

SKRIPSI

**KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN, DAN
KEKUATAN TARIK PADA MATERIAL *SUPERHEATER*
GB5310 20G SETELAH MENGALAMI PEMANASAN LEBIH
(*OVERHEATING*)**

Disusun dan diajukan oleh:

**AFIFI AGUNG PRANOTO
D021 18 1504**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN, DAN
KEKUATAN TARIK PADA MATERIAL *SUPERHEATER*
GB5310 20G SETELAH MENGALAMI PEMANASAN LEBIH
(*OVERHEATING*)**

Disusun dan diajukan oleh

Afifi Agung Pranoto
D021 18 1504

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 18 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing utama,



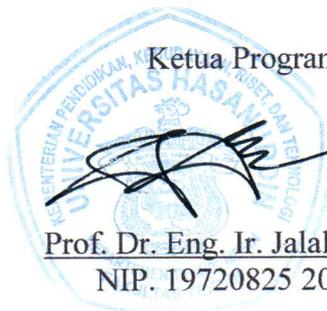
Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma ST., MT
NIP. 19740415 199903 1 001

Pembimbing pendamping,



Dr. Muhammad Syahid ST., MT
NIP. 19770707 200501 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 : Afifi Agung Pranoto

NIM : D021 18 1504

Program Studi : Teknik Mesin

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

KARAKTERISASI STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN, DAN KEKUATAN TARIK PADA MATERIAL *SUPERHEATER* GB5310 20G SETELAH MENGALAMI PEMANASAN LEBIH (*OVERHEATING*)

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, 18 Agustus 2023



Yang Menyatakan

Afifi Agung Pranoto

ABSTRAK

AFIFI AGUNG PRANOTO. *Karakterisasi Struktur Mikro, Kekerasan, Dan Kekuatan Tarik Pada Material Superheater GB5310 20G Setelah Mengalami Pemanasan Lebih (Overheating)* (dibimbing oleh Lukmanul Hakim Arma dan Muhammad Syahid)

Boiler merupakan komponen yang penting dalam sistem pembangkit yang berfungsi untuk menghasilkan uap panas hingga mencapai tekanan tertentu. *Boiler* tersusun dari beberapa komponen seperti cerobong, *superheater*, *steam drum* dan komponen lainnya. Salah satu komponen yang terpenting pada sistem *boiler* adalah *superheater* yang berfungsi untuk mengubah uap basah yang telah dihasilkan pada *boiler* menjadi uap kering. Adapun penyebab kegagalan yang sering terjadi pada pipa *superheater* disebabkan oleh *creep* akibat beroperasi dengan waktu yang cukup lama disertai dengan temperatur dan tekanan yang tinggi (*overheating*). Penyebab dari kegagalan fenomena *creep* adalah terjadinya degradasi mikrostruktur. Degradasi mikrostruktur mekanisme kerusakan yang menyebabkan kegagalan seperti *creep*, *fatigue* atau fraktur yang lebih cepat. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu studi literatur dan penelitian di laboratorium. Pengujian di laboratorium dilakukan untuk membandingkan hasil dari spesimen sebelum dan sesudah mengalami *overheating-creep*. Untuk hasil nilai pengujian mekanis yang dilakukan pada spesimen mengalami penurunan. Untuk pengujian kekerasan spesimen uji 4mm mengalami penurunan rata-rata sebanyak 30,02% , spesimen 6mm 24% dan spesimen 8mm 25,40%. Dari hasil pengujian tarik yang dilakukan mengalami penurunan nilai kuat tarik dari *Spesimen GB-20G*. Pada spesimen 4mm mengalami penurunan 35,38%, spesimen 6mm 35,21% dan untuk spesimen 8mm 49,88%. Untuk spesimen 4mm dan 6mm menghasilkan nilai kuat tarik yang saling berdekatan atau dapat dikatakan sama. Pada pengujian struktur mikro didapatkan perubahan ukuran butir pada spesimen dimana setelah pengujian mengalami pertambahan panjang dan fasa *ferrite* cenderung lebih nampak dari fasa *pearlite*. Untuk hasil pengukuran struktur mikro *after tensile* telah mendekati hasil pengukuran *creep reference* sehingga spesimen yang telah mengalami *overhaeting creep* terindikasi akan mengalami kegagalan atau *rupture*.

Kata kunci: *Boiler, Superheater, Overheating-creep, Kekerasan, Mikrostruktur, Kuat tarik.*

ABSTRACT

AFIFI AGUNG PRANOTO. *Micro Structure, Hardness And Tensile Strength Characterization Of Superheater Gb5310 20g Material After Overheating* (guided by Lukmanul Hakim Arma dan Muhammad Syahid)

Boiler is a critical component in the generator system that function to generate hot steam until it reaches a certain pressure. Boiler consist of several components such as chimney, superheater, steam drum, and other components. One of the most important parts in boiler system is superheater that function to change the wet steam that produced on boiler into a dry steam. As for the causes of frequent failures on superheater pipe are due to creep result for operating on a long time accompanied by high temperature and high pressure (overheating). The causes of creep phenomenon failure are microstructure degradation. Microstructure degradation are defect mechanism that causes failure such as creep, fatigue or fracture occur faster. Methods that are used in this research are literature study and research at laboratory. Test in laboratory is done to compare the results of the specimen before and after overheating-creep. For the result of the mechanic test the specimen value are decrease. For the hardness test on specimen 4mm had average decline as much 30,02%, specimen 6mm 24% and specimen 8mm 25,40%. The results of tensile test were having decrease on tensile value from specimen GB-20G. On specimen 4mm it had decrease 35,38%, specimen 6mm 35,21% and for specimen 8mm 49,88%. For specimens 4mm and 6mm it produces almost similar tensile value. On microstructure test the grain size are changing on specimen that has been tested and having the length increase and the ferrite phase are more likely to be seen than the pearlite phase. For the measurement of the micro structure after tensile approaching the result of the creep reference measurement until the specimen have experienced overheating creep indicated to experience failure or rupture.

Keywords: *Boiler, Superheater, Overheating-creep, Hardness, Microstructure, Tensile strength.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
KATA PENGANTAR	xii
Bab I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
Bab II TEORI DASAR	5
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap	5
2.2 <i>Boiler</i>	6
2.2.1 Superheater	7
2.3 <i>Creep</i>	10
2.3.1 Mekanisme Deformasi <i>Creep</i>	13
2.3.2 Pencegahan <i>Creep</i>	15
2.4 Contoh Kasus Kerusakan Pada pipa <i>Superheater</i>	17
2.5 Pengujian Mekanik	23
2.5.1 Uji <i>Creep</i>	23
2.5.2 Uji Kekerasan	24
2.5.3 Uji Struktur Mikro	25
2.5.4 Uji Tarik.....	28
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 Tahapan Penelitian.....	30
3.4.2 Tahapan Pengujian.....	30
3.5 Rencana dan Jadwal Penelitian.....	39
3.6 Diagram Alir.....	40
Bab IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Karakterisasi Material GB 5310 20G	42
4.1.1 Spesifikasi Material	42

4.1.2 Karakterisasi Kuat Tarik.....	43
4.1.3 Karakterisasi Kekerasan	43
4.1.4 Karakterisasi Mikrostruktur.....	44
4.1.5 Karakterisasi Spesimen <i>Creep</i> Spesimen GB-20G.....	45
4.2 Hasil pengujian mekanik pada spesimen.....	52
4.2.1 Pengujian Kekerasan	52
4.2.2 Pengamatan mikrostruktur setelah pengujian <i>creep</i>	54
4.2.3 Pengujian Tarik.....	60
4.2.4 Pengamatan struktur mikro setelah uji tarik	61
Bab V KESIMPULAN DAN SARAN.....	64
5.1 Kesimpulan.....	64
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem PLTU	5
Gambar 2 Skema <i>Boiler</i>	7
Gambar 3 Pipa <i>Superheater</i>	8
Gambar 4 Penggunaan material 20 G pada <i>boiler</i>	8
Gambar 5 Susunan berbagai unit superheater	9
Gambar 6 <i>Superheater Tube</i>	10
Gambar 7 <i>Superheater Tube</i>	11
Gambar 8 Peta Mekanisme deformasi yang disederhanakan (Dieter, 1988)	14
Gambar 9 Rasio <i>Poisson's</i> pada material	15
Gambar 10 Modulus elastisitas pada material <i>ferrous</i> berdasarkan temperatur ..	15
Gambar 11 Pengaruh kandungan elemen paduan terhadap penguatan <i>solid solution</i> pada baja.....	16
Gambar 12 Difusi dan diskolasi pada saat fenomena <i>creep</i>	17
Gambar 13 Bagian spesimen yang dilakukan pengujian metalografi	19
Gambar 14 Struktur mikro bagian 1 dengan perbesaran 500x.....	19
Gambar 15 Struktur mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x.....	20
Gambar 16 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x.....	20
Gambar 17 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x.....	20
Gambar 18 Daerah yang dilakukan uji SEM	22
Gambar 19 Hasil pengujian SEM pada bagian luar	22
Gambar 20 Hasil pengujian SEM bagian dalam	22
Gambar 21 Mesin Uji <i>Creep</i>	24
Gambar 22 Alat uji kekerasan metode <i>Vickers</i>	25
Gambar 23 Uji struktur mikro pada spesimen pipa <i>superheater</i>	26
Gambar 24 Mikroskop Optik	26
Gambar 25 Ilustrasi proses <i>In-situ metallography</i> pada material	27
Gambar 26 Mesin Uji Tarik	28
Gambar 27 Spesimen Uji Creep berdasarkan ASTM E8/E8M-21	30
Gambar 28 Titik pengamatan struktur mikro bagian A (sisi tebal/samping spesimen).....	31

Gambar 29 Titik pengamatan struktur mikro dan kekerasan bagian B (sisi permukaan spesimen).....	31
Gambar 30 Pengamatan struktur mikro pada spesimen.....	32
Gambar 31 Pengamatan struktur mikro pada spesimen.....	32
Gambar 32 Arah garis pengukuran degradasi mikrostruktur.....	34
Gambar 33 Hasil pengukuran degradasi mikrostruktur pada butir spesimen.....	34
Gambar 34 Grafik Uji Tarik Spesimen GB-20G.....	43
Gambar 35 Bagian Indentasi pada Spesimen.....	44
Gambar 36 Fasa struktur mikro pada Spesimen GB-20G.....	44
Gambar 37 Material <i>Superheater</i> GB 5310 20G.....	46
Gambar 38 Spesimen uji <i>Creep</i>	46
Gambar 39 Dimensi spesimen uji <i>Creep</i>	46
Gambar 40 Temperatur Uji <i>Creep</i>	47
Gambar 41 Kurva <i>creep</i> spesimen GB-20G setelah dilakukan pengujian <i>creep-rupture</i>	48
Gambar 42 Grafik Laju <i>Creep</i>	49
Gambar 43 Penentuan titik pertambahan panjang spesimen.....	51
Gambar 44 Hasil pengukuran rasio butir tiap spesimen bagian B2.....	54
Gambar 45 <i>In-situ Metallography</i> pada spesimen 8mm <i>after creep</i>	55
Gambar 46 Spesimen 6mm <i>after over-heating creep</i> , (A) bagian A-atas (sisi samping/tebal), (B) bagian A-tengah (sisi samping/tebal), (C) bagian A-bawah (sisi samping/tebal),(D) bagian B2 (sisi permukaan spesimen).....	57
Gambar 47 Spesimen 8mm <i>after over-heating creep</i> , (A) bagian A-atas (sisi samping/tebal), (B) bagian A-tengah (sisi samping/tebal), (C) bagian A-bawah (sisi samping/tebal), (D) bagian B (sisi permukaan spesimen).....	59
Gambar 48 Hasil pengujian tarik spesimen GB-20G dan spesimen <i>over-heating creep</i>	60
Gambar 49 Hasil struktur mikro spesimen 6mm <i>after tensile</i> (A) bagian A-1, (B) bagian A-2, (C) bagian A-3 (sisi samping/tebal), (D) bagian B-1 (sisi permukaan spesimen), (E) bagian B-2 (sisi permukaan spesimen) ...	63

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Hasil pengujian komposisi kimia.....	18
Tabel 2 Hasil perhitungan besar butir	21
Tabel 3 Hasil pengujian kekerasan	21
Tabel 4 Komposisi Kimia	42
Tabel 5 Data uji tarik dan kekerasan material GB5310 20G	42
Tabel 6 Metalografi GB5310 20G	42
Tabel 7 Data Uji Tarik <i>Spesimen GB-20G</i>	43
Tabel 8 Nilai Kekerasan Spesimen GB-20G	44
Tabel 9 <i>Grain size ratio</i> Spesimen GB-20G	45
Tabel 10 Nilai Laju <i>Creep</i>	49
Tabel 11 Nilai <i>grain size ratio</i> spesimen GB-20G <i>after creep</i>	50
Tabel 12 Nilai kekerasan spesimen.....	52
Tabel 13 Nilai degradasi mikrostruktur spesimen <i>after creep</i>	54
Tabel 14 Hasil <i>In-situ Metallography</i> pada spesimen.....	55
Tabel 15 Nilai rasio butir setelah pengujian tarik	61

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Luas permukaan lengkung bekas injakan
D	Diameter indenter
P	Gaya yang diberikan
HB	<i>Hardness brinell</i>
Hv	<i>Hardness vickers</i>
D	Diameter indentasi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Gambar Pengamatan Struktur Mikro Spesimen <i>RAW</i>	68
Lampiran B Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro Spesimen 4mm	74
Lampiran C Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro Spesimen 6mm	80
Lampiran D Titik Lokasi Pengamatan Struktur Mikro Spesimen 8mm	86
Lampiran E Hasil Pengamatan <i>In-situ Metallography</i> pada Spesimen	92
Lampiran F Proses preparasi spesimen	93
Lampiran G Inspeksi Sertifikat Material	97
Lampiran H Data Pengujian Kekerasan	98
Lampiran I Data Pengukuran <i>Grain Ratio</i>	99
Lampiran J Ukuran Dimensi Spesimen <i>Over-heating Creep</i>	113
Lampiran K Data Hasil Pengujian Spesimen <i>Creep-Rupture</i>	117
Lampiran L Data Laju <i>Creep</i>	131

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat ALLAH *Subhanahu wata'ala* atas segala limpahan rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam tidak lupa kami haturkan kepada baginda Nabi Muhammad *Sallallahu Alaihi Wasallam*. Nabi yang telah membawa islam dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh dengan cahaya ilmu pengetahuan yang terus berkembang hingga saat ini.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis tentu tak lepas dari pengarahan dan bimbingan dari berbagai pihak dan tidak lepas dari kendala. Sehingga penulis menjadikan sebagai bentuk pelajaran dan motivasi selama melaksanakan penelitian ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua tercinta Ayah Sunoko dan ibu tercinta Antini dan juga kepada saudara saya yang telah memberi nasehat, motivasi dan semangat untuk penulis dalam menyelesaikan skripsi ini
2. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim Arma, ST., MT selaku dosen pembimbing utama yang telah memberikan arahan, bimbingan kepada penulis sehingga penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan.
3. Bapak Dr. Muhammad Syahid, ST., MT selaku dosen pembimbing kedua saya yang telah membantu dan memberikan arahan kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Eng. Jalaluddin ST., MT, Selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Kanda Miswar, ST., MT dan kanda Muhammad Facheruddin BJ, ST., MT yang telah membantu dalam penyediaan material spesimen dan pembuatan skripsi ini.
6. Bapak dan Ibu dosen serta Staf Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman seperjuangan dalam penelitian ini Muhamamd Irvin Alif Hasan yang senantiasa membantu dan memberikan motivasi agar cepat menyelesaikan tugas akhir ini

8. Seluruh teman-teman asisten Lab Metalurgi Fisik Nadya Indriani Sazqia, Gabriel Yuranta, Muhammad Fatawy, Samhi, Rifki Adira, Fahrul Yakuza, Brilliant, Rijal, Arif, Ai Long dan Ramadhan Nert yang setia membantu dalam proses pengambilan data.
9. Seluruh penghuni Lab Metalurgi Fisik S2 dan Angkatan 19 yang selalu mendukung dan menghibur.
10. Sahabat REACTOR18, sebagai teman seperjuangan mulai dari mahasiswa baru sampai sekarang.
11. Sahabat RuJu Nanda, Rafli, Akram , Heril Uding, Aldi bolang dan Pawa yang senantiasa menghibur selama proses pembuatan skripsi.

Demikian, penulis ucapkan terima kasih dan semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca maupun bagi penulis

Gowa, 10 Agustus 2023

Penulis

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang menjadi kebutuhan primer bagi masyarakat maupun di dunia industri. Prinsip kerja dari PLTU adalah air dipompa masuk ke dalam *boiler*/ketel uap sehingga pada *boiler* air diubah menjadi uap. Kemudian uap yang telah bertekanan dan bertemperatur mengalir ke dalam turbin uap sehingga energi tersebut digunakan untuk memutar turbin. Batu bara salah satu bahan bakar yang sering digunakan untuk memanaskan air dalam *boiler* karena harga yang relatif lebih murah dibandingkan dengan bahan bakar minyak.

Boiler merupakan komponen yang penting dalam sistem pembangkit yang berfungsi untuk menghasilkan uap panas hingga mencapai tekanan tertentu. *Boiler* tersusun dari beberapa komponen seperti cerobong, *superheater*, *steam drum* dan komponen lainnya (Andi Abd. Rahman, 2019). Berdasarkan siklus kerjanya, *boiler* dibagi menjadi 2 klasifikasi yaitu *once-through boiler* dan *drum boiler*. Pada klasifikasi pertama, *once-through* (satu kali proses) adalah proses mengubah air menjadi uap panas secara menyeluruh, sehingga rentan terhadap kontaminan yang ikut dalam air. Kontaminan ini menyebabkan terjadinya korosi maupun *over-heating* karena memiliki sifat yang tidak mudah mengalami penguapan (*non-volatile*). Pada proses ini menggunakan tekanan hingga 24 MPa (3500 psi).

Untuk klasifikasi kedua *drum boiler* adalah proses sirkulasi untuk mengubah air menjadi uap panas yang sisanya akan dipisahkan ke dalam drum. Proses ini menggunakan tekanan hingga 16,6 MPa (2400 psi). Namun pada pengoperasian *boiler* rata-rata berkisar pada tekanan kritis 22,12 MPa (3208 psi). Dengan kondisi panas bertekanan tersebut dapat menghasilkan temperature operasi boiler hingga mencapai 1100 °F (593 °C) (Haris Efendi, 2008).

Salah satu komponen yang terpenting pada sistem *boiler* adalah *superheater* yang berfungsi untuk mengubah uap basah yang telah dihasilkan pada *boiler* menjadi uap kering untuk menghindari terjadinya korosi pada turbin yang diakibatkan kandungan didalam air yang berbahaya bagi logam (Vendy Antono

dkk,2018). Tabung *superheater* terletak pada bagian terpanas dari *boiler* yakni *steam generator*. Uap bertekanan tinggi dan temperatur tinggi masuk kedalam bagian tabung *superheater* yang akan terkena temperatur sangat tinggi dari hasil pembakaran batu bara.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jeremy Adrian (2016), tentang pipa *superheater tube boiler* mengalami kerusakan berupa pecah luar (*burst*) yang disebabkan penipisan pipa memiliki umur pemakaian selama 12,8 tahun. Pada pengujian spektrometer spesimen dari benda yang mengalami kegagalan adalah material yang mendekati material berkode ASTM A213 Grade T11 yaitu golongan baja karbon rendah sehingga memiliki keuletan yang tinggi, kekerasan yang rendah dan mudah untuk dilas namun memiliki sifat *machinability* yang cukup rendah.

Selain itu, pengamatan yang dilakukan pada spesimen dari pipa *superheater* yang pecah menunjukkan struktur mikro fasa ferit. Untuk pengujian metalografi dibagi menjadi 3 bagian yang merujuk pada lokasi terjadinya kerusakan pada *superheater*. Bagian 1 merupakan bagian dari pipa yang masih bagus memiliki nilai kekerasan sebesar 52 HRB. Bagian 2 terletak pada tepi pipa yang mengalami kerusakan memiliki nilai kekerasan sebesar 49 HRB. Bagian 3 merupakan tempat terjadinya kerusakan memiliki nilai kekerasan 25,5 HRB. Ini menunjukkan bahwa sifat mekanik dari pipa *superheater* yang mengalami kerusakan jauh dari spesifikasi material ASTM A213 Grade T11 yang memiliki nilai kekerasan 85 HRB. Dari hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* terjadi *void* dan *intergranular crack* pada permukaan maupun bagian luar dari material yang mengalami kerusakan. *Void* merupakan sebuah rongga kosong yang terdapat pada batas butir. Sedangkan *Intergranular crack* adalah *void* yang bergabung menjadi suatu muluran memanjang pada batas butir. *Intergranular crack* ini ditimbulkan karena adanya aliran panas yang fluktuatif yang menyebabkan benda mengalami *Thermal Fatigue*. *Thermal Fatigue* membuat benda mulur ketika terkena panas dan menyusut ketika panas tersebut hilang sehingga fenomena ini disebut dengan *creep*.

Menurut Furtado & Le May (2002) dalam penelitiannya, salah satu penyebab dari kegagalan fenomena *creep* adalah terjadinya degradasi mikrostruktur. Degradasi mikrostruktur mekanisme kerusakan yang menyebabkan kegagalan seperti *creep*, *fatigue* atau fraktur yang lebih cepat. Baja-baja yang mengandung

unsur kromium (Cr) dan molibdenum (Mo) cenderung gagal karena *creep* dalam waktu singkat (*short-term overheating*). Dalam beberapa kasus, pembentukan rongga muncul dan menjadi fenomena yang sangat lokal yang terjadi sangat dekat dengan waktu patahan. Dengan demikian, potensi kegagalan *creep* dan tingkat kerusakan yang diakibatkan *creep* perlu memperhitungkan perubahan struktur mikro yang terjadi.

Adapun penyebab kegagalan yang sering terjadi pada pipa *superheater* disebabkan oleh *creep* akibat beroperasi dengan waktu yang cukup lama disertai dengan temperatur dan tekanan yang tinggi (*overheating*) (Fahrizal, 2013). Menurut Muhammad Facheruddin (2023) dalam penelitiannya, *short term overheating* terjadi ketika suhu *tube* naik secara signifikan di atas batas desain (730°C) dalam waktu singkat. Ini menyebabkan kekuatan *tube* menurun. *Short term overheating* dapat terjadi selama *startup*, ketika aliran uap rendah pada *superheater* dan *reheater*. Adanya deposit pada pipa mengakibatkan diameter pipa akan menyempit sehingga kondisi ini menghambat laju aliran didalam pipa yang menyebabkan laju perpindahan panas terhambat sehingga terjadi kenaikan temperatur material pipa atau *overheating* pada pipa *boiler*.

Berdasarkan uraian diatas, maka penulis bermaksud meneliti dengan judul: **“Karakterisasi mikrostruktur, kekerasan, dan kekuatan tarik pada material *superheater* GB5310 20G setelah mengalami pemanasan lebih (*overheating*)”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang diatas, maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana *over-heating creep* mempengaruhi nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada pipa *superheater* sebelum dan sesudah pengujian *over-heating creep* pada temperatur 650°C.
2. Bagaimana pengaruh *over-heating creep* pada temperatur 650°C terhadap struktur mikro pipa *superheater*.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah diatas, maka tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisa perubahan nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada pipa *superheater* sebelum dan sesudah pengujian *over-heating creep* pada temperatur 650°C.
2. Menganalisa struktur mikro pipa *superheater over-heating creep* pada temperatur 650°C.

1.4 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini menjadi terarah, maka diberikan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Sampel yang digunakan adalah pipa *superheater* baru
2. Material pipa *superheater* yang digunakan tipe GB5310 20 G
3. Pengujian material meliputi uji *creep*, uji kekerasan, uji pengamatan struktur mikro dan uji tarik.
4. Pengamatan struktur mikro menggunakan metode *insitu* metalografi

1.5 Manfaat Penelitian

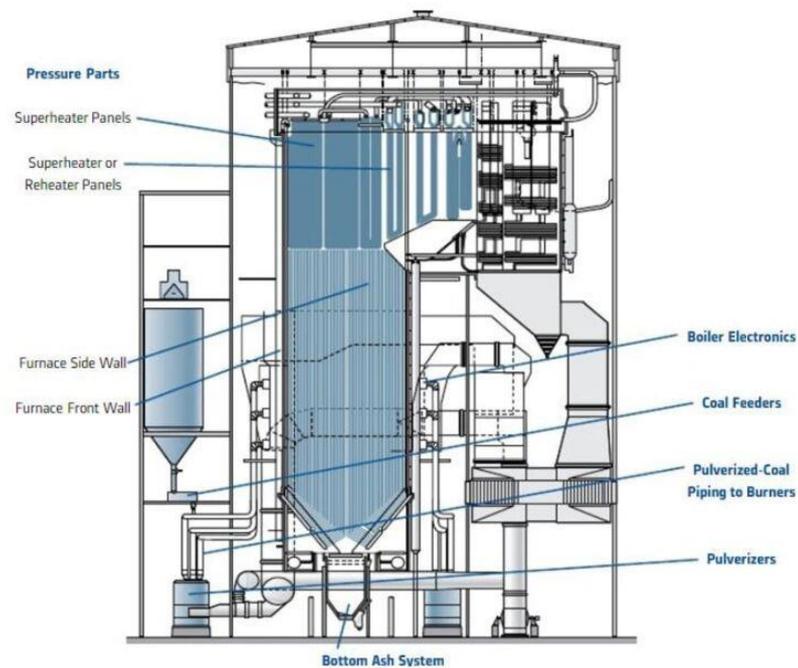
Mengetahui nilai kekerasan, perubahan struktur mikro dan kuat tarik pada pipa *superheater* yang mengalami *over-heating creep*. Selain itu, diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pembaca sebagai sumber literatur atau bahan penelitian selanjutnya dikemudian hari.

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 21. <i>Forced draught fan</i> | 25. <i>Main transformer</i> |
| 22. <i>Air heater</i> | 26. <i>Switch yard</i> |
| 23. <i>Smoke stack</i> | 27. <i>Transmission line</i> |
| 24. Generator | |

Prinsip kerja PLTU batubara adalah dimulai dengan air yang dipanaskan dalam *boiler*. Kemudian air tersebut dimasukkan kedalam *deaerator* yang berfungsi untuk menghilangkan oksigen yang terkandung dalam air. Selanjutnya air dipompa oleh *boiler feed water pump* dan masuk ke dalam *economizer*. Air dialirkan ke pipa untuk dipanaskan pada *tube boiler* sehingga air yang dipanaskan menghasilkan uap air. Kemudian, uap air dikumpulkan Kembali pada *steam drum*, dipanaskan lanjut pada *superheater* untuk menjadi uap kering bertekanan tinggi. Setelah itu uap digunakan untuk menggerakkan turbin. Hasil dari putaran poros turbin kemudian memutar poros generator yang dihubungkan dengan *coupling*. Dari putaran ini dihasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari generator kemudian disalurkan dan didistribusikan ke pelanggan. Uap bebas dari turbin selanjutnya dikondensasikan dari kondensor bersama air dari *make up water pump*, uap dipompa oleh pompa kondensat untuk masuk ke pemanas tekanan rendah, *deaerator*, *boiler feed water pump*, pemanas tekanan tinggi, *economizer* dan pada akhirnya menuju *boiler* untuk dipanaskan menjadi uap kembali. (Djiteng Marsudi, 2021)

2.2 Boiler

Boiler digunakan untuk mengubah air *feedwater* menjadi uap (*steam*) yang mengalir dengan jumlah massa yang berbeda. Air yang belum berubah fasa akan mengalir melalui pipa yang menuju ke bagian bawah *boiler* dan air yang telah menjadi butiran-butiran uap akan menuju ke *boiler* bagian atas. Uap yang telah dihasilkan didalam *boiler* akan difungsikan untuk memutar turbin. Uap yang digunakan sebagai pemutar turbin sebelumnya akan dipanaskan lanjut dengan menggunakan *superheater* yang berfungsi untuk mengubah uap basah hasil dari pembakaran *boiler* menjadi uap kering supaya turbin tidak mengalami kerusakan material seperti korosi yang disebabkan kandungan-kandungan yang terdapat didalam air yang berbahaya bagi logam. (Vendy Antono dkk, 2018)



Gambar 2 Skema Boiler

2.2.1 Superheater

2.2.1.1 Pengertian *Superheater*

Superheater merupakan alat penukar panas yang memanaskan uap jenuh sehingga suhu uap akan meningkat drastis dan menyebabkan efisiensi dari produksi energi dapat ditingkatkan (Jeremy Adrian, 2016).

2.2.1.2 Fungsi *Superheater*

Superheater adalah salah satu komponen pada *boiler* yang berfungsi untuk memanaskan lanjut uap sehingga menghasilkan uap (*steam*) yang memenuhi persyaratan untuk memutar Turbin. Manfaat dari penggunaan uap yang dipanaskan dengan sangat tinggi adalah sudah tidak terdapat kadar air di dalamnya, tidak ada kondensat dalam pipa uap, selain itu efisiensi produksi energi lebih tinggi.



Gambar 3 Pipa Superheater

名称 Description	设计温度 (°C) Temperature	材料 Material	热膨胀系数 Thermal expansion coefficient X10 ⁻⁶ mm/m, °C	单位膨胀量 Expansion value every metre mm/m	标高 Elevation
锅筒 Drum	319	SA-299	12.48	3.73	EL39400
集中下降管 Downcomer	319	20G	12.98	3.88	
炉膛水冷壁 Furnace	319+20	20G	13.20	4.21	
水冷壁上集箱 Upper header of furnace	319	20G	12.98	3.88	EL35670 EL36100
水冷壁下集箱 Lower header of furnace	319	20G	12.98	3.88	EL5040 EL3140
省煤器进口集箱 Inlet header of economizer	224	20G	12.28	2.51	EL18960
省煤器出口集箱 Outlet header of economizer	300	20G	12.78	3.58	EL40840
前包墙集箱 Upper header of forward HRA	347	20G	13.28	4.34	EL39440
前包墙下集箱 Lower header of forward HRA	342	20G	13.22	4.26	EL28980
后包墙下集箱 Upper header of behide HRA	352	20G	13.33	4.43	EL28980
侧包墙集箱 Upper header of side HRA	336	20G	13.16	4.16	EL39840
侧包墙下集箱 Lower header of side HRA	342	20G	13.22	4.26	EL28980
包墙管子 Pipe of HRA	345+50	20G	13.78	5.17	
低温过热器出口集箱 Outlet header of primary superheater	417	12Cr1MoVG	14.25	5.66	EL31580
屏式过热器进口集箱 Inlet header of wing wall	389	12Cr1MoVG	14.18	5.23	EL20100
屏式过热器出口集箱 Outlet header of wing wall	472	12Cr1MoVG	14.42	6.52	EL36650
屏式过热器管子 Pipe of wing wall	425+50	12Cr1MoVG	14.43	6.56	
高温过热器进口集箱 Inlet header of final superheater	457	12Cr1MoVG	14.37	6.28	EL32730
高温过热器出口集箱 Outlet header of final superheater	540	12Cr1MoVG	14.58	7.58	EL36430
蒸汽集箱 Vapor container header	540	12Cr1MoVG	14.58	7.58	EL43800
旋风分离器进口烟道 Gas inlet duct of cyclone	319+50	20G	13.50	4.71	
旋风分离器出口烟道及回弯管 Duct following cyclone & loop seal	100	Q235-A, F	12.20	0.98	
旋风分离器管子 Pipe of cyclone	328+50	20G	13.6	4.87	
空气预热器上部 Upper part of air preheater	265	Q235-A	13.29	3.26	
空气预热器中下部 Middle part of air preheater	211	Q235-A	13.05	2.49	
空气预热器下部 Lower part of air preheater	164	Q235-A	12.71	1.83	

Gambar 4 Penggunaan material 20 G pada boiler.

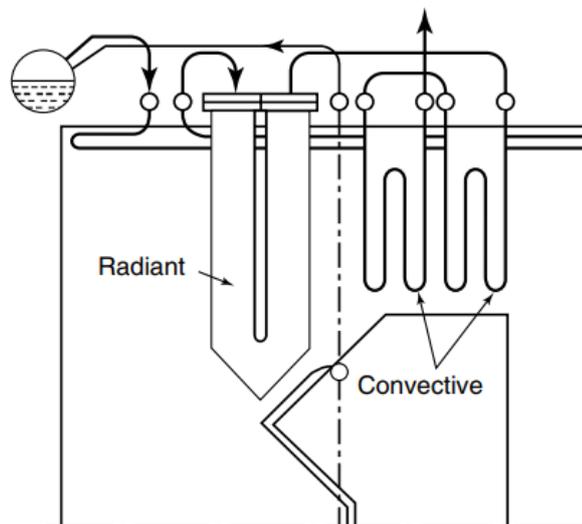
Superheater biasanya terbentuk dari tabung yang menghantarkan uap, yang dipanaskan oleh gas hasil pembakaran yang melewati sisi luar tabung. *Superheater* dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu *superheater* radiasi dan *superheater* konveksi (Jeremy Adrian, 2016).

2.2.1.3 *Superheater* Radiasi

Superheater radiasi berfungsi untuk mendapatkan suhu uap yang lebih tinggi dan panasnya disalurkan melalui radiasi. *Superheater* ditempatkan dalam jangkauan radiasi dari yang terletak pada dinding atas boiler tepatnya diatas tungku karena perpindahan panas yang dihasilkan pada daerah radiasi tersebut cukup baik (Jeremy Adrian, 2016)

2.2.1.4 *Superheater* Konveksi

Superheater konveksi merupakan *superheater* yang sering digunakan pada boiler uap. Pada *superheater* jenis ini digunakan pada uap bersuhu rendah dan hasil dari panas gas buang dihantarkan secara konveksi. *Superheater* konveksi terproteksi dari radiasi oleh tabung evaporator. Penempatan *superheater* konveksi berada dikedua sisi boiler maupun menggantung di atas *boiler* (Jeremy Adrian, 2016)



Gambar 5 Susunan berbagai unit *superheater*

2.2.1.5 Prinsip Desain *Superheater*

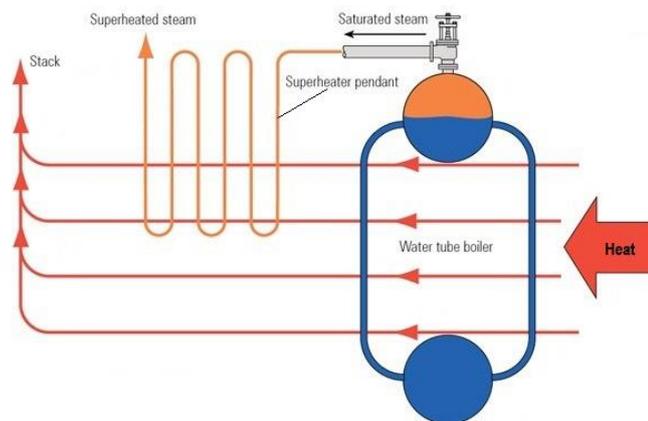
Superheater dan *reheater* adalah kumpulan tabung yang mencapai suhu tertinggi dalam boiler dan oleh karena itu memerlukan perhatian terbesar dalam desain dan

fabrikasi untuk memastikan bahwa suhu logam yang diizinkan tidak pernah terlampaui. Bagian terakhir *superheater* dan *reheater* harus ditempatkan pada suhu gas tertinggi, yang disebut untuk mengadopsi paduan suhu tinggi yang paling tepat untuk pipa dari pertimbangan:

- Suhu logam
- Kotoran karena senyawa abu
- Korosi karena garam dalam abu

Adapun tiga aspek terpenting dari desain *superheater* dan *reheater* adalah:

1. Distribusi uap dan gas yang seragam di semua bagian untuk meminimalkan ketidakseimbangan aliran.
2. Kecepatan uap tinggi yang optimal di semua tabung untuk menjaga suhu logam tetap konstan serendah mungkin.
3. Kehilangan tekanan uap minimum. (Kumar Rayaprolu, 2009)

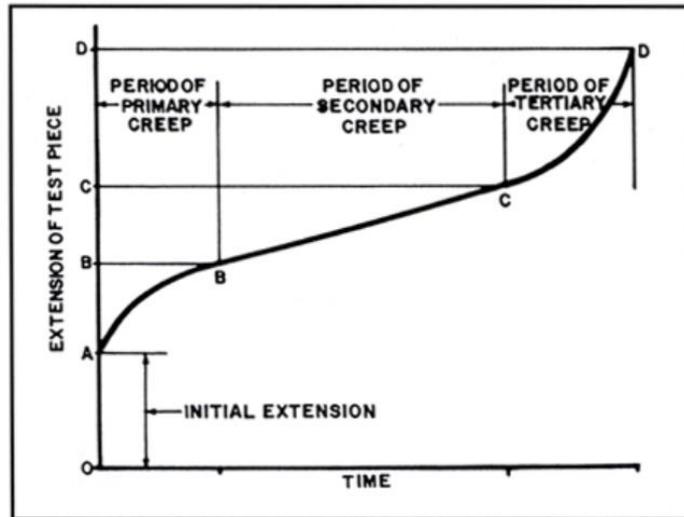


Gambar 6 Superheater Tube

2.3 Creep

Creep merupakan deformasi permanen yang terjadi pada suatu material akibat tegangan (*stress*), waktu dan temperatur yang tinggi lebih dari $0,4 T_m$ (T_m = Temperatur lebur absolut). Adanya tegangan pada material mengakibatkan terjadinya regangan (*strain*) yang seiring waktu (*time independent*) regangan berkembang sampai material putus (*rupture*). *Creep* merupakan fenomena yang bergantung dari waktu sehingga perilaku *creep* pada suatu material dijadikan faktor terpenting dalam *design life* pada aplikasi temperature tinggi.

Karena aktivitas termal, bahan dapat berubah bentuk secara perlahan maupun secara terus-menerus dibawah beban konstan (*stress*) dan akan mengalami kegagalan. Perubahan komponen yang bergantung pada waktu dan dipengaruhi oleh termal dibawah banyak tekanan diketahui merupakan perubahan yang dilakukan secara perlahan disebut *creep* (Haris Effendi,2008).



Gambar 7 Superheater Tube

Ada tiga tahapan deformasi pada pengujian creep yang dijelaskan dari perubahan regangan terhadap waktu, yaitu:

1. *Primary creep*

Pada tahapan ini terjadi setelah pembebanan. Benda uji akan mengalami peningkatan regangan plastis dengan menurunnya laju regangan waktu. Besarnya laju *creep* akan mengalami penurunan pada tahap ini, karena terjadi penyusunan ulang cacat kristal.

2. *Secondary creep*

Pada dasarnya tahapan ini adalah kondisi kesetimbangan antara mekanisme *work hardening* dan *recovery*. Benda uji tetap mengalami pembebanan dan bertambah panjang. Pada tahap ini sangat bergantung pada besarnya temperatur dan tingkat pembebanan yang diberikan pada benda uji. Kenaikan regangan (laju *creep*) tetap konstan.

3. *Tertiary creep*

Pada tahapan terakhir laju kenaikan regangan berjalan dengan cepat sehingga mengakibatkan pertambahan panjang pada benda uji secara cepat sehingga

mengalami perpatahan. Tahap ini merupakan hasil dari perubahan partikel, rekristalisasi atau perubahan difusi yang memungkinkan peningkatan deformasi secara cepat. Sehingga benda uji mengalami pengurangan luas penampang akibat adanya *necking* yang mengakibatkan bertambahnya tegangan dalam beban konstan (Caesar Wiratama, 2021)

Faktor penting dalam menentukan integritas komponen dalam sistem aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku *creep*. Pada material yang mengalami deformasi secara lambat dan terus-menerus dalam fungsi waktu dengan pembebanan atau tegangan yang konstan hingga patah, maka fenomena tersebut dinamakan dengan *creep*. Apabila material logam melewati temperature lebur absolutnya yaitu $0,3 - 0,6 T_m$ atau lebih, maka proses *creep* akan terjadi. Akibat deformasi tersebut, material akan mengalami perubahan bentuk ataupun perpatahan. *Creep* dapat terjadi pada retakan atau cacat yang telah ada. Sehingga adanya konsentrasi tegangan mempercepat perambatan retak hingga kegagalan (Haris Effendi, 2008).

Kegagalan tegangan-pecah atau *stress-rupture* sering terjadi pada *superheater* dan *reheater tube* yang didinginkan dengan uap temperatur operasi *tube* dalam kisaran *creep*. Tetapi, *stress-rupture* dapat terjadi pada *tube* dengan mekanisme pendinginan air, jika kondisi perpindahan panas yang terjadi berlebih sehingga menghasilkan peningkatan temperatur operasi *tube*. Mekanisme kegagalan *stress-rupture* yang sering terjadi diantaranya *short-term overheating* (*overheating* jangka pendek) dan *high-temperature creep/long-term overheating* (*creep* temperatur tinggi).

Short-term overheating disebabkan kondisi temperatur pada *tube* mengalami peningkatan yang sangat tinggi sehingga mengalami kondisi abnormal seperti temperatur gas *boiler* yang berlebihan dan kehilangan aliran cairan pendingin. Kegagalan *short-term overheating* mengakibatkan deformasi *tube* yang cukup besar sehingga terjadi pengurangan area dinding atau penampang dan pertambahan panjang pada logam (Miswar, 2022). Kondisi ini terjadi karena keadaan sebagai berikut :

1. Kehilangan sirkulasi pendingin atau tingkat air yang rendah.
2. Penyumbatan pada bagian internal *tube*.

3. Pembakaran yang berlebihan (*overfiring*) atau tidak merata pada pembakaran bahan bakar *boiler*.
4. Kehilangan pendingin karena kegagalan pada *tube* bagian hulu.

Long-term overheating atau disebut dengan kegagalan *creep* temperatur tinggi dapat terjadi pada komponen *boiler tube* (Viswanathan, 1989). Deformasi permanen pada logam akan terjadi seiring waktu, tergantung pada temperatur aktual dan tegangan. Apabila tegangan dan temperatur melebihi nilai komposisi desain, baja *tube* akan menunjukkan perilaku *creep* yang lebih tinggi dan akan gagal lebih cepat dari yang diprediksikan. Kerusakan akibat *creep* terjadi pada sepanjang batas butir baja. Deformasi *creep* menghasilkan sedikit atau tidak ada pengurangan ketebalan dinding tetapi mengakibatkan perpanjangan *creep* atau peningkatan diameter dalam *tube* baja feritik (Miswar, 2022).

Creep temperatur tinggi berkembang dari temperatur gas *boiler* yang mengalami peningkatan atau sifat material yang tidak memenuhi untuk kondisi operasi aktual dan sirkulasi pendingin *boiler* yang tidak mencukupi. Kondisi ini disebabkan dari beberapa keadaan, seperti :

1. Pembakaran bahan bakar yang tidak merata atau terlalu sering
2. Pengoperasian material *tube* pada temperatur melebihi batas yang diizinkan
3. Meningkatnya tegangan karena penipisan pada dinding
4. Penyumbatan pada saluran gas *boiler*
5. Pembatasan internal aliran pendingin *tube* akibat dari serpihan, *scale* atau kondensat.
6. Penurunan kemampuan transfer panas disebabkan permukaan internal (sisi-uap) terdapat oksida atau deposit kimia (Miswar, 2022).

2.3.1 Mekanisme Deformasi *Creep*

Menurut Miswar (2022), dalam G.E Dieter (1986) mekanisme deformasi *creep* dipengaruhi oleh modulus geser/*shear modulus* (G) dibagi menjadi 4 bagian, yaitu:

1. Dislokasi Meluncur (*Dislocation glide*).

Pada kondisi ini melibatkan dislokasi yang bergerak disepanjang bidang slip dan mengatasi hambatan dengan aktivasi termal. Mekanisme ini terjadi pada tegangan tinggi, ditandai dengan nilai $\sigma/G 10^{-2}$.

2. Dislokasi Mulur (*Dislocation creep*)

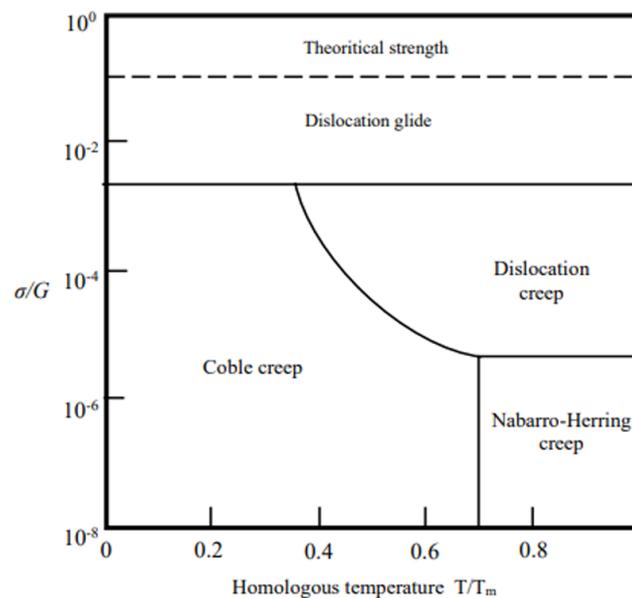
Pada kondisi ini melibatkan pergerakan dislokasi yang mengatasi hambatan dengan mekanisme yang dibantu secara termal yang melibatkan difusi kekosongan atau interstisial, ditandai dengan nilai $10^{-4} < \sigma/G < 10^{-2}$.

3. Difusi *creep* (*Diffusion creep*)

Pada kondisi ini melibatkan aliran kekosongan dan interstisial melalui kristal di bawah pengaruh tegangan yang diterapkan, ditandai dengan nilai $\sigma/G < 10^{-4}$. Kategori ini mencakup *Nabarro-Herring creep* dan *Coble Creep*.

4. Geser batas butir (*grain boundary sliding*)

Pada kondisi ini melibatkan geseran butir melewati satu sama lain.



Gambar 8 Peta Mekanisme deformasi yang disederhanakan (Dieter, 1988)

Untuk menentukan nilai modulus geser/*shear modulus* (G) material dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (ASTM International Committee, 2013) :

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

Dengan: E = Modulus Elastisitas/*young's modulus* (MPa)

ν = Rasio *poisson's*

Untuk nilai rasio *poisson's* dan modulus elastisitas dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

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

Gambar 9 Rasio *Poisson's* pada material

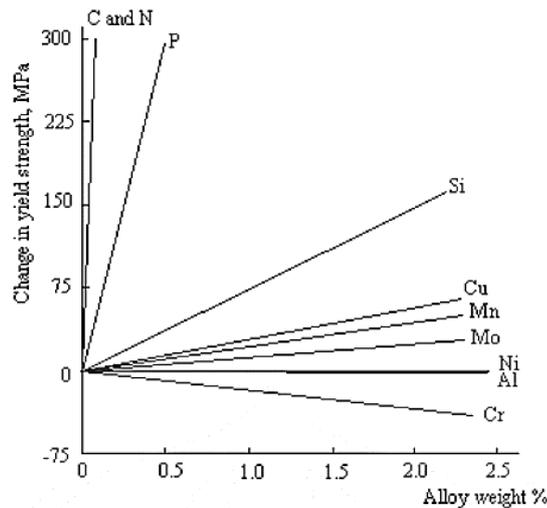
Materials	Modulus of Elasticity <i>E</i> = Value Given × 10 ³ MPa, for Temperature, °C, of																
	-200	-125	-75	25	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Carbon steels with C ≤ 0.30%	216	212	209	202	198	195	192	189	185	179	171	162	151	137	...	...	...
Carbon steels with C > 0.30%	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 10 Modulus elastisitas pada material *ferrous* berdasarkan temperatur

2.3.2 Pencegahan *Creep*

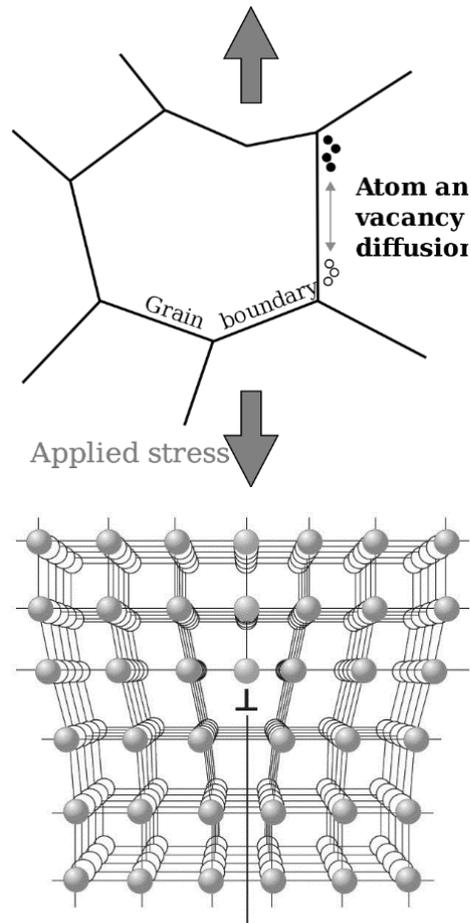
Untuk meningkatkan ketahanan *creep*, ketahanan butir dan batas butir dalam berimigrasi dan dalam waktu yang bersamaan menghindari proses *recovery* ataupun proses *softening* lainnya. Pada perilaku *creep*, diskolasi terjadi dalam bentuk aliran material. Metode dalam menahan dislokasi pada suatu material dapat dilakukan dengan penguatan *solid solution*. Penguatan *solid solution* melalui penambahan elemen paduan seperti kromium (Cr), molibdenium (Mo), vanadium (V), nikel (Ni) dan lain sebagainya yang mampu menahan diskolasi (Haris Effendi,2008).

Elemen paduan dapat membentuk partikel karbida dalam penguatan presipitasi dan mampu menahan diskolasi dalam mekanisme pengerasan preipitasi (*precipitation hardening*). Elemen pembentuk karbida yang stabil diantaranya Cr, Mo, V dan Ni yang meningkat secara berurutan. (Haris Effendi,2008)



Gambar 11 Pengaruh kandungan elemen paduan terhadap penguatan *solid solution* pada baja

Semua mekanisme pengerasan menjadi tidak stabil pada suhu tinggi yang diakibatkan oleh perlakuan *creep*. Dalam pengerasan larutan padat, peningkatan suhu meningkatkan laju difusi atom terlarut dalam atmosfer dislokasi sementara pada saat yang sama mendispersikan atom-atom atmosfer, dengan kedua efek tersebut sehingga memudahkan dislokasi untuk bergerak. Dalam mekanisme deformasi, perlakuan *creep* yang terjadi pada material merupakan hasil dari dislokasi. Namun pergerakan dislokasi tidak tergantung terhadap waktu dan akan mengalami penghambatan yang disebabkan kehadiran dari partikel endapan ataupun lainnya. Pemanasan paduan ke suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pelarutan presipitat. Pada suhu menengah, presipitat dapat menjadi kasar dan menjadi penghalang yang kurang efektif untuk gerakan dislokasi. Tegangan tinggi dan pembebanan siklik regangan tinggi juga dapat menyebabkan percepatan pelunakan. (Viswanathan, 1989)



Gambar 12 Difusi dan diskolasi pada saat fenomena *creep*

Adapun beberapa faktor yang dapat mencegah terjadinya *creep*, yaitu:

1. Elemen pembentuk karbida seperti molybdenum dan tungsten. Pada tingkat lebih rendah, kromium dan vanadium dapat meningkatkan ketahanan *creep*.
2. Peningkatan kandungan karbon hingga 500°C
3. Pada suhu lebih tinggi, baja austenitik dan paduan khusus memiliki ketahanan *creep* yang lebih baik dibandingkan dengan baja feritik paduan rendah atau tinggi.
4. Pada baja, pengaruh butir kasar lebih baik dari butir halus
5. Penambahan Si, Al, Cr dan Ni pada permukaan material bermanfaat untuk meningkatkan stabilitas dari perilaku *creep*. (Kumar Rayaprolu, 2009)

2.4 Contoh Kasus Kerusakan Pada pipa *Superheater*

Berdasarkan dari penelitian yang dilakukan Jeremy Adrian tahun 2016 tentang “Analisa kerusakan *Superheater Tube Boiler* pada pembangkit listrik tenaga uap”.

Analisa yang dilakukan pada pipa tabung *superheater* tipe ASTM A213 Grade 11 mengalami kegagalan yang disebabkan fenomena *creep* yang menjulur pada batang pipa sehingga mengakibatkan *crack* sebagai awal pecahnya pipa. Fenomena *creep* yang terjadi pada pipa *superheater* berawal dari adanya kelelahan material pada temperature tinggi, yang mengakibatkan terbentuknya *creep void* pada batas butir. *Void* akan saling bertemu dan bergabung membentuk *intergranular crack*. *Intergranular crack* yang bergabung membentuk *crack* yang makin lama akan semakin membesar. Sehingga banyaknya *crack* pada material menjadi rentan dan terjadi *burst* (pecah)

1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

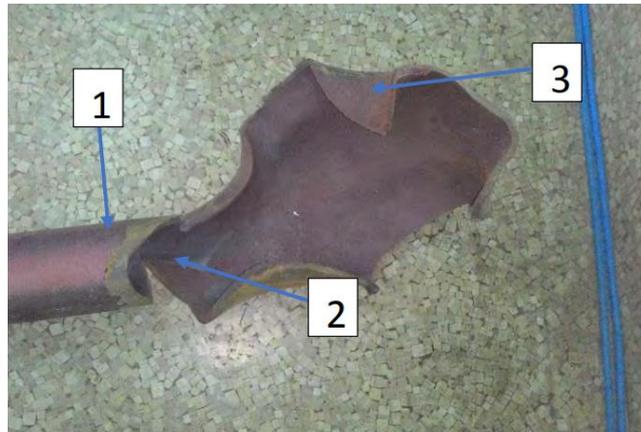
Dari hasil uji komposisi dapat dilihat bahwa spesimen dari benda yang mengalami kegagalan mendekati ASTM A213 Grade 11. Bagian dari spesimen benda uji yang diperiksa berada pada bagian luar *tube* yang mengalami paparan panas batu bara secara langsung. ASTM A213 Grade 11 termasuk ke dalam golongan baja karbin rendah yang dikenal dengan kemudahan untuk di las tetapi memiliki sifat *machinability* yang rendah, kekerasan yang rendah dan keuletan yang tinggi.

Tabel 1 Hasil pengujian komposisi kimia

Unsur	Hasil Uji	ASTM A213
C	0,126	0,05-0,15
Si	0,17	0,25-1,00
Mn	0,541	0,3-0,6
P	0,0309	0,025 max
S	0,0081	0,025 max
Cr	1,09	1,0-1,5
Mo	0,308	0,44-0,65
Fe	Balance	Balance

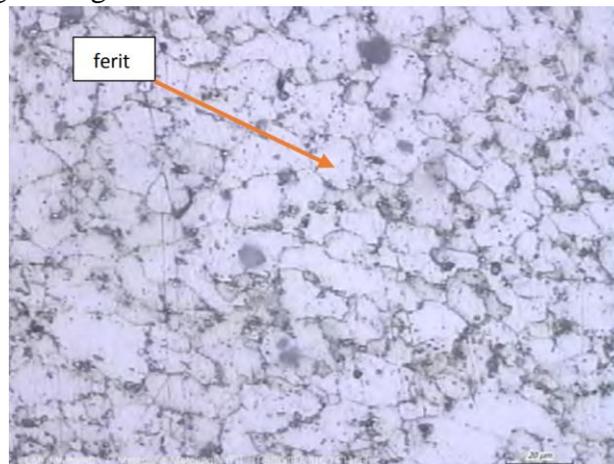
2. Hasil Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi ini dibagi menjadi 3 bagian. Bagian 1 merupakan bagian dari pipa yang masih bagus. Bagian 2 merupakan bagian tepi pipa yang mengalami kerusakan. Bagian 3 merupakan bagian pipa tempat terjadinya kerusakan. Pengujian metalografi menggunakan standar ASTM E3.



Gambar 13 Bagian spesimen yang dilakukan pengujian metalografi

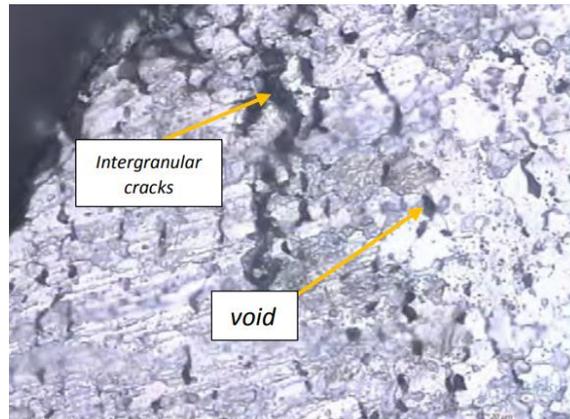
a) Hasil Metalografi bagian 1



Gambar 14 Struktur mikro bagian 1 dengan perbesaran 500x

ASTM A213 memiliki fasa ferit-perlit, dan pada gambar diatas menunjukkan bahwa fasa ferit. Tetapi jumlah karbon sangat kecil, sehingga fasa perlit tidak tampak pada gambar. Struktur ferit bersifat ulet sedangkan struktur perlit lebih getas dan keras sehingga material ASTM A213 merupakan material yang ulet dengan tingkat kekuatan yang tidak begitu baik.

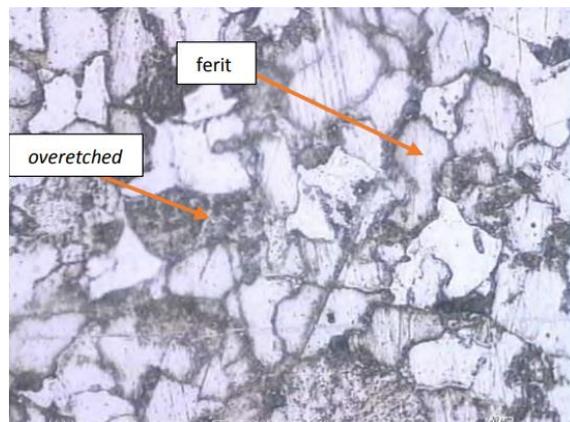
b) Hasil Metalografi bagian 2



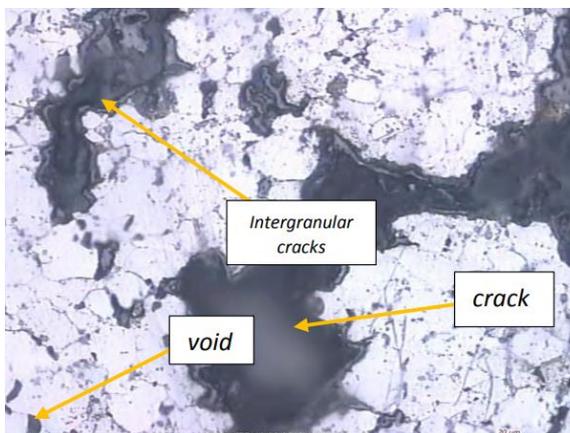
Gambar 15 Struktur mikro bagian 2 dengan perbesaran 500x

Pada gambar 15 menunjukkan bahwa bagian 2 memiliki *intergranular cracks* dan *void*. Namun dibagian ini tidak jauh berbeda dengan bagian 1 dengan fasa penyusun yang tampak yaitu fasa ferit.

c) Hasil Metalografi bagian 3



Gambar 16 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x



Gambar 17 Struktur mikro bagian 3 dengan perbesaran 500x

Dapat dilihat pada gambar 16 mengalami perbesaran butir, tetapi masih didominasi oleh ferit (berwarna putih) dengan beberapa *overetched* (bagian hitam). Pada struktur mikro yang ditampilkan pada gambar 17 dapat dilihat bahwa memiliki *intergranular crack*, *void* dan *crack*.

3. Hasil perhitungan besar butir

Tabel 2 Hasil perhitungan besar butir

No.	Bagian Spesimen	Rata-rata diameter (mm)
1.	Bagian 1	0,0213
2.	Bagian 2	0,0236
3.	Bagian 3	0,0308

Pengujian batas butir dilakukan dengan menggunakan metode *Plainmetric* dengan mengacu pada *Jeffrie's Procedure*. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa diameter 1 dan 2 hampir sama, sedangkan pada bagian 3 mengalami penambahan diameter.

4. Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian dilakukan dengan standar Rockwell dengan mengacu pada ASTM E10 yang bertujuan untuk mengetahui distribusi dan nilai kekerasan pada masing-masing daerah pipa yang rusak.

Tabel 3 Hasil pengujian kekerasan

Material	ASTM	Bagian 1	Bagian 2	Bagian 3
	A213			
	T11			
<i>Hardness</i>				
<i>Rockwell</i>				
<i>Number rata-rata</i>	85 HRB	52 HRB	49 HRB	25,5 HRB

Dapat dilihat dari hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan bahwa bagian 1 memiliki nilai kekerasan yang paling tinggi diikuti bagian 2 dan yang paling rendah adalah bagian 3.

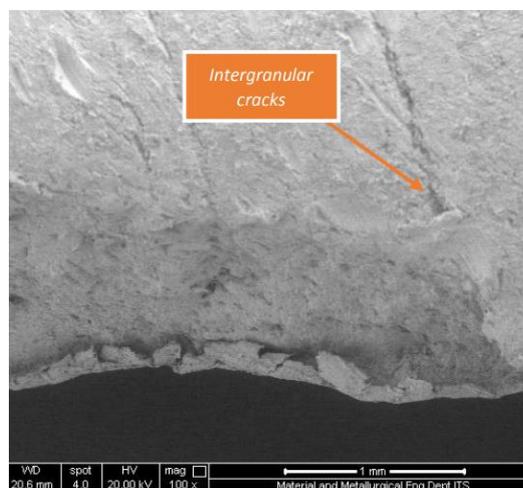
5. Hasil Pengujian SEM

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscope*) dilakukan hanya pada bagian yang rusak (bagian 3). Pengujian bertujuan untuk mencari kondisi permukaan

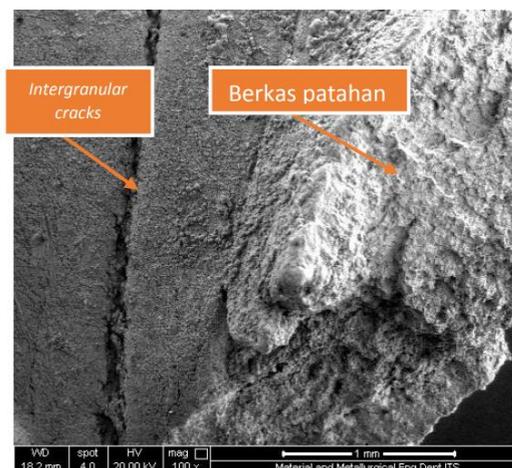
serta morfologi permukaan pada benda. Pengujian SEM dilakukan dengan perbesaran 100x dengan 2 titik yang merupakan bagian dalam dan bagian luar. Hasil pengujian SEM bagian luar ditampilkan pada gambar 19 dan bagian dalam pada gambar 20.



Gambar 18 Daerah yang dilakukan uji SEM



Gambar 19 Hasil pengujian SEM pada bagian luar



Gambar 20 Hasil pengujian SEM bagian dalam

Hasil pengujian SEM dengan perbesaran 100x yang dilakukan pada bagian luar dan bagian dalam pada bagian yang mengalami kerusakan (bagian 3). Dapat dilihat pada beberapa profil permukaan yaitu adanya dengan adanya *intergranular crack* yang tersebar pada permukaan bagian dalam maupun bagian

luar dari material yang mengalami kerusakan namun tidak menembus ke permukaan sebaliknya. *Intergranular crack* terlihat lebih sedikit pada bagian dalam.

Dari gambar 20 dapat dilihat telah terjadi berkas patahan yang tidak mengkilap dan berbentuk granular. Sehingga patahan yang terjadi adalah patahan secara cepat (*rapid failure*) yang disebabkan terjadinya penjuruan *crack* dari awal sampai terjadi kerusakan berjalan dengan cepat. *Intergranular crack* disebabkan adanya aliran panas yang fluktuatif yang mengakibatkan benda mengalami *Thermal Fatigue*. Terjadinya *fatigue* disebabkan pengoprasian pada alat yang melebihi batas temperatur ketahanan panasnya sehingga membuat benda mudah terderformasi. *Thermal Fatigue* menyebabkan benda mulur ketika terkena panas dan menyusut ketika panas berkurang ataupun hilang. *Creep* menimbulkan *void* yang muncul pada batas butir. Dengan sejalannya waktu *void* semakin banyak hingga menjalar di batas butir dan membentuk *Intergranular Crack*.

2.5 Pengujian Mekanik

2.5.1 Uji Creep

Creep adalah perubahan dimensi pada material yang disebabkan oleh waktu dan mengalami perubahan secara permanen ketika diberi beban konstan atau tekanan konstan. Pada jenis material logam, creep dapat terjadi jika melewati batas temperatur maksimal atau 0,4 temperatur *mealtungnya* (Jeremy Adrian, 2016).

Pada *creep*, aktivasi termal dapat mengakibatkan terjadinya deformasi plastis pada tekanan di bawah yang diperlukan untuk mengubah struktur kisi tanpa aktivasi termal. Sehingga, logam yang mengalami beban tarik secara konstan pada temperatur tinggi akan mengalami mulur (*creep*) dan mengalami penambahan panjang terhadap waktu hingga mengalami pecah atau *rupture* (Campbell, 2012).



Gambar 21 Mesin Uji *Creep*

2.5.2 Uji Kekerasan

Kekerasan merupakan nilai ketahanan bahan terhadap deformasi oleh indentasi permukaan benda. Standar yang umum digunakan untuk indenter adalah *Brinell*, *Vickers* dan *Rockwell*.

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

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

Dimana untuk mencari nilai A adalah:

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

Jadi, untuk mencari nilai HB adalah:

$$HB = \frac{2P}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad (4)$$

Dengan: P = gaya yang diberikan

D = diameter indenter

d = diameter indentasi

Uji kekerasan Vickers menggunakan indenter intan (*diamond*) berbentuk piramida dengan sudut puncak 136° dengan pemberian gaya pada permukaan benda selama 10 hingga 15 detik. Setelah pemberian beban dan bola diangkat, diagonal-diagonal bekas injakan diukur. *Vickers Hardness Number* (VB) 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 adalah:

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

Jadi, untuk mencari nilai HV adalah:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad (7)$$



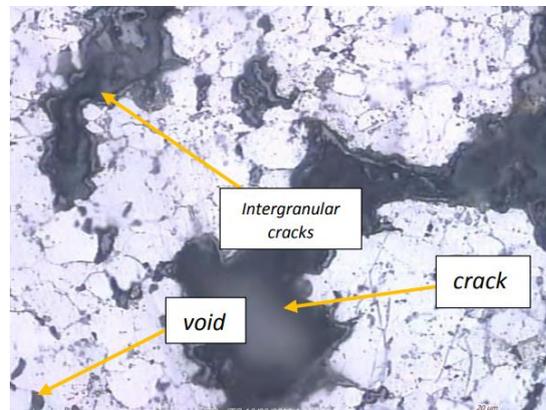
Gambar 22 Alat uji kekerasan metode *Vickers*

2.5.3 Uji Struktur Mikro

2.5.3.1 Pengujian Metalografi

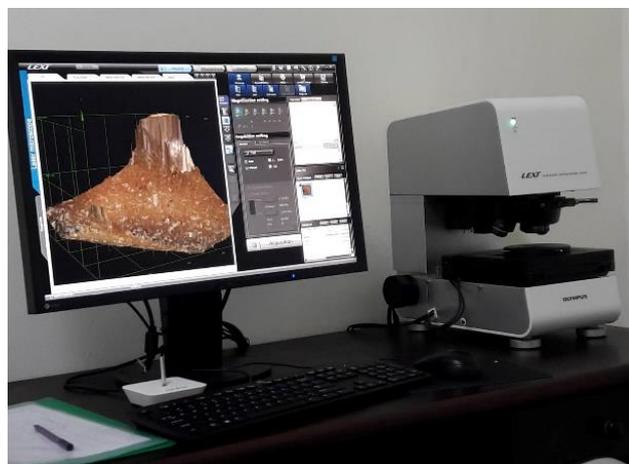
Metalografi merupakan paduan ilmu dan seni yang mempelajari tentang struktur mikro pada logam dan memperkirakan sifat-sifat fisik yang terdapat pada struktur

mikronya sehingga dapat mengetahui karakteristik dari bahan tersebut dengan menggunakan mikroskop elektron atau jenis mikroskop lainnya (Albaet Firdausi, 2013).



Gambar 23 Uji struktur mikro pada spesimen pipa *superheater*

Dalam pengamatan struktur mikro secara metalografi dapat dilihat gambaran struktur butiran dari suatu logam. Namun sebelum dilakukan pengujian, dapat dipastikan permukaan dari benda uji harus benar-benar rata agar dapat terlihat dan tergambar bentuk struktur mikro dari mikroskop sehingga cahaya yang berasal dari mikroskop akan dipantulkan dan mengarah ke mata (Albaet Firdausi, 2013).



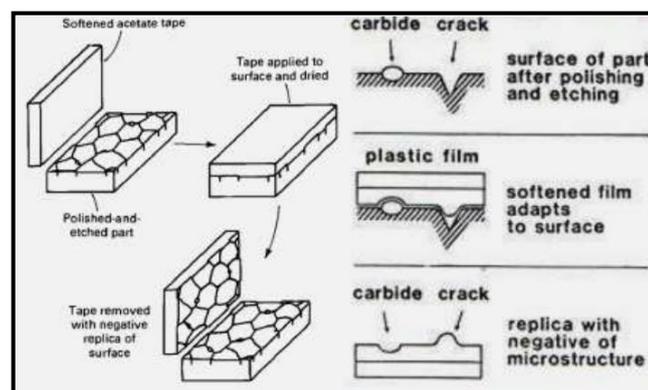
Gambar 24 Mikroskop Optik

2.5.3.2 *In-situ Metallography*

In-Situ metallography adalah salah satu metode untuk mendapatkan mikrostruktur pada material tanpa merusak material tersebut (Paresh U. Haribhakti, 2010). Proses *In-Situ metallography* ini dilakukan langsung ditempat dimana material ingin diperiksa, misal pada alat indsutri pabrik yang tidak dapat berhenti beroperasi

dan tidak dapat melakukan kerusakan pada material. Fungsi dari *In-Situ metallography* adalah mendapatkan struktur mikro dari material yang akan digunakan untuk pemeriksaan kualitas material sebagai Tindakan perawatan atau pencegahan pada material tersebut. (B.L. Bramfitt, 2004)

Prinsip pelaksanaan dari *In-situ metallography* hampir sama dengan pengujian metalografi pada laboratorium. Yang membedakan adalah pelaksanaan dan penggunaan alat. Pada *In-situ metallography* alat yang digunakan bersifat portabel, yaitu mudah dibawa kemana-mana. Prinsip pelaksanaan dari *In-situ metallography* hampir sama dengan pengujian metalografi pada laboratorium. Yang membedakan antara *In-situ metallography* dengan metalografi pada laboratorium adalah pelaksanaan dan penggunaan alat. Untuk lokasinya, metode *In-situ metallography* dilaksanakan pada tempat yang ingin dilakukan pemeriksaan komponen material tersebut (B.L. Bramfitt, 2004).



Gambar 25 Ilustrasi proses *In-situ metallography* pada material

Proses aplikasi replika *In-situ metallography* dapat dilihat pada gambar 2.20. Permukaan *metallographic* diberikan larutan replika yang disebut *softened acetate tape*. Dibiarkan hingga mengering, kemudian dilepas dari permukaan *metallographic* hingga membentuk menyerupai kopi dari permukaan spesimen. Apabila dilihat pada mikroskop iluminasi co-axial, benda uji terlihat mengkilap seperti metal, sehingga menampakkan detail dari permukaan benda uji seperti struktur mikro, retak mikro dan *pitting* (bintik-bintik) dapat dilakukan peninjauan dibawah mikroskop dengan pembesaran yang tinggi (Achmad Hata, 2014).

2.5.4 Uji Tarik

Uji Tarik merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengidentifikasi sifat-sifat dari material tersebut. Dengan melakukan pengujian tarik hingga merubah panjang dimensi material menyebabkan material bereaksi terhadap gaya tarikan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanis, khususnya logam. Diantara sifat-sifat mekanis setelah penarikan didapatkan sebagai berikut: kekuatan tarik maksimum, kekuatan luluh dari material, keuletan dari material dan modulus elastis dari material (Miswar,2022)



Gambar 26 Mesin Uji Tarik