

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

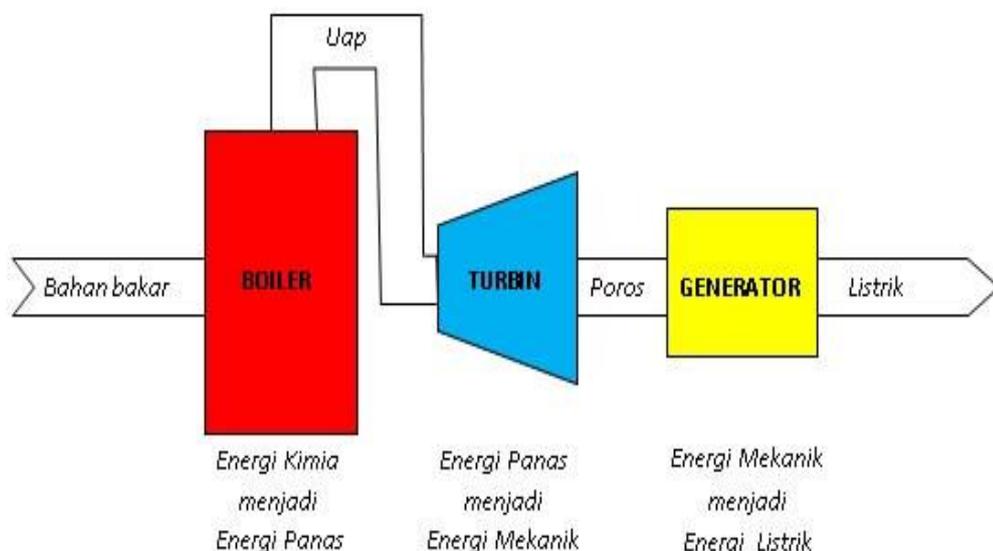
2.1 Pengertian Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang adalah jenis pembangkit yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar. Prinsip kerjanya dengan memanfaatkan uap hasil pembakaran batu bara untuk menggerakkan turbin uap dan generator listrik. Kinerja dari pembangkit listrik tenaga uap batu bara ditentukan oleh hubungan antara teknologi konversi energi dengan kuantitas dan kualitas batu bara yang digunakan. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar terutama batu bara dan minyak bakar serta MFO untuk *start up* awal.

Proses konversi energi pada PLTU berlangsung melalui 3 tahapan, yaitu :

1. Energi kimia dalam bahan bakar diubah menjadi energi panas dalam bentuk uap bertekanan dan temperatur tinggi.
2. Energi panas (uap) diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran.

Energi mekanik diubah menjadi energi listrik (Adrian et al., 2016)



Gambar 2.1 Proses Konversi Energi pada PLTU

2.2 Komponen Utama PLTU

2.2.1 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu alat berbentuk bejana tertutup yang digunakan untuk memproduksi *steam*/uap. *Steam* diperoleh dengan memanaskan air yang berada didalam bejana dengan bahan bakar. *Boiler* mengubah energi-energi kimia menjadi bentuk energi yang lain untuk menghasilkan kerja. *Boiler* dirancang untuk memindahkan kalor dari suatu sumber pembakaran, yang biasanya berupa pembakaran bahan bakar . *Boiler* adalah sebuah konteiner dimana diberi air dan dipanaskan, sehingga air mendidih dan menguap terus menerus menjadi uap.

2.2.2 Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energimekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. Tergantung pada jenis mekanisme yang digunakan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi. Pada proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanisnya yaitu dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara. Pada dasarnya turbin uap terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik.

2.2.3 Kondensor

Kondensor adalah suatu alat yang digunakan untuk mengkondensasikan uap dari LP *turbine* dengan media pendingin air laut yang dipompakan melalui CWP. Prinsip kerjanya adalah uap dari LP *turbine* mengalir di luar pipa – pipa *condenser* melewati air laut yang mengalir di dalam pipa – pipa kondensor.

2.2.4 Generator

Generator atau yang sering disebut dengan *alternator* merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang berasal dari putaran *shaft* turbin, menjadi energi listrik dengan perantara induksi medan magnet. Perubahan energi ini terjadi karena adanya pergerakan relatif antara medan magnet dengan kumparan generator. Pergerakan relatif ini menghasilkan medan putar pada belitan medan di rotor kemudian menginduksi belitan jangkar dari generator yang terdapat pada stator (Antono, 2014)

2.3 Unit Boiler Pada PLTU 3X10 MW Unit Tanjung Enim

Unit boiler yang digunakan di PLTU PT. BEST 3X10 MW berjenis *boiler CFB*. *Boiler CFB* memiliki cara kerja dengan menginjeksikan udara ke pembakaran primer menggunakan *bed* material yang berupa pasir. Udara yang dimasukkan pada kecepatan tertentu akan menyebabkan *bed* material terangkat dan terjadinya fluidisasi yang memudahkan dalam proses pencampuran antara bahan bakar dan udara sehingga mempercepat proses pembakaran (RIZKI MOHAMMAD WIJAYANTO, 2018)



Gambar 2.2 boiler CFB

Adapun spesifikasi dari pada *boiler* CFB yang berada di PLTU PT. BEST Unit Tanjung Enim dapat dilihat dalam tabel sebagai berikut :

Tabel 2.1 spesifikasi boiler di PLTU PT. BEST
(PT. BEST, 2023)

No	Nama	Keterangan
1	Tipe	Circulation fluidized bed
2	<i>Rated Evaporation Capacity</i>	56 T/H
3	<i>Rated Steam Pressure</i>	5,4 Mpa
4	<i>Rated Steam Temperature</i>	485°C
5	<i>Feed Water Temperature</i>	150°C
6	<i>Gas Exhaust Temperature</i>	140°C
7	<i>Continous Blow Down Effieciency</i>	2%
8	<i>Cold Air Temperature</i>	30°C
9	<i>Hot Air Temperature</i>	150°C
10	<i>Boiler Desain Heat Efficiency</i>	90,27%
11	<i>Manufacture</i>	Jiangxi Jiangliang Energy China

2.4 Pipa *Embedded*

Pipa *embedded* merupakan pipa baja pelindung eksternal. Fungsi dari pipa *embedded* sama seperti pipa *waterwall* dimana pipa tersebut sebagai media panas yang merubah air baku menjadi uap jenuh, pipa *embedded* ini berupa pipa air yang berada disubbed *furnace*.

Tabel 2.2 Data operasional *embedded*
(PT. BEST, 2023)

No	Nama	Keterangan
1	<i>Pressure embedded</i>	5.94 Mpa
2	<i>Velocity</i>	5900.0 m/s
3	Suhu	497°C
4	<i>Capacity</i>	36.65 t/h

2.5 Material yang digunakan

Material yang digunakan dalam pengujian ini, yaitu pipa hasil penggantian dari PLTU 3x10 MW PT BEST Tanjung Enim yang telah mengalami kebocoran. Jenis material yang di gunakan Baja Karbon GB5310 20G, Standar Cina GB5310 ditentukan untuk baja struktural karbon berkualitas tinggi, baja struktural paduan dan pipa baja seamless baja tahan panas tahan karat yang digunakan dalam pipa ketel uap dengan tekanan tinggi ke atas. Bahan tabung baja GB5310 terutama

mencakup baja karbon berkualitas tinggi (20G), baja paduan (12CrMoG, 15CrMoG), baja tahan panas (12Cr2MoG, 15Cr5MoG, 12Cr1MoVG, 10CrMo910 dan seterusnya). 20G adalah bahan baja karbon yang paling umum digunakan di GB5310.

Tabel 2.3 spesifikasi pipa

Material	PIPA BAJA KARBON GB5310 20G
Diameter Pipa	50 mm
Ketebalan Pipa	5 mm
Temperatur	425 ° C
Tekanan	11,88 mpA

2.6 Kegagalan Pada Pipa Boiler

Kegagalan pada pipa *elbow* sangat banyak faktor seperti pengoperasian yang tidak standar, temperatur tinggi, lingkungan yang *abrasif* dan *pressure* yang tinggi dari faktor tersebut dapat memunculkan variasi kegagalan lainnya seperti *overheating*, *pitting corrosion*, *creep*, *thermal fatigue*, *erosion*, *stress corrosion cracking*, dan *corrosion fatigue*. Berikut penjelasan masalah kegagalan tersebut dijelaskan di dalam tabel dibawah ini (Ariyanto, 2019)

Tabel 2.5 jenis-jenis penyebab kegagalan pipa *elbow*
(Ariyanto, 2019)

Jenis kegagalan	Penjelasan
<i>Overheating</i>	Yaitu pengoperasian unit yang terlalu berlebihan atau diluar batas penggunaan yang menyebabkan timbulnya panas berlebih.
<i>Pitting corrosion</i>	Korosi yang memiliki bentuk seperti sumur atau lubang-lubang kecil yang terjadi di lapisan logam.
<i>Creep</i>	Adalah proses terjadinya deformasi permanen kegagalan pada logam saat temperatur tinggi

Jenis kegagalan	Penjelasan
<i>Erosion</i>	Pengikisan yang disebabkan oleh aliran <i>fluida/steam</i> yang memiliki tekanan tinggi.
<i>Thermal fatigue</i>	Adanya terjadinya perubahan siklus tegangan dan regangan yang tidak merata pada benda akibat gradien temperatur pada benda. Seperti temperatur yang tinggi, seringnya terjadi siklus pemanasan dan pendinginan
<i>Corrosion fatigue</i>	Korosi yang disebabkan logam mendapatkan beban dengan siklus yang terus berulang-ulang sehingga logam mengalami patah.
<i>Stress corrosion cracking</i>	Korosi yang disebabkan logam mengalami perubahan bentuk dengan cara ditarik, di bending dll, sehingga dari aktivitas tersebut menyebabkan butiran retakan.

2.6.1 Korosi

Korosi adalah proses pengikisan atau degradasi pada sebuah logam yang terjadi adanya akibat interaksi dengan lingkungan disekitarnya. Maka interaksi tersebut terjadi karena adanya reaksi kimia ataupun elektrokimia yang nantinya mengakibatkan korosi. Faktor yang paling banyak mempengaruhi korosi adalah kontak langsung logam dengan oksigen dan air, keberadaan elektrolit, suhu, ph, dan jenis logam (Ariyanto, 2019)

2.6.2 Erosi

Erosi dan korosi memiliki pengertian yang hampir sama yaitu kegagalan atau penurunan kualitas atau mutu suatu material akibat adanya reaksi dengan lingkungan. Jika korosi terjadi adanya keterlibatan unsur kimiawi maka berbeda dengan erosi dimana terjadi akibat secara fisik. Proses kegagalan pada suatu material sangat jarang ditemukan yang terjadi akibat erosi murni, biasanya ada campur tangan korosi meskipun keterlibatan korosi sangat sedikit jumlahnya. Sehingga proses kegagalan ini disebut kegagalan korosi erosi material (Ariyanto, 2019)

2.6.3 Korosi Erosi

Korosi erosi adalah korosi yang terjadi pada sebuah permukaan material logam yang disebabkan aliran fluida yang sangat cepat sehingga merusak permukaan logam dan lapisan pelindung logam. Ada beberapa macam penyebab terjadinya korosi erosi pada logam, diantaranya (Ariyanto, 2019)

- Aliran turbulen, tekanan geser berfluktuasi dan dampak tekanan.
- Adanya dampak partikel padat tersuspensi.
- Adanya dampak *Liquid Droplet* yang tersuspensi dalam aliran berbentuk uap dengan kecepatan tinggi.
- Adanya dampak gelembung uap gas yang tersuspensi dalam aliran berbentuk cair.
- Terjadinya proses pecahnya gelembung udara yang menggumpal pada proses kavitasi.

2.7 Konsep Dasar Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah kegiatan pemeriksaan/pengujian terhadap suatu komponen yang mengalami kerusakan untuk mencari penyebab terjadi permasalahan yang sifatnya spesifik. Didukung dengan berbagai referensi, pengamatan, dan pengujian laboratorium untuk memperkuat dugaan permasalahan. Kegagalan bisa saja berasal dari manufaktur, perakitan ataupun pengoperasian yang tidak sesuai dengan prosedur, dan tujuan analisa kegagalan untuk mengetahui mekanisme kegagalan. Manfaat yang dihasilkan dari analisa kegagalan dalam jangka pendek adalah perbaikan desain dan proses fabrikasi juga pengoperasian. Untuk jangka panjang bisa dijadikan acuan pengembangan material dan evaluasi untuk memperkirakan kerja suatu material dan memperbaiki sistem perawatan dari material tersebut. Adapun faktor-faktor yang menjadi acuan parameter pengujian antara lain:

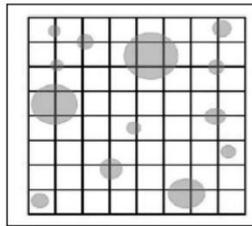
2.7.1 Uji Metalografi (struktur mikro)

Pengujian struktur mikro dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui fasa struktur mikro dari material pipa *embedded*. pengujian metalografi ini dilakukann

berdasarkan pada ASTM E562, yang merupakan satandar pengujian yang nantinya digunakan untuk menentukan fraksi volume dengan sistem perhitungan manual (*Point Count*) dan menghitung rata-rata butir yang berdasarkan pada ASTM E112 dengan menggunakan metode *Hilliard* (Nurmalasari, 2017)

Adapun cara menentukan jumlah fasa struktur mikro pada material sebagai berikut:

1. Metode *Point Count* (Nurmalasari, 2017)



Gambar 2. Kotak-kotak pembantu perhitungan (Metallurgical facts, 2021)

$$P_{Ms} = \frac{Q_{Ms}}{Q_o} \times 100\% = \%$$

Persamaan 2.1

Keterangan:

P_{Ms} = Presentase Mikrostruktur Tertentu

Q_{Ms} = Jumlah Titik Mikrostruktur Tertentu

Q_o = Jumlah Titik Total

2. Metode *Hilliard* (Imami, 2018)

$$G = -10 - 6,64 \log \frac{LT}{P \cdot M}$$

Persamaan 2.2

Keterangan:

G = besaran butir ASTM

LT = total keliling lingkaran

P = total jumlah perpotongan lingkaran dengan butiran

M = perbesaran

2.7.2 Uji Tarik Mulur (Elastisitas)

Modulus elastisitas didefinisikan sebagai hasil bagi antara tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dengan demikian modulus elastisitas dapat dinyatakan dengan (Budiawan, 2018) :

1. Regangan

Regangan adalah perbandingan antara pertambahan panjang dengan panjang awalnya. Pertambahan panjang ini tidak hanya terjadi pada ujungnya saja, tetapi pada setiap bagian batang (Budiawan, 2018).

Persamaan regangan :

$$e = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Persamaan 2.3}$$

Dengan :

e = Regangan

ΔL = Perubahan ukuran panjang (mm)

L = Panjang Awal (mm)

2. Tegangan

Tegangan adalah perbandingan antara gaya tarik yang dikerjakan pada benda dengan luas penampangnya (Budiawan, 2018) .

Persamaan Tegangan :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} \quad \text{Persamaan 2.4}$$

Dengan :

σ = Tegangan (N/m^2)

F = Gaya Tarik (N)

A = Luas Penampang (mm^2)

3. Modulus elastisitas

$$E = \frac{\sigma}{e} \quad \text{Persamaan 2.5}$$

Dengan :

E = Modulus elastisitas

σ = Regangan (N/m^2)

e = Tegangan (N)

2.7.3 Uji *Thicness*

Uji *thicness* adalah suatu alat uji mekanik yang berguna untuk mengukur dan mengetahui ketebalan pada benda. Uji *thicness* ini memiliki kinerja yang bagus dan berkualitas untuk mengetahui ketebalan benda. Pada umumnya uji *thicness* ini digunakan untuk mengetahui ketebalan pada pipa. Sebuah perancangan system perpipaan diperlukan analisis yang menyeluruh dari berbagai aspek. Salah satunya *pengukuran ketebalan* dinding pipa yang digunakan dalam sisitem ini.

28. Diagram Fasa

Diagram fasa *representasi* grafis yang menggambarkan hubungan antara berbagai fasa atau bentuk materi dalam suatu sistem pada kondisi tertentu, seperti suhu dan tekanan. Diagram ini digunakan untuk memahami bagaimana zat atau sistem akan berubah dari satu fasa ke fasa lainnya saat kondisi *eksternal* berubah.

Pada diagram fasa memberikan informasi penting tentang bagaimana material berperilaku di bawah beban tarik dan dapat digunakan untuk mengukur berbagai parameter material, seperti kekuatan tarik maksimum (*tensile strength*), modulus elastisitas (*elastic modulus*), regangan patah (*strain at failure*), dan lain sebagainya. Diagram ini sangat penting dalam perancangan dan pengujian material, terutama dalam industri seperti rekayasa sipil, rekayasa mekanik, dan pembuatan produk,

2.9 Kajian Pustaka

(Christanto et al., 2013) dengan judul Analisa Kerusakan Pipa CFB *Boiler* Untuk Menentukan Program Pemeliharaan Lanjut dapat disimpulkan bahwasannya Material yang digunakan untuk pipa Material yang digunakan untuk pipa *preheater boiler* adalah berupa baja karbon rendah dengan struktur mikro yang dominan berupa struktur *ferit equivalent* (putih) dan sedikit pulau- pulau *perlit* (hitam). Pipa mengalami kebocoran pada sisi *furnace* atau ruang bakar pada posisi antara posisi jam 4 sampai jam 3 pada sisi kiri ruang bakar dan posisi jam 8 sampai jam 9 pada sisi kanan ruang bakar dimana sisi pipa tersebut tepat bersentuhan langsung dengan aliran dari *primary* dan *secondary fan blower* sehingga mengalami gesekan

(*wearing*) dan membentuk kerusakan berupa lubang atau kebocoran dengan berbagai macam ukuran. akumulasi pemakaian masa material atau partikel yang berlebihan sehingga dapat mempercepat kerusakan *embedded pipe boiler* akibat dari penggunaan pasir silika yang berlebihan dan diameter batu bara yang terlalu besar. Selain itu juga *flow rate* dari *primary* dan *secondary fan blower* lebih besar dari yang dibutuhkan.

Rosyid, H. Al, & Firmansyah, J. (2015) dengan judul Analisis Kegagalan Material *Waterwall Tube Boiler* PLTU Ubon Banten 3 Lontar Unit 3 dapat disimpulkan bahwasannya

1. Penyebab pengikisan pada pipa *waterwall* dikarenakan oleh *shotblasting*. Dimana pada pipa yang mengalami kebocoran menyemburkan uap bertekanan, sehingga mengenai pipa sampel dan mengalami pengikisan.
2. Dari hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa kadar karbon pada material pipa *waterwall* mengalami penurunan, dimana pada pengujian sampel ini karbon yang terkandung adalah 0.12% berbeda dengan spesifikasi standar yaitu baja karbon menengah (0.23%-0.44%).
3. Setelah pengujian SEM-EDS bahwa terlihat struktur mikro pada permukaan yang terdapat pada material pipa *waterwall* ini termasuk jenis struktur *Hypoeutectoid*. Hal ini yang menyebabkan keuletan dari material ini meningkat dan kekerasan pada daerah pengikisan lebih rendah dibandingkan daerah utuh.
4. Penyebab utama kebocoran kemungkinan besar karena bahan bakar yang jelek atau air ketel yang jelek yang akan mengakibatkan korosif.

(Adrian et al., 2016) dengan judul Analisa Kerusakan *Superheater Tube Boiler* Tipe ASTM A213 Grade T11 pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap dapat disimpulkan

- 1) Hasil analisa metalografi pada daerah yang tidak mengalami kegagalan, fasa yang tampak merupakan *ferit* dengan diameter rata-rata butir sebesar 0,0213 mm dan memiliki kekerasan sebesar 52 HRB, pada tepi pipa yang pecah fasa yang tampak pada metalografi juga merupakan *ferit* dengan rata-rata diameter butir sebesar 0,02357 mm dan memiliki kekerasan sebesar 49 HRB. Pada daerah yang mengalami kerusakan didapatkan bahwa fasa yang tampak merupakan *ferit*

dengan rata-rata diameter sebesar 0,0308 mm dengan kekerasan sebesar 25,5 HRB. Pada hasil SEM terlihat adanya *crack* dan berkas patahan berupa *granular*.

- 2) Penyebab terjadinya kegagalan pada pipa *superheater* dikarenakan adanya *creep* yang menjulur dan mengakibatkan *crack* sebagai awal pecahnya pipa.
- 3) Mekanisme terjadinya *creep* berawal dari adanya kelelahan pada temperatur tinggi, yang mengakibatkan terbentuknya *creep void* pada batas butir. Void akan saling bertemu dan bergabung membentuk *intergranular crack*. *Intergranular crack* yang bergabung akan membentuk *crack* yang makin lama makin besar. Karena banyaknya *crack* maka material ini menjadi rentan pecah.

(Firdaus et al., 2019) dengan judul Studi Kasus Penyebab Kegagalan Pada Pipa *Waterwall* Untuk Meningkatkan *Availability Boiler* dapat disimpulkan:

1. Pecahnya pipa *waterwall* pada *boiler 1* disebabkan karena terjadinya penipisan ketebalan dari dimensi awal 5mm menjadi 3 mm pada bagian sisi luar pipa yang berkontak langsung dengan aliran flu gas
2. Berdasarkan hasil pengujian komposisi kimia pada pipa yang mengalami kegagalan (pecah) dari segi persentasi komposisi kimia kerusakan pada material pipa *waterwall* dapat dipicu oleh sebab menurunnya kadar *Chromium* (Cr) sehingga material kehilangan sifatnya yang tahan terhadap korosi, dan terjadinya penurunan persentasi *Molybdenum* (Mo) Sehingga material kehilangan sifat ketangguhan dan kekuatan pada temperatur tinggi, serta komposisi karbon lebih rendah dibandingkan *silicon* yang membuat material menjadi lebih getas.
3. Pada sample yang diambil pas pada bagian yang pecah mengandung Karbon dan Nikel lebih banyak dari sample dengan posisi lebih jauh dari area pecah yang membuktikan bahwa benda yang berada pada posisi pecah kehilangan sifat uletnya dan menjadi lebih ketsas.
4. Berdasarkan perhitungan *Minimum Wall Thickness* didapat *minimum wall thickness* dengan *pressure* operasi 5.4 Mpa yaitu 3.5mm namun bila dihitung MAWP (*Maximum Allowable Working Pressure*) pada ketebalan 3.5mm. *Pressure* operasi yang diizinkan yaitu 4.0 Mpa. Sehingga dapat disimpulkan pecahnya pipa *waterwall* pada *boiler 1* dikarenakan penipisan dimensi ketebalan

pipa melebihi batas minimum thickness sehingga pipa tidak sanggup menahan *pressure* operasi normal.

5. Berdasarkan beberapa kesimpulan diatas, pada proses *maintenance boiler* 1 dilakukan pengecekan ketebalan pada pipa disekitar pipa yang pecah dan dilakukan penggantian dan meminimalkan pengoperasian *boiler* 1 pada *maksimum pressure* sehingga *boiler* 1 dapat beroperasi dengan aman.

Sumirat, uum (2016) dengan Judul Perilaku *Creep* Pada Baja *Austenitik* Pada Kondisi Temperatur Tinggi, dapat disimpulkan:

1. Hasil uji tarik pada suhu kamar menunjukkan bahwa kekuatan tarik *maksimum spesimen* adalah 646 Mpa dengan elongation 42 %, Sedangkan kekuatan tarik *maksimum* yang dilakukan pada suhu tinggi atau 800 0C, menunjukkan hasil sebesar 203,5 Mpa dengan *elongation* sebesar 38 %.
2. Spesimen diuji pada suhu 800 - 900 oC pada daerah tegangan 53,8 – 134,5 MPa memberikan hasil kurva *creep* yang *signifikan* sehingga material tersebut dapat dioperasikan pada suhu tinggi.
3. Strukturmikro *spesimen* berupa *austenit* yang diperkuat oleh endapan *delta ferrite*, hanya saja endapan ini akan bergeser kebatas butir mana kala mengalami pemanasan yang cukup tinggi dan lama, sehingga mengakibatkan *elongasinya* menurun pada suhu tinggi.

Karokaro, muchtar dkk, (2009) dengan judul analisa kegagalan dan perkiraan umur sisa pipa air pada *boiler* 31f-4 *utilities*-1 di Pt Badak NGL Bontang, dapat disimpulkan:

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan dari material *tube* SA 178 C pada *Boiler* 31F-4 *Utilities* 1 PT Badak NGL Bontang adalah
 - a. Kegagalan berupa panas yang berlebih dalam jangka waktu yang lama (*Long – Term Overheating*).
 - b. Kegagalan berawal dari korosi merata (*uniform corrosion*) produk korosi oksida besi dan terjadi penumpukan Cu sehingga menghasilkan korosi bimetal (*galvanic corrosion*).
2. Perkiraan umur sisa pada *tube*/pipa berdasarkan metode *metalografi* dengan perkiraan *kuantitatif* dan perkiraan *kualitatif* adalah

a. Perkiraan *kuantitatif*

- Persamaan *Shammas* (1988) metode pertama sebesar 12.000 jam.
- Persamaan *Shammas* (1988) metode kedua sebesar 54.040 jam.

b. Perkiraan *kualitatif*

- *Kurva Neubaur dan Wedel* (1983) berada di kelas C dengan keterangan harus diperbaiki atau diganti dengan *tube* yang baru setelah enam bulan beroperasi.
- Gambar struktur mikro Mardianto (2007) perkiraan kerusakan 80% menghasilkan perkiraan umur sisa 20%. Keterangan *inspeksi* ulang setelah sekitar 10.000 jam operasi.

Kautsari Anggun Karisma dkk, (2012) Dengan judul Analisa Kegagalan dan Perkiraan Umur Sisa Pipa Air Pada *Boiler* Unit I di PLTU PT. PJB UP Gresik dapat disimpulkan:

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan dari material *tube* STB 42 pada *water wall boiler Tube* Unit 1 PT. PJB UP Gresik adalah
 - a.) Kegagalan berawal dari korosi produk korosi oksida besi dan terjadi penumpukan Oksigen sehingga menghasilkan korosi oksigen .
 - b.) Adanya *Deformasi*, Tekanan dari air yang menyebabkan *tube* bersifat luluh namun belum pecah.
2. Perkiraan umur sisa pada *tube*/pipa berdasarkan metode *metalografi* dengan perkiraan *kuantitatif* dan perkiraan *kualitatif* adalah
 - a.) Perkiraan *kuantitatif*
 - Persamaan *Shammas* (1988) metode pertama sebesar 247,4226 jam.
 - Persamaan *Shammas* (1988) metode kedua sebesar 1120jam.
 - b.) Perkiraan *kualitatif*
 - Analisa dengan *Kurva Neubaur dan Wedel* (1983) *tube* ini berada di kelas C dengan keterangan harus diperbaiki atau diganti dengan *tube* yang baru setelah enam bulan beroperasi.
 - Gambar struktur mikro hasil perhitungan mendapatkan hasil perkiraan kerusakan 88% sedangkan perkiraan umur sisa 12%. Keterangan *inspeksi* ulang setelah sekitar 10.000 jam operasi.