



Inspeksi *Tubes* Mesin H₂ Cooler Dengan Metode *Acoustic Pulse Reflectometry*

Elbi Wiseno^{1*}, Maulana Jafar Salsabi²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gunadarma, Indonesia

Alamat: Jl. Margonda Raya No. 100 Pondok Cina, Depok, Jawa Barat

Korespondensi penulis: Elbi_wiseno@staff.gunadarma.ac.id

Abstract. This study aims to evaluate the condition of H₂ cooler tubes at the Merak Power Plant using the Acoustic Pulse Reflectometry (APR) method as a Non-Destructive Test (NDT) technique to detect wall losses, holes, and blockages without damaging the material structure. The inspection process included tube cleaning, positional mapping, visual examination with a borescope, and APR calibration following ASTM E2906/E2906M standards. The results showed that all 330 tubes experienced an average wall loss of 25%, exceeding the allowable limit of 15% for copper C122 material, indicating significant material degradation. Fishbone diagram analysis revealed that long-term operation and internal corrosion were the main causes of deterioration. The study concludes that APR is an effective, fast, and accurate method for detecting wall losses in heat exchanger-based cooling systems. Retubing or replacement of damaged tubes is recommended to maintain the cooling system's efficiency and operational safety.

Keywords: Acoustic Pulse Reflectometry, H₂ Cooler, Non-Destructive Test, Wall Losses, Retubing

Abstrak. Penelitian ini bertujuan menganalisis kondisi tubes H₂ cooler pada PLTU Merak menggunakan metode Acoustic Pulse Reflectometry (APR) sebagai teknik inspeksi Non-Destructive Test (NDT). Metode ini digunakan untuk mendeteksi penurunan ketebalan (wall losses), lubang (hole), dan penyumbatan (blockages) tanpa merusak struktur material. Proses pengujian meliputi pembersihan tube, pemetaan posisi (mapping), pemeriksaan visual menggunakan borescope, serta kalibrasi alat APR sesuai standar ASTM E2906/E2906M. Hasil pengujian menunjukkan seluruh 330 tubes mengalami wall losses rata-rata sebesar 25%, melebihi batas toleransi aman untuk material tembaga C122 yang ditetapkan maksimal 15%. Analisis penyebab kerusakan menggunakan fishbone diagram menunjukkan bahwa degradasi material terjadi akibat umur operasi dan korosi internal. Kesimpulannya, metode APR terbukti efektif, cepat, dan akurat dalam mendeteksi wall losses pada sistem pendingin berbasis heat exchanger. Berdasarkan hasil tersebut, disarankan dilakukan retubing atau penggantian tubes untuk menjaga efisiensi serta keselamatan operasi sistem pendingin PLTU Merak agar lebih spesifik.

Kata kunci: Acoustic Pulse Reflectometry, H₂ Cooler, Non-Destructive Test, Wall Losses, Retubing.

1. LATAR BELAKANG

Inspeksi (*inspection*) merupakan proses sistematis untuk memastikan kualitas dan keamanan produk industri agar sesuai dengan standar yang ditetapkan. Dalam bidang teknik mesin, inspeksi dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu *Destructive Test (DT)* dan *Non-Destructive Test (NDT)* ([Singh R, et al. 2016](#)). Metode NDT memungkinkan pengujian kondisi material tanpa merusak struktur, sehingga banyak digunakan untuk mendeteksi cacat atau kerusakan pada komponen industri seperti *pipeline*, *boiler*, dan *heat exchanger*.

Received: October 10, 2025; Revised: October 25, 2025; Accepted: October 26, 2025; Online Available: October 26, 2025; Published: October 26, 2025;

*Corresponding author, Elbi_wiseno@staff.gunadarma.ac.id

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan metode NDT untuk menganalisis kerusakan pada sistem perpipaan dan *heat exchanger*. [Amir et al. \(2009\)](#) membuktikan bahwa *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR) efektif mendeteksi *wall losses* dan *blockages* dengan akurasi tinggi. [Suastiyanti et al. \(2020\)](#) dan [Saffiudeen et al. \(2023\)](#) menunjukkan bahwa metode *Remote Field Testing* (RFT) dan *Eddy Current Testing* (ECT) juga mampu mengidentifikasi cacat internal dengan baik. [Nicacio et al. \(2021\)](#) serta [Endramawan et al. \(2017\)](#) melaporkan bahwa korosi dan umur operasi menjadi penyebab utama kegagalan pada *heat exchanger tube*.

PLTU Merak menggunakan sistem pendingin berbasis gas hidrogen (*hydrogen-cooled generator*) dengan *H₂ cooler* sebagai penukar panas utama. [Vazdirvanidis et al. \(2019\)](#), mengatakan material *tubes* umumnya menggunakan tembaga C122 yang seiring waktu mengalami *wall losses*, lubang (*hole*), atau penyumbatan (*blockages*) akibat korosi dan usia operasi ([Nugroho, A. et al. 2019](#)). Oleh karena itu, diperlukan metode inspeksi yang akurat dan tidak merusak untuk mengetahui kondisi aktual *tubes* sebagai dasar perawatan dan pengambilan keputusan teknis ([Wibowo, S et al. 2018](#)).

Penelitian ini menerapkan metode *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR) untuk menganalisis kondisi *tubes H₂ cooler* di PLTU Merak. APR dipilih karena mampu mendeteksi penurunan ketebalan (*wall losses*) secara cepat dan kuantitatif ([Purnomo, 2020](#)). Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar evaluasi keandalan komponen pendingin serta mendukung strategi *maintenance* berbasis data pada sistem pembangkitan listrik.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 *Non-Destructive Test* (NDT)

Non-Destructive Test (NDT) adalah metode pengujian material untuk mendeteksi cacat atau kerusakan tanpa merusak benda uji. Tujuannya adalah memastikan integritas komponen dan menentukan tindakan perawatan berdasarkan tingkat kerusakan. Teknik NDT umum digunakan pada industri permesinan dan pembangkit listrik karena mampu mendeteksi kerusakan dini dengan efisiensi tinggi ([Endramawan et al., 2017](#)).

2.2 *Acoustic Pulse Reflectometry*

Acoustic Pulse Reflectometry (APR) merupakan metode NDT yang menggunakan gelombang akustik untuk mendeteksi perubahan ketebalan (*wall loss*), lubang (*hole*), dan

penyumbatan (*blockage*) di dalam *tube* atau pipa ([Sutikno et al. 2017](#)). Prinsip kerjanya adalah menembakkan pulsa akustik ke dalam *tube*; gelombang pantul yang diterima alat dianalisis untuk menentukan adanya ketidakteraturan pada dinding bagian dalam ([Amir et al., 2009](#)). Kelebihan metode APR adalah waktu pemeriksaan yang sangat singkat (kurang dari 10 detik per *tube*) dan akurasi tinggi untuk mendeteksi cacat internal.

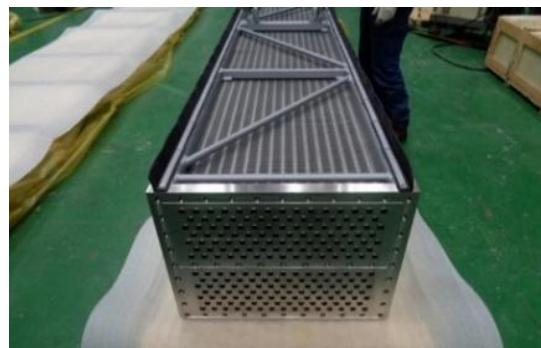


Gambar 1. Acoustic Pulse Reflectometry

Cara kerja alat APR adalah dengan menembakan alat APR ke dalam *tube* yang akan diinspeksi. Alat APR akan menembakan gelombang akustik ke dalam *tube* dan alat APR akan menerima sinyal pantulan pada alat APR lalu data akan diolah dan hasil akan terlihat apabila di dalam *tube* terjadi kerusakan atau tidak ([Zhang H, et al. 2019](#)). Keuntungan metode APRIS adalah pemeriksaan dengan metode ini sangat cepat. Setiap *tube* yang akan diinspeksi hanya dengan waktu kurang dari 10 detik. Kemudian kelebihan metode ini adalah akurasi yang tinggi, dengan metode APR dapat memberikan hasil yang akurat untuk mendeteksi cacat pada tube.

2.3. H₂ Cooler

H₂ cooler merupakan sistem pendingin pada generator yang menggunakan gas hidrogen sebagai media penukar panas. Hidrogen dipilih karena memiliki konduktivitas termal tinggi dan gesekan rendah, sehingga meningkatkan efisiensi pendinginan. *Tubes* pada *H₂ cooler* umumnya terbuat dari tembaga C122 yang dapat mengalami korosi dan *wall loss* akibat usia operasi ([Siregar, Tarigan, & Aryza, 2022](#)). Oleh karena itu, pemeriksaan rutin menggunakan metode NDT seperti APR menjadi penting untuk memastikan kondisi termal dan mekanis sistem tetap optimal..

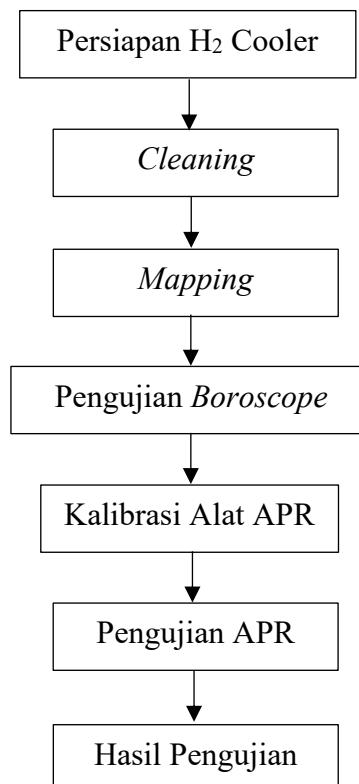


Gambar 2. H₂ Cooler

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen lapangan yang dilakukan pada unit *H₂ cooler* PLTU Merak. Proses inspeksi dilakukan untuk mengetahui kondisi aktual *tubes* menggunakan metode *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR) sebagai teknik *Non-Destructive Test* (NDT). Tahapan utama meliputi persiapan alat dan objek uji, pembersihan *tubes*, pemetaan posisi (*mapping*), pemeriksaan visual menggunakan *borescope*, kalibrasi alat APR, dan pengujian pada setiap *tube*.

Alur lengkap proses inspeksi ditunjukkan pada Gambar 3, yang menggambarkan urutan kegiatan dari tahap persiapan hingga analisis hasil pengujian.



Gambar 3. Flowchart Proses Inspeksi Tubes H₂ Cooler

Pada proses inspeksi *tubes H₂ cooler* dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan mesin *cooler* yang akan diinspeksi yaitu mesin *cooler left* dan mesin *cooler right*
- b. Membersihkan setiap *tubes* yang akan dilakukan inspeksi dengan menggunakan air bertekanan rendah dan dikeringkan dengan angin bertekanan rendah.
- c. Tahap *mapping* dilakukan secara manual dengan memberi penandaan pada setiap *tube*, serta secara otomatis menggunakan komputer.
- d. Melakukan pengujian menggunakan *boroscope* untuk mengecek apakah adanya penyumbatan yang terjadi. Apabila ditemukan penyumbatan maka dilakukan dengan pembersihan ulang.
- e. Kalibrasi alat APR dilakukan menggunakan *tube* berdiameter sama dengan *tube* uji.
- f. Dilanjutkan dengan proses inspeksi menggunakan alat APR ke setiap *tubes* yang diinspeksi.



Gambar 4. Proses Inspeksi *Tubes H₂ Cooler*

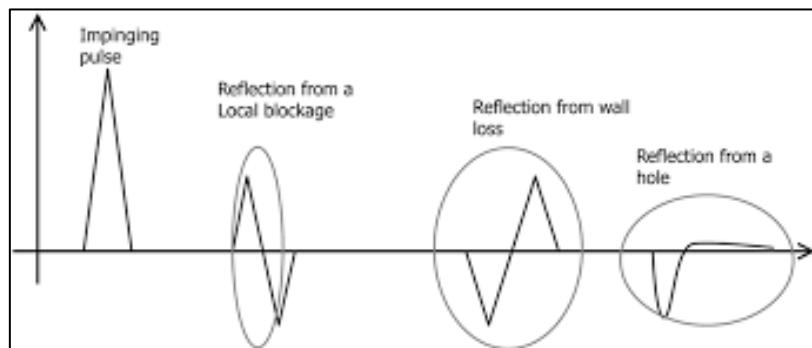
Metode *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR) bekerja dengan prinsip pantulan gelombang akustik yang merambat di sepanjang tube. Setiap perubahan impedansi akustik akibat *wall losses*, *hole*, atau *blockages* akan memunculkan sinyal pantulan yang direkam dan dianalisis secara digital. Sebelum pengujian, dilakukan penentuan variabel utama meliputi diameter dan panjang tube, jenis material (tembaga C122), serta frekuensi pulsa akustik. Kalibrasi alat dilakukan menggunakan *reference tube* dengan dimensi identik untuk memastikan keakuratan hasil.

Data pantulan kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak APRIS untuk mengidentifikasi pola refleksi yang menunjukkan adanya cacat. Proses ini memungkinkan estimasi tingkat kehilangan ketebalan (*wall loss percentage*) pada setiap tube. Dengan pendekatan ini, metode APR dapat mendeteksi kerusakan internal secara cepat dan akurat tanpa merusak struktur material.

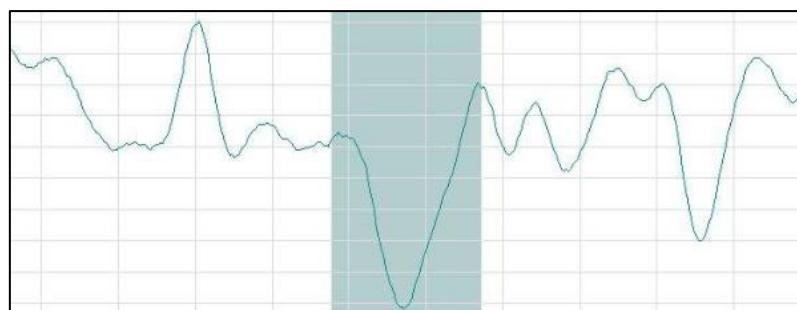
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Setelah semua proses dilakukan, inspektor akan menerima hasil dari tim level 2 APRIS di singapur untuk mengirimkan data yang dihasilkan pada proses inspeksi.



Gambar 5. Standar ASTM E2906/E2906M-13

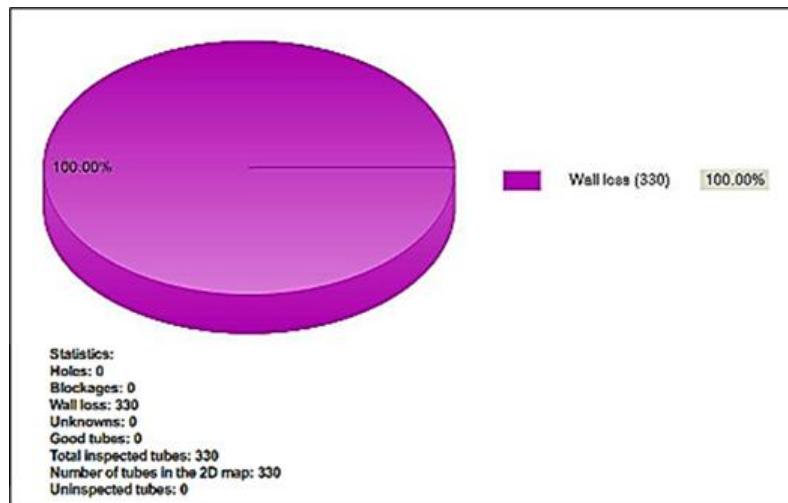


Gambar 6. Grafik Hasil Pengujian APR

Merujuk pada ASTM E2906/E2906M-13 yang ditunjukkan pada Gambar 5 diatas menunjukkan bahwa pada hasil yang ditunjukkan pada inspeksi yang ditunjukkan pada gambar 6 adalah terjadinya *wall losses* atau pengurangan ketebalan pada *tubes* sebesar 25%.

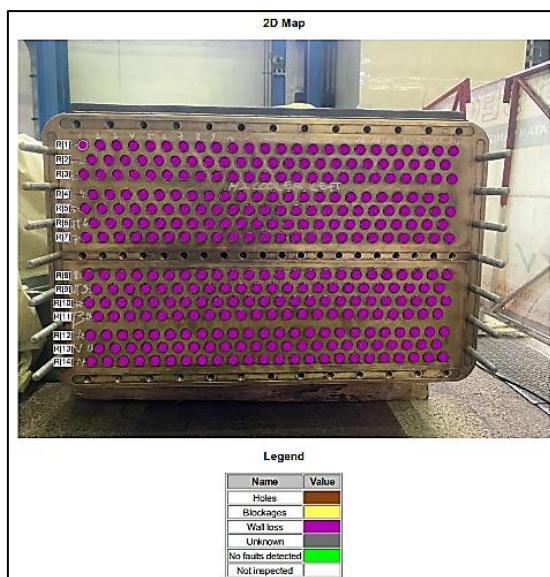
Pada Gambar 6 terlihat hasil sinyal refleksi dari pengujian *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR). Setiap puncak (*peak*) menunjukkan pantulan gelombang akibat perubahan ketebalan dinding tube. Puncak pertama menandakan pantulan dari ujung masuk, sedangkan puncak berikutnya menunjukkan lokasi indikasi cacat. Berdasarkan

hasil kalibrasi terhadap *reference tube*, peningkatan amplitudo refleksi sekitar 25% dibanding kondisi normal menunjukkan adanya penurunan ketebalan (*wall loss*) sekitar 25% sesuai korelasi standar ASTM E2906/E2906M. Dengan demikian, nilai *wall loss* 25% diperoleh dari analisis perbandingan amplitudo refleksi dan waktu pantulan gelombang hasil pengujian APR.



Gambar 7. Diagram Lingkaran Hasil Inspeksi

Pada gambar 7 adalah data *tubes* yang terjadi *wall losses*. Dapat dilihat bahwa mesin H_2 cooler terjadi *wall losses* pada seluruh *tubes* yang berjumlah 330 *tubes*.



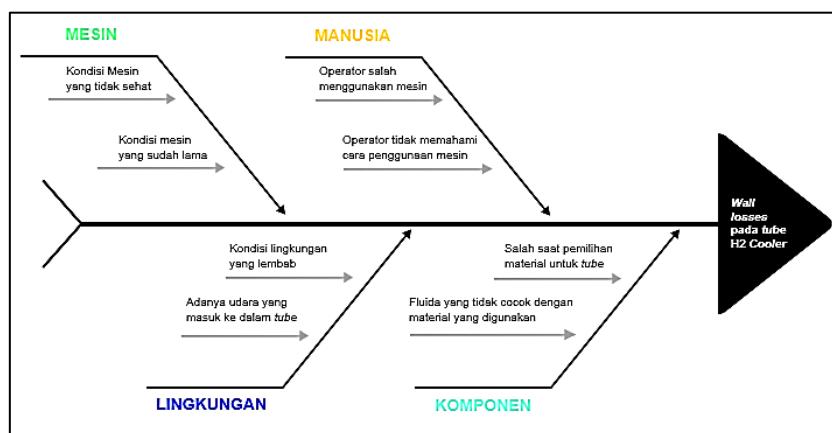
Gambar 8. Hasil Penandaan *Tubes* yang Terjadi Kerusakan

Pada Gambar 8 berguna sebagai penandaan *tubes* yang terindikasi kerusakan. Indikasi kerusakan diberikan dengan penandaan yang liberi warna. Pada pengujian ini dapat dilihat dengan pemberian warna ungu pada *tubes* adalah sebagai indikasi adanya

wall losses. Kemudian operator akan membuat *report* yang akan diberikan kepada *client*. Operator akan memberikan rekomendasi untuk kerusakan *tubes* seperti pada kasus ini, yaitu dengan cara *plugged* atau penutup dan tidak dipakai lagi *tubes* yang terjadi *wall losses* atau bisa juga dengan dilakukan *replace* pada mesin H₂ coolernya diganti dengan mesin yang baru.

4.2. Diagram *Fishbone*

Diagram *fishbone* atau diagram sebab akibat adalah salah satu alat kualitas yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisis penyebab masalah. Diagram ini dirancang untuk membantu dalam proses identifikasi penyebab masalah dengan memvisualisasikan hubungan antara penyebab dan efek.



Gambar 9. Diagram *Fishbone* Kerusakan Tubes H₂ Cooler

Pada kasus seperti ini, kemungkinan yang dapat terjadi sebagai penyebabnya *wall losses* pada *tubes* mesin H₂ cooler ini adalah dikarenakan kondisi mesin yang sudah lama. Karena pada umumnya setiap mesin mempunyai umur optimalnya sehingga apabila mesin yang sudah dipakai dengan kurun waktu yang lama dan mesin dipakai secara terus menerus akan menyebabkan terjadinya *wall losses* pada *tubes*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Acoustic Pulse Reflectometry* (APR) efektif digunakan untuk inspeksi *tubes* H₂ cooler berbahan tembaga C122 di PLTU Merak. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis sinyal refleksi, ditemukan *wall losses* sebesar $\pm 25\%$ pada seluruh 330 *tubes*, yang menunjukkan penurunan ketebalan akibat usia pakai mesin. Analisis menggunakan *fishbone diagram* mengindikasikan penyebab utama kerusakan adalah faktor keausan material dan umur operasi.

Dengan hasil tersebut, disarankan tindakan perawatan berupa *retubing* atau penggantian *tubes* yang rusak agar performa sistem pendingin tetap optimal. Penerapan metode APR terbukti cepat, akurat, dan tidak merusak struktur material, sehingga dapat digunakan sebagai metode inspeksi rutin pada sistem pendingin di industri pembangkitan listrik.

Metode APR terbukti efektif sebagai alat inspeksi non-destruktif yang cepat dan akurat untuk mendeteksi *wall losses* pada sistem pendingin berbasis *heat exchanger* di PLTU Merak.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan pengujian lanjutan menggunakan metode NDT lain seperti *Eddy Current Testing (ECT)* atau *wallsonic Testing (UT)* sebagai pembanding hasil metode APR. Selain itu, inspeksi periodik setiap enam bulan perlu diterapkan guna memantau laju penurunan ketebalan (*wall loss rate*) pada *tubes H₂ cooler*. Penggunaan data historis hasil APR secara berkelanjutan juga dapat dikembangkan untuk membuat model prediksi umur pakai (*lifetime prediction model*) sehingga kegiatan perawatan dapat direncanakan lebih efisien dan preventif.

DAFTAR REFERENSI

- Amir, N., Barzelay, O., Yefet, A., & Pechter, T. (2009). Inspecting U-tube bundles using acoustic pulse reflectometry. *ASME Power Conference*, 43505, 141–145. <https://doi.org/10.1115/POWER2009-81035>
- Endramawan, T., Haris, E., Dionisius, F., & Prinka, Y. (2017). Aplikasi Non Destructive Test Penetrant Testing (NDT-PT) untuk analisis hasil pengelasan SMAW 3G *butt joint*. *JTT (Jurnal Teknologi Terapan)*, 3(2), 60–66. <https://doi.org/10.31849/jtt.v3i2.1054>
- Hidayat, M., & Rohman, A. (2021). Penerapan *Eddy Current Testing (ECT)* untuk Deteksi Cacat *Pitting Corrosion* pada *Tube Condenser* PLTU. *Jurnal Uji Tak Rusak Indonesia (JUTI)*, 4(1), 23-30.
- Nicacio, J. A. P., Lins, V. D. F. C., & Bracarense, A. Q. (2021). Failure analysis in heat exchanger tubes from the top system of the regeneration tower of the hydrotreatment unit in an oil refinery: A case study. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26, e13035. <https://doi.org/10.1590/S1517-7076202100007.13035>
- Nugroho, A., & Prasetyo, B. (2019). Analisis Kegagalan Pipa *Water Wall Tube Boiler* pada PLTU X Akibat *Overheating* dan Korosi. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 14(2), 88-95.
- Purnomo, E., & Santoso, D. (2020). Pengukuran Penipisan Dinding Pipa Akibat Korosi Menggunakan *Ultrasonic Thickness-Measurement*. *ROTASI: Jurnal Teknik Mesin*, 22(3), 112-119.

- Saffiudeen, M. F., Syed, A., & Mohammed, F. T. (2023). Failure analysis of heat exchanger using Eddy Current Testing (ECT). *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23(5), 1898–1906. <https://doi.org/10.1007/s11668-023-01712-1>
- Setiawan, I., & Nugraha, Y. (2019). Analisis Kinerja *Heat Exchanger* Tipe *Shell and Tube* dengan Mempertimbangkan Pengaruh *Fouling*. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 10(1), 67-74.
- Singh, R., & Kumar, A. (2016). A review of NDT techniques for inspection of heat exchanger tubes. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 147, 67-78.
- Siregar, A. O., Tarigan, A. S. P., & Aryza, S. (2022). Analisis penanganan kebocoran hydrogen pada line generator stator cooling water. *Jurnal Darma Agung*, 30(1), 448–458. <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v30i1.1983>
- Suastiyanti, D., Fatanur, Y., & Rupajati, P. (2020). Analisis kerusakan tube heat exchanger menggunakan metode Remote Field Testing (RFT). *Jurnal Teknik Mesin ITI*, 4(3), 73–83. <https://doi.org/10.31543/jtm.v4i3.367>
- Sutikno, & Martono, E. (2017). Peran *Non-Destructive Test* (NDT) dalam Program Inspeksi dan Perawatan Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *Jurnal Energi & Ketenagalistrikan*, 10(2), 76-83.
- Vazdirvanidis, A., Pantazopoulos, G., & Rikos, A. (2019). Failure investigation of Cu-DHP tubes due to ant-nest corrosion. *International Journal of Structural Integrity*, 10(3), 325-336.
- Wibowo, S., & Subekti, A. (2018). Investigasi Kerusakan Material Pipa *Superheater* Boiler PLTU Rembang Akibat Korosi Temperatur Tinggi. *Jurnal Metalurgi dan Material Indonesia*, 20(1), 45-52.
- Zhang, H., & Li, J. (2019). Signal processing techniques for defect characterization in tubes using acoustic pulse reflectometry. *NDT & E International*, 102, 115-124.