

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang paling banyak digunakan di dunia. PLTU memanfaatkan energi panas dari uap untuk memutar turbin sehingga dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik melalui generator. Proses pembangkitan listrik di PLTU dimulai dengan pembakaran bahan bakar, seperti batubara, minyak, atau gas alam, di dalam *boiler*. Pembakaran bahan bakar menghasilkan energi panas yang digunakan untuk memanaskan air di boiler. Air yang dipanaskan akan berubah menjadi uap air. Uap air yang dihasilkan kemudian dialirkan ke turbin. Turbin akan berputar karena energi panas dari uap air. Putaran turbin kemudian digunakan untuk menggerakkan generator. Generator akan menghasilkan energi listrik. Komponen tersebut bekerja secara berkaitan untuk menghasilkan energi listrik. *Boiler* merupakan komponen utama yang berfungsi sebagai penghasil uap yang digunakan untuk memutar turbin.

*Boiler* menghasilkan uap dengan cara membakar batubara pada suatu ruang bakar (*furnace*) yang disekitar ruang bakar tersebut terdapat pipa-pipa air atau uap. Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) merupakan pembangkit listrik yang banyak digunakan di Indonesia. Pada prinsipnya PLTU memanfaatkan air untuk menghasilkan *steam* dan mengubah energi termal yang dimiliki oleh uap (*steam*) menjadi energi listrik, *steam* bertekanan akan digunakan sebagai penggerak generator untuk menghasilkan listrik dengan media turbin untuk mengubah energi termal 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 tube* adalah bagian penting dari boiler yang berfungsi untuk memanaskan uap (*steam*) hingga mencapai temperatur yang tinggi.

*Wingwall* adalah bagian dari dinding boiler yang terletak di sisi kanan dan kiri ruang bakar. *Wingwall* terbuat dari pipa-pipa yang dilas dan dilapisi dengan bahan tahan panas. Pipa-pipa ini berfungsi untuk mendinginkan dinding boiler dan melindungi boiler dari erosi akibat gas panas hasil pembakaran. *Wingwall Superheater Tube* adalah kombinasi dari *superheater tube* dan *wingwall*. Pipa-pipa ini terletak di *wingwall* dan berfungsi untuk memanaskan uap sekaligus mendinginkan uap boiler. *Wingwall Superheater Tube* biasanya terbuat dari baja tahan karat yang tahan terhadap panas dan tekanan tinggi. Pada penelitian ini terdapat sampel yang telah terpapar suhu 500°C. Pengamatan visual menunjukkan bahwa terjadi *fish mouth cracking* pada satu sisi dan terdapat bagian yang menggembung pada *tube* (*bulging*)

pada daerah seberang las. Menurut Furtado HC dan May IL (2004) kerusakan struktur mikro mungkin merupakan aspek dominan dari pengurangan kekuatan mulur. Oleh karena itu, penting untuk melakukan analisis mendalam terhadap distribusi kekerasan dan struktur mikro pada material *Wingwall Superheater Tube 20G* pada suhu operasionalnya. Analisis tersebut bertujuan untuk memahami bagaimana material bereaksi terhadap beban operasionalnya, potensi kelelahan material, serta kemungkinan kegagalan yang dapat terjadi. Dengan pemahaman yang lebih baik tentang karakteristik material pada kondisi operasional tersebut, langkah-langkah perawatan preventif dan perbaikan dapat direncanakan dengan lebih efektif, sehingga meningkatkan keandalan dan masa pakai dari komponen tersebut. 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 Distribusi Kekerasan Dan Struktur Mikro Pada Material *Wingwall Superheater Tube 20G* Pada Suhu 500 °C”**

## **1.2 Rumusan Masalah**

1. Bagaimana distribusi nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material *Wingwall Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C?
2. Bagaimana degradasi struktur mikro pada material *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C?
3. Bagaimana hubungan kekerasan dan struktur mikro *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Menguji distribusi nilai kekerasan dan kekuatan tarik pada material *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C.
2. Mengamati degradasi struktur mikro pada material *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C.
3. Menganalisis hubungan kekerasan dan struktur mikro *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C.

## **1.4 Batasan Penelitian**

Pada penelitian ini digunakan untuk membatasi asumsi parameter yang sangat kecil pengaruhnya pada penelitian. Adapun Batasan-batasan masalahnya sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah *Wingwall Superheater Tube* bermaterial baja karbon rendah dengan tipe 20G.

2. Pengujian material meliputi uji kekerasan, pengamatan struktur mikro dan uji tarik dan Insitu Metalografi.



**Gambar 1.** Spesimen *Wingwall Superheater Tube 20G*

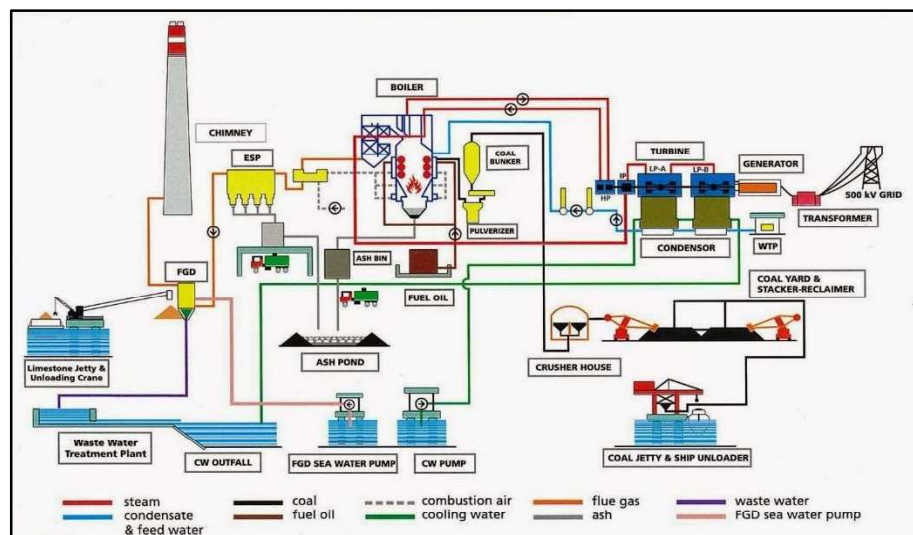
### 1.5 Manfaat Penelitian

Mengetahui perubahan struktur mikro, kekerasan dan kuat tarik *Wingwall Superheater Tube 20G* setelah mengalami suhu 500 °C, sehingga penelitian ini dapat membantu dalam mengidentifikasi potensi titik-titik lemah atau daerah rentan terhadap kegagalan. Ini memungkinkan pengambilan tindakan preventif yang tepat untuk meningkatkan keandalan dan keselamatan operasional sistem pembangkit listrik tenaga uap. Hasil ini juga akan menjadi referensi bagi *engineer* yang menangani *furnace* 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 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan pembangkit listrik yang mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik yang memiliki nilai efisiensi yang tinggi terhadap energi termal. Di Indonesia PLTU menggunakan bahan bakar batu bara untuk menekan ketergantungan pada PLTD (*Diesel*) yang masih menggunakan bahan bakar minyak. Prinsip kerja PLTU batu bara secara umum dapat dilihat pada gambar 1. Adapun keterangan gambar sebagai berikut (Yuniarti, 2019) :



**Gambar 2. Sistem Pada PLTU**

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

1. Batu bara 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 batu bara di *boiler* digunakan untuk mengubah air menjadi uap pada suhu dan tekanan tinggi. Dengan proses sebagai berikut:
  - a. *Pre-heater* udara adalah pemanas awal udara untuk meningkatkan suhu udara yang digunakan untuk pembakaran batu bara. 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 turbin 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*/ketel uap bejana tertutup yang mana panas pembakaran dialirkan ke air sampai terbentuk *steam* berupa energi kerja. Air adalah sarana yang berguna dan murah untuk mengalirkan panas ke suatu sistem. *Steam* dengan tekanan dan suhu tertentu mempunyai nilai energi yang dimanfaatkan untuk mengalirkan panas dalam bentuk energi kalor ke suatu sistem. Ketika air dididihkan hingga menjadi *steam*, maka volumenya meningkat sebesar 1600 kali, menghasilkan tenaga yang menyamai bubuk mesiu yang mudah meledak, sehingga sistem *boiler* adalah peralatan yang harus diatur dan dijaga dengan sangat baik. Sistem pada *boiler* terdiri dari sistem bahan bakar, sistem air umpan, dan sistem *steam*.

Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang berperan untuk menyediakan bakar yang digunakan pada proses pembakaran didalam dapur *boiler*. Sistem air umpan berperan untuk menyediakan air umpan untuk boiler sesuai dengan kebutuhan produksi uap. Sistem *steam* ini berperan untuk mengumpulkan dan mengontrol produksi uap pada *boiler*. Fungsi utama boiler adalah untuk memproduksi uap untuk digunakan dalam membangkitkan Listrik untuk kebutuhan pabrik. Jika pembuatan uap menurun yang terjadi adalah gangguan terhadap generator turbin yang menyebabkan penurunan produksi tenaga listrik dan penurunan proses pengolahan (Juliyanti & Fitriani, 2023).

### 2.1.1 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) (Pamungkas, 2020)

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

| No | BOILER CFB                                                                           | BOILER PC                                                                            |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Temperatur pembakaran di tungku rendah ( $\pm 800^{\circ}\text{C}$ ), <i>low</i> NOx | Temperatur pembakaran di tungku tinggi ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ), <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 Wingwall Superheater Tube

*Wingwall Superheater Tube* adalah untuk memanaskan uap yang dihasilkan oleh proses pembakaran bahan bakar menjadi uap *superheated*, yang memiliki suhu dan tekanan yang lebih tinggi dari uap jenuh biasa. Uap *superheated* ini kemudian digunakan untuk memutar turbin uap yang menggerakkan generator listrik. *Wingwall Superheater Tube* terletak di dalam area *superheater*, yang merupakan bagian dari *boiler* di mana uap panas melewati pipa-pipa untuk dipanaskan lebih lanjut. Konstruksi *Wingwall Superheater Tube* biasanya terdiri dari sejumlah pipa logam yang terhubung di antara dinding boiler. Namun, yang membedakan *Wingwall Superheater Tube* adalah adanya sayap (*wingwall*) di sekitar pipa-pipa ini, yang dirancang untuk membantu mengarahkan aliran gas panas secara efisien melalui pipa-pipa *superheater*. Namun distorsi pada pemanas *wingwall superheater* sering terjadi pada banyak boiler CFBC. Beberapa faktor yang berkontribusi pada kerusakan ini adalah operasi pada suhu tinggi dan faktor korosi. Selain itu, kualitas batu bara yang buruk juga dapat menyebabkan korosi yang disebabkan oleh residu pembakaran (korosi abu batu bara) (Himarosaa, et al., 2022). Agar mampu melakukan simulasi distribusi suhu secara bersamaan pada beberapa pipa gabungan. Pipa-pipa ini dialiri oleh *steam* dengan nilai aliran massa yang berbeda. Bentuk pemanas *superheater wingwall* sedemikian rupa sehingga dapat dengan mudah melengkung karena dimensi penampang melintangnya yang lebih kecil dibandingkan dengan rasio tingginya. Oleh karena itu ia tidak mengembang sebagai anggota yang kaku. Jika ada resistansi untuk mencegah ekspansi termal, panel akan melengkung. Hal ini menyebabkan deformasi permanen (Majdak, 2021).

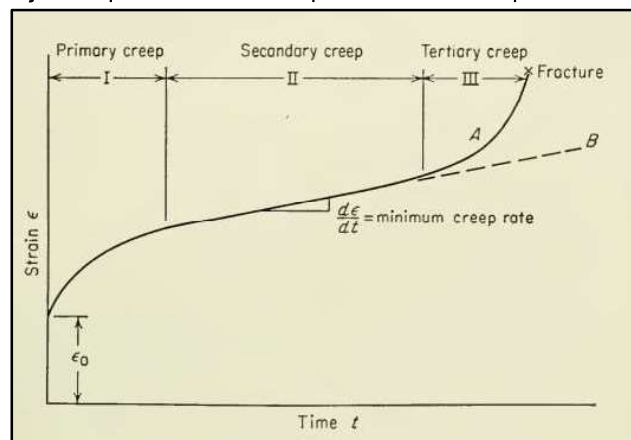
### 2.4 Distribusi Kekerasan

Berbagai mikrostruktur dapat terbentuk pada paduan baja, martensit merupakan yang paling keras dan kuat tetapi getas. Kekerasannya tergantung pada kandungan karbon yang ada pada paduan tersebut. Austenit lebih padat dari pada martensit,

bagaimanapun pada waktu transformasi fasa dengan *quenching* volumenya akan berkurang. Konsekuensinya, sebagian besar *quenching* akan mengalami keretakan (*crack*) karena pengaruh *internal stress*. Secara distribusi kekerasan, dapat diasumsikan bahwa ketebalan yang lebih besar memiliki distribusi kekerasan yang lebih kompleks karena kehadiran struktur martensite yang keras. Sebaliknya, ketebalan yang lebih kecil mungkin memiliki distribusi kekerasan yang lebih seragam karena hanya terdiri dari struktur pearlite dan ferrite yang biasanya memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan dengan martensite. Namun, perlu diingat bahwa distribusi kekerasan juga dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti perlakuan panas dan komposisi kimia material (Romania, et al., 2017).

## 2.5 Kegagalan Creep

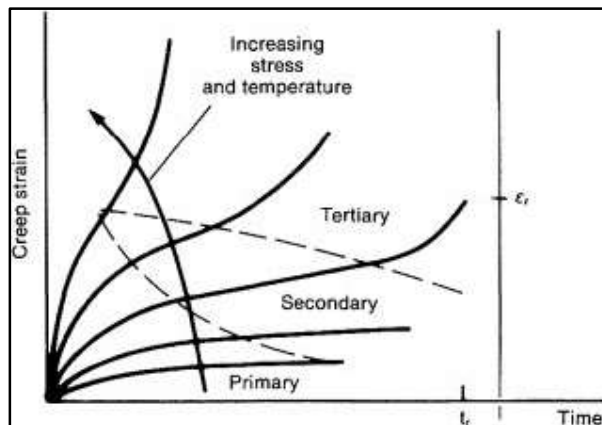
Salah satu faktor penting dalam menentukan integritas komponen dalam suatu sistem pada aplikasi temperatur tinggi adalah perilaku *creep*. Pada proses termal, suatu material yang mengalami deformasi secara lambat dan kontinyu dalam fungsi waktu dengan beban atau tegangan konstan hingga patah, maka perilaku 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 3. 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 3 memperlihatkan bentuk kurva *creep* yang dipengaruhi jenis material, temperatur dan tegangan.

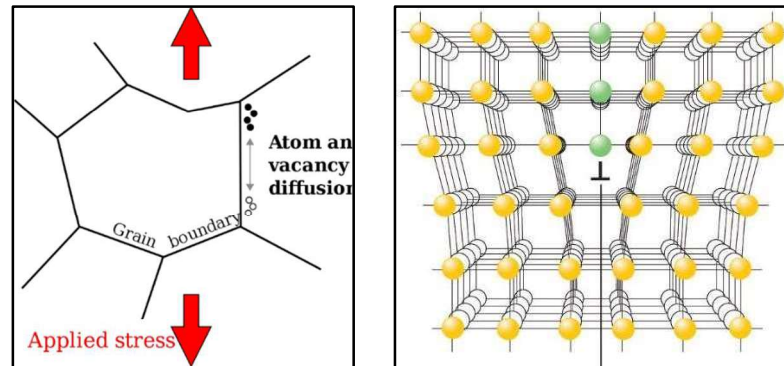


**Gambar 4.** Pengaruh Perubahan Temperatur Dan Tegangan

Dari Gambar 4 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.

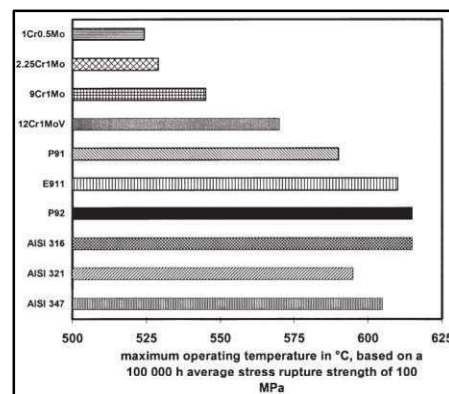
Karakterisasi *creep* dapat didefinisikan sebagai mekanisme deformasi ataupun komponen regangan. Dalam mekanisme deformasi, proses *creep* yang terjadi pada logam merupakan hasil dari pergerakan dislokasi. Namun berbeda pada kondisi biasa, dimana pergerakan dislokasi tidak tergantung terhadap waktu dan 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 5.



**Gambar 5.** 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 6 ditunjukkan kekuatan *creep* (*rupture*) dari beberapa *grade* material baja terhadap temperatur.



**Gambar 6.** Kekuatan *Creep* Dari Beberapa Jenis Baja

## 2.6 Kategori Kegagalan pada Pipa Ketel Uap

Pada pengoperasian pipa ketel uap, beberapa kategori kegagalan dapat terjadi. Contohnya:

1. Tekanan pecah  
Tekanan pecah umumnya dikarenakan *overheating* yang dapat diartikan sebagai kegagalan yang disebabkan pengoperasian ketel uap pada temperatur diatas desain selama waktu tertentu. *Overheating* dihasilkan oleh kondisi yang abnormal, seperti hilangnya aliran pendingin atau temperatur ruang bakar ketel uap yang terlalu tinggi.
2. Temperatur mulur tinggi  
Kerusakan akibat mulur, umumnya diawali retak aksial. Retak muncul pada arah aksial atau longitudinal tegak lurus dengan *principle hoop stress*.
3. Korosi  
Permasalahan yang sering dijumpai pada pipa ketel uap pada area *superheater* adalah korosi (*water/fire side*) dan erosi.
4. Korosi terlokalisasi  
Korosi terlokalisasi merupakan bentuk korosi yang membentuk lubang-lubang kecil pada logam. Penyebab utama korosi ini adalah kurangnya oksigen disuatu daerah yang kecil, dimana daerah ini menjadi semakin anodik, sedangkan daerah dengan kelebihan oksigen, menjadi semakin katodik sehingga menimbulkan korosi galvanik yang terlokalisasi.
5. Degradasi mikrostruktur  
Merupakan mekanisme kerusakan yang dapat mengakibatkan kegagalan dengan beberapa proses, seperti mulur (*creep*) dan lelah (*fatigue*), sehingga menyebabkan pengurangan kekuatan dari material.
6. *Hydrogen damage*  
*Hydrogen damage* terjadi akibat berdifusinya atom hidrogen kedalam logam yang kemudian bereaksi dengan karbon dalam  $Fe_3C$  untuk membentuk metana, sehingga metana tersebut akan mengeliminasi pearlit yang ada. Karakteristik kegagalan yaitu terjadinya dekarburisasi dan retakan merambat dari *Internal Diameter* (ID) ke *Outer Diameter* (OD) (Hasan, 2018).

## 2.7 Pengujian Mikrostruktur

Sifat fisik dan khususnya, perilaku mekanis suatu material sering kali berbeda bergantung pada struktur mikronya. Pada paduan logam, struktur mikro dicirikan oleh jumlah fasa yang ada, proporsinya, dan cara distribusi atau penyusunannya. Struktur mikro suatu paduan bergantung pada variabel-variabel seperti unsur-unsur paduan yang ada, faktor-faktor konsentrasi, dan perlakuan panas paduan (yaitu suhu, waktu pemanasan, dan laju pendinginan hingga suhu ruangan) (Callister Jr & Rethwisch, 2018). Pengujian mikrostruktur merupakan salah satu pengujian dan karakterisasi yang penting dalam ilmu material. Pengujian mikrostruktur bisa dimaksudkan untuk melihat fasa dan ukuran butir fasa akibat perubahan komposisi logam ataupun karena pengaruh perlakuan panas. Untuk mendapatkan gambar mikrostruktur yang jelas perlu dilakukan beberapa persiapan berupa pemotongan, *mounting*, pengamplasan, pemolesan dan *etching* yang memakan waktu cukup lama. Tahapan *mounting* menggunakan

resin bisa diabaikan apabila ukuran material cukup besar. Tahapan pengamplasan bisa dilakukan setelah pemotongan material untuk mendapatkan permukaan yang rata dan halus. Permukaan yang rata harus bisa didapatkan pada pengamplasan pertama dengan grit yang kecil. Tidak ada standar tentang penggunaan ukuran grit amplas. Pengamplasan yang terakhir harus mendapatkan permukaan yang halus dan mudah untuk dilanjutkan pada pemolesan (Wibowo, et al., 2020).

#### 1. Pemotongan

Dalam pemotongan sampel menjadi suatu spesimen yang akan diamati harus diperhatikan beberapa hal agar diperoleh hasil pemotongan yang baik, antara lain pemilihan lokasi pemotongan yang baik, jumlah spesimen yang representatif yang akan dipotong, dimensi pemotongan, cara pemotongan, jenis *cutter*, temperatur saat pemotongan, pelindung supaya tidak terjadi oksidasi, dan yang tidak kalah penting adalah pemberian kode identifikasi (nomor) pada spesimen agar tidak tertukar dengan spesimen yang lain. Pemotongan sampel menyebabkan panas antara sampel dan tidak boleh merubah struktur sampel, untuk itu pada saat pemotongan harus diberikan cairan pendingin.

#### 2. Pembungkaihan (*mounting*)

Pembungkaihan spesimen (*mounting*) dilakukan manakala spesimen uji berukuran kecil sehingga akan sangat menyulitkan dalam pemegangan pada saat penggerindaan atau pengamplasan. *Mounting* dilakukan dengan menempatkan potongan spesimen dalam suatu tempat, kemudian dituangkan ke dalamnya campuran resin dan pengeras. Setelah kering dan mengeras, maka spesimen dapat di amplas untuk dihaluskan permukaannya.

#### 3. Pengamplasan

Pada proses pengamplasan ini ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu pengamplasan tidak boleh menyebabkan spesimen menjadi panas, sehingga perlu pengaliran air ke permukaan amplas selama pengamplasan. Pengamplasan tidak boleh merusak struktur yang ada, amplas yang digunakan bertahap dari yang paling kasar. Setiap pergantian tingkat di putar 90°, dan setiap tingkatan diusahakan sampai garis yang tegak lurus hilang, permukaan spesimen harus benar benar rata dan tidak melengkung, selain itu spesimen tidak boleh terkontaminasi.

#### 4. Pemolesan

Pemolesan dilakukan setelah proses pengamplasan selesai, dan untuk menjadikan permukaan spesimen halus mengkilat seperti kaca dan tanpa

goresan dilakukan pemolesan dengan menggunakan kain bludru yang diletakan dipiringan putar mesin poles dengan diberikan pasta alumina. Hal-hal yang harus diperhatikan selama pemolesan antara lain, bekas amplas dipastikan benar-benar halus, pemolesan hingga garis-garis bekas amplas hilang, pada piringan poles tidak boleh ada kotoran, tidak boleh terjadi kontaminasi dengan zat kimia/lemak, bahan poles tidak boleh bereaksi dengan benda uji, pemolesan harus merata dan permukaan spesimen tidak boleh teroksidasi (Bethony, 2022).

## 5. *Etching*

*Etching* atau proses etsa merupakan proses yang bertujuan untuk memunculkan fasa atau batas butir pada sample dengan menggunakan cairan etsa. Larutan ini berupa campuran kimia yang dicampurkan dengan alkohol. Khusus untuk baja biasanya digunakan cairan Nital 2% ataupun 3% lama pencelupan tergantung dari spesimen yang diuji (Kurniawan, et al., 2022). Proses ini dilakukan dengan mencelupkan permukaan spesimen ke dalam cairan etsa dalam waktu tertentu, kemudian mencuci dengan air hangat untuk menghentikan reaksi dan mengeringkannya. Melalui proses ini akan tampak batas butir dan struktur pada permukaan spesimen, sehingga memudahkan untuk pengamatan. Hal-hal yang harus diperhatikan selama proses etsa adalah permukaan benda uji harus bersih, tidak berminyak, tidak tersentuh tangan dan tidak boleh teroksidasi, dan tidak terdapat goresan lagi. Jenis larutan etsa yang digunakan harus sesuai dengan standar, waktu etsa harus diperhatikan, etsa harus merata diseluruh permukaan dan segera dihentikan ketika sampai pada waktunya, kemudian tunggu sampai spesimen yang telah dietsa kering dan diamati dengan mikroskop. Jika terjadi gagal etsa, maka spesimen harus di amplas ulang (Bethony, 2022).

## 2.8 Pengujian Mekanik

Sifat mekanik material mencerminkan hubungan antara beban atau gaya yang diberikan terhadap respons atau deformasinya.

### 2.8.1 Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan teknik untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu material yang paling sering dilakukan. Kekerasan merupakan ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis terlokalisasi (contoh: “indentasi kecil” atau gores). Pengujian kekerasan yang terdahulu adalah uji kekerasan Mohs, berdasarkan skala kemampuan material untuk menggores material lain (dari 1 = talk sampai dengan 10 = intan). Kini, terdapat berbagai metode pengujian kekerasan, seperti Brinell, Vickers, dan Rockwell (Sofyan, 2021).

## 1. Metode Brinell

Metode Brinell lazim digunakan untuk mengukur kekerasan logam dengan nilai kekerasan yang rendah. Pengujian Brinell adalah salah satu cara pengujian kekerasan yang paling banyak digunakan. Pada pengujian brinell digunakan bola baja yang dikeraskan sebagai indentor. Kekerasan Brinell dihitung sebagai berikut:

$$HB = \frac{2P}{(\pi D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Dimana:

- HB = Nilai kekerasan *brinell*
- P = Besarnya gaya penekanan (kgf)
- D = Diameter bola indentor (mm)
- d = Diameter tampak tekan (mm)

## 2. Metode Vickers

Metode vickers dilakukan dengan menekan indentor berupa limas diamond dengan sudut puncak  $136^\circ$ . Besar indentornya bervariasi tapi sudutnya sama. Jejak indentasi berupa bujur sangkar, kemudian panjang kedua diagonalnya diukur, dan dimasukkan ke dalam rumus *Hardness Vickers*.

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

Dimana:

- HV = Nilai kekerasan Vickers
- P = Besarnya gaya penekanan (kgf)
- d = Diameter diagonal (mm)

### 3. Metode Rockwell

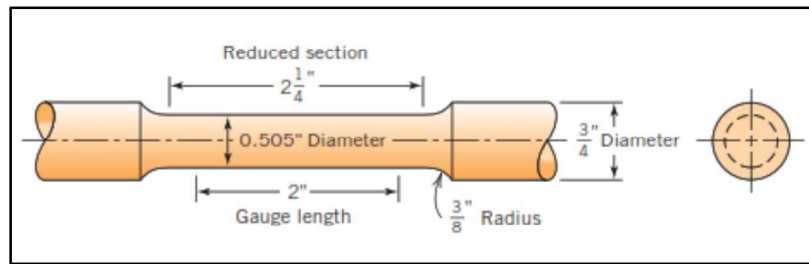
Metode rockwell dilakukan dengan menekan indenter berupa kerucut diamond dengan sudut puncak  $120^\circ$  atau bola baja. Pembebanan dilakukan secara bertahap. Pembebanan minor load 10 kg, sedangkan beban mayor 60, 100, dan 250 kgf. Jejak penekanan dapat dihitung kedalamannya dan langsung diamati di skala penunjukan. Kekurangan metode rockwell adalah hasil pengukuran yang kurang teliti (Bethony, 2022).



**Gambar 7.** Alat Uji Kekerasan

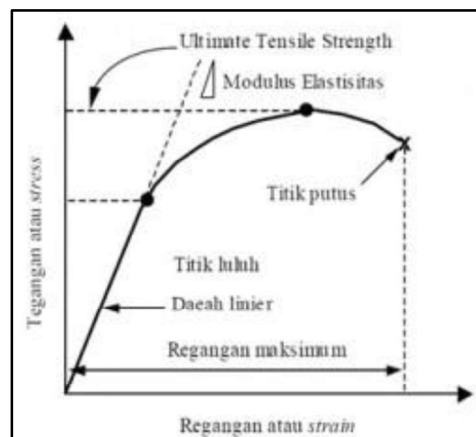
#### 2.8.2 Pengujian Tarik

Untuk mengetahui sifat dari suatu material maka diperlukan suatu pengujian, salah satu pengujian yang paling sering dilakukan yaitu uji tarik (*tensile test*). Pengujian ini memiliki fungsi untuk mengetahui tingkat kekuatan suatu material dan untuk mengenali karakteristik pada material tersebut. Prinsipnya, uji tarik ini dilakukan menggunakan mesin yang dapat memberikan gaya tarik yang cukup kuat pada material dan juga memberikan cengkaman yang kencang sehingga material tidak terlepas ketika diberikan gaya tarik. Ada banyak hal yang bisa didapatkan dari uji tarik, dengan memberikan gaya tarik pada material sampai putus maka semua susunan struktur material bisa diketahui dengan jelas sehingga dapat menentukan kualitas dari material tersebut. Uji tarik memiliki prinsip dasar dari hukum hooke (*hooke's law*) dimana regangan (*strain*) dan rasio tegangan (*stress*) adalah konstan (Mahadi & Novri, 2020).



**Gambar 8.** Standar spesimen uji tarik dengan penampang melingkar

Keluaran dari uji tarik tersebut dicatat (biasanya di komputer) sebagai beban atau gaya *versus* perpanjangan. Karakteristik deformasi ini bergantung pada ukuran spesimen. Misalnya, diperlukan beban dua kali lipat untuk menghasilkan perpanjangan yang sama jika luas penampang benda uji menjadi dua kali lipat. Untuk meminimalkan faktor geometri ini, beban dan perpanjangan dinormalisasi ke parameter masing-masing rekayasa menekankan dan rekayasa tekanan (Callister Jr & Rethwisch, 2018).



**Gambar 9.** Kurva tegangan regangan (*stress-strain*)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

Dimana:

$\sigma$  = Tegangan (*stress*)

$F$  = Gaya tarikan (N)

$A_0$  = Luas penampang awal (m<sup>2</sup>)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (4)$$

Dimana:

$\varepsilon$  = Regangan (*strain*)

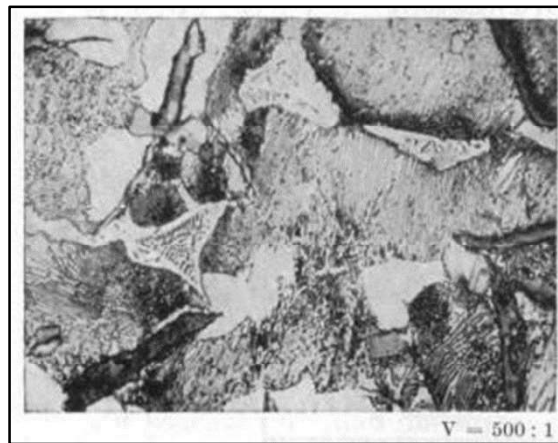
$\Delta l$  = Pertambahan panjang (m)

$l_0$  = Panjang awal (m)

### 2.8.3 Pengamatan struktur mikro

#### 2.8.3.1 Metalografi

Metalografi adalah studi fisik dan komponen logam yang menggunakan mikroskop atau mengetahui perkiraan sifat-sifat fisik dengan mengenali ciri-ciri khusus dari struktur mikronya ataupun sebagai karakteristik bahan. Contoh foto struktur mikro perlit besi cor kelabu sebagaimana pada gambar 10 berikut:



**Gambar 10.** 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”.

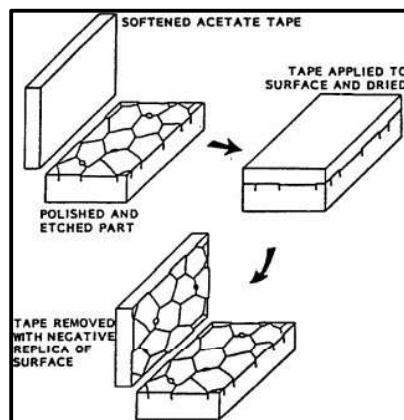
Pada pengamatan struktur mikro dapat dilihat gambaran struktur butiran dari suatu logam. Dengan syarat sebelum dilakukan pengujian, harus dilakukan preparasi yang benar agar dapat terlihat bentuk struktur mikro dari mikroskop dengan cara cahaya yang berasal dari mikroskop akan dipantulkan dan mengarah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



**Gambar 11.** Mikroskop Optik Untuk Logam

### 2.8.3.2 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 pengubahan 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 mikro strukturnya tersebut berada.



**Gambar 12.** 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 mikrostuktur untuk selanjutnya dilakukan perawatan (B.L. Bramfitt, 2004)