EMPD 5 (2) Nopember 2026, 455-462 ISSN 2964-6987
Energy, Materials and Product Design
https://journal.unram.ac.id/index.php/empd

# ANALISIS KONDISI PIPA PRIMARY SUPERHEATER BOILER MENGGUNAKAN ULTRASONIC THICKNESS

## *CONDITION ASSESSMENT OF PRIMARY SUPERHEATER BOILER TUBES USING ULTRASONIC THICKNESS MEASUREMENT*

**I M. Adi Sayoga*, I M. Mara, I W. Joniarta**

Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jln. Majapahit No. 62, 83125, Indonesia no. hp 081246895321

**Corresponding author*
*E-mail addresses:* adsayoga@unram.ac.id
https://doi.org/10.29303/empd.v5n2.455-462
*Received 4 August 2026; Received in revised form 15 September 2026; Accepted 15 September 2026*

## *ABSTRACT*

*The integrity of superheater tubes is critical to the reliability and operational safety of steam boilers in thermal power plants. This study assesses the condition of the Primary Superheater Flue Gas Outlet of Boiler Unit #51 at PT Amman Mineral Nusa Tenggara using Ultrasonic Thickness Measurement (UTM) data from September 2024 and April 2026. A total of 32 tubes were evaluated using descriptive statistics, paired t-test, Pearson correlation, and Measurement System Analysis (MSA). The results showed that the average tube thickness increased from 6.332 to 6.449 mm, with a statistically significant difference between the two inspection periods ($p < 0.001$). However, the low Pearson correlation coefficient ($r = 0.1633$) indicated weak correspondence between measurements. The MSA yielded a Mean Error of 0.1166 mm, RMSE of 0.1368 mm, and Coefficient of Variation values of 0.97% and 0.78% for 2024 and 2026, respectively. These results indicate good measurement precision but reveal a systematic positive bias that should be considered when interpreting thickness changes. No significant wall thinning or localized degradation was identified. Therefore, the Primary Superheater Flue Gas Outlet remains in a serviceable condition. Integrating statistical analysis with MSA provides a more reliable basis for interpreting UTM results and supporting condition-based maintenance decisions.*

***Keywords:*** *Ultrasonic thickness measurement, Primary superheater, Condition assessment, Measurement system analysis, Condition-based maintenance*

## 1. Pendahuluan

Boiler merupakan komponen utama pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang berfungsi menghasilkan uap bertekanan tinggi untuk menggerakkan turbin. Salah satu komponen yang bekerja pada kondisi paling kritis adalah *Primary Superheater*, yang beroperasi pada temperatur sekitar 450-550°C sehingga rentan mengalami oksidasi temperatur tinggi, korosi, erosi, *thermal fatigue*, dan *creep*. Mekanisme degradasi tersebut menyebabkan penurunan ketebalan dinding pipa (*wall thinning*) yang dapat memicu kebocoran maupun kegagalan operasi apabila tidak terdeteksi sejak dini [1, 2, 3, 4].

Kegagalan pipa boiler dapat menyebabkan *forced outage*, peningkatan biaya pemeliharaan, dan risiko keselamatan sehingga inspeksi berkala diperlukan untuk memastikan integritas komponen. Evaluasi kondisi perlu didukung data inspeksi yang andal serta mempertimbangkan material, kondisi operasi, dan mekanisme degradasi sesuai pedoman ASME dan API [4, 5, 6, 7, 8, 9]. *Ultrasonic Thickness Measurement* (UTM) merupakan metode *Non-Destructive Testing (NDT)* yang banyak

digunakan untuk mengevaluasi ketebalan pipa karena bersifat non-invasif dan dapat diterapkan pada inspeksi *in-service* [5, 6, 10]. Namun, hasil UTM dapat dipengaruhi oleh kalibrasi instrumen, posisi *probe*, kondisi permukaan, *couplant*, dan operator, sehingga perubahan hasil antarperiode tidak selalu menunjukkan degradasi material [6, 10, 11]. Oleh karena itu, evaluasi ketebalan perlu mempertimbangkan variasi dan potensi *measurement bias* sistem pengukuran melalui pendekatan *Measurement System Analysis* (MSA) [11].

Seiring berkembangnya konsep *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan *Predictive Maintenance*, data inspeksi semakin dimanfaatkan untuk menilai kondisi komponen dan mendukung keputusan pemeliharaan [14]. Dalam konteks tersebut, Measurement System Analysis (MSA) menjadi metode penting untuk mengevaluasi akurasi, presisi, dan konsistensi sistem pengukuran melalui parameter seperti *Mean Error (ME)*, *Mean Absolute Error (MAE)*, *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Coefficient of Variation (CV)*, dan *Bland–Altman Analysis* [11]. Berbagai penelitian telah memanfaatkan UTM untuk mengevaluasi degradasi pipa boiler dan memprediksi umur sisa komponen [1, 2, 3, 10]. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada perubahan ketebalan material tanpa mengevaluasi kualitas sistem pengukurannya. Akibatnya, perubahan hasil inspeksi sering langsung diinterpretasikan sebagai degradasi material, padahal dapat dipengaruhi oleh variasi sistem pengukuran [6, 11].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini mengintegrasikan statistik deskriptif, *paired t-test*, korelasi Pearson, dan *Measurement System Analysis* (MSA) untuk mengevaluasi hasil UTM pada *Primary Superheater Flue Gas Outlet* Boiler Unit #51 PT Amman Mineral Nusa Tenggara. Pendekatan ini digunakan untuk membedakan perubahan ketebalan aktual dari variasi sistem pengukuran serta mendukung *Condition-Based Maintenance* (CBM) dan *Risk-Based Inspection* (RBI) [7, 8, 9, 11, 14].

## 2. Bahan dan Metode

Penelitian menggunakan data inspeksi *Primary Superheater Flue Gas Outlet* Boiler Unit #51 PT Amman Mineral Nusa Tenggara. Data UTM diperoleh dari 32 *tube* pada September 2024 dan April 2026, dengan pengukuran pada empat posisi keliling pipa (0°, 90°, 180°, dan 270°) untuk mengevaluasi kemungkinan *localized wall thinning* [5, 6]. Peralatan yang digunakan meliputi *Ultrasonic Thickness Gauge*, *contact transducer*, *ultrasonic couplant*, *calibration block*, MATLAB R2024b, dan Microsoft Excel. Sebelum pengukuran, instrumen dikalibrasi sesuai ASME Section V, ASTM E797/E797M-22, dan ASTM E317-23 [4, 5, 6].

Data diperoleh melalui pembersihan permukaan pipa, kalibrasi instrumen, pemberian *couplant*, pengukuran pada empat titik setiap *tube*, dan pencatatan hasil inspeksi. Prosedur pengukuran mengacu pada standar ASME dan ASTM untuk memastikan konsistensi dan *repeatability* hasil UTM [4, 5, 6]. Variabel input berupa ketebalan pipa hasil inspeksi tahun 2024 dan 2026, sedangkan variabel output meliputi *mean*, *median*, minimum, maksimum, standar deviasi, *paired t-test*, korelasi Pearson, *Mean Error* (ME), *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Measurement Bias*, *Confidence Interval* (95%), dan *Coefficient of Variation* (CV) [6, 11, 15].

Analisis data diawali dengan statistik deskriptif untuk memperoleh nilai rata-rata dan standar deviasi. Jika $(\bar{x})$ adalah nilai rata-rata,$(x_i)$adalah nilai pengukuran ke-(i), dan (n) adalah jumlah data. Maka nilai rata-rata $(\bar{x})$ dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{1}$$

Jika (s) adalah standar deviasi,$(x_i)$ adalah nilai pengukuran ke i, $(\bar{x})$ adalah nilai rata-rata, dan (n) adalah jumlah data, maka standar deviasi (s) dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \tag{2}$$

Perbedaan rata-rata ketebalan antara periode inspeksi 2024 dan 2026 dianalisis menggunakan *paired t-test* pada tingkat kepercayaan 95%. Misalkan $(\bar{d})$ adalah rata-rata selisih pasangan pengukuran, $(s_d)$

adalah standar deviasi selisih pasangan pengukuran, dan (n) adalah jumlah pasangan data maka uji t dapat dihitung. Statistik uji dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \tag{3}$$

Jika (r) adalah koefisien korelasi Pearson, ($x_i$) dan ($y_i$) masing-masing merupakan hasil pengukuran tahun 2024 dan 2026, sedangkan ($\bar{x}$) dan ($\bar{y}$) adalah nilai rata-rata masing-masing periode, selanjutnya hubungan antara hasil pengukuran tahun 2024 dan 2026 dapat dianalisis menggunakan koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{\left[n\sum x^2 - (\sum x)^2\right]\left[n\sum y^2 - (\sum y)^2\right]}} \tag{4}$$

Kinerja sistem pengukuran dievaluasi menggunakan *Measurement System Analysis* (MSA) melalui parameter *Mean Error* (ME), *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), *Measurement Bias*, dan *Coefficient of Variation* (CV) [11, 15]. *Mean Error* dihitung menggunakan Persamaan 5.

$$\textit{Mean Error}\ (ME) = \frac{1}{n}\sum(y_i - \hat{y}_i) \tag{5}$$

Selanjutnya *Mean Absolute Error* dihitung menggunakan Persamaan 6.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \tag{6}$$

*Root Mean Square Error* dihitung menggunakan Persamaan 7.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{7}$$

*Measurement Bias* dihitung sebagai rata-rata perbedaan antara hasil pengukuran tahun 2026 dan tahun 2024 menggunakan Persamaan 8.

$$Bias = \overline{x_{2026}} - \overline{x_{2024}} \tag{8}$$

Selanjutnya *Coefficient of Variation* dihitung menggunakan Persamaan 9.

$$\textit{Coefficient of Variation}\ \ (CV) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \tag{9}$$

Menurut ISO 10012, kinerja sistem pengukuran perlu dievaluasi berdasarkan kesesuaian proses pengukuran dan ketertelusuran hasil, sedangkan *Coefficient of Variation* (CV) digunakan sebagai indikator variasi relatif, dengan nilai yang lebih rendah menunjukkan konsistensi pengukuran yang lebih baik [11, 15]. Selain itu, *95% confidence interval* dan analisis *Bland–Altman* digunakan untuk mengevaluasi perbedaan dan kesesuaian hasil pengukuran antara 2024 dan 2026 [11].

## 3. Hasil dan Pembahasan

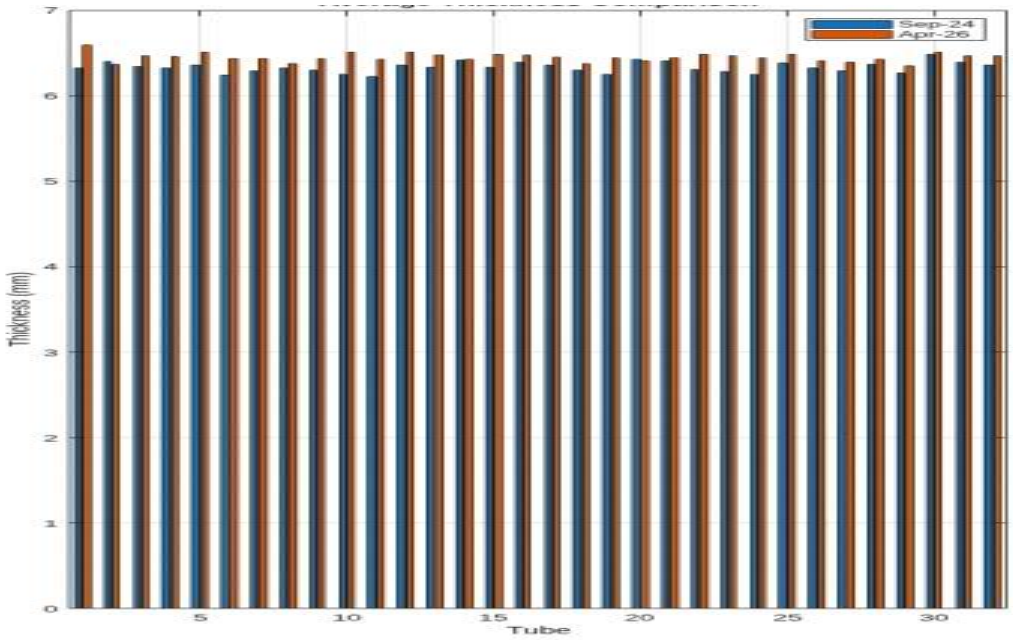
Tabel 1 menunjukkan bahwa rata-rata ketebalan *tube* meningkat dari 6,332 mm pada tahun 2024 menjadi 6,449 mm pada tahun 2026, sedangkan standar deviasi menurun dari 0,061 mm menjadi 0,050 mm. Penurunan standar deviasi menunjukkan hasil pengukuran yang lebih konsisten dibandingkan inspeksi sebelumnya. Namun demikian, peningkatan ketebalan material tidak mungkin terjadi selama

operasi boiler sehingga perubahan tersebut lebih mungkin disebabkan oleh variasi sistem pengukuran dibandingkan pertumbuhan material.

Tabel 1 Statistik deskriptif hasil pengukuran ketebalan *Primary Superheater* tahun 2024 dan 2026

| Parameter | Tahun 2024 | Tahun 2026 |
|---|---|---|
| Minimum (mm) | 6.170 | 6.260 |
| Maksimum (mm) | 6.440 | 6.560 |
| Rata-rata (mm) | 6.332 | 6.449 |
| Median (mm) | 6.328 | 6.445 |
| Standar Deviasi (mm) | 0.061 | 0.050 |

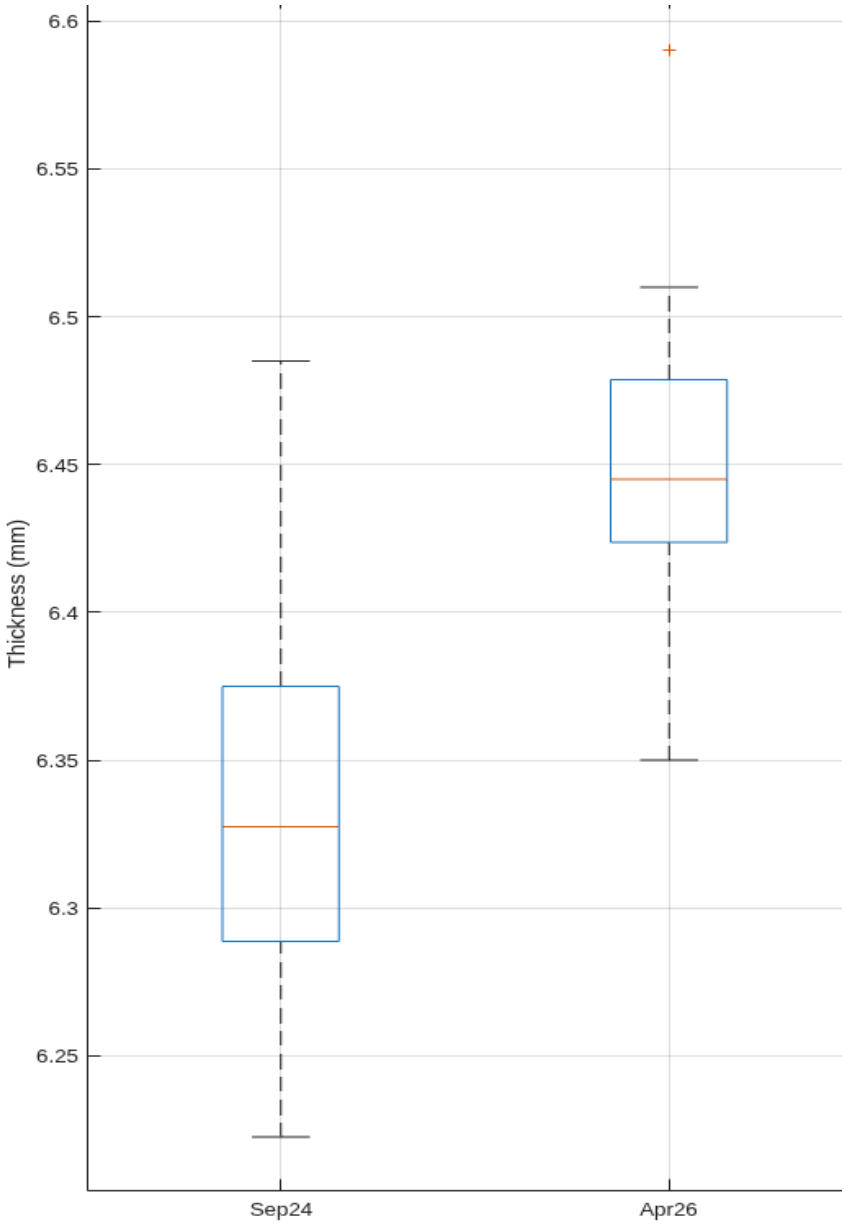
Variasi hasil inspeksi ultrasonik dapat dipengaruhi oleh posisi probe, kondisi permukaan, lapisan oksida, *couplant*, dan operator. Oleh karena itu, interpretasi hasil perlu mempertimbangkan ketidakpastian sistem pengukuran untuk menghindari kesalahan dalam penilaian laju korosi dan sisa umur komponen [5, 6, 11].




Gambar 1 Perbandingan ketebalan *tube Primary Superheater* tahun 2024 dan 2026

Gambar 1 memperlihatkan bahwa sebagian besar *tube* memiliki ketebalan hasil inspeksi tahun 2026 sedikit lebih tinggi dibandingkan tahun 2024. Hanya beberapa *tube* yang menunjukkan penurunan kecil, namun nilainya masih berada dalam rentang variasi pengukuran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat pola *localized wall thinning* pada seluruh tube yang diamati. Perbedaan hasil pengukuran antarperiode dapat dipengaruhi oleh variasi posisi probe dan *repeatability* pengujian, sehingga perubahan kecil tidak selalu menunjukkan degradasi material [6, 10, 11]. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa *Primary Superheater* masih berada dalam kondisi *serviceable*, sehingga inspeksi berkala dan pemantauan berbasis *Condition-Based Maintenance* (CBM) lebih tepat dibandingkan penggantian komponen [7, 8, 9, 11].

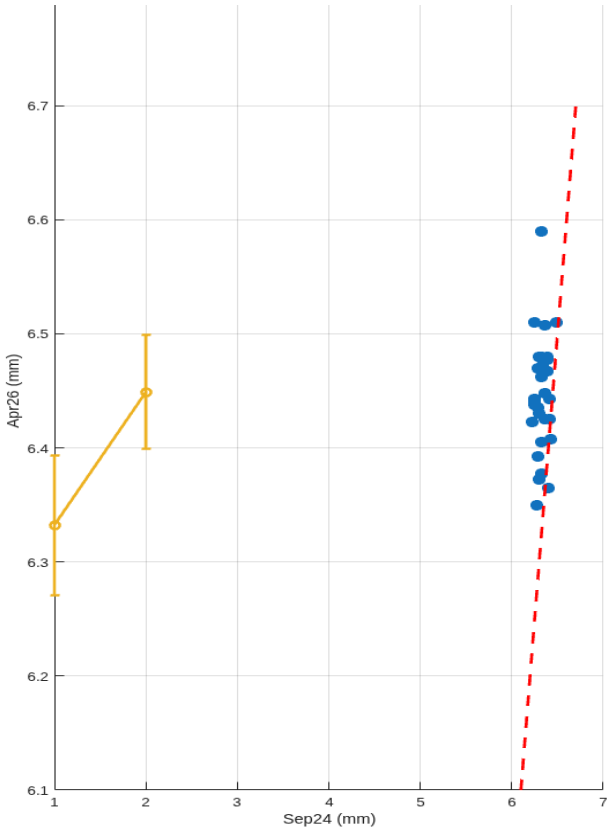
*Boxplot* pada Gambar 2 menunjukkan distribusi data yang relatif homogen tanpa adanya *outlier*. Median kedua kelompok berada di sekitar nilai rata-rata, sedangkan rentang interkuartil relatif sempit sehingga menunjukkan variasi data yang rendah. Penurunan standar deviasi pada tahun 2026 mengindikasikan peningkatan konsistensi hasil inspeksi. Tidak ditemukannya *outlier* juga menunjukkan bahwa tidak terdapat *tube* dengan penipisan ekstrem yang berpotensi menyebabkan kegagalan dini.



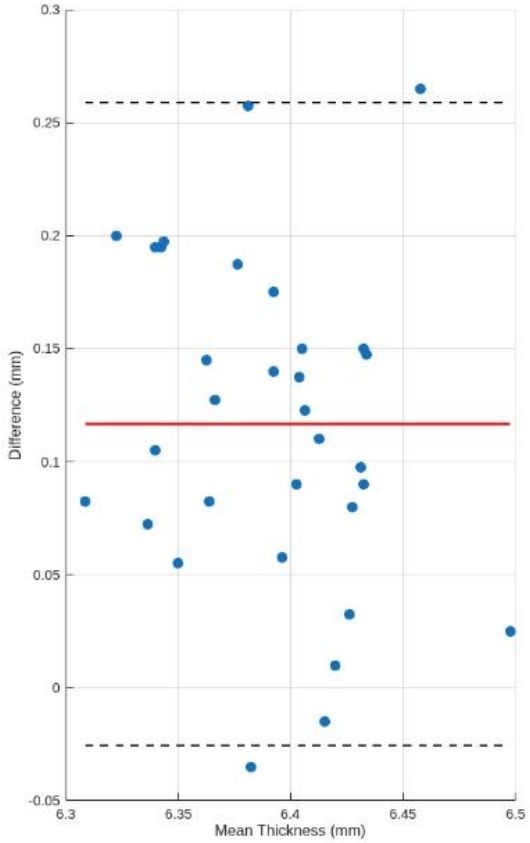

Gambar 2 *Boxplot* distribusi ketebalan *tube* tahun 2024 dan 2026

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa degradasi material masih berlangsung secara seragam sehingga kondisi *tube* masih tergolong baik. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa distribusi ketebalan yang homogen merupakan indikator integritas material yang masih terjaga [7, 11].

Nilai koefisien korelasi Pearson sebesar $r$ = 0,1633 menunjukkan hubungan linear yang lemah antara hasil inspeksi 2024 dan 2026. Namun, korelasi yang rendah tidak secara langsung membuktikan bahwa perbedaan disebabkan oleh variasi sistem pengukuran. Hasil ini perlu diinterpretasikan bersama analisis *paired difference* dan Bland–Altman. Penggunaan *Permanent Reference Point* (PRP) direkomendasikan untuk meningkatkan *repeatability* dan konsistensi posisi pengukuran pada inspeksi berikutnya [5, 6, 11].




Gambar 3 Korelasi hasil pengukuran ketebalan tahun 2024 dan 2026




Gambar 4 *Bland–Altman plot* hasil pengukuran tahun 2024 dan 2026

*Plot Bland–Altman* menunjukkan bahwa sebagian besar data berada dalam *Limits of Agreement*, dengan *mean bias* sebesar 0,1166 mm. Hasil ini menunjukkan adanya bias positif antara kedua periode pengukuran, sehingga perbedaan ketebalan perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan variasi sistem pengukuran. Dengan demikian, hasil *Bland–Altman* mendukung indikasi bahwa perubahan yang diamati lebih mungkin berkaitan dengan variasi pengukuran daripada degradasi material [11, 15].

Tabel 2 Hasil *Measurement System Analysis* (MSA)

| Parameter | Nilai |
|---|---|
| ME | 0.1166 mm |
| MAE | 0.1185 mm |
| RMSE | 0.1368 mm |
| CV 2024 | 0.97 % |
| CV 2026 | 0.78 % |

Nilai *Coefficient of Variation (CV)* kurang dari 1% menunjukkan variasi relatif hasil pengukuran yang rendah. Nilai MAE dan RMSE yang relatif kecil juga menunjukkan konsistensi hasil pengukuran. Dengan demikian, sistem pengukuran masih layak digunakan untuk evaluasi kondisi *tube*, dengan peningkatan kalibrasi dan penggunaan titik referensi untuk memperkuat *repeatability* inspeksi berikutnya [6, 11, 15].

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi *Primary Superheater Flue Gas Outlet* masih berada dalam kategori *serviceable* berdasarkan hasil pengukuran ketebalan selama dua periode inspeksi. Tidak ditemukan indikasi penipisan lokal maupun degradasi yang signifikan sehingga belum diperlukan tindakan penggantian *tube*. Analisis statistik, *boxplot*, korelasi, dan *Bland–Altman* secara konsisten menunjukkan bahwa perbedaan hasil pengukuran lebih dipengaruhi oleh variasi sistem pengukuran daripada mekanisme korosi. Oleh karena itu, evaluasi kondisi tube tidak cukup hanya berdasarkan perubahan nilai ketebalan, tetapi juga harus mempertimbangkan kualitas sistem pengukuran melalui *Measurement System Analysis (MSA).* Penerapan *Permanent Reference Point* (PRP), prosedur kalibrasi yang lebih ketat, dan inspeksi berkala berbasis *Condition-Based Maintenance* (CBM) direkomendasikan untuk meningkatkan *repeatability* dan keandalan pemantauan degradasi *tube*. Pendekatan ini dapat mengurangi ketidakpastian pengukuran dan mendukung efektivitas program pemeliharaan boiler [5, 6, 7, 8, 9, 11].

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi kondisi *Primary Superheater Flue Gas Outlet Unit Boiler #51* PT Amman Mineral Nusa Tenggara berdasarkan hasil inspeksi *Ultrasonic Thickness Measurement* (UTM) pada September 2024 dan April 2026 menggunakan analisis statistik dan *Measurement System Analysis* (MSA). Rata-rata ketebalan meningkat dari 6,332 mm menjadi 6,449 mm dengan selisih 0,1166 mm. Meskipun *paired t-test* menunjukkan perbedaan signifikan ($p < 0,05$), peningkatan tersebut lebih mungkin berkaitan dengan variasi sistem pengukuran daripada perubahan kondisi material, karena degradasi pada kondisi operasi boiler umumnya menyebabkan penurunan ketebalan akibat oksidasi, korosi, erosi, dan *creep*. Hasil MSA menunjukkan variasi pengukuran yang rendah, dengan MAE 0,1185 mm, RMSE 0,1368 mm, dan CV < 1%, sementara analisis *Bland–Altman* menunjukkan sebagian besar data berada dalam *Limits of Agreement*. Tidak ditemukan indikasi *localized wall thinning*, sehingga *Primary Superheater* masih berada dalam kondisi *serviceable*. Untuk meningkatkan keandalan pemantauan kondisi, direkomendasikan penerapan *Permanent Reference Point* (PRP), kalibrasi sesuai standar ASME dan ASTM, inspeksi berkala berbasis *Condition-Based Maintenance* (CBM), serta pelaksanaan MSA secara berkala.

## Daftar Pustaka


[1] R. Khodabandeh, M. Kahani, H.R. Mirdamadi, Assessment of wall thinning in boiler tubes using ultrasonic thickness measurement, Engineering Failure Analysis, 138 (2022) 106317.

[2] F. Silva, M. Costa, J. Oliveira, Ultrasonic inspection and degradation analysis of boiler tubes subjected to high-temperature corrosion, Materials Today Communications, 31 (2022) 103692.

[3] Y. Wang, X. Liu, H. Zhao, Statistical evaluation of wall thinning in superheater tubes using ultrasonic inspection data, Case Studies in Thermal Engineering, 56 (2024) 104215.

[4] American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section V: Nondestructive Examination, New York, NY, USA, ASME, 2023.

[5] ASTM International, ASTM E797/E797M-22: Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse-Echo Contact Method, West Conshohocken, PA, USA, ASTM International, 2022.

[6] ASTM International, ASTM E317-23: Standard Practice for Evaluating Performance Characteristics of Ultrasonic Pulse-Echo Testing Instruments and Systems, West Conshohocken, PA, USA, ASTM International, 2023.

[7] American Petroleum Institute, API 570: Piping Inspection Code, 5th ed., Washington, DC, USA, API, 2022.

[8] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 580: Risk-Based Inspection, 4th ed., Washington, DC, USA, API, 2021.

[9] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 581: Risk-Based Inspection Methodology, 4th ed., Washington, DC, USA, API, 2022.

[10] Z. Li, Y. Wang, H. Zhang, Ultrasonic thickness monitoring for boiler tube integrity assessment under high-temperature operation, NDT & E International, 135 (2023) 102780.

[11] Automotive Industry Action Group, Measurement Systems Analysis (MSA), 4th ed., Southfield, MI, USA, AIAG, 2019.

[12] J. Ferreira, M. Oliveira, Evaluation of measurement uncertainty in ultrasonic thickness testing using Bland-Altman analysis, Measurement, 220 (2023) 113420.

[13] ASM International, ASM Handbook, Volume 11: Failure Analysis and Prevention, Materials Park, OH, USA, ASM International, 2022.

[14] A.K.S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, Mechanical Systems and Signal Processing, 20 (7) (2006) 1483-1510.

[15] International Organization for Standardization, ISO 10012:2003 Measurement Management Systems—Requirements for Measurement Processes and Measuring Equipment, Geneva, Switzerland: ISO, 2003.