E-ISSN : 3025-1311
https://journal.cib.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 3 Tahun 2026

Analisis Penyebab Engine Overheating Pada Unit Excavator Caterpillar 302.5

Aldi Abdillah[1]* , Fuad Zainuri [1]*, Muhammad Todaro[1]*
[1]Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425
*Corresponding author *E-mail address: fuad.zainuri@mesin.pnj.ac.id*

Abstrak

Engine overheating merupakan salah satu permasalahan yang sering terjadi pada alat berat dan dapat menyebabkan kerusakan serius, salah satunya pada cylinder head. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor penyebab engine overheating, menganalisis hubungan sebab-akibat yang mengarah pada kerusakan cylinder head, menentukan akar penyebab menggunakan metode 5 Why Analysis, serta menyusun rekomendasi tindakan perbaikan dan pencegahan. Penelitian menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kualitatif melalui observasi, wawancara, dokumentasi, dan pemeriksaan komponen sistem pendingin pada Mini Excavator Caterpillar 302.5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan air biasa sebagai media pendingin serta tidak dilaksanakannya preventive maintenance sesuai Operation and Maintenance Manual (OMM) menyebabkan terbentuknya korosi dan endapan pada thermostat serta penyumbatan pada radiator. Kondisi tersebut mengakibatkan thermostat mengalami delay opening dan radiator mengalami clogging, sehingga pelepasan panas tidak berlangsung optimal dan memicu engine overheating. Dampak yang ditimbulkan adalah terjadinya warpage pada cylinder head yang ditunjukkan oleh hasil pengukuran kerataan melebihi batas standar Caterpillar. Penelitian ini merekomendasikan penggunaan coolant sesuai spesifikasi pabrikan, penerapan preventive maintenance secara berkala, serta inspeksi rutin terhadap komponen sistem pendingin untuk mencegah terulangnya kerusakan.

Kata-kata kunci: engine overheating, cylinder head, sistem pendingin, 5 Why Analysis, preventive maintenance

Abstract

Engine overheating is one of the most common problems encountered in heavy equipment and may lead to severe damage, particularly to the cylinder head. This study aims to identify the factors causing engine overheating, analyze the cause-and-effect relationships leading to cylinder head failure, determine the root cause using the 5 Why Analysis method, and propose corrective and preventive actions. This research employed a descriptive qualitative approach through observation, interviews, documentation, and inspection of the cooling system components of a

Article History
Received: Agustus 2026
Reviewed:Agustus 2026
Published: Agustus 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

Caterpillar 302.5 mini excavator. The results indicate that the use of plain water instead of the manufacturer-recommended coolant, combined with the failure to perform preventive maintenance in accordance with the Operation and Maintenance Manual (OMM), resulted in corrosion and scale formation on the thermostat as well as clogging within the radiator. These conditions caused delayed thermostat opening and reduced radiator heat dissipation efficiency, leading to engine overheating. As a consequence, the cylinder head experienced warpage, as confirmed by flatness measurements exceeding Caterpillar's allowable tolerance. The study recommends using coolant that meets the manufacturer's specifications, implementing scheduled preventive maintenance, and conducting routine inspections of cooling system components to prevent similar failures.
Keywords: engine overheating, cylinder head, cooling system, 5 why analysis, preventive maintenance

1. PENDAHULUAN

Mini excavator merupakan salah satu alat berat yang berperan penting dalam mendukung pekerjaan konstruksi, pertambangan, perkebunan, maupun pemindahan tanah. Tingginya intensitas penggunaan mengharuskan setiap komponen bekerja secara optimal, terutama engine diesel sebagai sumber tenaga bagi sistem hidrolik dan seluruh mekanisme kerja alat, sehingga keandalan engine menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas operasi dan meminimalkan downtime.

Selama beroperasi, engine diesel menghasilkan panas yang tinggi akibat proses pembakaran, sehingga diperlukan cooling system yang mampu menyerap dan melepaskan panas secara efektif agar temperatur kerja engine tetap berada pada batas normal. Apabila sistem pendinginan tidak bekerja optimal, panas hasil pembakaran tidak dapat dilepaskan secara maksimal sehingga temperatur engine meningkat dan berpotensi menimbulkan engine overheating yang, apabila tidak segera ditangani, dapat menurunkan performa engine hingga merusak komponen utama seperti cylinder head [1].

Salah satu komponen yang paling rentan mengalami kerusakan akibat overheating adalah cylinder head. Paparan temperatur berlebih secara terus-menerus dapat menyebabkan deformasi (warpage) pada permukaan cylinder head, kerusakan cylinder head gasket, kebocoran kompresi, hingga tercampurnya coolant dengan oli pelumas [2], [3].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji permasalahan engine overheating dengan objek dan pendekatan yang beragam. Malik dan Apriana menerapkan metode Root Cause Analysis (RCA) untuk mengidentifikasi penyebab overheating pada engine Cummins QSX15 dan menemukan bahwa aftercooler yang kotor akibat minimnya perawatan berkala menjadi penyebab utama [4]. Prasetyo dkk. menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dan menemukan bahwa penurunan kinerja fresh water cooler dan sea water pump menjadi penyebab overheat pada main engine kapal self propelled oil barge [5]. Suhartono dkk. menemukan bahwa overheating pada auxiliary engine CAT 18 disebabkan oleh retaknya sea water pump body, penurunan kinerja thermostat, dan penyumbatan sea chest strainer [6]. Rodhi dkk. mengkaji kerusakan pada main engine akibat abnormalitas sistem pendinginan yang

berkembang menjadi kebocoran coolant ke dalam silinder [7]. Ramadhan dkk. menggunakan RCA dan Fishbone Diagram dan menemukan bahwa retaknya cylinder liner menjadi penyebab utama peningkatan coolant temperature pada engine CAT C-15 [8]. Purwono menjelaskan bahwa kebocoran kompresi melalui head gasket yang rusak menjadi penyebab munculnya gelembung pada coolant radiator bulldozer D375A-5 [9]. Wahyudinata dkk. menggunakan metode 7 Steps Troubleshooting dan menemukan bahwa kerusakan water pump menjadi penyebab overheating pada engine wheel loader 835H Liugong [10]. Ketujuh penelitian tersebut menunjukkan bahwa penyebab engine overheating bersifat spesifik terhadap objek dan kondisi operasionalnya masing-masing, namun belum ada penelitian yang secara khusus menelusuri akar penyebab engine overheating pada Mini Excavator Caterpillar 302.5 menggunakan pendekatan 5 Why hingga menemukan titik pertemuan (konvergensi) antara beberapa jalur kegagalan komponen sistem pendingin.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab engine overheating pada sistem pendingin Mini Excavator Caterpillar 302.5, menganalisis hubungan sebab-akibat yang mengarah pada kerusakan cylinder head, menentukan akar penyebab (root cause) menggunakan metode 5 Why Analysis [11], serta menyusun rekomendasi tindakan perbaikan (corrective action) dan pencegahan (preventive action) agar kerusakan serupa tidak terulang.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Jenis dan Objek Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kualitatif melalui desain studi kasus (case study) untuk mengungkap secara mendalam penyebab engine overheating dan kerusakan cylinder head sesuai kondisi aktual di lapangan. Objek penelitian adalah satu unit Mini Excavator Caterpillar 302.5 yang mengalami engine overheating dan kerusakan cylinder head, dengan lokasi penelitian di workshop Teknik Alat Berat, Politeknik Negeri Jakarta.

2.2 Jenis dan Sumber Data

Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap kondisi unit serta wawancara dengan teknisi yang menangani unit tersebut [12]. Data sekunder diperoleh dari Operation and Maintenance Manual (OMM) Caterpillar 302.5, Service Manual Caterpillar 302.5, spesifikasi teknis unit, serta literatur ilmiah yang membahas engine overheating dan sistem pendingin.

2.3 Tahapan Analisis Data

Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi masalah berupa terjadinya engine overheating yang diduga disebabkan oleh gangguan pada cooling system, dilanjutkan dengan studi literatur, pengumpulan data melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi, serta pemeriksaan fisik terhadap komponen cooling system, yaitu coolant, radiator, hose, thermostat, cooling fan, water pump, dan cylinder head. Hasil pemeriksaan setiap komponen kemudian dibandingkan dengan spesifikasi yang tercantum pada OMM dan Service Manual Caterpillar untuk mengetahui ketidaksesuaian kondisi maupun fungsi komponen. Komponen yang teridentifikasi mengalami kegagalan selanjutnya dianalisis secara terpisah menggunakan metode 5 Why Analysis untuk menelusuri hubungan sebab-akibat pada masing-masing jalur kegagalan hingga diperoleh akar penyebab (root cause). Apabila beberapa jalur analisis bermuara pada penyebab yang sama, maka penyebab tersebut ditetapkan sebagai root cause

tunggal yang mendasari seluruh kegagalan. Hasil analisis selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi tindakan perbaikan (corrective action) dan tindakan pencegahan (preventive action).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gambaran Umum Objek Penelitian dan Temuan Awal

Objek penelitian adalah unit Mini Excavator Caterpillar 302.5 dengan engine CAT 3013 yang mengalami engine overheating pada saat dioperasikan. Berdasarkan hasil wawancara dengan teknisi, gejala yang muncul saat overheating adalah coolant menyembur keluar dari radiator menuju tangki reservoir akibat peningkatan tekanan di dalam sistem pendinginan. Hasil observasi awal menemukan tiga indikasi utama, yaitu rembesan coolant pada housing thermostat, tercampurnya oli pada coolant yang ditandai perubahan warna dan lapisan oli di permukaannya, serta coolant yang menyembur keluar dari radiator saat temperatur engine meningkat. Temuan tersebut menjadi dasar untuk melakukan pemeriksaan menyeluruh terhadap seluruh komponen cooling system.

3.2 Hasil Pemeriksaan Komponen Sistem Pendingin

Pemeriksaan dilakukan terhadap seluruh komponen cooling system dan dibandingkan dengan spesifikasi pada OMM dan Service Manual Caterpillar. Ringkasan hasil pemeriksaan disajikan pada Tabel 1.

No.	Komponen	Temuan Pemeriksaan	Status
1	Coolant	Media pendingin berupa air biasa, tidak mengandung corrosion inhibitor maupun anti-scaling additive	Tidak sesuai spesifikasi
2	Radiator	Sirip pendingin tertutup debu dan kotoran, sebagian mengalami deformasi ringan, serta ditemukan endapan pada saluran internal	Tersumbat (clogged)
3	Hose	Tidak ditemukan retak, deformasi, maupun rembesan pada sambungan	Baik
4	Thermostat	Korosi dan endapan kerak pada katup dan badan thermostat; setelah dibersihkan, hasil pengujian tiga kali menunjukkan pembukaan pada 82,8–83,2°C dan terbuka penuh pada 94,7–95,4°C, sesuai OMM	Sesuai spesifikasi setelah dibersihkan
5	Cooling fan	Seluruh fan blade dan hub dalam kondisi utuh, tidak ada retak maupun deformasi	Baik
6	Water pump	Tidak ditemukan kebocoran mechanical seal maupun keausan impeller	Baik
7	Cylinder head	Permukaan mengalami warpage; empat dari enam titik pengukuran kerataan melebihi batas standar 0,05 mm, dengan nilai tertinggi 0,10 mm pada posisi A–B	Melebihi toleransi (warpage)

Table 1. Ringkasan Hasil Pemeriksaan Komponen Sistem Pendingin

Hasil pemeriksaan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa dua komponen mengalami kegagalan fungsional, yaitu thermostat dan radiator, sedangkan hose, cooling fan, dan water pump masih berada dalam kondisi baik. Kegagalan pada kedua komponen tersebut secara bersamaan menghambat proses pelepasan panas pada sistem pendingin sehingga temperatur engine meningkat melebihi batas kerja normal dan mengakibatkan cylinder head mengalami warpage.

3.3 Analisis Root Cause Analysis (RCA) dengan Pendekatan 5 Why

Berdasarkan hasil pemeriksaan yang menunjukkan dua komponen mengalami kegagalan, yaitu thermostat dan radiator, analisis 5 Why Analysis dilakukan secara terpisah pada masing-masing jalur kegagalan untuk menelusuri akar penyebabnya. Ringkasan analisis disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tahapan	Pertanyaan	Hasil Analisis
Masalah	Mengapa terjadi engine overheating?	Temperatur engine meningkat melebihi batas kerja normal.
Why 1	Mengapa temperatur engine meningkat?	Sirkulasi coolant menuju radiator terhambat sehingga panas hasil pembakaran terakumulasi di sistem pendingin.
Why 2	Mengapa sirkulasi coolant terhambat?	Thermostat mengalami keterlambatan membuka (delay opening).
Why 3	Mengapa thermostat mengalami delay opening?	Katup dan badan thermostat dipenuhi endapan (scale) serta korosi sehingga pergerakan katup terhambat.
Why 4	Mengapa terbentuk endapan dan korosi?	Sistem pendingin menggunakan air biasa, bukan coolant sesuai spesifikasi pabrikan, sehingga tidak memiliki corrosion inhibitor maupun anti-scaling additive.
Why 5 (Root Cause)	Mengapa penggunaan air biasa ini terjadi?	Penggantian coolant tidak dilakukan sesuai prosedur dan interval preventive maintenance pada OMM — ditetapkan sebagai root cause jalur thermostat.

Table 2. Analisis 5 Why – Thermostat

Tahapan	Pertanyaan	Hasil Analisis
Masalah	Mengapa terjadi engine overheating?	Temperatur engine meningkat melebihi batas kerja normal.
Why 1	Mengapa temperatur engine meningkat?	Panas dari coolant tidak dapat dilepaskan secara optimal ke udara melalui radiator.
Why 2	Mengapa radiator tidak dapat melepaskan panas secara optimal?	Radiator mengalami penyumbatan (clogged) pada saluran internal serta

		sirip pendingin tertutup debu dan kotoran.
Why 3	Mengapa radiator tersumbat?	Terdapat endapan (scale) yang menempel pada saluran internal radiator sehingga mengganggu aliran coolant.
Why 4	Mengapa terbentuk endapan pada saluran radiator?	Media pendingin berupa air biasa tidak memiliki anti-scaling additive, diperparah tidak adanya pembersihan radiator secara berkala.
Why 5 (Root Cause)	Mengapa penggunaan air biasa dan minimnya pembersihan berkala ini terjadi?	Tidak dilaksanakannya preventive maintenance sesuai interval OMM, termasuk penggantian coolant dan pembersihan radiator — ditetapkan sebagai root cause jalur radiator.

Table 3. Analisis 5 Why – Radiator

Kedua hasil analisis 5 Why pada Tabel 2 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa akar penyebab pada jalur thermostat maupun jalur radiator bermuara pada penyebab yang sama, yaitu penggunaan media pendingin yang tidak sesuai spesifikasi pabrikan (air biasa), yang tidak memenuhi konsentrasi glycol minimum sebagaimana disyaratkan pada General Coolant Information Caterpillar [13], akibat tidak dilaksanakannya preventive maintenance sesuai OMM. Root cause tunggal tersebut memicu dua jalur kegagalan yang berlangsung bersamaan: thermostat mengalami keterlambatan membuka (delay opening) dan radiator mengalami penyumbatan (clogged), sehingga pelepasan panas dari sistem pendingin tidak berlangsung optimal. Kondisi ini menyebabkan temperatur engine meningkat secara terus-menerus hingga melebihi batas kerja normal dan memicu engine overheating, yang pada akhirnya menyebabkan cylinder head mengalami deformasi (warpage) akibat paparan temperatur tinggi yang berlangsung berulang.

3.4 Rekomendasi Tindakan Perbaikan dan Pencegahan

Berdasarkan akar penyebab yang telah diidentifikasi, dirumuskan rekomendasi tindakan perbaikan (corrective action) dan tindakan pencegahan (preventive action) sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

No.	Temuan	Tindakan	Kategori
1	Endapan dan korosi pada sistem pendingin	Menguras seluruh coolant lama dan melakukan flushing pada radiator, water jacket, dan seluruh saluran pendingin	Corrective
2	Thermostat tertutup endapan	Membersihkan thermostat dan menguji ulang temperatur pembukaan katup; hasil masih sesuai spesifikasi OMM sehingga tidak perlu diganti	Corrective
3	Warpage pada cylinder head	Mengukur ulang kerataan permukaan; melakukan resurfacing bila masih dalam	Corrective

		toleransi, atau penggantian bila melampaui batas Service Manual	
4	Kontaminasi oli oleh coolant	Mengganti cylinder head gasket, menguras oli mesin yang terkontaminasi beserta filter, dan mengisi oli baru sesuai spesifikasi	Corrective
5	Debu dan deformasi ringan pada sirip radiator	Membersihkan permukaan radiator dan memperbaiki fin yang mengalami deformasi ringan	Corrective
6	Media pendingin tidak sesuai spesifikasi	Mengisi ulang sistem pendingin dengan coolant sesuai spesifikasi Caterpillar dan tidak menggunakan air biasa meskipun bersifat sementara	Preventive
7	Preventive maintenance belum terlaksana sesuai OMM	Melaksanakan preventive maintenance berkala sesuai interval OMM, termasuk pemeriksaan thermostat, radiator, dan level coolant	Preventive
8	Deteksi dini gangguan pendinginan	Melakukan daily check terhadap indikator temperatur engine dan kondisi visual sistem pendingin sebelum unit dioperasikan	Preventive

Table 4. Rekomendasi Tindakan Perbaikan dan Pencegahan

Implementasi rekomendasi pada Tabel 4 diharapkan dapat mengatasi kerusakan yang telah terjadi sekaligus mencegah terulangnya engine overheating dan kerusakan cylinder head pada unit Mini Excavator Caterpillar 302.5 di masa mendatang, sekaligus meningkatkan keandalan dan umur pakai engine [14].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap Unit Mini Excavator Caterpillar 302.5 yang mengalami engine overheating dan kerusakan cylinder head, menggunakan metode Root Cause Analysis (RCA) dengan pendekatan 5 Why Analysis, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Engine overheating pada unit Mini Excavator Caterpillar 302.5 disebabkan oleh dua kegagalan komponen yang berlangsung bersamaan, yaitu thermostat yang mengalami korosi dan endapan sehingga diduga mengalami delay opening, serta radiator yang mengalami penyumbatan (clogged) pada saluran internal disertai penumpukan debu dan kotoran pada sirip pendingin.
2. Hubungan sebab-akibat menunjukkan bahwa kedua kegagalan tersebut berawal dari penggunaan air biasa sebagai media pendingin yang tidak mengandung corrosion inhibitor maupun anti-scaling additive, sehingga panas hasil pembakaran terakumulasi di dalam sistem pendingin, temperatur engine meningkat melebihi batas kerja normal, dan akhirnya menyebabkan cylinder head mengalami deformasi (warpage) yang berpotensi menimbulkan kebocoran antara oil gallery dan coolant passage.

3. Hasil analisis 5 Why Analysis pada jalur thermostat dan jalur radiator menunjukkan bahwa keduanya bermuara pada root cause yang sama, yaitu penggunaan media pendingin yang tidak sesuai spesifikasi pabrikan akibat tidak dilaksanakannya preventive maintenance sesuai Operation & Maintenance Manual (OMM).
4. Rekomendasi tindakan perbaikan meliputi flushing sistem pendingin, pembersihan dan pengujian ulang thermostat, pengukuran ulang serta perbaikan/penggantian cylinder head, penggantian cylinder head gasket dan oli mesin, serta pembersihan radiator; sedangkan rekomendasi pencegahan meliputi penggunaan coolant sesuai spesifikasi pabrikan, pelaksanaan preventive maintenance berkala sesuai OMM, serta daily check terhadap kondisi sistem pendingin sebelum unit dioperasikan.

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian ini adalah agar penggunaan coolant pada Mini Excavator Caterpillar 302.5 selalu mengikuti spesifikasi pabrikan dan tidak digantikan dengan air biasa meskipun bersifat sementara, preventive maintenance pada cooling system dilaksanakan secara konsisten sesuai interval OMM, serta apabila ditemukan gejala engine overheating, unit sebaiknya segera dihentikan untuk dilakukan pemeriksaan guna mencegah kerusakan yang lebih serius pada cylinder head.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Allah SWT atas rahmat dan kemudahan yang diberikan selama penelitian ini berlangsung. Terima kasih kepada orang tua penulis yang senantiasa memberikan dukungan doa, moril, dan material. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Fuad Zainuri, S.T., M.Si. dan Muhammad Todaro, S.T., M.Tr.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta masukan selama pelaksanaan penelitian, serta kepada Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta atas dukungan fasilitas dan akademik dalam penyusunan penelitian ini.

REFERENSI

[1] D. Prasetyo, A. Apriana, and D. M. Hidayatullah, “Analisa Engine Overheating Unit Excavator HX210S Hyundai,” Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, pp. 1414–1421, 2022.
[2] Gunawan, “Identifikasi Kerusakan Tutup Radiator Terhadap Suhu Engine Toyota Kijang 5K,” Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy, vol. 4, no. 1, pp. 24–30, 2020.
[3] I. Ramli, “Analisa Kerusakan Cylinder Head pada Diesel Engine QSK 50 MCRS Di Bengkel Sungai Sembilan Nunukan,” vol. 3, no. 7, p. 6, 2021.
[4] A. Malik and A. Apriana, “Analisa Penyebab Overheat Pada Engine Cummins,” pp. 124–132, 2025.
[5] P. Prasetyo, A. Seno, P. Pelayaran, and S. Barat, “Jurnal Cakrawala Bahari,” vol. 5, no. 2, pp. 5–10, 2022.
[6] Marshelino Chandra Suhartono, A. Nugroho, T. Rahayu, A. E. Kristiyono, S. D. Robbi, and I. Sutrisno, “Analysis of Overheating On Auxiliary Engine Cat 18 On Ahts Ship Logindo Stamina,” Asian Journal Science and Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 1–17, 2025.

[7] Alex Bima Rodhi, E. Darmana, and F. Pujiyanto, "Analisis Masuknya Air Pendingin kedalam Cylinder Main Engine di Kapal MT. Transko Bima," Marine Science and Technology Journal, vol. 2, no. 1, pp. 24–35, 2025.

[8] G. Ramadhan, M. Todaro, and Y. Yusyama, "Analisis Peningkatan Coolant Temperature pada Engine Diesel Cat C-15 Akibat Kontaminasi Oli Engine dengan Air Radiator Serta Efisiensi Overhaul," vol. 2, pp. 478–487, 2025.

[9] R. Hendro Purwono, "Analisis kebocoran air pendingin dari radiator pada bulldozer tipe D375A-5," Toab - 002, pp. 1–7, 2018.

[10] M. E. Wahyudinata, R. Noval, and I. Susanto, "Analisa Overheating Engine Whell Loader 835 H Liugong Studi Kasus Pada Waterpump," Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin, pp. 1473–1482, 2024.

[11] F. A. Saputra and D. T. Santoso, "Analysis of Production Defects Using The 5 WHYS and RCA Method at PT. X," Transmisi, vol. 20, no. 2, pp. 52–59, 2024.

[12] S. P. Chand, "Methods of Data Collection in Qualitative Research: Interviews, Focus Groups, Observations, and Document Analysis," Advances in Educational Research and Evaluation, vol. 6, no. 1, pp. 303–317, 2025.

[13] Caterpillar Inc., General Coolant Information (SEBU6250-36), Special Publication. Caterpillar Inc., 2025.

[14] M. Sawaludin, H. Maksum, and W. Wagino, "The Comparison of Water Cooling Media Against Radiator Heat Dissipation Rate in Diesel Engines," MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering, vol. 3, no. 1, pp. 19–26, 2021.