

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan tulang punggung pasokan energi listrik nasional, dengan kontribusi lebih dari 50% terhadap total kapasitas terpasang di Indonesia pada tahun 2024. Keandalan dan efisiensi PLTU sangat dipengaruhi oleh kondisi komponen kritis, salah satunya *tube superheater*. Berdasarkan laporan kegagalan di berbagai PLTU, insiden kegagalan *tube superheater* menjadi penyebab utama *downtime*, penurunan performa, dan meningkatnya biaya pemeliharaan. Pada PLTU batu bara 600 MW, kegagalan *tube superheater* terjadi berupa *thin lip rupture*, yaitu keretakan berupa penipisan dinding pada titik pecahnya akibat *overheating* jangka pendek yang didahului penggembungan (*bulging*). Kondisi ini dipicu oleh gangguan aliran *steam* dan penumpukan deposit serbuk pada area *elbow*[1].

Kegagalan *tube superheater* dapat dipicu oleh berbagai faktor, seperti *overheating*, korosi suhu tinggi, erosi, serta ketidaksesuaian material dengan spesifikasi desain. Studi Kurniawan [2] pada PLTU Tanjung Jati B menemukan bahwa penipisan *tube* akibat Semburan *sootblower* bertekanan tinggi dan *overheating* menyebabkan material menjadi getas dan tidak mampu menahan tekanan uap, sehingga *tube*-nya pecah. Penelitian lain juga mengidentifikasi mekanisme kegagalan seperti *creep*, *caustic attack*, *hydrogen damage*, *oxygen pitting*, *acid attack*, *stress corrosion cracking*, dan kegagalan lainnya [3], [4], [5], [6], [7]. Data visual kegagalan, lokasi spesifik pada *tube*, dimensi, riwayat operasi, dan kondisi permukaan (deposit, oksida) menjadi kunci untuk mengidentifikasi pola dan mekanisme kegagalan. Selain itu, data material dan spesifikasi *tube*, riwayat pemeliharaan, serta parameter operasional (tekanan, temperatur, siklus termal) sangat penting untuk menganalisis hubungan antara kondisi aktual dan potensi kegagalan[8], [9], [10].

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kegagalan *tube superheater* dapat dipicu oleh faktor material, lingkungan operasi, serta kondisi pembebanan termal dan mekanik. Namun, dalam praktik industri, ketersediaan data operasional dan pemeliharaan secara rinci tidak selalu dapat diakses secara penuh untuk kepentingan

penelitian. Keterbatasan ini menyebabkan analisis kegagalan secara kuantitatif berbasis data operasi tidak dapat dilakukan secara komprehensif, sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang menitikberatkan pada bukti fisik kegagalan material. Pendekatan tersebut dilakukan melalui hasil pengujian laboratorium dan pengamatan mikro struktur, yang selanjutnya diinterpretasikan dan dikorelasikan dengan indikasi kondisi operasi berdasarkan diskusi teknis dengan pihak terkait. Metode deskriptif–eksperimental berbasis *failure analysis* dengan pendekatan investigasi metalurgi dan analisis risiko menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*. Pengujian yang dilakukan meliputi uji visual untuk mengidentifikasi pola dan tingkat kegagalan, uji *Positive Material Identification (PMI)* untuk memastikan jenis dan komposisi material *tube*, uji metalografi untuk mengamati struktur mikro material, uji *Scanning Electron Microscope* dilengkapi dengan *Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM-EDS)* untuk analisis kandungan deposit pada material, serta uji kekerasan untuk menilai perubahan sifat mekanik material pada area yang rusak dibandingkan area normal dan pengujian lainnya.

Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan informasi kualitatif berupa hasil diskusi teknis antara peneliti, tim penguji dan pihak unit pembangkit untuk memperkuat interpretasi mekanisme kegagalan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi baru dalam pemahaman mekanisme kegagalan *tube superheater*, serta menawarkan rekomendasi praktis untuk peningkatan keandalan dan efisiensi pembangkit. Secara teoretis, penelitian ini akan memperkaya literatur tentang analisis kegagalan material di sektor pembangkitan listrik, sedangkan secara praktis, hasilnya dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan pemeliharaan, mitigasi risiko, dan pengambilan keputusan teknis di industri PLTU.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat disimpulkan bahwa rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Apakah jenis dan karakteristik material *tube superheater* sudah sesuai standarnya?
2. Bagaimana sifat mekanik material pada area yang rusak dibandingkan area normal?
3. Apakah kegagalan material disebabkan oleh operasional dan pemeliharaan yang

kurang baik?

4. Faktor-faktor apa saja yang menjadi kemungkinan penyebab utama kegagalan *tube superheater* berdasarkan hasil seluruh pengujian?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilaksanakannya penelitian ini, berdasarkan dari latar belakang dan rumusan masalah penelitian di atas, adalah sebagai berikut:

1. Memverifikasi kesesuaian jenis dan karakteristik material *tube superheater* terhadap standar spesifikasi yang telah ditetapkan.
2. Menganalisis perubahan sifat mekanik pada material, meliputi nilai kekerasan, kekuatan tarik, dan penipisan dinding, dengan membandingkan kondisi area yang rusak terhadap area normal.
3. Menentukan mekanisme kegagalan dominan pada *tube superheater* berdasarkan hasil investigasi metalurgi.
4. Menganalisis tingkat risiko kegagalan *tube superheater* menggunakan metode *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Setelah menguraikan tujuan penelitian, penulis telah menunjukkan bahwa mereka dapat mencapai tujuan tersebut dan penelitian ini akan menghasilkan manfaat yang disusun secara baik dan benar. Manfaat penelitian ini secara keseluruhan di antaranya:

1. Memberikan data dan analisis komprehensif mengenai mekanisme kegagalan *tube superheater* di PLTU, sehingga dapat menjadi referensi teknis bagi industri pembangkitan listrik.
2. Menambah khazanah ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin, khususnya analisis kegagalan material pada komponen *superheater* PLTU.
3. Menjadi dasar pertimbangan dalam analisis risiko kegagalan serta perumusan strategi pencegahan kegagalan berulang pada *tube superheater* menggunakan pendekatan *FMEA*.
4. Memberikan kontribusi praktis bagi industri pembangkitan listrik dalam meningkatkan keandalan dan efektivitas pemeliharaan komponen *superheater*.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Ruang lingkup masalah yang diangkat pada penelitian ini berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, di antaranya:

1. Penelitian difokuskan pada analisis kegagalan *tube superheater* di PLTU X, tidak mencakup komponen lain pada sistem *boiler*.
2. Sampel yang digunakan adalah *tube superheater* yang telah mengalami kegagalan.
3. Pengujian yang dilakukan meliputi uji visual, uji PMI, uji metalografi, uji SEM-EDS, uji kekerasan dan uji tarik.
4. Analisis dibatasi pada sifat material dan mikro struktur untuk fokus pada evaluasi kerusakan material secara langsung, tidak membahas analisis performa operasi pembangkit secara kuantitatif maupun perhitungan termal dan fluida secara detail karena memerlukan pendekatan dan sumber daya yang berbeda di luar cakupan penelitian ini.
5. Identitas pembangkit disamarkan sebagai “PLTU X” untuk menjaga kerahasiaan data teknis.

1.6 Kebaharuan

Kebaharuan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan analisis kegagalan material berbasis bukti metalurgi yang dikombinasikan dengan analisis risiko menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)*, khususnya pada kondisi keterbatasan data operasional industri. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan sudut pandang praktis dan aplikatif dalam investigasi kegagalan *tube superheater* di lingkungan PLTU.

1.7 Hipotesis

Berdasarkan pengamatan awal, teori-teori kegagalan material, dan studi literatur terkini, hipotesis yang diajukan untuk penelitian ini:

H_0 = Material *tube* sesuai standar, tidak ada perbedaan sifat mekanik yang signifikan antara area rusak dan normal, serta kegagalan tidak dipengaruhi oleh faktor operasional maupun pemeliharaan.

H_1 = Jenis dan karakteristik material *tube superheater* (komposisi kimia dan struktur

mikro awal) telah sesuai dengan standar spesifikasi yang berlaku, sehingga kegagalan material bukan diakibatkan oleh cacat bawaan pabrik atau kesalahan pemilihan material (*material grade*).

H₂ = Terdapat penurunan sifat mekanik yang signifikan pada area rusak dibandingkan area normal, berupa penurunan nilai kekerasan (akibat *Overheating/Creep*), atau penipisan dinding ekstrem (akibat erosi/korosi), yang menyebabkan material kehilangan kemampuannya dalam menahan tekanan uap.

H₃ = Kegagalan material dipicu oleh kondisi operasional yang tidak optimal (seperti temperatur berlebih atau tekanan *sootblower* terlalu tinggi) serta manajemen pemeliharaan yang kurang baik (seperti interval inspeksi yang terlewat atau kualitas air yang buruk penyebab *SCC/Hydrogen Damage*), sebagaimana dilaporkan dalam beberapa studi literatur terkait kegagalan *tube superheater* yang umum terjadi.

H₄ = Faktor penyebab utama kegagalan adalah mekanisme gabungan antara degradasi fisik (seperti erosi atau Fatik) dan degradasi termal (seperti *Overheating* atau *Creep*), yang diperparah oleh lingkungan operasional yang agresif.