

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Sebagai pendukung pengerjaan penelitian ini penulis mencantumkan beberapa referensi penelitian sebelumnya yang sejenis dengan penelitian kali ini.

1. Iwan Toni Saputro & Meilinda Nurbanasari (2023), "*Failure Analysis of Secondary Superheater Tube at 600 MW Coal Power Plant*," G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan, 7(2), 474–483.

Penelitian ini secara mendalam menganalisis kegagalan *tube secondary superheater* berbahan ASTM SA 213 T91 pada PLTU 600 MW. Kegagalan yang ditemukan berupa pecah dengan bibir tipis (*thin lip rupture*) akibat *short term overheating* yang diawali fenomena *bulging/swelling*. Pengujian yang dilakukan meliputi inspeksi visual, pengujian kekerasan Vickers, analisis struktur mikro, dan uji XRD pada deposit. Hasil pengamatan visual menunjukkan tidak ada deposit menempel di dinding dalam *tube*, namun ditemukan serbuk deposit di dalam *tube* yang terbawa aliran *steam* dan menumpuk di daerah *elbow*. Analisis XRD mengidentifikasi adanya magnetit (Fe_3O_4) dan hematit (Fe_2O_3) pada deposit, menandakan eksfoliasi lapisan oksida akibat temperatur tinggi. Penipisan pada area ruptur menyebabkan *tube* tidak mampu menahan tekanan *steam*, sehingga terjadi *bulging* dan akhirnya pecah. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kegagalan terjadi karena terganggunya aliran *steam* akibat penumpukan serbuk deposit di *elbow*, bukan karena lapisan oksida yang menempel di dinding *tube*. Rekomendasi yang diberikan adalah penggantian *tube* pada area bermasalah, menjaga temperatur metal pipa di bawah 590°C , dan operasi unit secara kontinu dengan beban konstan untuk mencegah fluktuasi beban yang mempercepat eksfoliasi oksida.

2. Janu Kurniawan (2024), "*Analisis Kerusakan Tube Primary Superheater PLTU Tanjung Jati B*," Skripsi, Universitas Sangga Buana YPKP Bandung.

Penelitian ini menganalisis penyebab kegagalan *tube primary superheater* pada PLTU Tanjung Jati B. Pengujian dilakukan pada sampel *tube* yang diambil pada November 2023. Hasil pengujian visual menemukan adanya penipisan di sisi luar *tube*

akibat Semburan uap *sootblower* bertekanan tinggi, serta deformasi *bulging* yang menunjukkan *overheating*. Pengamatan visual pada sisi *inner tube* tidak ditemukan oksidasi tebal, korosi, maupun endapan deposit. Pengujian dimensi menunjukkan diameter maksimum *tube* pada area *bulging* sebesar 57,09 mm dan *minimum* 45,69 mm, sedangkan tebal maksimum *tube* 6,28 mm dan *minimum* 2,13 mm. Pada area pecah, tebal *tube* hanya sekitar 0,25 mm, jauh di bawah minimal *wall thickness*. Uji identifikasi material menunjukkan kandungan unsur material sesuai spesifikasi SA 213 T12. Uji metalografi memperlihatkan struktur mikro ferit-perlit dan dekarburisasi pada sisi *inner tube*. Uji kekerasan pada area normal masih dalam batas standar (123-170 HV), namun pada area *failure* terjadi peningkatan kekerasan yang menyebabkan material menjadi getas. Uji SEM-EDS pada *inner tube* menunjukkan kandungan deposit berupa oksigen dan *ferrous (oxide scale)*. Kesimpulan penelitian ini adalah kegagalan *tube* disebabkan oleh kombinasi penipisan akibat erosi *sootblower* dan *overheating*, yang menyebabkan kekuatan logam menurun dan material menjadi getas sehingga tidak mampu menahan tekanan uap. Rekomendasi yang diberikan antara lain *re-design tube*, penambahan *erosion shield* untuk *sootblower*, *coating* pada *tube*, dan pemeliharaan rutin sisi *boiler*.

3. Rusnaldy, Tauviqirrahman, M., Iskandar, N. (2022), "Analisa Kerusakan pada *Secondary Superheater Tube* di Sistem *Boiler* pada *Power Plant* Akibat Proses *Soot Blowing*," *Rotasi*, 24(4), 41–48.

Penelitian ini melakukan analisis kegagalan pada *secondary superheater tube* berbahan ASTM SA-213-T12 yang telah beroperasi sekitar 10 tahun di sebuah PLTU. *Tube* ini didesain untuk masa operasi 30 tahun, namun ditemukan penipisan pada dinding luar *tube*. Analisis dilakukan melalui inspeksi visual, analisis metalurgi, analisis mekanik, dan simulasi termal. Hasil inspeksi visual menunjukkan tidak ada kerusakan akibat deformasi plastis atau efek termal, namun ditemukan penipisan dinding luar *tube* akibat erosi dari proses *soot blowing* yang digunakan untuk membersihkan *fly ash* pada permukaan *tube*. Penelitian ini menegaskan bahwa erosi akibat *soot blowing* adalah penyebab utama penipisan dinding *tube*, bukan deformasi termal atau plastis. Rekomendasi yang diberikan adalah perlunya pengendalian operasi *sootblower* dan pemantauan periodik ketebalan *tube* untuk mencegah kegagalan dini pada *superheater tube*.

4. Akbar, S., Nursyifaulkhair, D., Nurdiwijayanto, L., Noviyanto, A., Rochman, N.T. (2023), "*High-Temperature Failure Of Steel Boiler Tube Secondary Superheater In A Power Plant*" *Sinergi*, 27(1), 1–6.

Penelitian ini menganalisis kegagalan *tube secondary superheater* berbahan baja karbon rendah 2.25Cr-1Mo yang mengalami ruptur setelah 26 jam operasi. Melalui uji mikro struktur, analisis unsur, dan uji mekanik, ditemukan bahwa kenaikan suhu operasi secara tiba-tiba menjadi penyebab utama degradasi material. Mikro struktur menunjukkan butir memanjang dan mikro retak pada batas butir, sedangkan nilai hoop stress mencapai 42,47 MPa—melampaui batas izinnya 23,5 MPa pada 605°C. Pada *tube* yang tidak gagal, mikro struktur masih berbentuk *equiaxed*. Kegagalan disimpulkan terjadi akibat kombinasi *overheating*, tegangan berlebih, dan perubahan mikro struktur. Penelitian merekomendasikan inspeksi rutin dan penggantian *tube* lama untuk mencegah kegagalan serupa.

5. Hossein RK, et al. (2018), "*Root Cause Failure Analysis of Superheated Steam Tube Boiler: Microstructure and Mechanical Behavior Investigation*" *Engineering Failure Analysis*, Volume 94, Pages 55-71.

Penelitian ini menyelidiki penyebab utama kegagalan *tube superheater boiler* yang berasal dari paparan suhu tinggi secara berulang. Studi ini menggunakan analisis mikro struktur, pengujian mekanik, dan inspeksi visual untuk memahami mekanisme kerusakan seperti oksidasi, *creep*, dan kelelahan termal. Ditemukan bahwa perubahan mikro struktur seperti pembentukan karbida sekunder serta retakan mikro pada batas butir menjadi penyebab utama penurunan sifat mekanik yang menyebabkan keretakan dan pecahnya *tube*. Penelitian menyajikan model kegagalan berdasarkan simulasi termal dan mekanik, serta merekomendasikan strategi pengoperasian dan pemeliharaan untuk memperpanjang umur pakai *tube superheater*. Artikel ini lengkap dengan data pengujian laboratorium, foto mikroskopi, dan analisis numerik.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

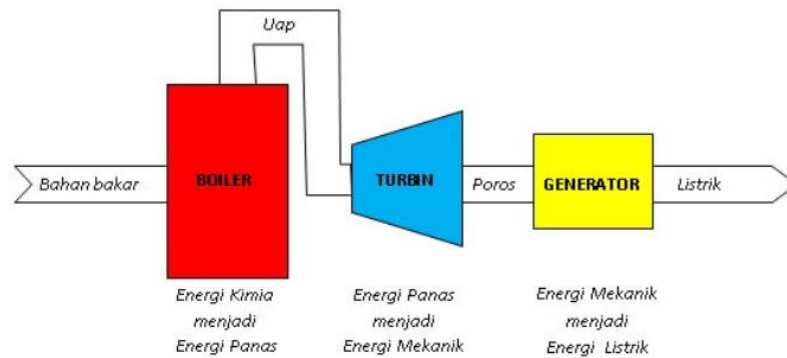
Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu jenis pembangkit yang mengubah energi panas bahan bakar menjadi energi listrik melalui proses konversi termal [6], [7]. Fungsi utama PLTU adalah menyediakan daya listrik dalam kapasitas besar dan stabil, sehingga mampu menjadi sumber daya pada beban dasar (*base load*) yang menopang sistem kelistrikan nasional [6]. PLTU pada umumnya menggunakan bahan bakar batu bara sebagai sumber energi yang dominan karena kelimpahan sumber daya, harga yang terjangkau, dan infrastruktur yang sudah terbentuk dengan baik pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia [6], [7]. Selain itu, tren *co-firing* biomassa sebagai bahan bakar campuran mulai banyak diterapkan untuk efisiensi sekaligus strategi pengurangan emisi karbon dioksida (CO_2) dan gas rumah kaca lain guna mendukung kebijakan energi terbarukan nasional [8].



Gambar 2. 1 PLTU Batu Bara

Prinsip kerja PLTU dimulai dengan pembakaran bahan bakar di ruang *boiler* yang bertujuan mengubah air menjadi uap dengan tekanan dan suhu tinggi melalui proses transfer panas. Uap yang dihasilkan kemudian dipanaskan hingga menjadi uap *superheated* yang memiliki temperatur lebih tinggi dan memiliki kandungan air minimal. Uap *superheated* ini dialirkan ke turbin uap di mana energi panasnya diubah menjadi energi mekanik putar dengan memanfaatkan ekspansi uap pada bilah turbin. Energi mekanik tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan generator penghasil arus listrik. Setelah melewati turbin, uap bekas dialirkan ke kondensor,

yang mendinginkan dan mengembalikannya menjadi air sebagai bagian dari proses siklus tertutup agar air dapat dimanfaatkan kembali sebagai media pemanas di *boiler* [6], [9].



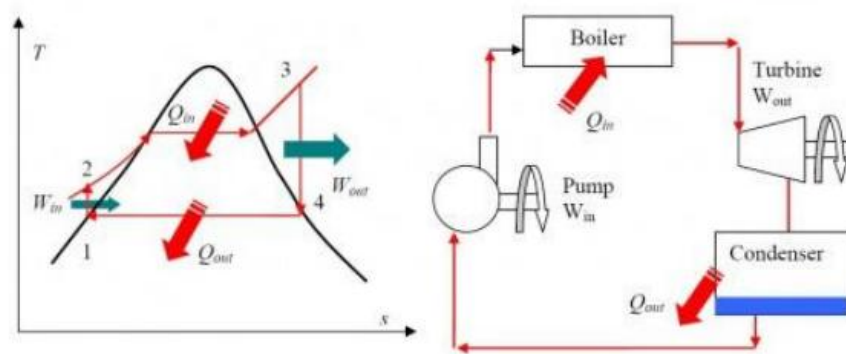
Gambar 2. 2 Proses Konversi Energi Pada PLTU

PLTU secara luas dikenal sebagai pembangkit yang mampu menghasilkan listrik berkapasitas besar dan cocok untuk beban dasar (*base load*) secara stabil, menjadikannya pilar utama dalam menjaga keandalan pasokan listrik nasional. Teknologi *boiler supercritical* dan *ultra-supercritical* memungkinkan operasi pada tekanan hingga 240 bar dan temperatur sampai 600°C, dengan efisiensi termal lebih dari 45% [7]. Namun, pembakaran batu bara menyebabkan emisi gas rumah kaca seperti CO₂, SO₂, dan NO_x serta partikulat yang berpengaruh pada pencemaran udara dan perubahan iklim [7], [8]. Oleh karena itu, berbagai teknologi pengendalian dan mitigasi emisi, seperti *Electrostatic Precipitator (ESP)*, *Flue Gas Desulfurization (FGD)*, dan *Low NO_x Burner* diterapkan untuk mengurangi polutan agar memenuhi standar lingkungan yang ketat [6], [8].

Inovasi dan pengelolaan proses pembakaran terus dikembangkan dengan harapan mampu meningkatkan efisiensi sekaligus menjaga ketahanan sistem ketenagalistrikan nasional, sambil meminimalkan dampak lingkungan. Selain itu, penerapan bahan bakar alternatif dilakukan untuk mendukung transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan berkelanjutan, tanpa mengorbankan ketersediaan energi yang andal dan stabil [7], [10]. Dengan pendekatan ini, PLTU tetap dapat berperan sebagai salah satu sistem pembangkitan listrik utama, terutama di negara berkembang seperti Indonesia yang masih bergantung pada batu bara [6], [8], [9].

2.2.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine merupakan siklus termodinamika yang digunakan pada PLTU untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik melalui fluida kerja berupa air dan uap. Siklus ini dirancang untuk bekerja pada perubahan fase cair–uap, sehingga dapat menghasilkan ekspansi fluida yang besar untuk memutar turbin secara efisien [6], [9].



Gambar 2. 3 Siklus Rankine

Siklus Rankine terdiri dari empat proses utama sebagai berikut:

- Proses 1–2 : Air jenuh dari kondensor dipompa menuju *boiler* dengan tekanan tinggi menggunakan *feedwater pump*. Pada proses ini energi yang dibutuhkan relatif kecil karena fluida masih berupa cairan dengan volume spesifik rendah.
- Proses 2–3 : Air bertekanan tinggi dipanaskan di dalam *economizer*, *evaporator*, dan *superheater* hingga berubah menjadi uap *superheated*.
- Proses 3–4 : Uap *superheated* diekspansikan melalui turbin sehingga menghasilkan energi mekanik untuk memutar generator. Pada tahap ini tekanan dan temperatur uap menurun secara bertahap seiring terjadinya ekspansi.
- Proses 4–1 : Uap keluaran turbin masuk ke kondensor dan mengalami proses kondensasi menjadi air jenuh cair dengan melepas kalor ke media pendingin, biasanya air laut atau air sungai. Fluida kembali ke kondisi awal untuk mengulangi siklus.

Untuk meningkatkan efisiensi siklus, PLTU umumnya menambahkan beberapa teknologi pendukung seperti:

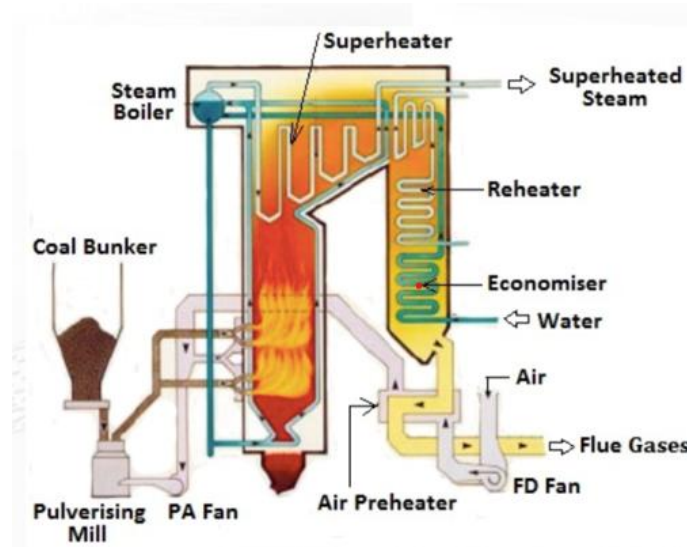
- *Reheater* untuk memanaskan kembali uap sebelum masuk ke tahap turbin tekanan menengah/ rendah.
- *Regenerative feedwater heating* menggunakan ekstraksi uap dari turbin untuk memanaskan kembali air umpan (*feedwater*) sehingga mengurangi kebutuhan energi di *boiler*.
- *Superheater* untuk meningkatkan temperatur uap sehingga mengurangi risiko kondensasi di turbin.

Efisiensi termal Siklus Rankine sangat bergantung pada rentang temperatur dan tekanan kerja. Semakin tinggi temperatur akhir pemanasan uap, Semakin besar konversi energi panas menjadi kerja mekanik dan Semakin efisien operasi pembangkit [6], [9].

Dengan penerapan pengaturan siklus yang tepat, PLTU mampu menghasilkan daya besar secara kontinu dan stabil sehingga sangat cocok dijadikan sebagai sumber energi utama dalam sistem ketenagalistrikan.

2.2.3 Sistem *Boiler* Pada PLTU

Boiler pada PLTU berfungsi sebagai penukar panas utama, tempat energi kimia dari bahan bakar diubah menjadi energi panas untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi. *Boiler* dirancang untuk mengalirkan air melalui serangkaian pipa dan memanaskannya dengan panas hasil pembakaran batu bara di ruang bakar (*furnace*), sehingga air berubah menjadi uap panas lanjut yang siap menggerakkan turbin [6].



Gambar 2. 4 *Boiler* PLTU

Sistem *boiler* terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terkait:

1. *Water Wall*

Pipa-pipa yang membatasi sisi dinding ruang bakar, berfungsi menyerap panas radiasi dari nyala api dan gas panas. Air di dalam pipa ini mulai dipanaskan dan sebagian menguap menjadi uap jenuh.

2. *Superheater*

Berfungsi memanaskan uap jenuh dari *evaporator* hingga menjadi uap *superheated*. Peningkatan temperatur uap meningkatkan efisiensi termal PLTU sekaligus mencegah kondensasi di turbin yang dapat merusak sudu turbin.

3. *Reheater*

Uap keluaran turbin tekanan tinggi dialirkan kembali ke *reheater* untuk dipanaskan ulang sebelum masuk ke turbin tekanan menengah/rendah, sehingga menjaga efisiensi siklus Rankine.

4. *Economizer*

Pipa yang memanaskan air umpan (*feedwater*) sebelum masuk ke *boiler* menggunakan panas gas buang dari *boiler*. Hal ini meningkatkan efisiensi karena sebagian energi panas yang terbuang dimanfaatkan kembali.

5. *Air Preheater*

Memanaskan udara yang masuk ke ruang bakar menggunakan panas gas buang, sehingga memperbaiki efisiensi pembakaran dan mengurangi konsumsi bahan bakar.

Boiler PLTU beroperasi pada kondisi ekstrem, di mana pipa-pipa pemanas seperti *superheater* dan *reheater* menghadapi:

- Tekanan uap tinggi (100–200 bar).
- Temperatur tinggi (450–600°C).
- Lingkungan korosif akibat gas buang yang mengandung sulfur, klorin, dan partikel abu batu bara.

Kondisi tersebut menyebabkan beban termal, mekanik, dan kimia yang signifikan pada material pipa, sehingga pemilihan material dan desain pipa menjadi sangat kritis untuk memastikan keandalan dan umur operasi *boiler*[11].

2.2.4 Komponen *Superheater* Pada PLTU



Gambar 2. 5 Komponen *Tube Superheater*

Superheater merupakan komponen penting dalam *boiler* PLTU yang berfungsi untuk meningkatkan temperatur uap jenuh menjadi uap *superheated*. Uap *superheated* ini memiliki energi termal lebih tinggi dan tidak mudah mengembun saat melewati turbin, sehingga dapat meningkatkan efisiensi siklus Rankine dan melindungi sudu turbin dari kegagalan akibat kondensasi [6], [9].

Superheater biasanya terdiri dari pipa-pipa baja tahan panas yang tersusun secara paralel atau melingkar di atas ruang bakar (*furnace*), di mana uap dari *evaporator* dialirkan melalui pipa-pipa ini dan dipanaskan lebih lanjut oleh panas gas buang. Struktur *superheater* dirancang sedemikian rupa agar tahan terhadap:

- Temperatur tinggi, umumnya 450–600°C.
- Tekanan uap tinggi, mencapai 100–200 bar.
- Gas buang korosif yang mengandung SO₂, O₂, dan abu batu bara.
- Erosi, *slagging*, dan *fouling* akibat partikel abu yang terbawa gas.

Superheater dapat dibedakan berdasarkan lokasi dan konfigurasi:

- *Radiant Superheater*: Terletak di dalam ruang pembakaran (*furnace*), terutama di dinding atau atap. Pipa *superheater* langsung terkena panas dari api dan gas panas di dalam *furnace*. Panas yang diserap berasal dari radiasi langsung dari nyala api[12].
- *Convection Superheater*: Terletak di jalur gas buang setelah keluar dari ruang pembakaran. Pipa *superheater* dilewati oleh gas panas sebelum gas dibuang ke cerobong. Panas yang diserap berasal dari konveksi (aliran gas panas)[12].

- *Semi-Radiant Superheater (Platen Superheater)*: Terletak di bagian atas ruang pembakaran atau di tempat keluarnya gas buang dari *furnace*. Pipa *superheater* menerima kombinasi panas dari radiasi api dan konveksi dari aliran gas buang[12].

Pemilihan material *superheater* sangat kritis karena harus tahan terhadap *creep*, kelelahan termal (*thermal fatigue*), oksidasi, dan sulfidasi akibat kondisi operasi ekstrem. Material yang umum digunakan antara lain:

- SA213-T22 / P22 (*Chromium-Molybdenum Steel*).
- TP347H / 321 *Stainless Steel*.
- Baja tahan panas lain sesuai standar *boiler* PLTU modern.

Kinerja dan umur *superheater* bergantung pada:

- Distribusi temperatur gas panas.
- Kualitas dan aliran uap.
- Karakteristik bahan pipa.
- Beban mekanik dan termal selama operasi.

Pemahaman tentang desain, lokasi, dan material *superheater* menjadi dasar penting sebelum dilakukan analisis kegagalan material seperti pengamatan *creep*, korosi, oksidasi, kelelahan termal, penipisan dinding (*wall thinning*), dan retak mikro. Analisis ini sangat penting untuk menentukan strategi pemeliharaan preventif dan prediktif yang dapat menjaga keandalan operasi PLTU secara berkelanjutan.

2.2.5 Material *Superheater*

Tube superheater merupakan komponen *boiler* PLTU yang menghadapi temperatur tinggi, tekanan tinggi, dan lingkungan korosif secara terus-menerus. Oleh karena itu, pemilihan material *tube superheater* menjadi sangat kritis untuk menjamin keandalan, umur operasi, dan keselamatan *boiler*.

1. Material yang Umum Digunakan

Material *superheater* harus memiliki kombinasi sifat mekanik dan termal yang baik, antara lain:

- Tahan terhadap *creep* pada temperatur tinggi.
- Tahan oksidasi dan sulfidasi akibat gas buang.
- Kekuatan tarik tinggi untuk menahan tekanan uap.

- Tahan terhadap kelelahan termal akibat fluktuasi temperatur.

Beberapa material yang umum digunakan :

Tabel 2. 1 Standar Material *Tube Superheater*

Material	Komposisi Utama	Kelebihan	Kelemahan
SA213-T22 (P22)	2,25% Cr, 1% Mo	Tahan terhadap <i>creep</i> dan sulfidasi, banyak digunakan pada PLTU	Rentan terhadap oksidasi jika temperatur >600°C
TP347H Stainless Steel	17–19% Cr, 9–13% Ni, Nb <i>stabilizer</i>	Stabil pada temperatur tinggi, tahan oksidasi	Harga lebih mahal
T91 / P91	9% Cr, 1% Mo, V & Nb	Kekuatan <i>creep</i> tinggi, tahan kelelahan termal	Perlu perlakuan panas khusus

2. Sifat Material yang Dibutuhkan

Material *superheater* harus memenuhi karakteristik berikut:

- *Creep Strength*: kemampuan material menahan deformasi permanen di bawah temperatur tinggi dan tekanan tinggi selama operasi jangka panjang.
- *Oxidation & Sulfidasi Resistance*: ketahanan terhadap reaksi kimia dengan oksigen dan sulfur di gas buang, yang dapat menipiskan dinding pipa.
- *Thermal Fatigue Resistance*: kemampuan menahan retak akibat siklus pemanasan dan pendinginan, terutama saat *start-stop boiler*.
- *Mechanical Strength*: kekuatan tarik, *yield strength*, dan modulus elastisitas harus cukup tinggi untuk menahan tekanan uap.

3. Faktor yang Mempengaruhi Kegagalan Material

Material *tube superheater* dapat mengalami degradasi akibat beberapa faktor utama:

- *Overheating*: temperatur pipa terlalu tinggi menyebabkan *creep* dan penurunan kekuatan material.

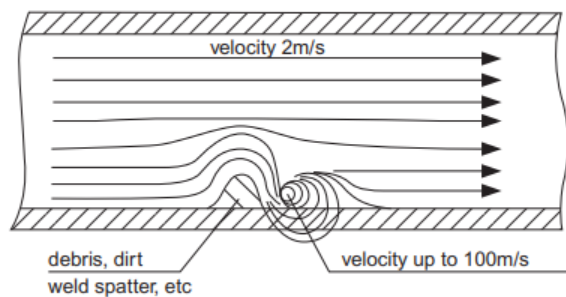
- Korosi & Sulfidasi: gas buang yang mengandung SO_2 dan O_2 bereaksi dengan logam membentuk lapisan oksida atau sulfida yang rapuh.
- Erosi: Partikel abu batu bara yang terbawa aliran gas panas dapat menipiskan dinding pipa.
- Kelelahan termal (*Thermal fatigue*): Kegagalan material akibat tegangan yang berulang kali disebabkan oleh siklus suhu panas dan dingin.

Pemahaman mendalam tentang material *superheater* menjadi dasar penting sebelum dilakukan analisis kegagalan dan pemilihan strategi pemeliharaan preventif atau prediktif untuk menjaga keandalan operasi PLTU.

2.2.6 Mekanisme Kegagalan Material

Superheater pada PLTU beroperasi dalam kondisi ekstrem, yakni temperatur tinggi, tekanan tinggi, dan paparan gas buang korosif. Kondisi ini dapat menimbulkan berbagai mekanisme degradasi material yang berpotensi menimbulkan kegagalan. Pemahaman terhadap mekanisme kegagalan ini menjadi dasar penting untuk melakukan analisis kegagalan (*failure analysis*) dan strategi pemeliharaan. Berikut beberapa penyebab kegagalan material yang paling banyak terjadi pada *tube superheater*:

1. Erosi



Gambar 2. 6 Mekanisme Kegagalan Erosi

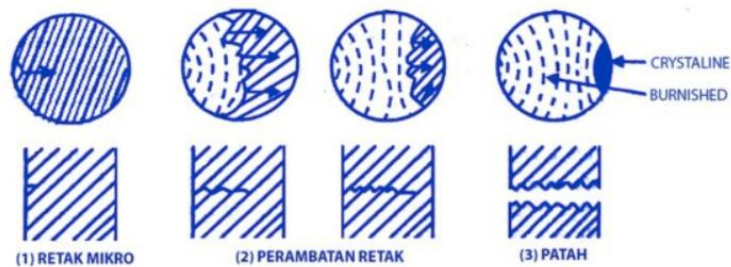
Erosi adalah mekanisme kegagalan akibat hantaman partikel padat atau fluida berkecepatan tinggi yang mengikis permukaan material secara progresif. Pada *superheater*, kondisi operasi ekstrem (temperatur dan tekanan tinggi serta gas buang korosif) mempercepat penipisan dinding *tube* hingga melewati batas aman sehingga tidak mampu lagi menahan tekanan uap[13].

Pada *tube superheater* di PLTU, erosi sangat dipengaruhi oleh kecepatan aliran

gas, kandungan partikel padat, geometri *tube* (terutama pada tikungan atau elbow), serta kualitas material pelapis *tube*. Pada area tertentu yang terpapar langsung aliran gas dengan kecepatan tinggi, partikel-partikel abrasif akan menabrak permukaan luar *tube* secara konstan, sehingga menyebabkan penipisan dinding yang progresif. Jika tidak terdeteksi, penipisan ini dapat menciptakan *puncture*, kebocoran, bahkan ruptur mendadak pada *tube*. Menurut Chandra[14], gesekan dalam aplikasi teknik mesin banyak sekali terjadi karena mesin pada dasarnya bergerak satu sama lain, seperti poros dan roda gigi, dan erosi yang disebabkan oleh partikel keras yang menerpa komponen lain dapat menurunkan unjuk kerja komponen secara signifikan.

Dampak erosi sangat signifikan bagi keandalan operasi PLTU. Apabila penipisan dinding *tube* mencapai ambang kritis, *tube* tak lagi mampu menahan tekanan kerja serta suhu tinggi, sehingga risiko kebocoran dan kebocoran meningkat secara drastis. Pencegahan erosi meliputi desain *tube* dan jalur uap yang optimal, pemilihan material *tube* dengan ketahanan aus tinggi, serta pemeliharaan sistem pembersih (*sootblower* atau pengelolaan gas dan abu otomatis) agar laju penumpukan partikel di *tube* dapat dikurangi.

2. Kelelahan/Fatik (*Fatigue*)



Gambar 2. 7 Fase Perpatahan Fatik

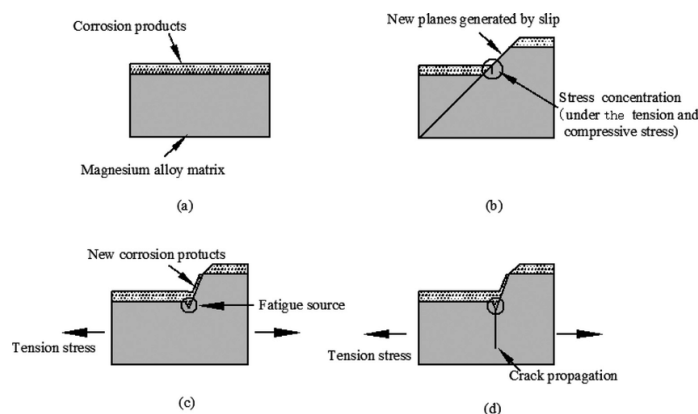
Kelelahan/fatik merupakan mekanisme kegagalan material yang ditandai oleh munculnya retak mikro akibat pembebanan siklik (berulang-ulang), baik secara mekanis maupun termal, selama *tube superheater* beroperasi. Secara umum, fatik terjadi ketika suatu material menerima beban berulang-ulang yang menyebabkan akumulasi kerusakan mikro pada struktur kristal logam. Akibat proses ini, retak inisial terbentuk dan berkembang hingga akhirnya memicu kegagalan total berupa patah atau ruptur struktur *tube*. Menurut Chandra [14], kegagalan akibat lelah atau

fatik adalah salah satu jenis modus kegagalan yang paling sering terjadi di dunia Teknik Mesin, dengan lebih dari 70 persen kegagalan pada aplikasi Teknik Mesin disebabkan oleh fatik.

Pada *tube superheater* PLTU, fenomena kelelahan sangat erat kaitannya dengan siklus operasi *boiler*, seperti *start-up* dan *shutdown* secara berulang, atau fluktuasi tekanan dan temperatur akibat variasi beban listrik. Siklus ekspansi dan kontraksi *tube* akibat perubahan suhu menyebabkan timbulnya tegangan berulang, terutama pada zona sambungan las, tikungan, dan titik konsentrasi tegangan lainnya. Menurut Veolia [15], retak memanjang (*transgranular cracking*) yang terutama disebabkan oleh tegangan berulang adalah bentuk retak yang paling sering ditemukan dalam *boiler* industri. Studi visual pada *tube* yang gagal akibat kelelahan biasanya memperlihatkan pola retakan "tanda pasir pantai" (cincin konsentris pada permukaan patahan), menandakan pertumbuhan retak secara bertahap di bawah tegangan yang masih di bawah tegangan maksimum material. Permukaan patah pada kegagalan kelelahan dibagi menjadi dua zona: zona pertama dengan permukaan patah yang halus mirip patah rapuh namun lebih berkilau, diikuti dengan zona kedua permukaan patah yang tetap dengan adanya deformasi plastis atau permukaan yang kasar [19].

Pencegahan fatik pada *tube superheater* meliputi desain *tube* yang fleksibel terhadap ekspansi termal, penyambungan las berkualitas tinggi, dan pembatasan siklus operasi *boiler* yang ekstrem. Pengawasan berkala terhadap area-area kritis di *tube superheater* serta prediksi *lifetime* berdasarkan siklus operasi merupakan langkah penting dalam mitigasi fatik dan peningkatan keandalan sistem *boiler*.

3. Kelelahan Korosi (*Corrosion fatigue*)



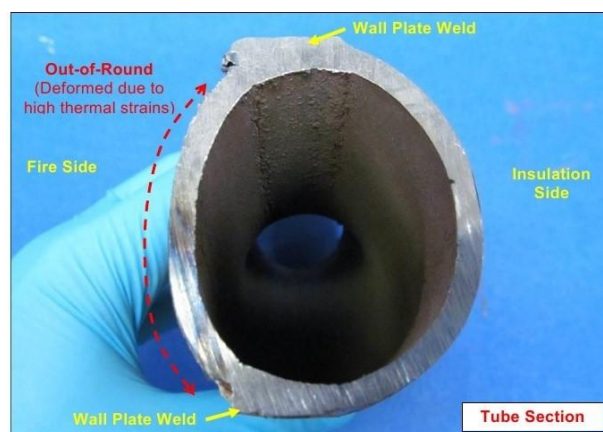
Gambar 2. 8 Mekanisme *Corrosion Fatigue*

Kelelahan Korosi (*Corrosion fatigue*) merupakan bentuk kegagalan akibat interaksi antara siklus tegangan berulang dan lingkungan korosif. Korosi yang terjadi pada permukaan logam menyebabkan penurunan kekuatan material, sehingga tegangan yang relatif kecil pun dapat memicu pembentukan retak dan mempercepat pertumbuhannya. Menurut Chandra [19], korosi adalah peristiwa alam atau elektro kimiawi yang tidak bisa dihindari, namun hanya bisa dikendalikan. Komponen mesin atau konstruksi yang beroperasi di lingkungan yang korosif atau mengalirkan zat yang korosif akan mengalami penurunan kekuatan dan unjuk rupa, sehingga sangat berbahaya sekali dalam operasinya.

Pada *tube superheater*, kondisi ini muncul ketika permukaan luar terpapar air, oksigen, sulfur, atau klorida akibat insulasi yang lembap atau sistem gas buang yang tidak bersih. Kombinasi lingkungan lembap dan beban berulang mempercepat terbentuknya produk korosi seperti Fe_3O_4 dan Fe_2O_3 yang memperlemah struktur permukaan. Menurut Facheruddin [18], penyebab kegagalan yang signifikan pada *tube superheater* adalah *overheating*, kerusakan mulur, kelelahan termal, tekanan termal yang berlebihan, korosi di sisi air dan api, serta erosi.

Pencegahan kelelahan korosi dilakukan melalui kontrol kualitas air dan uap, inspeksi serta penggantian insulasi yang rusak, dan menjaga area sekitar *tube* tetap kering dan bersih.

4. Kelelahan Termal (*Thermal fatigue*)



Gambar 2. 9 *Thermal Fatigue* Pada *Tube*

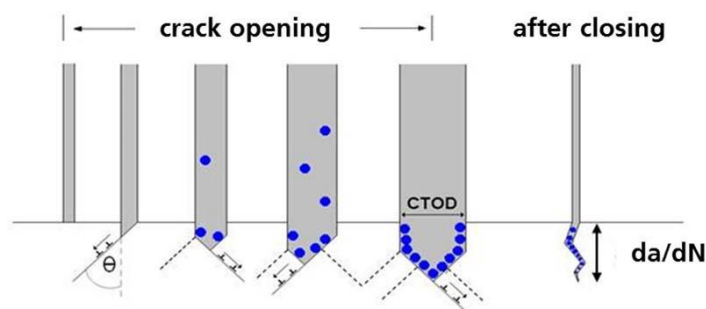
Kelelahan Termal (*Thermal fatigue*) adalah mekanisme kegagalan material akibat perubahan temperatur ekstrem yang berulang-ulang, baik dalam proses *start-*

up dan *shutdown* maupun fluktuasi beban di *boiler*. Menurut Facheruddin [18], kelelahan termal didefinisikan sebagai patah atau kegagalan yang disebabkan oleh perubahan suhu yang signifikan yang mengakibatkan tekanan siklus pada struktur material. Kelelahan termal terjadi ketika struktur material suatu logam mengalami perbedaan pemuaian panas (ekspansi termal) selama beberapa siklus pemanasan dan pendinginan yang cepat.

Pada *tube superheater* PLTU, perbedaan suhu antara sisi dalam (dialiri uap panas) dan sisi luar *tube* (terpapar gas buang dari pembakaran) menghasilkan gradien suhu yang cukup besar. Akibatnya, *tube* mengalami ekspansi dan kontraksi termal yang tidak merata, sehingga timbul tegangan sisa pada zona tertentu. Retakan akibat kelelahan termal umumnya bercabang dan berkembang dari permukaan luar atau zona *Heat-Affected Area* (HAA) setelah pengelasan [18]. Veolia [20] menekankan bahwa setiap fitur desain yang memungkinkan kantong uap terbentuk dalam unit dapat menyebabkan pemanasan berulang-ulang dan pendinginan cepat, yang dapat menyebabkan retak melintang pada *tube* dan cangkang *boiler*. Kegagalan dapat terjadi dalam waktu kurang dari sepuluh siklus tergantung pada arah kejutan panas yang diberikan. Permukaan material dengan retak kecil juga dipengaruhi oleh beban dua arah atau tiga arah.

Pengendalian kelelahan termal pada *tube superheater* sangat penting, karena kegagalan yang terjadi dapat menyebabkan kebocoran mendadak atau *rupture* di zona yang paling panas. Evaluasi siklus operasional dan pemeliharaan prediktif menjadi langkah wajib untuk menekan potensi kejadian kelelahan termal pada sistem *superheater*.

5. *Stress Corrosion Cracking* (SCC)



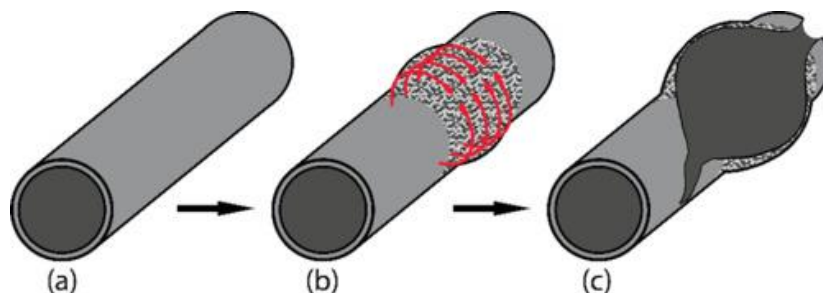
Gambar 2. 10 Mekanisme *Stress Corrosion Cracking* (SCC)

Stress Corrosion Cracking (SCC) merupakan mekanisme kegagalan material *tube superheater* akibat interaksi antara tegangan tarik tinggi (baik dari tekanan operasi, sisa tegangan pengelasan, atau penyambungan), dan kehadiran lingkungan yang korosif seperti ion klorida, karbonat, atau sulfur. Retak korosi tegangan dapat terjadi sebagai retak memanjang (menembus butir kristal) maupun retak antar butir (mengikuti batas butir), di mana retak merambat tanpa ada perubahan bentuk yang nyata dari logam [18].

Pada *tube superheater*, retak korosi tegangan sering terjadi pada area dengan tekanan internal tinggi khususnya zona las, *header tube*, atau sambungan paduan logam yang rawan tersisa tegangan tinggi. Lingkungan operasi *boiler* yang mengandung klorida, natrium, sulfur, atau zat kimia dari proses perlakuan air yang terbawa bersama uap sangat memperbesar risiko retak korosi tegangan.

Ciri visual utama SCC adalah retakan "jaring" yang menyebar zig-zag sepanjang batas butir, yang jika digabung dengan beban operasi mendadak, dapat menyebabkan pecah seketika pada *tube* [18]. Veolia [20] juga menjelaskan bahwa pemeriksaan struktur mikro pada area yang gagal sangat diperlukan untuk mengkonfirmasi tipe retak yang spesifik, setelah itu tindakan perbaikan yang tepat dapat dilakukan. Kegagalan SCC sering terjadi secara mendadak dan dapat menyebabkan penghentian operasi PLTU yang cukup lama. Oleh karena itu, penting untuk melakukan inspeksi rutin area *tube* yang rawan retak korosi tegangan dan pemantauan kimia air/uap secara konsisten.

6. *Overheating*



Gambar 2. 11 Mekanisme *Overheating* Pada *Tube*

Overheating merupakan kegagalan yang sangat dominan pada *tube superheater*, terjadi ketika temperatur *tube* melebihi batas desain selama periode

waktu tertentu. Pemanasan berlebih pada *tube superheater* dapat dipicu oleh akumulasi deposit di dalam *tube* (kerak, lapisan mineral, pengotoran), tersumbatnya aliran uap, atau distribusi panas yang terganggu akibat desain dan operasi yang kurang optimal. Menurut Veolia [20], pemanasan berlebih adalah penyebab utama kegagalan dalam pembangkit uap. Dalam survei laboratorium selama 12 tahun mencakup 413 investigasi, pemanasan berlebih terdaftar sebagai penyebab dalam 201 kegagalan, atau 48,7% dari kegagalan yang diselidiki.

Ketika suhu *tube* naik secara signifikan di atas batas desain (lebih dari 730°C dalam kondisi jangka pendek atau secara terus-menerus dalam kondisi jangka panjang), struktur mikro material mengalami perubahan, mulai dari pergeseran karbida ke batas butir, pengubahan bentuk butir karbon menjadi bulat (Sferoidisasi perlit), hingga pertumbuhan butir dan penurunan kekerasan di area paling panas (Facheruddin, 2023). Menurut Facheruddin [18], kegagalan material pada *boiler* secara umum 30% disebabkan oleh mulur (*creep*) dan 35% disebabkan oleh pemanasan berlebih. Pada studi PLTU Barru, bentuk patahan pada *tube superheater* adalah bibir tebal berbentuk mulut ikan (*thick lip fishmouth*) dengan penggembungan pada area patahan, menunjukkan karakteristik pemanasan berlebih jangka panjang.

Diagnosa pemanasan berlebih dilakukan dengan inspeksi visual (penggembungan, pecah berbentuk mulut ikan), pengujian kekerasan (menurun drastis di sekitar area gagal), serta analisis struktur mikro dan metalografi pada area *tube* yang rusak. Pencegahan pemanasan berlebih meliputi pembersihan *tube* secara rutin dari deposit menggunakan sistem pembersih uap, pengendalian kualitas air dan uap, pemantauan distribusi temperatur dan tekanan saat operasi, serta pengaturan perlahan *start-up* dan *shutdown boiler* agar tidak terjadi kejutan panas. Pemeliharaan prediktif dan jadwal pembersihan menjadi kunci agar *tube superheater* terhindar dari pemanasan berlebih yang berujung pada kegagalan struktural yang serius.

7. Creep (Mulur)



Gambar 2. 12 Proses Terjadinya *Creep*

Creep adalah proses perubahan bentuk permanen yang sangat lambat namun terus berlanjut, terjadi pada material yang berada di bawah beban tetap pada temperatur tinggi selama periode waktu yang panjang. Mulur menjadi perhatian utama dalam desain dan pengoperasian *tube superheater* di PLTU maupun instalasi termal lainnya, karena kegagalan akibat mulur sering kali bersifat tersembunyi, tidak terdeteksi sampai kerusakan parah terjadi berupa penggembungan (*bulging*), kebocoran, atau pecah struktur *tube*. Secara mekanisme, mulur dibagi menjadi tiga tahapan. Tahap pertama adalah mulur awal di mana laju perubahan bentuk menurun seiring waktu karena proses pengerasan regangan. Tahap kedua disebut mulur keadaan tetap atau mulur tahap dua, yakni fase utama di mana perubahan bentuk berlangsung dengan laju tetap. Tahapan ketiga, mulur tahap akhir, terjadi ketika kerusakan struktur mikro makin parah (terjadi rongga/*void*) dan laju perubahan bentuk meningkat drastis hingga akhirnya terjadi kegagalan material secara tiba-tiba (pecah).

Pada *tube superheater*, suhu operasi biasanya berada pada kisaran 500–600°C, sering kali bahkan melebihi batas desain material akibat gangguan pendinginan atau terbentuknya deposit di dalam *tube*. Dalam kondisi demikian, struktur mikro material seperti ferit, perlit, atau *martensite* pada baja *superheater* menjadi sangat rentan terhadap pergerakan cacat garis kristal (dislokasi) dan perpindahan atom selama waktu operasi yang panjang. Studi pada PLTU Rembang menunjukkan bahwa struktur mikro pada *tube superheater* yang telah beroperasi lama mengalami pengubahan bentuk butir karbon menjadi bulat (sferoidisasi), terbentuknya rongga

kecil di batas butir, serta munculnya retak antar butir, semua ini mengindikasikan tahap kerusakan mulur. Pendekatan Paduan Sisa Setara (ERA) mampu mengklasifikasikan tingkat kerusakan mulur pada *tube*, misalnya jika sudah terjadi 33% kerusakan berarti sisa umur *tube* hanya 66% dari total siklus hidup [18].

Kegagalan akibat mulur sangat berbahaya karena terjadi secara perlahan, *tube* secara bertahap melengkung, menipis, hingga akhirnya pecah. Akibatnya, dapat terjadi kebocoran dalam sistem uap dan menghentikan operasi PLTU secara total. Berdasarkan penelitian pada *boiler* di Indonesia, sekitar 30% kegagalan *tube superheater* disumbang oleh mulur. Untuk mencegah kegagalan, sangat penting melakukan pemantauan suhu operasi, inspeksi ketebalan *tube*, evaluasi struktur mikro, dan perhitungan sisa umur pakai *tube* berdasarkan kinetika mulur material.

8. *Hydrogen damage* (Kerusakan Hidrogen)



Gambar 2. 13 Kegagalan *Hydrogen Damage*

Hydrogen damage adalah mekanisme kegagalan material *tube boiler* yang terjadi akibat penetrasi atom hidrogen ke dalam struktur logam, sehingga mengurangi kelenturan dan ketangguhan material secara drastis. Menurut Veolia [20], serangan hidrogen atau kerapuhan hidrogen telah dijumpai dengan frekuensi meningkat sejak sekitar tahun 1960 pada sistem tekanan tinggi dan kemurnian tinggi. Masalah ini biasanya terjadi hanya pada unit yang beroperasi pada tekanan 1500 psig atau lebih tinggi, karena pada sistem ini tingkat alkalinitas air *boiler* dipertahankan pada nilai yang jauh lebih rendah dibanding standar operasi tekanan rendah.

Mekanisme terjadinya kerusakan hidrogen melibatkan beberapa tahap. Pertama, ketika kontaminan menurunkan pH air *boiler* secara signifikan, serangan asam pada baja menghasilkan hidrogen. Jika serangan asam terjadi di bawah deposit *tube* yang keras, menempel kuat, dan tidak berpori, tekanan hidrogen

dalam deposit dapat terakumulasi hingga mencapai titik di mana hidrogen menembus *tube* baja [20]. Ketika atom hidrogen meresap ke dalam struktur logam, hidrogen bereaksi dengan kandungan karbon membentuk metana. Karena molekul metana terlalu besar untuk berdifusi melalui baja, tekanan yang berlebihan berkembang dalam struktur logam, menyebabkan pecahnya logam sepanjang batas butir di mana metana telah terbentuk [20].

Kerusakan hidrogen dapat berkembang sangat cepat, sehingga pengawasan terus-menerus atas kemurnian kondensat sangat diperlukan. Untuk mencegah kerapuhan hidrogen, Veolia [20] merekomendasikan aplikasi kontrol pH dan fosfat terpadu untuk mengurangi kemungkinan kerapuhan hidrogen, terutama karena penyangga air *boiler* yang lebih baik dengan fosfat hadir.

2.2.7 Macam-Macam Pengujian Material *Superheater*

Pengujian material *superheater* dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik, fisik, dan mikro struktur material, serta mendeteksi adanya kegagalan sebelum atau selama operasi PLTU. Pengujian ini dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu *Destructive Testing* (DT) dan *Non-Destructive Testing* (NDT).

1. *Destructive Testing* (DT)

Destructive Testing dilakukan dengan cara menghancurkan atau merusak sampel material untuk mengetahui karakteristik mekanik dan kimia material. Beberapa metode DT yang umum digunakan pada *tube superheater* [21], antara lain:

- Analisis Metalografi (*Metallographic Analysis*)

Melalui preparasi sampel, pengamatan mikro struktur material dilakukan menggunakan mikroskop optik untuk mendeteksi perubahan butir, retakan mikro, atau endapan fasa baru akibat *creep* dan oksidasi.

- Uji Tarik (*Tensile test*)

Pengujian merusak yang digunakan untuk mengukur kekuatan tarik maksimum, *yield strength*, dan elongasi material. Hasil uji ini penting untuk memastikan *tube* mampu menahan tekanan uap tinggi.

- Uji Kekerasan (*Hardness test*)

Mengukur kekerasan material menggunakan skala Rockwell, Brinell, atau Vickers. Kekerasan dapat menjadi indikator adanya perubahan sifat mekanik

akibat *creep* atau *overheating*.

- Uji Tekuk (*Bending Test*)

Digunakan untuk mengukur kekuatan dan kelenturan material dengan menekuk sampel hingga terjadi retakan atau kegagalan. Hasil pengujian ini memberikan indikasi terhadap penurunan keuletan akibat perubahan mikro struktur.

- Uji Tumbukan (*Impact Test*)

Menentukan ketahanan material terhadap beban benturan dengan menghantamkan benda uji dengan energi yang diketahui dengan mengukur responsnya terhadap kejutan.

- Pengujian Putus Mulur (*Creep Rupture Testing*)

Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi deformasi material pada temperatur tinggi dalam jangka waktu tertentu. Parameter utama yang dikaji meliputi deformasi akibat suhu tinggi dan estimasi *remaining life*.

- Uji Ketebalan (*Thickness Testing*)

Pengujian ini digunakan untuk mengukur ketebalan dinding *tube* atau lapisan pelindung yang ada. Parameter ketebalan digunakan sebagai indikator penipisan dinding akibat erosi atau korosi selama operasi.

2. *Non-Destructive Testing* (NDT)

Non-Destructive Testing dilakukan tanpa merusak *tube*, sehingga *tube* dapat tetap digunakan setelah pengujian. Beberapa metode NDT yang sering diterapkan pada *superheater* [22], antara lain:

- Inspeksi Visual (*Visual Inspection*):

Metode NDT yang paling sederhana, di mana inspeksi dilakukan secara langsung oleh mata manusia, dengan atau tanpa alat bantu seperti kaca pembesar atau endoskop.

- *Ultrasonic Testing* (UT)

Ultrasonic Testing (UT) adalah metode NDT yang menggunakan gelombang suara frekuensi tinggi untuk mendeteksi cacat atau ketidaksesuaian dalam material. Alat UT mengirimkan gelombang ultrasonik melalui material yang diperiksa, dan pantulan gelombang tersebut akan diukur untuk mendeteksi

adanya retakan, rongga, atau cacat internal lainnya.

- *Magnetic Particle Testing* (MPT / MT)

Teknik NDT yang digunakan untuk mendeteksi retakan atau cacat permukaan pada material feromagnetik seperti besi atau baja. Teknik ini memanfaatkan medan magnet untuk menarik partikel magnetik yang tersebar di permukaan material, sehingga cacat atau retakan dapat terdeteksi.

- *Radiographic Testing* (RT / X-Ray)

Metode NDT yang menggunakan sinar X atau sinar gamma untuk mengambil gambar internal dari suatu material. Teknik ini mirip dengan X-ray pada tubuh manusia, di mana film atau detektor digunakan untuk menangkap gambar dari dalam material.

- *Dye/Liquid Penetrant Testing* (DPT / LPT)

Dye Penetrant Testing (DPT) atau *Liquid Penetrant Testing* (LPT) adalah metode NDT yang digunakan untuk mendeteksi cacat permukaan seperti retakan, pori-pori, atau cacat permukaan lainnya pada material *non-porous*.

- *Eddy Current Testing* (ECT)

Metode NDT yang menggunakan arus eddy (*eddy current*) untuk mendeteksi cacat pada material konduktif. ECT sangat efektif dalam mendeteksi cacat permukaan dan dekat permukaan pada material seperti aluminium, tembaga, dan baja.

- *Acoustic Emission Testing* (AET)

Metode NDT yang mendeteksi emisi akustik yang dihasilkan oleh material saat mengalami tekanan atau deformasi. Teknik ini digunakan untuk mendeteksi perubahan struktur di dalam material, seperti retakan yang berkembang.

- *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian SEM digunakan untuk mengamati kandungan deposit, morfologi permukaan, dan karakteristik cacat material pada skala mikro.

- *Spectrometri* (EDX/OES/XRF)

Pengujian spektrometri digunakan untuk menganalisis komposisi kimia material dan deposit guna memverifikasi kesesuaian material dan mengidentifikasi unsur penyebab korosi.

- Pengujian Boreskop

Pengujian boreskop digunakan untuk inspeksi visual bagian dalam *tube* yang sulit dijangkau secara langsung.

- Pengujian Mikrometer (*Micrometer Test*)

Pengujian ini digunakan untuk mengukur dimensi *tube* secara presisi, seperti diameter luar dan ketebalan dinding.

- *Inner Oxide Scale Measurement*

Pengujian ini digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan oksida internal pada sisi *steam side*, yang menjadi indikator degradasi termal dan potensi *overheating* jangka panjang.

- *Crack Depth Test*

Pengujian kedalaman retak digunakan untuk mengevaluasi seberapa jauh retakan berkembang ke dalam material.