

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan sumber energi utama yang dibutuhkan untuk setiap peralatan listrik atau energi yang tersimpan dalam arus listrik. Sumber energi listrik bisa dikonversikan menjadi energi lain untuk menunjang pada aktivitas manusia seperti bisa menggerakan motor, lampu penerangan dan juga bisa memanaskan sesuatu. Sumber energi listrik tidak mudah untuk didapatkan karena bukan energi yang bebas, dalam hal ini energi listrik dikelola oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) (Topuh, et al., 2019). Di Indonesia, pembangkit listrik yang paling umum dan banyak digunakan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama. PLTU memiliki sejumlah kelebihan termasuk ketersediaan bahan bakar yang relatif melimpah di Indonesia, kemampuan untuk menghasilkan daya yang besar, serta infrastruktur yang sudah ada untuk mendukung penggunaan batu bara dalam pembangkitan listrik.

Prinsip kerja industri pembangkit listrik tenaga uap secara umum adalah pembakaran batu bara pada *boiler* untuk memanaskan air dan mengubah air menjadi uap panas (*superheated steam*). Uap panas tersebut digunakan menggerakkan turbin dan menghasilkan tenaga listrik dari kumparan medan magnet di generator (Saputri, et al., 2022). *Boiler* pada pembangkit listrik merupakan tempat perubahan fasa air menjadi fasa uap. Komponen-komponen ini adalah terutama dari paduan suhu tinggi seperti baja tahan karat, besi tuang, dan baja. Kegagalan pada *tube boiler*/ketel pipa menyebabkan terhentinya sistem pembangkit listrik dan berdampak pada keuntungan perusahaan. Hal ini telah diberitahukan kepada orang yang bekerja di generator, itu adalah kasus umum di pembangkit listrik. Investigasi kegagalan terhadap *tubes* sangat penting untuk menemukan penyebab masalah dan mencegahnya di masa depan (Drastiawati, et al., 2021).

Salah satu material yang sering digunakan dalam pembuatan *tube boiler* PLTU adalah baja karbon, seperti material 20G. Baja 20G memiliki sifat mekanik yang baik, termasuk kekuatan tarik yang tinggi dan ketangguhan yang baik. Namun, ketika *tube* material 20G digunakan dalam boiler PLTU dengan temperatur kerja yang berbeda dan pengoperasian dalam jangka waktu yang lama, perubahan struktur mikro dan sifat mekanik dapat terjadi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pengujian *creep* pada material 20G pada temperatur 550°C dengan beban 75,1 kg mengakibatkan penurunan sifat mekanik dan perubahan struktur mikro selama material terpapar *creep*. Perubahan ini ditandai dengan peningkatan ukuran butir dan penurunan rasio butir, yang mengindikasikan butir menjadi semakin pipih selama terpapar *creep* (Hasan, 2023).

Pemahaman yang mendalam tentang perubahan yang terjadi pada struktur mikro dan sifat mekanik tube material 20G dalam *boiler* PLTU setelah pengoperasian selama 11 tahun dengan temperatur kerja yang berbeda sangat penting untuk memastikan keandalan dan performa *boiler*.

Berdasarkan uraian diatas, maka penulis bermaksud meneliti dengan judul penelitian : **“ANALISIS STRUKTUR MIKRO DAN SIFAT MEKANIK *TUBE BOILER* PLTU DARI MATERIAL 20G DENGAN TEMPERATUR KERJA BERBEDA SETELAH 11 TAHUN PENGOPERASIAN”**

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perubahan sifat mekanik pada dua keadaan *tube* dalam *boiler* PLTU dengan temperatur kerja yang berbeda setelah 11 tahun pengoperasian?
2. Bagaimana perubahan struktur mikro pada dua keadaan *tube* dalam *boiler* PLTU dengan temperatur kerja yang berbeda setelah 11 tahun pengoperasian?
3. Bagaimana hubungan antara temperatur kerja, sifat mekanik dan struktur mikro *tube* dalam *boiler* PLTU setelah 11 tahun pengoperasian?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menguji sifat mekanik pada dua keadaan *tube* dalam *boiler* PLTU dengan temperatur kerja yang berbeda setelah 11 tahun pengoperasian.
2. Menguji struktur mikro pada dua keadaan *tube* dalam *boiler* PLTU dengan temperatur kerja yang berbeda setelah 11 tahun pengoperasian.
3. Menganalisis hubungan antara temperatur kerja, struktur mikro dan sifat mekanik pada dua keadaan *tube* dalam *boiler* PLTU setelah 11 tahun pengoperasian.

1.4 Batasan Penelitian

1. Sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah *waterwall tube* temperatur kerja 350°C dan *wingwall tube* temperatur kerja 570°C setelah 11 tahun pengoperasian.
2. Pengujian komposisi kimia menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*).
3. Pengujian sifat mekanik material meliputi uji kekerasan dan uji tarik.
4. Pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik.

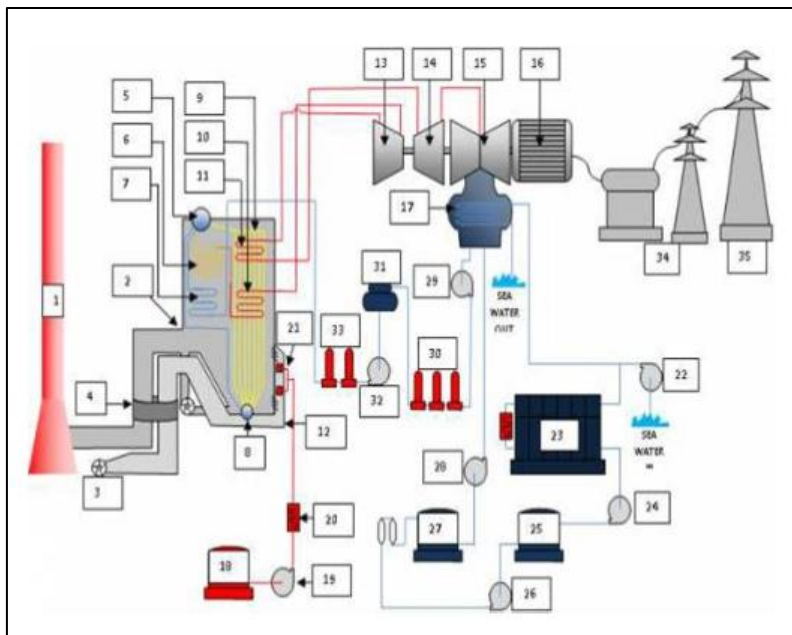
1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini akan memberi memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana temperatur kerja yang berbeda mempengaruhi perubahan struktur mikro dan sifat mekanik pada *tube* material 20G dalam *boiler* PLTU setelah pengoperasian selama 11 tahun. Temuan dan hasil penelitian ini dapat dijadikan referensi dan digunakan oleh peneliti lain dalam bidang yang sama atau bidang terkait untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Skema Pusat Listrik Tenaga Uap

PLTU adalah suatu pembangkit listrik dimana energi listrik dihasilkan oleh generator yang diputar oleh turbin uap yang memanfaatkan tekanan uap hasil dari penguapan air yang dipanaskan oleh bahan bakar di dalam ruang bakar (*boiler*). Sifat salah satu jenis PLTU adalah PLTU berbahan bakar batu bara (Gambar 2.1) (Rosyid & Firmansyah, 2013).



Gambar 1. Skema PLTU Batu Bara

Keterangan alat dan fungsi:

1. Stack atau *Chimney* (cerobong asap) merupakan alat untuk pengeluaran gas buang dari furnace menuju udara luar.
2. *Boiler* (steam generator) berfungsi untuk mengubah air menjadi uap.
3. *Forced Draft Fan* berfungsi menghasilkan udara *secondary* (*Secondary Air*) yang digunakan sebagai udara pembakaran pada *furnace boiler*.
4. *Air Heater* berfungsi sebagai pemanas awal udara.
5. *Steam Drum* adalah Alat untuk memisahkan uap dengan air. Uap menuju *backpass* dan air akan menuju *downcomer* untuk kembali dipanaskan didalam *furnace*.
6. *Primary Superheater* berfungsi sebagai pemanas pertama.

7. *Economizer* berfungsi untuk meningkatkan temperatur air (pemanasan awal) sebelum masuk ke *boiler*.
8. *Header* fungsinya adalah sebagai tempat terpasangan *tube economizer*, dimana pada *header* dibuat lubang-lubang yang sesuai dengan ujung-ujung pipa.
9. *Water Wall Tube* bertugas menerima dan mengalirkan air didalam *boiler*.
10. *Secondary Superheater*, pemanas lanjut.
11. *Reheater* berfungsi untuk menaikkan temperatur SH *Steam* tanpa mempengaruhi tekanannya.
12. *Wind Box* adalah kotak angin penampung udara sebagai udara pembakaran.
13. *High Pressure (HP) Turbine* adalah turbin bertekanan tinggi.
14. *Intermediate Pressure (IP) Turbine* adalah turbin bertekanan menengah.
15. *Low Pressure (LP) Turbine* adalah turbin bertekanan rendah.
16. *Generator* berfungsi untuk merubah energi mekanik pada *rotor generator* menjadi energi listrik.
17. *Condenser* berfungsi untuk mengembunkan uap menjadi air kembali dengan menggunakan pendinginan dari air laut.
18. *Marine Fuel Oil (MFO) Tank* adalah tanki penampung bahan bakar.
19. *MRO Pump (Maintenance Repair Overhaul)*
20. *Marine Fuel Oil (MFO) Heater* berfungsi untuk memanaskan bahan bakar dengan tujuan menurunkan viskositas (kekentalan).
21. *Burner* berfungsi untuk membakar campuran antara bahan bakar (*fuel*) dengan udara (*air*) di dalam ruang bakar (*furnace*) pada *boiler*.
22. *Circulating Water Pump* adalah pompa pendingin utama yang berfungsi untuk memompakan air laut sebagai media pendingin utama menuju kondensor.
23. *Desalination Plant* berfungsi untuk mengubah air laut (*brine*) menjadi air tawar (*fresh water*).
24. *Distillation Plant*
25. *Make Up Water Tank* (Tangki Air Penambah) berfungsi sebagai penampung air penambah yang akan digunakan untuk menambah kekurangan air di dalam sistem.
26. *Make Up Water Pump* berfungsi untuk memindahkan air dari MWT ke *hotwell*.
27. *Demin Water Tank* adalah tangka penampung air dari laut.
28. *Demin Water Pump* adalah pompa untuk memindahkan air.
29. *Condensate Pump* berfungsi untuk memindahkan *condensate* dari *hotwell* ke *deaerator*.
30. *Low Pressure (LP) Heater* fungsi untuk menaikkan temperatur secara bertahap atau sebagai pemanas lanjut yang mendapat panas dari uap ekstraksi turbin.
31. *Deaerator* berfungsi untuk memanaskan dan menghilangkan gas dan udara terlarut dalam air pengisi.
32. *Boiler Feed Pump* berfungsi untuk memasok air bertekanan tinggi ke *boiler* selama *start up*, keadaan normal, dan pada saat operasi darurat.

33. *High Pressure (HP) Heater* berfungsi untuk menaikkan temperatur secara bertahap atau sebagai pemanas lanjut yang menggunakan uap ekstraksi dari turbin sebagai sumber pemanasan.
34. *Switch Yard 18kV/150kV* adalah perangkat yang berfungsi sebagai pemutus dan penghubung aliran listrik yang berada di wilayah.
35. *Transmission* berfungsi untuk pengiriman aliran listrik.

2.2 Boiler

Boiler atau ketel uap adalah suatu perangkat mesin yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap. Proses perubahan air menjadi uap terjadi dengan memanaskan air yang berada didalam pipa-pipa dengan memanfaatkan panas dari hasil pembakaran bahan bakar. Pembakaran dilakukan secara kontinyu didalam ruang bakar dengan mengalirkan bahan bakar dan udara dari luar.

Uap yang dihasilkan *boiler* adalah uap *superheat* dengan tekanan dan temperature yang tinggi. Jumlah produksi uap tergantung pada luas permukaan pemindah panas, laju aliran, dan panas pembakaran yang diberikan. Boiler yang konstruksinya terdiri dari pipa-pipa berisi air disebut dengan *water tube boiler* (Nurhasanah & Firdaus, 2016).

1. *Jenis boiler* menurut bahan bakar dapat dikelompokkan menjadi:
 - *Boiler* bahan bakar padat: Terutama digunakan batu bara. Komponen bahan bakar dan karakteristik abu adalah faktor sangat penting dalam desain boiler.
 - *Boiler* bahan bakar cair: Dengan kecepatan gas buang yang lebih tinggi dan volume dapur yang lebih kecil.
 - *Boiler* bahan bakar gas: Terutama digunakan gas alam atau gas dapur tinggi, dengan kecepatan gas buang yang lebih tinggi dan volume dapur yang lebih kecil.
2. *Jenis boiler* berdasarkan posisi air dan gas panas dapat di klasifikasikan sebagai berikut:
 - *Boiler* pipa air (*water tube*): Api dan gas panas hasil pembakaran melintas diluar *tube*, sedangkan air/uap mengalir didalam *tube*. Cocok sekali dipakai untuk pembangkit uap berkapasitas besar dan bertekanan tinggi.
 - *Boiler* pipa api (*fire tube*): Api dan gas panas hasil pembakaran melintas didalam *tube*, sedangkan air/uap berada diluar *tube* didalam bejana.
3. *Jenis boiler* menurut tekanan dapat di klasifikasikan sebagai berikut:
 - *Boiler* tekanan rendah dan sedang ($<10\text{MPa}$): Digunakan sebagai *industrial boiler*, sirkulasi natural, beberapa diantaranya dengan *boiler bank*, dapur dengan *burner* atau *stoker*, tanpa *reheater*.
 - *Boiler* tekanan tinggi (10-14 MPa): Digunakan sebagai *utility boiler*, biasanya sirkulasi natural, dengan *reheater* bila tekanannya $\geq 14\text{ Mpa}$.

4. Jenis *boiler* menurut sirkulasi dapat dibagi sebagai berikut:

- *Boiler* sirkulasi alami/natural: Sirkulasi fluida di pipa *evaporator* akibat perbedaan dalam massa jenis antara campuran air-uap di *riser* dan air di *downcomer*. Dengan dua atau satu drum, hanya dapat beroperasi pada tekanan subkritis.
- *Boiler* sirkulasi paksa: Sirkulasi fluida di pipa *evaporator* dihasilkan secara paksa oleh pompa sirkulasi yang dipasang pada sirkuit sirkulasi dengan drum tunggal atau separator, hanya dapat beroperasi pada tekanan subkritis (Rosyid & Firmansyah, 2013).

2.3 Waterwall Tube

Waterwall pada *boiler* di PLTU mempunyai peranan penting, yaitu merupakan media panas yang merubah air baku menjadi uap jenuh, *waterwall* ini berupa pipa-pipa air (*riser*) yang membentuk dinding mengelilingi *furnace* secara vertikal. Air yang telah di panaskan oleh *econoimizer* dan di pisahkan di *steam drum* kemudian dialirkan melalui *down comer* menuju *riser* (aliran naik) yaitu *waterwall* untuk di rubah menjadi uap. Apabila terdapat endapan dan korosi pada inside *waterwall tube* akan menyebabkan kehilangan efisiensi yang dapat mengakibatkan kegagalan dalam pipa *boiler* dan ketidakmampuan memproduksi *steam*. Endapan bertindak sebagai isolator dan memperlambat perpindahan panas (Asof & P, 2013). Saat ketel beroperasi pada beban rendah, fluida kerja pada pipa dinding air *boiler* terkena fluks panas yang tinggi di dalam tungku, yang dapat menyebabkan penurunan perpindahan panas, tabung menjadi terlalu panas atau bahkan kebocoran. Oleh karena itu, memang demikian sangat penting untuk mempelajari keandalan siklus hidrodinamik boiler selama *peak shaving* (operasi beban rendah) (Guo, et al., 2022). Terjadi proporsi kenaikan dan penurunan terhadap efisiensi *Boiler-Furnace* yang dapat dievaluasi dari beberapa faktor diantaranya: pembakaran yang tidak sempurna yang terjadi dalam ruang bakar *furnace*, temperatur udara pembakaran batu bara diatas 900°C yang akan menimbulkan aglomerasi atau penggumpalan abu dan pasir di dalam *furnace* dan menghambat terjadinya perpindahan panas di dalam ruang bakar *furnace*, dan pembentukan *slagging* dan *fouling* yang terjadi pada permukaan panas seperti *waterwall tube* dan *superheater* (Wulandari & Basri, 2022).



Gambar 2. *Waterwall Tube* Setelah 11 Tahun Pengoperasian

2.4 Wingwall Superheater

Wingwall terletak pada bagian samping *boiler*, dan keluar di bagian atas *boiler*, sehingga *wingwall* dapat berperan sebagai *evaporator* ataupun sebagai *superheater*. *Wingwall superheater* adalah sejenis *superheater* panel yang memanjang dari *furnace*. Tepi tabung, yang dilas bersama, biasanya dibangun di dinding depan *boiler*. Tabung biasanya terbuat dari baja karbon. *Wingwall superheater* menerima kalor terutama melalui radiasi.



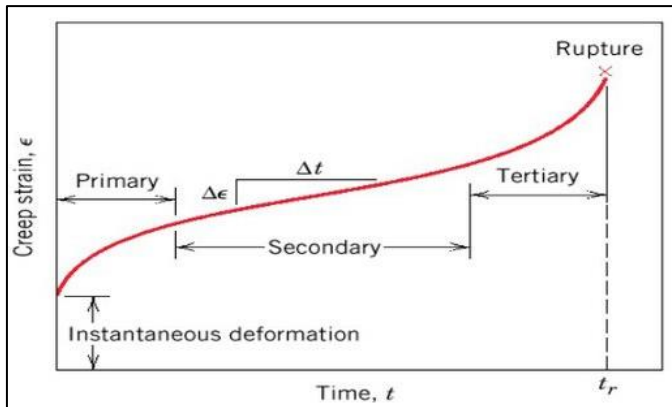
Gambar 3. *Wingwall Tube* Setelah 11 Tahun Pengoperasian

2.5 Perilaku Material pada Temperatur Tinggi

Perilaku material terhadap temperatur tinggi sangat bervariasi tergantung pada jenis materialnya. Contohnya, temperatur yang tinggi pada material baja akan sangat berpengaruh terhadap sifat dan karakteristiknya. Apabila suatu material baja diberikan temperatur melebihi 200°F (93°C) maka kurva tegangan-regangan mulai menjadi tidak linier yang kemudian secara bertahap titik leleh yang jelas menghilang. Pada temperatur antara 800°F sampai dengan 1.000°F (430°C sampai dengan 540°C) akan terjadi laju penurunan yang maksimum. Modulus elastisitas, kekuatan leleh dan kekuatan tarik akan menurun apabila temperatur semakin tinggi (Wibawa & Suprpto, 2011).

2.5.1 Fenomena Creep

Creep adalah salah satu fenomena mekanik dimana suatu material menerima beban tetap pada temperatur tinggi, yang akan mengakibatkan deformasi dalam waktu yang lama. Fenomena *creep* dapat terjadi pada berbagai suhu, namun *creep* yang ideal terjadi pada suhu antara 0,3 sampai 0,6 dari titik leleh material. Ada tiga tahapan pada *creep* dapat dilihat pada gambar dibawah :



Gambar 4. Tahapan Pada Creep

Laju regangan mulur semakin berkurang dengan bertambahnya waktu, tahap ini disebut *primary creep* atau *transient creep*. Pada tahap kedua atau biasa disebut sebagai *secondary creep*, laju regangan *creep* menjadi konstan, hal ini disebabkan karena terjadinya keseimbangan antara kecepatan proses pengerasan regangan dan proses pemulihan (*recovery*). Tahap ini adalah tahap yang paling penting dalam proses mulur, karena pada saat ini material mengalami laju mulur yang terendah dan konstan dalam waktu yang lebih lama. Tahap mulur ketiga adalah *tertiary creep*, dimana terjadi penyempitan local atau pembentukan rongga internal hingga pada akhirnya laju *creep* bertambah besar hingga terjadi kerusakan (Marlyn, et al., 2013).

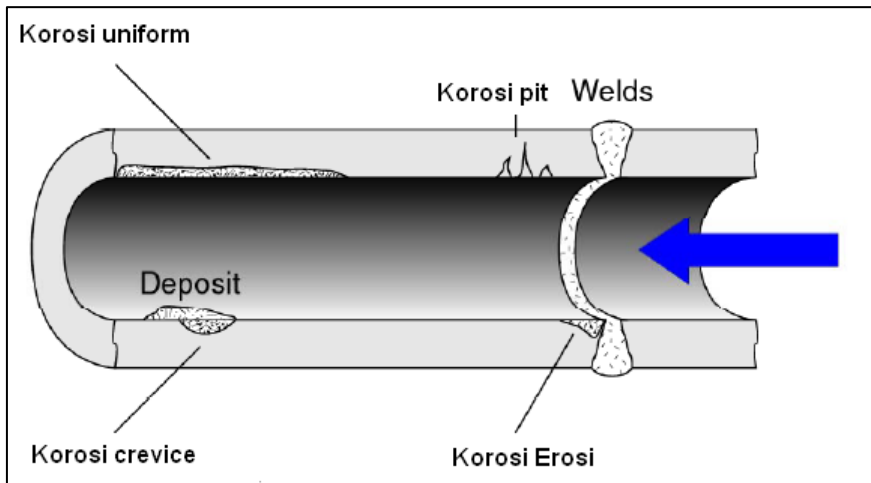
2.5.2 Korosi Temperatur Tinggi

Korosi secara umum didefinisikan sebagai proses oksidasi pada suatu logam dengan waktu proses senyawa kurun waktu yang lama. Suatu logam yang terserang oleh korosi lebih disebabkan karena faktor lingkungan yang menjadikan penggalak dan dimana disitu ada unsur-unsur kandungan senyawa asam yang merupakan pemicu terjadinya proses senyawa oksidasi, karena proses elektrolisis atau pemindahan elektron, maka disanalah pada akhirnya terjadilah proses korosi pada logam. Ada dua macam istilah korosi pada logam suhu tinggi (Asof & P, 2013).

1. Korosi yang disebabkan suhu (temperatur) tinggi, yaitu pada suhu tinggi laju oksidasi logam-logam meningkat atau unsur-unsur pencetus korosi seperti klor, nitrogen, atau unsur pembentuk asam mudah bereaksi dengan logam yang mempunyai ketahanan korosi tinggi, seperti nikel, *chromium*, aluminium, titanium dan lain-lain.
2. Korosi panas (*hot corrosion*), yaitu kombinasi antara oksidasi dan reaksi-reaksi dengan belerang, natrium, nitrogen, klor dan pengotor-pengotor lain pencetus korosi, baik diudara yang dihisap maupun yang berasal dari bahan bakar, atau larutan media yang lain.

2.6 Korosi pada Pipa

Korosi merupakan penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungannya. Secara umum korosi dapat terjadi karena hilangnya logam pada bagian yang terpengaruh terhadap lingkungan. Korosi terjadi dalam berbagai macam bentuk, mulai dari korosi merata pada seluruh permukaan logam sampai dengan korosi yang terkonsentrasi pada bagian tertentu saja (Irwanto, et al., 2013).



Gambar 5. Korosi Pada Pipa

- 1) Korosi Uniform : Korosi yang berbentuk lapisan tipis yang terbentuk antara metal dengan lingkungannya. Korosi ini terjadi pada seluruh bagian pipa yang diakibatkan akibat terjadinya reaksi kimia antara material pipa dan lingkungannya.
- 2) Korosi Crevice : Korosi yang terfokus pada sebuah area tertentu. Korosi ini terjadi pada sambungan pipa yang memiliki jenis material yang sama, korosi ini terjadi akibat adanya air yang terperangkap pada daerah tersebut.
- 3) Korosi Pit : Korosi yang memiliki bentuk seperti sumur. Korosi ini bisa saja terjadi dimana saja dikarenakan korosi ini terjadi akibat adanya impuritas dari bahan tersebut yang menyebabkan laju korosi yang tidak sama dan membuat sumur di bagian yang memiliki laju korosi lebih besar.
- 4) Korosi Erosi : Korosi yang berbentuk pengikisan lapisan metal akibat kecepatan pergerakan antara metal dan lingkungannya. Biasanya terjadi di daerah-daerah siku pada pipa.

2.7 Evolusi Struktur Mikro pada Material yang Beroperasi

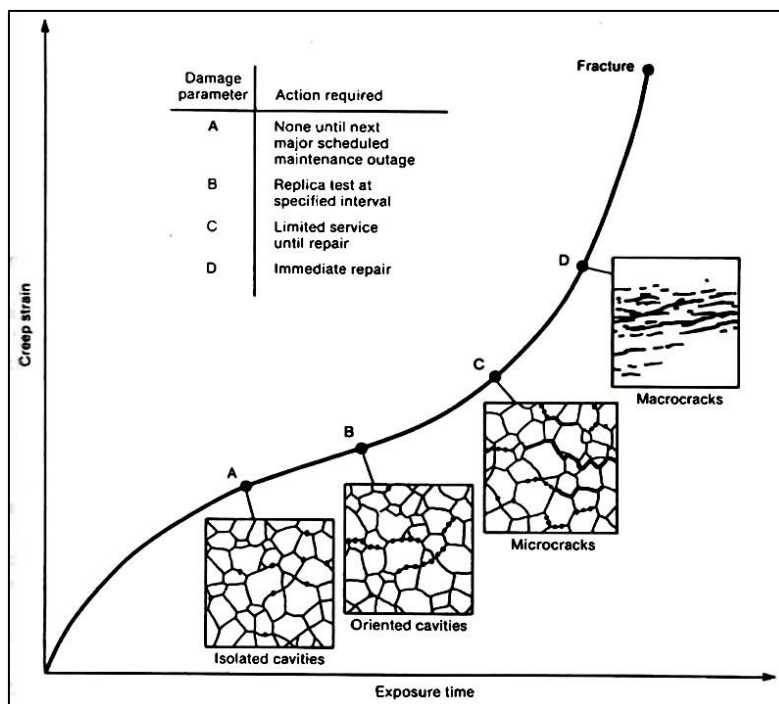
Sifat *creep* pada baja tahan panas dikendalikan oleh komposisi kimia dan mikrostruktur baja tersebut. Jika komposisi kimia telah diketahui, mikrostruktur baja ini bergantung pada perlakuan panas, suhu, dan waktu paparan *creep*. Mekanisme

penguatan yang paling penting pada baja ini, yang berfungsi selama paparan *creep* suhu tinggi, adalah penguatan presipitasi dan penguatan larutan padat. Telah terbukti bahwa baik tegangan bukti pada suhu kamar maupun kekuatan putus *creep* meningkat ketika kepadatan fasa kedua meningkat. Pada saat yang sama, laju *creep* menurun. Jelas bahwa sifat mekanik baja tahan panas akan menurun ketika terpapar pada suhu tinggi dalam jangka panjang. Sejalan dengan itu, mikrostrukturnya juga akan mengalami degradasi secara signifikan. Adapun karakteristik evolusi mikrostruktur, fenomena utama degradasi dijelaskan di bawah ini :

1. Pertumbuhan presipitat dan transformasi fasa.
2. Dekomposisi mikrostruktur asli.
3. Pembentukan *microvoid* di batas butir.

Evolusi mikrostruktur ini secara langsung berkaitan dengan penurunan kekuatan *creep* dan sifat lainnya, sehingga sering dianggap sebagai tanda paparan panas yang berlebihan, dan telah diterima secara umum sebagai indeks degradasi termal kualitatif (Hu, 2011).

2.7.1 Pembentukan *Microvoid* di Batas Butir



Gambar 6. Stadium of microvoid at grain boundaries by Neubauer

Konsep pembentukan *microvoid* pada batas butir telah banyak dipelajari dan dikembangkan pada tahun 1970-an, dan diakui serta diterapkan secara umum di semua negara Eropa dengan klasifikasi Neubauer. Prinsip ini didasarkan pada fakta

bahwa evolusi *creep* pada baja tahan panas terkait dengan munculnya rongga beberapa waktu sebelum pecah. Rongga-rongga ini secara bertahap membentuk *microcrack* melalui interkoneksi dan pada akhirnya memicu pecahnya material. Ukuran dan kepadatan rongga meningkat seiring dengan perkembangan *creep* dari tahap *primary* ke *tertiary*. Ukuran rongga sangat bergantung pada jenis material, namun biasanya berada pada kisaran ukuran mikron (seringkali lebih kecil); oleh karena itu, mereka biasanya disebut sebagai *microvoid* atau "*micro-cavities*". Karena ukurannya yang kecil, mereka tidak dapat dideteksi oleh teknik NDT seperti uji penetrasi, uji ultrasonik, uji magnetik, uji radiografi, dan investigasi metalografis diperlukan (Hodžić & Hajro, 2007).

2.7.2 Proses Speriodisasi

Ferrite/ Bainite						
						
Class/Stadium	A	B	C	D	E	F
Approx. Damage	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	End Of Life
Approx. Life Remaining	100 %	80 %	60 %	40 %	20 %	None
Nature	No Creep Defect, Ferrite and distinct transformation product	Incipient Spheroidisation and isolated carbide precipitation, notably at grain boundaries	Evident Spheroidisation of transformation product Ferrite and transformation product easily distinguishable	Full Spheroidisation of transformation product. No significant carbide precipitation within ferrite grains	Full Spheroidisation. Carbides evenly dispersed throughout grains and at grain boundaries	Full Spheroidisation. Significant coalescence between carbides
Action	None	Reinspection after Approx. 100.000 service hours	Reinspection after Approx. 50.000 service hours	Reinspection after Approx. 35.000 service hours	Reinspection after Approx. 10.000 service hours	Management must be informed immediately grinding to determine crack depth

Gambar 7. Klasifikasi Stadium Kerusakan Struktur Mikro untuk Bahan *Ferrite/Bainite* dan *Ferrite/Pearlite* Berdasarkan ERA Technology

Banyak penelitian telah dilakukan tentang evolusi karbida yang ada pada baja akibat paparan *creep*. Pemisahan dan pembesaran karbida dianggap sebagai indikator degradasi material akibat paparan *creep* (Hu, 2011). Disamping terbentuknya *void*, maka fasa perlit akan mengalami sferoidisasi karena terkekspose ke temperatur tinggi dalam waktu lama (Subekti, 2010). Tahapannya dimulai dari material tanpa kerusakan *creep*, dengan struktur mikro yang masih utuh, hingga tahap terakhir di mana material menunjukkan sferoidisasi penuh dengan partikel karbida yang menyebar merata. Proses ini secara bertahap menyebabkan pengurangan kekuatan

material dan meningkatkan risiko kegagalan. Setiap tahap dalam tabel mengindikasikan tingkat kerusakan yang berbeda, yang berkorelasi dengan sisa umur material, memberikan panduan untuk inspeksi atau penggantian berdasarkan kondisi mikrostruktur yang teramati. ERA *Technology* memberikan klasifikasi ini untuk membantu memprediksi kapan material akan mencapai akhir masa pakainya, serta memberikan rekomendasi untuk inspeksi ulang pada interval tertentu tergantung pada tingkat kerusakan yang terjadi.

2.8 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).

2.9 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 & Rethwisch, 2018). Pengujian mikrostruktur merupakan salah satu pengujian dan karakterisasi yang penting dalam ilmu material. Pengujian mikro struktur 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).

2.10 Pengujian Mekanik

Sifat mekanik material mencerminkan hubungan antara beban atau gaya yang diberikan terhadap respons atau deformasinya. Sifat-sifat mekanik material yang sering diuji secara rinci untuk mengetahui kemampuan dari material yang akan digunakan adalah kekuatan (*strength*) merupakan kemampuan suatu material untuk menerima tegangan tanpa menyebabkan material menjadi patah, kekakuan (*stiffness*) adalah kemampuan suatu material untuk menerima tegangan atau beban tanpa mengakibatkan deformasi atau defleksi, elastisitas (*elasticity*) didefinisikan

sebagai kemampuan material untuk menerima tegangan tanpa mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk yang permanen setelah tegangan dihilangkan, plastisitas (*plasticity*) adalah kemampuan material untuk mengalami deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen) tanpa mengalami kerusakan, keuletan (*ductility*) adalah suatu sifat material yang digambarkan seperti kabel dengan aplikasi kekuatan tarik. Material *ductile* ini harus kuat dan lentur, ketangguhan (*toughness*) merupakan kemampuan material untuk menyerap sejumlah energi tanpa mengakibatkan terjadinya kerusakan, kegetasan (*brittleness*) adalah suatu sifat bahan yang mempunyai sifat berlawanan dengan keuletan, kelelahan (*fatigue*) merupakan kecenderungan dari logam untuk menjadi patah bila menerima beban bolak-balik (*dynamic load*) yang besarnya masih jauh dibawah batas kekuatan elastisnya, mulur (*creep*), merupakan kecenderungan suatu logam untuk mengalami deformasi plastis bila pembebanan yang besarnya relatif tetap dilakukan dalam waktu yang lama pada suhu yang tinggi dan kekerasan (*hardness*) merupakan ketahanan material terhadap penekanan atau penetrasi (Rusjdi, et al., 2016).

2.10.1 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 indenter. 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 indenter (mm)
 d = diameter tampak tekan (mm)

2. Metode Vickers

Metode vickers dilakukan dengan menekan indenter berupa limas diamond dengan sudut puncak 136°. 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)

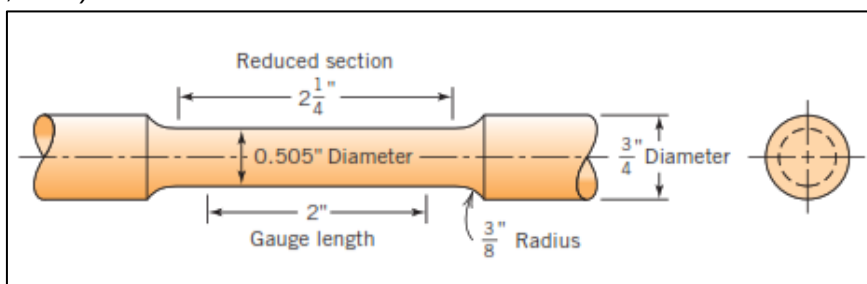
d = Diameter diagonal (mm)

3. Metode Rockwell

Metode rockwell dilakukan dengan menekan indenter berupa kerucut diamond dengan sudut puncak 120° 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).

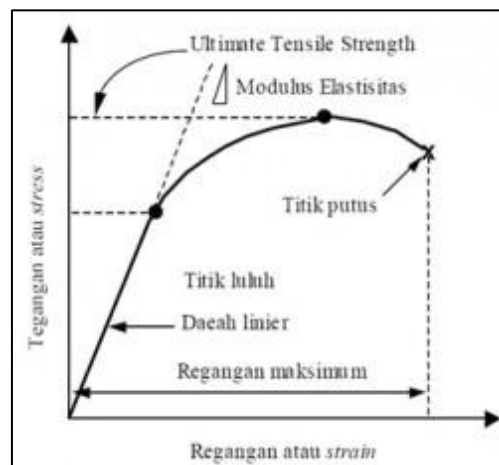
2.10.2 Pengujian Tarik

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 & Rethwisch, 2018).



Gambar 9. Kurva Tegangan Regangan (Stress-Strain)

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

Dimana:

σ = Tegangan (*stress*)
 F = Gaya tarikan (N)
 A_0 = Luas penampang awal (m²)

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

Dimana:

ε = Regangan (*strain*)
 Δl = Pertambahan panjang (m)
 l_0 = Panjang awal (m)

2.11 Larson Miller Parameter

Parameter Larson Miller (LM) dikembangkan untuk memperkirakan kekuatan mulur jangka panjang tahan panas bahan menggunakan hasil yang diperoleh dalam waktu

singkat. Parameter waktu-suhu serupa telah dikembangkan untuk tujuan yang sama. Diantaranya adalah LM parameter adalah yang paling umum digunakan di seluruh dunia. Telah diketahui bahwa konstanta LM adalah sekitar 20 untuk baja karbon, baja paduan rendah, dan baja tahan karat austenitik ketika waktu dan suhu diukur masing-masing dalam satuan jam dan Kelvin (Tamura, et al., 2013).

$$LMP = T[C + \log(t_r)] \quad (5)$$

Dimana:

- LMP = Larson Miller Parameter
- T = Temperatur (K)
- C = Konstanta Material
- t_r = Waktu Sampai Terjadinya Kegagalan (jam)