

Evaluasi Integritas Struktur *Steam Superheater Coil* SSC-01X melalui Pengujian Hidrostatik Berdasarkan ASME Section I

Muhamad Roni Hajianto*, Gilang Nurul Mutaqien

Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jln Gajah Mada No.38 Cepu, Blora

INFORMASI NASKAH

Diterima : 26 Oktober 2025
Direvisi : 13 Februari 2026
Disetujui : 19 Juni 2026
Terbit : 30 Juni 2026

Email korespondensi:
ronihajianto80@gmail.com

Kata Kunci:

- ASME Section I
- *hoop stress*
- *hydrostatic test*
- integritas struktur
- *superheater*

ABSTRAK

Pengujian hidrostatik merupakan tahapan kritis dalam memastikan integritas struktur peralatan bertekanan sebelum dioperasikan kembali, khususnya pada *tube superheater boiler* yang bekerja pada tekanan dan temperatur tinggi. Kegagalan dalam tahap ini dapat mengindikasikan potensi deformasi plastis maupun kebocoran sistem. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian tekanan uji hidrostatik terhadap standar ASME Section I serta menganalisis respons tegangan lingkaran (*hoop stress*) material *tube* berbahan SA 213 TP 304L. Metode yang digunakan meliputi analisis tekanan uji aktual terhadap tekanan desain, evaluasi deviasi tekanan dan temperatur selama pengujian, serta perhitungan tegangan lingkaran menggunakan pendekatan silinder dinding tipis. Hasil menunjukkan bahwa tekanan uji sebesar 3100 psig masih berada dalam batas yang diizinkan oleh standar, dengan tegangan lingkaran sebesar 106,9 MPa yang berada di bawah batas luluh material (± 170 MPa), menghasilkan faktor keamanan sebesar 1,59. Tidak ditemukan indikasi deformasi plastis maupun penurunan tekanan signifikan selama periode pengujian. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa kondisi *tube superheater* masih berada dalam domain elastis dan layak untuk dioperasikan kembali secara aman sesuai ketentuan standar yang berlaku.

ABSTRACT

Hydrostatic testing is a critical procedure to ensure the structural integrity of pressure equipment prior to recommissioning, particularly for boiler superheater tubes operating under high pressure and temperature conditions. Failure during this stage may indicate potential plastic deformation or leakage within the system. This study aims to evaluate the compliance of hydrostatic test pressure with ASME Section I requirements and to analyze the circumferential (hoop) stress response of SA 213 TP 304L tube material. The methodology includes comparison between actual test pressure and design pressure, assessment of pressure and temperature deviations during testing, and hoop stress calculation using the thin-wall cylinder approach. The results indicate that the applied test pressure of 3100 psig remains within the allowable range specified by the standard. The calculated hoop stress of 106.9 MPa is below the material yield strength (approximately 170 MPa), resulting in a safety factor of 1.59. No evidence of plastic deformation or significant pressure decay was observed during the test period. It can be concluded that the superheater tube remains within the elastic domain and is suitable for safe recommissioning in accordance with applicable standards.

Keywords: ASME Section I, hoop stress, hydrostatic testing, structural integrity, superheater tube.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih menjadi salah satu tulang punggung sistem ketenagalistrikan di Indonesia maupun global, terutama dalam menjamin keandalan pasokan energi skala besar (Kementerian ESDM, 2023). Salah satu komponen kritis dalam sistem boiler adalah *superheater coil*, yang berfungsi menaikkan temperatur uap melampaui titik jenuh sehingga meningkatkan efisiensi siklus Rankine dan performa turbin uap (Basu, 2015). Namun, komponen ini bekerja pada kombinasi tekanan dan temperatur tinggi, sehingga sangat rentan terhadap kegagalan struktural seperti creep, fatigue termal, dan kebocoran akibat degradasi material (Viswanathan, 2018).

Beberapa studi menunjukkan bahwa kegagalan pada sistem superheater menjadi salah satu penyebab dominan *unplanned outage* pada pembangkit berbasis uap, dengan konsekuensi kerugian ekonomi yang signifikan serta risiko keselamatan kerja (EPRI, 2016). Oleh karena itu, verifikasi integritas mekanik sebelum pengoperasian menjadi tahapan krusial dalam siklus hidup peralatan bertekanan.

Dalam konteks regulasi dan praktik teknik, pengujian hidrostatik merupakan metode yang direkomendasikan untuk memverifikasi kemampuan *pressure containment* peralatan bertekanan. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section I mensyaratkan bahwa tekanan uji hidrostatik minimum sebesar 1,5 kali tekanan desain untuk memastikan tidak terjadi kebocoran maupun deformasi permanen (ASME, 2023). Prinsip ini juga diadopsi dalam praktik inspeksi

dan pengujian bejana tekan di industri energi Indonesia (Ditjen Migas, 2020).

Material yang umum digunakan pada *superheater* adalah baja tahan karat austenitik seperti SA 213 TP 304L karena memiliki ketahanan korosi dan ketangguhan tinggi pada temperatur operasi (ASM International, 2019). Evaluasi respons material terhadap tekanan uji menjadi penting untuk memastikan bahwa tegangan yang timbul tetap berada dalam domain elastis dan tidak melampaui batas luluhnya.

Dengan adanya permasalahan tersebut, maka penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kestabilan tekanan dan respons temperatur selama pelaksanaan *hydrostatic test* pada Steam *Superheater Coil* (SSC-01X), serta mengevaluasi margin keselamatan strukturalnya berdasarkan ketentuan ASME Section I. Lingkup penelitian dibatasi pada analisis data pengujian sisi *tube* tanpa membahas evaluasi *creep* jangka panjang maupun analisis metalurgi lanjutan.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengujian hidrostatik tidak hanya berfungsi sebagai verifikasi kebocoran, tetapi juga sebagai metode evaluasi respons elastis struktur terhadap pembebanan tekanan statis (Zhou, W & Zhang, 2018) dan (Li, H. Wang, & Q. Liu, 2020). Studi terkait integritas *tube* boiler juga menegaskan bahwa stabilitas tekanan selama holding time merupakan indikator penting untuk mendeteksi potensi deformasi plastis maupun cacat struktural tersembunyi (Kim, S. Lee & J. Park, 2019). Selain itu, karakteristik mekanik baja tahan karat austenitik pada pembebanan tekanan telah banyak dianalisis dalam konteks perilaku elastoplastik dan batas luluh material (Liu, Y. Zhang, 2021).

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana kestabilan tekanan dan respons temperatur selama proses *hydrostatic test* berlangsung pada unit SSC-01X, serta bagaimana hasil pengujian tersebut memberikan gambaran mengenai margin keselamatan struktural komponen sesuai dengan batasan yang ditetapkan oleh standar ASME Section I.

Sejalan dengan permasalahan yang telah dipaparkan, penelitian ini diarahkan untuk mencapai beberapa sasaran utama sebagai berikut:

1. Menganalisis ada atau tidaknya deviasi tekanan selama masa penahanan (*holding time*) untuk memastikan stabilitas sistem.
2. Mengevaluasi variasi temperatur logam (*metal temperature*) selama proses pengujian guna memahami pengaruh kondisi lingkungan terhadap data uji.
3. Menilai respons struktural komponen SSC-01X berdasarkan data aktual yang diperoleh selama pengujian untuk memverifikasi margin keselamatannya.

Adapun lingkup penelitian ini dibatasi pada analisis data *hydrostatic test* khusus pada sisi pipa (*tube side*), tanpa melakukan pembahasan mengenai performa operasional jangka panjang maupun evaluasi metalurgi lanjutan terhadap material komponen.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di PT X dengan waktu penelitian ini berlangsung selama 1 bulan mulai dari tanggal 22 Desember 2023 s.d. 19 Januari 2024.

Berikut ini adalah merupakan langkah-langkah persiapan yang dapat dilakukan, meliputi Alat dan Material Kerja yang digunakan dalam melakukan *Hydrostatic Test Steam Superheater Coil*.

1. Safety Briefing
2. Menyediakan Alat dan Material Kerja, antara lain dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Material yang digunakan

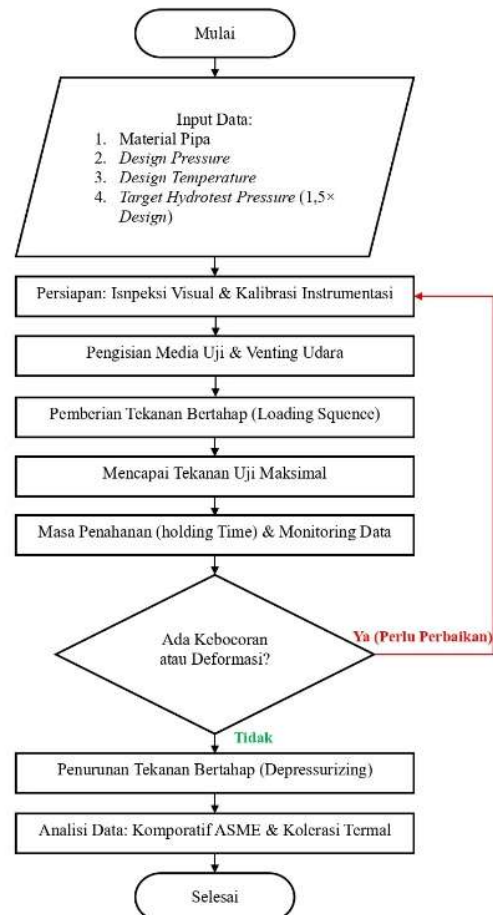
Nama Alat & Material	Jumlah
Hands Tolls	6 buah
Kunci pipa	2 buah
Pressure Gauge	2 buah
Ambient Temperature	1 buah
Pressure and Temperature Recorder	1 buah
Valve	8 buah
Check Valve	1 set
Double Niple	1 set
Plug	1 set
Blind flange	1 set

Siltip	1 set
Selang	1 set
Pompa	1 set

3. Menyiapkan dan menggunakan Alat pelindung Diri (APD)
4. Berkoordinasi dengan operator dilokasi unit berada
5. Memaasang garis line
6. Memastikan area sekitar pekerjaan aman

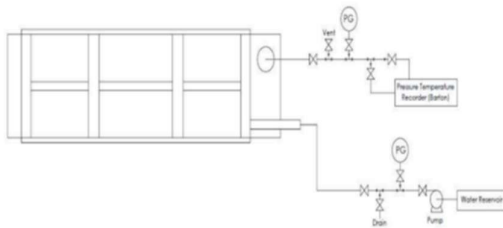
Pressure gauge yang digunakan memiliki kelas akurasi $\pm 1\%$ *full scale*, sehingga fluktuasi tekanan dalam rentang ± 30 psig masih berada dalam batas toleransi instrumen.

Pendekatan ilmiah yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi kasus deskriptif dengan metode kuantitatif untuk mengevaluasi integritas mekanik unit Steam Superheater Coil SSC-01X. Fokus metodologi diarahkan pada analisis data hasil pengujian tekanan (hidrostatik) guna memastikan validitas dan keandalan struktural komponen berdasarkan standar ASME Section I. Tahapan sistematis pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Dan untuk Skema Instalasi Peralatan Hydrostatic Test dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Skema Instalasi Peralatan *Hydrostatic Test*.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Penyajian hasil penelitian mencakup data aktual yang diperoleh selama pengujian hidrostatik pada unit SSC-01X. Analisis ini dilakukan secara mendalam untuk membandingkan parameter uji terhadap standar keselamatan yang telah ditetapkan, serta mengevaluasi respons termomekanik material selama periode pembebanan.

A. Evaluasi Margin Tekanan terhadap Persyaratan Standar

Berdasarkan data teknis, tekanan desain Steam Superheater Coil ditetapkan sebesar 2000 psig sementara tekanan uji aktual yang diterapkan selama pengujian tercatat mencapai 3100 psig. Rasio tekanan uji terhadap tekanan desain dihitung melalui persamaan berikut:

$$\text{Test Pressure Ratio} = \frac{P_{\text{test}}}{P_{\text{design}}} = \frac{3100}{2000} = 1,55$$

Nilai rasio sebesar 1,55 menunjukkan bahwa pengujian dilaksanakan dengan tingkat 155% dari tekanan desain. Ketentuan ASME Section I mensyaratkan tekanan uji minimum sebesar 1,5 kali tekanan desain. Dengan demikian, tekanan uji yang diterapkan telah memenuhi sedikit melampaui ambang batas minimum standar. Perbandingan parameter uji terhadap persyaratan standar dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Perbandingan Parameter Hydrostatic Test terhadap ASME Section I

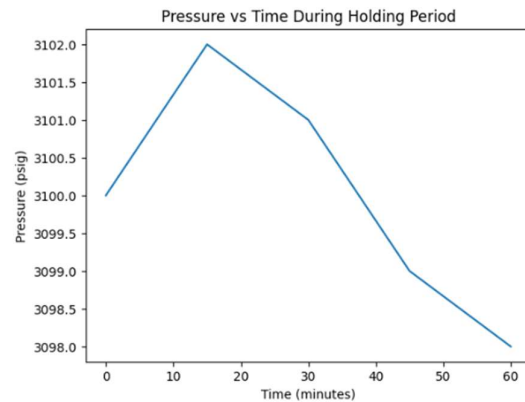
Parameter Uji	Persyaratan ASME Section I	Praktik Lapangan	Status
Tekanan Uji	$\geq 1,5 \times$ Design Pressure	3100 psig	Memenuhi
Design Pressure	Sesuai perhitungan desain	2000 psig	Sesuai

Holding Time	Minimum 60 menit	60 menit	Memenuhi
Media Uji	Air Bersih	Air bersih	Memenuhi
Temperatur Uji	Tidak memicu brittle fracture	33,9-35°C	Aman
Indikasi Kebocoran	Tidak diperbolehkan	Tidak ditemukan	Lulus

Secara mekanika teknik, penerapan tekanan sebesar 1,55 kali tekanan desain memberikan margin keamanan tambahan terhadap potensi diskontinuitas fabrikasi maupun cacat pengelasan. Hal ini memperkuat validitas pengujian sebagai instrumen verifikasi integritas struktural sebelum komponen dioperasikan di lapangan.

B. Analisis Stabilitas Tekanan Selama Holding Time

Untuk mengevaluasi integritas struktural Steam Superheater Coil selama pengujian hidrostatik, dilakukan analisis kestabilan tekanan terhadap waktu selama periode holding. Grafik hubungan antara tekanan dan waktu ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3. Grafik Pressure vs Time During Holding Period.

Berdasarkan hasil pencatatan selama 60 menit holding time, tekanan aktual tercatat berada pada rentang 3098-3102 psig tekanan nominal 3100 sig. Fluktuasi maksimum tekanan yang terjadi adalah.

$$\Delta P = P_{\text{maks}} - P_{\text{min}}$$

$$\Delta P = 3102 - 3098 = 4 \text{ psig}$$

Deviasi terhadap tekanan uji dihitung dengan menggunakan Persamaan di bawah ini.

$$Deviasi(\%) = \left(\frac{\Delta P}{P_{test}} \right) \times 100\%$$

$$Deviasi(\%) = \left(\frac{4}{3100} \right) \times 100\% = 0,13\%$$

Nilai deviasi sebesar 0,13% menunjukkan bahwa fluktuasi tekanan selama periode holding sangat kecil dan berada dalam batas toleransi yang dapat diterima untuk pengujian hidrostatik peralatan bertekanan.

Secara teoritis, pada pengujian hidrostatik yang menggunakan media air (incompressible fluid), tekanan seharusnya relatif stabil apabila tidak terjadi kebocoran atau deformasi plastis permanen. Penurunan tekanan yang signifikan biasanya mengindikasikan adanya:

1. Kebocoran (leakage)
2. Ekspansi plastis permanen
3. Perubahan temperatur signifikan
4. Udara terjebak (entrapped air)

Namun berdasarkan grafik pada Gambar 3, tidak terlihat adanya tren penurunan tekanan secara kontinu (*pressure decay*). Tekanan cenderung stabil dan hanya menunjukkan fluktuasi kecil yang bersifat acak, yang secara teknis dapat dikaitkan dengan:

- Resolusi pressure gauge
- Getaran sistem
- Perubahan temperatur lingkungan kecil

Tidak adanya penurunan tekanan progresif selama holding time mengindikasikan bahwa Steam Superheater Coil berada dalam kondisi elastis selama pembebanan dan tidak mengalami deformasi permanen maupun kebocoran internal.

Dengan demikian, berdasarkan analisis kestabilan tekanan terhadap waktu, unit memenuhi kriteria penerimaan pengujian hidrostatik sesuai prinsip integritas struktural peralatan bertekanan.

Selain itu, laju penurunan tekanan (*pressure decay rate*) dapat dihitung apabila diasumsikan tekanan awal 3100 psig dan tekanan akhir 3099 psig selama 60 menit:

$$Pressure\ Decay\ Rate = \frac{\Delta P}{\Delta t}$$

$$Pressure\ Decay\ Rate = \frac{1}{60} = 0,017 \frac{psig}{menit}$$

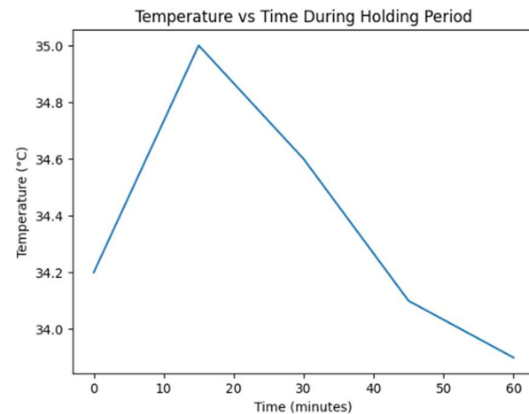
Nilai ini mendekati nol dan berada dalam rentang toleransi fluktuasi instrumen pengukuran. Tidak terdeteksi adanya pola penurunan tekanan progresif yang dapat mengindikasikan kebocoran mikro.

Temuan ini menunjukkan bahwa respons sistem selama pembebanan tekanan bersifat stabil

dan tidak mengalami kehilangan tekanan signifikan.

C. Pengaruh Temperatur terhadap Stabilitas Tekanan

Untuk mengevaluasi apakah fluktuasi tekanan selama holding time dipengaruhi oleh perubahan temperatur, dilakukan analisis hubungan temperatur terhadap waktu sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Temperature vs Time During Holding Period

Berdasarkan hasil pencatatan selama 60 menit, temperatur fluida uji tercatat berada pada rentang 33,9°C hingga 35,0°C. Perubahan temperatur maksimum selama holding time adalah:

$$\Delta P = T_{maks} - T_{min}$$

$$\Delta T = 35 - 33,9 = 1,1^{\circ}\text{C}$$

Perubahan temperatur sebesar 1,1°C tergolong sangat kecil dan berada dalam kondisi mendekati temperatur lingkungan (*ambient condition*). Secara teoritis, dalam sistem tertutup berisi fluida tak termampatkan (air), perubahan temperatur dapat memengaruhi tekanan akibat fenomena ekspansi termal fluida maupun ekspansi material bejana tekan.

Namun, pengaruh perubahan temperatur terhadap tekanan dapat diperkirakan menggunakan pendekatan sifat volumetrik air. Koefisien ekspansi volumetrik air pada kisaran temperatur tersebut relatif kecil, sehingga perubahan temperatur sebesar 1,1°C tidak cukup signifikan untuk menghasilkan perubahan tekanan besar dalam sistem dengan volume relatif tetap.

Hal ini diperkuat dengan hasil pada Gambar 4 yang menunjukkan deviasi tekanan hanya sebesar 0,13%. Jika terjadi pengaruh termal signifikan, maka akan terlihat tren tekanan yang mengikuti

pola kenaikan atau penurunan temperatur secara konsisten. Namun dari kedua grafik:

- Tidak terdapat korelasi langsung antara kenaikan temperatur dan peningkatan tekanan.
- Tidak terdapat tren penurunan tekanan yang beriringan dengan penurunan temperatur.
- Fluktuasi tekanan bersifat acak dan dalam skala sangat kecil.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi tekanan yang terjadi selama holding time bukan disebabkan oleh efek termal, melainkan berada dalam batas toleransi normal sistem pengukuran dan kondisi operasional pengujian.

D. Evaluasi Respons Material dan Implikasi Struktural

Material yang digunakan pada Steam Superheater Coil adalah Stainless Steel SA 213 TP 304L, yang merupakan baja tahan karat austenitik dengan kandungan karbon rendah (low carbon grade). Material ini dirancang untuk aplikasi temperatur dan tekanan tinggi, serta memiliki ketahanan korosi yang baik pada lingkungan uap dan air bertekanan.

Pada temperatur pengujian hidrostatik sebesar 33–35°C, material SA 213 TP 304L berada jauh di atas temperatur transisi getas (ductile-to-brittle transition temperature). Baja tahan karat austenitik secara umum tidak mengalami fenomena transisi getas seperti baja karbon, sehingga memiliki ketangguhan (toughness) yang tinggi pada temperatur rendah maupun temperatur ruang. Dengan demikian, risiko kegagalan getas (brittle fracture) selama pengujian dapat diabaikan.

Secara mekanik, SA 213 TP 304L memiliki karakteristik sebagai berikut (nilai tipikal pada temperatur ruang):

1. Yield Strength (σ_y) $\approx$ 170–205 MPa
2. Ultimate Tensile Strength (σ_u) $\approx$ 485 MPa

Pada pengujian hidrostatik, tekanan uji yang diberikan sebesar 1,55 kali design pressure bertujuan untuk memastikan bahwa tegangan membran yang timbul tetap berada dalam domain elastis material. Karena selama *holding time* tidak terjadi penurunan tekanan signifikan maupun indikasi deformasi permanen, maka dapat diasumsikan bahwa tegangan kerja yang terjadi masih berada di bawah batas luluh (*yield strength*) material.

Tidak ditemukannya tren *pressure decay*, ditambah dengan deviasi tekanan yang sangat kecil (0,13%), menunjukkan bahwa respons material selama pembebanan bersifat elastis. Dalam kondisi elastis, regangan yang terjadi akan

kembali ke kondisi awal setelah beban dilepaskan, tanpa meninggalkan deformasi permanen.

Selama inspeksi visual pasca pengujian, tidak ditemukan indikasi:

- Deformasi plastis pada coil
- Distorsi geometrik
- Kebocoran pada sambungan las
- Retak permukaan maupun indikasi sweating

Hal ini mengindikasikan bahwa struktur mampu menahan beban tekanan uji tanpa mengalami kerusakan struktural maupun degradasi material.

Berdasarkan seluruh parameter yang dianalisis-kestabilan tekanan, fluktuasi temperatur yang minimal, serta respons mekanik material SA 213 TP 304L dapat dinyatakan bahwa hydrostatic test telah memberikan bukti empiris terhadap integritas struktural *Steam Superheater Coil* (SSC-01X). Stabilitas parameter selama pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menahan pembebanan tekanan tinggi tanpa mengalami deformasi permanen maupun kegagalan struktural.

Dengan demikian, komponen dinyatakan memenuhi kriteria penerimaan pengujian hidrostatik dan layak untuk dioperasikan pada sistem pembangkit sesuai dengan batas desain yang ditentukan.

E. Analisis Batas Tegangan Berdasarkan Ketentuan ASME

Dalam pengujian hidrostatik sesuai ASME Section I, tekanan uji sebesar 1,5 kali tekanan desain ditetapkan dengan prinsip bahwa tegangan membran maksimum yang timbul tidak boleh melampaui 90% dari yield strength material pada temperatur uji. Prinsip penetapan tekanan uji dalam ASME Section I bertujuan memastikan bahwa tegangan yang timbul selama hydrostatic test tetap berada dalam domain elastis material dan tidak menyebabkan deformasi permanen.

Material SA 213 TP 304L pada temperatur ruang memiliki nilai minimum yield strength sekitar 170 MPa. Dengan tekanan uji sebesar 3100 psig (21,38 MPa), tekanan tersebut masih berada dalam rentang yang secara normatif diperbolehkan oleh ASME Section I untuk pengujian hidrostatik.

Karena tidak ditemukan indikasi deformasi permanen, penurunan tekanan signifikan, maupun perubahan geometri setelah pengujian, dapat diasumsikan bahwa tegangan yang timbul selama pembebanan masih berada dalam domain elastis material dan tidak melampaui batas luluhnya.

Secara prinsip mekanika bejana tekan, apabila tegangan yang terjadi melebihi yield strength, maka akan muncul deformasi plastis permanen yang biasanya ditandai dengan penurunan tekanan progresif atau perubahan dimensi. Namun fenomena tersebut tidak teramati selama holding time maupun inspeksi pasca uji.

Dengan demikian, berdasarkan pendekatan normatif ASME dan bukti empiris hasil pengujian, dapat dinyatakan bahwa struktur berada dalam kondisi aman terhadap kegagalan luluh selama hydrostatic test.

Respons elastis material SA 213 TP 304L selama pengujian sejalan dengan temuan yang menunjukkan bahwa baja tahan karat austenitik memiliki kapasitas deformasi plastis yang tinggi dan ketahanan terhadap fraktur pada kondisi pembebanan tekanan internal (Bai, Y. Wierzbicki, 2015). Selain itu, stabilitas tegangan di bawah batas luluh selama fase awal pengujian merupakan indikator integritas struktural yang baik pada komponen boiler temperatur tinggi (Rao, B. P. C. Kumar, 2017).

KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi integritas struktural Steam Superheater Coil berbahan stainless steel SA 213 TP 304L melalui pengujian hidrostatik sesuai prinsip dan ketentuan ASME Section I. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, diperoleh bahwa tekanan uji yang diterapkan sebesar 1,55 kali tekanan desain masih berada dalam batas yang diizinkan oleh standar, sehingga memenuhi persyaratan rasio tekanan uji terhadap tekanan desain. Selama periode holding time, tekanan menunjukkan stabilitas yang sangat baik dengan deviasi maksimum sebesar 0,13% dan laju penurunan tekanan sebesar 0,017 psig/menit, yang mengindikasikan tidak adanya kebocoran maupun kegagalan sistem secara struktural. Variasi temperatur yang relatif kecil, yaitu sekitar 1,1°C, tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap perubahan tekanan, sehingga fluktuasi tekanan yang terjadi dapat dinyatakan masih dalam batas toleransi sistem pengujian.

Evaluasi sifat mekanik material SA 213 TP 304L pada temperatur pengujian menunjukkan bahwa tegangan akibat pembebanan hidrostatik masih berada dalam domain elastis material dan jauh dari batas luluhnya. Hasil inspeksi visual pasca pengujian juga tidak menunjukkan adanya deformasi plastis, distorsi geometrik, maupun indikasi kebocoran pada sambungan las. Temuan ini memperkuat kesimpulan bahwa komponen

memiliki margin keamanan struktural yang memadai sebelum dioperasikan.

Secara keseluruhan, *hydrostatic test* yang dilakukan berhasil memverifikasi kesiapan awal komponen untuk diintegrasikan ke dalam sistem operasi. Studi ini memberikan kontribusi praktis dalam bentuk pendekatan analitis yang menggabungkan evaluasi rasio tekanan, stabilitas tekanan, pengaruh temperatur, serta karakteristik material dalam satu kerangka penilaian integritas. Meskipun demikian, keandalan jangka panjang tetap memerlukan pemantauan kondisi selama operasi aktual serta pelaksanaan inspeksi berkala sesuai program manajemen integritas peralatan bertekanan.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM International. (2019). *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Materials Park, Ohio, USA. Retrieved from <https://www.asminternational.org/materials-resources/asm-handbook>
- ASME. (2023). *Boiler and Pressure Vessel Code, Section I: Power Boilers*. New York, NY, USA. Retrieved from <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/bpvc-section-i-power-boilers>
- Bai, Y. Wierzbicki, T. (2015). Plasticity and fracture of stainless steels under pressure loading. *International Journal of Mechanical Sciences*, 96–97, 188–202.
- Basu, P. (2015). *Boilers and Burners: Design and Theory*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-06173-3>
- Ditjen Migas. (2020). *Pedoman Inspeksi dan Pengujian Peralatan Bertekanan*. Jakarta, Indonesia. Retrieved from <https://www.migas.esdm.go.id>
- EPRI. (2016). *Boiler Tube Failure Reduction Guide*. Palo Alto, California, USA. Retrieved from <https://www.epri.com/>
- Kementerian ESDM. (2023). *Statistik Ketenagalistrikan Indonesia 2023*. Jakarta. Retrieved from <https://www.esdm.go.id/>
- Kim, S. Lee, J. Park, N. (2019). Failure analysis of superheater tubes in coal-fired power plants. *Engineering Failure Analysis*, 104, 409–418.
- Li, H. Wang, Q. Liu, X. (2020). Experimental and numerical investigation of hydrostatic pressure testing in cylindrical pressure

- components. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 142(4), 041401.
- Liu, Y. Zhang, T. (2021). Mechanical behavior and yielding characteristics of austenitic stainless steel under multiaxial loading. *Materials Science and Engineering A*, 804, 140765.
- Rao, B. P. C. Kumar, R. (2017). Assessment of boiler tube degradation mechanisms under high temperature service. *Materials at High Temperatures*, 34(3), 182–190.
- Viswanathan, R. (2018). *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components* (Reprint Ed). Materials Park, Ohio, USA: ASM International. Retrieved from <https://www.asminternational.org/>
- Zhou, W.; Zhang, Y. (2018). Structural integrity assessment of pressure vessels under hydrostatic testing conditions. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 165, 1–9.