

**ANALISIS KERUSAKAN TUBE PRIMARY SUPERHEATER  
PLTU TANJUNG JATI B**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Pelaksanaan Laporan Tugas Akhir Jenjang

S1 Teknik Mesin Universitas Sangga Buana YPKP Bandung

Disusun Oleh:

**JANU KURNIAWAN  
2115227028**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANGGA BUANA YPKP**

**BANDUNG**

**2024**

	<b>UNIVERSITAS SANGGA BUANA</b>	<b>FORMULIR LEMBAR PENGESAHAN</b>	
	<b>Jl. PH.H. Mustofa No 68, Cikutra, Cibeunying kidul, Bandung 40124</b>	No. Revisi	00
		Berlaku efektif	11 Februari 2019

## LEMBAR PENGESAHAN

### TUGAS AKHIR

#### ANALISIS KERUSAKAN TUBE PRIMARY SUPERHEATER

PLTU TANJUNG JATI B

Disusun oleh:

**JANU KURNIAWAN**

**2115227028**

Telah disetujui dan disahkan sebagai Tugas Akhir Program S1 Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP

Bandung, 09 Maret 2024

Disahkan oleh:

Dosen Pembimbing Tugas Akhir Universitas Sangga Buana YPKP



**Dr. Ir. Agus Solehudin, S.T., M.T., IPM**

**NIDN. 0018026802**

Penguji 1

Penguji 2



Mohamad Agus Fhaizal, S.T., M.T

Wisnu Wijaya, S.T.,M.T

NIDN. 428.079.601

NIDN. 420.117.101



	<b>UNIVERSITAS SANGGA BUANA</b>	<b>FORMULIR LEMBAR PENGESAHAN</b>	
	<b>Jl. PH.H. Mustofa No 68, Cikutra, Cibeunying kidul, Bandung 40124</b>	No. Revisi	00
		Berlaku efektif	11 Februari 2019

## LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini :

NPM : 2115227028

Nama : Janu Kurniawan

Program Studi : Teknik Mesin

Alamat : Gumawang 24/06, Putat, Patuk, Gunungkidul, D.I.Yogyakarta

No. Telp : 081226478062

E-mail : janu.kurnia08@gmail.com

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini merupakan karya orisinal saya sendiri, dengan judul:

**“ANALISIS KERUSAKAN TUBE PRIMARY SUPERHEATER PLTU TANJUNG JATI B”.**

Atas pernyataan ini, saya siap menanggung resiko/sanksi yang dijatuhkan kepada saya apabila di kemudian ditemukan adanya pelanggaran terhadap kejujuran akademik atau etika keilmuan dalam karya ini, atau ditemukan bukti yang menunjukkan ketidak aslian karya ini.



Bandung, 09 Maret 2024



Janu Kurniawan

NPM : 2115227028

## ABSTRAK

*Primary Superheater* berfungsi untuk menaikkan temperatur uap jenuh yang berasal dari steam drum menjadi uap panas lanjut dengan memanfaatkan gas panas hasil pembakaran. Pada pengujian *sample tube primary superheater* PLTU Tanjung Jati B pada tanggal 1-14 November 2023, telah ditemukan adanya *failure* pecah *tube* dan penipisan permukaan luar akibat semburan uap *sootblower* bertekanan tinggi yang mengenai permukaan *tube* yang mengalami *bulging* (pembengkakan) yang menunjukkan adanya *overheating* pada *tube*. Hasil pengamatan visual pada *inner tube*, tidak ditemukan oksidasi tebal, korosi, maupun endapan deposit.

Berdasarkan hasil serangkaian pengujian pada sampel *tube primary superheater*, hasil evaluasi menunjukkan bahwa *tube* terindikasi mengalami penipisan dan *overheating* yang akan menyebabkan kekuatan logam menurun. Dengan kondisi penipisan *tube* melebihi minimal *wall thickness*, sifat material yang getas akibat meningkatnya nilai kekerasan menyebabkan material *tube* tidak dapat menahan tekanan uap dan akhirnya mengalami *failure* atau pecah *tube*.

Kata kunci : *overheating*, pecah, PLTU, *primary superheater*, *tube*.

## **ABSTRACT**

*The Primary Superheater functions to increase the temperature of saturated steam originating from the steam drum into superheated steam by utilizing hot gas from combustion. In testing the primary superheater tube sample of PLTU Tanjung Jati B on November 1-14<sup>th</sup> 2023, it was found that there was tube rupture failure and thinning of the outer surface due to jets of high-pressure sootblower steam hitting the surface of the tube which experienced bulging (swelling), which indicates overheating of the tube. The results of visual observations on the inner tube showed no thick oxidation, corrosion or deposits.*

*Based on the results of a series of tests on primary superheater tube samples, the evaluation results show that the tubes are indicated to be experiencing thinning and overheating which will cause the metal strength to decrease. If the tube is thinned beyond the minimum wall thickness, the brittle nature of the material due to the increase in hardness value causes the tube material to be unable to withstand steam pressure and ultimately the tube will fail or burst.*

*Key words: overheating, rupture, PLTU, primary, superheater, tube.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas rahmat dan hidayahNya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Kerusakan *Tube Primary Superheater* PLTU Tanjung Jati B”. Penulis menyusun Tugas Akhir ini sebagai syarat dalam menyelesaikan pendidikan sarjana pada pada program studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar Tugas Akhir ini agar lebih baik untuk kedepannya.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat untuk menambah pengetahuan bagi pembaca. Penulis minta maaf atas keterbatasan pengetahuan dan pengalaman sehingga Tugas Akhir ini perlu disempurnakan oleh peneliti berikutnya.

Bandung, 09 Maret 2024

Janu Kurniawan

## UCAPAN TERIMAKASIH

Alhamdulillah terima kasih kepada Allah SWT yang memberikan kesehatan, kekuatan, kesabaran, dan kesempatan serta kelancaran dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Saya menyadari tanpa adanya bantuan dari beberapa pihak, skripsi ini tidak akan selesai dengan baik. Sehingga, dalam pengerjaan tugas ini banyak pihak yang memberikan dukungan, waktu, tenaga, pikiran, dan bantuan lainnya. Pada kesempatan kali ini saya ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. terimakasih kepada keluarga atas segala dukungan moral dan doa dalam perjalanan studi ini, terimakasih kepada istri tercinta dan anak-anak yang kusayangi, terimakasih atas segala doa dan semangatnya.
2. Terimakasih kepada Bapak Dr. Ir. Agus Solehudin, S.T., M.T., IPM selaku pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berharga untuk saya dalam penulisan tugas akhir ini.
3. Dosen-dosen program studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang berharga selama ini.
4. Terimakasih kepada pihak PLTU Tanjung Jati B yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian, mengolah data, dan memberikan informasi yang bermanfaat.
5. Terimakasih kepada teman yang membantu kelancaran penelitian kali ini,
6. Pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, atas segala doa dan dukungannya.

Semoga kebaikan dan keikhlasan kalian mendapatkan balasan kebaikan dari Tuhan Yang Maha Esa. Peneliti menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian skripsi ini, oleh sebab itu peneliti mengharapkan kritik dan saran demi lebih sempurnanya di masa yang akan datang.

Bandung, 09 maret 2024

Janu Kurniawan

## UCAPAN TERIMAKASIH

Alhamdulillah terima kasih kepada Allah SWT yang memberikan kesehatan, kekuatan, kesabaran, dan kesempatan serta kelancaran dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Saya menyadari tanpa adanya bantuan dari beberapa pihak, skripsi ini tidak akan selesai dengan baik. Sehingga, dalam pengerjaan tugas ini banyak pihak yang memberikan dukungan, waktu, tenaga, pikiran, dan bantuan lainnya. Pada kesempatan kali ini saya ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. terimakasih kepada keluarga atas segala dukungan moral dan doa dalam perjalanan studi ini, terimakasih kepada istri tercinta dan anak-anak yang kusayangi, terimakasih atas segala doa dan semangatnya.
2. Terimakasih kepada Bapak Dr. Ir. Agus Solehudin, S.T., M.T., IPM selaku pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan yang berharga untuk saya dalam penulisan tugas akhir ini.
3. Dosen-dosen program studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sangga Buana YPKP yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang berharga selama ini.
4. Terimakasih kepada pihak PLTU Tanjung Jati B yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian, mengolah data, dan memberikan informasi yang bermanfaat.
5. Terimakasih kepada teman yang membantu kelancaran penelitian kali ini,
6. Pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, atas segala doa dan dukungannya.

Semoga kebaikan dan keikhlasan kalian mendapatkan balasan kebaikan dari Tuhan Yang Maha Esa. Peneliti menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian skripsi ini, oleh sebab itu peneliti mengharapkan kritik dan saran demi lebih sempurnanya di masa yang akan datang.

Bandung, 09 maret 2024

Janu Kurniawan

## DAFTAR ISI

COVER.....	
HALAMAN PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II LANDASAN TEORI.....	4
2.1. Fungsi PLTU.....	4
2.2 Prinsip Kerja .....	6
2.3 Siklus Diagram Rankine.....	7
2.4 Bagian PLTU.....	8
2.5 Pengujian Material.....	13
BAB III METODE PENELITIAN.....	18
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	18
3.2 Tahap Awal.....	18
3.3 Pengambilan Data.....	20
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN.....	21
4.1 Data Hasil Pengukuran.....	21

4.2 Analisis Data dan Pembahasan.....	30
BAB V PENUTUP.....	32
5.1 Kesimpulan.....	32
5.2 Saran.....	33
DAFTAR PUSTAKA.....	xiii
LAMPIRAN.....	xiv

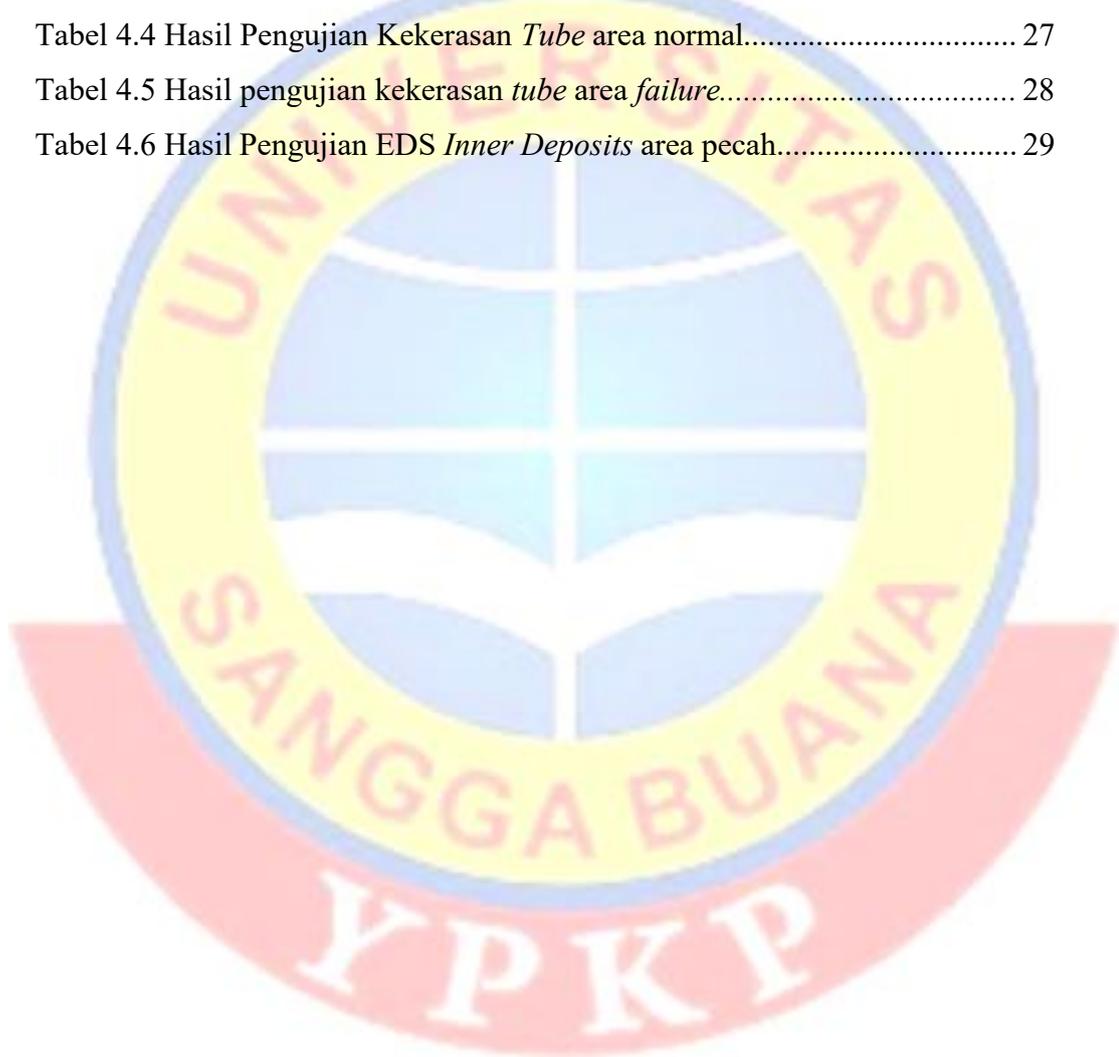


## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Proses konversi energi pada PLTU.....	4
Gambar 2.2. Tata letak PLTU Batubara.....	5
Gambar 2.3. Siklus fluida kerja sederhana (air uap) PLTU.....	7
Gambar 2.4. Diagram T – S siklus PLTU (siklus rankine).....	7
Gambar 2.5. Tata Letak PLTU Pulverizer.....	10
Gambar 2.6. Tata letak CFB <i>Boiler</i> Batubara.....	11
Gambar 4.1 Visual Sampel Tube Pecah.....	21
Gambar 4.2 Visual Potongan Tube.....	21
Gambar 4.3 Visual area pecah.....	22
Gambar 4.4 Visual sisi <i>inner tube</i> .....	22
Gambar 4.5 Titik Pengukuran <i>Outside Diameter</i> .....	23
Gambar 4.6 titik pengujian thickness.....	23
Gambar 4.7 Hasil Pengujian Thickness Area Pecah.....	24
Gambar 4.8 Struktur mikro area permukaan normal.....	25
Gambar 4.9 Struktur mikro area permukaan normal.....	26
Gambar 4.10 Struktur mikro area lasan.....	26
Gambar 4.11 Titik uji metalografi area pecah.....	26
Gambar 4.12 Struktur mikro area failure (pecah).....	26
Gambar 4.13 Titik Pengujian Kekerasan area normal.....	27
Gambar 4.14 Titik Pengujian Kekerasan area <i>failure</i> .....	27
Gambar 4.15 SEM <i>inner deposits</i> area pecah perbesaran 150X.....	28
Gambar 4.16 Spektrum EDS <i>Inner Deposits</i> area pecah.....	29

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Ruang Lingkup dan Peralatan Uji.....	19
Tabel 3.2 Data Teknik Sampel.....	20
Tabel 4.1 Hasil Pengujian <i>Outside Diameter</i> .....	23
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Thickness.....	24
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Identifikasi Material.....	24
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan <i>Tube area normal</i> .....	27
Tabel 4.5 Hasil pengujian kekerasan <i>tube area failure</i> .....	28
Tabel 4.6 Hasil Pengujian EDS <i>Inner Deposits area pecah</i> .....	29



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Instruksi Kerja Uji Visual.....	xii
Lampiran 2 Instruksi Kerja Uji Outside Diameter.....	xiii
Lampiran 3 Instruksi Kerja Uji Thickness.....	xiv
Lampiran 4 Instruksi Kerja Uji PMI.....	xvi
Lampiran 5 Instruksi Kerja Uji Metallograpy.....	xviii
Lampiran 6 Instruksi Kerja Uji Kekerasan Mikro.....	xxi
Lampiran 7 Instruksi Kerja Uji SEM_EDS .....	xxii
Lampiran 8 Gambar Teknik.....	xxiv



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Pembangkit Listrik Tenaga Uap masih populer di Indonesia dan masih sering digunakan dalam penyediaan energi listrik. Boiler memegang peranan yang sangat penting dalam membuat uap pada PLTU. *Superheater* menjadi salah satu bagian yang sangat penting pada boiler. *Superheater* berperan dalam meningkatkan suhu uap dengan tujuan meningkatkan energi panas dan mengurangi kandungan kelembaban sehingga menghasilkan uap *superheat*. Masalah yang timbul adalah gagalnya operasi akibat kerusakan pada *tube primary superheater*.

*Primary Superheater* memiliki fungsi untuk meningkatkan suhu uap jenuh yang berasal dari steam drum menjadi uap panas yang lebih tinggi dengan menggunakan gas panas yang dihasilkan dari proses pembakaran. Dalam kegagalan operasi ini, ditemukan bahwa ada kerusakan pada pipa dan penipisan pada bagian luar akibat semburan uap *sootblower* yang bertekanan tinggi yang mengenai permukaan pipa. Pada area kerusakan, ditemukan bahwa pipa telah mengalami pembengkakan yang menunjukkan tanda-tanda pipa terlalu panas.

Untuk memahami fungsi dan peran penting Boiler dalam operasi PLTU, serta untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan pada *Tube Primary Superheater*, penulis memilih tema "Pengujian Kerusakan *Tube Primary Superheater* PLTU Tanjung Jati B" sebagai tugas akhir.

## 1.2 RUMUSAN MASALAH

Adapun rumusan masalah yang penulis kemukakan dalam penulisan Tugas Akhir ini, yaitu:

- a. Pengujian apa saja yang akan dilakukan untuk mengetahui penyebab kerusakan *Tube Primary Superheater*?
- b. Bagaimana tahapan-tahapan pengujian material *Tube Primary superheater*?
- c. Bagaimana rekomendasi perbaikan dari hasil analisa pengujian material *Tube Primary Superheater*?

## 1.3 BATASAN MASALAH

Penulisan tugas akhir ini, penulis membatasi masalah pembahasannya. Hal ini dilakukan agar pembahasan ataupun penganalisisan yang dilaksanakan tidak meluas, dimana penulis hanya melakukan beberapa metode pengujian material *Tube Primary Superheater* dan rekomendasi perbaikan dari hasil analisa pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.

## 1.4 TUJUAN PENELITIAN

Penulis melakukan penelitian dengan tema “ANALISIS KERUSAKAN *TUBE PRIMARY SUPERHEATER* PLTU TANJUNG JATI B”, bertujuan:

- a. Memahami metode apa saja yang dilakukan dalam pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.
- b. Memahami prosedur pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.
- c. Mengetahui penyebab kegagalan pada *Tube Primary Superheater* PLTU dan Memberikan rekomendasi perbaikan permasalahan tersebut.

## 1.5 MANFAAT PENELITIAN

Ada beberapa manfaat dari pelaksanaan praktek tugas akhir ini, baik manfaat untuk mahasiswa yang melaksanakannya maupun bagi universitas/perguruan tinggi yang bersangkutan. Manfaat bagi mahasiswa

tersebut adalah:

- a. Mengetahui metode pengujian material apa saja yang dilakukan dalam pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.
- b. Mengetahui prosedur pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.
- c. Mengetahui penyebab kegagalan pada *Tube Primary Superheater* PLTU.
- d. Mengetahui rekomendasi perbaikan *Tube Primary Superheater* PLTU dari hasil pengujian material.

Manfaat bagi pimpinan program study S1 Teknik Mesin:

- a. Adanya sumber referensi mengenai informasi pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.
- b. Memperbanyak informasi dalam bidang teknik mesin khususnya tentang pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.

## 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan tugas akhir ini terdiri dari empat bab, dimana masing-masing bab menguraikan hal-hal yang dipelajari dan dituangkan dalam bentuk laporan tertulis yang dimana antara bab pertama dengan bab lainnya saling berkaitan.

Bab I berisikan tentang pendahuluan yang membahas latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan yang ingin dicapai, manfaat yang diharapkan dari penulisan, langkah-langkah metode penulisan, dan sistematika penulisan Tugas Akhir.

Bab II berisikan tentang tinjauan umum tentang Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), komponen-komponen utama, dan jenis Pengujian Material.

Bab III berisikan uraian tentang pembahasan praktik tugas akhir pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.

Bab IV berisikan Tentang Metode Penelitian kegiatan praktek tugas akhir.

Bab V berisikan tentang kesimpulan dan saran dari hasil penulisan tentang pengujian material *Tube Primary Superheater* PLTU.

## BAB II

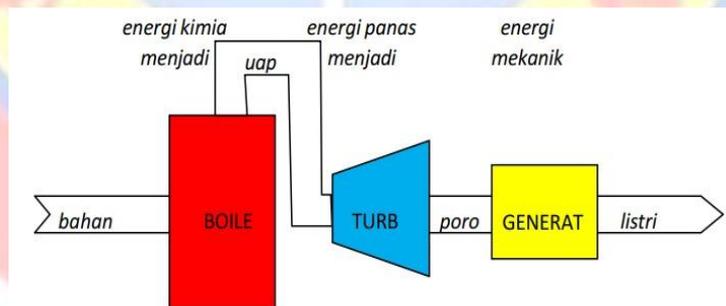
### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Fungsi PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang sering digunakan karena memiliki tingkat efisiensi yang tinggi, sehingga mampu menghasilkan energi listrik secara ekonomis. PLTU adalah suatu alat pengubah energi yang mengubah energi kimia yang terdapat dalam bahan bakar menjadi energi listrik.

Progresi transformasi daya pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dilakukan melalui tiga fase yang berbeda, yakni :

- Pertama-tama, energi yang terdapat dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap yang memiliki tekanan dan suhu tinggi.
- Kedua, energi panas (uap) dialihkan menjadi energi mekanik melalui gerakan rotasi.
- Ketiga, Keberadaan energi mekanik dirubah menjadi energi listrik.



Gambar 2.1. Proses Konversi Energi pada PLTU

Sumber : Materi Diklat PLTU Suralaya

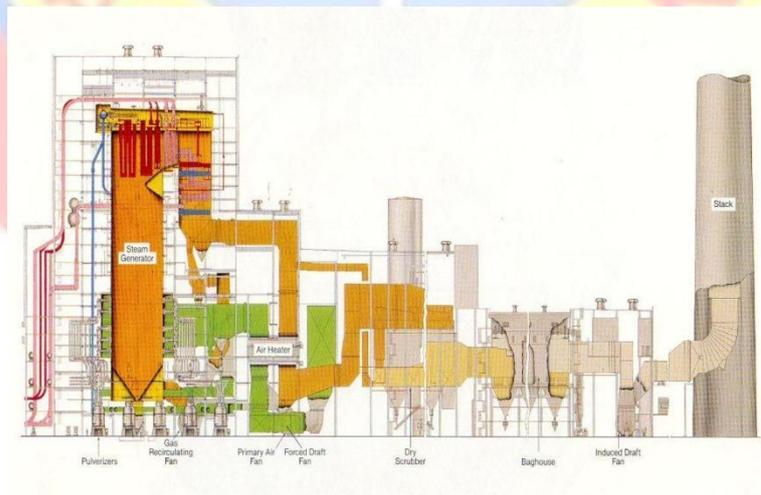
PLTU memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan jenis pembangkit lainnya.

Beberapa kelebihan yang dimiliki antara lain:

- a. bisa beroperasi dengan menggunakan berbagai macam jenis bahan bakar.
- b. Dapat dibuat dengan berbagai kapasitas yang berbeda.
- c. Bisa berfungsi dalam berbagai mode pengisian.
- d. Kontinyuitas operasi yang tinggi.
- e. Usia pemakaian lama.

Namun, ada beberapa kekurangan yang perlu dipertimbangkan ketika memilih jenis pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). kekurangan tersebut diantaranya :

- a. Sangat bergantung pada ketersediaan bahan bakar
- b. tidak bisa dimulai (start) kecuali mendapatkan pasokan listrik dari sumber eksternal.
- c. Perlu adanya jumlah air pendingin yang besar dan tidak terputus secara perlahan.
- d. Investasinya mahal.



Gambar 2.2. Tata letak PLTU Batubara

Sumber : Materi Diklat PLTU Suralaya

## 2.2 Prinsip Kerja PLTU

PLTU menggunakan sistem peredaran tertutup air uap sebagai fluida kerjanya. Definisi siklus tertutup adalah menggunakan fluida yang sama berulang kali dalam rangkaian proses. Singkatnya, urutan sirkulasi adalah sebagai berikut:

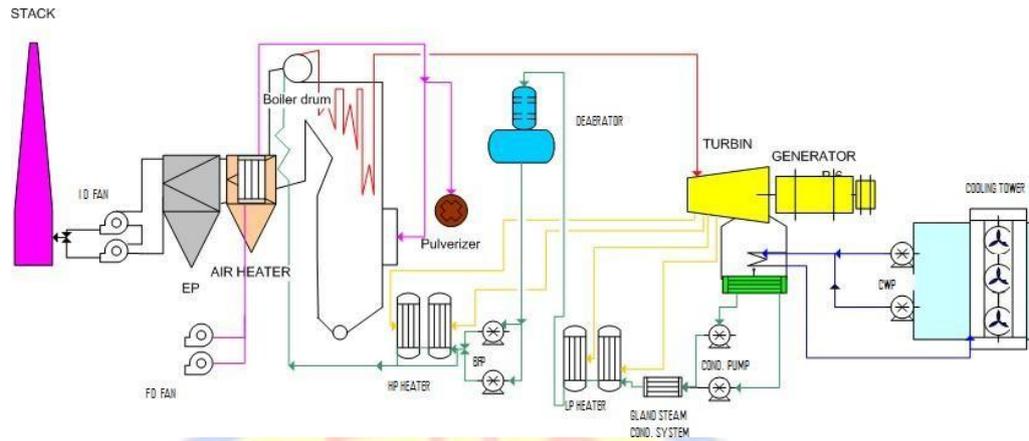
Pertama, boiler diisi dengan air sampai menyeluruh permukaan pemindah panas terisi penuh dengan air. Pada boiler air ini, gas panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar dicampur dengan udara dan digunakan untuk memanaskan air di dalamnya hingga berubah menjadi uap.

Selanjutnya, uap yang dihasilkan dari proses pemanasan air dalam boiler dengan tekanan dan suhu yang telah ditentukan dialirkan ke turbin untuk menghasilkan tenaga mekanik dalam bentuk rotasi.

Kedua, alat yang terhubung secara langsung dengan turbin bergerak untuk menciptakan listrik saat medan magnet dalam kumparan berputar.

Uap yang sebelumnya keluar dari turbin akan masuk ke dalam kondensor untuk didinginkan menggunakan air pendingin sehingga dapat kembali menjadi bentuk air. Air yang terkondensasi dari uap kemudian digunakan kembali sebagai air untuk mengisi boiler. Siklus ini terus berjalan secara berulang dan berkelanjutan. Ilustrasi 2.3. Teks tersebut memperlihatkan gambaran dasar dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki komponen utama dan menggambarkan bagaimana sistem-sistemnya beroperasi dalam siklus kerja.

Generator dihubungkan langsung dengan turbin untuk menghasilkan energi listrik melalui putaran turbin. Ketika turbin berputar, generator menghasilkan listrik melalui terminal outputnya.



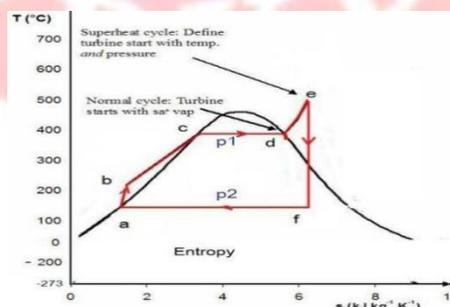
Gambar 2.3. Siklus fluida kerja sederhana (air uap) PLTU

Sumber : Materi Diklat PLTU Suralaya

Meskipun rangkaian fluidanya menjadi siklus yang tertutup, tetapi kuantitas air dalam siklus akan berkurang. Penurunan jumlah air ini disebabkan oleh kehilangan air akibat kebocoran, baik yang terjadi secara sengaja maupun tidak sengaja. Dalam rangka mengganti kehilangan cairan, diperlukan penambahan air ke dalam proses ini. Air penambah harus memenuhi kriteria yang sama dengan air yang berada dalam siklus tersebut.

### 2.3 Siklus Diagram Rankine

Siklus kerja PLTU yang merupakan siklus tertutup bisa diilustrasikan dengan menggunakan diagram suhu – entropi ( $T-s$ ). Siklus ini mengimplementasikan siklus *rankine* yang ideal. berikut langkah-langkah yang harus diikuti :



Gambar 2.4. Diagram  $T - S$  siklus PLTU (siklus rankine)

Sumber : Materi Diklat PLTU Suralaya

- a - b : Air dialirkan dari tekanan P2 ke tekanan P1 dengan menggunakan pompa. Proses ini terjadi pada pompa air pengisi dimana terjadi kompresi *isentropis*.
- b - c : Tekanan pada air ditingkatkan hingga mencapai suhu yang membuatnya mendidih.
- c - d : Air berubah wujud menjadi uap yang sudah mencapai tingkat kejenuhan. Proses ini dinamakan penguapan dengan metode *isobar isothermal* yang berlangsung di dalam boiler.
- d - e ; Uap dipanaskan lebih jauh sampai mencapai suhu efektifnya. Langkah ini terjadi di dalam boiler dan melibatkan proses yang konstan tekanannya, dikenal sebagai proses *isobarik*.
- e - f : Uap bekerja sehingga terjadi penurunan tekanan dan temperatur. Proses ini merujuk pada langkah *ekspansi isentropis* yang terjadi dalam turbin.
- f - a: Pengeluaran energi panas tersembunyi dari uap mengakibatkan perubahan menjadi air yang terkondensasi. Tahap ini dilakukan dengan cara yang sama dengan kesetimbangan tekanan dan temperatur, dan berlangsung di dalam perangkat kondensor.

## 2.4 Bagian PLTU

PLTU merupakan sebuah perangkat pembangkit energi yang terdiri dari elemen inti dan sarana penunjang pemasangannya. elemen utama PLTU terdiri dari empat, yaitu :

- a. Boiler
- b. Turbin Uap
- c. Kondensor
- d. Generator

Dan peralatan penunjang antara lain:

- a. Pengolahan air laut (*desal*)
- b. *Reverse Osmosis* (RO)
- c. *Pre Treatment* untuk pendingin yang menggunakan air tanah atau sungai

d. *Demineraliser*

e. *Hidrogen plant* untuk pembangkit yang memanfaatkan H<sub>2</sub> sebagai pendingin Generator

f. *Chlorination* air laut

g. *Auxiliary* untuk boiler

h. Pengelolaan batu bara dan debu batubara

Setiap bagian utama dan perangkat pendukung dilengkapi dengan sistem dan peralatan tambahan yang membantu dalam menjalankan tugasnya. Kerusakan atau gangguan pada salah satu komponen utama dapat mengakibatkan gangguan pada keseluruhan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

a. Boiler

Ketel uap atau boiler merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap. Proses transformasi air menjadi uap terjadi melalui pemanasan air yang ada dalam pipa-pipa dengan menggunakan panas yang dihasilkan dari pembakaran.

Bahan bakar merupakan sumber energi yang digunakan untuk menggerakkan mesin atau peralatan. Pada proses pembakaran, pengaliran bahan bakar dan udara dari luar terus-menerus dilakukan di dalam ruang bakar.

Tekanan dan suhu yang tinggi terdapat pada uap superheat yang dihasilkan oleh boiler. Banyaknya uap yang diproduksi bervariasi tergantung pada ukuran permukaan penukar panas, kecepatan aliran, dan tingkat energi yang digunakan untuk proses pembakaran. *Water tube boiler* adalah jenis boiler yang terdiri dari pipa-pipa yang berisi air di dalamnya.

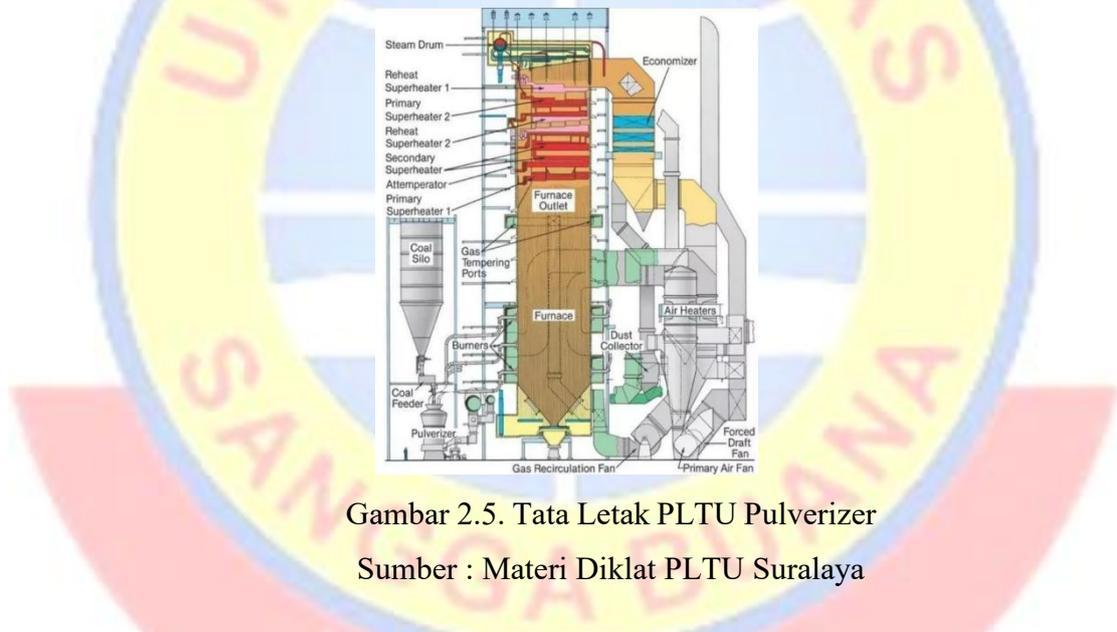
Pada bagian pembangkit listrik, steam generator atau yang disebut juga sebagai pembangkit uap adalah istilah lain yang digunakan untuk boiler. Hal ini dikarenakan kata "boiler" hanya merujuk pada perangkat pemanas, meskipun sebenarnya boiler ini menghasilkan uap *superheat*

dengan tekanan yang tinggi.

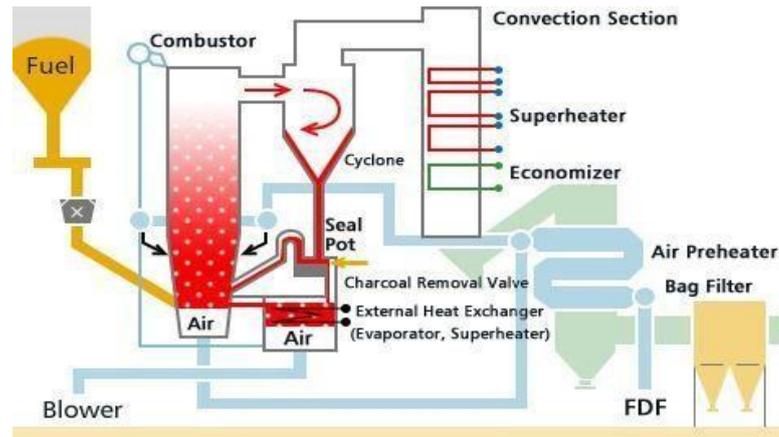
Terkait dengan jenis bahan bakar yang digunakan, PLTU dapat diklasifikasikan menjadi :

- a. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara
- b. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Minyak
- c. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Gas
- d. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Nuklir

Terdapat variasi dalam jenis pembakaran batu bara dalam PLTU, yang meliputi pembakaran batu bara bubuk (*Pulverized Coal / PC Boiler*) dan pembakaran batu bara curah (*Circulating Fluidized Bed / CFB Boiler*).



Perbedaan antara pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara dengan PLTU yang menggunakan minyak atau gas terletak pada perangkat dan sistem untuk mengelola dan membakar bahan bakar serta mengolah limbah abu. PLTU jenis batubara memiliki beberapa peralatan pendukung yang lebih banyak serta lebih rumit jika dibandingkan dengan PLTU yang menggunakan bahan bakar minyak atau gas. PLTU gas adalah jenis PLTU yang memiliki peralatan pendukung paling simpel.



Gambar 2.6. Tata letak CFB *Boiler* Batubara  
 Sumber : Materi Diklat PLTU Suralaya

b. Turbin Uap

Turbin uap berperan dalam mengkonversi energi panas yang ada dalam uap menjadi energi mekanik melalui gerakan berputar. Uap yang memiliki tekanan dan suhu yang tinggi mengalir melalui nosel untuk meningkatkan kecepatannya dan secara tepat mengarahkan sudu-sudu turbin yang terpasang pada poros. Sebagai hasilnya, gerakan poros turbin menghasilkan rotasi (tenaga mekanik).

Setelah melewati proses kerja di turbin, uap mengalami penurunan tekanan dan temperatur sehingga menjadi uap yang mengandung kelembaban. Setelah keluar dari turbin, uap ini kemudian dialirkan ke kondensor untuk didinginkan dan berubah menjadi air kondensat. Sementara itu, energi putaran yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan generator.

c. Kondensor

Kondensor merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengubah uap menjadi air. Cara melakukan perubahan tersebut adalah dengan mengirimkan uap ke dalam sebuah ruangan yang berisi pipa-pipa. Udara mengalir di luar saluran-saluran sementara air sebagai penghilang panas mengalir di dalam saluran-saluran tersebut. Kondensor semacam ini

dikenal sebagai kondensor permukaan. Dalam perencanaan, kebutuhan air untuk pendingin di kondensor telah dihitung dengan sangat besar. Air pendingin diambil dari sumber air yang mempunyai pasokan yang cukup, seperti danau, sungai, atau laut.

Kondensor umumnya ditempatkan di bawah turbin agar aliran uap dari turbin dapat dengan mudah memasuki kondensor karena gaya gravitasi.

Kecepatan transfer panas bergantung pada aliran air yang digunakan untuk pendingin, tingkat kebersihan pipa, dan selisih suhu antara uap dan air pendingin. Perubahan dari fase uap menjadi fase air terjadi ketika tekanan dan suhu mencapai titik jenuh, dalam kondisi ini, kondensor beroperasi dalam kondisi hampa udara. Ketika suhu air pendingin dan suhu udara luar sama, suhu air kondensat mencapai maksimum yang mendekati suhu udara luar. Jika terjadi gangguan pada perpindahan panas, dampaknya akan terlihat pada tekanan dan suhu.

#### d. Generator

Tujuan utama yang ingin dicapai melalui kegiatan di PLTU adalah memproduksi tenaga listrik. Proses konversi energi di PLTU bertujuan untuk menciptakan produksi energi listrik. Turbin dan generator dihubungkan secara langsung, menyebabkan terciptanya tegangan listrik saat turbin berputar.

Proses mengubah energi di dalam generator dilakukan melalui putaran medan magnet yang ada di dalam kumparan. Medan magnet yang dihasilkan oleh rotor generator mempengaruhi kumparan yang terletak pada stator, sehingga terbentuk tegangan di antara ujung-ujung kumparan generator. Untuk menciptakan medan magnet pada rotor, arus searah dialirkan melalui kumparan rotor. Eksitasi adalah nama yang diberikan untuk proses mengalirkan arus DC ke rotor sehingga rotor dapat menjadi magnet.

## 2.5 Pengujian Material

Ada dua metode pengujian material yang tersedia, yaitu pengujian non-destruktif (*non-destructive testing/NDT*) dan pengujian destruktif (*destructive testing/DT*). Pengujian tanpa merusak (NDT) adalah metode pengujian dan analisis yang diterapkan oleh sektor industri untuk menilai material, komponen, struktur, atau sistem guna mendeteksi perbedaan karakteristik atau kelemahan tanpa menyebabkan kerusakan pada keseluruhan komponen. Sementara itu, *Destructive Test* (DT) adalah jenis pengujian yang melibatkan merusak material dengan tujuan untuk menguji kinerja suatu benda. Aktivitas ini memiliki potensi yang besar untuk menyebabkan kerusakan pada benda yang sedang diuji.

Macam - macam pengujian *Non-destructive testing* (NDT)

### a. Tes Radiografi

Pemeriksaan dengan menggunakan *sinar X* atau *sinar Gamma* pada aspek pertama dapat dilakukan pada semua jenis bahan, kecuali timbal. Mendeteksi ketidaknormalan di dalam benda adalah kemampuan yang dimiliki oleh *sinar X*. Radiasi dari jenis tes ini akan berbeda-beda sesuai dengan tebal dan densitas material yang diperiksa.

### b. *Magnetic Particle Inspection*

Tujuan dari tes ini adalah untuk menguji kemungkinan adanya kecacatan pada bagian luar atau pada lapisan yang berada sedikit di bawah permukaan. Material yang sedang diperiksa adalah material yang memiliki tingkat kemagnetan yang tinggi.

Sering kali, NDT testing ini dilaksanakan untuk memastikan apakah terdapat sisa-sisa partikel yang memiliki sifat magnetik yang dapat menarik objek magnet lainnya.

### c. *Ultrasonic Flaw Detector*

Metode ini dianggap yang paling kuno dibandingkan dengan metode-metode lain yang ada. Sebagai bentuk uji NDT, detektor kecacatan

ultrasonik telah digunakan sejak tahun 1940 untuk mengungkapkan kecacatan dalam bahan seperti komposit, keramik, logam, dan plastik melalui suara.

d. *Vacuum Test*

*Vacuum test* merupakan suatu bentuk pengujian NDT yang digunakan untuk menciptakan keadaan hampa udara pada material yang sedang diperiksa. Pelaksanaan dapat dilakukan dengan menggunakan silinder atau berbagai macam material transparan..

e. *Holiday Detector*

*Holiday detector* merupakan instrumen yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan ruang kosong di dalam suatu bahan. Keberadaan ruang yang tak terisi ini bisa menimbulkan kekurangan secara beragam.

Macam - macam pengujian *destructive testing* (DT)

a. Uji Tarik (*Tensile Testing*)

Uji tarik adalah metode pengujian yang digunakan untuk mengukur kekuatan material saat ditarik. Prosedur itu melibatkan pemberian tekanan gaya tarik pada sampel bahan yang sedang diuji.

Dalam upaya untuk menguji ketahanan sampel, beban diberikan secara bertahap hingga terjadi kegagalan atau putus pada sampel tersebut. Selama proses pengujian, dimungkinkan untuk melakukan pengukuran terhadap kekuatan tarik maksimum, perpanjangan bahan, dan modulus elastisitas.

Metode ini digunakan untuk mengenali ketahanan, daya tahan, dan karakteristik fisik lainnya dari bahan, seperti logam, plastik, dan material campuran. Selanjutnya, penerapan hasil penelitian ini digunakan dalam tahap perencanaan produk serta seleksi bahan yang sesuai.

b. Uji Tekan (*Compressive Testing*)

Uji tekan merupakan suatu metode uji yang *destructif* yang digunakan untuk mengukur kekuatan material ketika ditekan. Dalam eksperimen ini, suatu tes dilakukan di mana materi yang sedang diuji ditempatkan di bawah tekanan yang terus meningkat hingga materi tersebut akhirnya mengalami kegagalan atau kerusakan.

Uji tekan dapat membantu menentukan batas kekuatan tekan dan elastisitas material. Penggunaan ini bermanfaat dalam menilai daya tahan bahan ketika digunakan dalam situasi dimana terjadi beban, seperti dalam struktur bangunan dan bagian mesin.

c. Uji Bengkok (*Bending Testing*)

Uji bending merujuk pada metode pengujian yang tujuannya adalah untuk menilai kekuatan material terhadap beban yang menyebabkan perubahan bentuk atau tekukan. Dalam uji ini, bahan sampel diletakkan di atas dua penopang dengan satu titik tengah.

Setelah itu, tekanan diberikan pada bagian tengah sampel untuk melengkungkannya. Setelah itu, dilakukan pengukuran guna menentukan berat maksimum yang dapat ditahan oleh sampel sebelum mengalami kegagalan.

Pentingnya uji bengkok terletak pada pengujian material yang akan digunakan dalam aplikasi yang melibatkan proses lenturan atau tekukan, contohnya seperti material struktural dan komponen logam.

d. Uji Kekerasan (*Hardness Testing*)

Uji kekerasan merupakan sebuah metode tes yang merusak untuk mengukur seberapa keras suatu bahan, dengan fokus pada ketahanan bahan terhadap penetrasi atau deformasi. Ada beberapa metode yang bisa digunakan untuk menguji tingkat kekerasan, namun salah satu yang sering digunakan adalah uji *Brinell*.

Dalam uji *Brinell*, sebuah bola logam dikompres ke atas permukaan bahan dengan beban yang sudah ditetapkan. Dilakukan pengukuran diameter bekas penekanan dan perhitungan kekerasan bahan berdasarkan diameter tersebut.

Pengujian ini digunakan untuk menilai karakteristik mekanis suatu bahan dan memverifikasi bahwa bahan tersebut memenuhi persyaratan yang dibutuhkan dalam berbagai aplikasi, termasuk peralatan industri dan bagian mesin.

e. Uji Kegagalan (*Fracture Testing*)

Pengujian kegagalan merupakan metode untuk mengetahui material mengalami kegagalan atau retakan. Prosesnya melibatkan penggunaan contoh material yang diberi beban hingga mengalami kerusakan.

Jenis kerusakan kemudian diidentifikasi dan diselidiki untuk memperoleh pemahaman tentang karakteristik bahan yang terkait dengan kegagalan. Eksperimen ini berguna untuk memahami risiko kegagalan bahan dan mengembangkan strategi perbaikan atau penguatan yang sesuai.

f. Uji Fatik (*Fatigue Testing*)

Metode ini digunakan untuk mengestimasi kemampuan materi dalam menahan tegangan yang berulang atau beban yang bersiklus. Proses pengujian ini melibatkan memberikan beban berulang pada sampel material untuk menguji kemampuan material tersebut dalam menjaga kekuatannya secara berulang.

Pengujian seperti ini memiliki kepentingan dalam aplikasi yang melibatkan perubahan beban secara teratur, seperti dalam penggunaan komponen mesin. Dengan melakukan uji fatik, Anda memiliki kesempatan untuk menilai berapa lama suatu bahan dapat digunakan dan mengidentifikasi risiko kemungkinan kegagalan akibat beban siklik.

g. Uji Residual Stress (*Residual Stress Testing*)

Kemudian, terdapat pengujian stres sisa yang dipakai untuk mengukur tegangan yang masih ada dalam bahan setelah semua beban luar telah dihapus. Metode uji yang digunakan untuk mengukur tingkat stress residu dalam bahan adalah melalui difraksi sinar *X* (*X-Ray*).

Residual tegangan berguna sangat penting dalam menganalisis dan memahami keadaan tegangan yang ada dalam suatu material, yang dapat memengaruhi kinerja dan keamanan komponen yang digunakan.

h. Uji SEM-EDS

Uji SEM-EDS merupakan cara uji untuk mengetahui ukuran partikel dan komposisi dasar. SEM merupakan bagian dari analisis lapisan material untuk menentukan ketebalan material. Uji SEM dan uji EDS diaplikasikan secara bersamaan bertujuan untuk membandingkan komposisi material yang berbeda di antara tiap - tiap lapisan. Pengujian metode ini digunakan untuk uji logam diantaranya *fraktografi*, *embrittlement*, analisis korosi, dan komposisi paduan.

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Sub Bab ini akan menguraikan tentang diagram aliran penelitian yang akan dilaksanakan. Diagram alir ini menggambarkan langkah-langkah yang harus diikuti dalam rangkaian penelitian dari awal hingga akhir. Proses penelitian akan terbagi dalam beberapa tahap yaitu meliputi tahap awal, pengumpulan data, pemrosesan data, dan penarikan kesimpulan. Berikut adalah rencana penelitian yang diilustrasikan dalam diagram alur sebagai berikut :



#### 3.2 Tahap Awal

##### a. Waktu dan tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di laboratorium PT PLN (Persero) Pusat Sertifikasi. PT. PLN (Persero) Pusat Sertifikasi berlokasi di Jl. Laboratorium No.1, RW.1, Duren Tiga, Kec. Pancoran, Kota Jakarta Selatan. PLN Pusat Sertifikasi merupakan unit bisnis PLN dalam bidang jasa sertifikasi, inspeksi, pengujian dan kalibrasi ketenagalistrikan. Penelitian dilaksanakan pada 01 s.d 14 November 2023.

##### b. Lingkup Penelitian

Dalam permasalahan ini, pada *Tube Primary Superheater* PLTU Tanjung Jati B ditemukan bahwa ada kerusakan pada pipa dan penipisan pada

bagian luar akibat semburan uap *sootblower* yang bertekanan tinggi yang mengenai permukaan pipa. Pada area kerusakan, ditemukan bahwa pipa telah mengalami pembengkakan yang menunjukkan tanda-tanda pipa terlalu panas. Sehingga dari masalah tersebut, lingkup penelitian adalah melakukan Pengujian sampel *tube Primary Superheater* yang mengalami kegagalan menggunakan metode Uji Merusak/*Destructive Test (DT)* dengan ruang lingkup dan peralatan uji sebagai berikut :

Tabel 3.1 Ruang Lingkup dan Peralatan Uji

Sampel Uji	Metode Pengujian	Peralatan Uji
<i>Primary Superheater K7 No.53 Failure</i>	Pengujian Visual	Kamera Digital
	Pengujian <i>Outside Diameter</i>	Caliper-Mitutoyo
	Pengujian <i>Thickness</i>	GE-DMS Go+
	Pengujian <i>Positive Matrial Identification</i>	OES-Master Pro Oxford
		Ins
	Pengujian <i>Metallography</i>	Olympus BX51M
	Pengujian Kekerasan Mikro	Future Tech FRV-50 AR
	Pengujian SEM-EDS	Hitachi TM 3000 SWIFT ED 3000

c. Data Teknik

Sebelum dilakukan pengujian material, perlu diketahui data teknik *tube primary superheater* PLTU Tanjung Jati B. adapun data teknik dan sampel uji sebagai berikut:

Tabel 3.2 Data Teknik Sampel

No	Item	Spesifikasi
1	<i>Specimen Location</i>	<i>Primary Superheater</i>
2	<i>Specimen Material Design</i>	SA 213 T12
3	<i>Specimen Dimension Design</i>	Ø50,8mm x 5,2mm

### 3.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilaksanakan dengan cara melakukan pengujian material menggunakan metode Uji Merusak/ *Destructive Test* (DT). adapun pengujian yang dilakukan antara lain :

1. Pengujian Visual
2. Pengujian Outside Diameter
3. Pengujian Thickness
4. Pengujian Identifikasi Material (Spektrometri)
5. Pengujian Metalografi
6. Pengujian Kekerasan
7. Pengujian SEM – EDS

## BAB IV

### DATA DAN PEMBAHASAN

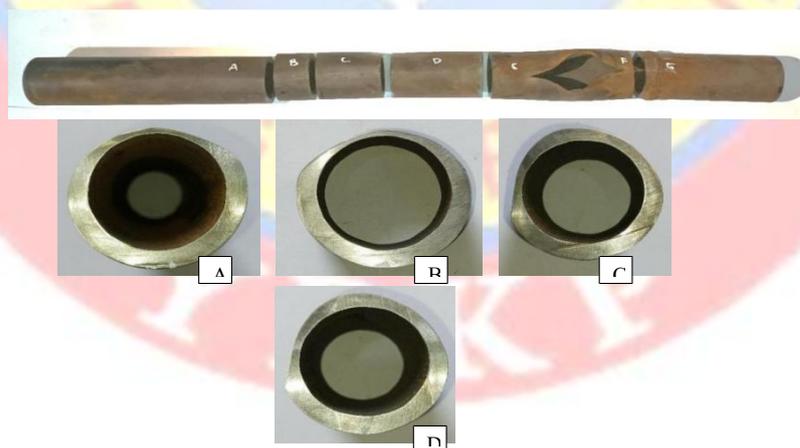
#### 4.1 Data Hasil Pengukuran

##### 1. Pengujian Visual

Pengujian visual dilakukan dengan cara mengamati langsung bagian yang mengalami kerusakan menggunakan alat bantu penerangan/ lampu. Dari hasil pengamatan Ditemukan adanya *failure* pecah *tube* dan penipisan pada permukaan luar. Penipisan *tube* terjadi karena semburan uap *sootblower* bertekanan tinggi yang mengenai permukaan *tube*.



Gambar 4.1 Visual Sampel Tube Pecah



Gambar 4.2 Visual Potongan Tube

Pada area pecah ditemukan kondisi *tube* telah mengalami *bulging* (pembengkakan) yang menunjukkan adanya indikasi *overheating* pada *tube*.



Gambar 4.3 Visual area pecah

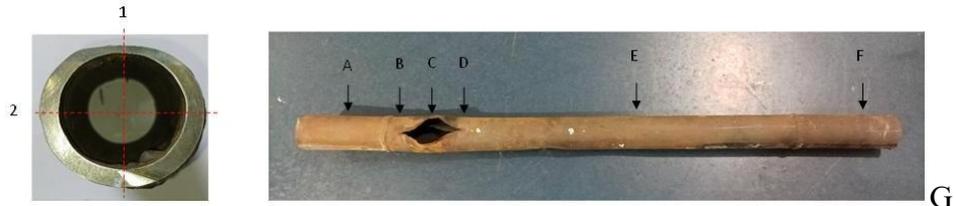
Pengamatan visual pada sisi *inner tube*, tidak ditemukan adanya indikasi oksidasi tebal, korosi maupun endapan deposit.



Gambar 4.4 Visual sisi *inner tube*

## 2. Pengujian *Outside Diameter*

Pengujian *outside diameter (OD)* dilakukan pada sampel *tube* untuk mengetahui adanya perubahan dimensi akibat proses operasi. Dari hasil pengujian diperoleh diameter maksimum sebesar 57,09 mm dan minimum sebesar 45,69 mm. Berdasarkan hasil pengujian, *tube* telah mengalami *bulging* pada titik C sehingga diperoleh nilai diameter yang melebihi desain. *Bulging* pada *tube* dapat disebabkan oleh adanya penipisan *tube* melebihi batas yang diijinkan dan panas berlebih yang diterima oleh *tube* tersebut sehingga kekuatan *tube* menjadi menurun. Ketika ada tekanan *steam* didalam *tube* ditambah dengan kondisi panas berlebih pada *tube*, maka dinding *tube* akan melemah dan menyebabkan perubahan dimensi/deformasi termal yang pada akhirnya menyebabkan *bulging*.



Gambar 4.5 Titik Pengukuran *Outside Diameter*

Tabel 4.1 Hasil Pengujian *Outside Diameter*

**Hasil Pengukuran Outside Diameter**

$\emptyset$ Design (mm)	Titik	A	B	C	D	E	F
50,80	1	49,79	45,69	56,89	46,77	48,09	50,17
	2	50,38	51,91	57,09	51,26	46,53	50,97

### 3. Pengujian *Thickness*



Gambar 4.6 titik pengujian *thickness*

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Thickness

Hasil Pengukuran Thickness (mm)										
Desain thickness (mm)	MWT (mm)	Titik	1	2	3	4	5	6	7	8
5,20	4.42	A	4,90	2,39	pecah	2,54	3,59	2,13	3,06	5,15
		B	5,73	6,07	4,47	6,16	6,14	6,12	6,13	5,86
		C	5,87	5,90	6,03	6,08	6,25	6,28	6,12	5,90
		D	5,92	5,78	4,99	5,87	2,39	5,14	2,13	5,98

Desain *tube primary superheater* memiliki ketebalan 5,20 mm. Dari hasil pengujian *thickness* pada *tube* diperoleh tebal maksimum sebesar 6,28 mm dan tebal minimum sebesar 2,13 mm. Hasil pengujian *thickness* pada area pecah menunjukkan bahwa tebal *tube* sisi pecah sekitar 0,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa *failure* disebabkan oleh penipisan *tube*.



Gambar 4.7 Hasil Pengujian Thickness Area Pecah

#### 4. Pengujian Identifikasi Material (Spektrometri)

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Identifikasi Material

<i>Chemical Composition (%)</i>			
Unsur	SA 213 T12	<i>Existing</i>	<i>Retubing</i>
Fe	<i>Balance</i>	97,20	97,21
C	0,050 - 0,15	0,158	0,145
Si	Max 0,500	0,210	0,229

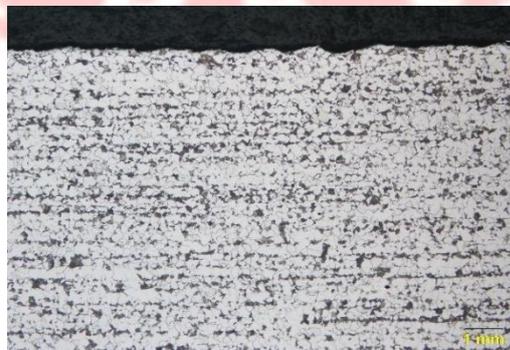
Mn	0,300 - 0,61	0,630	0,510
P	Max 0,025	< 0,003	< 0,003
S	Max 0,026	< 0,002	< 0,002
Cr	0,800 - 1,25	1,070	0,939
Mo	0,440 - 0,650	0,60	0,634

Identifikasi material *tube primary superheater* dilakukan dengan menggunakan metode *Positive Material Identification (PMI)* untuk mengetahui persentase *chemical composition* yang terkandung di dalam sampel material. Pengujian dilakukan pada dua titik uji yaitu area *tube existing* dan area *tube retubing*. Hasil pengujian identifikasi material tube existing dan *tube retubing* menunjukkan bahwa kandungan unsur pada material sampel uji ekuivalen dengan spesifikasi material SA 213 T12.

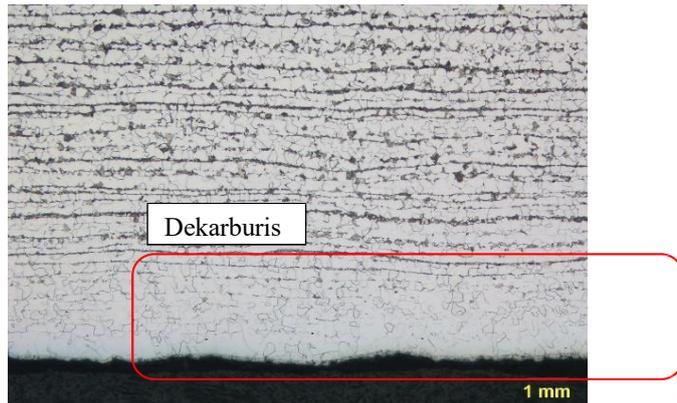
## 5. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan pada area area normal, *failure* dan lasan. Hasil pengujian metalografi menunjukkan struktur mikro *tube primary superheater* K7 no.53 berupa *ferrite pearlite*. Sedangkan pada area lasan, struktur mikro berupa martensit dan tidak ditemukan adanya cacat mikro. Struktur mikro pada area normal tidak ditemukannya cacat mikro, tetapi ditemukan adanya dekarburisasi pada sisi *inner tube*.

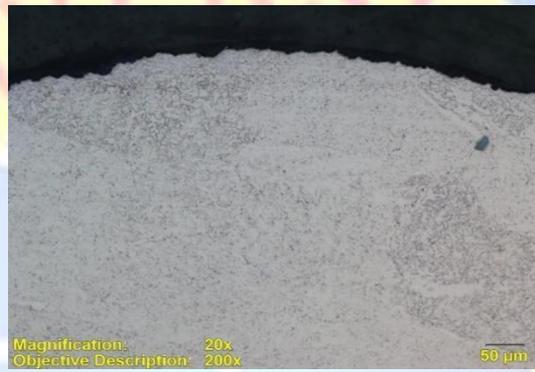
Bentuk struktur mikro pada area ujung *failure* lebih pipih daripada area normal, hal ini disebabkan oleh adanya tarikan ketika proses *bulging*.



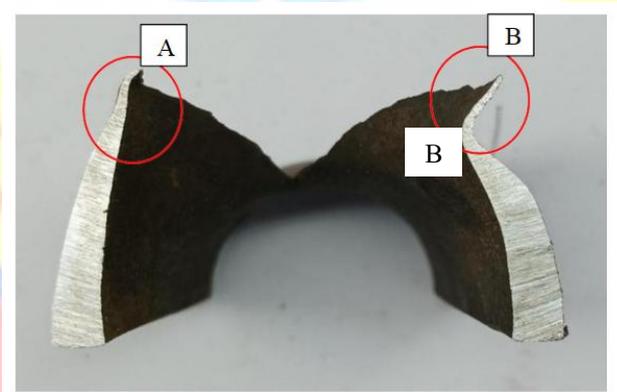
Gambar 4.8 Struktur mikro area permukaan normal



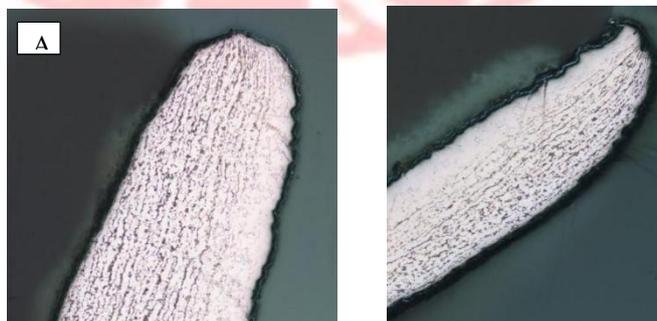
Gambar 4.9 Struktur mikro area permukaan normal



Gambar 4.10 Struktur mikro area lasan



Gambar 4.11 Titik uji metalografi area pecah



Gambar 4.12 Struktur mikro area *failure* (pecah)

## 6. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menggunakan metode *hardness micro vickers* dilakukan untuk mengidentifikasi sifat mekanik dari bahan tersebut. Nilai kekerasan yang diperoleh dapat dikonversi menjadi nilai kekuatan tarik (*tensile strength*). Titik pengujian diambil pada tiga area, yaitu sisi luar material (*fire side*), sisi tengah metal (*middle side*), dan sisi dalam material (*steam side*). Hasil pengujian kekerasan dievaluasi dengan membandingkan antara sampel yang normal dan yang mengalami kegagalan. Perubahan nilai kekerasan juga diperiksa dengan mengacu pada standar jenis material SA213 Grade T12.



Gambar 4.13 Titik Pengujian Kekerasan area normal

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kekerasan *Tube* area normal

Titik Uji		Nilai Kekerasan (HV)				Standard Design SA 213 T12 (HV)
		1	2	3	Average	
Area Normal	<i>Fire Side</i>	163,4	162,84	148,45	158,23	123 - 170
	<i>Middle Side</i>	162,05	159,3	160,43	160,59	
	<i>Steam Side</i>	152,53	138,31	132,11	140,98	



Gambar 4.14 Titik Pengujian Kekerasan area *failure*

Tabel 4.5 Hasil pengujian kekerasan *tube* area *failure*

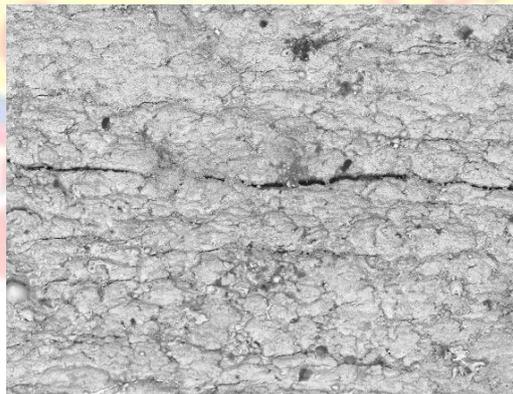
Titik Uji		Nilai Kekerasan (HV)							SA 213 T12 (HV)
		1	2	3	4	5	6	Avg	
Area <i>failure</i>	A	188,16	209,58	193,89	188,56	202,94	217,06	200,03	123 - 170
	B	171,83	183,65	192,71	196,4	198,38	237,04	196,67	

Hasil pengujian kekerasan pada area normal menunjukkan bahwa nilai kekerasan masih dalam batasan *standard design* SA 213 T12 (123-170 HV).

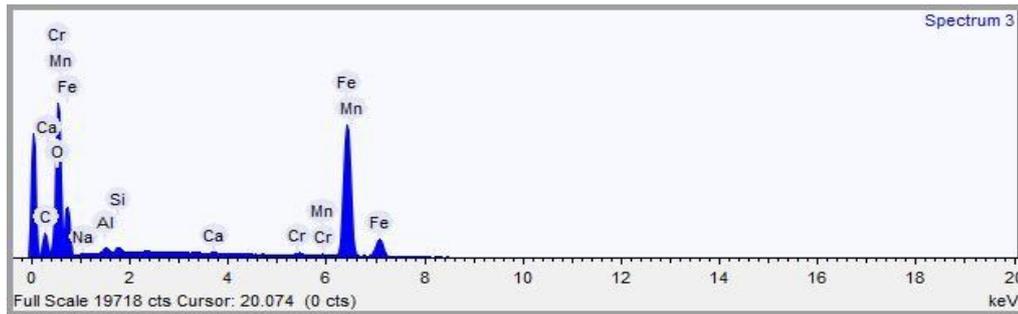
Sedangkan hasil pengujian kekerasan pada area *failure* menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan melebihi standar. Peningkatan nilai kekerasan ini dapat disebabkan oleh adanya panas berlebih yang diterima material *tube*. Dengan adanya kekerasan yang tinggi pada *tube*, maka sifat material dari *tube* akan menjadi getas (*brittle*) dan dapat meningkatkan resiko pecah pada *tube*.

#### 7. Pengujian SEM – EDS

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) bertujuan untuk mengidentifikasi morfologi dari deposit atau cacat, sementara EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectrometry*) digunakan untuk menentukan komposisi deposit tersebut.



Gambar 4.15 SEM *inner deposits* area pecah perbesaran 150X



Gambar 4.16 Spektrum EDS *Inner Deposits* area pecah

Tabel 4.6 Hasil Pengujian EDS *Inner Deposits* area pecah

Element	Weight %	Weight % $\sigma$	Atomic %
Carbon	12.234	0.200	26.836
Oxygen	26.431	0.191	43.524
Sodium	0.290	0.043	0.333
Aluminum	0.516	0.027	0.504
Silicon	0.403	0.026	0.378
Calcium	0.215	0.026	0.141
Chromium	0.538	0.042	0.273
Manganese	0.344	0.056	0.165
Iron	59.029	0.219	27.847

Hasil pengujian SEM-EDS pada *inner tube* menunjukkan bahwa kandungan deposit pada permukaan *inner tube* yaitu *oxygen* dan *ferrous* (unsur pembentuk *oxide scale*). Dari kedua unsur dominan tersebut dapat diketahui bahwa deposit yang paling besar adalah berupa *oxide scale* yaitu  $Fe_2O_3$  atau  $Fe_3O_4$ . Sedangkan unsur selain itu seperti *carbon*, *aluminum*, *manganese*, *silicon* dapat berasal dari *alloy* material itu sendiri maupun berasal dari *chemical water treatment* atau deposit yang berasal dari peralatan lain yang dilalui aliran air.

## 4.2 Analisis Data dan Pembahasan

Hasil pengujian visual pada *tube primary superheater K7 no.53*, ditemukan adanya penipisan di sisi luar *tube* akibat semburan uap bertekanan tinggi yang berasal dari operasi *sootblower*. Selain itu, pada area *failure* juga ditemukan adanya deformasi *bulging*. *Bulging* pada *tube* dapat disebabkan oleh adanya penipisan *tube* melebihi batas yang diijinkan dan panas berlebih (*overheating*) pada *tube* sehingga kekuatan *tube* menjadi menurun.

Dengan adanya tekanan fluida di dalam *tube* dan penurunan kekuatan logam maka akan terjadi deformasi *bulging* pada *tube*. Struktur mikro *tube* berupa *ferrite pearlite* dan ditemukan bentuk butiran yang lebih pipih di ujung *failure* karena adanya tarikan saat proses deformasi *bulging*. Sedangkan hasil pengujian kekerasan pada area *failure* menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan yang disebabkan oleh adanya panas berlebih (*overheating*) pada *tube*. Dengan adanya kekerasan yang tinggi pada *tube*, maka sifat material dari *tube* akan menjadi getas (*brittle*) sehingga dapat meningkatkan resiko pecah pada *tube*.

Berdasarkan serangkaian pengujian pada sampel *tube primasry superheater K7 no 53*, hasil evaluasi menunjukkan bahwa *tube* terindikasi mengalami penipisan dan *overheating*. *Overheating* akan menyebabkan kekuatan logam menurun seiring dengan tingginya temperatur dan lamanya waktu paparan. Dengan kondisi penipisan *tube* yang telah melebihi *minimal wall thickness* (MWT), sifat material yang getas akibat meningkatnya nilai kekerasan menyebabkan material *tube* tidak dapat menahan tekanan uap dan akhirnya mengalami *failure* atau pecah *tube*.

untuk itu, beberapa langkah yang mungkin dapat dilakukan agar permasalahan dapat teratasi atau diminimalisir antara lain melakukan *re-design tube primary*

*superheater*, melakukan penambahan *erosion shield* untuk *soot blower*, melakukan *coating* pada *tube primary superheater* dan rutin melakukan pemeliharaan pada sisi boiler.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Ditemukan adanya *failure* pecah *tube* dan penipisan pada permukaan luar akibat semburan uap *sootblower* bertekanan tinggi yang mengenai permukaan *tube*.
2. Pada area pecah ditemukan kondisi *tube* telah mengalami bulging (pembengkakan) yang menunjukkan adanya indikasi overheating pada *tube*.
3. Pengamatan visual pada sisi *inner tube*, tidak ditemukan adanya indikasi oksidasi tebal, korosi maupun endapan deposit.
4. Hasil pengujian outside diameter diperoleh diameter maksimum sebesar 57,09 mm (area bulging) dan minimum sebesar 45,69 mm.
5. Hasil pengujian thickness pada *tube* diperoleh tebal maksimum sebesar 6,28 mm dan tebal minimum sebesar 2,13 mm. Hasil pengujian thickness pada area pecah menunjukkan bahwa tebal *tube* sisi pecah sekitar 0,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa *failure* disebabkan oleh penipisan *tube*.
6. Hasil pengujian identifikasi material *tube existing* dan *tube retubing* menunjukkan bahwa kandungan unsur pada material sampel uji ekuivalen dengan spesifikasi material SA 213 T12.
7. Hasil pengujian metalografi menunjukkan struktur mikro *tube primary superheater K7 no.53* berupa ferrite pearlite dan ditemukan adanya dekarburisasi pada sisi *inner tube*.
8. Hasil pengujian kekerasan pada area normal menunjukkan bahwa nilai kekerasan masih dalam batasan standard design SA 213 T12 (123-170 HV), sedangkan hasil pengujian kekerasan pada area *failure* menunjukkan adanya peningkatan nilai kekerasan melebihi standar.
9. Hasil pengujian SEM-EDS pada *inner tube* menunjukkan bahwa kandungan deposit pada permukaan *inner tube* yaitu *oxygen dan ferrous* (unsur pembentuk *oxide scale*).

## 5.2 Saran

1. Melakukan *re-design tube primary superheater*.
2. Melakukan penambahan *erosion shield* untuk *soot blower*.
3. Melakukan *coating* pada *tube primary superheater*.
4. Rutin melakukan pemeliharaan pada sisi boiler.



## DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E3, "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens".*
- ASTM E986, "Standard Practice for Scanning Electron Microscope Beam Size Characterization".*
- ASTM E1508, "Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy- Dispersive Spectroscopy".*
- ASTM E140, "Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness".*
- ASTM E370, "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products".*
- ASM Metal Handbook Volume 9, "Metallography and Microstructure".*
- ASM Metallographer's Guide, "Practices and Procedures for Irons and Steels".*
- API 573, "Inspection of Fired Boilers and Heaters".*
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section I, "Rules for Construction of Power Boilers".*
- ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II An International Code, "Part A Ferrous Material Specifications (Beginning to SA 450),"*
- Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel Boiler, Superheater and Heat Exchanger Tubes.*

## Lampiran 1

### INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN VISUAL

#### 1. TUJUAN

Untuk mengetahui kondisi visual suatu benda.

#### 2. STANDAR

-

#### 3. PERALATAN UJI

- a. Kamera
- b. Borescope XL Go +
- c. Borescope Mentor Q

#### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Safety Shoes

#### 5. PELAKSANAAN

- a. Permukaan benda uji dikondisikan bersih dan terdapat akses.
- b. Pastikan alat telah terkalibrasi dan lakukan kalibrasi ulang jika ragu.
- c. Hidupkan alat uji.
- d. Posisikan benda uji sesuai dengan area yang ingin diuji.
- e. Amati layar dan kemudian ambil gambar.
- f. Catat nilai hasil pengujian pada Blanko Uji

## Lampiran 2

# INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN OUTSIDE DIAMETER

### 1. TUJUAN

Untuk mengukur diameter luar benda yang berbentuk lingkaran

### 2. PERALATAN UJI

Outside Diamater

### 3. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Masker
- d. *Safety Helmet*
- e. *Safety Shoes*

### 4. PELAKSANAAN

- a. Pilih ukuran outside diameter yang akan digunakan
- b. Kalibrasi outside diameter sesuai dengan ukuran yang diinginkan
- c. Bersihkan benda uji dari kotoran agar hasil pengukuran akurat
- d. Amati pembacaan nilai pada alat outside diamater
- e. Catat nilai hasil pengukuran pada Blanko Uji
- f. Bersihkan alat dan simpan alat dengan baik dan benar.

### Lampiran 3

## INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN KETEBALAN TUBE

### 1. TUJUAN

Untuk mengetahui nilai ketebalan *tube* dibandingkan terhadap nilai standar ketebalan *tube* (desain) dan nilai MWT (*Minimum Wall Thickness*) yang diijinkan.

### 2. STANDAR

- a. ASTM E 797
- b. ASTM E 1316

### 3. PERALATAN UJI

Ultrasonic Thickness Gauge dan Kuplan

### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Masker
- d. Kacamata Safety
- e. Safety Helmet
- f. Body Hardness
- g. Safety Shoes

### 5. PELAKSANAAN

- a. Benda uji dibersihkan dari kotoran.
- b. Perhatikan dalam membersihkan permukaan material yang akan diuji, agar tidak sampai terlalu menggerus atau mengurangi dimensi asli dari material tersebut, gunakan alat pembersih sesuai dengan tipe kotoran yang menutupi material tersebut.
- c. Oleskan kuplan pada permukaan material yang akan diuji sebagai penghantar gelombang dari probe.
- d. Hubungkan probe pada alat dan hidupkan alat menurut manual alat operasi.
- e. Pastikan baterai alat dalam keadaan tidak hampir habis.
- f. Pastikan alat telah terkalibrasi sesuai dengan manual alat.
- g. Tempelkan probe pada material uji yang telah diberi kuplan.

- h. Pastikan posisi probe rata dengan permukaan material uji.
- i. Amati pembacaan nilai yang tampil pada layar, upayakan agar nilai tersebut terbaca dengan stabil dan catat nilai hasil pengukuran pada Blanko Uji



## Lampiran 4

# INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN PMI - POSITIVE MATERIAL IDENTIFICATION

### 1. TUJUAN

Untuk mengetahui kandungan komposisi kimia dari material dengan membandingkan terhadap nilai standar kandungan komposisi kimia material yang ada.

### 2. STANDAR

- 1) ASTM E 572 – Standard Test Method for Analysis of Stainless and Alloy Steels by X-Ray Fluorescence Spectrometer
- 2) ASTM E 322 – Standar Test Method for X-Ray Emission Spectrometric Analysis of Low – Alloy Steels and Cast Irons.
- 3) ASTM E 1476 – Standard Guide for Metals Identification, Grade Verification, and Sorting.

### 3. PERALATAN UJI

- a. PMI Master Pro
- b. Argon
- c. Kalibrator
- d. Gerinda tangan dan amplas

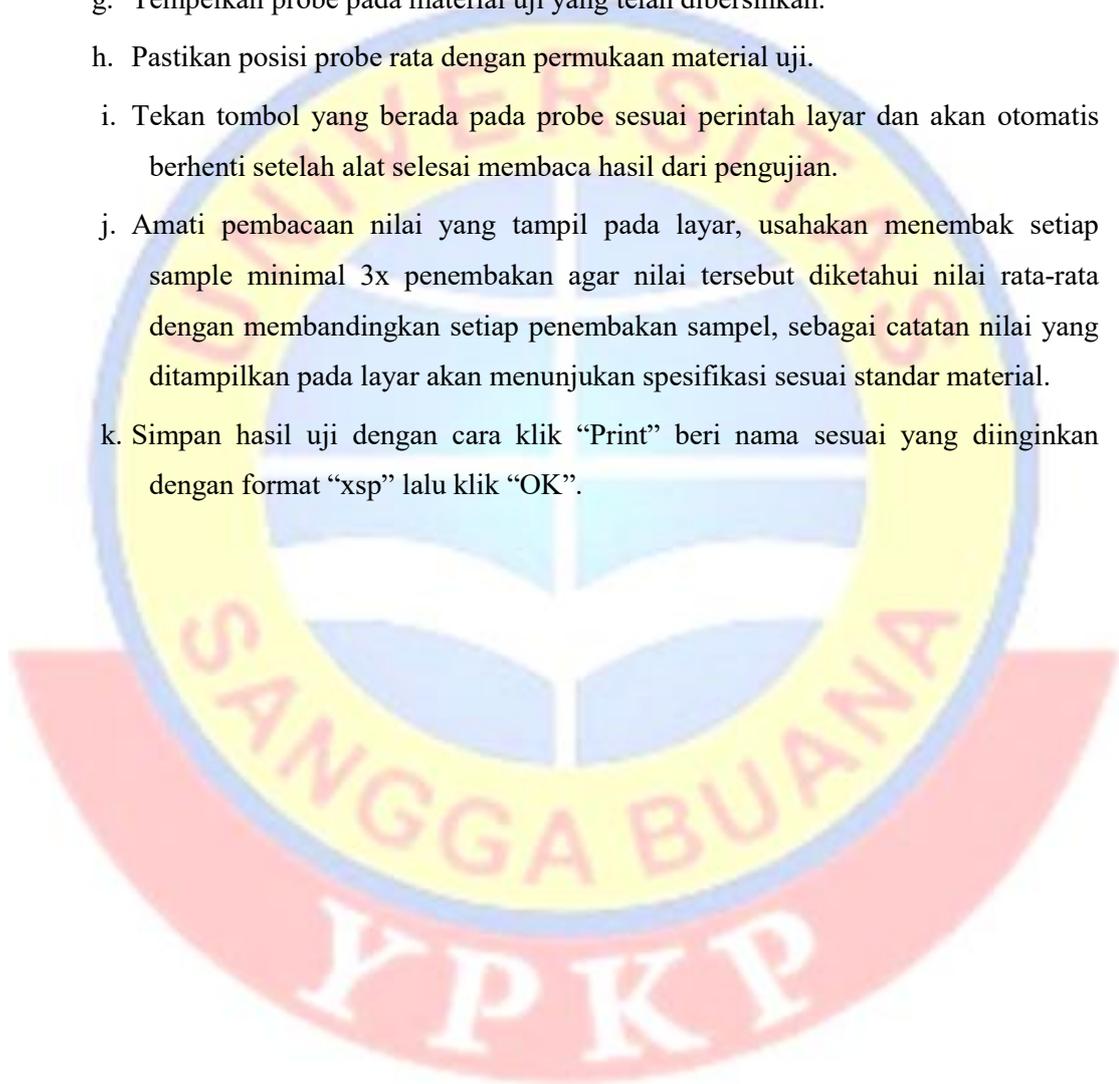
### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Masker
- d. Kacamata Safety
- e. Earmuff
- f. Safety Shoes

### 5. PELAKSANAAN

- a. Benda uji dibersihkan dari kotoran.
- b. Perhatikan dalam membersihkan permukaan material yang akan diuji, agar benar-benar bersih sampai terlihat permukaan material intinya (bersih dari karat, coating, dsb), gunakan alat pembersih gerinda yang telah ditempelkan amplas sesuai dengan kotoran yang menutupi material tersebut.

- c. Bersihkan ujung probe dengan sikat kawat maupun sikat kecil untuk memaksimalkan hasil dari pada pengujian.
- d. Hubungkan probe pada alat, buka tekanan argon sampai tekanan menunjukkan 5 bar dan hidupkan alat menurut manual alat operasi.
- e. Pastikan argon dalam keadaan terisi.
- f. Pastikan alat telah terkalibrasi sesuai dengan manual alat.
- g. Tempelkan probe pada material uji yang telah dibersihkan.
- h. Pastikan posisi probe rata dengan permukaan material uji.
- i. Tekan tombol yang berada pada probe sesuai perintah layar dan akan otomatis berhenti setelah alat selesai membaca hasil dari pengujian.
- j. Amati pembacaan nilai yang tampil pada layar, usahakan menembak setiap sample minimal 3x penembakan agar nilai tersebut diketahui nilai rata-rata dengan membandingkan setiap penembakan sampel, sebagai catatan nilai yang ditampilkan pada layar akan menunjukkan spesifikasi sesuai standar material.
- k. Simpan hasil uji dengan cara klik “Print” beri nama sesuai yang diinginkan dengan format “xsp” lalu klik “OK”.



## Lampiran 5

# INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN METALOGRAFI

## 1. TUJUAN

Untuk mendapatkan struktur makro dan mikro suatu logam sehingga dapat dianalisa sifat mekanik dari logam tersebut.

## 2. STANDAR

- a. ASTM E3-11 (2017) & ASTM E3-95, *Preparation of Metallographic Specimens*  
tentang preparasi metalografi, menjelaskan tentang tahapan preparasi suatu logam dan paduannya dari proses pemilihan sampel sampai polishing sehingga sampel siap di etsa dan dilanjutkan dengan pengamatan struktur mikro.
- b. ASTM E7-17, *Terminology Relating to Metallography*  
Tentang metode pengujian dan petunjuk pengujian metalografi secara benar.
- c. ASTM E407, *Test Methods For Microetching Metals And Alloys*  
Merupakan standar untuk melakukan proses etsa baik dengan etsa kimia maupun dengan etsa elektrolitik
- d. ASTM E340, *Test Methods For Macroetching Metals And Alloys*  
Menjelaskan tentang metode makroetching pada metal dan alloy untuk menghasilkan makrostruktur.

## 3. PERALATAN UJI

- a. Mesin Potong
- b. Mesin Mounting
- c. Mesin Polishing
- d. Bubuk resin
- e. Gelas ukur
- f. Alkohol
- g. Cairan Etsa
- h. Pipet
- i. Pinset
- j. Kapas
- k. Mikroskop Metalografi

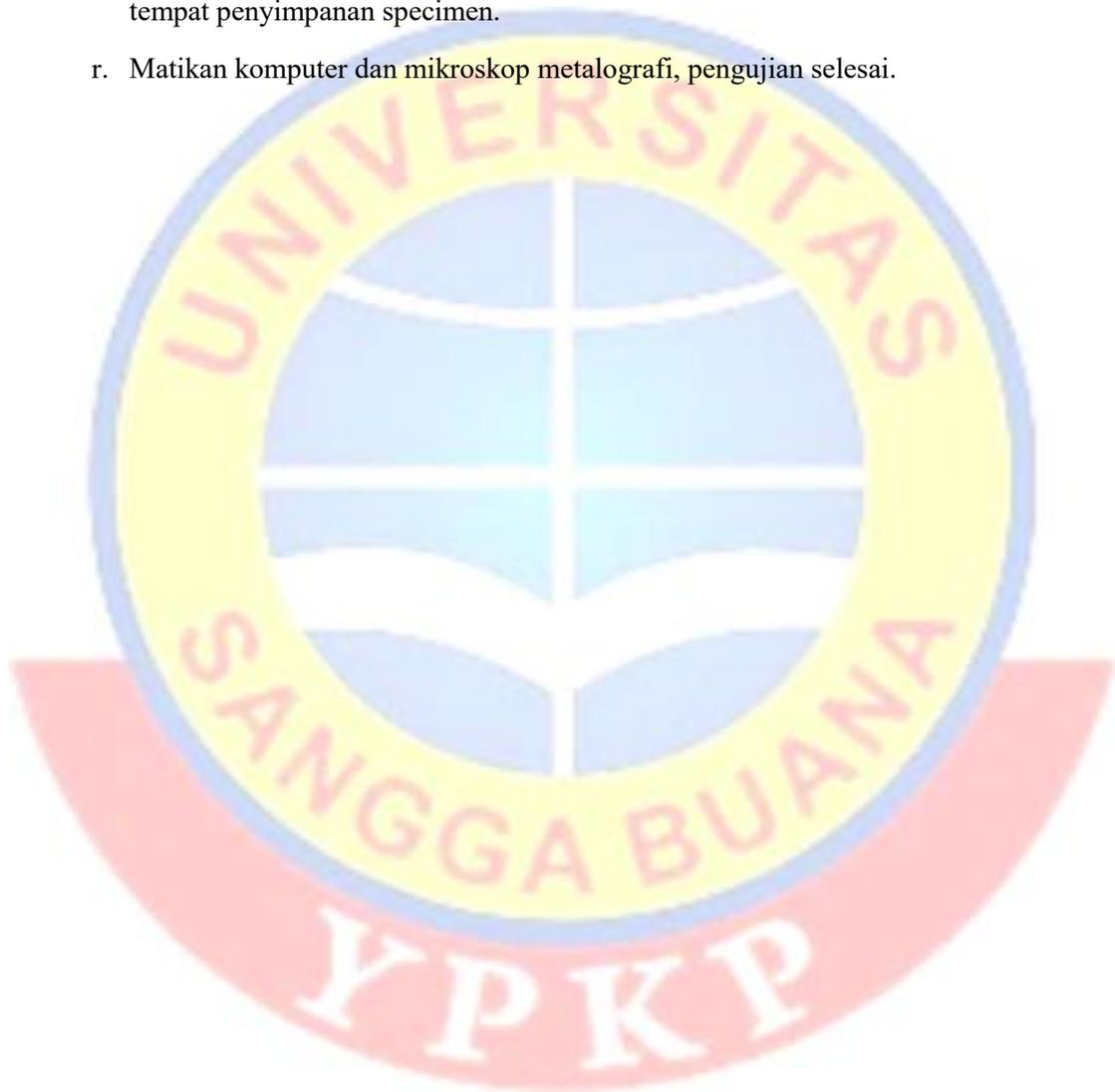
#### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Masker
- d. Kacamata Safety
- e. *Safety Helmet*
- f. *Body Hardness*
- g. *Safety Shoes*

#### 5. PELAKSANAAN

- a. Benda uji di potong menjadi specimen kecil menggunakan mesin potong.
- b. Perhatikan dalam proses pemotongan sampel agar tidak terlalu panas supaya tidak merubah kondisi struktur mikro dan juga kecepatan pemotongan yang tidak terlalu cepat untuk menjaga lapisan deposit yang mungkin ada pada sampel tidak terbuang karena gerakan pemotongan yang terlalu cepat atau kasar.
- c. Hilangkan sudut-sudut tajam/kasar bekas pemotongan pada specimen menggunakan mesin polising.
- d. Masukkan specimen dan bubuk resin kedalam mesin mounting hingga garis batas dan menutupi specimen.
- e. Nyalakan mesin mounting hingga waktu yang ditentukan selesai.
- f. Haluskan permukaan specimen yang sudah di mounting, menggunakan mesin polishing hingga halus dan minim goresan.
- g. Bersihkan permukaan specimen dari sisa proses polishing menggunakan cairan alcohol.
- h. Jepit kapas menggunakan pinset kemudian celupkan kedalam cairan etsa.
- i. Oleskan cairan etsa tersebut ke permukaan specimen dengan memperhatikan waktu untuk tidak terlalu lama agar struktur mikro tidak korosi berlebih.
- j. Bersihkan specimen dengan alkohol agar cairan asam dari etsa terbuang sempurna.
- k. Bersihkan specimen menggunakan kapas dan alkohol hingga bersih dan kering.
- l. Perhatikan dalam proses pembersihan pasca etching untuk dilakukan secara hati-hati agar tidak menggores permukaan specimen.

- m. Letakan specimen diatas meja mikroskop.
- n. Nyalakan komputer dan mikroskop metalografi.
- o. Atur ukuran lensa, tingkat pencahayaan dan tingkat fokus gambar sampai mendapatkan tampilan gambar struktur mikro yang optimal.
- p. Capture dan simpan gambar yang diinginkan.
- q. Pengambilan gambar struktur mikro dari specimen selesai , rapihkan specimen ke tempat penyimpanan specimen.
- r. Matikan komputer dan mikroskop metalografi, pengujian selesai.



## Lampiran 6

### INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN HARDNESS (MIC 20)

#### 1. TUJUAN

Untuk mengetahui nilai kekerasan material.

#### 2. STANDAR

- a. ASTM E 384
- b. ASTM E 92

#### 3. PERALATAN UJI

Hardness Tester

#### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- a. Baju Kerja
- b. Sarung Tangan
- c. Safety Shoes

#### d. PELAKSANAAN

- a. Permukaan benda uji dikondisikan bersih, rata dan halus.
- b. Pastikan alat telah terkalibrasi dan lakukan kalibrasi ulang jika ragu.
- c. Hidupkan alat uji .
- d. Posisikan probe pada benda uji sesuai dengan area yang ingin diuji.
- e. Amati pembacaan nilai yang tampil pada layar.
- f. Catat nilai hasil pengukuran pada Blanko Uji

## Lampiran 7

# INSTRUKSI KERJA PENGUJIAN SEM (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY)

### 1. TUJUAN

- a. Prosedur ini meliputi persyaratan dalam melaksanakan pengamatan morfologi dan komposisi logam menggunakan SEM.
- b. Prosedur ini dibuat untuk membantu operator dalam mengoperasikan alat SEM dengan benar.
- c. Prosedur ini berfungsi agar hasil yang diperoleh sesuai dengan fakta dan dapat dipertanggung jawabkan

### 2. STANDAR

- a. ASTM E986 – 04 2017 , *Standard Practice for Scanning Electron Beam Size Characterization*
- b. ASTM E2809 – 13, *Standard Guide for Using Scanning Electron Microscopy/X-Ray Spectrometry in Forensic Paint Examinations*
- c. ASTM E1508 – 12a, *Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy*

### 3. PERALATAN UJI

- a. TM3000 TableTop SEM beserta perlengkapan lengkapnya (*Conductive double-sided tape, tweezers, specimen stub, specimen holder, height gauge* dan lainnya)
- b. *Dryer*
- c. *Alkohol*

### 4. ALAT PELINDUNG DIRI

- d. Baju Kerja
- e. Sarung Tangan
- f. Masker
- g. Safety Shoes

### 5. PELAKSANAAN

#### a. Tahap Persiapan

Sebelum melakukan pengukuran, langkah-langkah yang harus dipersiapkan adalah:

- 1) Benda uji dibuat menurut standar laboratorium.
- 2) Mempersiapkan peralatan
- 3) Perhatikan dalam meletakkan, membersihkan dan mempersiapkan specimen, hindari adanya tambahan karbon yang berasal dari lemak tangan, tisu, atau peralatan lainnya.

**b. Pengoperasian TM3000**

- 1) Hidupkan alat SEM menurut manual alat operasi.
- 2) Letakkan benda uji pada specimen stub sesuai manual alat.
- 3) Perhatikan ketinggian benda uji. Sesuaikan menggunakan alat ukur ketinggian sekitar 1 mm. Hal itu berpengaruh pada saat pengoperasian perbesaran, benda uji akan menabrak lensa jika terlalu tinggi.
- 4) Pindahkan specimen ke dalam specimen stage
- 5) Arahkan pegangan XY pada *specimen stage* berada di pusat tanda “cross” agar langsung menampilkan gambar saat monitor dihidupkan.
- 6) Evakuasi ruangan benda uji saat melakukan pengujian.
- 7) Buka dan mulai aplikasi TM3000.
- 8) Cari keanehan pada material dengan perbesaran paling kecil kemudian telusuri dari arah pinggir perlahan-lahan
- 9) Perbesar gambar sampai benar-benar yakin ditemukan cacat
- 10) Freeze penampakan dan ambil gambar dengan perbesaran 1000 x pada lokasi yang diindikasikan adanya cacat/ discontinuitas
- 11) Beri keterangan dimensi gambar jika diperlukan menurut manual alat operasi.
- 12) Simpan dan beri nama file gambar.
- 13) Ganti filamen jika sudah rusak/ terbakar.

Lampiran 8

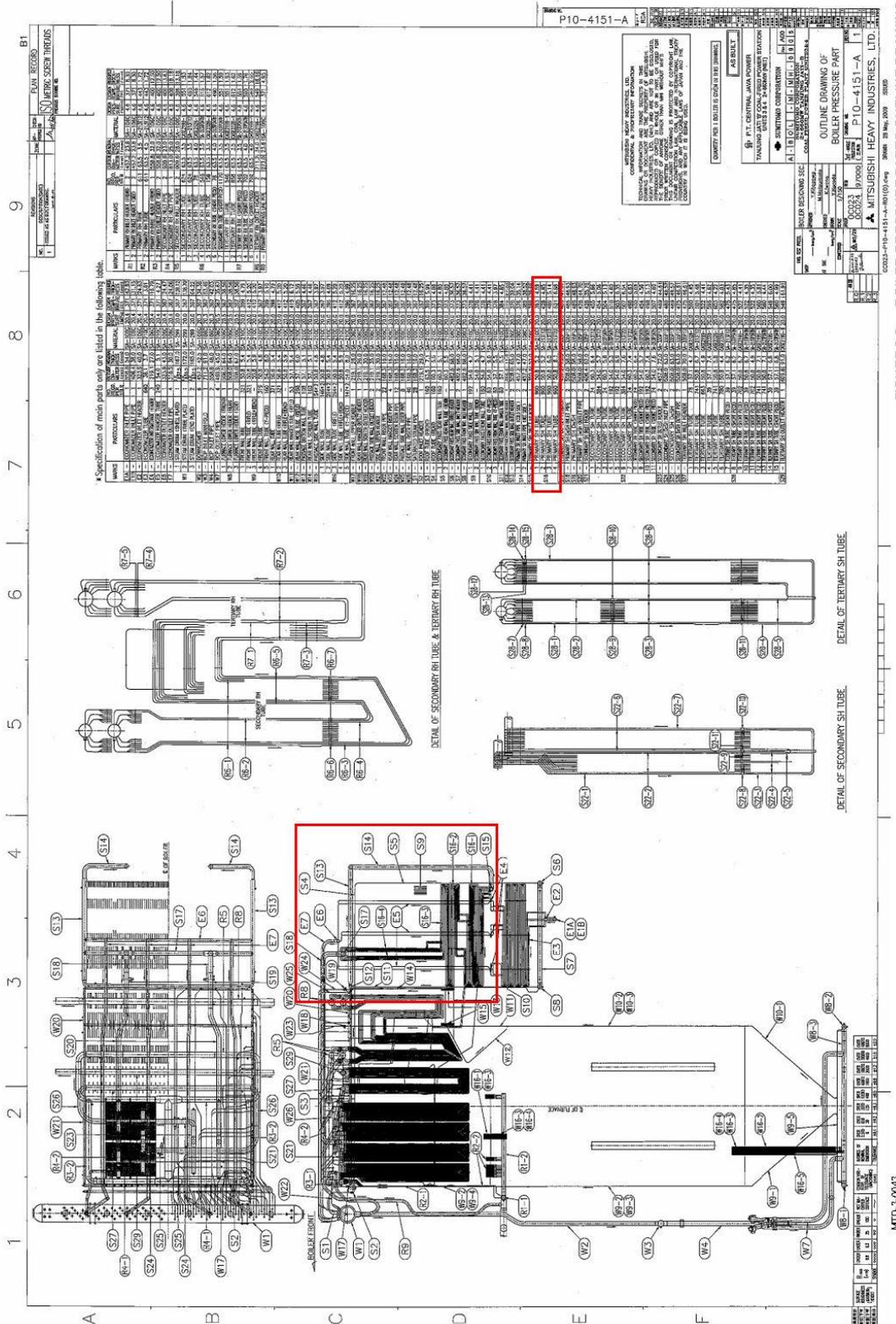


FIGURE 2-2 BOILER PRESSURE PARTS OUTLINE DRAWING

Boiler Pressure Parts, Main & Reheat Steam System