. Deposit, b. Kerusakan erosi dan korosi, c. Kerusakan erosi meluas	20
Gambar 2.14 Sampel condensor tube terlihat pecah karena erosi uap dimana kondisi tube kosong (tanpa air pendingin), (Melanie montgomery, 2014)	21
Gambar 2.15 Mekanisme wear titanium condenser tube, (Fei-Jun Chen, 2013) .	22
Gambar 2.16 Conductivity MgO pada berbagai temperatur dan ketebalan, (A. J. Slifka, B. J. Filla, and J. M. Phelps, (1998))	23
Gambar 2.17 Mechanical properties material titanium	24

Gambar 2.18 Thermal conductivity Mineral yang terkandung dalam air laut.....	26
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 3.2 Karakteristik ketahanan condenser tube terhadap jumlah air pendingin (Dongfang Turbine Work)	32
Gambar 3.3 Karakteristik ketahanan condenser tube terhadap perubahan temperatur air pendingin (Dongfang Turbine Work).....	33
Gambar 3.4 Karakteristik operasi condenser dengan satu CWP (Dongfang Turbine Work).....	33
Gambar 3.5 Pemeriksaan elbow perpipaan sisi masuk dan keluar condenser waterbox.....	36
Gambar 3.6 Pemeriksaan cathodic protection pada condenser waterbox	36
Gambar 3.7 Pemeriksaan kebocoran pada condenser tube	37
Gambar 3.8 Pemeriksaan hotwell condenser	38
Gambar 3.9 Pemeriksaan debris filter condenser.....	39
Gambar 3.10 Prinsip kerja Eddy current test	40
Gambar 3.11 Mikroskop optik	41
Gambar 3.12. Scanning Electron Microscope Hitachi FlexSEM 1000 equipped with EDS from EDAX system.	42
Gambar 3.13 Parameter specimen pada pengujian kekuatan Tarik (ASTM A 370, 2010)	42
Gambar 3.14 Material etsa untuk pengetesan titanium condenser tube (ASTM E 407, 2010).....	43
Gambar 3.15 Sampel material <i>condenser tube</i>	45
Gambar 3.16 Penampang sampel <i>tube</i> nomor 1,2, dan 3 menggunakan mikroskop perbessaran 500x dan 1000x	46
Gambar 3.17 Gambar 3.17 Struktur mikro pipa sampel material	48
Gambar 3.18 Spesimen uji kekerasan sampel tube	50
Gambar 3.19 grafik uji tarik sampel tube	51
Gambar 3.20 Pengujian deposit yang menempel pada bagian dalam sampel condenser tube.....	53
Gambar 3.21 Pengujian SEM EDS sampel tube.....	55
Gambar 3.22 Hasil Analisa air laut sisi masuk condenser Unit 1 PLTU Labuan	57

Gambar 3.23 Titik pengambilan sampir air laut (air pendingin) setelah keluar dari condenser Unit 1 PLTU Labuan.....	57
Gambar 4.1 Grafik prosentase tingkat penipisan condenser tube hasil pengujian eddy current.....	60
Gambar 4.2 Mapping hasil pengujian condenser tube unit 1 PLTU Labuan, 2019	63
Gambar 4.3 Jenis sinyal defect pada alat eddy current.....	64
Gambar 4.4 Data Sinyal cacat / defect eddy current pada inlet condenser 1A, defect terdapat pada bagian OD / sisi luar tube	65
Gambar 4.5 Data Sinyal cacat / defect eddy current pada outlet condenser 1A, terlihat untuk defect terdapat pada bagian OD / sisi luar tube.....	66
Gambar 4.6 Data Sinyal cacat / defect eddy current pada inlet condenser 1B, terlihat untuk defect terdapat pada bagian OD / sisi luar tube.....	66
Gambar 4.7 Data Sinyal cacat / defect eddy current pada outlet condenser 1B, terlihat untuk defect terdapat pada bagian OD / sisi luar tube.....	66
Gambar 4.8 Data Sinyal cacat / defect eddy current dari ujung ke ujung (rear to front)	67
Gambar 4.9 Sinyal Eddy current sepanjang tube pada beberapa tube sisi inlet A	68
Gambar 4.10 Sinyal Eddy current sepanjang tube pada sisi outlet A	69
Gambar 4.11 Sinyal Eddy current sepanjang tube pada sisi inlet B.....	69
Gambar 4.12 Sinyal Eddy current sepanjang tube pada sisi outlet B.....	70
Gambar 4.13 Siklus ideal randkine PLTU dengan <i>reheating</i>	71
Gambar 4.14 Pemodelan simulasi 2D <i>condenser</i> menggunakan CFD.....	72
Gambar 4.15 Velocity contour dan streamline simulasi 2D CFD kondensor	73
Gambar 4.16 Turbulence kinetic energy pada simulasi CFD 2D kondensor	73
Gambar 4.17 Kontur kecepatan simulasi 2D <i>condenser</i> pada beban TMCR dengan variasi penambahan 30% <i>mainsteam flow</i>	74
Gambar 4.18 Kontur turbulensi energi kinetik simulasi 2D <i>condenser</i> pada beban TMCR dengan variasi penambahan 30% <i>mainsteam flow</i>	75
Gambar 4.19 Kontur kecepatan simulasi 2D <i>condenser</i> pada beban TMCR dengan variasi perubahan temperatur air pendingin.....	76

Gambar 4.20 Kontur turbulensi energi kinetik simulasi 2D condenser pada beban TMCR dengan variasi perubahan temperatur air pendingin	76
Gambar 4.21 RCPS penipisan condenser tube Unit 1 PLTU Labuan	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 SPESIFIKASI CONDENSER.....	12
Tabel 2.2 Kandungan mineral dalam air pendingin yang meyebabkan kerusakan condenser tube (Fayard Et al, 2010).....	15
Tabel 3.1 Strategi pemeliharaan condenser unit 1 PLTU Labuan.....	36
Tabel 3.2 Hasil pengujian struktur mikro sampel condenser tube	48
Tabel 3.3 Hasil uji kekerasan sampel condenser tube	49
Tabel 3.4 Hasil uji Tarik.....	50
Tabel 3.5 Hasil pengujian komposisi kimia sampel tube	51
Tabel 4.1 Hasil pengujian eddy current condenser tube unit 1 PLTU Labuan.	60

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Condenser merupakan peralatan penting pada boiler untuk Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). *Condenser* berfungsi untuk merubah uap (steam) dari Low Pressure turbin menjadi air. Dalam close loop system pada boiler, air yang telah menjadi uap kemudian akan dikondensasikan pada sistem condenser untuk digunakan kembali sebagai bahan baku uap (feedwater) pada boiler. Dengan menggunakan air yang sama, maka biaya operasi dapat dihemat karena tidak diperlukan pemurnian dan perlakuan kimia khusus seperti air yang akan masuk ke sistem boiler. Tentu saja masih tetap diperlukan air penambah (make-up water) dengan jumlah sesuai dengan water losses yang terjadi selama siklus air tersebut.

Kegagalan pada sistem condenser sangat berpengaruh pada produksi dan kehandalan unit pembangkit. Kegagalan yang sering dialami pada condenser adalah kebocoran condenser tube. Indikasi adanya kebocoran pada condenser tube adalah kenaikan nilai ion chlorin (Cl⁻), kenaikan nilai konduktivitas air dan penurunan pH pada air hasil kondensasi (kondensat) dan hal ini akan menaikkan kemungkinan terjadinya kegagalan akibat korosi. Selain itu kondisi ini juga akan ikut berpengaruh terhadap sistem lain pada boiler seperti pada line feedwater heater.

Media pendingin yang digunakan pada condenser adalah air laut yang telah diolah. Air laut ini dipompa oleh Circulating Water Pump (CWP) yang dilengkapi dengan saringan/filter menuju condenser tube dan selanjutnya dikembalikan ke laut. Saringan/filter yang terpasang pada jalur aliran air laut ini berfungsi untuk menyaring partikel-partikel kasar agar tidak masuk dalam sistem condenser tube dan menyebabkan deposit, erosi atau sumbatan. Air laut yang digunakan akan diberi perlakuan kimia dengan sodium hypochlorite untuk membunuh biota laut sehingga mengurangi kemungkinan tumbuhnya biota laut pada internal condenser tube. Sesuai dengan acuan dari manufaktur, maka jumlah sodium hypochlorite yang perlu ditambahkan terus menerus adalah 1 mg/L. Untuk mengontrol kualitas air laut, maka jumlah residual ion chlorin diukur secara rutin pada sisi keluar condenser

secara periodik. Hasil pengukuran ini dijadikan acuan untuk penambahan sodium hypochlorite antara 3 – 4 mg/L agar tetap menjaga agar nilai residual chlorin dalam batas yang dapat mematikan biota laut.

Untuk mencegah terjadinya kerusakan katrastopik yang dapat merembet ke sistem lainnya pada boiler maka perlu dilakukan inspeksi secara rutin tentang kondisi condenser terutama pada bagian condenser tube. Metode eddy current test merupakan salah satu cara yang dilakukan untuk mengetahui tingkat penipisan yang terjadi pada condenser tube. Setelah pengukuran Eddy current, dilakukan pula proses pembersihan pada sisi internal condenser tube dari deposit dengan ball cleaning.

Pada bulan juli, tahun 2019, dilakukan pengujian condenser tube unit 1 PLTU Labuan dengan metode eddy current. Pengujian eddy current dilakukan pada seluruh inlet dan outlet condense. Hasil dari pengujian ini kemudian dibuat mapping dan pada tube yang telah mengalami penipisan lebih dari 90% dilakukan proses plugging. Data prosentase penipisan condenser tube ini diolah pada penelitian ini untuk dapat melihat kecenderungan kerusakan yang terjadi pada condenser tube secara keseluruhan. Hasil dari analisa data yang ada kemudian dapat digunakan untuk mengetahui mekanisme penipisan yang terjadi dan melakukan review strategi – strategi dalam pemeliharaan dan pengoperasian condenser sehingga dapat menghindari kerusakan katastropik pada condenser dan peralatan yang lain.

Simulasi CFD dengan memodelkan condenser PLTU Labuan secara dua (2) dimensi, untuk memperoleh distribusi perpindahan panas yang terjadi. Dengan pemodelan geometri condenser berupa solid, input data aliran uap masuk dan aliran air pendingin sisi masuk dan keluar akan diperoleh data persebaran perpindahan panas yang terjadi. Dari simulasi ini diharapkan diperoleh gambaran area kritis pada proses perpindahan panas yang terjadi sehingga dapat disimulasikan variasi jumlah uap yang masuk dan temperatur air pendinginnya.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimanakah sebaran data penipisan *condenser tube* unit 1 PLTU Labuan setelah beroperasi selama sembilan (9) tahun?
2. Bagaimana pemodelan simulasi CFD 2D distribusi aliran fluida pada proses perpindahan panas pada Kondensor?
3. Adakah langkah – langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi laju penipisan *condenser tube* yang terjadi pada program pemeliharaan selanjutnya?

1.3 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang diambil untuk menganalisa permasalahan di atas, antara lain:

1. Data hanya dibatasi pada data eddy current distribusi penipisan condenser tube unit 1 PLTU Labuan.
2. Simulasi aliran fluida dengan fluent 2D pada condenser unit 1 PLTU Labuan.
3. Data eddy current digunakan untuk mengetahui mekanisme penipisan yang terjadi pada condenser tube.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisa data sebaran penipisan *condenser tube* pada *condenser* unit 1 PLTU Labuan.
2. Melakukan pemodelan simulasi 2D aliran fluida yang terjadi pada pengoperasian *condenser* unit 1 PLTU Labuan
3. Mengetahui mekanisme penyebab penipisan *condenser tube* pada *condenser* unit 1 PLTU Labuan.

1.5 Relevansi dan Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dengan adanya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sisi Keandalan Peralatan

Dari assesmen yang dihasilkan dapat meningkatkan keandalan pengoperasian *condenser*, untuk menghindari kegagalan / kerusakan pada *condenser* itu sendiri dan peralatan lain yang diakibatkan kegagalan *condenser*.

2. Dari sisi efisiensi pembangkit

Dengan handalnya *condenser* akan berdampak terjaganya efisiensi *condenser* dan efisiensi pembangkit secara keseluruhan.

3. Sisi Perencanaan Pemeliharaan

Rekomendasi dalam *failure analysis* penipisan *condenser tube* diharapkan diperoleh langkah – langkah yang dapat diambil untuk bisa mengurangi laju penipisan *condenser tube* sehingga dapat dimitigasi langkah yang tepat dalam strategi pemeliharaan.

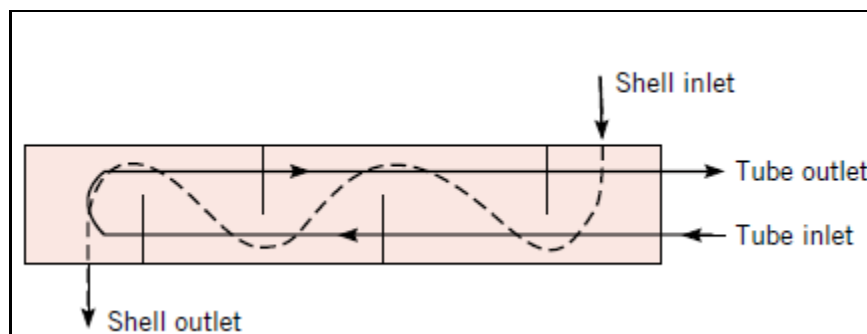
BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 *Condenser Unit 1 PLTU Labuan*

Condenser mempunyai sistim penampungan air kondensat yang dinamakan *condenser hotwell*. *Condenser* sisi air laut terbagi menjadi dua sisi (A dan B) yang menerima suplai air laut dari *supply culvert discharge header* yang disupplai oleh *Circulating Water Pump (CWP)*.

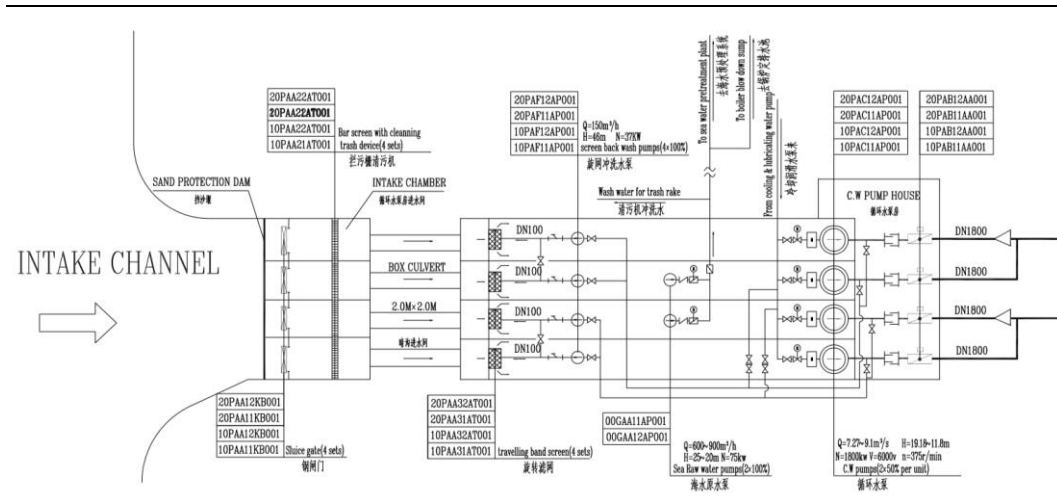
Pada *condenser* PLTU Labuan unit 1 mempunyai tipe *shell and tube heat exchanger Single Shell Double Pass Steam Surface Condenser*. Yang terbagi menjadi dua sisi yaitu sisi A dan sisi B dimana air laut masuk melalui inlet A dan B pada bagian tengah *condenser water box* sisi A dan B melewati *tube bundle* menuju *outlet water box* sisi A dan B pada bagian ujung *condenser* secara *counterflow*. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



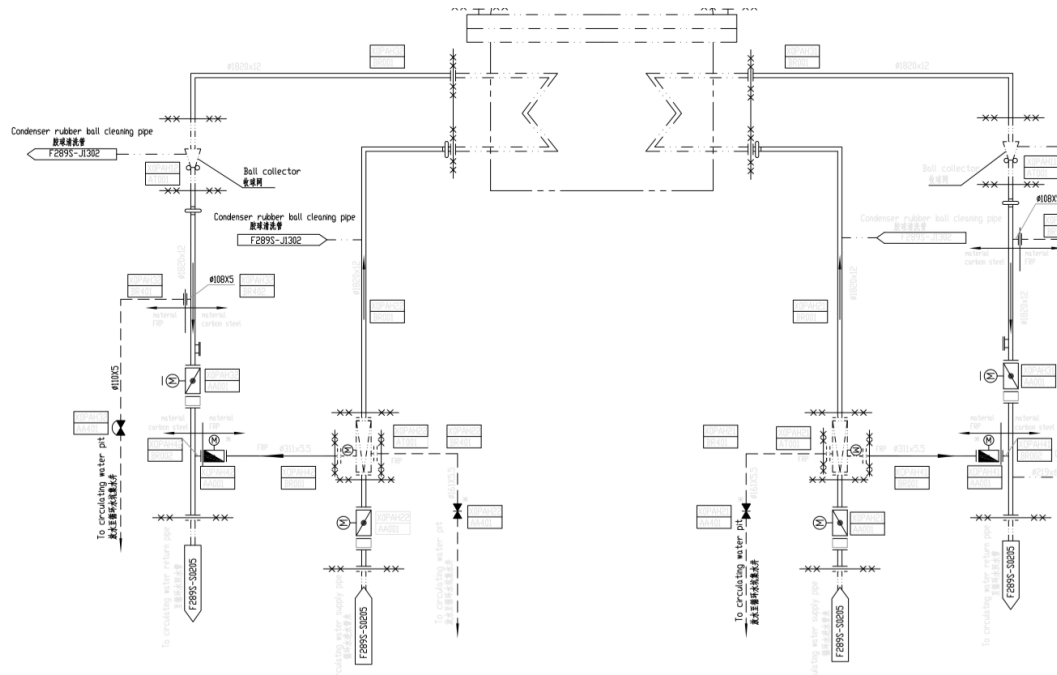
Gambar 2.1 Tipe *condenser* unit 1 PLTU Labuan

2.1.1 **Sistem Air Pendingin pada condenser (tube side)**

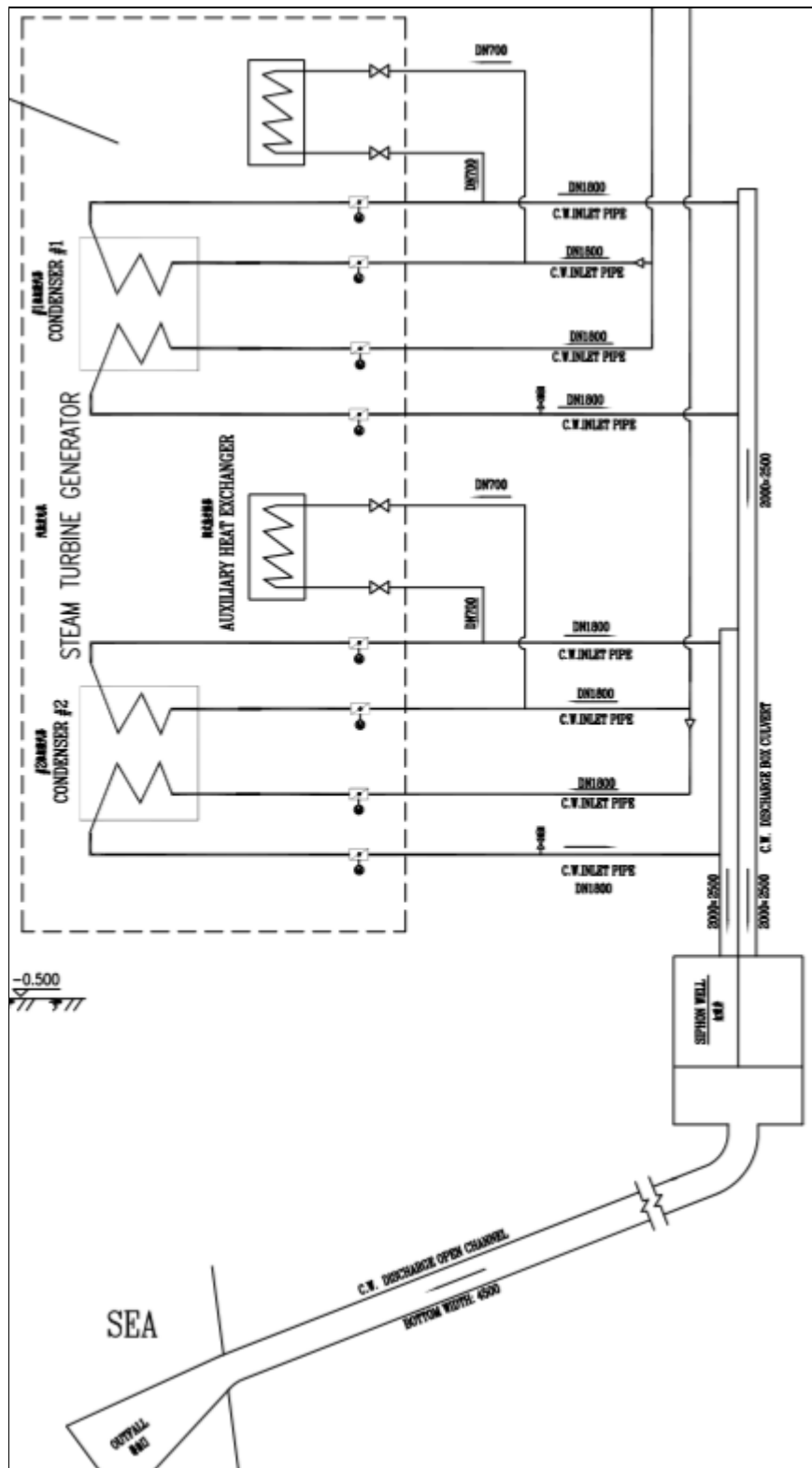
Air laut dari *intake channel* dipompakan menuju condenser melalui jalur perpipaan pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.2 Piping and Instrument Diagram (P&ID) air pendingin dari laut menuju condenser



Gambar 2.3 Piping and Instrument Diagram (P&ID) air pendingin pada condenser



Gambar 2.4 Sistem laluan aliran air keluar dari *condenser* menuju laut kembali

Dalam menjaga keberihan aliran sistim air pendingin air laut dari sampah agar tidak terbawa ke *condenser*, sistim ini dilengkapi:

- *Trash boom*

Merupakan saringan kasar Berfungsi sebagai saringan pertama air laut sebelum masuk ke intake sumur CWP untuk menyaring sampah berukuran besar.

- *Travelling Bar screen*

Berfungsi saringan kasar tetapi lebih kecil dibandingkan trash boom dengan ukuran sampah 10 – 25 cm. terpasang pada pintu sumur CWP.

- *Travelling Band Screen*

Dipasang *vertical* pada sisi masuk kanal pompa air pendingin utama (CWP) dimana sebagian besar segmen saringan berada di bawah permukaan air, Sedang sebagian lagi diatas permukaan air. Konstruksi saringan adalah berupa kawat baja berbentuk segmen-segmen persegi panjang yang dikaitkan pada rantai-rantai kedua sisinya tersebut kemudian dikalungkan melingkari roda-roda gigi yang ditempatkan diantara 2 poros. Salah satu poros dihubungkan ke penggerak motor listrik.

Dalam keadaan terpasang, rangkaian segmen-segmen kasa baja tersebut akan membentuk suatu pita raksasa / layar (*screen*) dan motor berputar maka screen akan bergerak mengelilingi roda gigi. Sampah atau kotoran dalam air pendingin akan tersangkut pada saringan dan karena saringan bergerak, maka kotoran yang menempel juga akan terbawa ke atas permukaan. Pada bagian saringan yang berada diatas permukaan air dipasang nozel-nozel penyemprot (*sprayer*) yang menggunakan air bertekanan yang bertujuan untuk merontokkan sampah sampah dan jatuh ke saluran (*got*) yang khusus di sediakan untuk selanjutnya di kembalikan ke laut.

- *Debris Filter Condenser*

Sea water debris filter system diinstal di pipa *inlet condenser* berdiameter besar yang dirancang untuk menyaring kotoran atau sampah, lembaran plastik, rumput laut, remis, kerang, dan lain-lain.

- *Ball Cleaning System*

Berfungsi membersihkan endapan lumut, binatang air dan kotoran yang menempel pada tube condensor, pengotoran pada tube *condenser* akan

mengakibatkan aliran pendingin yang masuk pipa berkurang sehingga mengurangi penyerapan panas laten uap dan vacuum akan turun. *Ball cleaning* adalah sistem pembersih bagian –bagian dalam *condenser* (sisi air pendingin) dengan menggunakan sarana pembersih berupa bola busa. Bola yang di gunakan adalah bola-bola busa yang diameternya 10% lebih besar dari diameter dalam pipa. Pembersihan di lakukan dalam saat berbeban dengan cara mensirkulasikan bola – bola tersebut bersama dengan air pendingin. Pada saluran pendingin keluar (outlet condensor) di pasang semacam saringan berengsel yang terdiri dari 2 buah bagian layaknya seperti sepasang daun pintu tralis (*catcher*). *Catcher* berfungsi untuk menangkap bola-bola agar tidak ikut terbuang ke outfall.

- *Vaccum priming system*

Berfungsi untuk membuang udara yang terjebak pada air laut yang masuk ke condenser tube, terutama saat proses pengisian awal *waterbox* nya. Dengan adanya sistim ini diharapkan seluruh tube sudah terisi air sehingga tidak terjadi overheating.

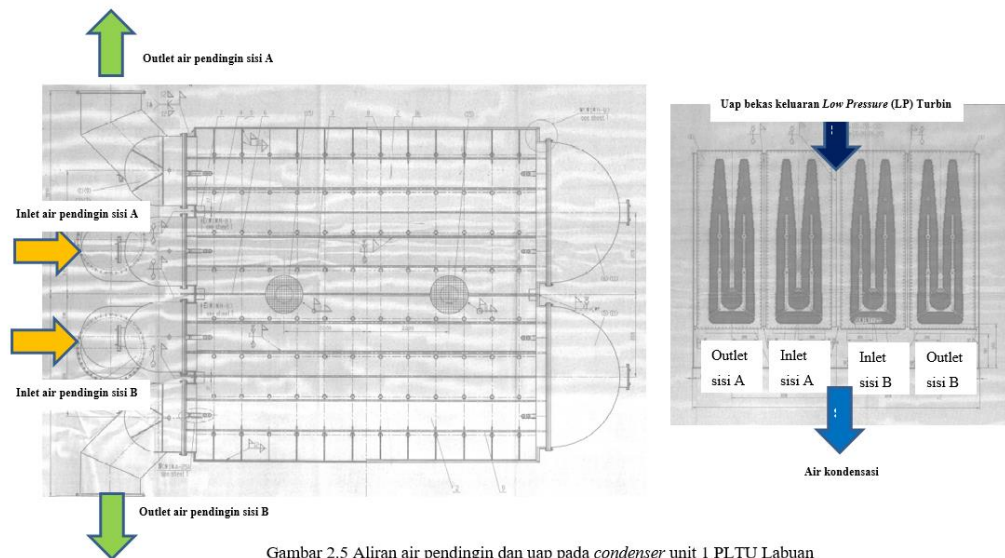
2.1.2 Sistem Condenser (*shell side*)

Kondensor adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (tubes). Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*). Kondensor seperti ini disebut kondensor tipe surface (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensor sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediannya, yaitu dari danau, sungai atau laut. Posisi kondensor umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensor karena gravitasi.

Laju perpindahan panas tergantung pada aliran air pendingin, kebersihan pipa-pipa dan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin. Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperatur jenuh, dalam hal ini kondensor berada pada kondisi vakum. Karena temperatur air pendingin sama dengan temperatur udara luar, maka temperatur air kondensatnya maksimum mendekati

temperatur udara luar. Apabila laju perpindahan panas terganggu, maka akan berpengaruh terhadap tekanan dan temperatur.

Pada *condenser shell side* unit 1 PLTU Labuan terdiri dari *condenser shell*, dua (2) buah *support tube sheet*, dua belas (12) buah *support tube*, *tube bundles* yang terdiri dari 14.220 tube, dan enam belas (16) *baffles tube*. Secara detail terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.5 Aliran air pendingin dan uap pada *condenser* unit 1 PLTU Labuan

Condenser dilengkapi dengan ;

- 2 sisi *water box* dengan masing – masing inlet dan outlet sea water

Yaitu ruangan yang berfungsi sebagai tempat di mana air laut untuk sementara dikumpulkan sebelum dialirkan menuju ke dalam *tubes*. *Water chambers* juga dapat difungsikan sebagai ruang untuk proses pemeliharaan ketika overhaul dimana unit diposisikan stop.

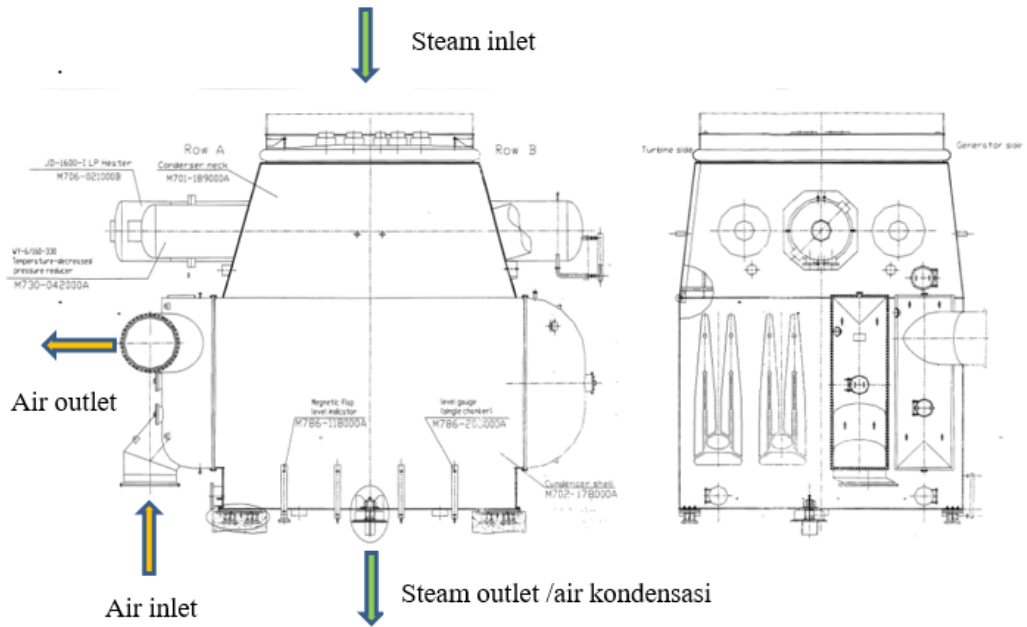
- *Condenser tube*

Yaitu pipa-pipa berongga yang berfungsi sebagai tempat di mana air laut dialirkan untuk proses pendinginan. *Tubes* berbahan titanium yang difungsikan agar dapat bertahan terhadap korosi dari air laut

- *Condenser Hotwell*.

Merupakan ruang di mana air hasil kondensasi dari uap ekstraksi turbin ditampung untuk sementara. Posisi *hotwell* di bawah condenser di mana level dijaga. Air yang

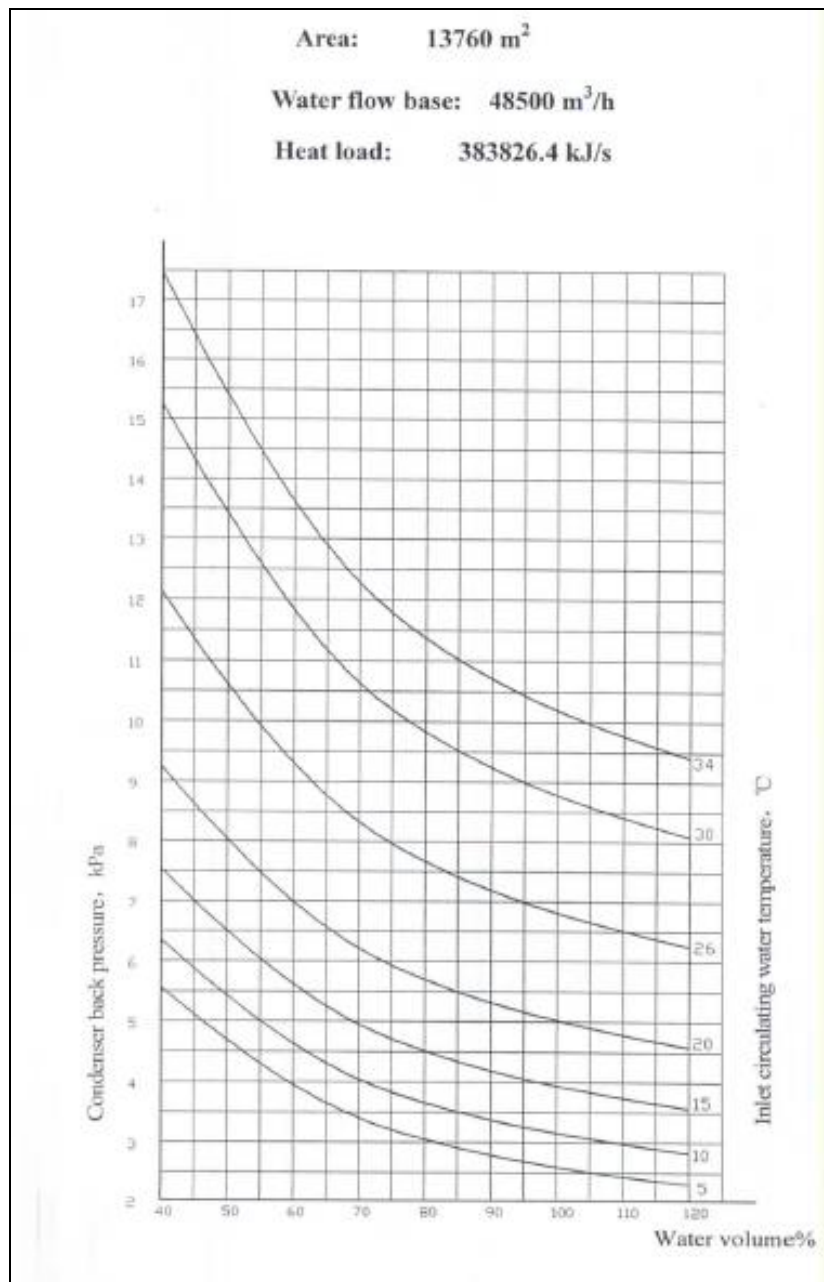
ditampung dihotwell kemudian akan Merupakan dialirkan menuju steam drum oleh *Condensate Extraction Pump (CEP)* melalui beberapa heater.



Gambar 2.6 *Drawing Condenser PLTU Labuan*

Tabel 2.1 SPESIFIKASI CONDENSER

<i>Type</i>	<i>Single Shell Double Pass Steam Surface Condenser</i>
Manufacturer	Dong Fang Steam Turbine Work
Design heat duty (at Rating) (kcal/H)	326.6x10 ⁶
Design absolute pressure (mmHg abs)	65.25
Heat transfer coefficient (kcal/H/m ² /°C)	2790
Circulating water quantity (m ³ /H)	48250
Circulating water inlet temperature (°C)	30
Circulating water outlet temperature (°C)	37
Cleanliness factor (%)	0.85
Condensate oxygen content (cc/liter)	20
Water velocity in tube (m/sec)	2.5
Friction loss through tube (kgf/cm ²)	0.49
Total effective tube surface (m ²)	13760
Tube :	
Effective tube length (mm)	9630
Overall tube length (mm)	9740
Size and thickness (mm)	φ32 x 0.5 / 0.7
Number of tube (main condensing zone)	13652
Number of tube (air cooling zone and exhaust impingement zone)	568
Material	titanium
Tube sheet :	
Material	titanium clad
Thickness	40
Hot well capacity (m ³)	110



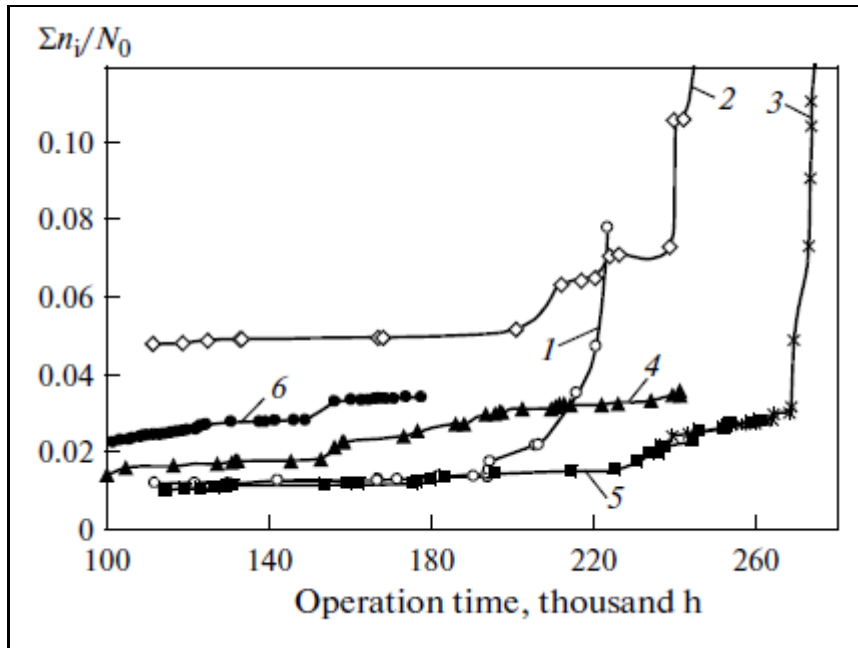
Gambar 2.7 Kurva karakteristik condenser unit 1 PLTU Labuan

2.2 Literature Review condenser tube

2.2.1 Aronson. Et al, (2013)

Aronson, K.E., Ryabcjikov A. Yu., Brodov, M., and Loginov, M.I., telah melakukan prosedur tinjauan statistik yang dijadikan acuan dalam rencana penggantian condenser tube. Dimana kriteria estimasi waktu yang diperlukan untuk

diperlukan penggantian *condenser tube* berdasarkan rasio antara jumlahnya *tube* yang di plug dan parameter pengoperasian turbin. Data – data yang dibutuhkan dalam assesmen ini adalah analisa tingkat kerusakan *tube* dilakukan pada variasi material *condenser tube* pada 11 (sebelas) turbin dengan kapasitas 25 – 500 MW.



Gambar 2.8 Jumlah tube yang unplugged terhadap waktu operasi (Aronson Et al, 2013)

2.2.2 Fayard. Et al., (2010)

Fayard, Eric H., telah mensimulasikan risiko – risiko *loss opportunity* yang diakibatkan oleh kegagalan *condenser tube*. Untuk meminimalisir biaya tersebut dilakukan *tube cleaning* dan NDT seperti *Eddy current* harus dilakukan dalam perencanaan pemeliharaan *condenser tube*. Berdasarkan paper tersebut disebutkan bahwa penyebab utama kandungan mineral yang menyebabkan kerusakan pada *condenser tube*.

Tabel 2.2 Kandungan mineral dalam air pendingin yang menyebabkan kerusakan *condenser tube* (Fayard Et al, 2010)

<i>Cations</i> (ppm as CaCO ₃)	<i>Anions (silica included)</i> (ppm as CaCO ₃)
Calcium – 130	Bicarbonate alkalinity – 115
Magnesium – 8	Chloride –20
Potassium – 5	Sulfate – 50
Sodium – 25	Silica -1

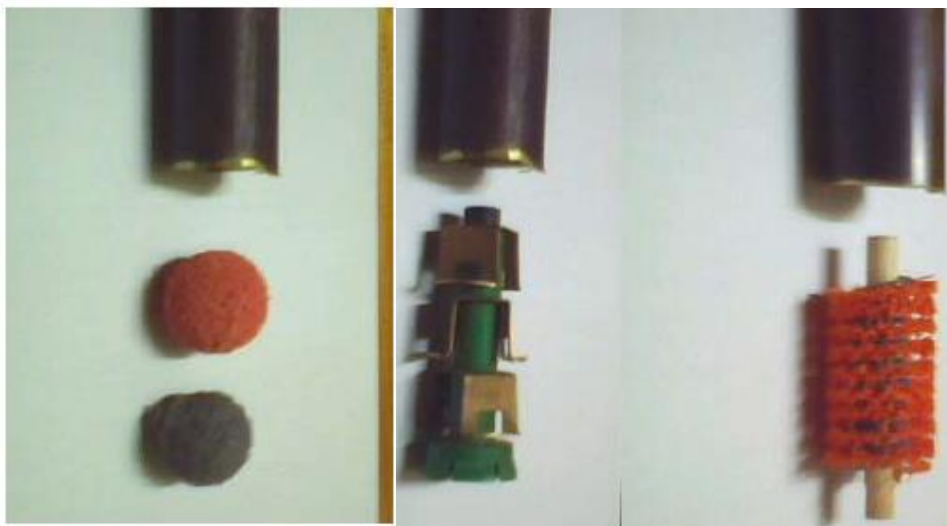
Untuk itu sebagai langkah preventive dilakukan uji NDT *eddy current* terhadap semua condenser tube dimana hasil eddy curent dengan tingkat wall loss 94% (didasarkan pada experience dan kesepakatan engineering) dilakukan plugged. Rencana penggantian condenser tube dilaksanakan apabila total pipa yang telah diplugged sebesar >10% dari jumlah total pipa.

2.2.3 Elshiekh Dafallah. Et al., (2009)

Elshiekh Dafallah, Zuhier Mohammed, telah melakukan perhitungan hasil assesmen Eddy current condenser tube pada *Khartounn Noorth Power Station* (KNPS) dan memberikan hasil rekomendasi yang optimal. Sehingga loss opportunity yang diakibatkan kegagalan condenser tube dapat diminimalisir. Setelah terjadi berbagai kejadian kegagalan condenser tube yang mengakibatkan kehilangan kesempatan produksi dalam jumlah yang besar dan pemeliharaan yang tidak terduga, maka dilakukan analisa penyebab kegagalan condenser tube dan NDT *eddy current* sehingga rencana pemeliharaan yang tepat adalah dengan metode *ball cleaning*, cairan kimia pada *condenser tube* dan NDT setiap overhaul. Sedangkan rekomendasi terhadap hasil NDT *eddy current* adalah *tube* dengan tingkat wall loss >60% dilakukan plugged pada tube tersebut dan apabila total pipa yang telah *diplugged* melebihi 10% dari total pipa, maka akan dilakukan penggantian total *condenser tube (retubing)*.

Pada pemeliharaan *condenser tube* menjelaskan penggunaan metode *acid cleaning* dan *mechanical cleaning*. *Acid cleaning* dengan menggunakan cairan kimia bersifat asam dimana direndam ke dalam tube dan sisi *shell* nya direndam air demin selama beberapa jam. Kelemahan metode ini dapat menimbulkan *stress corrosion cracking* karena karena akumulasi gas yang memecah interaksi asam / tabung, dikenal sebagai '*gas blanketing*', yang dihasilkan oleh aksi asam pada kalsium karbonat (kemungkinan terjadi 50%).

Mechanical cleaning menggunakan metode *ball cleaning system* dimana bola – bola dipompakan mengikuti arah aliran air pendingin ke dalam tube dan ditangkap pada catcher untuk disirkulasikan kembali. Bisa juga menggunakan alat pembersih manual seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.9 *Tapproge Cleaning system* pada *condenser tube* (Elshiekh Dafallah. Et al., 2009)

Adapun faktor penyebab kegagalan *condenser tube* adalah:

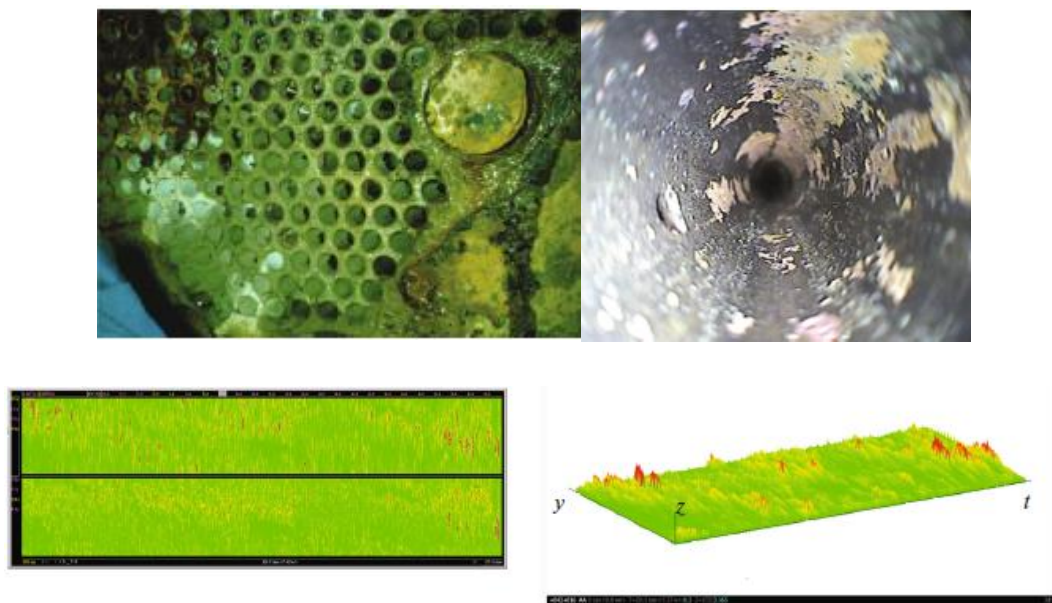
- Erosi dan korosi
- Deposit
- Hot spot pitting
- Stress corrosion cracking
- Corrosion fatigue

- Korosi karena kandungan amonia pada uap
- Kegagalan dari manufaktur / pabrik

Detai penjelasan terkait faktor penyebab tersebut di sub-chapter 2.4.

2.2.4 Golovin. Et al., (2016)

Golovin, V.A., Pechnikov, N.V., Schelkov, V.A., and Tsivadze, A.Yu., telah melakukan simulasi data eddy current testing berdasarkan posisi, tipe, dan kedalaman pada semua area kerusakan yang terjadi. Hasil perhitungan pada variasi kondisi dan perbedaan turbin digunakan untuk menghitung distribusi ketebalan secara teori. Dengan analisa statistik distribusi *weibull* untuk memperkirakan estimasi *lifetime* dari *condenser tube*.



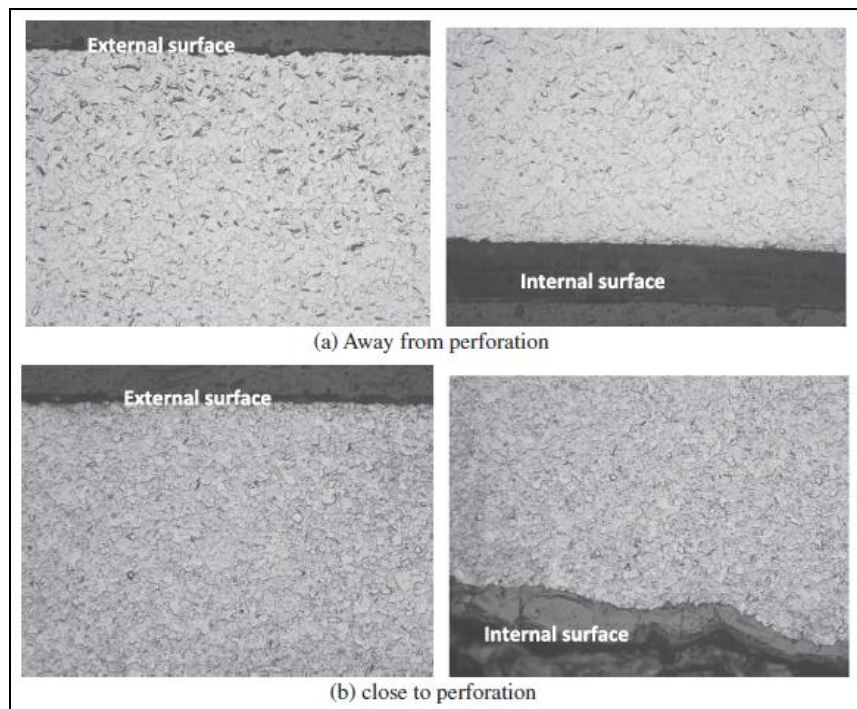
Gambar 2.10 *Scaling and fouling* pada *condenser tube* akibat mineral air pendingin (Golovin. Et al., 2016)

2.2.5 H.M. Shalaby. Et al., (2011)

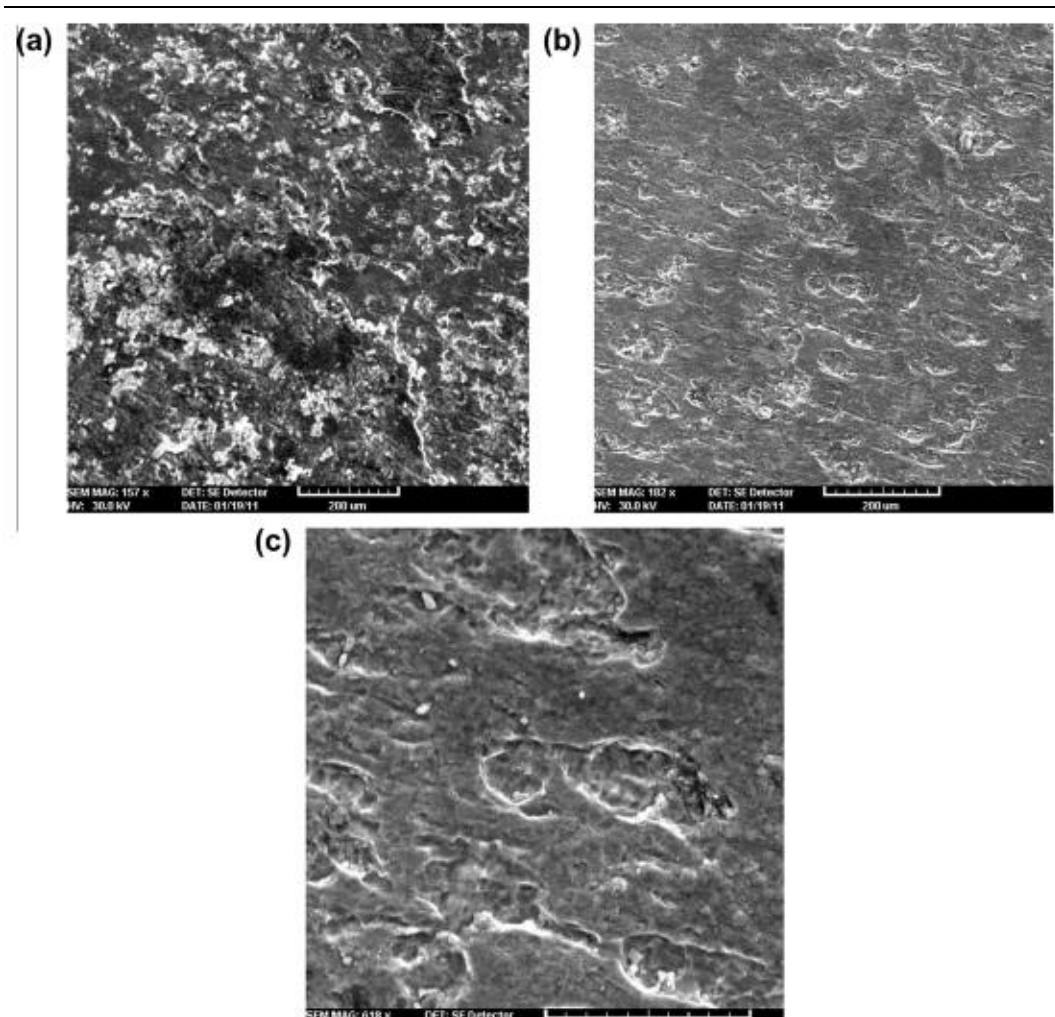
H.M. Shalaby, H. Al-Mazeedi, H. Gopal, N. Tanoli, telah melakukan analisa kegagalan titanium *condenser tube* dengan metode visual, mikroskopik, SEM dan EDS dan juga menguji komposisi mineral *scale* yang terdapat pada *condenser tube*. Dari hasil pengujian diperoleh kesimpulan bahwa kegagalan *condenser tube* disebabkan oleh korosi dan erosi yang disebabkan oleh mineral yang terkandung dalam air dan partikel solid yang mengalir secara turbulen sehingga mengikis *condenser tube* hingga *tube* berlubang.



Gambar 2.11 Sampel Material Kerusakan *condenser tube*
(H.M. Shalaby. Et al., 2011)



Gambar 2.12 *Optical Micrograph* etsa area permukaan, menunjukkan bahwa kehilangan TiH pada internal dan eksternal permukaan yang berlubang, Jauh dari permukaan (a) dan dekat dengan permukaan (b), struktur α mengandung *acicular* atau *grains* (200x)., (H.M. Shalaby. Et al., 2011)



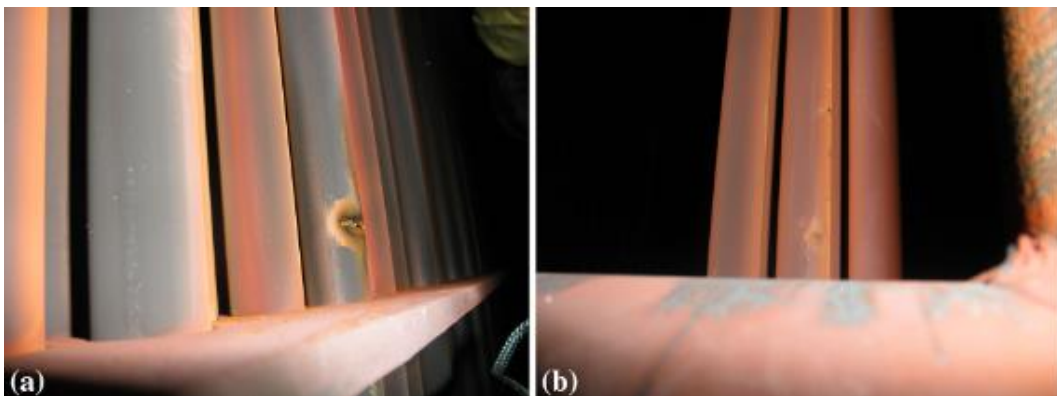
Gambar 2.13 SEM micrograph tube surface berlawanan dengan area yang berlubang, menunjukkan a. Deposit, b. Kerusakan erosi dan korosi, c. Kerusakan erosi meluas

2.2.6 Melanie Montgomery. Et al., (2014)

Melanie Montgomery, Allan Enemark, Anders Hangaard telah melakukan analisa kegagalan *titanium condenser tube* yang telah beroperasi selama 24 tahun. Metode NDT dan DT dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalan material tersebut. Faktor penyebab kegagalan adalah: *inner fouling*, *steam impingement*, *fretting/erosion around the supports*, *ductile cracks*. Dari hasil penelitian diperoleh

kesimpulan bahwa Kondensor titanium tidak rentan terhadap kegagalan kondisi operasi normal.

Dari analisis, disimpulkan bahwa penyebab utama kebocoran kondensor adalah pengisian *waterbox* yang tidak memadai. Hal ini menyebabkan tube yang kosong mengalami ekspansi dari uap sisa saat unit mengalami trip, yang telah memberikan kegagalan mekanik tube dalam tubesheet. Indikasi retak telah diamati pada beberapa tube yang diambil tubesheet. Analisis retakan menunjukkan tube mengalami overload ductile fracture yang mungkin berasal dari distribusi suhu yang tidak rata untuk membuatnya meluncur di tubesheet. Tidak ada retak ditemukan, *tube* titanium di sebagian besar kondensor berada di kondisi baik dan tidak menunjukkan tanda-tanda korosi, erosi, atau penyumbatan internal.



Gambar 2.14 Sampel *condenser tube* terlihat pecah karena erosi uap dimana kondisi *tube* kosong (tanpa air pendingin), (Melanie montgomery, 2014)

2.2.7 Fei-Jun Chen. Et al., (2013)

Fei-Jun Chen, Cheng Yao, Zhen-Guo Yang telah melakukan penelitian terkait adanya *titanium tube condenser* pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di China yang mengalami penipisan. Untuk mencari penyebab penipisan tersebut dilakukan analisa deposit permukaan, inspeksi visual, analisis struktur mikro, analisis komposisi sampel dengan cara difraksi sinar-X (XRD), *scanning electron microscope* (SEM) dan *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS).

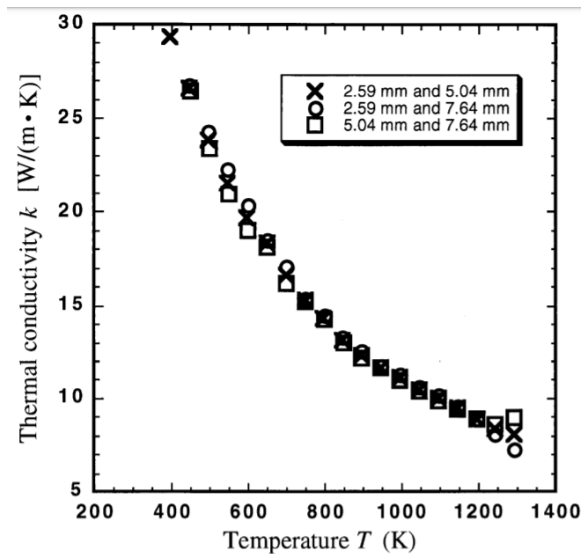
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penipisan *condenser tube* terutama disebabkan oleh keausan akibat bagian internal tube dan support dengan produk korosi yang mengalami getaran (*Eccentric contact wear and three-body contact wear*). Produk korosi ini disebabkan oleh galvanic corrosion antara material baja (*support*) yang mengandung oksida film yang menempel pada material titanium tube.



Gambar 2.15 Mekanisme *wear titanium condenser tube*, (Fei-Jun Chen, 2013)

2.2.8 A. J. Slifka, B. J. Filla, and J. M. Phelps, (1998)

Konduktivitas termal polikristalin magnesium oksida telah diukur kisaran suhu dari 400 K hingga 1300 K menggunakan hot-guard-plate yang dimodifikasi rancangan. Tiga ketebalan berbeda spesimen memiliki 93% teori Kepadatan diuji untuk memverifikasi operasi, akurasi, dan kemampuan reproduksi alat ini. Konduktivitas termal yang diukur berkisar 30 W/m.K hingga 8 W/m.K dan berbanding terbalik dengan suhu. Hasilnya sesuai dengan literatur nilainya untuk bahan ini.



Gambar 2.16 *Conductivity* MgO pada berbagai temperatur dan ketebalan, (A. J. Slifka, B. J. Filla, and J. M. Phelps, 1998)

2.3 Titanium tube condenser

Condenser PLTU labuan menggunakan material titanium pada bagian *tube* nya, meskipun harganya lebih mahal dibandingkan *stainless steel* hingga empat (4) kali nya tetapi dengan sifat materialnya memiliki kelebihan – kelebihan material dibandingkan material lain yaitu:

- a. Titanium merupakan penghantar panas yang baik dengan nilai koefisien ekspansi panas thermal nya lebih rendah dibandingkan baja.
- b. Tahan terhadap korosi, ketahanan korosinya melebihi material *stainless steel* dengan grade tertinggi
- c. Material ringan, dengan density yang rendah, dimana density titanium adalah 60% dibandingkan *steel* atau *nickel base super alloys*.
- d. Memiliki tensile strength lebih baik dibandingkan *austenitic or ferritic stainless* meskipun masih dibawah *martensitic stainless steel*.
- e. Dapat dilakukan aplikasi pengelasan, *brazing*, dan *diffusion bonding* sehingga mudah dalam pemeliharaannya.

Property	Description or value
Atomic number	22
Atomic weight	47.90
Atomic volume	10.6 W/D
Covalent radius	1.32 Å
Ionization potential	6.8282 V
Thermal neutron absorption cross section	5.6 barns/atom
Crystal structure	
Alpha (≤ 882.5 °C, or 1620 °F)	Close-packed hexagonal
Beta (≥ 882.5 °C, or 1620 °F)	Body-centered cubic
Color	Dark gray
Density	4.51 g/cm ³ (0.163 lb/in. ³)
Melting point	1668 \pm 10 °C (3035 °F)
Solidus/liquidus	1725 °C (3135 °F)
Boiling point	3260 °C (5900 °F)
Specific heat (at 25 °C)	0.5223 kJ/kg · K
Thermal conductivity	11.4 W/m · K
Heat of fusion	440 kJ/kg (estimated)
Heat of vaporization	9.83 MJ/kg
Specific gravity	4.5
Hardness	70 to 74 HRB
Tensile strength	240 MPa (35 ksi) min
Young's modulus	120 GPa (17×10^6 psi)
Poisson's ratio	0.361
Coefficient of friction	
At 40 m/min (125 ft/min)	0.8
At 300 m/min (1000 ft/min)	0.68
Coefficient of linear thermal expansion	8.41 μ m/m · K
Electrical conductivity	3% IACS (where copper = 100% IACS)
Electrical resistivity (at 20 °C)	420 n Ω · m
Electronegativity	1.5 Pauling's
Temperature coefficient of electrical resistance	0.0026/°C
Magnetic susceptibility (volume, at room temperature)	180 (± 1.7) $\times 10^{-6}$ mks

Designation	Tensile strength (min)		0.2% yield strength (min)		Impurity limits, wt% (max)					Nominal composition, wt%				
	MPa	ksi	MPa	ksi	N	C	H	Fe	O	Al	Sn	Zr	Mo	Others
Unalloyed grades														
ASTM grade 1	240	35	170	25	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	...	...	...	...	...
ASTM grade 2	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	...
ASTM grade 3	450	65	380	55	0.05	0.08	0.015	0.30	0.35	...	...	...	...	...
ASTM grade 4	550	80	480	70	0.05	0.08	0.015	0.50	0.40	...	...	...	...	...
ASTM grade 7	340	50	280	40	0.03	0.08	0.015	0.30	0.25	...	...	...	...	0.2Pd
ASTM grade 11	240	35	170	25	0.03	0.08	0.015	0.20	0.18	...	...	...	...	0.2Pd

Gambar 2.17 Mechanical properties material titanium

2.4 Condenser Tube failure

Secara umum beberapa faktor yang dapat menyebabkan kegagalan material titanium adalah sebagai berikut:

2.4.1 Erosi dan korosi

Faktor ini merupakan penyebab dominan terjadinya kegagalan pada condenser tube dimana *condenser tube* kontak langsung dengan aliran air pendingin yang melaluinya. Kondisi aliran yang turbulen mengandung mineral terlarut dan

partikel solid memicu terjadinya korosi dan erosi pada permukaan tube. Secara visual pada umumnya penipisan *condenser tube* berada pada bagian dalam.

Padatan solid tersuspensi menyebabkan abrasi, yang secara dramatis dapat mempercepat kehilangan logam. Dengan demikian, proses pengendapan disertai oleh logam ke gaya geser yang diberikan oleh aliran fluida dan padatan tersuspensi. Titanium adalah logam reaktif, yang berarti secara spontan terbentuk dalam film permukaan seperti keramik TiO_2 yang memberikan ketahanan erosi-korosi yang luar biasa. Untuk alasan ini, paduan titanium dapat menahan kecepatan air laut yang mengalir setinggi 30 m / s dengan kehilangan logam yang signifikan tanpa adanya padatan tersuspensi. Namun, ini kontras dengan keberadaan padatan tersuspensi di mana logam mengalami erosi dan abrasi dengan kondisi aliran turbulen ekstrim terjadi.

2.4.2 Deposit

Merupakan kandungan mineral dan biota laut yang terbawa bersama aliran air pendingin mengendap pada permukaan tube. Deposit yang berupa biota laut / bakteri berpotensi menyebabkan korosi, karena akan mengendap pada tube membentuk lapisan film polysaccharide. Lapisan film ini akan menangkap garam yang terbawa air laut dan semakin lama semakin bertambah tebal yang mengganggu proses heat transfer. Meskipun bakteri ini bersifat aerobik, pada lapisan tertentu bisa membiarkan bakteri anaerobik masuk menyelinap ke lapisan dalam yang dapat menghasilkan asam yang langsung menyerang metal tube sehingga memicu korosi.

Deposit yang berupa scaling atau fouling dapat terjadi disebabkan oleh aliran air pendingin yang mengandung mineral terlarut seperti calcium carbonate (CaCO_3), calcium phosphate ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), calcium sulfate (CaSO_4), magnesium chloride (MgCl_2), sodium silica, potassium carbonate. Deposit ini akan menyebabkan terganggunya proses perpindahan panas yang terjadi pada condenser sehingga akan mengurangi efisiensi pendinginan pada steam exhaust turbin yang berdampak menurunkan efisiensi unit. Tingkat konduktifitas panas deposit pada condenser tube dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

<i>Compound</i>	<i>Thermal Conductivity</i> Btu/hr·ft ² ·°F/in
Calcium Carbonate (CaCO ₃)	6.4
Calcium Phosphate [Ca ₃ (PO ₄) ₂]	25
Calcium Sulfate (CaSO ₄)	15
304L SS	113
316L SS	113
Admiralty Brass	768
90-10 Copper-Nickel	312

Gambar 2.18 *Thermal conductivity* Mineral yang terkandung dalam air laut

2.4.3 Hot spot pitting

Merupakan fenomena pemanasan berlebih pada area yang tertentu yang bisa disebabkan rendahnya jumlah air pendingin yang mengalir pada area tersebut.

2.4.4 Stress corrosion cracking

Stress corrosion cracking adalah bentuk korosi yang sangat lokal yang mengarah pada pembuatan lubang kecil di logam. Kekuatan pendorong untuk korosi pitting adalah depassivasi area kecil, yang menjadi anodik sementara area yang tidak diketahui tetapi berpotensi luas menjadi katodik, yang mengarah ke korosi galvanik yang sangat terlokalisasi. Korosi menembus massa logam, dengan difusi ion terbatas. Mekanisme korosi pitting mungkin sama dengan korosi celah.

Dalam material yang faktor intensitas tegangan-penerapan maksimumnya melebihi nilai ambang batas tegangan, korosi, retak, korosi tegangan menambah kecepatan pertumbuhan retak. Ini ditunjukkan dalam skema di sebelah kanan. Dalam lingkungan yang korosif, retakan tumbuh karena pembebanan siklik pada rentang intensitas tegangan yang lebih rendah; di atas ambang batas intensitas tegangan untuk korosi retak tegangan, pertumbuhan retak tambahan (garis merah) terjadi karena SCC. Wilayah intensitas tegangan rendah tidak terpengaruh, dan rentang ambang intensitas tegangan untuk perambatan retak tidak berubah dalam lingkungan korosif. Dalam kasus yang paling umum, pertumbuhan retak korosi-kelelahan dapat menunjukkan kedua efek di atas; perilaku crack-growth direpresentasikan dalam skema di sebelah kiri.

2.4.5 Galvanic corrosion

Korosi galvanik (juga disebut korosi bimetal) adalah proses elektrokimia di mana satu logam terkorosi secara istimewa ketika berada dalam kontak listrik dengan yang lain, dengan adanya elektrolit. Logam dan paduan yang berbeda memiliki potensi elektroda yang berbeda, dan ketika dua atau lebih kontak dalam elektrolit, satu logam bertindak sebagai anoda dan yang lainnya sebagai katoda. Jika elektrolit hanya mengandung ion logam yang tidak mudah direduksi (seperti Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , atau Zn^{2+}), reaksi katoda adalah reduksi H^+ terlarut menjadi H_2 atau O_2 menjadi OH^- . Perbedaan potensial antara reaksi pada dua elektroda adalah kekuatan pendorong untuk serangan dipercepat pada logam anoda, yang larut ke dalam elektrolit. Hal ini menyebabkan logam pada anoda terkorosi lebih cepat daripada yang seharusnya dan korosi pada katoda terhambat. Kehadiran elektrolit dan jalur konduksi listrik antara logam sangat penting untuk terjadinya korosi galvanik

2.4.6 Fatigue Corrosion

Kelelahan korosi adalah kelelahan dalam lingkungan yang korosif. Ini adalah degradasi mekanis dari suatu material di bawah aksi bersama dari korosi dan pembebanan siklik. Hampir semua struktur teknik mengalami beberapa bentuk tegangan bolak-balik, dan terpapar kelingkungan yang berbahaya selama masa kerjanya. Lingkungan memainkan peran penting dalam kelelahan bahan struktural kekuatan tinggi seperti baja, paduan aluminium dan paduan titanium. Bahan dengan kekuatan spesifik tinggi sedang dikembangkan untuk memenuhi persyaratan teknologi maju. Namun, kegunaannya sangat tergantung pada sejauh mana mereka melawan kelelahan korosi.

2.4.7 Korosi karena kandungan amonia pada uap

Adanya injeksi kimia pada air kondensat berupa NH_3 atau amonia menyebabkan uap yang memutar turbin mengandung zat kimia tersebut. Ammonia menyerang tube pendingin udara paduan kuningan dalam bentuk lubang di bagian

luar permukaan tube, dengan grooving pada titik-titik yang berdekatan dengan pelat tabung dan pelat pendukung.

2.4.8 Kegagalan dari manufaktur / pabrik

Kategori ini mencakup kegagalan yang disebabkan oleh manufaktur baik dalam proses pembuatan material maupun dalam proses assembly yang secara garis besar adalah sebagai berikut:

- Desain yang tidak tepat, yang meliputi kesalahan desain material, konstruksi, dan peruntukannya terhadap kondisi operasi.
- Proses manufaktur yang tidak tepat yang meliputi proses pembuatan raw material, proses pembuatan, proses transportasi, dan proses penyimpanan.

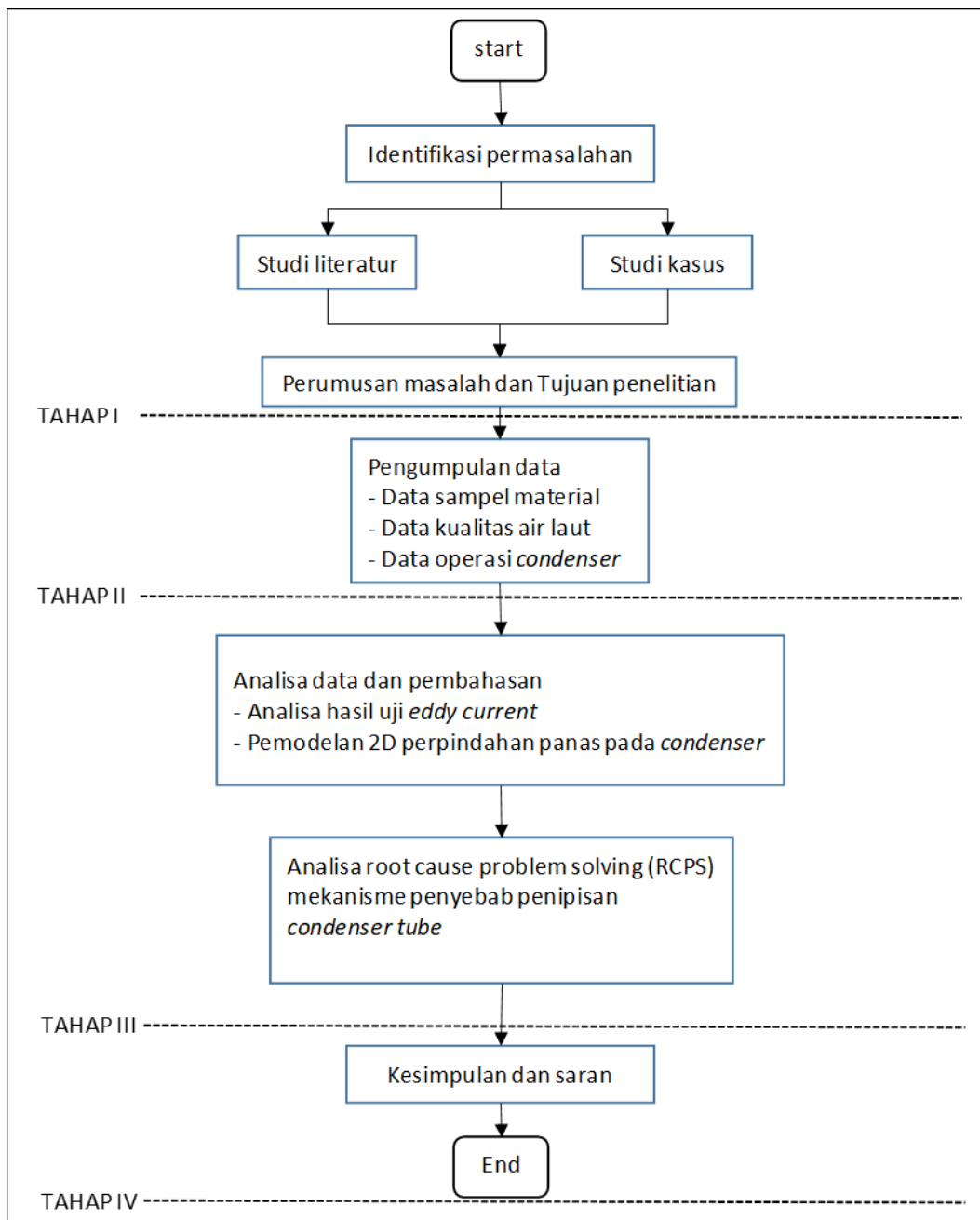
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penyusunan *failure Analysis* ini menggunakan dua metode, yaitu metode pengujian *eddy current condenser tube* untuk mengetahui penipisan ketebalan *condenser tube* setelah beroperasi selama ± 9 tahun. Pemodelan simulasi 2D dengan CFD geometri *solid single phase*. Pemodelan ini untuk mengetahui persebaran perpindahan panas yang terjadi pada seluruh area *heat exchanger / condenser* sehingga dapat dikendalikan faktor – faktor yang mempengaruhi laju penipisan *condenser tube* yang terjadi.

3.1 Diagram alir Penelitian

Diagram alir penelitian yang dilakukan seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Studi literatur

Dalam tahap ini, secara garis besar studi literatur yang diambil yaitu data – data manual book dari Dong Fang Steam Turbine Work. Dengan mengambil data

manual dari manufaktur pembuat condenser yaitu Dongfang Steam Work. Melalui data ini dapat dipahami berbagai hal terkait condenser yaitu:

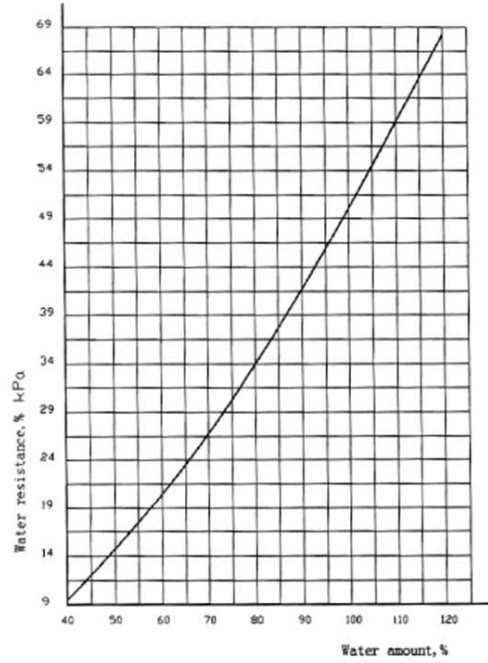
- Prinsip kerja dan diagram alir untuk condenser system.
- Karakteristik operasi condenser, pada normal operasi condenser memerlukan jumlah air pendingin ± 48.000 ton/jam dimana disuplai oleh dua (2) pompa Circulating Water Pump (CWP).
- Spesifikasi operasi condenser system.
- Failure modes dan panduan prosedur dalam pemeliharaan.
- Panduan troubleshooting peralatan.
- Karakteristik ketahanan tube terhadap aliran air pendingin (± 48.000 ton/jam).
- Karakteristik operasi condenser terhadap perubahan temperatur air pendingin.
- Karakteristik operasi condenser dalam kondisi jumlah air pendingin hanya disuplai oleh satu pompa CWP beroperasi.
- Panduan pengoperasian injeksi chemical pada air laut sebagai media pendingin condenser.

Parameter – parameter diatas berdasarkan kondisi condenser tube new and clean. Sehingga dalam pengoperasian dan pemeliharaan condenser yang menjadi acuan / baseline adalah kondisi new and clean.

Water resistance curve of condenser

Calculated water temperature: 30 °C

Water flow base: 48500 m³/h



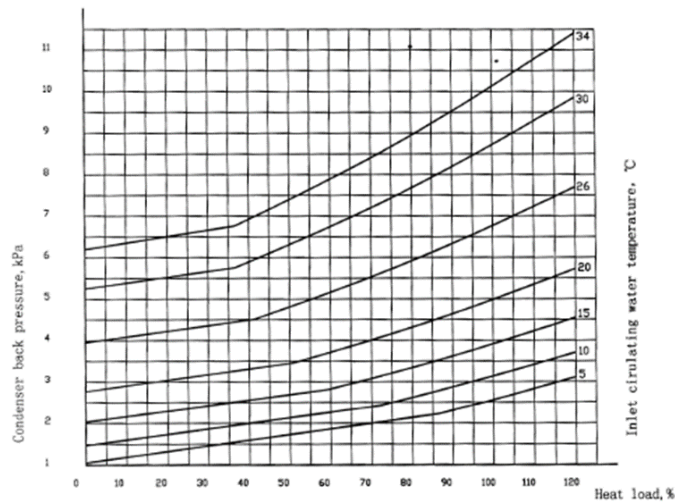
Gambar 3.2 Karakteristik ketahanan *condenser tube* terhadap jumlah air pendingin (Dongfang Turbine Work)

Condenser back pressure-heat load characteristic curve

Area: 13760m²

Water flow base: 48500m³/h

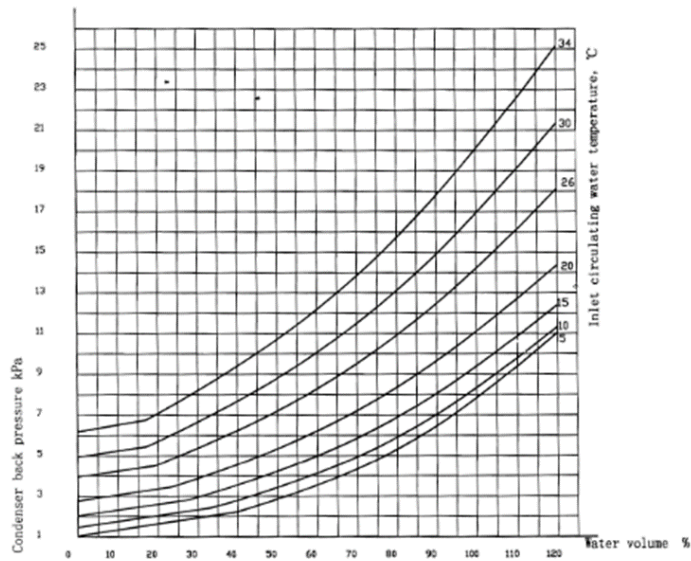
Heat load: 383826.4 kJ/s



Gambar 3.3 Karakteristik ketahanan condenser tube terhadap perubahan temperatur air pendingin (Dongfang Turbine Work)

Half Side Run-Condenser back pressure-heat load characteristic curve

Area: 6880m²
 Water flow base: 24250m³/h
 Heat load: 287869.8kJ/s



Gambar 3.4 Karakteristik operasi *condenser* dengan satu CWP (Dongfang Turbine Work)

Berdasarkan FMEA yang disusun untuk condenser unit 1 PLTU Labuan, strategi pemeliharaan pada condenser Unit 1 PLTU Labuan terlihat pada tabel berikut ini:

Tabel 3.1 Strategi pemeliharaan condenser unit 1 PLTU Labuan

No	Komponen	Failure Mode	Penyebab	Task	Frekuensi	PIC
1	Housing	Bocor	Coating rusak	Doubling dan coating	OH	Pemeliharaan
2	Water box, tube weld, expansion seals, dan liners	Kegagalan <i>Chatodic protection</i>	Kerusakan coating	Coating, cathodic inspection	OH	Pemeliharaan
3	Expansion joint	Pemasangan yang kurang tepat	Kebocoran air laut ke sistim PLTU	Inspeksi	OH	Pemeliharaan
4	Tube	Erosi internal	Bocor	- Cek kualitas air laut	Tiap Shift	Operator Kimia
5	Waterbox	Kerusakan rubber lining / coating	Bocor	- Coating	OH	Pemeliharaan
6	Hotwell	Kerusakan pada lasan	Bocor	- NDT	OH	Pemeliharaan
7	Air Sprai	Block	Kualitas uap	- Check	Tiap shift	Operator kimia
8	Pipa sprai	crack	Manufacture defect	- NDT	OH	Pemeliharaan
9	Level indicator water box	Kotor	Lingkungan	- Cleaning	OH	Pemeliharaan
10	Rubber lining	Lapisan terkelupas	Kualitas lining kurang bagus	- Coating	OH	Pemeliharaan

a. Studi pustaka

Berdasarkan dasar teori empiris digunakan untuk pendekatan kondisi aktual dengan kondisi desainnya sehingga bisa membantu dalam strategi kehandalannya.

b. Studi literatur dari jurnal

Berdasarkan penelitian – penelitian terdahulu yang telah teruji kebenarannya, hal ini dijadikan panduan dalam melakukan penelitian ini.

c. Observasi dilapangan

Dengan melakukan observasi langsung dilapangan pada saat condenser dalam proses pemeliharaan akan menambah keakurasian dalam proses penelitian ini.

3.3 Pemeliharaan condenser unit 1 PLTU Labuan

PLTU Labuan unit 1 pertama kali beroperasi pada 22 januari 2010, dalam program pemeliharaan preventive yang telah dilaksanakan pada peralatan condenser unit 1 PLTU Labuan adalah sebagai berikut:

1. First Year Inspection (tahun 2011)
2. Inspeksi tahun 2013
3. Inspeksi tahun 2014
4. Inspeksi tahun 2015
5. Inspeksi tahun 2017

Dalam perencanaan overhaul, lingkup pekerjaan pada semua peralatan berdasarkan jam operasinya terdiri dari:

- a. Simple inspection (SI) dengan jumlah jam operasi 8000 jam dan durasi overhaul selama dua puluh enam (26) hari
- b. Mean Inspection (ME) dengan jumlah jam operasi 16000 jam dan durasi overhaul empat puluh (40) hari.
- c. Serious Inspection (SE) dengan jumlah jam operasi 32000 jam dan durasi overhaul lima puluh lima (55) hari.

Kegiatan pemeliharaan khususnya bidang mekanik terkait penipisan pipa pada condenser tube Unit 1 PLTU Labuan berdasarkan ketentuan diatas yaitu:

- Pemeriksaan *elbow* pada saluran masuk water box

Inspeksi ini memastikan bahwa kondisi elbow berada pada kondisi bagus, tidak ada kerusakan pada lapisan *rubber liningnya*.



Gambar 3.5 Pemeriksaan *elbow* perpipaan sisi masuk dan keluar *condenser waterbox*

- Pemeriksaan *cathodic protection waterbox*

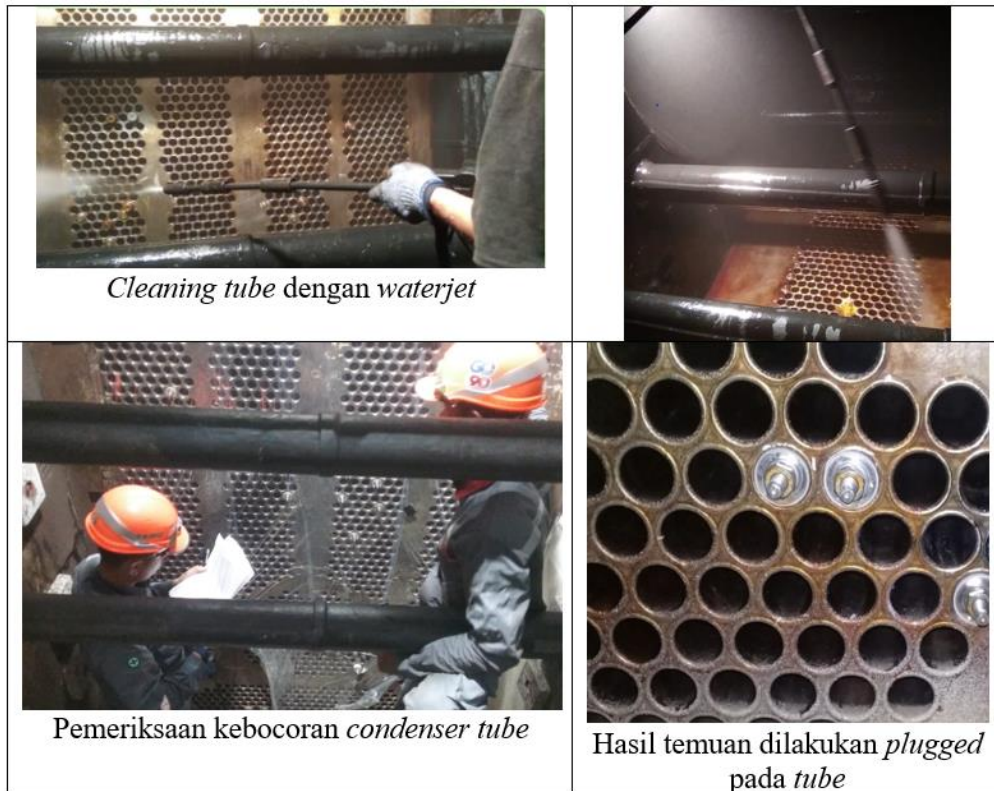
Pemeriksaan ini meliputi pemeriksaan kondisi *cathodic protection* pada *water box*, dilakukan penggantian apabila ada temuan kerusakan *cathodic protection*nya.



Gambar 3.6 Pemeriksaan *cathodic protection* pada *condenser waterbox*

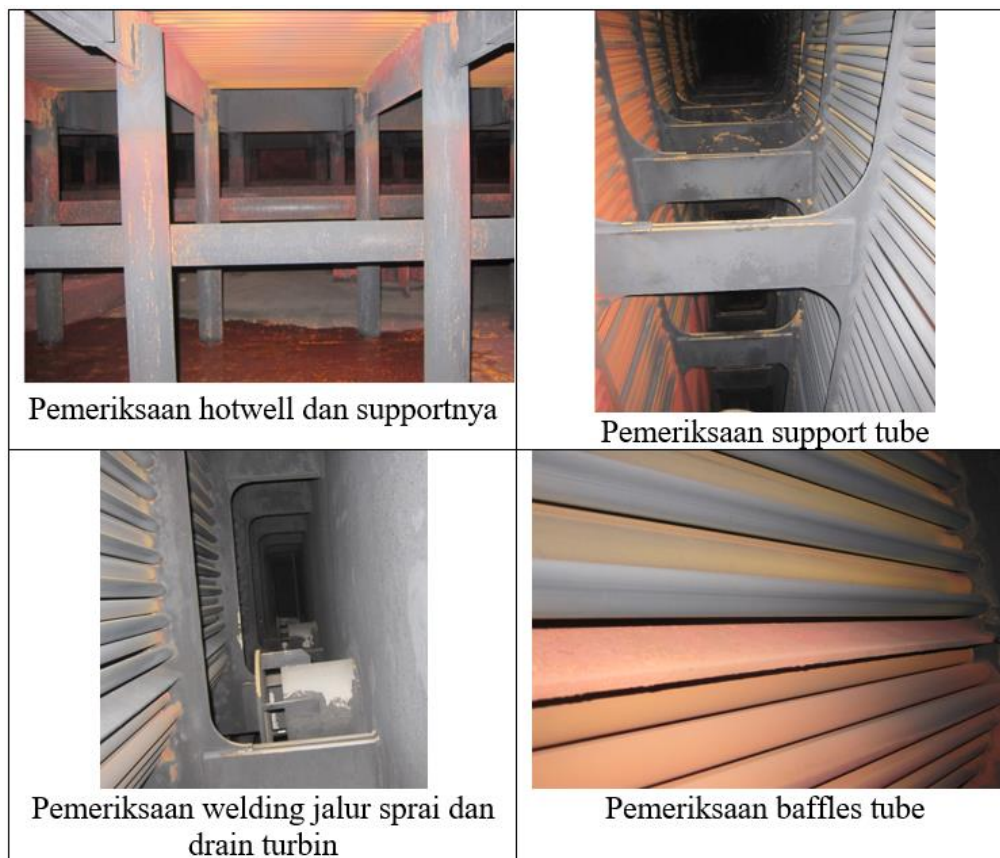
- Inspeksi *condenser tube* secara manual

Pemeriksaan ini meliputi pembersihan *condenser tube* dengan *water jet*, lalu dilakukan *leak test* manual dimana hotwell condenser diisi air hingga penuh dan didiamkan selama minimal 6 jam lalu dilakukan pengamatan visual. Jika ada kebocoran maka air dari *shell side* akan mengalir keluar dari *tube*.



Gambar 3.7 Pemeriksaan kebocoran pada *condenser tube*

- Pemeriksaan hotwell condenser



Gambar 3.8 Pemeriksaan *hotwell condenser*

- Pemeriksaan Ball Cleaning System

Pemeriksaan kondisi sistim ini tidak dilakukan dikarenakan kondisi sistim ini tidak berfungsi dengan baik dimana saat dioperasikan ball cleaningnya hilang mengikuti aliran air keluar condenser menuju laut

- Inspeksi debris filter condenser

Pemeriksaan ini meliputi inspeksi screen, pembersihan screen dari sampah dan saluran outlet debrisnya



Gambar 3.9 Pemeriksaan *debris filter condenser*

3.4. Metode Pengujian Non Destructive Test (NDT) Eddy current Condenser Tube

Pengujian tanpa merusak / Non Destructive Test (NDT) dengan menggunakan teknik arus eddy (eddy current) telah mencapai hasil kerja yang lebih berkembang dan dapat dipercaya untuk menemukan diskontinuitas material yang bersifat konduktif. Teknik Eddy Current dapat dipakai untuk berbagai bentuk geometric antara lain: kawat, pipa, batang, silinder, lembaran logam, dan bentuk – bentuk lainnya dari hasil pembentukan / permodelan seperti casting atau wrought stages yang digunakan untuk:

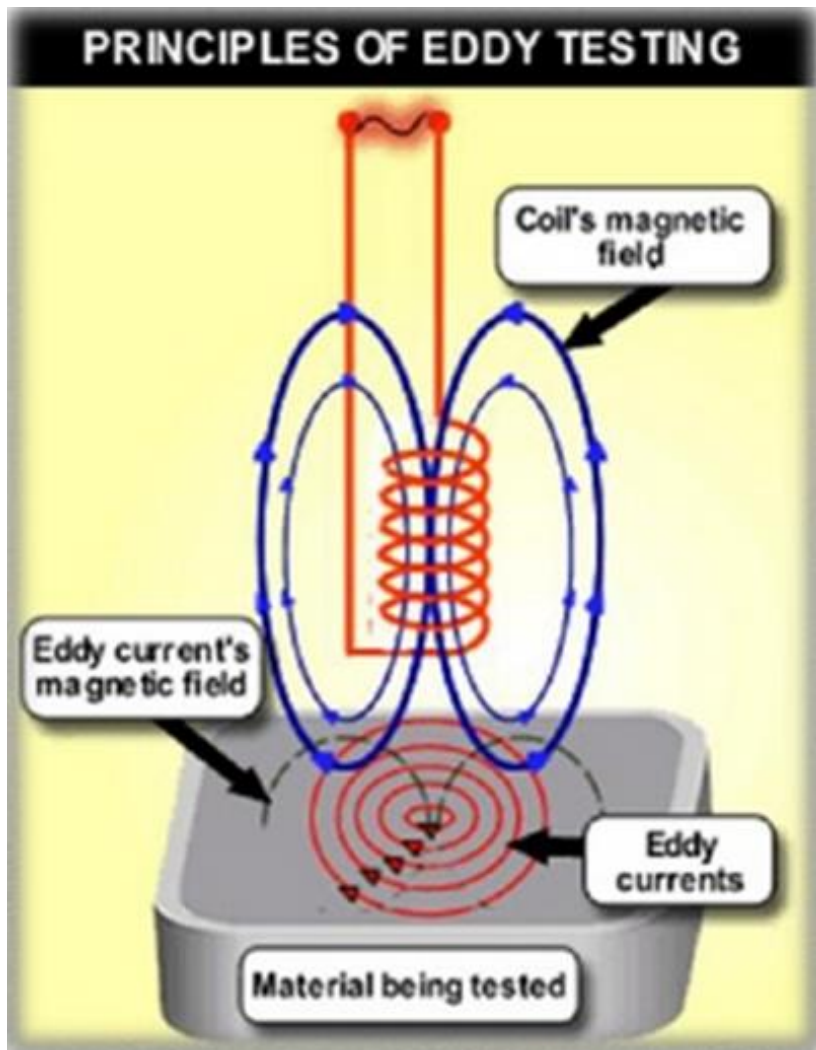
- a. Mampu teknik produksi.
- b. Mengetahui letak cacat sebelum dilakukan pengerjaan material selanjutnya.
- c. Menguji kualitas akhir produk

Eddy Current biasanya digunakan untuk:

- Mendeteksi retak pada permukaan.
- Mendeteksi retak pada sub-surface.

- Mendeteksi cacat korosi.
- Memperkirakan kerusakan oleh api.
- Mengukur tebal lapisan cat dan menguji konduktivitas pada aluminium

Pengujian dengan menggunakan teknik Eddy Current pada dasarnya memanfaatkan daya listrik dengan bantuan probe (yaitu salah satu bagian dari alat Eddy Current yang bersentuhan langsung dengan benda uji). Eddy Current merupakan arus bolak-balik yang diinduksi kedalam bahan induktif oleh medan magnetic bolak-balik. Beberapa modifikasi arus induksi didalam material dapat dianalisa secara elektrik dan menunjukkan penyebab kemungkinan modifikasi tersebut. Prinsip kerjanya seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.10 Prinsip kerja *Eddy current test*

Perubahan aliran Eddy Current dihasilkan oleh adanya :

- Retak, lubang, rongga, porositas, inklusi, dan kerutan.
- Perubahan bentuk atau dimensi.
- Perubahan jarak antara probe dengan benda uji.
- Variasi komposisi dari benda uji.
- Perlakuan panas pengerjaan mekanik.
- Perubahan permeabilitas magnetic.
- Keadaan probe, seperti posisi ujung probe menempel pada permukaan benda uji.

3.5 Data Awal Pengujian Material

Dilakukan pengambilan sampel tube dengan memotong salah satu tube yang terjangkau saat proses pemotongan. Sampel pipa ini diambil pada lokasi sisi inlet condenser A dengan nomor row 141 dan coloumn 1. Sampel ini dilakukan beberapa pengujian seperti yaitu:

3.5.1 Pengujian morfologi, struktur mikro, hardness, dan uji tarik material

Dalam setiap kegagalan suatu material, sangat penting untuk diketahui mekanisme penyebabnya agar dapat dilakukan langkah – langkah strategis pencegahannya. Untuk mengetahui mekanisme kegagalan suatu material, pengujian yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut:

- **Pengujian visual dan struktur makro**

Material sampel condenser tube kita foto makro, hal ini bertujuan untuk menganalisa bentuk permukaan dari pengujian tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan mikroskop olympus yang memiliki pebesaran sampai 1000x dan dilengkapi dengan kamera digital.

- **Pengujian struktur mikro**

Pengamatan ini menggunakan mikroskop electron, Scanning Electron Microscopy (SEM) FlexSEM 1000 yang dilengkapi dengan Energy Dispersive Spectrometry (EDS) dari EDAX sistem. Data EDS kemudian diolah dengan software TEAM.



Gambar 3.12. *Scanning Electron Microscope* Hitachi FlexSEM 1000 dengan EDS dari EDAX system.

- Uji kekerasan mikro

Pengujian kekerasan mikro dilakukan dengan alat kekerasan microvikcers dari Shimadzu HMV-2T dengan pembebanan antara 100 sampai 1000 gram.

- Uji Tarik

Pengujian kekuatan Tarik menggunakan alat UPM 1000 menggunakan standard ASTM A 370 dengan parameter alat yang diuji dengan Panjang 200 mm \pm 0,25 mm seperti terlihat pada gambar dibawah ini:

DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		¼-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 \pm 0.01	200 \pm 0.25	2.000 \pm 0.005	50.0 \pm 0.10	1.000 \pm 0.003	25.0 \pm 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ¼ - ¼	40 + 3 - 6	0.500 \pm 0.010	12.5 \pm 0.25	0.250 \pm 0.002	6.25 \pm 0.05
T—Thickness (Note 7)			Thickness of Material			
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	¼	13	¼	6
L—Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	10

Gambar 3.13 Parameter specimen pada pengujian kekuatan Tarik (ASTM A 370, 2010)

- Uji spektrometry

Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui kandungan unsur apa saja yang terdapat pada material tersebut serta persentasenya. Alat yang digunakan untuk uji komposisi kimia biasanya adalah Optical Emission Spectroscopy (OES) Amtex dari Jerman.

Pada pengujian ini menggunakan alat PMI-Master Pro2 sesuai dengan standard ASTM E 407, ASTM A 751. Dimana pada proses etsa metal titanium menggunakan material etsa Dix's keller reagent. Material ini sesuai panduan ASTM E 407 dengan menggunakan etsa nomor 67, 68, 69, 186, 187, dan 217 dengan prosedur dan komposisi pada gambar dibawah ini:

Etchant	Composition	Procedure
67	10 mL perchloric acid 10 mL 2-butoxyethanol 70 mL ethanol (95 %) 10 mL water	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 30–65 V for 10–60 s.
68	3 mL perchloric acid 35 mL 2-butoxyethanol 60 mL methanol (absolute)	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 60–150 V for 5–30 s.
69	5 mL perchloric acid 80 mL acetic acid 85 mL water	Precaution—Keep cool when mixing and use. Electrolytic at 20–60 V for 1–5 min.
187	10 mL HF 30 mL HNO ₃	Swab 3–20 s.
217	5 g ammonium bifluoride 100 mL water	Mix fresh, use plastic coated tongs and polyethylene beaker. Immerse until surface is colored.

Gambar 3.14 Material etsa untuk pengetesan *titanium condenser tube* (ASTM E 407, 2010)

3.5.2 Sampel air laut sisi masuk dan sisi keluar *condenser* unit 1 PLTU Labuan

Air laut sebagai media air pendingin diambil sampel pada bagian inlet dan outlet *condenser* unit 1 PLTU Labuan. Air laut sebelum masuk ke *condenser* diberi injeksi sodium hypochlorite yang berfungsi untuk melemahkan biota laut agar tidak hidup dan menyumbat pada bagian internal tube. Sesuai dengan manual book, jumlah injeksi sodium hypochlorite pada air laut adalah sebesar 1 mg/L secara terus menerus, dan secara periodic ditambahkan lagi 3 – 4 mg/L sesuai dengan kondisi mikororganisme pada air laut. Untuk mengontrol jumlah injeksi ini, jumlah residual chlorin secara rutin diambil datanya dimana air laut sisi keluar *condenser* sebelum menuju kembali ke laut.

Adapun sampel ini akan diuji analisa kandungan didalamnya yaitu:

- PH
- Kandungan chlorine
- Conductivity

Dengan diketahui kandungan air laut maka dapat diketahui pula tingkat erosi dan korosi pada internal tube.

3.6 Hasil Pengujian Sampel Material

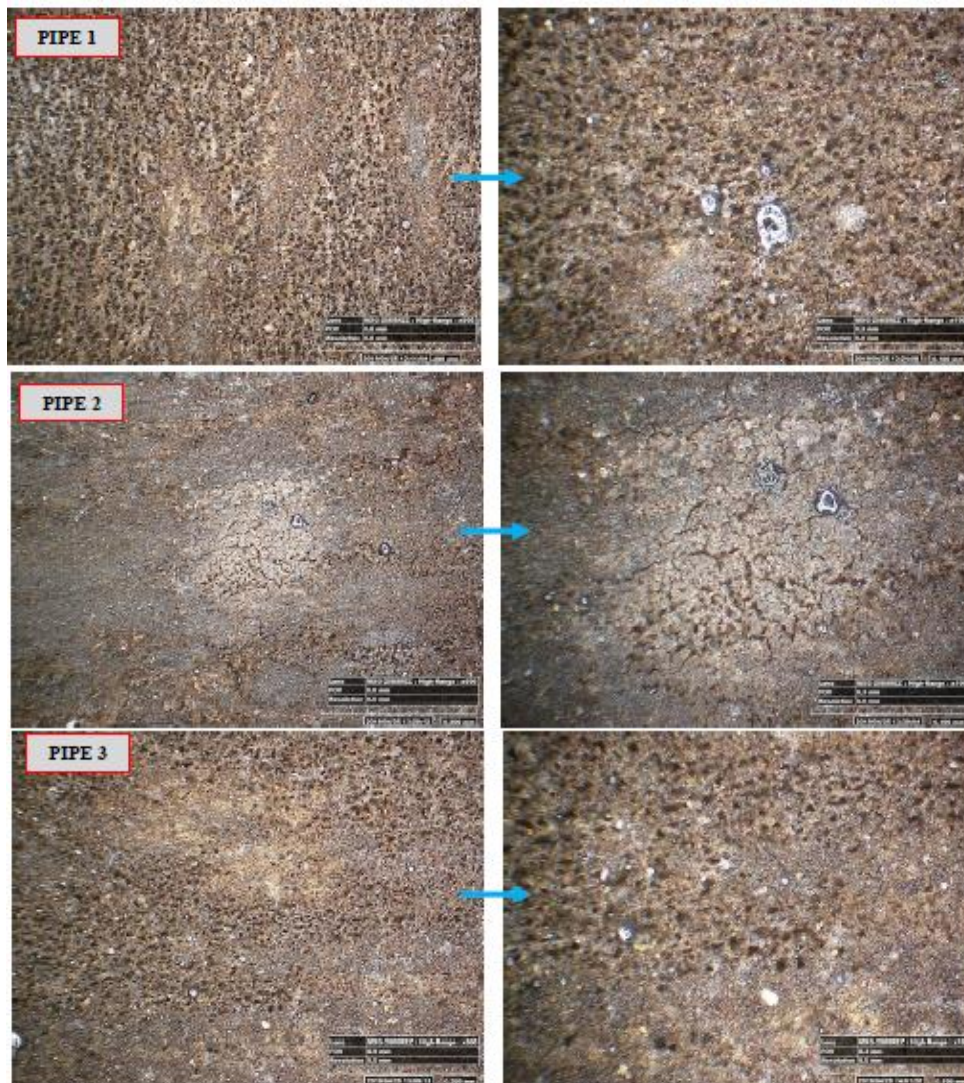
Sampel tube diambil pada tube nomor row 141 kolom 1 dimana diambil 3 potong pada tube tersebut yaitu potongan sampel tube A, B, dan C. Sampel tube diambil pada nomor *row* tersebut didasarkan dengan pertimbangan lokasi atau akses *tube* tersebut memungkinkan untuk dilakukan pemotongan *tube* (gambar 4.1). Selanjutnya *tube* tersebut dilakukan *plug*. Sebelum dilakukan pengambilan sampel, *condenser* tube sudah dilakukan pembersihan *tube* secara manual dengan *water jet*. Dari ketiga sampel tersebut dilakukan pengujian NDT dan DT baik pada bagian internal maupun eksternal tube.



Gambar 3.15 Sampel material *condenser tube*

3.6.1. Pengujian visual dan struktur makro

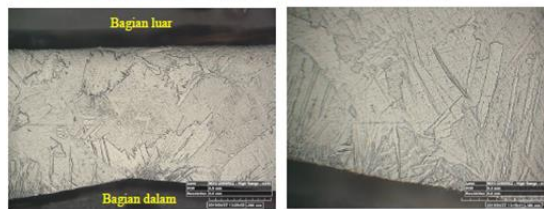
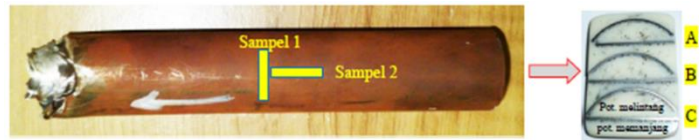
Dari ketiga potongan pipa sampel tube dilakukan pengujian secara makro dan dari hasil pengujian tersebut tidak ditemukan adanya cacat pada bagian *internal tube*, hanya ditemukan deposit halus pada permukaan *internal tube*. Foto diambil dengan menggunakan stereo mikroskop HYROX dengan perbesaran 500x dan 1000x. Seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



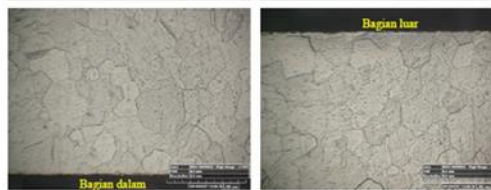
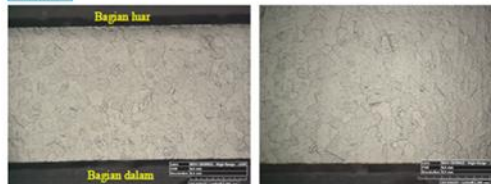
Gambar 3.16 Penampang sampel tube nomor 1,2, dan 3 menggunakan mikroskop dengan perbesaran 500x dan 1000x

3.6.2. Pemeriksaan struktur mikro

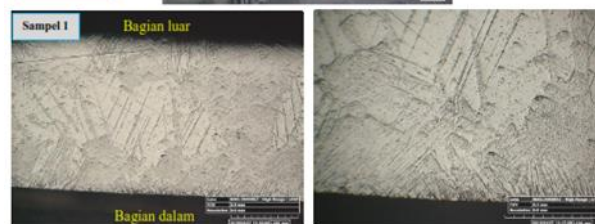
Pemeriksaan struktur mikro material sampel tube diambil pada tube secara melintang dan memanjang untuk masing – masing sampel tube A, B, dan C. Seperti terlihat pada penampang gambar dibawah ini:

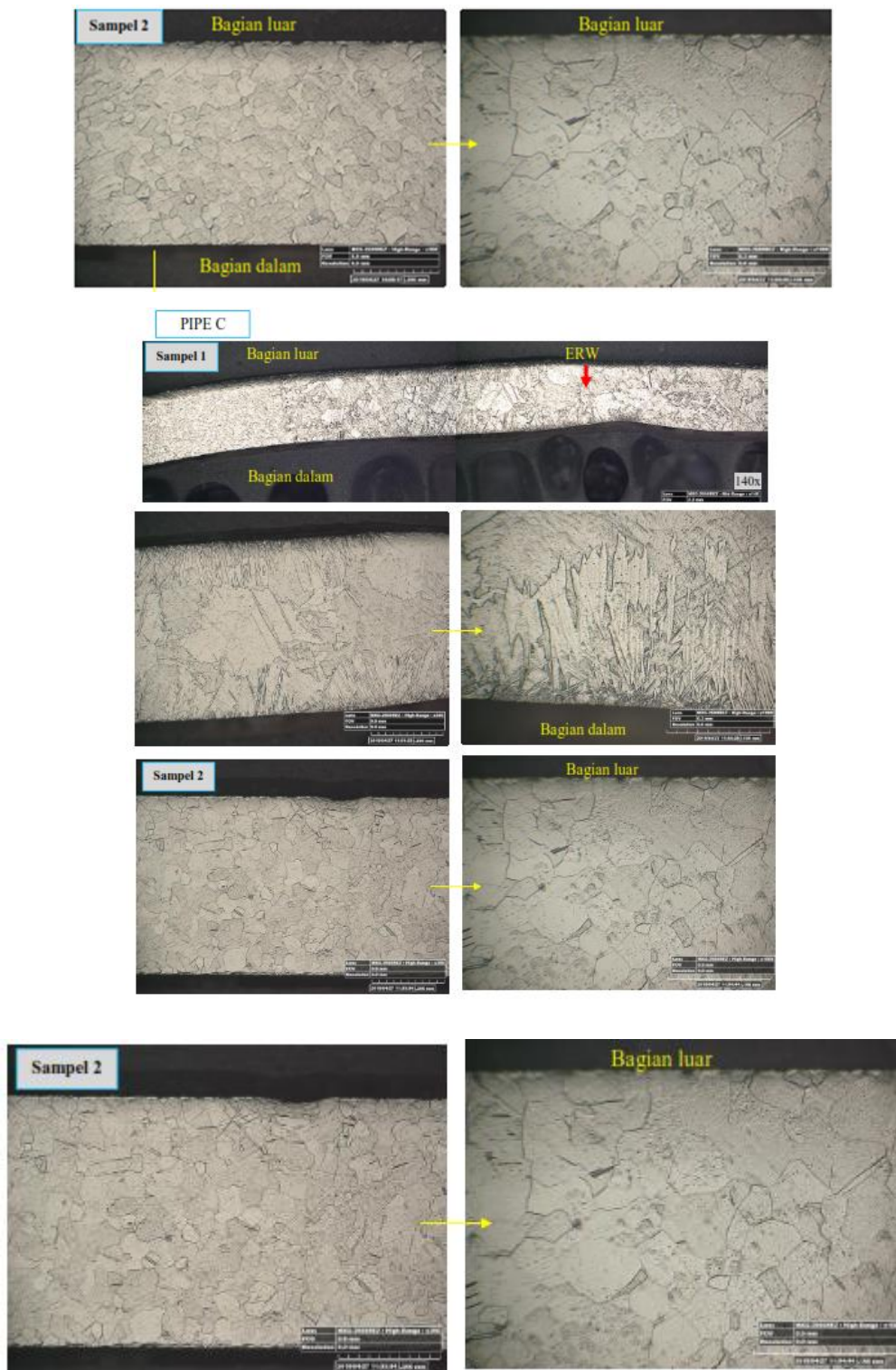


PIPE A
Sampel 2



PIPE B
Sampel 1&2





Gambar 3.17 Struktur mikro pipa sampel material

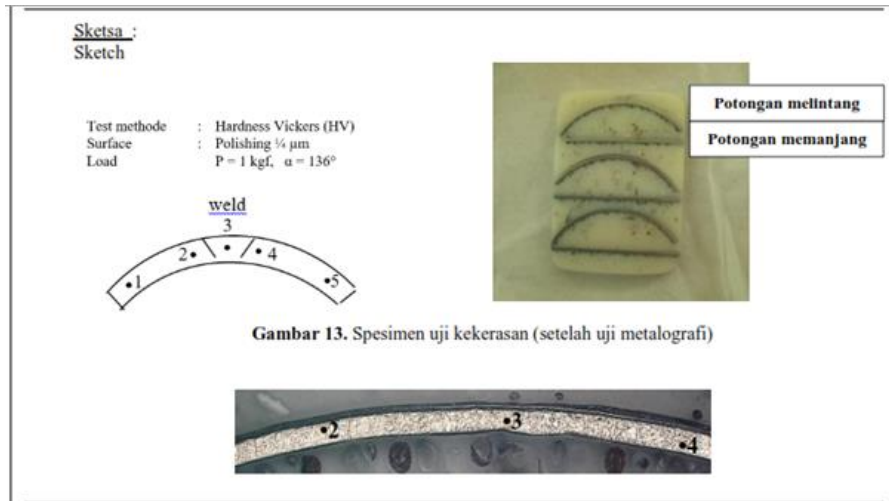
Hasil pemeriksaan struktur mikro dapat dilihat pada table 3.2:

Tabel 3.2 Hasil pengujian struktur mikro sampel condenser tube

Pipa sampel	Lokasi	Kondisi Struktur mikro	Keterangan
A	Sampel 1 potongan melintang	Pada bagian las Electric Resistance Weld (ERW), struktur mikro berupa bainite-austenit. Di material dasar bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, struktur mikro austenit kondisi normal.	Gambar 4.5
	Sampel 2 potongan memanjang	Struktur mikro berupa austenit. Pada bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, kondisi normal.	Gambar 4.6
B	Sampel 1 potongan melintang	Pada bagian las Electric Resistance Weld (ERW) struktur mikro berupa bainit-austenit. Pada bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, kondisi normal.	Gambar 4.7
	Sampel 2 potongan memanjang	Pada material dasar struktur mikro berupa austenit. Pada bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, kondisi normal.	Gambar 4.8
C	Sampel 1 potongan melintang	Pemeriksaan dibagian las Electric Resistance Weld (ERW) struktur mikro berupa bainit-austenit. Pada bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, kondisi normal.	Gambar 4.9
	Sampel 2 potongan memanjang	Dibagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat maupun korosi, struktur mikro berupa austenit kondisi normal.	Gambar 4.10

3.6.3. Uji kekerasan

Uji kekerasan dengan metode *Hardness Vickers* (HV) dengan mesin Frank Finotest dengan standard SNI 19-0409-1989, pengambilan sampel pengujian seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.18 Spesimen uji kekerasan sampel *tube*

Hasil yang diperoleh terlihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.3 Hasil uji kekerasan sampel *condenser tube*

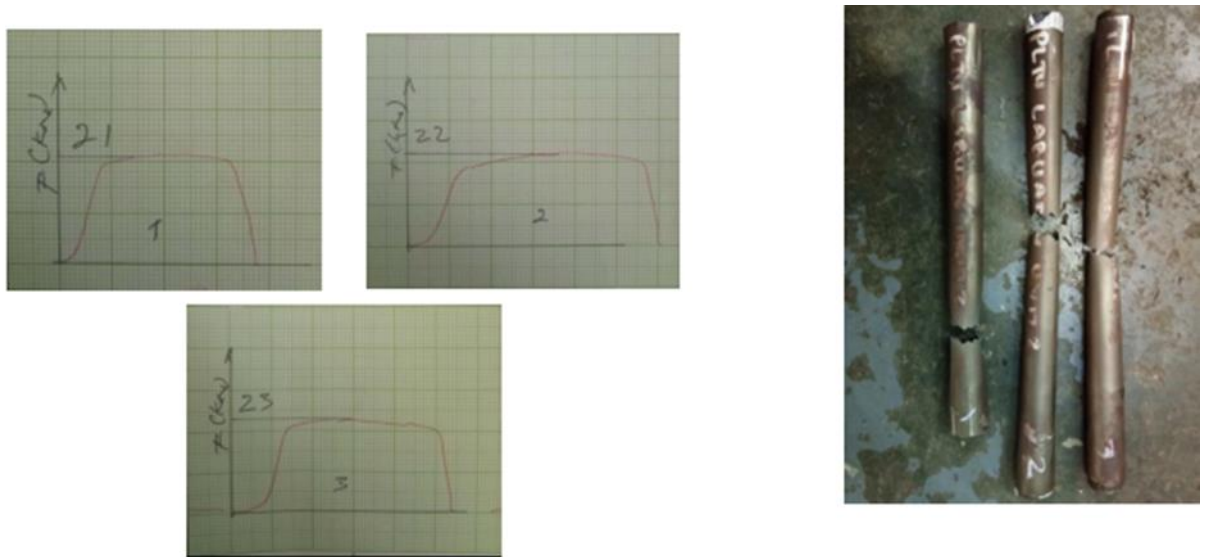
NO.	Nilai Kekerasan, HV (Panel SH)			Standar
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	
1	114	106	107	
2	112	105	104	
3	98 *	100 *	99 *	
4	108	106	105	
5	111	108	107	
Rata rata	108.6	105	104	

*Keterangan: daerah las

Berdasarkan tabel tersebut terlihat seluruh sampel tube memiliki nilai kekerasan yang relatif sama, untuk area ERW memiliki kekerasan dibawah base metalnya, hal ini dikarenakan berada area HAZ saat proses pengelasan dan masih dalam batas normal (penurunan kekerasan $\pm 10\%$ dari base metal). Secara keseluruhan nilai kekerasan sampel condenser tube ini dalam kondisi normal meskipun sedikit berada dibawah batasan properti material tube titanium grade 2.

3.6.4. Uji tarik

Uji tarik dengan mesin UPM 1000 dengan standard ASTM 370, pengambilan sampel pengujian seperti terlihat pada gambar grafik 4.12 dibawah ini:



Gambar 3.19 Uji tarik sampel tube

Hasil yang diperoleh terlihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.4 Hasil uji tarik

No Sampel	Diameter (mm)		A ₀ (mm ²)	F _{0.2} % (kN)	F _m (kN)	σ _{0.2} %		σ _u		ε (%)	Standar
	Lebar	Tebal				(N/mm ²)	(Kgf/mm ²)	(N/mm ²)	(Kgf/mm ²)		
1	31,91	31,01	44,45		21,0			472,4	48,2	40	35,18 Kgf/mm ²
2	31,95	31,01	46,46		22,0			473,5	48,3	42	
3	31,97	31,02	46,97		23,0			489,6	49,9	42	

Keterangan:

A₀ = Luas penampang F_m = Beban tarik σ_{0.2%} = Kuat Luluh
 F_{0.2%} = Beban luluh ε = Elongasi σ_u = Kuat Tarik

3.6.5. Uji komposisi kimia

Uji tarik dengan mesin PMI-Master Pro2 dengan standard ASTM E 407, ASTM A 751, dengan hasil pengambilan pengujian komposisi kimia seperti terlihat pada tabel 4.4 dibawah ini:

Tabel 3.5 Hasil pengujian komposisi kimia sampel tube

No.	Unsur	Nilai Kandungan Unsur (% berat)			Standar (%)	Keterangan
		Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3		
1	Ti	98,977	98,780	98,989	99,6	
2	Si	0,316	0,296	0,282		
3	K	0,283	0,278	0,273		
4	S	0,006	0,022	0,018		
5	Ca	0,031	0,004	0,027		
6	Al	0,041	0,064	0,049		
7	Sc	0,083	0,088	0,087		
8	Fe	0,233	0,425	0,236	0,300	
9	Pb	0,032	0,041	0,087		

3.6.6. Uji SEM dan EDS Deposit yang menempel pada *internal tube*

Pada permukaan internal tube diambil deposit yang menempel, kemudian diuji SEM dan EDS untuk mengetahui komposisi unsur didalamnya. Dari data pengujian deposit menggunakan SEM dan EDS diperoleh unsur yang dominan adalah Oksigen (O), Magnesium (Mg), dan Silikon (Si). Unsur ini menunjukkan adanya oksida akibat interaksi Mg dan Si dengan O.

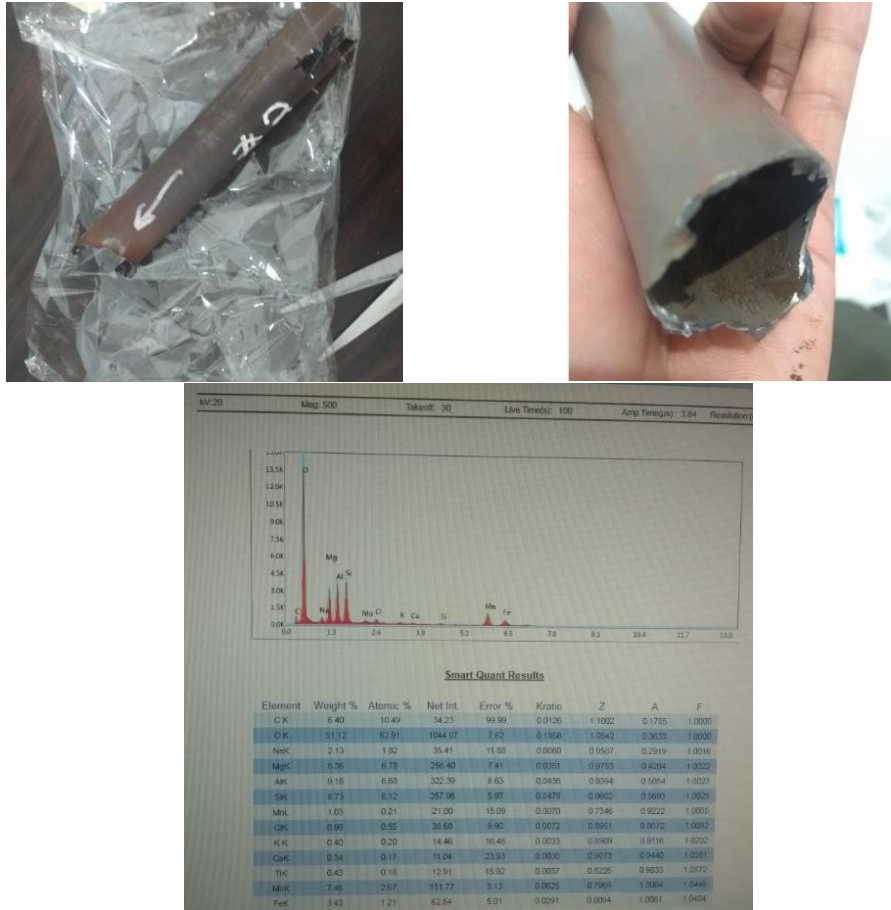
Unsur Mg terdapat pada mineral CaMgCl yang terkandung dalam air laut berinteraksi dengan O membentuk magnesium oksida (MgO). Magnesium oksida dihasilkan oleh kalsinasi dari magnesium karbonat atau magnesium hidroksida. Yang terakhir diperoleh dengan perlakuan larutan magnesium klorida, biasanya air laut, dengan kapur.

Unsur Si yang terlarut dalam air laut berinteraksi dengan O membentuk Silikon dioksida (SiO₂) / pasir. Hal ini mengindikasikan tingginya deposit MgO dan SiO₂ yang ikut terbawa pada aliran air laut ke condenser tube.

Dengan tingginya deposit pada internal tube maka akan meningkatkan tingkat erosi aliran air laut terhadap condenser tube sehingga meningkat pula tingkat penipisan tube akibat erosi ini. Selain itu deposit ini akan mengurangi efektifitas perpindahan panas condenser tube yang menyebabkan turunnya efisiensi condenser.

Berdasarkan data tersebut terlihat juga bahwa meskipun kondisi tube sudah dilakukan pembersihan dengan water jet, deposit yang menempel pada tube tidak

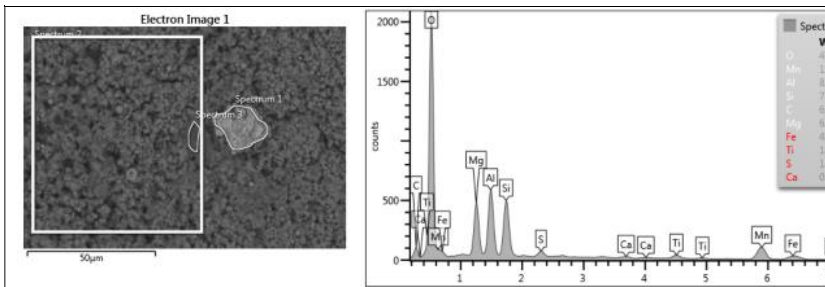
bisa dibersihkan. Sehingga metode pembersihan ini kurang optimal menghilangkan deposit yang menempel pada tube.



Gambar 3.20 Pengujian deposit yang menempel pada bagian dalam sampel *condenser tube*

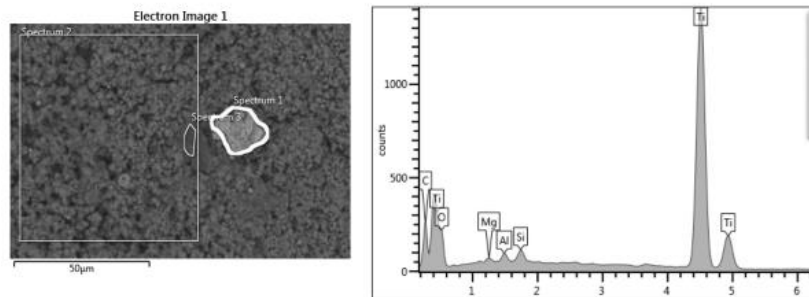
3.6.7. Uji SEM dan EDS bagian dalam dan luar tube

Uji SEM EDX dengan mesin FIE Seri QUANTA 650, dengan hasil pengujian SEM EDX seperti terlihat pada gambar 3.29 dibawah ini:



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Factory Standard
C	K series	2.54	0.02536	6.62	0.61	11.43	Yes
O	K series	118.19	0.39772	47.61	0.65	61.73	Yes
Mg	K series	8.98	0.05956	6.52	0.20	5.56	Yes
Al	K series	11.58	0.08314	8.43	0.22	6.48	Yes
Si	K series	10.27	0.08138	7.56	0.21	5.59	Yes
S	K series	1.39	0.01198	1.00	0.11	0.65	Yes
Ca	K series	0.79	0.00705	0.54	0.13	0.28	Yes
Ti	K series	2.34	0.02337	1.92	0.22	0.83	Yes
Mn	K series	17.71	0.17714	15.42	0.58	5.82	Yes
Fe	K series	5.10	0.05104	4.38	0.54	1.63	Yes
Total:				100.00		100.00	

Sampel 1a

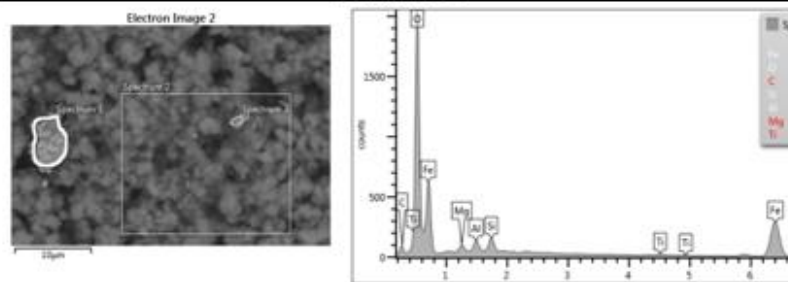


Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Factory Standard
C	K series	5.50	0.05504	6.65	0.36	17.73	Yes
O	K series	10.48	0.03526	14.30	0.88	28.61	Yes
Mg	K series	0.45	0.00297	0.28	0.09	0.37	Yes
Al	K series	0.97	0.00697	0.57	0.09	0.67	Yes
Si	K series	1.32	0.01046	0.73	0.09	0.83	Yes
Ti	K series	120.17	1.20166	77.47	0.86	51.78	Yes
Total:				100.00		100.00	Yes

Sampel 1b

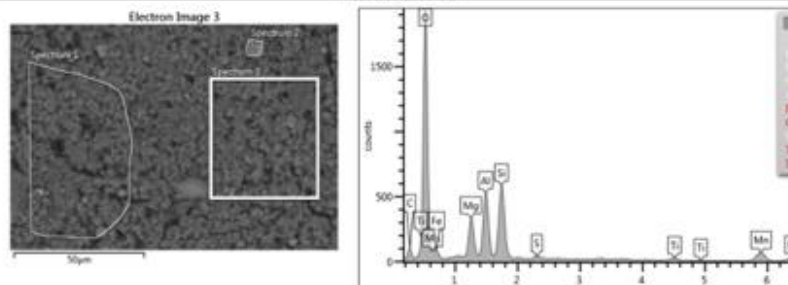
Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Factory Standard
C	K series	2.18	0.02177	5.99	0.70	10.44	Yes
O	K series	120.22	0.40455	46.70	0.65	61.07	Yes
Mg	K series	8.60	0.05701	6.16	0.19	5.30	Yes
Al	K series	12.58	0.09037	9.04	0.23	7.01	Yes
Si	K series	13.60	0.10774	9.95	0.24	7.41	Yes
S	K series	0.97	0.00832	0.70	0.11	0.46	Yes
K	K series	0.85	0.00721	0.57	0.12	0.31	Yes
Ca	K series	0.88	0.00786	0.60	0.13	0.31	Yes
Mn	K series	16.60	0.16603	14.36	0.58	5.47	Yes
Fe	K series	6.92	0.06923	5.91	0.55	2.21	Yes
Total:				100.00		100.00	

Sampel 1A



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Factor Standai
C	K series	1.37	0.01371	2.60	0.40	5.81	Yes
O	K series	129.66	0.43631	37.45	0.61	62.96	Yes
Mg	K series	1.12	0.00743	0.90	0.13	0.99	Yes
Al	K series	2.22	0.01594	1.59	0.13	1.58	Yes
Si	K series	2.86	0.02267	1.90	0.13	1.82	Yes
Ti	K series	1.24	0.01239	0.83	0.19	0.47	Yes
Fe	K series	76.41	0.76410	54.74	0.70	26.37	Yes
Total:				100.00		100.00	Yes

Sampel 2b



Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Fi St
C	K series	2.18	0.02181	5.79	0.62	9.83	
O	K series	131.69	0.44314	50.49	0.70	64.29	
Mg	K series	7.47	0.04953	5.27	0.19	4.42	
Al	K series	12.46	0.08946	8.77	0.24	6.62	
Si	K series	14.44	0.11440	10.36	0.26	7.51	
S	K series	0.67	0.00577	0.48	0.11	0.30	
Ti	K series	1.90	0.01903	1.55	0.22	0.66	
Mn	K series	13.27	0.13269	11.38	0.58	4.22	
Fe	K series	6.99	0.06992	5.92	0.58	2.16	
Total:				100.00		100.00	

Sampel 3a

Gambar 3.21 Pengujian SEM EDS sampel tube

Data awal pengujian sampel *condenser tube* dapat disimpulkan dibawah ini:

- Pada permukaan bagian luar dan bagian dalam tidak ditemukan adanya cacat atau korosi.
- Struktur mikro pada pipa kondensor daerah las Electric Resistance Weld (ERW) berupa bainit-austenit dan pada material dasar pipa dibagian luar dan bagian dalam berupa Austenit kondisi normal, tidak ditemukan adanya cacat dan serangan korosi kondisi normal.
- Nilai kekerasan Vickers antara 104 – 114 HV dan dibagian las 98 – 100 HV.
- Hasil uji komposisi kimia didapatkan 98.780 % s/d 98.977 %.
- Pemeriksaan SEM-EDS pada deposit bagian dalam didapatkan unsur O, Al, Si, Mn, dan Mg.
- Dari sisi material condenser tube PLTU Labuan unit 1 tidak ditemukan cacat dan korosi.
- Dari hasil pemeriksaan deposit yang menempel pada internal tube diperoleh dominan unsur O, Al, Mg, dan Si. Hal ini menunjukkan tingginya deposit $AlO_2.SiO_2$ (lumpur), MgO (mineral laut), dan pasir yang ikut terbawa ke condenser tube saat beroperasi.

3.7 Data sampel air pendingin kondensor

Air laut sebagai media air pendingin diambil sampel pada bagian inlet dan outlet condenser unit 1 PLTU Labuan. Air laut sebelum masuk ke *condenser* diberi injeksi *sodium hypochlorite* yang berfungsi untuk melemahkan biota laut agar tidak hidup dan menyumbat pada bagian internal tube. Sesuai dengan *manual book*, jumlah injeksi *sodium hypochlorite* pada air laut adalah sebesar 1 mg/L secara terus menerus, dan secara periodik ditambahkan lagi 3 – 4 mg/L sesuai dengan kondisi mikororganisme pada air laut. Untuk mengontrol jumlah injeksi ini, jumlah *residual chlorin* secara rutin diambil datanya dimana air laut sisi keluar *condenser* sebelum menuju kembali ke laut.



Gambar 3.22 Hasil Analisa air laut sisi masuk condenser Unit 1 PLTU Labuan

3.7.2. Kualitas air laut setelah keluar dari *condenser*

Pada pengujian ini diambil sampel air laut sisi keluar *condenser* (*outfall*) dan selanjutnya dianalisa kandungan temperatur dan residual chlorinnya. Titik sampel air laut seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 3.23 Titik pengambilan sampir air laut (air pendingin) setelah keluar dari *condenser* Unit 1 PLTU Labuan

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN HASIL

Bab ini berisi analisa dan pembahasan data dari hasil pengujian eddy current testing (ECT) dan simulasi 2D distribusi perpindahan panas fluida pada condenser. Dengan data eddy current dapat diketahui persebaran penipisan condenser tube dan lokasi dominan dengan laju penipisan yang tinggi sehingga dapat dijadikan pedoman untuk meminimalisir laju penipisan tersebut. Dengan simulasi 2D distribusi perpindahan panas fluida pada condenser digunakan untuk mengetahui persebaran penipisan condenser tube pada seluruh area condenser sehingga faktor yang dapat mempengaruhi perubahan aliran fluida yang berdampak pada kenaikan laju penipisan pada condenser dapat dilakukan mitigasi dengan tepat.

4.1 Data pengujian eddy current condenser unit 1 PLTU Labuan

Pengujian condenser tube dengan metode eddy current test ini dilakukan pada semua tube. Pada proses pengujian ini diperoleh data persebaran prosentase penipisan condenser tube, jenis penipisan / defect pada setiap tube, dan lokasi defect.

4.1.1 Hasil pengujian eddy current condenser unit 1 PLTU Labuan

Jumlah condenser tube pada unit 1 PLTU Labuan sebanyak 14.220 tube. Pada tahap ini dilakukan pengujian *eddy current* terhadap semua *tube*.

Hasil pengujian *eddy current* akan diperoleh parameter data – data dibawah ini:

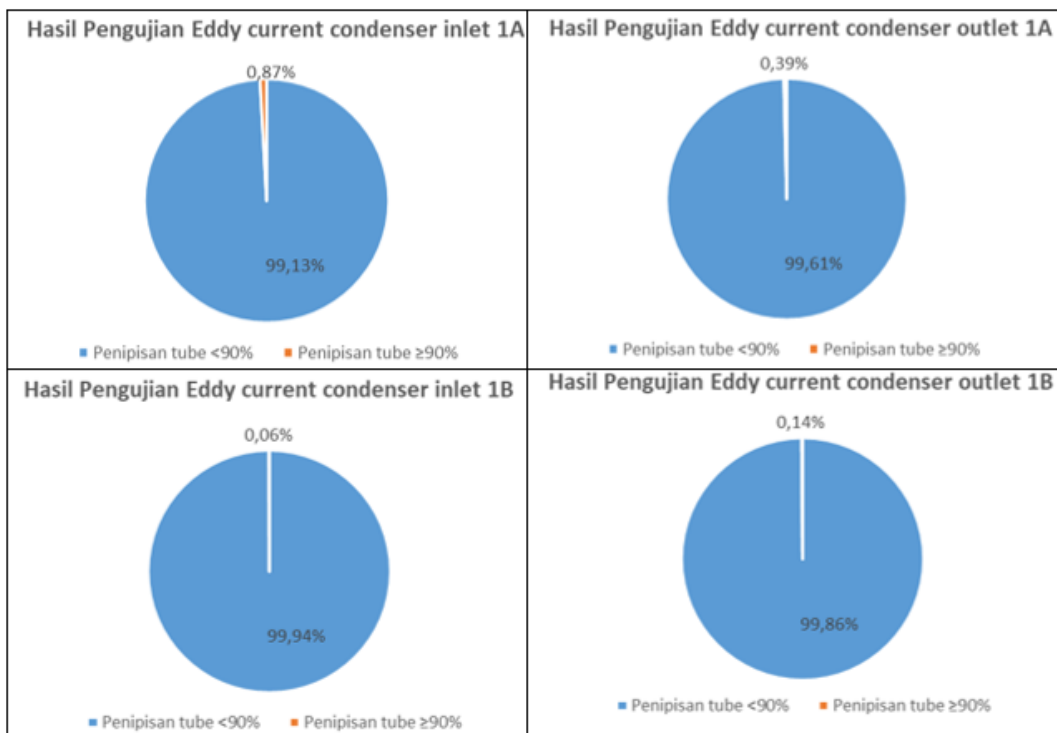
- Lokasi titik pengujian tube (dalam baris dan kolom sesuai mapping *condenser tube*).
- Sinyal arus Tube wall loss (tingkat penipisan tube).
- Penipisan tinggi dimana hasil pengujian *eddy current* dengan *wall loss* $\geq 80\%$
- Hasil pengujian *eddy current* dengan tingkat penipisan $\geq 90\%$ akan dilakukan *plug* pada *tube* tersebut. Jumlah tube yang tingkat penipisannya $\geq 90\%$ dan *diplug* sebanyak 52 buah *tube* ($\pm 1,46\%$ dari total *tube*).

Adapun secara detail hasil pengujian *eddy current* dengan *wall loss* tinggi (sebesar 80% - 89,9% dan 90% - 100%) dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4.1 Hasil pengujian *eddy current condenser tube* unit 1 PLTU Labuan

No	Side of condenser	Tube count	Tube test	80% - 89% wall loss	90% - thru wall loss
1	Inlet of Condenser 1A	3555	3555	76	31
2	Outlet of Condenser 1A	3555	3555	129	14
3	Inlet of Condenser 1B	3555	3555	21	2
4	Outlet of Condenser 1B	3555	3555	19	5
TOTAL				245	52

Secara grafik tingkat penipisan *condenser tube* Unit 1 PLTU Labuan terlihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 4.1 Grafik prosentase tingkat penipisan *condenser tube* hasil pengujian eddy current

Secara keseluruhan hasil pengujian *eddy current condenser tube* unit 1 PLTU Labuan disajikan dalam mapping / persebaran penipisan *condenser tube* berikut ini:

a. Mapping Hasil Pengujian Eddy current condenser inlet 1A

Dilakukan pengujian terhadap semua tube. Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

- Jumlah tube yang diuji sebanyak 3.555 *tube*.
- *Wall Loss* 20 – 29.9% sebanyak 6 *tube*.
- *Wall Loss* 30 – 39.9% sebanyak 80 *tube*.
- *Wall Loss* 40 – 49.9% sebanyak 269 *tube*.
- *Wall Loss* 50 – 59.9% sebanyak 588 *tube*.
- *Wall Loss* 60 – 69.9% sebanyak 1277 *tube*.
- *Wall Loss* 70 – 79.9% sebanyak 1202 *tube*.
- *Wall Loss* 80 – 89.9% sebanyak 76 *tube*.
- *Wall Loss* 90 – Thru Wall sebanyak 31 *tube*.

Jumlah tube yang di *plug* yaitu dengan *wall loss* $\geq 90\%$ sebanyak 31 *tube* (0,87%).

b. Mapping Hasil Pengujian Eddy current condenser outlet 1A

Dilakukan pengujian terhadap semua tube. Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

- Jumlah *tube* yang diuji sebanyak 3555 *tube*
- *Wall Loss* 10 – 19.9% sebanyak 2 *tube*.
- *Wall Loss* 20 – 29.9% sebanyak 61 *tube*.
- *Wall Loss* 30 – 39.9% sebanyak 248 *tube*.
- *Wall Loss* 40 – 49.9% sebanyak 495 *tube*.
- *Wall Loss* 50 – 59.9% sebanyak 807 *tube*.
- *Wall Loss* 60 – 69.9% sebanyak 1075 *tube*.
- *Wall Loss* 70 – 79.9% sebanyak 651 *tube*.
- *Wall Loss* 80 – 89.9% sebanyak 129 *tube*.
- *Wall Loss* 90 – Thru Wall sebanyak 14 *tube*.

Jumlah *tube* yang di *plug* yaitu dengan *wall loss* $\geq 90\%$ 14 *tube* (0,39%).

c. Mapping Hasil Pengujian Eddy current condenser inlet 2B

Dilakukan pengujian terhadap 3.555 buah tube. Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

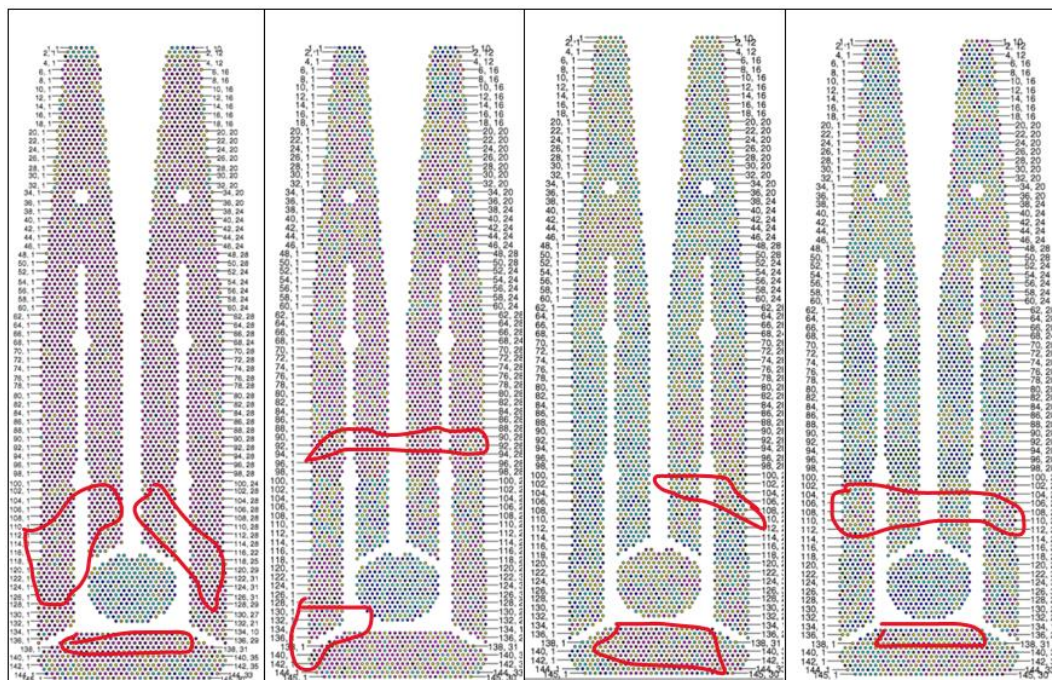
- Jumlah tube yang diuji sebanyak 3.555 *tube*
- *Wall Loss* 10 – 29.9% sebanyak 3 *tube*.
- *Wall Loss* 20 – 29.9% sebanyak 78 *tube*.
- *Wall Loss* 30 – 39.9% sebanyak 456 *tube*.
- *Wall Loss* 40 – 49.9% sebanyak 1188 *tube*.
- *Wall Loss* 50 – 59.9% sebanyak 1234 *tube*.
- *Wall Loss* 60 – 69.9% sebanyak 422 *tube*.
- *Wall Loss* 70 – 79.9% sebanyak 108 *tube*.
- *Wall Loss* 80 – 89.9% sebanyak 21 *tube*.
- *Wall Loss* 90 – Thru Wall sebanyak 2 *tube*.
- Jumlah tube dengan wall loss $\geq 90\%$: 2 tube (0,06%)

d. Mapping Hasil Pengujian Eddy current condenser outlet 2B

Dilakukan pengujian terhadap 3.555 buah tube. Dari hasil pengujian diperoleh data sebagai berikut:

- Jumlah tube yang diuji sebanyak 3.555 *tube*
- *Wall Loss* 10 – 29.9% sebanyak 37 *tube*.
- *Wall Loss* 20 – 29.9% sebanyak 257 *tube*.
- *Wall Loss* 30 – 39.9% sebanyak 1387 *tube*.
- *Wall Loss* 40 – 49.9% sebanyak 703 *tube*.
- *Wall Loss* 50 – 59.9% sebanyak 257 *tube*.
- *Wall Loss* 60 – 69.9% sebanyak 95 *tube*.
- *Wall Loss* 70 – 79.9% sebanyak 43 *tube*.
- *Wall Loss* 80 – 89.9% sebanyak 16 *tube*.
- *Wall Loss* 90 – Thru Wall sebanyak 5 *tube*.

Jumlah tube yang *diplug* yaitu dengan wall loss $\geq 90\%$ sebanyak 5 *tube* (0,14%).



LEGEND KEY			LEGEND KEY			LEGEND KEY			LEGEND KEY		
DESCRIPTION	SYMBOL	QTY	DESCRIPTION	SYMBOL	QTY	DESCRIPTION	SYMBOL	QTY	DESCRIPTION	SYMBOL	QTY
TUBE COUNT	○	3555(100%)	TUBE COUNT	○	3555(100%)	TUBE COUNT	○	3555(100%)	TUBE COUNT	○	3555(100%)
TOTAL TESTED	○	3555(100.00%)	TOTAL TESTED	○	3555(100.00%)	TOTAL TESTED	○	3555(100.00%)	TOTAL TESTED	○	3555(100.00%)
NDD	●	0(0%)	NDD	●	0(0%)	NDD	●	0(0%)	NDD	●	0(0%)
0-19.9%	●	0(0%)	0-19.9%	●	2(0.06%)	0-19.9%	●	3(0.08%)	0-19.9%	●	37(1.04%)
20-29.9%	●	6(0.17%)	20-29.9%	●	61(1.72%)	20-29.9%	●	78(2.19%)	20-29.9%	●	257(7.23%)
30-39.9%	●	80(2.25%)	30-39.9%	●	248(6.98%)	30-39.9%	●	456(12.83%)	30-39.9%	●	617(17.36%)
40-49.9%	●	289(7.57%)	40-49.9%	●	495(13.92%)	40-49.9%	●	1188(33.42%)	40-49.9%	●	1053(29.62%)
50-59.9%	●	588(16.54%)	50-59.9%	●	807(22.70%)	50-59.9%	●	1234(34.71%)	50-59.9%	●	983(27.65%)
60-69.9%	●	1277(36.92%)	60-69.9%	●	1075(30.24%)	60-69.9%	●	422(11.87%)	60-69.9%	●	410(11.53%)
70-79.9%	●	1202(33.81%)	70-79.9%	●	651(18.31%)	70-79.9%	●	108(3.04%)	70-79.9%	●	100(2.81%)
80-89.9%	●	76(2.14%)	80-89.9%	●	129(3.63%)	80-89.9%	●	21(0.59%)	80-89.9%	●	19(0.53%)
90%-THRU WALL	●	31(0.87%)	90%-THRU WALL	●	14(0.39%)	90%-THRU WALL	●	2(0.06%)	90%-THRU WALL	●	5(0.14%)
PLUG EXISTING	●	26(0.73%)	PLUG EXISTING	●	73(2.05%)	PLUG EXISTING	●	43(1.21%)	PLUG EXISTING	●	74(2.08%)
DENT/BLOCKED	□	0(0%)	DENT/BLOCKED	□	0(0%)	DENT/BLOCKED	□	0(0%)	DENT/BLOCKED	□	0(0%)

Gambar 4.2 Mapping hasil pengujian condenser tube unit 1 PLTU Labuan, 2019

Untuk mengetahui mekanisme penipisan yang terjadi dapat diidentifikasi data sinyal *eddy current* pada setiap *defect* yang terjadi pada *tube*. Akan dijelaskan sinyal *defect* dengan nilai *wall loss* dari data *eddy current* sebesar 90% atau lebih.

4.1.2 Data signal eddy current

Sinyal *eddy current* menunjukkan variasi defect terhadap tube melalui sinyal arus bolak – balik dari coil probe. Apabila terdapat defect, maka akan terjadi perubahan arus bolak balik pada sensor probe yang memberikan input perubahan impedansi coil probenya sehingga akan menghasilkan perubahan sinyal. Berbagai defect akan memberikan sinyal yang berbeda – beda karena respon dari arus yang diterima tersebut juga berbeda – beda. Berbagai sinyal defect yaitu:

- ID Defect

Merupakan penipisan tube pada sisi ID nya dimana ID mengalami penambahan diameternya. Sinyal arus eddy current (V_{pp}) akan bergerak naik secara perlahan berlawanan arah dengan jarum jam jika terjadi kenaikan frekuensi.

- OD Defect

Merupakan penipisan tube pada sisi OD nya dimana OD mengalami pengurangan diameternya. Sinyal arus eddy current (V_{pp}) akan bergerak naik secara cepat searah arah dengan jarum jam jika terjadi kenaikan frekuensi.

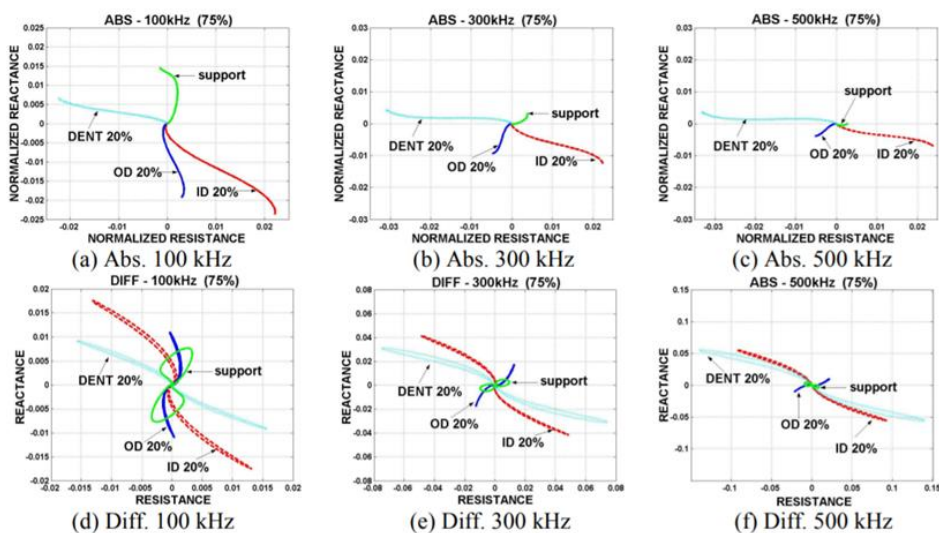
- Dent / lekukan

Cacat lekukan pada tube diindikasikan dengan naiknya arus secara lebih cepat lagi dibandingkan dengan OD defect

- Bulge / menggelembung

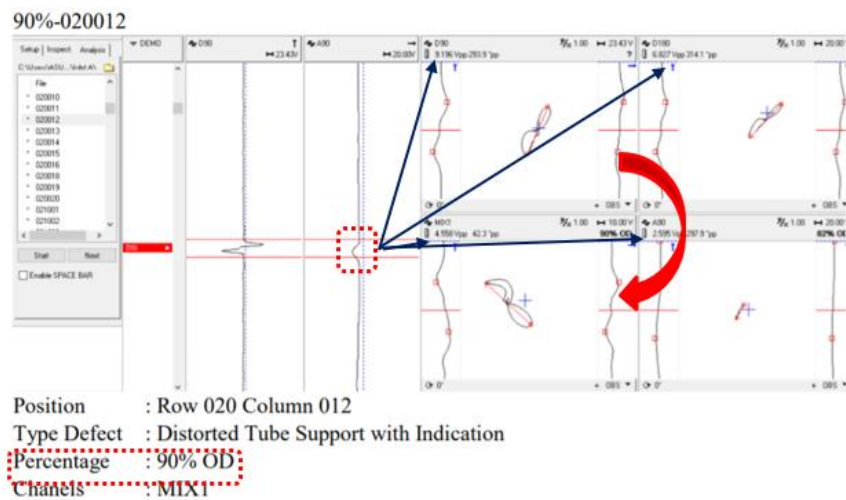
Merupakan indikasi cacat menambahnya OD. Sinyal defect ini berupa naiknya arus searah jarum jam dan nilainya lebih besar lagi dibandingkan cacat OD dan dent.

Detail sinyal defect terlihat pada gambar dibawah ini:



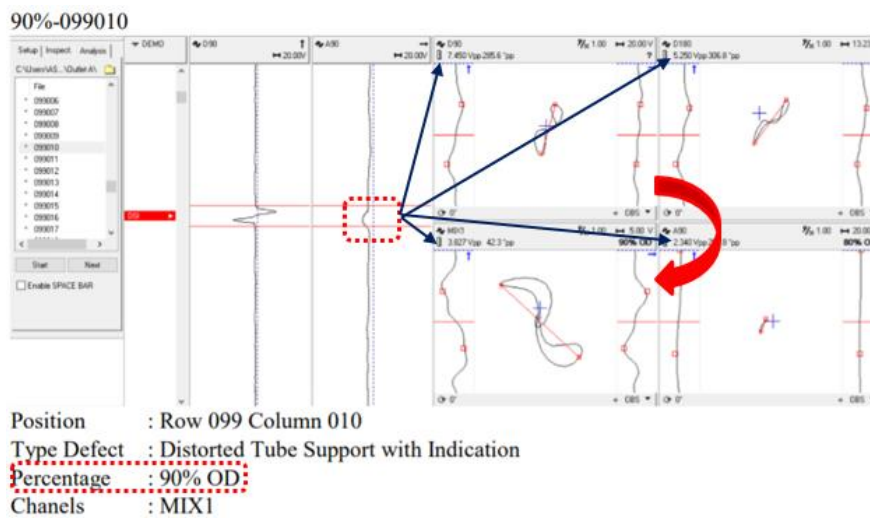
Gambar 4.3 Jenis sinyal *defect* pada alat *eddy current*

Berikut ini adalah beberapa contoh sinyal cacat / *defect* yang diperoleh dari hasil uji *eddy current* (untuk data lengkapnya dilampiran):



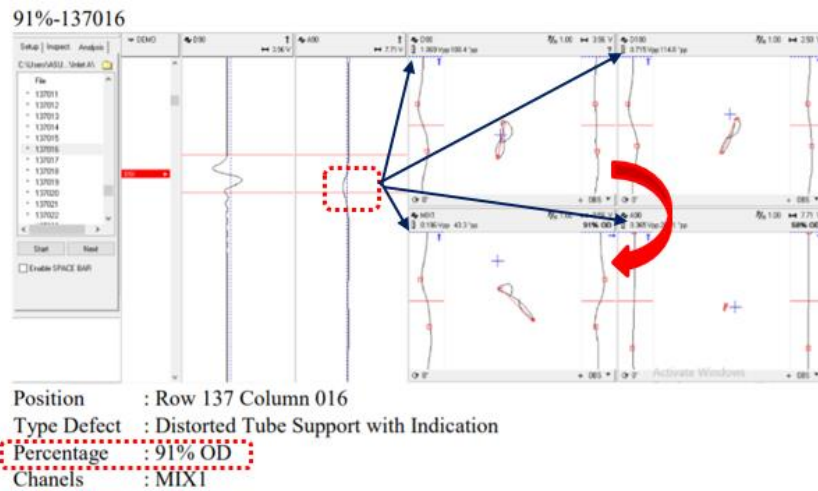
Gambar 4.4 Data Sinyal cacat / *defect eddy current* pada inlet condenser 1A,
defect terdapat pada bagian OD / sisi luar *tube*

Indikasi cacat pada gambar sinyal tersebut adalah sisi OD yaitu pergerakan
 kenaikan arus searah jarum jam.



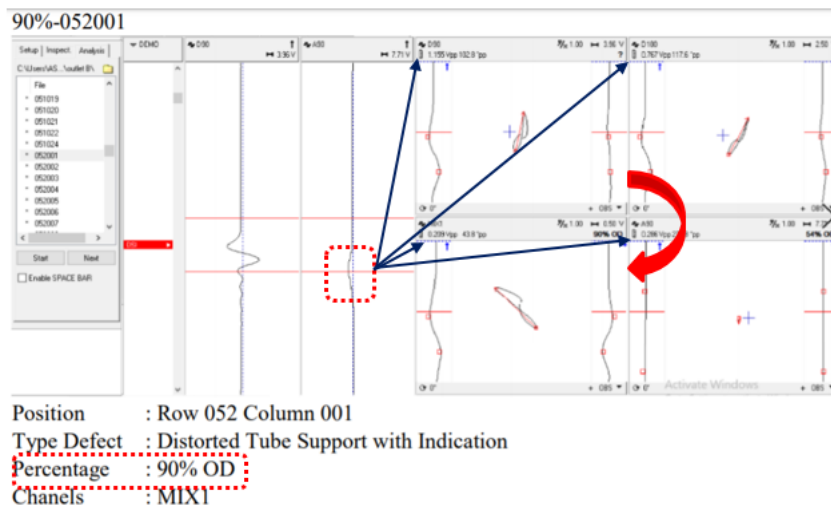
Gambar 4.5 Data Sinyal cacat / *defect eddy current* pada outlet condenser 1A,
defect terdapat pada bagian OD / sisi luar *tube*

Indikasi cacat pada gambar sinyal tersebut adalah sisi OD yaitu pergerakan
 kenaikan arus searah jarum jam.



Gambar 4.6 Data Sinyal cacat / *defect eddy current* pada inlet condenser 1B, *defect* terdapat pada bagian OD / sisi luar *tube*

Indikasi cacat pada gambar sinyal tersebut adalah sisi OD yaitu pergerakan kenaikan arus searah jarum jam.



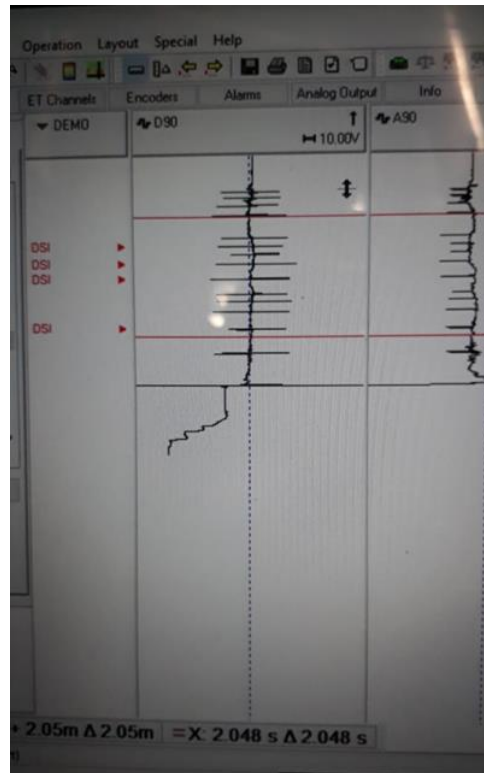
Gambar 4.6 Data Sinyal cacat / *defect eddy current* pada outlet condenser 1B, *defect* terdapat pada bagian OD / sisi luar *tube*

Indikasi cacat pada gambar sinyal tersebut adalah sisi OD yaitu pergerakan kenaikan arus searah jarum jam.

Berdasarkan data sinyal *defect* diatas terlihat bahwa penipisan yang terjadi pada bagian luar / *outside diameter* (OD). Selanjutnya dilakukan identifikasi lokasi untuk *defect* tersebut.

4.1.3 Identifikasi lokasi penipisan *condenser tube*

Selanjutnya lokasi *tube* yang mengalami penipisan tersebut dianalisa data sinyal secara utuh dapat diketahui lokasi tersebut. Adapun data sinyal secara utuh seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



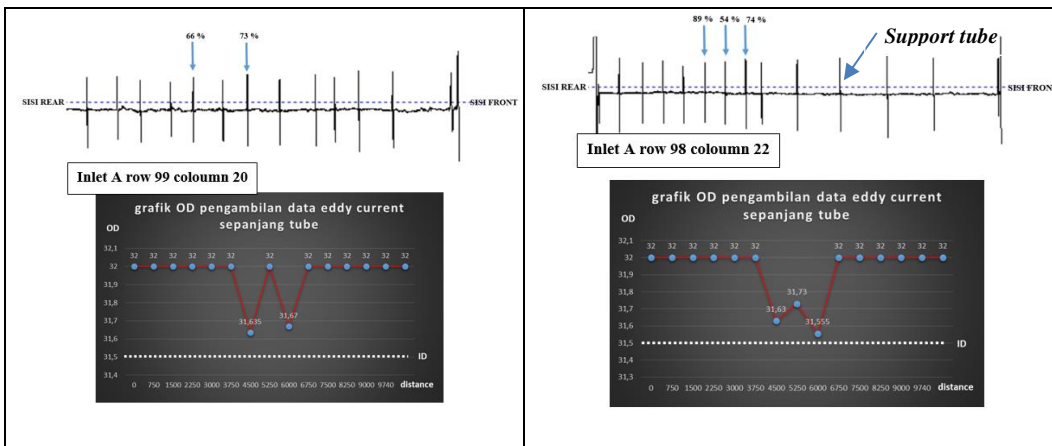
Gambar 4.7 Data Sinyal *cacat / defect eddy current* dari ujung ke ujung (*rear to front*)

Dari gambar terlihat sinyal arus eddy current mulai pada posisi depan (*fornt*) hingga belakang (*rear*). Sinyal arus akan berfluktuasi setiap melewati *support* dan apabila terdapat *defect* dari layar komputer akan muncul prosentasenya. Prosentase ini menunjukkan prosentase penipisan pada bagian *tube* tersebut.

Data sinyal eddy current diambil secara utuh sepanjang *tube* yang diambil datanya. Dengan demikian dapat dilihat posisi tepatnya untuk lokasi penipisan / defect yang terjadi. Sinyal dimulai dari sisi front menuju rear melebihi sepanjang *tube*, terlihat amplitudo naik turun indikasi posisi tersebut adalah pada posisi *support tube*, dari gambar sinyal terlihat jarak antar *support tube* tidak sama hal ini dikarenakan faktor kecepatan saat proses penarikan *probe sensor eddy current*. Sinyal akan memberikan informasi apabila terdapat adanya *defect* pada *tube* yang dilaluinya karena dengan adanya defect maka medan magnet pada posisi tersebut berubah sehingga memberikan respon *impedance* pada sinyal arus yang diberikan.

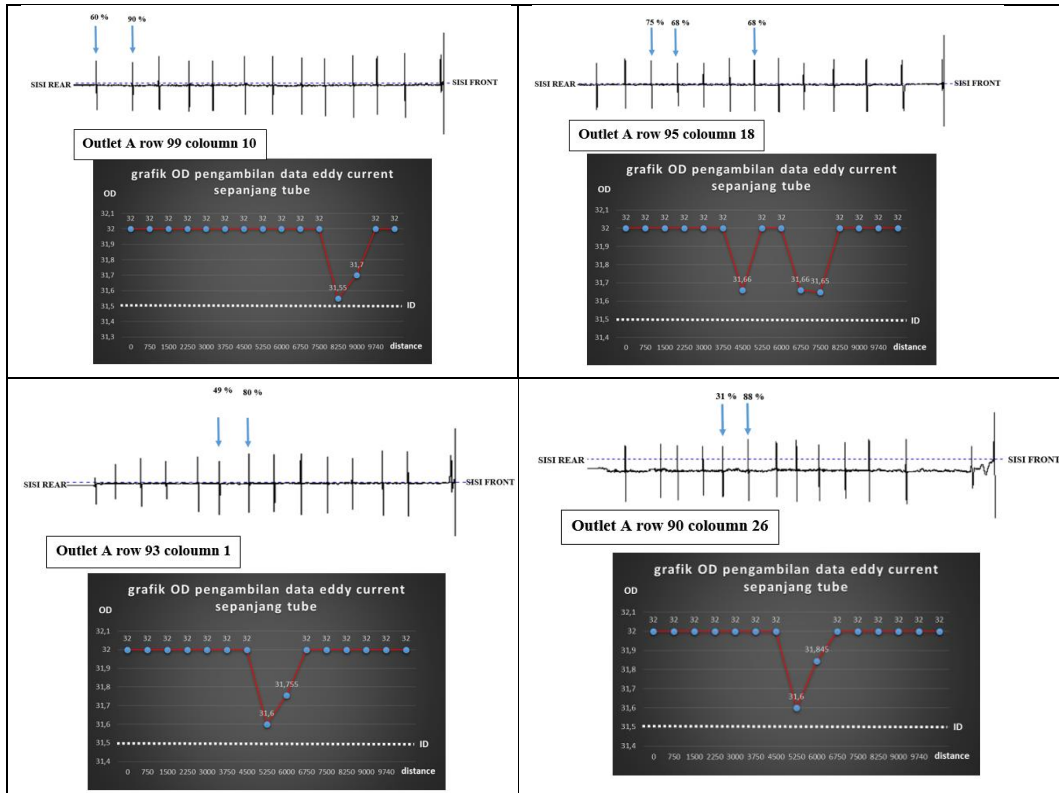
- **Lokasi penipisan condenser sisi inlet A**

Untuk sisi A inlet diambil beberapa tube yang diambil sinyalnya seperti terlihat pada gambar dibawah ini:



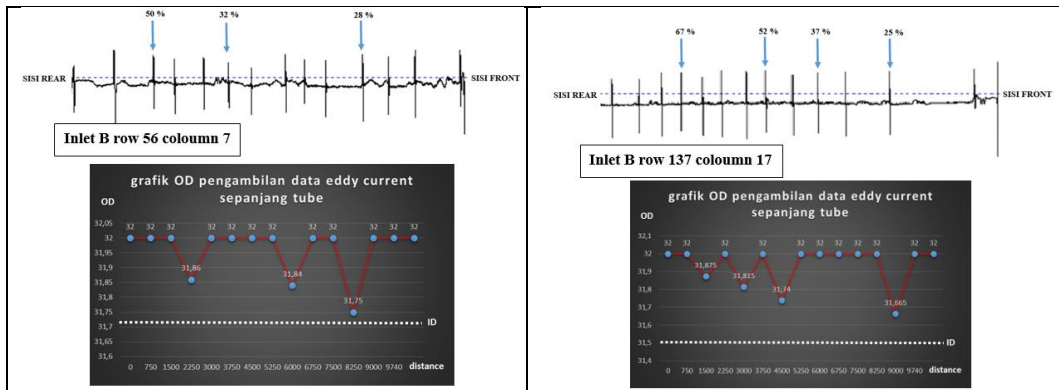
Gambar 4.8 Sinyal *Eddy current* sepanjang *tube* pada beberapa *tube* sisi inlet A

- Lokasi penipisan *condenser* sisi outlet A



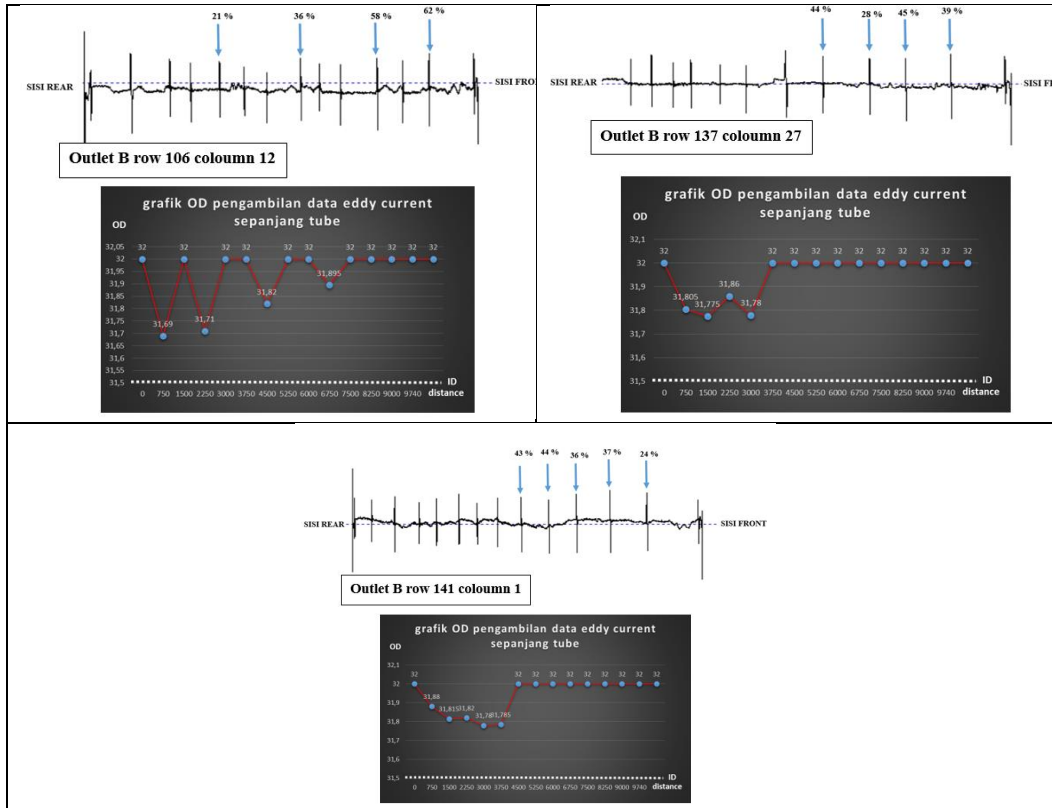
Gambar 4.9 Sinyal *Eddy current* sepanjang *tube* pada sisi outlet A

- Lokasi penipisan *condenser* sisi inlet B



Gambar 4.10 Sinyal *Eddy current* sepanjang *tube* pada sisi inlet B

- Lokasi penipisan condenser sisi outlet B

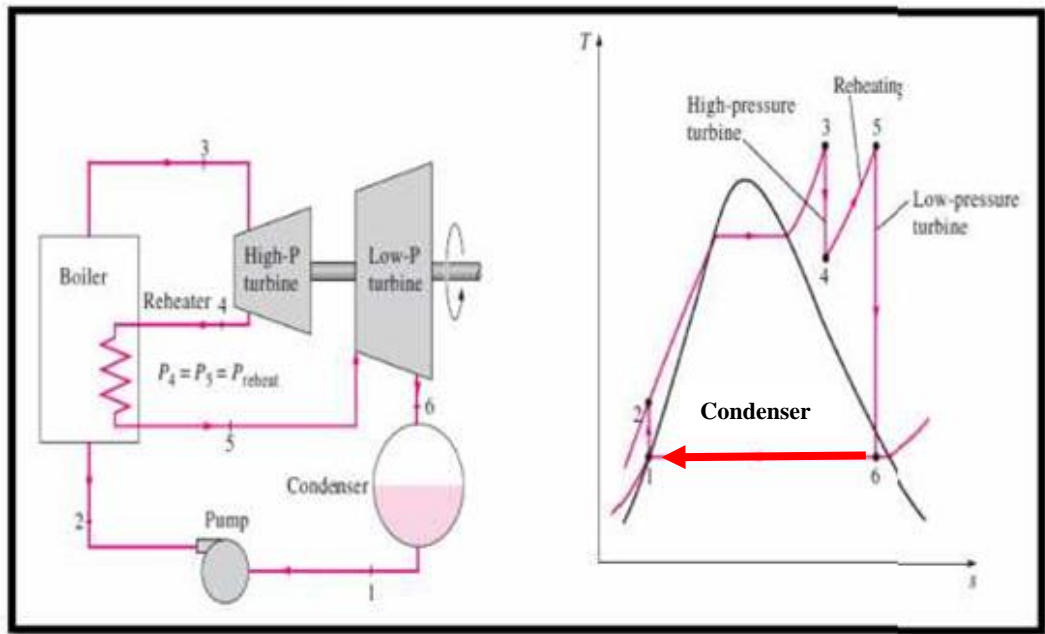


Gambar 4.11 Sinyal *Eddy current* sepanjang *tube* pada sisi outlet B

Berdasarkan data pengujian *eddy current* diatas diperoleh kesimpulan bahwa tingkat penipisan tinggi (dengan *wall loss* 90% sampai 100%) terdapat pada area dekat dengan struktur *baffle* pada *tube bundles* (pada gambar 4.2). Pada area tersebut uap keluaran turbin tingkat kebasahannya sudah cukup tinggi dan kondensasi uap mengalir mengikuti arah *baffles tube* sehingga terdapat tumpukan air kondensasi pada area tersebut.

Hal ini terlihat pada gambar 4.12 siklus *ideal rankine* PLTU dengan reheating, proses pada *condenser* (siklus nomor 6 ke 1) panas laten dari uap keluaran *Low Pressure Turbine* diserap oleh aliran air pendingin *condenser* sehingga terjadi proses kondensasi dengan tingkat kebasahan uap tersebut semakin tinggi. Pada area *baffles tube* yang berada pada bagian bawah *condenser tube bundles*, uap kondensasi diarahkan menuju *hotwell*. Kondisi ini menimbulkan terjadinya penumpukan aliran uap kondensasi yang dapat meningkatkan turbulensi aliran pada area tersebut.

Sehingga tingkat vibrasi dan erosi pada *support tube* area tersebut juga tinggi. Vibrasi dan erosi pada *support* ini menyebabkan *fretting* keausan / *wear* pada *support tube* sehingga akan mengikis *tube* pada area tersebut.

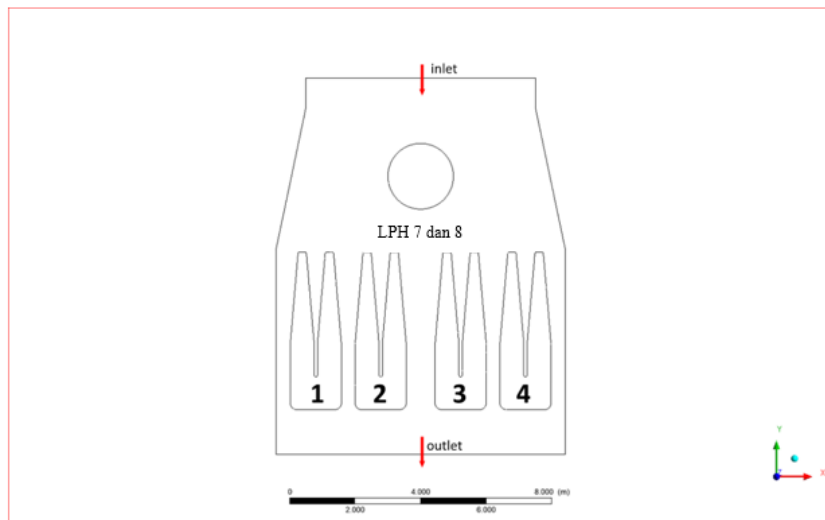


Gambar 4.12 Siklus *Ideal Rankine* PLTU dengan *reheating*

Selanjutnya dilakukan analisa untuk persebaran tingkat distribusi perpindahan panas pada *condenser* dengan simulasi fluent 2D untuk mengetahui persebaran ini.

4.2 Simulasi numerik distribusi aliran 2D pada *condenser*

Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dilakukan dengan memodelkan penampang *condenser* secara 2 dimensi. Pada kondisi beban *Turbine Maximum Continuous Rating* (TMCR) dengan *flowrate steam* sebesar 566.062 kg/jam (157.239 kg/s) serta luas inlet sebesar 48 m², didapatkan kecepatan masuk steam sebesar 5.46 m/s. Konfigurasi *tube* 2 dan 3 merupakan inlet fluida air pendingin (air laut) dengan temperatur masuk sebesar 30°C sementara konfigurasi tube 1 dan 4 merupakan outlet fluida air pendingin dingin dengan temperatur keluar sebesar 37°C seperti terlihat pada gambar 4.13.

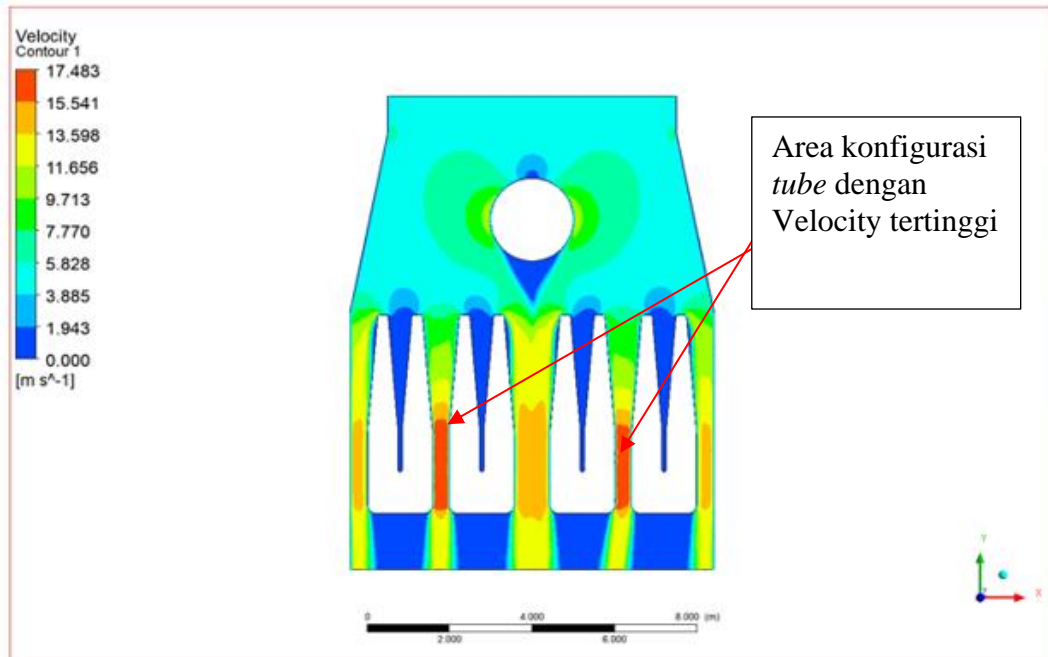


Gambar 4.13 Pemodelan simulasi 2D *condenser* menggunakan CFD

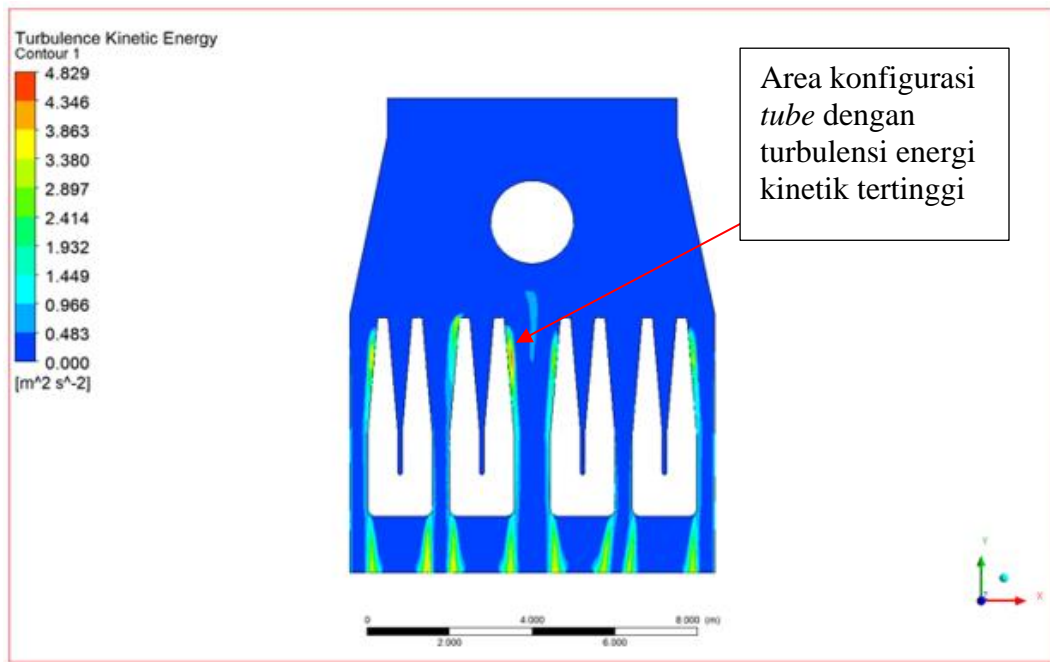
Dari hasil simulasi didapatkan kontur kecepatan pada konfigurasi *tube*, terlihat adanya area turbulen ditandai dengan besarnya kecepatan pada celah antar konfigurasi *tube* bagian bawah yang lebih tinggi dibandingkan dengan area lain (gambar 4.14 dengan warna kontur merah). Pada area konfigurasi *tube* juga terdapat area turbulensi energi kinetik di sisi-sisi luar konfigurasi (gambar 4.15). Berdasarkan simulasi tersebut kecepatan tertinggi berada pada kisaran 17,483 m/s dan turbulensi energi kinetik tertinggi berada pada kisaran 4,829 m²/s².

Adanya turbulensi dapat memicu adanya vibrasi pada susunan *support tube* yang dikenal dengan istilah *flow induced vibration* (FIV). Adanya FIV dapat memicu terjadinya gesekan antar komponen pada *support tube* dengan OD *tube*. Proses ini lama kelamaan akan menimbulkan keausan pada daerah eksternal (OD) dari *condenser tube*. Mekanisme penipisan karena vibrasi inilah yang sering dikenal sebagai *fretting*.

Selanjutnya dilakukan variasi perubahan parameter – parameter simulasi untuk dapat mengetahui dampak terhadap proses perpindahan panas pada *condenser*.



Gambar 4.14 Kontur kecepatan simulasi 2D *condenser* pada beban TMCR

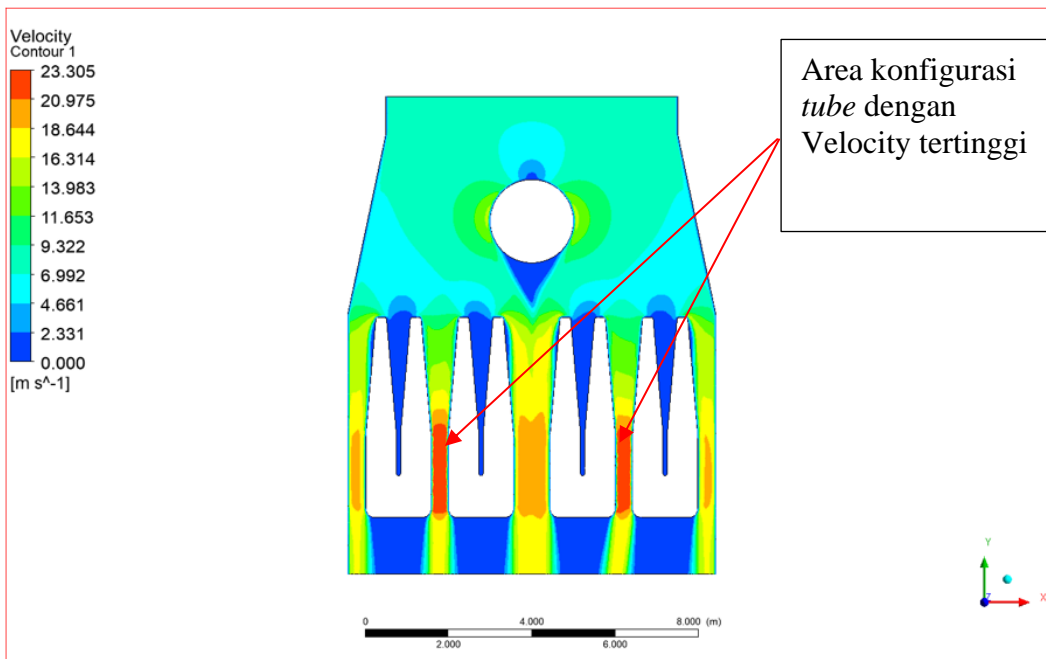


Gambar 4.15 Kontur energi kinetik simulasi 2D *condenser* pada TMCR

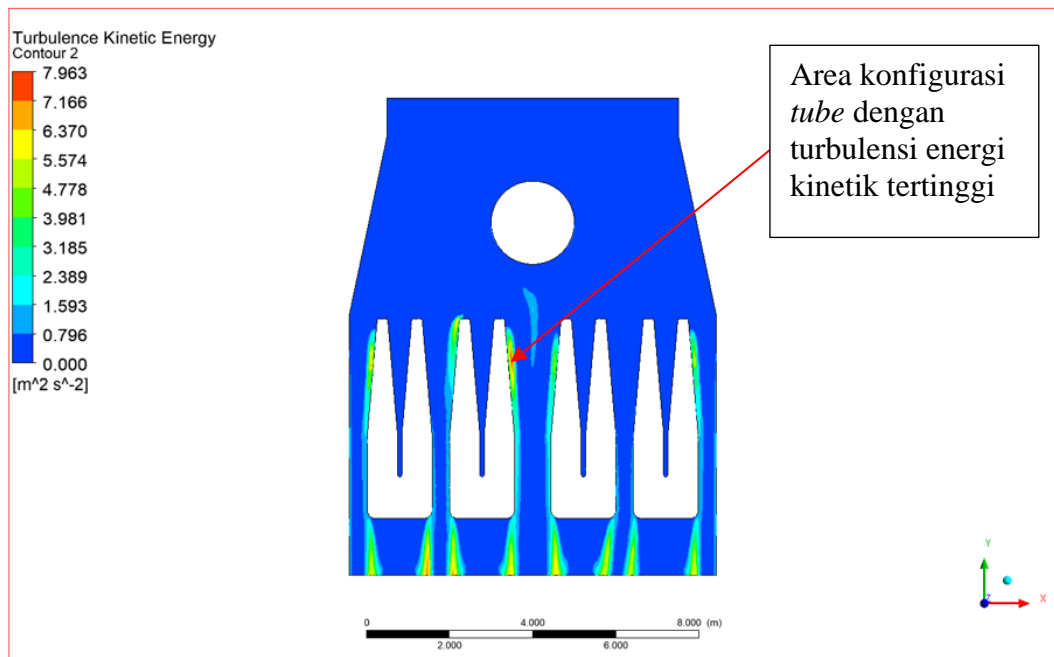
4.2.1 Variasi simulasi dengan perubahan *main steam flow*

Pada pemodelan ini *main steam flow* dirubah dari 566.062 kg/jam (157.239 kg/s) menjadi 209.652 kg/s, penambahan 1/3 dari total *mainsteam* pada TMCR. Hasil simulasi diperoleh *velocity* tertinggi ada kenaikan dari 17,483 m/s menjadi 23,305 m/s dan turbulensi energi kinetik tertinggi naik dari 4,829 m²/s² menjadi 7,963m²/s². Hal ini menunjukkan kenaikan *velocity* 33,3% dan turbulensi energi kinetik sebesar 65% yang berdampak pada meningkatnya mekanisme *fretting* pada *support tube* (gambar 4.16 dan 4.17). Adapun untuk area dengan tingkat *velocity* dan turbulensi energi kinetik pada kondisi variasi simulasi ini relatif sama dengan simulasi pada kondisi TMCR yaitu pada area celah konfigurasi *tube* bagian bawah. Penambahan *main steam flow* ini bisa berasal dari:

- Kebocoran *bypass system*
- Kebocoran drain – drain turbin
- Drain *feedwater heater*



Gambar 4.16 Kontur kecepatan simulasi 2D *condenser* pada beban TMCR dengan variasi penambahan 30% *mainsteam flow*

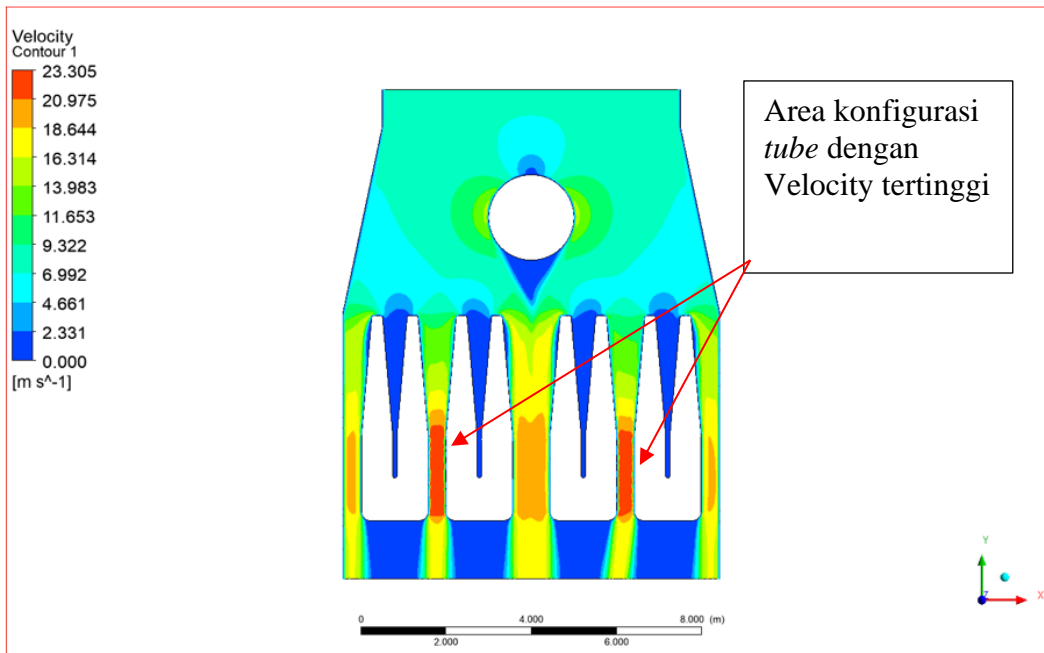


Gambar 4.17 Kontur turbulensi energi kinetik simulasi 2D *condenser* pada beban TMCR dengan variasi penambahan 30% *mainsteam flow*

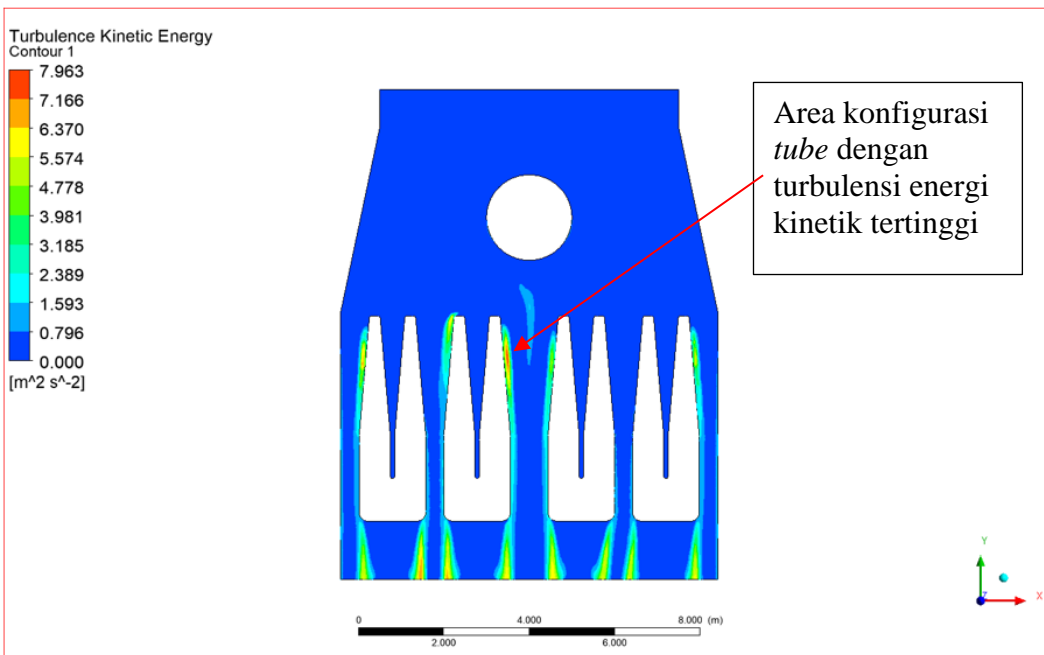
4.2.2 Variasi simulasi dengan perubahan temperatur air pendingin

Pada pemodelan ini temperatur outlet air pendingin dirubah dari 37°C menjadi 40°C pada TMCR. Hasil simulasi diperoleh *velocity* tertinggi (gambar 4.17 dengan warna kontur merah) ada kenaikan dari 17,483 m/s menjadi 23,305 m/s dan turbulensi energi kinetik tertinggi naik dari 4,829 m²/s² menjadi 7,963m²/s². Adapun untuk area dengan tingkat *velocity* dan turbulensi energi kinetik pada kondisi variasi simulasi ini relatif sama dengan simulasi pada kondisi TMCR yaitu pada area celah konfigurasi *tube* bagian bawah. Kenaikan temperatur air laut ini bisa disebabkan oleh:

- Jumlah air pendingin kurang dikarenakan salah satu CWP kondisi stop / tidak beroperasi.
- Tingkat deposit pada *internal tube* yang menyebabkan terganggunya proses perpindahan panas pada *tube*.



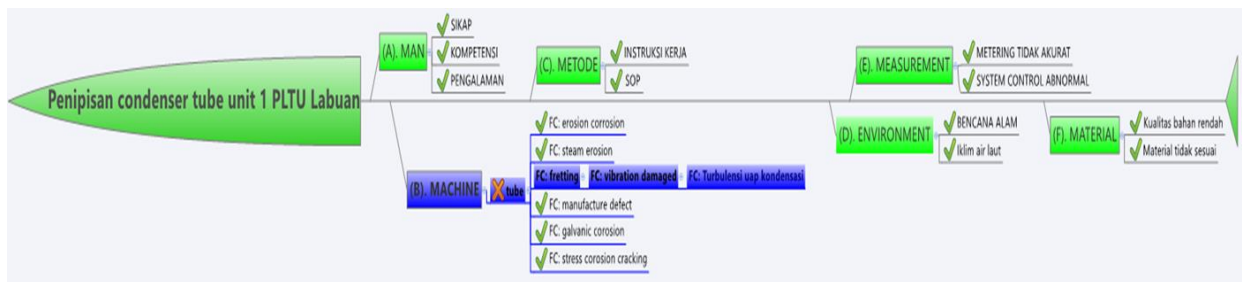
Gambar 4.18 Kontur kecepatan simulasi 2D *condenser* pada beban TMCR dengan variasi perubahan temperatur air pendingin



Gambar 4.19 Kontur turbulensi energi kinetik simulasi 2D *condenser* pada beban TMCR dengan variasi perubahan temperatur air pendingin

4.3 Root Cause Problem Solving (RCPS) penipisan *condenser tube* unit 1 PLTU Labuan

Berdasarkan data – data hasil pengujian *eddy current* yang telah diperoleh dan simulasi 2D CFD untuk kondensor, *Root Cause Problem Solving* (RCPS) *fishbone diagram* mekanisme penipisan *condenser tube* unit 1 PLTU Labuan yaitu mekanisme *fretting* yang disebabkan oleh keausan *support tube* akibat turbulensi aliran uap kondensasi dan vibrasi seperti terlihat pada gambar sebagai dibawah ini:



Gambar 4.20 RCPS penipisan *condenser tube* Unit 1 PLTU Labuan

Dengan opsi *problem solving*:

- Menjaga kualitas uap yang masuk ke kondensor

Kualitas uap yang masuk ke kondensor selalu diyakinkan berada pada Batasan normal operasinya. Kualitas uap ini terdiri dari *Conductivity* dan PH. Karena kenaikan parameter tersebut akan mempercepat laju korosi dan erosi pada *support tube* yang diakibatkan oleh turbulensi uap kondensasi (*support tube* tidak hanya mengalami keausan karena *fretting* tetapi juga karena korosi).

- Menjaga jumlah uap yang masuk ke kondensor

Dengan naiknya jumlah uap yang masuk ke kondensor akan meningkatkan tingkat turbulensi uap kondensasi yang terjadi sehingga meningkatkan laju keausan *support tube*.

- Menjaga agar tidak terjadi kebocoran uap yang masuk ke kondensor

Dengan adanya kebocoran uap yang ikut masuk ke kondensor maka jumlah uap yang masuk ke kondensor akan bertambah dan mengakibatkan tingkat turbulensi uap kondensasi juga meningkat sehingga tingkat keausan *support tube* akan meningkat pula. Sumber kebocoran uap yang dapat terjadi yaitu:

- ❖ Jalur *Bypass system*, saat unit sudah beroperasi normal dan kondisi *bypass* menutup. Apabila kondisi katup *bypass* kurang rapat maka uap ikut masuk ke kondensor.
- ❖ Jalur drain – drain turbin yang kurang rapat katupnya.
- ❖ Jalur drain *feedwater heater* yang menuju kondensor kurang rapat saat beroperasi atau saat dibuka drainnya dikarenakan *feedwater heater* sedang *outservice* (karena dalam kondisi pemeliharaan).
- Menjaga kebersihan *internal tube* dari deposit dengan *mechanical tube cleaning* dan *ball cleaning*.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil data – data dari Analisa pengujian *Eddy current* dan pemodelan simulasi 2D menggunakan CFD pada *condenser* unit 1 PLTU Labuan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian *eddy current condenser tube* diperoleh data penipisan tube sebesar 52 buah tube (1,46% dari total tube) dengan penipisan $\geq 90\%$ dan selanjutnya dilakukan *plug* pada *tube* tersebut.
2. Hasil pengujian *eddy current condenser tube* diperoleh persebaran penipisan tinggi secara dominan terjadi pada area *tube bundles* yang dekat dengan *baffles tube*.
3. Hasil pengujian *eddy current condenser tube*, penipisan terjadi pada sisi luar tube (OD) dan lokasinya berada pada *support tube*.
4. Hasil pemodelan 2D dengan CFD proses perpindahan panas pada kondensor akan menimbulkan turbulensi energi kinetik pada area belakang *condenser* dan area sekitar konfigurasi *tube bagian* bawah mengakibatkan keausan / *fretting* pada *support tube*.
5. Pada pemodelan *condenser* 2D dengan CFD, kenaikan *main steam flow* lebih dari TMCR akan meningkatkan turbulensi energi kinetik dari $4,829 \text{ m}^2/\text{s}^2$ menjadi $7,963 \text{ m}^2/\text{s}^2$ dan kecepatan dari $17,483 \text{ m/s}$ menjadi $23,305 \text{ m/s}$.
6. Pada pemodelan *condenser* 2D dengan CFD, kenaikan temperatur outlet air pendingin dari 37°C menjadi 40°C , akan meningkatkan kecepatan tertinggi dari $17,483 \text{ m/s}$ menjadi $23,305 \text{ m/s}$ dan turbulensi energi kinetik tertinggi naik dari $4,829 \text{ m}^2/\text{s}^2$ menjadi $7,963 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

Sehingga disimpulkan bahwa mekanisme penipisan *condenser tube* unit 1 PLTU Labuan adalah keausan / *wear* pada *support tube (fretting)* disebabkan oleh vibrasi akibat turbulensi aliran uap kondensasi.

5.2 Saran

Untuk memperbaiki kinerja dan kehandalan operasi *condenser* ini, peneliti memberikan saran dan rekomendasi sebagai berikut:

1. Pengujian *Eddy current condenser tube* unit 1 PLTU Labuan dilakukan secara rutin setiap overhaul.
2. Pengujian *Eddy current condenser tube* perlu dilakukan juga pada unit 2 PLTU Labuan.
3. Perlu dilakukan simulasi aliran fluida 3D dengan mempertimbangkan aliran *multi fase* untuk dapat lebih mengetahui aliran dan turbulensi uap yang terjadi pada seluruh area *condenser*.
4. Untuk meminimalisir terjadinya kerusakan pada *support tube* perlu dijaga kualitas uap, laju aliran uap, kebocoran – kebocoran uap selain dari keluaran LP Turbin, dan menghindarkan terjadinya deposit karena dari kandungan mineral dan partikel pada air pendingin.

DAFTAR PUSTAKA

1. Aronson, K. E., Ryabchikov, A. Yu., Brodov, Yu. M., and Loginov, M. I., 2013. Development of a Procedure for Substantiating Replacement Terms for the Condenser Tubes of Steam Turbine Installations. Russia: Ural Federal University.
2. Fayard, Eric H., 2011. Improving Condenser Reliability and Availability Through Effective Offline Cleaning and Nondestructive Testing.. USA : Conco Systems Verona, PA.
3. ELSHIEKH DAFFAALLAH, ZUHIER MOHAMMED., 2001. EVALUATION OF EDDY CURRENT CONDENSER TUBE INSPECTION PRACTICE IN KHARTOUM NORTH POWER STATION. A thesis Submitted to the University of Khartoum in Partial Fulfillment for the Degree of MSc in Electrical Power Engineering, University of Khartoum.
4. Golovin, V. A., et al., 2016. Determination of the Life Cycle of Heat-Exchange Tubes of Vapor Condensers on the Basis of Statistical Analysis of Local Pitting Corrosion According to Data of Eddy Current Testing. Russia : Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow.
5. Shalaby, H.M., et al., 2011. Failure of titanium condenser tube. Kuwait: Kuwait Institute for Scientific Research.
6. Montgomery, Melanie., Enemark, Allan., Hangaard, Anders., 2014. Failure of Titanium Condenser Tubes After 24 Years Power Plant Service. ASM International.
7. Fei-Jun Chen. Et al., 2013. Failure analysis on abnormal wall thinning of heat-transfer titanium tubes of condensers in nuclear power plant Part I: Corrosion and wear. China : Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai.
8. Incropera, Frank P. and David P. Dewitt. 2002. Fundamental Heat and Mass Transfer sixth Edition. College of Engineering.

9. Dongfang turbine work. Co.ltd. 2008. Condenser spesification. China :
Project PLTU Banten 2 Labuan (2x300 MW).
10. Del Frate, Luca., 2011. PRODUCT FAILURE: A LIFE CYCLE
APPROACH. International Conference On Engineering Design (ICED11),
Denmark : Technical University Of Denmark.
11. Grunsky, A., 2001 Condenser Application and Maintenance Guide, USA:
EPRI California.
12. A. J. Slifka, B. J. Filla, and J. M. Phelps, A., National Institute of Standards
and Technology, Boulder, CO 80303.

BIOGRAFI PENULIS



FATCHUR ROZAQ, lahir di Nganjuk pada hari Rabu tanggal 11 Mei 1983 merupakan putra ke-5 dari pasangan Bapak Muhyidin dan Ibu Dewi Asiyah. Penulis saat ini sudah berkeluarga dengan 1 orang istri Taufika Kusuma, AMD dan 2 orang anak Amira Adzkia Rusyda dan Khalisa Aghnia Eiliya. Pendidikan formal dasar ditempuh di SD Negeri Begadung V Nganjuk, dan lulus pada tahun 1996. Pendidikan selanjutnya ditempuh di SLTPN 1 Nganjuk, lulus tahun 1999, dan di SMU

Negeri 1 Kertosono, lulus tahun 2002. Dari jenjang SMU penulis melanjutkan ke jenjang Sarjana Jurusan Teknik Mesin Universitas Gadjah Mada yang dijalani sejak tahun 2002 hingga tahun 2008. Pada tahun 2018, penulis melanjutkan studi pascasarjana di Departemen Teknik Mesin, Program Studi S2 Manajemen Energi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Alamat e-mail: fatchur.rozaq@indonesiapower.co.id atau fath_rz@yahoo.com

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Hasil pengujian Eddy Current Testing Condenser tube unit 1 PLTU Labuan tahun 2019

1. Indikasi defect pada Condensor Inlet 1A

NO	ROW	COLUMN	DEFECT	TYPE	LOCATION
1.	20	12	90.0%	OD	1.0723m
2.	21	14	92.0%	OD	2.3047m
3.	23	7	93.0%	OD	0.8572m
4.	24	4	97.0%	OD	1.0285m
5.	31	2	96.0%	OD	2.6185m
6.	35	1	90.0%	OD	0.5225m
7.	36	1	94.0%	OD	3.1672m
8.	39	22	95.0%	OD	2.3958m
9.	40	4	96.0%	OD	2.4968m
10.	57	15	90.0%	OD	2.2957m
11.	61	15	92.0%	OD	0.2943m
12.	62	1	90.0%	OD	0.5387m
13.	64	14	92.0%	OD	1.0213m
14.	64	15	92.0%	OD	1.2820m
15.	65	14	92.0%	OD	1.6490m
16.	66	1	90.0%	OD	0.7828m
17.	66	14	93.0%	OD	1.8495m
18.	66	15	90.0%	OD	0.7828m
19.	67	12	91.0%	OD	1.0122m
20.	68	12	92.0%	OD	0.9872m
21.	68	13	91.0%	OD	1.4197m
22.	70	1	90.0%	OD	1.6272m
23.	72	14	92.0%	OD	1.5532m
24.	82	1	90.0%	OD	1.7705m
25.	90	14	91.0%	OD	2.2178m
26.	98	21	90.0%	OD	2.4597m
27.	99	19	90.0%	OD	1.0792m
28.	111	18	94.0%	OD	1.2598m
29.	123	30	91.0%	OD	1.5905m
30.	129	1	90.0%	OD	1.9650m
31.	141	1	91.0%	OD	2.2202m

2. Indikasi defect pada Condensor Outlet 1A

NO	ROW	COLUMN	DEFECT	TYPE	LOCATION
1.	6	13	98.0%	OD	1.2763m
2.	20	4	91.0%	OD	1.8227m
3.	23	14	90.0%	OD	3.5078m
4.	24	6	90.0%	OD	1.9672m
5.	24	18	93.0%	OD	2.3758m
6.	28	17	90.0%	OD	2.9088m
7.	39	12	90.0%	OD	1.0827m
8.	54	9	94.0%	OD	1.4588m
9.	70	22	95.0%	OD	1.2242m
10.	73	25	97.0%	OD	1.6005m
11.	86	15	92.0%	OD	1.7268m
12.	91	2	92.0%	OD	2.3463m
13.	97	11	91.0%	OD	2.7570m
14.	99	10	90.0%	OD	0.5683m

3. Indikasi defect pada Condensor Inlet 1B

NO	ROW	COLUMN	DEFECT	TYPE	LOCATION
1.	106	1	92.0%	OD	4.1240m
2.	137	16	91.0%	OD	2.6737m

4. Indikasi defect pada Condensor Outlet 1B

NO	ROW	COLUMN	DEFECT	TYPE	LOCATION
1.	52	1	90.0%	OD	4.7822m
2.	62	1	92.0%	OD	3.9825m
3.	75	14	99.0%	OD	1.5853m
4.	127	1	94.0%	OD	2.7730m
5.	141	1	91.0%	OD	2.1047m

Halaman ini sengaja dikosongkan