

**SKRIPSI**

**ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO  
PADA MATERIAL *SUPERHEATER TUBE* GB5310 20G  
SETELAH MENGALAMI PEMBEBANAN *CREEP***

**Disusun dan diajukan oleh:**

**MUHAMMAD IRVIN ALIF HASAN  
D021 18 1501**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**

**ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA  
MATERIAL *SUPERHEATER TUBE* GB5310 20G SETELAH  
MENGALAMI PEMBEBANAN *CREEP***

Disusun dan diajukan oleh

**Muhammad Irvin Alif Hasan  
D021 18 1501**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing utama,



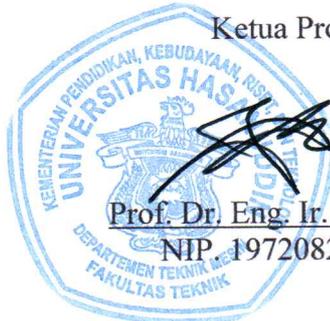
Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma ST., MT  
NIP. 19740415 199903 1 001

Pembimbing pendamping,



Dr. Hairul Arsyad ST., MT  
NIP. 19750322 200212 1 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., MT  
NIP. 19720825 200003 1 001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Muhammad Irvin Alif Hasan  
NIM : D021 18 1501  
Program Studi : Teknik Mesin  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA  
MATERIAL *SUPERHEATER TUBE* GB5310 20G SETELAH MENGALAMI  
PEMBEBANAN *CREEP*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa,

Yang Menyatakan



Muhammad Irvin Alif Hasan

## ABSTRAK

**MUHAMMAD IRVIN ALIF HASAN.** *Analisis Kekuatan Tarik Dan Mikrostruktur Pada Material Superheater Tube Gb5310 20g Setelah Mengalami Pembebanan Creep* (dibimbing oleh Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT)

*superheater* merupakan salah satu komponen terpenting di boiler. Keuntungan utama menggunakan *superheater* adalah mengurangi konsumsi bahan bakar. Namun pada pengaplikasiannya *superheater* rentan terhadap jenis kegagalan tertentu seperti kegagalan creep, distorsi, dan kegagalan mekanis yang disebabkan oleh lingkungan (Movahedi-Rad, 2015). Tujuan penelitian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang terjadi pada material *superheater tube* setelah mengalami creep pada kondisi primary, secondary dan tertiary creep. Pengujian ini meliputi pengujian creep, pengujian Tarik, pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro. Dari penelitian yang telah dilakukan terjadi penurunan kuat Tarik dan nilai kekerasan pada material namun nilai tersebut belum dapat mewakili tingkat kerusakan yang terjadi pada material karena pada setiap variasi dari pengujian *creep* tidak terdapat perbedaan nilai yang signifikan dari pengujian yang telah dilakukan, pengujian struktur mikro dapat mewakili tingkat kerusakan yang terjadi pada material karena terlihat jelas degradasi mikrostruktur yang dialami oleh material.

Kata Kunci : *superheater*, *creep* , pengujian Tarik, pengujian struktur mikro, pengujian kekerasan

## ABSTRACT

**MUHAMMAD IRVIN ALIF HASAN.** *Tensile Strength and Microstructural Analysis of Superheater Tube Gb5310 20g After Experiencing Creep Loading* (supervised by Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT dan Dr. Hairul Arsyad, ST., MT)

superheater is one of the most important components in the boiler. The main function of superheater is reduced fuel consumption. However, in its application the superheater is vulnerable to certain types of failures such as creep failure, distortion and mechanical failure caused by the environmental condition (Movahedi-Rad, 2015). The purpose of this study was conducted to determine the level of damage that occurs to the superheater tube material after experiencing creep in primary, secondary and tertiary creep conditions. This test includes creep test, tensile test, hardness testing and microstructure examination. From the research that has been done, tensile strength and hardness values decrease after creep test in three stage of creep , but these values cannot yet represent the level of damage that occurs to the material because in each variation of the creep test there is no significant difference in value from the tests that have been carried out, microstructure testing can represent the level of damage that occurs to the material due to the obvious microstructural degradation experienced by the material.

Key words: superheater, creep, tensile test, micro structure examination, hardness test

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK .....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN .....	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) .....	4
2.2 <i>Boiler</i> .....	6
2.2.1 Perbedaan Boiler Circulating Fluidize Bed (CFB) dan Boiler Pulverized Coal (PC) .....	7
2.3 <i>superheater</i> .....	7
2.3.1 Prinsip desain <i>superheater</i> .....	8
2.3.2 <i>superheater tube</i> .....	9
2.4 Kegagalan <i>creep</i> .....	9
2.4.1 Mekanisme Deformasi Creep .....	13
2.4.2 Karakteristik deformasi <i>creep</i> .....	14
2.4.3 Mekanisme patahan <i>creep</i> .....	17
2.4.4 Pencegahan <i>Creep</i> .....	17
2.5 Contoh Kasus Kerusakan Pada Pipa Bertekanan .....	19
2.6 Pengujian Mekanik.....	21
2.6.1 Pengujian <i>Creep</i> .....	21
2.6.2 Pengujian Tarik .....	22

2.6.3 Uji kekerasan .....	23
2.6.4 Pengamatan struktur mikro .....	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	29
3.1 Tempat dan Waktu .....	29
3.2 Alat dan Bahan .....	29
3.2.1 Alat yang digunakan .....	29
3.2.2 Bahan yang digunakan.....	29
3.3 Metode Penelitian.....	30
3.3.1 Jenis metode penelitian.....	30
3.4 Pelaksanaan Penelitian .....	30
3.4.1 Tahap Pembuatan spesimen .....	30
3.4.2 Tahapan Pengujian .....	31
3.4.3 Pengamatan struktur mikro.....	31
3.4.4 Pengujian microvickers .....	36
3.4.5 Pengujian <i>creep</i> .....	39
3.4.6 Pengujian Tarik .....	41
3.5 Diagram Alir.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Karakterisasi <i>Raw Material superheater</i> Tube GB5310 20G.....	44
4.1.1 Spesifikasi Material .....	45
4.1.2 Karakterisasi Kuat Tarik .....	46
4.1.3 Karakterisasi Kekerasan .....	47
4.1.4 Karakterisasi Struktur Mikro .....	47
4.1.5 Karakterisasi <i>Creep</i> Pada Material GB5310 20G.....	48
4.1.6 Hasil Pengujian <i>Creep</i> Material GB5310 20G .....	48
4.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian.....	52
4.2.1 Penentuan Elongasi.....	53
4.2.2 Hasil dan Pembahasan Pengujian <i>creep</i> .....	53
4.2.3 Pengamatan Struktur Mikro Setelah Spesimen Mengalami <i>Creep</i> .....	54
4.2.4 Pengujian Kekerasan Setelah Material Mengalami <i>Creep Displacement</i> 4 mm .....	63
4.2.5 Pengujian Tarik Setelah Spesimen Mengalami <i>Creep</i> .....	64
4.2.6 Mikro struktur setelah pengujian Tarik.....	65
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	70

5.1 Kesimpulan.....	70
5.2 Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA.....	72
LAMPIRAN.....	76
Lampiran A Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro dan Pengukuran Grain Rasio.....	76
Lampiran B Data Pengujian <i>Grain Ratio</i> .....	103
Lampiran C Data Pengukuran Besar Butir Rata-Rata.....	117
Lampiran D Data Pengujian Kekerasan.....	121
Lampiran E Dimensi Spesimen.....	122
Lampiran F Perhitungan Laju Creep.....	125
Lampiran G Data Curva Creep.....	126
Lampiran H Sertifikat Material.....	135
Lampiran I Data Pengukuran Void Dan Micro Crack.....	136
Lampiran J Dokumentasi Proses Pengambilan Data.....	137

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem Pada PLTU.....	4
Gambar 2 Fase <i>creep</i> .....	10
Gambar 3 Pengaruh Perubahan Temperatur Dan Tegangan .....	11
Gambar 4 Mekanisme terjadinya <i>creep</i> Berdasarkan Difusi dan Dislokasi.....	12
Gambar 5 Kekuatan <i>Creep</i> Dari Beberapa Jenis Baja .....	12
Gambar 6 Peta Mekanisme Deformasi Creep yang Telah Disederhanakan.....	13
Gambar 7 Poisson's ratio pada material .....	14
Gambar 8 Modulus elastisitas pada material <i>ferrous</i> berdasarkan temperature....	14
Gambar 9 kurva <i>creep</i> efek pengaplikasian tegangan pada suhu konstan .....	16
Gambar 10 mikrostruktur dan fraktografi kegagalan <i>creep</i> .....	17
Gambar 11 Hasil Pengamatan Visual .....	19
Gambar 12 Hasil Pengamatan Mikroskopik .....	20
Gambar 13 standar spesimen uji Tarik dengan penampang melingkar.....	22
Gambar 14 Alat Uji Kekerasan .....	25
Gambar 15 Tampak potongan melintang dari impact body leed hardness tester..	25
Gambar 16 Contoh Foto Struktur Mikro.....	26
Gambar 17 Mikroskop Optik Untuk Logam.....	27
Gambar 18 Ilustrasi Skema Insitu Metalografi .....	28
Gambar 19 Dimensi spesimen uji <i>creep</i> berdasarkan ASTM E 139.....	30
Gambar 20 Bentuk potong spesimen <i>creep</i> .....	30
Gambar 21 lokasi pengamatan struktur mikro .....	31
Gambar 22 contoh titik Lokasi pengamatan struktur mikro pada material setelah material mengalami kegagalan <i>creep</i> .....	32
Gambar 23 titik lokasi pengamatan mikrostruktur area patahan.....	32
Gambar 24 skema garis ukur pada pengukuran rasio butir struktur mikro, (B) contoh pengukuran rasio butir struktur mikro.....	34
Gambar 25 Contoh pengukuran besar butir rata-rata berdasarkan.....	35
Gambar 26 (A) suhu pengujian <i>creep</i> , (B) mesin pengujian <i>creep</i> .....	39
Gambar 27 Grafik dan nilai kuat Tarik material raw GB5310 20G.....	46
Gambar 28 Fasa struktur mikro pada material Raw.....	47
Gambar 29 curva <i>creep</i> material raw .....	49
Gambar 30 Grafik Laju Creep.....	50
Gambar 31 titik lokasi pengamatan mikrostruktur area patahan.....	51
Gambar 32 fasa pada bagian B-a material GB5310 20G setelah mengalami <i>creep</i> .....	52
Gambar 33 Penentuan elongasi pada ketiga spesimen uji .....	53
Gambar 34 Grafik perbandingan rasio butir pada bagian B setelah mengalami <i>creep</i> .....	55
Gambar 35 Hasil Insitu Metalografi Spesimen 6 mm setelah mengalami <i>creep</i> ..	56
Gambar 36 Grafik perbandingan insitu metalografi dengan metalografi langsung .....	56
Gambar 37 Grafik perbesaran ukuran butir .....	57

Gambar 38 void yang terbentuk (A), ukuran void pada butir lingkaran nomor 1 (B), ukuran void pada batas butir lingkaran nomor 2 (C), ukuran void pada batas butir lingkaran nomor 3.....	58
Gambar 39 Retakan pada spesimen 6 mm, Bagian atas sisi tebal (A), Bagian tengah sisi tebal (B), Bagian bawah sisi tebal (C), Bagian bawah sisi diameter luar (D) .....	60
Gambar 40 Retakan pada spesimen 8 mm, Bagian atas sisi tebal (A), Bagian tengah sisi tebal (B), Bagian bawah sisi tebal (C), Bagian bawah sisi diameter luar (D) .....	62
Gambar 41 grafik nilai kekerasan setelah mengalami <i>creep displacement</i> 4 mm - 8 mm .....	63
Gambar 42 Grafik nilai kekuatan kuat tarik spesimen setelah mengalami <i>creep</i> .	64
Gambar 43 Grafik perbandingan nilai rasio butir mikro struktur pada titik B-b ..	65
Gambar 44 Bentuk patahan spesimen 6 mm bagian A-1 (A), bagian A-2 (B), bagian A-3 (C) setelah pengujian Tarik.....	67
Gambar 45 Bentuk patahan spesimen 6 mm bagian B-1 (A), bagian B-2 (B), bagian B-3 (C) setelah pengujian Tarik.....	68

**DAFTAR TABEL**

Tabel 1 Perbedaan Antara Boiler (CFB) dan (PC) .....	7
Tabel 2 Hasil Uji Komposisi Kimia (Denhafi, 2017) .....	21
Tabel 3 Komposisi kimia material GB5310 20G .....	45
Tabel 4 Sifat mekanik material GB5310 20G .....	45
Tabel 5 Metalografi GB5310 20G .....	45
Tabel 6 nilai kekerasan spesimen raw .....	47
Tabel 7 rasio butir material raw .....	48
Tabel 8 nilai rasio mikro struktur material raw setelah mengalami <i>creep</i> .....	51
Tabel 9 nilai rasio pada spesimen setelah mengalami <i>creep</i> .....	54
Tabel 10 nilai kekerasan spesimen .....	63
Tabel 11 nilai rasio mikrostruktur setelah pengujian Tarik .....	65

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.1 Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro dan Pengukuran Grain Rasio spesimen raw .....	76
Lampiran A.2 Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro dan Pengukuran Grain Rasio Spesimen 4 mm .....	82
Lampiran A.3 Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro dan Pengukuran Grain Rasio Spesimen 6 mm .....	89
Lampiran A.4 Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro dan Pengukuran Grain Rasio Spesimen 8 mm .....	96
Lampiran B.1 Data Pengukuran Grain Ratio Spesimen Raw .....	103
Lampiran B.2 Data Pengukuran Grain Ratio Spesimen 4 mm .....	105
Lampiran B.3 Data Pengukuran Grain Ratio Spesimen 6 mm .....	109
Lampiran B.4 Data Pengukuran Grain Ratio Spesimen 8 mm .....	113
Lampiran C.1 Data perhitungan ASTM grain size Spesimen raw .....	117
Lampiran C.2 Data perhitungan ASTM grain size Spesimen 4 mm .....	118
Lampiran C.3 Data perhitungan ASTM grain size Spesimen 6 mm .....	119
Lampiran C.4 Data perhitungan ASTM grain size Spesimen 8 mm .....	120
Lampiran D.1 Data pengujian kekerasan Spesimen raw .....	121
Lampiran D.2 Data pengujian kekerasan Spesimen 4 mm .....	121
Lampiran D.3 Data pengujian kekerasan Spesimen 6 mm .....	121
Lampiran D. 4 Data pengujian kekerasan Spesimen 8 mm .....	121
Lampiran E.1 Dimensi spesimen 4 mm .....	122
Lampiran E.2 Dimensi spesimen 6 mm .....	123
Lampiran E. 3 Dimensi spesimen 8 mm .....	124
Lampiran F. 1 Perhitungan laju creep rupture .....	125
Lampiran G.1 Data curva creep rupture .....	126

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“ANALISIS KEKUATAN TARIK DAN STRUKTUR MIKRO PADA MATERIAL *SUPERHEATER TUBE* GB5310 20G SETELAH MENGALAMI PEMBEBANAN CREEP”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan tugas akhir ini, namun berkat bantuan dari berbagai pihak, maka tugas akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan ilmu, waktu, arahan dan bimbingan kepada penulis sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan.
2. Bapak Dr. Hairul Arsyad, ST., MT selaku dosen pembimbing kedua saya yang telah memberikan ilmu dan memberikan arahan dan bimbingan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin ST., MT, selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Ilyas Renreng, MT., atas dukungan dan perhatian kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
5. Bapak dan Ibu dosen serta Staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Bapak Miswar, ST., MT yang telah memberikan ilmu, saran dan masukan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Sahabat semasa kuliah dan sebagai Partner penelitian Afifi Agung Pranoto yang telah memberikan support dan Kerjasamanya selama penelitian ini berlangsung.
8. Sahabat semasa kuliah Andi Almudai Chumaratungga, ST., yang telah memberikkan support semasa perkuliahan berlangsung.

9. Seluruh teman-teman asisten Lab Metalurgi Fisik Gabriel Yuranta, Muh, Fatawy, Samhi, Rifki Adira, Fahrul, Brilliant, Rijal, Arif, Ai dan Ramadhan yang setia membantu dalam proses pengambilan data.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada :

1. Kedua orang tua yang tercinta ayahanda Mohammad Hasan Sahabuddin, SE dan ibunda Juanita Hasbullah, SE atas doa dan kasih sayangnya yang tidak terbatas serta telah membesarkan dan menyekolahkan penulis hingga ke jenjang perguruan tinggi dan memberikan Pelajaran hidup yang penting untuk kehidupan selanjutnya.
2. Keluarga besar Hasbullah Rauf dan Dan Sahabuddin Ambo'lau atas doa dan dukungannya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini. Terkhusus kepada nenek Hasbullah Rauf dan Nuraini Kadir yang telah setia dan tulus menemani penulis pada jenjang taman kanak-kanak hingga sekolah menengah pertama.
3. Adik Aura Ramadhani Hasan atas doa dan dukungan sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian ini.
4. Muflihah niddayani, ST., selaku rekan dan kekasih yang telah menemani dan memberikan warna yang indah semasa perkuliahan yang selalu ada disaat sulit maupun senang serta senangtiasa memberikan perhatian, dorongan dan doa sehingga penulis lebih semangat dalam menyelesaikan perkuliahan.

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang banyak digunakan di Indonesia. Pada prinsipnya PLTU memanfaatkan air untuk menghasilkan steam dan mengubah energi thermal yang dimiliki oleh uap (*steam*) menjadi energi listrik, *steam* bertekanan akan digunakan sebagai penggerak generator untuk menghasilkan listrik dengan media turbin untuk mengubah energi thermal menjadi energi mekanik. komponen utama dari sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari *boiler*, turbin, generator dan kondensor. Salah satu bagian terpenting dari sistem pembangkit listrik tenaga uap yaitu *boiler* (asmudi, 2007). *Boiler* merupakan alat yang menghasilkan uap panas bertekanan tinggi dari hasil proses pembakaran. Uap panas tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin sehingga terkonversi menjadi energi listrik (pamungkas, 2020).

*superheater* merupakan salah satu komponen terpenting di *boiler*. Keuntungan utama menggunakan *superheater* adalah mengurangi konsumsi bahan bakar. Namun pada pengaplikasiannya *superheater* rentan terhadap jenis kegagalan tertentu seperti kegagalan *creep*, distorsi, dan kegagalan mekanis yang disebabkan oleh lingkungan (Movahedi-Rad, 2015). *Creep* adalah deformasi permanen suatu material yang disebabkan oleh tegangan (*stress*) dan temperature tinggi melampaui batas desain. Berdasarkan presentase dari data yang dipublikasikan kegagalan *boiler* disebabkan oleh *creep* (*longterm overheating*) sebanyak 23,4%, suhu tinggi (*short term overheating*) sebanyak 8,8% (Rahman et al., 2010). Perubahan mikrostruktur pada baja *boiler* disebabkan oleh paparan suhu tinggi, Perubahan ini bahkan terjadi di bawah kondisi desain dengan umur operasi yang panjang. Pembentukan dipercepat ketika baja tubes dioperasikan di atas kondisi desain. Operasi di atas kondisi desain ini menyebabkan *overheating*, yang mengakibatkan kegagalan tubes melalui mekanisme kegagalan atau *overheating* jangka panjang (Saha & Roy, 2017).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gupta, G.K. and Chattopadhyaya, S. (2017) yang berjudul *Critical Failure Analysis of superheater Tubes of Coal-Based Boiler* bermaterial DIN 10CrMo910. Dalam penelitiannya dilakukan dengan melakukan pengamatan visual, mikrostruktur, pengujian kekerasan, komposisi kimia. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, terdapat penyebab kegagalan pada *superheater* yaitu penipisan dinding, *fish mouth cracking*, retakan *creep* pada permukaan tabung. Pada penelitian ini terdapat sampel yang telah terpapar suhu 540°C dengan tingkat tegangan 100 bar selama pengoperasian. Pengamatan visual menunjukkan bahwa terjadi *fish mouth cracking* pada satu sisi dan terdapat bagian yang menggelembung pada tube (*bulging*) pada daerah seberang las. Dari pengamatan struktur mikro terdapat *void* yang berada dekat dengan batas butir, hal tersebut merupakan indikasi dari deformasi *creep*, hilangnya angularitas pada butir yang berada pada dekat daerah yang mengalami kegagalan menunjukkan penipisan dinding setelah pengurangan awal ketebalan karena pengelupasan. Menurut Furtado HC dan May IL (2004) kerusakan struktur mikro mungkin merupakan aspek dominan dari pengurangan kekuatan mulur. Dengan demikian, evaluasi potensi kegagalan rangkai dan tingkat kerusakan rangkai perlu memperhitungkan perubahan struktur mikro. Ini dapat dilakukan secara langsung atau melalui pengukuran perubahan kekerasan, karena besaran ini memberikan indikasi ketahanan material terhadap deformasi.

Berdasarkan uraian diatas maka penulis bermaksud meneliti dengan judul **“Analisis Kekuatan Tarik dan Mikrostruktur pada material *superheater* tube GB5310 20G setelah mengalami pembebanan *creep*”**

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material *superheater tube* GB5310 20G setelah mengalami pembebanan *creep*.
2. Bagaimana perubahan struktur mikro pada material *superheater tube* GB5310 20G setelah mengalami pembebanan *creep*.

3. Bagaimana perbedaan antara insitu metalografi dan metalografi langsung ke material.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Dari perumusan masalah yang telah dikemukakan diatas, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisa perubahan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material *superheater tube* GB5310 20G setelah mengalami pembebanan *creep*.
2. Menganalisa degradasi struktur mikro pada material *superheater tube* GB5310 20G setelah mengalami *creep*
3. Mengetahui perbedaan antara hasil pengujian insitu metalografi dan hasil pengujian metalografi langsung langsung ke material.

### 1.4 Batasan Masalah

Adapun Batasan penelitian dalam penelitian ini adalah:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah *superheater tube* baru bermaterial baja karbon sedang dengan tipe GB5310 20G.
2. Pengujian material meliputi uji *creep* pada temperatur 550°C, uji kekerasan, pengamatan struktur mikro dan uji kuat tarik.

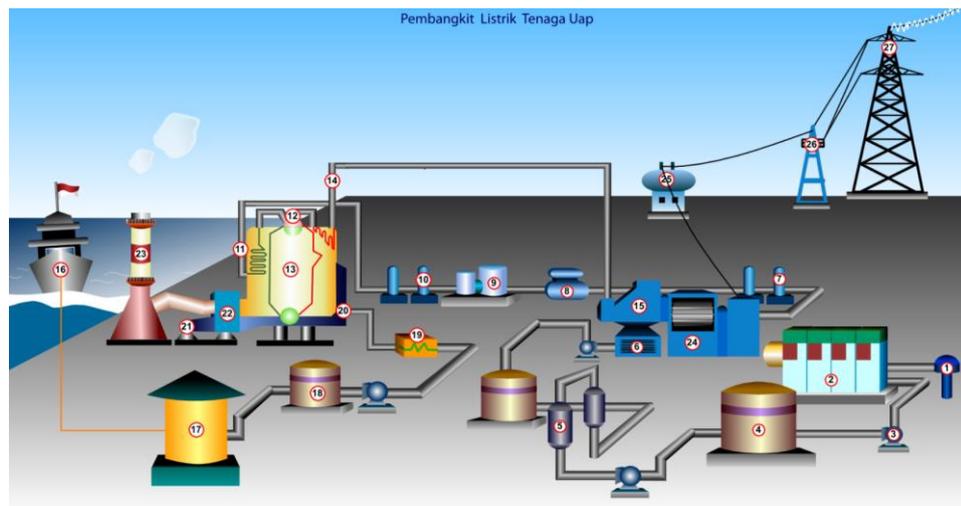
### 1.5 Manfaat Penelitian

Mengetahui perubahan struktur mikro, kekerasan dan kuat tarik *superheater tube* GB5310 20G setelah mengalami beban *creep*, sehingga dapat mengetahui perubahan struktur mikro, kekerasan dan kuat tarik setelah *superheater tube* mengalami *creep* dan dapat mengetahui hasil pengamatan struktur mikro antara insitu metalografi dengan pengamatan struktur mikro langsung pada material. Hasil ini akan menjadi referensi bagi *engineer* yang menangani *boiler* dan komponennya di industri pembangkit daya. Selain itu, diharapkan dapat memberikan manfaat bagi teman-teman mahasiswa dan juga masyarakat pada umumnya sebagai literatur atau bahan untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit listrik tenaga uap adalah pembangkit listrik yang menggunakan energi kinetik dari uap air untuk menghasilkan energi listrik. Pada prosesnya PLTU menggunakan siklus Rankine yang mengubah panas menjadi kerja. PLTU memiliki 3 siklus konversi energi dalam operasinya, yaitu konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas dalam bentuk uap bertemperatur dan bertekanan tinggi, konversi energi panas menjadi energi mekanik untuk memutar generator, konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Secara garis besar sistem pembangkit listrik tenaga uap terdiri dari beberapa peralatan utama diantaranya: *boiler*, turbin, generator, dan kondensor (Yuniarti, 2019).



Gambar 1 Sistem Pada PLTU

- |                                   |                            |
|-----------------------------------|----------------------------|
| 1. <i>Circulating water pump,</i> | 14. <i>superheater</i>     |
| 2. <i>Desalination evaporator</i> | 15. <i>Steam turbine</i>   |
| 3. <i>Destilate pump</i>          | 16. <i>Barge (kapal)</i>   |
| 4. <i>Make up water tank</i>      | 17. <i>Pumping house</i>   |
| 5. <i>Denim water tank</i>        | 18. <i>Fuel oil tank</i>   |
| 6. <i>Condenser</i>               | 19. <i>Fuel oil heater</i> |

7. <i>Low pressure heater</i>	20. <i>Burner</i>
8. <i>Daerator</i>	21. <i>Forced draught fan</i>
9. <i>Boiler feed pump</i>	22. <i>Air heater</i>
10. <i>High pressure heater</i>	23. <i>Smokestack</i>
11. <i>Economizer</i>	24. <i>Generator</i>
12. <i>Steam drum</i>	25. <i>Main transformer</i>
13. <i>Boiler</i>	26. <i>Switch yard</i>

Seperti yang telah di jelaskan di atas, PLTU melibatkan konversi panas pembakaran batu bara menjadi energi listrik, sistem kerjanya dapat dilihat sebagai berikut:

1. Batubara dihancurkan menjadi potongan kecil-kecil yang bertujuan untuk mempercepat pembakaran.
2. Pada pembangkit uap terdapat generator uap yang terdiri dari *boiler* untuk produksi uap dan komponen lainnya untuk proses pemanfaatan gas buang.
3. Hasil panas pembakaran batubara di *boiler* digunakan untuk mengubah air menjadi uap pada suhu dan tekanan tinggi. Dengan proses sebagai berikut:
  - a. *Preheater* udara adalah pemanas awal udara untuk meningkatkan suhu udara yang digunakan untuk pembakaran batubara. Kegunaan utama pemanasan awal udara adalah meningkatkan efisiensi termal dan meningkatkan kapasitas uap per meter persegi permukaan *boiler*.
  - b. Sebelum masuk ke *boiler* air dipanaskan oleh *economizer* yang memanfaatkan panas oleh hasil gas buang.
  - c. Uap yang dihasilkan oleh *boiler* melewati *superheater* untuk dikeringkan dan dipanaskan, kemudian uap super panas dilanjutkan ke turbi uap.
4. Uap kering dan bertekanan tinggi yang dihasilkan oleh *superheater* diarahkan ke turbin uap sehingga uap bertekanan memutar turbin dengan kecepatan tinggi. Lalu, energi potensial uap yang tersimpan diubah menjadi energi mekanik.
5. Turbin uap disambungkan dengan alternator yang mengubah energi mekanik turbin menjadi energi listrik. Sisa uap yang bertekanan rendah kemudian masuk ke dalam kondensor dan diubah menjadi air.

6. uap bertekanan rendah melalui proses kondensasi oleh kondensor berubah menjadi air kemudian digunakan sebagai air umpan masuk ke *boiler* untuk mengulangi siklus.

## **2.2 Boiler**

Boiler adalah alat penukar kalor yang merupakan suatu bejana tertutup berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. syarat utama boiler yaitu harus menyediakan uap sebanyak mungkin dengan tekanan dan suhu yang telah ditentukan tetapi dalam penggunaan bahan bakar yang serendah mungkin (praktikto, 2008). Umumnya terdapat 3 jenis boiler yang dipakai di Indonesia, yaitu:

1. Boiler jenis stocker merupakan boiler yang pembakarannya berada di atas rantai, menyerupai rantai tank yang berjalan (*Chain Grate/Travelling Grate Boiler*).
2. Boiler jenis pulverize, sering disebut PC (*Pulverized Coal*) boiler. Pada boiler jenis ini pembakaran dilakukan dengan menyemprotkan batu bara ke ruang bakar sehingga melayang dan terbakar di tengah ruang bakar.
3. Boiler jenis *Circulating Fluidized Bed* (CFB), boiler jenis ini dilengkapi dengan cyclon diantara ruang bakar dan outlet asapnya yang berfungsi untuk proses sirkulasi dengan memisahkan (separator) gas untuk dibuang melalui cerobong asap dan partikel yang tidak terbakar untuk dikembalikan ke ruang bakar.

Pembangkit listrik yang digunakan PT.PLN umumnya menggunakan boiler berjenis PC dan CFB sedangkan boiler berjenis stocker umumnya dipakai oleh industri berskala kecil.

### 2.2.1 Perbedaan Boiler Circulating Fluidize Bed (CFB) dan Boiler Pulverized Coal (PC)

Tabel dibawah ini menunjukkan perbandingan antara *Boiler Tipe Circulating Fluidize Bed (CFB)* dan *Boiler Pulverized Coal (PC)*.

Tabel 1 Perbedaan Antara Boiler (CFB) dan (PC)

No	<b>BOILER CFB</b>	<b>BOILER PC</b>
1	Temperatur pembakaran di tungku rendah ( $\pm 800$ °C), <i>low</i> NOx	Temperatur pembakaran di tungku tinggi ( $> 1000$ °C), <i>high</i> NOx
2	Kadar sulfur (Sox) yang rendah karena menggunakan <i>limestone</i>	Kadar sulfur (Sox) yang tinggi karena tidak menggunakan <i>limestone</i>
3	Ukuran batu bara yang masuk ke tungku ( $\pm 10$ mm)	Ukuran batubara yang masuk ke tungku dalam bentuk serbuk halus
4	Menggunakan batubara dengan nilai kalor yang rendah	Menggunakan batubara dengan nilai kalor yang tinggi
5	Menggunakan panel evaporator dan <i>superheater</i> didalam tungku	Tidak menggunakan panel evaporator dan <i>superheater</i> didalam tungku

### 2.3 *superheater*

*superheater* merupakan suatu komponen dalam *boiler* yang digunakan untuk memanaskan lanjut uap saturasi sampai dihasilkan uap yang benar– benar kering (marjidah dkk, 2016). Dalam *boiler* subkritis, *superheater* berada di antara *header* uap utama dan drum uap dan terdiri dari:

1. *Saturated tube* yang mengangkut uap dari drum ke *header inlet superheater* (bila tabung *superheater* tidak terhubung langsung ke *drum*).
2. *superheater banks* dengan *header inlet* dan *outlet* masing-masing.
3. *Attemperator* untuk STC
4. *Main-steam header* dengan semua *fitting* dan dibatasi dengan katup penghenti uap utama (MSSV)

Steam dari steam drum mengalir menuju *main-steam header*, dan tidak boleh ada katup di antara keduanya untuk memastikan aliran dalam tabung SH

dalam semua kondisi untuk mencegah *overheating* dan kegagalan (rayapolu, 2009)

### 2.3.1 Prinsip desain *superheater*

*superheater* adalah tabung yang mencapai suhu tertinggi dalam *boiler* dan sehingga memerlukan perhatian terbesar dalam desain, fabrikasi, dan O&M untuk memastikan bahwa suhu logam yang diizinkan tidak pernah terlampaui. Bagian akhir dari kedua SH dan RH harus ditempatkan pada suhu gas tertinggi untuk mengadopsi paduan suhu tinggi yang paling tepat untuk tabung dari pertimbangan Suhu logam, pengotoran karena senyawa abu, korosi karena garam dalam abu (rayapolu, 2009).

Tiga aspek terpenting dari desain SH dan RH adalah:

1. Distribusi uap dan gas yang seragam di semua bagian untuk meminimalkan ketidakseimbangan aliran.
2. Kecepatan uap tinggi secara optimal di semua tabung untuk menjaga suhu logam tetap
3. serendah mungkin.
4. Kehilangan tekanan uap minimum.

Penurunan tekanan *superheater* biasanya dibatasi hingga 8% dari tekanan *outlet* untuk mengurangi beban pemompaan.

Penurunan tekanan pemanas ulang biasanya  $<2$  bar dari pertimbangan efisiensi siklus. Hal tersebut persyaratan yang sulit, terutama jika volume spesifik steam *reheater* tiga sampai empat kali lebih tinggi daripada steam *superheater*. Sebuah bank reheater biasanya terletak tepat setelah bank *superheater* akhir dalam gas panas untuk membuatnya sekompak mungkin dan menampungnya dalam satu bank di antara satu set *header*.

### 2.3.2 *superheater tube*

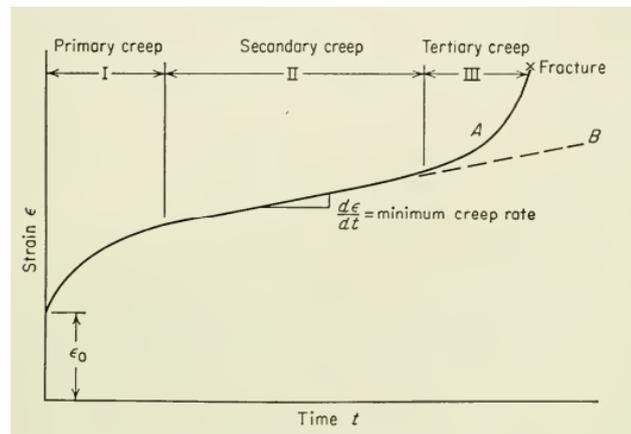
Banyak hal yang perlu diperhatikan dalam konstruksi *superheater*, dalam hal diameter, ketebalan, dan metalurgi

1. *Plain tube* yang biasanya digunakan berukuran 38,1, 44,5, 50,8, dan 63,5 mm ( $1\frac{1}{2}$ ,  $1\frac{3}{4}$ , 2, dan  $2\frac{1}{2}$  inci), dengan penggunaan yang lebih jarang sebesar 31,8 dan 70 mm ( $1\frac{1}{4}$  dan  $2\frac{3}{4}$  inci) OD.
2. Ukuran yang lebih besar lebih banyak digunakan di *boiler* utilitas di mana aliran uap tinggi.
3. Semakin kecil diameter, semakin besar laju perpindahan panas tetapi semakin lemah tabung secara mekanis.
4. Umumnya, tabung 50,8 dan 63,5 mm banyak digunakan untuk aplikasi SH pada *power boiler* dan tabung 38,1, 44,5, dan 50,8 mm pada *boiler* industri.
5. Ketebalan tabung minimum dari pertimbangan tekuk adalah 3,25 mm. Untuk aplikasi pembakaran batubara, pada umumnya menggunakan minimal 3,66 mm dengan mengenali potensi erosi. Untuk yang berada di dekat radius lengkungan, diperlukan ketebalan yang lebih tinggi tergantung pada proses pembuatannya. Untuk tekanan dan suhu yang lebih tinggi, ketebalan tabung yang dibutuhkan jauh lebih tinggi.
6. Untuk tabung bersirip yang digunakan di *heat recovery steam generator* (HRSG), ketebalan tabung minimum lebih rendah pada 2,65/2,9 mm) tergantung pada kode konstruksi. Ketebalan tabung yang lebih rendah diperbolehkan karena sirip membantu menambah kekuatan tabung. Juga karena HRSG tidak mengalami erosi atau korosi.

### 2.4 Kegagalan *creep*

Salah satu faktor penting dalam menentukan integritas komponen dalam suatu sistem pada aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku *creep*. Pada proses termal, suatu material yang mengalami deformasi secara lambat dan kontinu dalam fungsi waktu dengan beban atau tegangan konstan hingga patah, maka perilaku tersebut dinamakan *creep*. Pengaruh temperatur pada material logam didasarkan pada  $T_m$ , yaitu temperatur lebur absolut, dimana ketika diekspos pada rentang  $0,35-0,6 T_m$  tersebut atau di atasnya, maka proses *creep* akan terjadi.

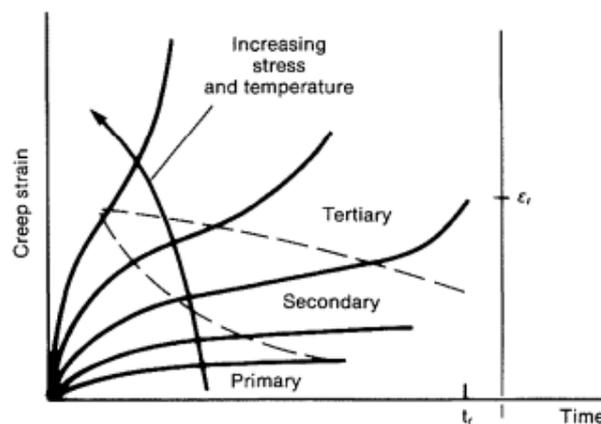
Sehingga, material yang dioperasikan dalam jangka waktu yang lama dan mendekati temperatur leburnya cenderung mengalami *creep*. Akibat deformasi tersebut, suatu material dapat mengalami perubahan bentuk ataupun perpatahan yang tidak diinginkan. *Creep* dapat terjadi pada suatu cacat/retak yang telah ada, dan dengan adanya konsentrasi tegangan mempercepat perambatan retak yang akan menyebabkan kegagalan (Viswanathan, 1989). Perilaku *creep* suatu material dapat diketahui melalui pengujian terhadap suatu spesimen yang diberikan pembebanan atau tegangan konstan yang menghasilkan besaran regangan dalam fungsi waktu. Bentuk kurva yang dihasilkan memiliki karakteristik seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Kurva *creep* terdiri dari fase-fase yang menunjukkan perilaku material pada kondisi temperatur tinggi, yaitu:



Gambar 2 Fase *creep*

1. Tahap pertama, yang dikenal sebagai *primary creep*, pada tahap ini terjadi penurunan laju *creep*. *primary creep* adalah periode mulur transien di mana ketahanan mulur material meningkat karena deformasinya sendiri.
2. Tahap kedua, dikenal juga sebagai *secondary creep*, merupakan periode laju *creep* yang hampir konstan yang dihasilkan dari keseimbangan antara proses pengerasan yang disebabkan oleh regangan (*strain hardening*) dan pemulihan (*recovery*). *secondary creep* biasanya disebut sebagai kondisi *steady state*. Nilai rata-rata laju *creep* sekunder disebut laju *creep* minimum.
3. Tahap ketiga, yang dikenal sebagai *tertiary creep*, laju *creep* berakselerasi sampai material putus (*rupture*).

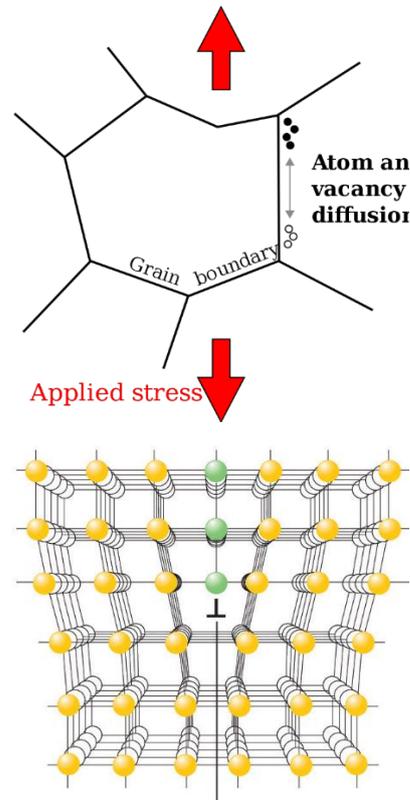
Pada prinsipnya semakin tinggi kekuatan *creep* suatu material, maka semakin rendah keuletannya. Material yang ulet atau *ductile* memiliki daerah *secondary* yang lebih lebar pada kurva *creep*, dan waktu perpatahan lebih pendek. Sementara material getas atau *brittle* yang didefinisikan dengan kekuatan *creep* tinggi, laju *creep* pada daerah *secondary* yang lebih sempit, dan perpatahan yang terjadi seketika dengan keuletan rendah. Gambar 2 memperlihatkan bentuk kurva *creep* yang dipengaruhi jenis material, temperatur dan tegangan.



Gambar 3 Pengaruh Perubahan Temperatur Dan Tegangan

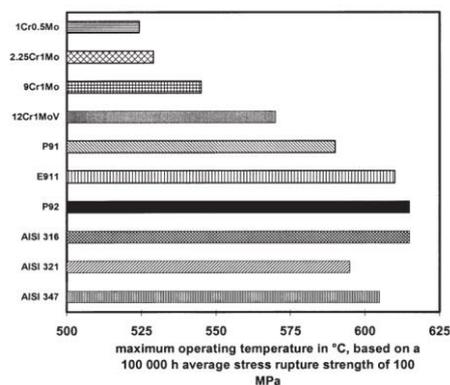
Dari Gambar 3 juga diperlihatkan pengaruh perubahan temperatur dan tegangan. Kenaikan temperatur dan tegangan memperpendek fase primary dari kurva *creep*, serta menghilangkan fase *secondary*, yang berarti laju *creep* terus meningkat sejak awal hingga patah. Sebaliknya, penurunan temperatur dan tegangan menghasilkan kurva dengan semua fase yang ada, dan total elongasi yang terjadi menjadi lebih kecil.

Karakterisasi *creep* dapat didefinisikan sebagai mekanisme deformasi ataupun komponen regangan. Dalam mekanisme deformasi, proses *creep* yang terjadi pada logam merupakan hasil dari pergerakan dislokasi. Namun berbeda pada kondisi biasa, dimana pergerakan dislokasi tidak tergantung terhadap waktu dan akan terhambat dengan kehadiran partikel endapan ataupun lainnya. Pergerakan dislokasi pada *creep* tidak terhalang oleh adanya presipitat. Pada kondisi *steady state*, terjadi kesetimbangan antara *strain hardening* dan *recovery* dimana interaksi dislokasi terjadi. Mekanisme terjadinya *creep* ditunjukkan dalam Gambar 4.



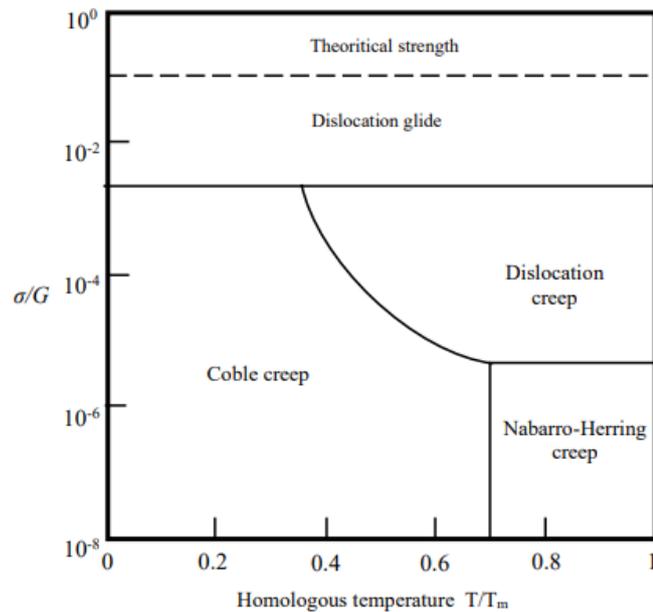
Gambar 4 Mekanisme terjadinya *creep* Berdasarkan Difusi dan Dislokasi

Perkembangan material dengan ketahanan *creep* umumnya dilihat pada efisiensi termal yang terjadi pada proses, dimana efisiensi tinggi dapat dicapai dengan menaikkan temperatur dan tekanan operasi, sehingga diperlukan material yang memiliki ketahanan *creep* pada temperatur yang lebih tinggi (Ennis, 2003). Pemakaian material dengan *grade* lebih tinggi dapat memiliki ketahanan *creep* yang lebih baik pada temperatur yang lebih tinggi. Dalam Gambar 5 ditunjukkan kekuatan *creep* (*rupture*) dari beberapa *grade* material baja terhadap temperatur.



Gambar 5 Kekuatan *Creep* Dari Beberapa Jenis Baja

### 2.4.1 Mekanisme Deformasi Creep



Gambar 6 Peta Mekanisme Deformasi Creep yang Telah Disederhanakan

Menurut G.E. dieter, (1986) dalam Miswar, (2022) terdapat 4 jenis deformasi creep, dimana mekanisme tersebut dipengaruhi oleh modulus geser/*shear modulus* ( $G$ ):

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (1)$$

dimana,

$E$  = modulus elastisitas

$\nu$  = *poisson's ratio*

#### 1. Dislokasi Meluncur (*dislocation glide*)

Mekanisme deformasi creep ini terjadi pada tegangan tinggi yang melibatkan dislokasi yang bergerak pada sepanjang bidang slip dan mengatasi hambatan dengan aktivasi termal. ditandai dengan  $\sigma/G > 10^{-2}$ .

#### 2. Dislokasi mulur (*dislocation creep*)

Pada mekanisme ini terjadi pergerakan dislokasi yang mengatasi hambatan dengan mekanisme yang dibantu secara termal yang melibatkan difusi kekosongan atau interstisial, ditandai dengan nilai  $10^{-4} < \sigma/G < 10^{-2}$ .

### 3. Difusi *creep* (*diffusion creep*)

Difusi *creep* termasuk dalam kategori *nebarro herring* dan *coble creep* mekanisme ini melibatkan aliran kekosongan dan interstisial melalui kristal dipengaruhi oleh tegangan yang diterapkan, dengan nilai  $\sigma/G < 10^{-4}$ .

### 4. Pergeseran batas butir (*grain boundary sliding*)

Mekanisme ini melibatkan pergeseran batas butir melewati satu sama lain.

Untuk nilai *poissons's ratio* dan modulus elastisitas yang ada pada persamaan 1 dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m <sup>3</sup>	Material	Poisson's Ratio	Density, kg/m <sup>3</sup>
<b>Ferrous Materials</b>			Cast high alloy steels	0.30	7830
Carbon steels	0.30	7750			
Cast irons	0.29	7200	<b>Nonferrous Materials</b>		
Low alloy steels			<b>Aluminum Base</b>		
C-Mo steels	0.30	7750	Alclad 3003	0.33	2730
1/2Cr to 1 1/4Cr steels	0.30	7750	Alclad 3004	0.33	2720
1 1/4Cr to 3Cr steels	0.30	7750	Alclad 6061	0.33	2700
5Cr to 9Cr steels	0.30	7750	A02040	0.33	2800
Mn, Mn-Mo, and Si steels	0.30	7750	A03560	0.33	2680
Ni steels	0.30	7750	A24430	0.33	2700
PH stainless: S15500, S17400, S17700	0.31	7750	A91060	0.33	2705
			A91100	0.33	2710
High alloy steels (200 series)	0.31	7810	A92014	0.33	2800
High alloy steels (300 series)	0.31	8030	A92024	0.33	2780
High-Si stainless: S30600, S30601, S32615, and S38815	0.31	7600	A93003	0.33	2730
			A93004	0.33	2720
5-7% Mo stainless: S32050, S31254, S31266, S31277, and S32654	0.31	8100	A95052	0.33	2680
			A95083	0.33	2660
S32202	0.31	7770	A95086	0.33	2660
High alloy steels (400 series)	0.31	7750	A95154	0.33	2660
High alloy steels (duplex/austenitic-ferritic)	0.31	7800	A95254	0.33	2660
			A95454	0.33	2690
PH stainless: S66286	0.31	7920	A95456	0.33	2660
			A95652	0.33	2670

Gambar 7 Poisson's ratio pada material

Materials	Modulus of Elasticity E = Value Given $\times 10^3$ MPa, for Temperature, °C, of																
	-200	-125	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Carbon steels with C $\leq$ 0.30%	216	212	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162	151	137	...	...	...
Carbon steels with C > 0.30%	215	211	207	201	197	194	191	188	183	178	170	161	149	136	121	...	...
Ductile cast iron	...	...	169	161	155	151	147	142	138	134	...	...	...	...	...	...	...

Gambar 8 Modulus elastisitas pada material *ferrous* berdasarkan temperature

## 2.4.2 Karakteristik deformasi *creep*

Karakteristik *creep* tergantung pada beberapa faktor seperti waktu, suhu, tegangan, dan struktur mikro.

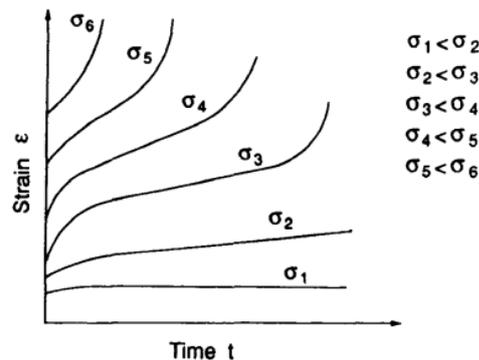
### 2.4.2.1 Waktu

Skala waktu selalu terlibat dalam uji *creep*. Sebagai perbandingan, untuk sebagian besar material teknik yang diuji pada suhu rendah, sifat tarik yang diukur relatif tidak tergantung pada waktu pengujian, terlepas dari apakah itu 5 menit atau 5 jam. Dengan kata lain, jika ketergantungan waktu diamati dalam uji tarik. Alasan utama untuk ketergantungan waktu dari *creep* adalah keterlibatan proses yang bergantung pada waktu yang diaktifkan secara termal. Uji *creep* dirancang untuk bertahan berjam-jam, berhari-hari, atau bahkan bertahun-tahun. Laju mulur keseluruhan selama deformasi mulur biasanya dikendalikan secara termal. Misalnya, jika proses pengontrolan adalah difusi, laju mulur disebut terkendali difusi (J.li dan dasgupta, 1993).

### 2.4.2.2 Suhu

Proses *creep* melibatkan mekanisme pada skala atom. Pada suhu tinggi, seiring dengan suhu mobilitas atom atau kekosongan meningkat dengan cepat sehingga atom dapat berdifusi melalui kisi bahan sepanjang arah gradien tegangan hidrostatik, yang disebut *self-diffusion*. *self-diffusion* atom atau kekosongan juga dapat membantu dislokasi (cacat kristal garis) (A. Dasgupta, 1992) naik (gerakan dislokasi menuju arah tegak lurus bidang slip). Pada suhu rendah, *creep* menjadi kurang dikendalikan difusi. Difusi dapat terjadi, tetapi terbatas di daerah berpori, seperti difusi batas butir. Temperatur sangatlah berpengaruh pada *creep* dikarenakan setiap material memiliki ketahanan akan suhu tinggi yang berbeda beda. Untuk mengimbangi perbedaan ini, suhu sering dinyatakan dalam skala homolog, yaitu rasio suhu uji ( $T$ ) dengan suhu leleh ( $T_m$ ) (J.li dan Dasgupta, 1993).

### 2.4.2.3 Tegangan



Gambar 9 kurva *creep* efek pengaplikasian tegangan pada suhu konstan

Laju mulur (*creep rate*) juga sangat berpengaruh terhadap seberapa besarnya tegangan yang diterapkan. Gambar 9 secara skematis menunjukkan bagaimana tingkat tegangan yang diterapkan mempengaruhi laju mulur pada suhu konstan (G.E. Dieter, 1986). Dengan peningkatan tegangan yang diterapkan, tahap primer dan sekunder semakin singkat atau bahkan dihilangkan dan tahap tersier mendominasi dalam proses *creep*. Pengukuran sifat mulur diklasifikasikan ke dalam uji mulur (*creep test*) dan uji pecah mulur (*creep rupture test*) menurut tingkat tegangan (J. Li dan Dasgupta, 1993).

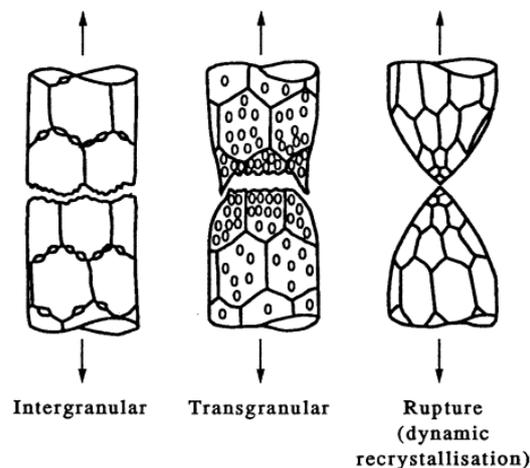
1. Uji *creep* dilakukan pada tegangan rendah untuk menghindari *creep* tersier. Tujuan dari uji mulur sebagian besar untuk menentukan laju mulur kondisi *steady state*. Regangan total seringkali kurang dari 0,5%.
2. Uji *creep rupture* pengujian ini hampir sama dengan pengujian *creep* yang membedakan adalah pada pengujian *creep rupture* beban yang diaplikasikan tinggi untuk mencapai kegagalan. *creep rupture* sebagian besar digunakan untuk mendapatkan waktu-kegagalan pada tegangan tertentu dan suhu tertentu. Ketegangan total bisa mencapai 50%.

### 2.4.2.4 Mikrostruktur

Sifat *creep* material secara intrinsik ditentukan oleh struktur mikro material. Ukuran butir mempengaruhi laju mulur di ketiga tahap mulur. Pengendapan dan partikel pengotor memulai rongga *creep*. Efek mikrostruktur ini dapat ditumpangkan dan dapat mempengaruhi sifat mulur bahan dalam berbagai cara yang kompleks (J. Li dan Dasgupta, 1993)

### 2.4.3 Mekanisme patahan *creep*

Patahan dari material sering kali dapat memberikan informasi tentang kondisi di mana kegagalan terjadi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 100, terdapat tiga mekanisme dasar kegagalan *creep*. Pada tegangan rendah mekanisme yang paling mungkin adalah patahan rangkai intergranular. Dalam mekanisme ini, retakan pada batas butir disebabkan oleh tegangan tarik yang diterapkan. Cacat tumbuh dan akhirnya ligamen yang tersisa gagal. Deformasi terkonsentrasi pada batas butir beserta daktilitas dan pengurangan area putus biasanya kecil. Pada tegangan tinggi, kegagalan biasanya terjadi oleh patahan rangkai transgranular. Void tumbuh pada butir. Kegagalan terjadi oleh koalesensi microvoid dengan cara yang mirip dengan kegagalan *ductile* pada suhu normal daktilitas tarik dan pengurangan area putus biasanya cukup besar (jones, 2004)



Gambar 10 mikrostruktur dan fraktografi kegagalan *creep*

### 2.4.4 Pencegahan *Creep*

*Creep* disebabkan oleh priode operasi pada suhu logam di atas batas yang telah ditentukan dapat dicegah dengan meningkatkan material tabung. Bahan tabung dapat diganti dengan baja feritik dengan kandungan krom yang lebih tinggi atau baja tahan karat austenitik. Dengan melakukan perkiraan sisa umur baja merupakan Langkah yang baik untuk mencegah terjadinya kerusakan pada material. Menjaga tekanan tabung di dalam batas kemampuan material merupakan salahsatu cara untuk mencegah *creep*, selain itu panas dan tekanan

berlebih pada material merupakan penyebab terjadinya *creep*, penyebab spesifik dari kegagalan *creep* yaitu *overheating* dan *over stressing*. *Overheating* adalah pemanasan dengan temperatur sangat tinggi, mencapai ratusan derajat diatas suhu normalnya sehingga memicu terjadinya deformasi atau peluluhan (*yielding*). *Overheating* biasanya disebabkan oleh terhambatnya aliran internal dan kurangnya perpindahan panas sehingga dengan menghilangkan kerak dan kotoran yang telah terakumulasi di dalam tabung dapat mencegah dari *overheating*,

Berdasarkan waktu terjadinya *overheating* dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. *Long term overheating*

*Long term overheating* adalah dimana suhu suatu logam melebihi batas desain dalam waktu yang lama. Karena baja kehilangan banyak kekuatan pada suhu tinggi long term *overheating* ini lebih sering menyebabkan kegagalan pada suatu material. Tekanan internal meningkat disertai dengan suhu tinggi melebihi batas desain menyebabkan material pecah. *Creep* dan penambahan diameter Pada baja feritik dapat terjadi walaupun tidak terjadi pengurangan ketebalan dari dinding. Penyebab dari *long term overheating* ini yaitu adanya termal yang buruk pada dinding *tube* sehingga terbentuk *scale* dan retak menyerupai kulit pohon, serta terjadi pengembangan pada *tube* akibat ekspansi termal dan tekanan.

2. *Short term overheating*

*Short term overheating* adalah dimana suhu suatu logam melebihi batas desain dalam waktu yang singkat. Pada keadaan normal suhu logam diantara biasanya 850°C dan sering sekali melebihi 1350°C. Tergantung pada suhu saat kegagalan terjadi dalam waktu yang sangat singkat, hal ini disebabkan oleh aliran pendingin tidak cukup dan masuknya panas pada sisi yang berlebihan serta pada saat *boiler start up* ketika suhu dari *tube* sangat tinggi dan kurangnya air pendingin uap sehingga menyebabkan kegagalan pada *tube*. Kegagalan yang terjadi akibat *short term overheating* ini merupakan kegagalan yang bersifat ulet, dimana yang paling sering terjadi adalah kegagalan dengan bentuk mulut ikan (*fish mouth rupture*) yang terjadi pada bagian *tube* yang mengalami penipisan dindingnya.

### 3. *Over stressing*

*Over stressing* merupakan dimana keadaan suatu material diberi tegangan berlebih diluar batas kemampuannya. *Overstressing* dapat dicegah dengan mengontrol ketebalan material dengan menggunakan metode ultrasonic dan dengan disertai perkiraan usia pakai. Banyak negara telah berhasil menggunakan metode tersebut, dengan mengetahui ketebalan material maka dapat ditentukan tebal kritis dari material tersebut (Viswanathan, 1989)

## 2.5 Contoh Kasus Kerusakan Pada Pipa Bertekanan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Dehnavi,F,dkk tahun 2017. Tentang studi kasus kegagalan *superheater tube* pada industri pembangkit listrik tenaga uap. Analisa dilakukan pada tabung *superheater* yang bermaterial DIN 16crMo4, terjadi kegagalan material karena mengembang dan pecah setelah beroperasi selama tiga tahun. Analisa metalurgi mengungkapkan bahwa terdapat degradasi mikrostruktur terutama dipermukaan external pada tabung yang berada pada sisi api. Kegagalan *premature* ini disebabkan oleh *overheating* jangka panjang.

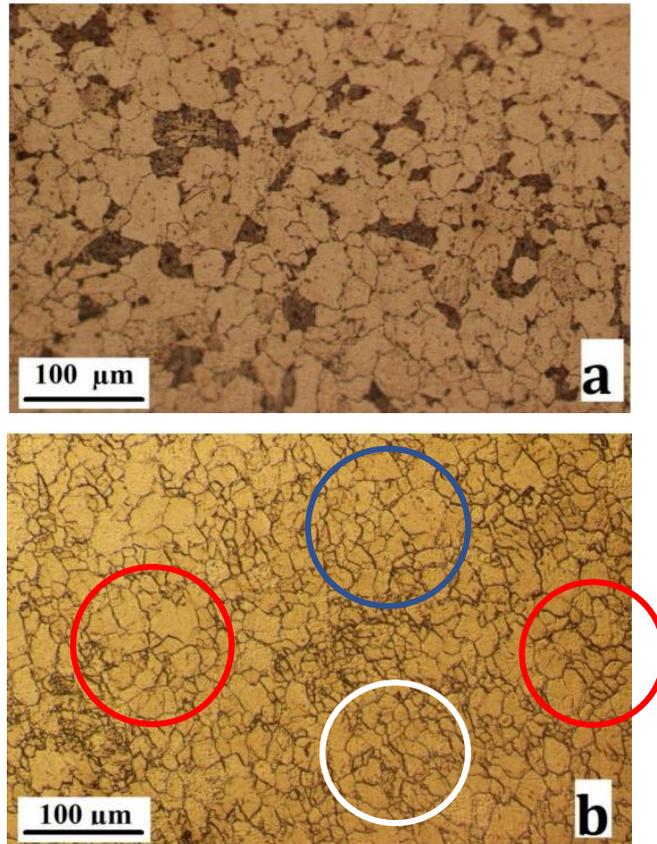
### 1. Hasil Pengamatan Visual

Dari hasil penelitian yang dilakukan terdapat penipisan yang cukup signifikan dan terdapat kebocoran pada *secondary superheater tube*. Terjadi pembengkokan pada pipa (*bending*) yang disebabkan oleh penipisan pada *tube* selain itu, hal tersebut dapat mengakibatkan patahnya *secondary superheater tube*.



Gambar 11 Hasil Pengamatan Visual

## 2. Hasil Pengamatan Mikroskopik



Gambar 12 Hasil Pengamatan Mikroskopik

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa gambar A merupakan struktur mikro dari tabung baru sedangkan gambar B merupakan struktur mikro dari tabung yang gagal. Dapat dilihat dari gambar A kumpulan ferit dan perlit sedangkan gambar B terdiri dari butiran feritik dan karbida. Dapat dilihat dari gambar di atas permukaan tabung yang rusak, lingkaran biru tidak terdapat partikel karbida pada permukaan luarnya, sedangkan pada lingkaran putih pada dinding luar dan dalam terbentuk karbida sferoid. Hal ini menunjukkan bahwa permukaan tabung yang rusak seharusnya terkena suhu yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan permukaan yang berlawanan. Lingkaran merah memiliki mikrostruktur yang mirip dengan lingkaran putih namun, jumlah dan ukuran karbida berbeda. Struktur mikro dari lingkaran biru menunjukkan rongga dan *microcracks* individu yang terbentuk melalui penggabungan void. Hal tersebut merupakan indikasi kegagalan *creep*. Selain

itu, penampang cacat dari tabung gagal menegaskan terjadinya kegagalan *creep*

### 3. Hasil Uji komposisi kimia

Tabel 2 Hasil Uji Komposisi Kimia (Denhafi, 2017)

Barang	Elemen(wt.%)										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Cu	P	S	Fe
Tabung baja	0,31	0,24	0,70	1,37	0,20	<0,11	0,20	<0,09	<0,035		Bal.
GB	0,3	0,17	0,4	1	0,2		0,1				Bal.
35CrMoV	-	-	-	-	-	<0,5	-	<0,3	<0,035	<0,035	
	0,38	0,37	0,7	1,3	0,3		0,2				

Sumber : Denhafi (2017)

Hasil analisis komposisi kimia bahwa skala pada kedua sisi didominasi oleh besi oksida dengan beberapa pengayaan unsur kromium dan molibdenum. Berdasarkan rasio Fe terhadap O, terdiri dari skala bagian dalam dari magnetit ( $Fe_3O_4$ ). Daerah bagian dalam dari timbangan memiliki kandungan Cr dan Mo yang lebih tinggi daripada logam dasar yang berdekatan dengannya. Hal ini membuat lebih banyak perlindungan dengan skala lapisan dalam dibandingkan dengan lapisan luar di mana kromium lebih rendah. Sejumlah besar belerang diidentifikasi di permukaan luar tabung dalam skala oksida. Belerang harus berasal dari bahan bakar yang digunakan dalam *boiler*, dan dapat menyebabkan oksidasi yang dipercepat.

## 2.6 Pengujian Mekanik

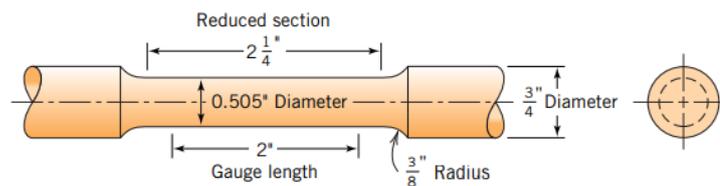
### 2.6.1 Pengujian *Creep*

Berdasarkan pengertiannya *creep*/mulur merupakan deformasi suatu material secara lambat dan kontinu dalam fungsi waktu dengan beban atau tegangan konstan, pengujian *creep* yaitu pengujian dengan memberikan beban dan temperatur konstan dalam jangka waktu tertentu. Pengujian *creep* sampai putus disebut juga dengan *creep-rupture test*, dimaksudkan untuk mengetahui

ketahanan logam terhadap beban dan/atau suhu tinggi yang konstan dengan cara mengetahui sifat mulur logam serta mengetahui mekanisme yang terjadi pada saat logam putus, juga terdapat pengujian *creep* tidak sampai putus yaitu *creep-stress test*. Pengujian *creep* dilakukan dengan mengacu pada ASTM E139 dengan preparasi spesimen uji mengacu pada ASTM E8/E8M-21 (*ASTM International Committee, 2021*)

## 2.6.2 Pengujian Tarik

Uji tarik dapat digunakan untuk memastikan beberapa sifat mekanik bahan yang penting dalam desain. Spesimen dideformasi, biasanya hingga patah, dengan beban tarik yang meningkat secara bertahap yang diterapkan secara uniaksial sepanjang sumbu panjang spesimen. Spesimen tarik standar ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13 standar spesimen uji Tarik dengan penampang melingkar

Biasanya, penampang berbentuk lingkaran, tetapi spesimen persegi panjang juga digunakan. Konfigurasi spesimen "tulang anjing" ini dipilih agar, selama pengujian, deformasi terbatas pada daerah tengah yang sempit (yang memiliki penampang seragam sepanjang panjangnya) dan juga untuk mengurangi kemungkinan patah pada ujung spesimen. Diameter standar kira-kira 12,8 mm (0,5 inci), sedangkan panjang bagian yang dikurangi harus setidaknya empat kali diameter ini; 60 mm (2 1/4 in.) adalah umum. Panjang pengukur digunakan dalam perhitungan daktilitas, seperti yang dibahas dalam Bagian 7.6; nilai standarnya adalah 50 mm (2,0 in.). Spesimen dipasang pada ujungnya ke dalam holding (Callister, 2020)

### 2.6.3 Uji kekerasan

Kekerasan adalah ukuran ketahanan bahan terhadap deformasi oleh indentasi permukaan. Standar yang umum untuk indenter adalah Brinnel, Vickers, dan Rockwell. Pada kondisi tertentu umumnya dilakukan pengujian kekerasan leeb (*leeb hardness testing*).

#### 2.6.3.1 Pengujian kekerasan brinnel

Uji kekerasan brinnel menggunakan bola baja yang dikeraskan dan ditekankan pada permukaan selama 10-15 detik dengan standar gaya. Setelah beban dan bola baja diangkat, diameter indentation diukur. Brinnel *Hardness Number* (HB) diperoleh dengan membagi gaya yang diberikan pada permukaan (P) dengan luas permukaan lengkung bekas injakan (A).

$$HB = \frac{P}{A} (kg/mm^2) \quad (2)$$

dimana untuk mencari nilai A sebagai berikut:

$$A = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 + d^2}) kg/mm^2 \quad (3)$$

jadi, untuk mencari nilai HB sebagai berikut:

$$HB = \frac{2p}{\pi D (\sqrt{D^2 + d^2})} \quad (4)$$

Dengan : P = gaya yang diberikan

D = diameter indenter

d = diameter indentasi

#### 2.6.3.2 Pengujian kekerasan Vickers

Uji kekerasan Vickers menggunakan indenter intan (*diamond*) berbentuk piramida dengan sudut puncak 1360 dengan pemberian gaya pada permukaan selama 10-15 detik. Setelah beban dan bola diangkat, diagonal-diagonal bekas injakan diukur. Vickers *Hardness Number* (VHN) didapat dengan membagi gaya yang diberikan pada permukaan dengan permukaan bekas injakan.

$$HV = \frac{P}{A} (kg/mm^2) \quad (5)$$

dimana untuk mencari nilai A sebagai berikut:

$$A = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ} mm^2 \quad (6)$$

jadi, untuk mencari nilai HV sebagai berikut:

$$HV = 1,854 P/d^2 \quad (7)$$

### 2.6.3.3 Pengujian kekerasan Rockwell

Uji kekerasan Rockwell berbeda dengan uji keras Brinell maupun Vickers yang mengukur luas indentasi. Dalam pengujian Rockwell, mengukur kedalaman indentasinya yang langsung diidentifikasi dengan suatu skala yang telah dikalibrasi. Beban awal diberikan untuk menekan indenter kontak pada permukaan spesimen. Lebih lanjut diberikan gaya, sehingga indenter menekan masuk (penetrasi) ke permukaan spesimen. Perbedaan penetrasi kedalaman akhir dan kedalaman awal sebagai penetrasi akibat gaya tambahan (*additional load*).

$$HB = E - e \quad (8)$$

Dengan : E = konstanta yang ditentukan oleh bentuk indenter

e = kedalaman penetrasi permanen karena beban utama (F1)

diukur

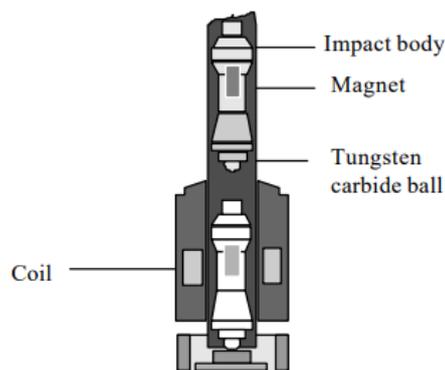


Gambar 14 Alat Uji Kekerasan

#### 2.6.3.4 Pengujian kekerasan leeb

Metode uji rebound yang ditemukan oleh Leeb beberapa tahun lalu telah berhasil dikembangkan menjadi metode uji kekerasan portabel yang layak yang sangat berguna untuk bahan cor dan tempa baja. Standar yang mencakup metode pengujian ini diterbitkan oleh ASTM A956/A956M – 17a (Frank, 1986)

Pengujian kekerasan menggunakan metode Leeb sedikit berbeda dibandingkan dengan metode pengujian standar seperti Vickers, Rockwell atau Brinell. Kekerasan diukur secara tidak langsung melalui hilangnya energi dari apa yang disebut benda tumbukan (Leeb, 1986).



Gambar 15 Tampak potongan melintang dari impact body leeb hardness tester

Sebuah massa ditumbukkan ke permukaan benda uji kecepatan yang ditentukan, hal itu disebut energi kinetik. Tabrakan menciptakan deformasi plastis pada permukaan (indentasi) yang menyebabkan *impact body* kehilangan sebagian dari energi atau kecepatan aslinya, pada bahan yang lebih lembut indentasi yang terbentuk lebih besar dengan demikian energi yang tersisa

semakin kecil akibat penyerapan energi yang besar. Secara teknis, prinsip pengukuran ini diimplementasikan melalui benda tumbukan yang memiliki ujung tungsten karbida bulat dan yang didorong ke permukaan uji oleh gaya pegas. Kecepatan setelah dan sebelum tumbukan masing-masing diukur dalam mode non-kontak. Hal ini dilakukan oleh magnet permanen kecil di dalam tubuh tumbukan (gambar 15) yang menghasilkan tegangan induksi selama perjalanannya melalui kumparan, dengan tegangan ini sebanding dengan kecepatan.

## 2.6.4 Pengamatan struktur mikro

### 2.6.4.1 Metalografi

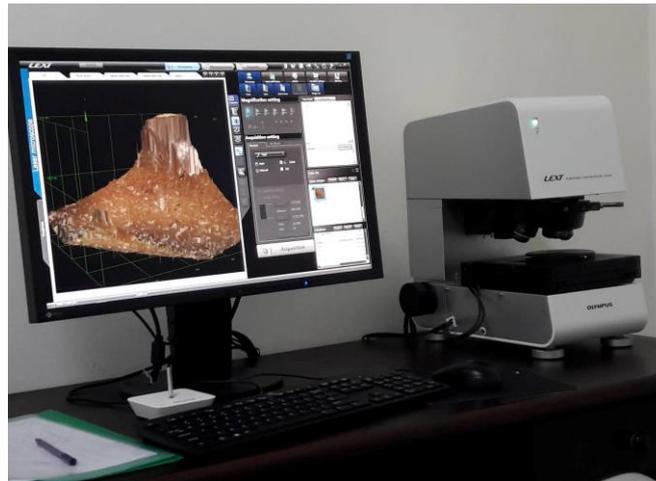
Metalografi adalah studi fisik dan komponen logam yang menggunakan mikroskop atau mengetahui perkiraan sifat-sifat fisik dengan mengenali ciri-ciri khusus dari struktur strukturnya ataupun sebagai karakteristik bahan. Contoh foto struktur mikro perlit besi cor kelabu sebagaimana pada gambar 16 berikut:



Gambar 16 Contoh Foto Struktur Mikro

Henry Clifton Sorby ilmuwan abad 19 merintis produksi besi dan baja modern di Sheffield (UK) menyatakan bahwa terdapat hubungan erat antara struktur mikro dan sifat makroskopik, dan menjelang akhir hayatnya mengatakan, “jika terjadi kecelakaan kereta api, maka perusahaan harus mengambil rel kereta api untuk diperiksa dengan mikroskop dan saya dianggap sebagai orang sehat yang dikirim ke rumah sakit jiwa, tetapi itu adalah apa yang sekarang sedang dilakukan”.

Pada pengamatan struktur mikro dapat dilihat gambaran struktur butiran dari suatu logam. Dengan syarat sebelum dilakukan pengujian, harus dilakukan preparasi yang benar agar dapat terlihat bentuk struktur mikro dari mikroskop dengan cara cahaya yang berasal dari mikroskop akan dipantulkan dan mengarah ke mata (Albaet Firdausi, 2013).

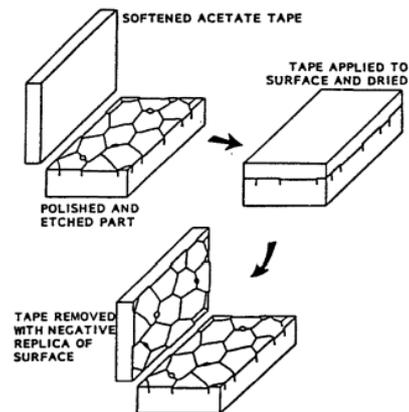


Gambar 17 Mikroskop Optik Untuk Logam

#### 2.6.4.2 Insitu metalografi

Insitu metalografi adalah suatu metode yang dilakukan untuk mendapatkan gambar mikrostruktur pada suatu komponen yang terlalu besar untuk dibawa ke dalam laboratorium metalografi. Komponen ini biasanya merupakan komponen-komponen yang masih sedang digunakan atau komponen yang tidak boleh mengalami kerusakan maupun perubahan bentuk. Proses insitu metalografi ini dilakukan langsung di tempat di mana komponen yang ingin diperiksa berada. Metode metalografi ini tidak memberikan banyak kerusakan berarti pada komponen uji.

Prinsip pelaksanaan dari insitu metalografi tidak jauh berbeda dengan pelaksanaan metalografi pada laboratorium. Hal yang membedakan insitu metalografi dengan metalografi pada laboratorium terletak pada penggunaan alat dan lokasi pelaksanaan. Alat-alat yang digunakan pada insitu metalografi bersifat portabel atau mudah untuk dibawa ke mana pun. Lokasi pelaksanaannya, seperti yang telah dijelaskan di atas, berada pada tempat di mana komponen yang akan diperiksa mikrostrukturnya tersebut berada.



Gambar 18 Ilustrasi Skema Insitu Metalografi

Selain itu, pada proses insitu metalografi akan dibuat sebuah replika permukaan pada akhir pemeriksaan. Pemeriksaan permukaan untuk insitu metalografi sebenarnya sudah cukup dilakukan hanya dengan menggunakan mikroskop portabel, namun hasil dari replika dapat dijadikan sebagai catatan permanen mengenai apa yang terjadi pada material komponen yang diuji. Hasil replika ini juga dapat dibawa ke laboratorium untuk digunakan sebagai penelitian tingkat lanjut mengenai apa yang terjadi pada permukaan material tersebut.

Prosedur insitu metalografi tidak berbeda dengan metalografi pada lab, namun sebelum memulai pemeriksaan perlu dilakukan identifikasi mengenai karakteristik pada material yang bersangkutan. Beberapa hal yang perlu diketahui diantaranya, yaitu kekerasan material, tipe dan komposisi paduan, kondisi permukaan, lingkungan sekitar material, akses menuju komponen, ukuran, bentuk komponen, lokasi, jumlah area yang akan diuji, vibrasi, dan lain sebagainya. Hal ini perlu dilakukan agar peralatan yang disiapkan dapat sesuai dengan kebutuhannya di lapangan dan agar dapat diketahui perlakuan uji apa yang cocok dengan karakter material yang akan diuji.

Aplikasi dari insitu metalografi ini banyak diterapkan pada *fossil-fuel power plant*, pembangkit listrik tenaga nuklir, industri manufaktur, industri baja, maupun pada industri-industri yang memiliki komponen-komponen logam berukuran besar dan membutuhkan pengecekan secara mikrostruktur untuk selanjutnya dilakukan perawatan (B.L. Bramfitt, 2004)