

DOI: <https://doi.org/10.38035/sjtl.v4i3.1229><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Received: 21 September 2026 | Revised: 17 October 2026 | Accepted: 19 October 2026

Analisis Akar Penyebab Kegagalan pada Sistem Bahan Bakar, Pengisian Daya, dan Hidraulik *Baggage Towing Tractor* Menggunakan Diagram Fishbone dan Analisis 5 Why

Satrio Endra Gemilang¹, Ukkasyah Sabbit Aqdamana Lubis², Mulyadi Nur³

¹Politeknik Penerbangan Jayapura, Papua, Indonesia, ghozzaly27@gmail.com

²Politeknik Penerbangan Jayapura, Papua, Indonesia, ukkasyah_sabbit@kemenhub.go.id

³Politeknik Penerbangan Jayapura, Papua, Indonesia, mulyadi_nur@dephub.go.id

Corresponding Author: ghozzaly27@gmail.com¹

Abstract: Ground Support Equipment (GSE) plays a vital role in supporting aircraft ground handling operations. The reliability of baggage towing tractors directly affects operational efficiency, safety, and airport service continuity. This study aims to identify the root causes of failures occurring in a baggage towing tractor powered by an Isuzu 4JB1-T diesel engine after prolonged storage without operation. The research employed a qualitative descriptive approach using Root Cause Analysis (RCA), supported by Fishbone Diagram and 5 Why Analysis. Data were collected through visual inspection, functional testing, maintenance record analysis, and interviews with maintenance personnel. Four dominant failures were identified, namely battery charging system failure, fuel feed pump malfunction, hydraulic power steering seal leakage, and starter trigger failure. The analysis revealed that component aging, prolonged inactivity, biodiesel degradation during storage, moisture-induced corrosion, and the absence of preventive maintenance were the primary root causes. The findings indicate that most failures originated not from normal operational wear but from storage-related degradation. The study recommends implementing preventive maintenance schedules, periodic engine operation during storage, regular fuel quality monitoring, battery charging management, and replacement of elastomer components compatible with biodiesel blends to improve the reliability of Ground Support Equipment.

Keyword: Root Cause Analysis, Fishbone Diagram, Baggage Towing Tractor, Biodiesel, Preventive Maintenance.

Abstrak: Ground Support Equipment (GSE) merupakan peralatan pendukung yang berperan penting dalam menjamin kelancaran pelayanan pesawat udara di sisi darat. Keandalan Baggage Towing Tractor sangat menentukan kelancaran proses penanganan bagasi, keselamatan operasi, dan kontinuitas pelayanan bandar udara. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada Baggage Towing Tractor bermesin diesel Isuzu 4JB1-T yang mengalami penyimpanan dalam waktu lama tanpa dioperasikan. Penelitian menggunakan metode deskriptif kualitatif dengan pendekatan Root Cause Analysis (RCA) yang dipadukan dengan Fishbone Diagram dan 5 Why Analysis. Data diperoleh melalui inspeksi visual, pengujian fungsi, analisis riwayat pemeliharaan, dan wawancara dengan teknisi pemeliharaan.

Hasil penelitian menunjukkan empat jenis kerusakan dominan, yaitu kerusakan sistem pengisian baterai, kerusakan feed pump bahan bakar, kebocoran seal power steering hidraulik, serta kerusakan trigger starter. Analisis menunjukkan bahwa penuaan komponen, penyimpanan kendaraan tanpa pengoperasian, degradasi biodiesel selama penyimpanan, korosi akibat kelembapan lingkungan, dan tidak dilaksanakannya pemeliharaan preventif merupakan akar penyebab utama kerusakan. Temuan penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar kerusakan tidak disebabkan oleh keausan operasi, tetapi oleh degradasi selama masa penyimpanan. Oleh karena itu, diperlukan penerapan program pemeliharaan preventif, pengoperasian berkala selama penyimpanan, pengendalian kualitas bahan bakar, pengelolaan sistem pengisian baterai, serta penggunaan material elastomer yang kompatibel dengan biodiesel untuk meningkatkan keandalan Ground Support Equipment.

Kata Kunci: *Root Cause Analysis, Fishbone Diagram, Baggage Towing Tractor, Biodiesel, Pemeliharaan Preventif.*

PENDAHULUAN

Ground Support Equipment (GSE) merupakan peralatan penunjang yang memiliki peran penting dalam mendukung kelancaran operasi penerbangan di sisi udara (*airside*). Salah satu jenis GSE yang berperan dalam proses *ground handling* adalah *Baggage Towing Tractor* (BTT), yaitu kendaraan yang digunakan untuk menarik kereta bagasi dari terminal menuju pesawat maupun sebaliknya. Keandalan BTT sangat memengaruhi efisiensi operasional bandar udara karena kerusakan kendaraan dapat meningkatkan turnaround time, mengganggu distribusi bagasi, serta menurunkan kualitas pelayanan penerbangan. Oleh karena itu, penerapan sistem pemeliharaan yang efektif menjadi aspek penting dalam menjaga ketersediaan (*availability*) dan keandalan (*reliability*) kendaraan GSE.

Kerusakan pada kendaraan operasional umumnya dipengaruhi oleh faktor usia komponen, intensitas penggunaan, kondisi lingkungan, dan kualitas program pemeliharaan. Namun demikian, kendaraan yang mengalami penyimpanan dalam jangka waktu lama tanpa dioperasikan juga memiliki risiko kerusakan yang tinggi akibat degradasi komponen mekanis, kelistrikan, *hidraulik*, maupun sistem bahan bakar. Selama masa penyimpanan, baterai mengalami proses self-discharge yang dapat berkembang menjadi hard sulfation, sehingga kapasitas penyimpanan energi menurun dan kemampuan baterai dalam menghasilkan arus awal (*cranking current*) menjadi berkurang [12]–[14]. Selain itu, kelembapan lingkungan penyimpanan mempercepat terjadinya korosi pada komponen logam, termasuk rod silinder hidraulik, yang pada akhirnya meningkatkan keausan bibir seal dan memicu kebocoran fluida hidraulik [9]–[11].

Objek penelitian ini adalah *Baggage Towing Tractor* bermesin diesel Isuzu 4JB1-T Turbo Intercooler dengan sistem injeksi mekanis yang mengalami kondisi tidak siap operasi setelah disimpan dalam waktu yang relatif lama tanpa pengoperasian berkala. Hasil inspeksi awal menunjukkan adanya empat kerusakan dominan, yaitu kegagalan sistem pengisian baterai, kerusakan *feed pump* bahan bakar, kebocoran *seal hydraulic power steering*, dan kerusakan *trigger starter*. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kerusakan tidak hanya dipengaruhi oleh keausan komponen, tetapi juga oleh degradasi selama masa penyimpanan yang belum dikelola melalui program *preventive maintenance*.

Permasalahan menjadi semakin kompleks karena kendaraan menggunakan *biodiesel B30* berbasis minyak kelapa sawit sebagai bahan bakar. Biodiesel memiliki kandungan *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dan terdapat ikatan oksigen yang berbeda dibandingkan solar fosil sehingga mampu meningkatkan kualitas pembakaran. Akan tetapi, biodiesel juga mempunyai sifat *higroskopis* yang lebih tinggi dan stabilitas oksidasi yang lebih rendah sehingga lebih mudah menyerap air serta mengalami degradasi selama penyimpanan [1], [2], [15]. Penelitian

mengenai implementasi biodiesel B30 di Indonesia juga menunjukkan bahwa kualitas bahan bakar selama penyimpanan merupakan faktor penting yang memengaruhi keandalan sistem bahan bakar kendaraan diesel [6].

Proses oksidasi biodiesel selama penyimpanan dapat menghasilkan gum, sedimen, dan senyawa asam organik yang berpotensi menyumbat filter, katup, maupun saluran bahan bakar sehingga menurunkan kinerja *feed pump* [1], [2]. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa paparan biodiesel terhadap material *elastomer* dapat menyebabkan *swelling*, perubahan kekerasan, penurunan sifat mekanik, serta degradasi diafragma dan seal, khususnya pada kendaraan diesel generasi lama yang belum dirancang untuk bahan bakar dengan kandungan FAME tinggi [3]–[5], [7], [8]. Dengan demikian, karakteristik biodiesel menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam analisis penyebab kerusakan sistem bahan bakar.

Beberapa penelitian sebelumnya lebih banyak membahas pengaruh biodiesel terhadap performa mesin, konsumsi bahan bakar, emisi gas buang, maupun kompatibilitas material sistem bahan bakar [1]–[8]. Penelitian lain juga telah mengkaji mekanisme keausan *seal hidraulik* akibat korosi dan kekasaran permukaan rod silinder [9]–[11], serta mekanisme *sulfasi* pada baterai timbal-asam akibat penyimpanan jangka panjang [12]–[14]. Namun demikian, penelitian yang mengintegrasikan *Root Cause Analysis* (RCA), *Fishbone Diagram*, dan *5 Why Analysis* untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan beberapa sistem utama pada *Baggage Towing Tractor* akibat penyimpanan jangka panjang masih sangat terbatas, khususnya pada kendaraan GSE yang menggunakan biodiesel B30.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada sistem pengisian baterai, sistem bahan bakar, sistem *hydraulic power steering*, dan sistem starter pada *Baggage Towing Tractor* menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) yang dipadukan dengan *Fishbone Diagram* dan *5 Why Analysis*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar dalam penyusunan strategi *preventive maintenance* dan prosedur *preservasi* kendaraan selama masa penyimpanan, sehingga dapat meningkatkan keandalan operasional *Ground Support Equipment* (GSE) sebagai bahan praktikum mahasiswa. Selain memberikan rekomendasi praktis bagi pengelola GSE, penelitian ini juga memperkaya kajian mengenai hubungan antara degradasi biodiesel, kondisi penyimpanan kendaraan, dan keandalan sistem mekanis pada kendaraan pendukung operasi penerbangan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan metode *Root Cause Analysis* (RCA) untuk mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada *Baggage Towing Tractor* (BTT) yang digunakan sebagai alat praktikum *Ground Support Equipment* (GSE) di Politeknik Penerbangan Jayapura. Pendekatan ini dipilih karena mampu menelusuri hubungan sebab-akibat suatu kegagalan secara sistematis sehingga penyebab mendasar dapat diidentifikasi dan digunakan sebagai dasar penyusunan tindakan korektif maupun preventif.

Objek penelitian adalah satu unit *Baggage Towing Tractor* bermesin Isuzu 4JB1-T *Turbo Intercooler* dengan sistem injeksi mekanis yang berada dalam kondisi tidak siap operasi (TSO) setelah mengalami penyimpanan dalam jangka waktu yang lama. Penelitian dilaksanakan di Politeknik Penerbangan Jayapura selama periode Januari–Juni 2026, yang meliputi tahap persiapan, pengumpulan data lapangan, pengolahan data, hingga penyusunan laporan penelitian.

Instrumen penelitian yang digunakan terdiri atas tool set perawatan kendaraan ringan, multimeter/AVO meter, test pen DC, selang bahan bakar, dan head lamp, sedangkan bahan pendukung penelitian meliputi bahan bakar diesel, baterai 12 V 75 Ah, cairan penetran (WD-40), dan kabel penghubung. Peralatan tersebut digunakan untuk mendukung proses inspeksi visual, pemeriksaan fungsi sistem, dan identifikasi kerusakan pada kendaraan.

Pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung, pemeriksaan kondisi kendaraan, analisis riwayat pemeliharaan, serta dokumentasi hasil inspeksi. Parameter yang

diamati meliputi kondisi oli mesin, sistem penyaluran bahan bakar, sambungan kabel utama, fuse box, serta kemungkinan kebocoran pada sistem hidraulik dan sistem pendingin. Seluruh hasil pengamatan kemudian didokumentasikan sebagai dasar analisis penyebab kerusakan.

Analisis data dilakukan menggunakan *Root Cause Analysis* (RCA) yang dipadukan dengan *Fishbone Diagram* dan *5 Why Analysis*. *Fishbone Diagram* digunakan untuk mengelompokkan penyebab kerusakan ke dalam lima kategori utama, yaitu man, machine, material, method, dan environment, sehingga hubungan sebab-akibat setiap kegagalan dapat dipetakan secara sistematis. Selanjutnya, metode *5 Why Analysis* diterapkan untuk menelusuri penyebab secara bertingkat hingga diperoleh akar penyebab (*root cause*) dari setiap jenis kerusakan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi faktor teknis maupun faktor manajemen pemeliharaan yang berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan pada kendaraan.

Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah berdasarkan kondisi aktual kendaraan, dilanjutkan dengan studi literatur, pengumpulan data lapangan, penentuan kerusakan dominan, analisis menggunakan *Root Cause Analysis*, serta penyusunan rekomendasi tindakan korektif dan preventif berdasarkan hasil identifikasi akar penyebab. Alur penelitian tersebut telah disusun dalam bentuk diagram alir penelitian yang disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Identifikasi Kerusakan

Hasil inspeksi menunjukkan bahwa Baggage Towing Tractor bermesin Isuzu 4JB1-T mengalami empat jenis kerusakan utama yang menyebabkan kendaraan tidak dapat beroperasi secara normal, yaitu kegagalan sistem pengisian baterai, kerusakan sistem feed pump bahan bakar, kebocoran seal hydraulic power steering, dan kerusakan trigger starter. Keempat kerusakan tersebut ditemukan setelah kendaraan mengalami penyimpanan dalam waktu yang relatif lama tanpa pengoperasian maupun program pemeliharaan berkala. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa faktor penyimpanan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penurunan keandalan sistem kendaraan.

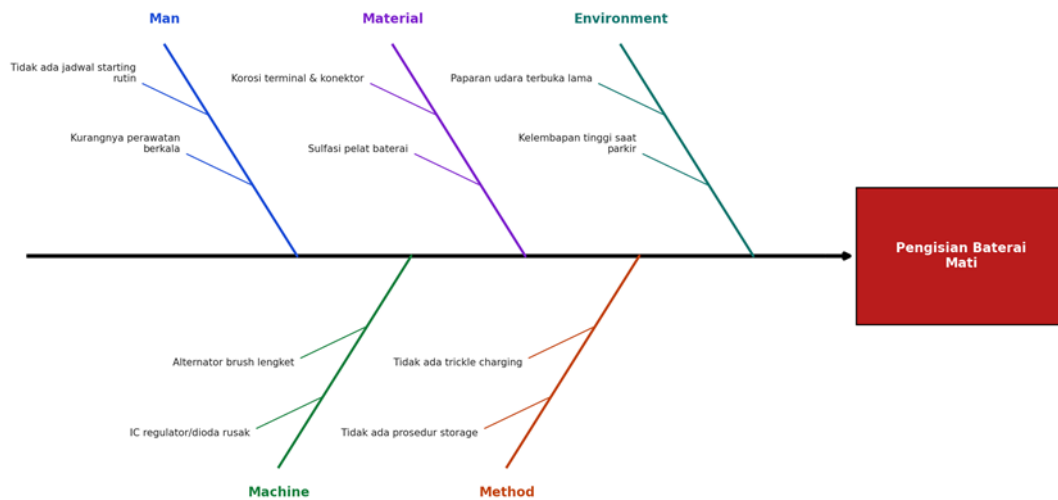
Selanjutnya, masing-masing kerusakan dianalisis menggunakan Fishbone Diagram untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab, kemudian ditelusuri lebih lanjut menggunakan 5 Why Analysis sehingga diperoleh akar penyebab (root cause) yang menjadi dasar penyusunan rekomendasi perbaikan.

Analisis Fishbone Diagram

a. Kerusakan Sistem Pengisian Baterai

Hasil analisis menunjukkan bahwa kegagalan sistem pengisian baterai dipengaruhi oleh kombinasi faktor machine, method, dan environment. Kendaraan yang tidak dioperasikan dalam waktu lama menyebabkan baterai mengalami self-discharge secara alami tanpa adanya pengisian dari alternator. Kondisi tersebut memicu terbentuknya kristal timbal sulfat (hard sulfation) pada pelat elektroda sehingga kapasitas baterai menurun dan resistansi internal

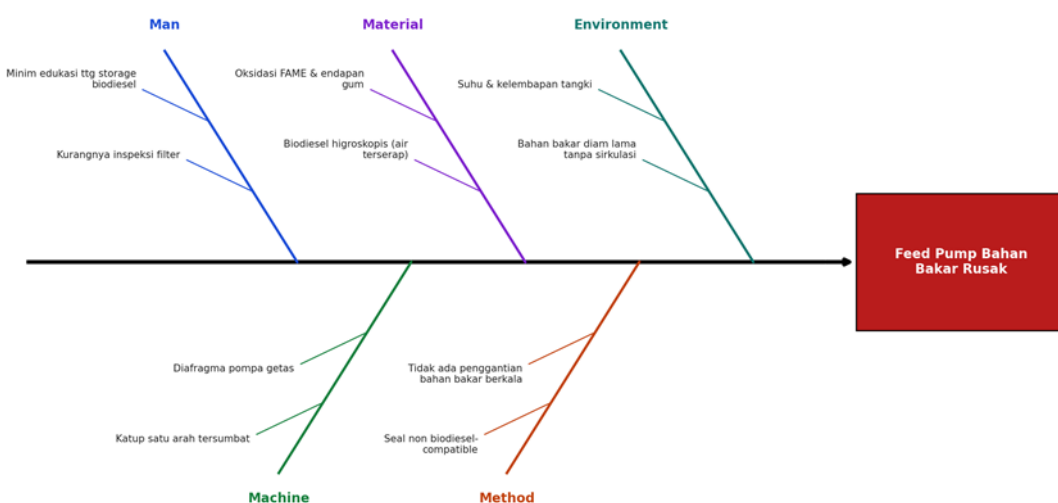
meningkat [12], [13], [14]. Selain itu, tidak adanya inspeksi berkala menyebabkan kondisi baterai terus mengalami penurunan hingga tidak mampu menyuplai arus starter.



Gambar 2. Fishbone Diagram Kerusakan Sistem Pengisian Baterai

b. Kerusakan Feed Pump Bahan Bakar

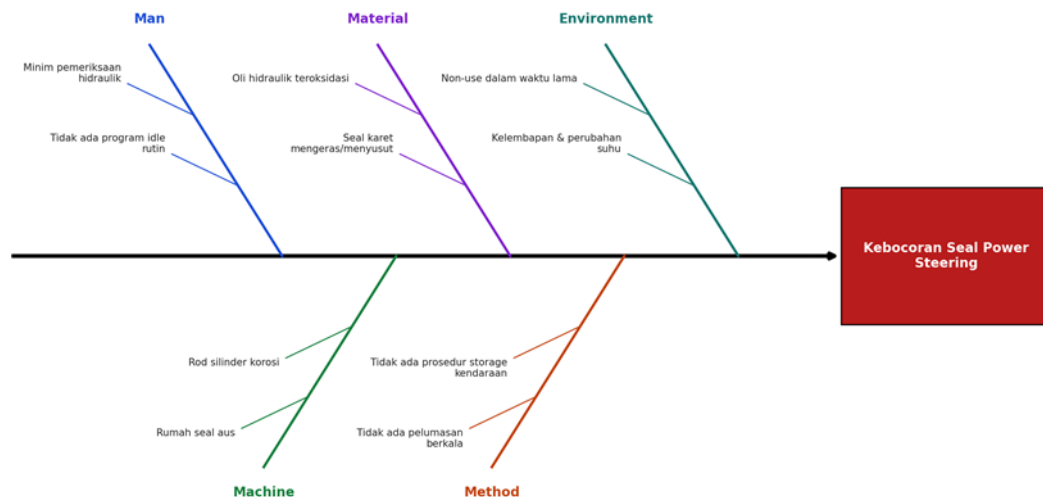
Fishbone Diagram menunjukkan bahwa kerusakan feed pump dipengaruhi oleh faktor material, machine, environment, dan method. Kendaraan menggunakan bahan bakar biodiesel berbasis minyak kelapa sawit (B30) yang disimpan dalam tangki dalam waktu lama tanpa sirkulasi. Kondisi tersebut mempercepat proses oksidasi biodiesel sehingga menghasilkan gum, sedimen, dan senyawa asam organik yang menyumbat katup serta mengurangi kemampuan diafragma feed pump dalam memompa bahan bakar [1], [2]. Selain itu, elastomer pada diafragma diduga mengalami degradasi akibat paparan Fatty Acid Methyl Ester (FAME) selama penyimpanan sehingga menurunkan fleksibilitas dan kemampuan penyekatan komponen [3], [4], [5].



Gambar 3. Fishbone Diagram Kerusakan Feed Pump

c. Kebocoran Seal Hydraulic Power Steering

Analisis menunjukkan bahwa kebocoran sistem power steering dipengaruhi oleh korosi pada rod silinder, penuaan material seal, serta tingginya kelembapan lingkungan penyimpanan. Korosi menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan (surface roughness) sehingga mempercepat keausan bibir seal selama gerakan resiprok. Kondisi tersebut mengakibatkan kemampuan penyekatan fluida hidraulik menurun sehingga terjadi kebocoran pada sistem power steering [9], [10], [11].



Gambar 4. Fishbone Diagram Kebocoran Seal Hydraulic Power Steering

Analisis 5 Why

Analisis 5 Why menunjukkan bahwa seluruh kerusakan memiliki pola penyebab yang sama, yaitu tidak adanya program preventive maintenance selama kendaraan disimpan. Sebagai contoh, pada kerusakan feed pump, analisis dilakukan sebagai berikut.

Tabel 1. Tabel 5 Whay Analisis

Why	Hasil Analisis
Why 1	Feed pump tidak mampu mengalirkan bahan bakar.
Why 2	Diafragma feed pump mengalami kerusakan dan katup tersumbat.
Why 3	Terbentuk gum dan endapan pada sistem bahan bakar.
Why 4	Biodiesel mengalami degradasi selama penyimpanan tanpa sirkulasi [1], [2].
Why 5	Tidak terdapat prosedur pemeliharaan preventif dan pengelolaan bahan bakar selama masa penyimpanan kendaraan.

Analisis terhadap sistem pengisian baterai, sistem hidraulik, dan sistem starter juga menunjukkan bahwa penyebab utama bukan hanya kegagalan komponen, tetapi lemahnya manajemen pemeliharaan kendaraan.

Root Cause Analysis (RCA)

Berdasarkan hasil Fishbone Diagram dan 5 Why Analysis, diperoleh akar penyebab masing-masing kerusakan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Root Cause Analisis

Sistem	Root Cause
Pengisian baterai	Sulfasi baterai akibat penyimpanan tanpa pengisian berkala [12], [13]
Feed pump	Degradasi biodiesel selama penyimpanan dan kerusakan elastomer diafragma [1]–[5]
Hydraulic Power Steering	Korosi rod silinder dan penuaan seal [9]–[11]
Trigger starter	Korosi terminal listrik dan tidak adanya inspeksi berkala

Secara umum, seluruh kerusakan memiliki keterkaitan dengan tiga faktor utama, yaitu penyimpanan kendaraan dalam jangka panjang, tidak adanya pemeliharaan preventif, dan degradasi komponen akibat pengaruh lingkungan.

Pembahasan Pengaruh Biodiesel terhadap Kerusakan Feed Pump

Analisis menunjukkan bahwa kerusakan *feed pump* tidak hanya disebabkan oleh usia komponen, tetapi juga berkaitan dengan karakteristik biodiesel berbasis minyak kelapa sawit yang digunakan pada kendaraan. Biodiesel mengandung *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) dengan kandungan oksigen lebih tinggi dibandingkan solar fosil. Kandungan oksigen tersebut meningkatkan efisiensi pembakaran, tetapi juga menyebabkan biodiesel memiliki sifat higroskopis lebih tinggi dan stabilitas oksidasi yang lebih rendah dibandingkan solar konvensional [1], [2], [15].

Pengujian B30 pada kondisi operasional Indonesia menunjukkan bahwa biodiesel sawit dapat digunakan secara andal apabila kualitas bahan bakar dan prosedur pemeliharaan dipenuhi. Namun demikian, penyimpanan dalam waktu lama tanpa sirkulasi meningkatkan risiko degradasi bahan bakar sehingga membentuk gum, sedimen, dan senyawa asam organik yang dapat menyumbat filter maupun katup pada sistem bahan bakar [6].

Selain degradasi bahan bakar, kandungan FAME juga dapat memengaruhi kompatibilitas material elastomer pada kendaraan diesel generasi lama. Paparan biodiesel dalam waktu lama menyebabkan swelling, perubahan kekerasan, penurunan kekuatan mekanik, dan degradasi struktur polimer pada seal maupun diafragma feed pump [3], [4], [5], [7], [8].

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa kerusakan feed pump merupakan hasil interaksi antara degradasi biodiesel selama penyimpanan, ketidaksesuaian material elastomer, dan tidak adanya pemeliharaan preventif. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menegaskan bahwa pengendalian kualitas biodiesel selama penyimpanan serta penggunaan material yang kompatibel dengan biodiesel merupakan faktor penting dalam menjaga keandalan sistem bahan bakar kendaraan diesel [2], [3], [6].

Implikasi Penelitian

Sebagian besar kerusakan pada *Baggage Towing Tractor* bukan disebabkan oleh keausan akibat operasi normal, tetapi oleh degradasi komponen selama penyimpanan tanpa pengoperasian dan tanpa pemeliharaan *preventif*. Oleh karena itu, diperlukan penerapan program preservasi kendaraan, meliputi pengoperasian mesin secara berkala, pengisian baterai (maintenance charging), pengelolaan kualitas biodiesel, inspeksi sistem hidrolik, serta penggunaan material elastomer yang kompatibel dengan biodiesel [3], [6], [12].

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi akar penyebab kerusakan pada *Baggage Towing Tractor* bermesin diesel Isuzu 4JB1-T menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) yang dipadukan dengan Fishbone Diagram dan 5 Why Analysis. Empat kerusakan utama yang ditemukan meliputi kegagalan sistem pengisian baterai, kerusakan feed pump bahan bakar, kebocoran *seal hydraulic power steering*, dan kerusakan trigger starter. Hasil analisis menunjukkan bahwa penyebab dominan bukan hanya berasal dari keausan komponen, tetapi

juga dipengaruhi oleh penyimpanan kendaraan dalam jangka waktu lama tanpa pengoperasian dan tanpa pemeliharaan preventif.

Kerusakan sistem pengisian baterai berkaitan dengan proses hard sulfation akibat self-discharge selama penyimpanan [12]–[14]. Kerusakan feed pump dipengaruhi oleh degradasi biodiesel yang memicu pembentukan gum dan sedimen, serta degradasi elastomer akibat paparan FAME [1]–[8]. Kebocoran sistem power steering disebabkan oleh korosi pada permukaan rod silinder yang mempercepat keausan bibir seal [9]–[11], sedangkan kegagalan trigger starter berkaitan dengan korosi terminal listrik dan penurunan kualitas kontak kelistrikan.

Penerapan program preservasi kendaraan, pengelolaan kualitas biodiesel selama penyimpanan, pengisian baterai secara berkala, inspeksi sistem kelistrikan, serta penggunaan material elastomer yang kompatibel dengan biodiesel merupakan langkah yang diperlukan untuk meningkatkan keandalan Ground Support Equipment (GSE) dan mengurangi risiko kerusakan pada kendaraan yang disimpan dalam jangka panjang [3], [6], [12].

Kontribusi Author

Seluruh penulis berkontribusi secara signifikan terhadap penelitian ini. Kontribusi meliputi konseptualisasi penelitian, penyusunan kerangka teori, pengumpulan data, analisis data, interpretasi hasil, penulisan naskah, revisi ilmiah, serta persetujuan akhir terhadap naskah yang akan dipublikasikan. Seluruh penulis menyatakan telah membaca dan menyetujui versi final artikel.

AI Disclosure Statement

Selama penyusunan naskah ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk menyunting tata bahasa dan memperbaiki keterbacaan teks bahasa Inggris. Penulis telah memeriksa dan menyunting kembali konten tersebut secara menyeluruh, serta bertanggung jawab penuh atas seluruh isi publikasi ini.

REFERENSI

- [1] G. Knothe, "Some aspects of biodiesel oxidative stability," *Fuel Processing Technology*, vol. 88, no. 7, pp. 669–677, 2007.
- [2] J. Pullen and K. Saeed, "An overview of biodiesel oxidation stability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 8, pp. 5924–5950, 2012.
- [3] M. A. Ibrahim et al., "Compatibility Effects of Waste Cooking Oil Biodiesel Blend on Fuel System Elastomers in Compression Ignition Engines," *ACS Omega*, vol. 9, no. 6, 2024.
- [4] A. G. Arisanti et al., "Novel Findings on Elastomer Exposure Effects in Palm-Based Biodiesel Blends," *Evergreen*, vol. 11, no. 3, 2024.
- [5] A. R. Wimada et al., "Pengaruh Bahan Bakar Campuran Biodiesel Berbahan Dasar Minyak Sawit terhadap Elastomer NBR," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 6, no. 1, pp. 66–71, 2023.
- [6] I. Haryono et al., "An Investigation of 30% Palm Biodiesel Blend Fuel (B30) under Indonesian Operating Conditions," *Journal of Oil Palm Research*, vol. 37, no. 2, pp. 324–337, 2025.
- [7] M. A. Fazal, A. S. M. A. Haseeb, and H. H. Masjuki, "Biodiesel feasibility study: An evaluation of material compatibility, performance, emission and engine durability," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 1314–1324, 2011.
- [8] A. S. M. A. Haseeb, H. H. Masjuki, L. J. Ann, and M. A. Fazal, "Compatibility of automotive materials in biodiesel: A review," *Fuel*, vol. 90, no. 3, pp. 922–931, 2011.
- [9] Y. Zhang et al., "Research Status and Prospect of Wear and Aging on Hydraulic Rubber Sealing Materials," *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 52, no. 5, pp. 249–266, 2023.

- [10] X. Duan et al., "A Hydraulic Reciprocating Rod Seal's Life Evaluation Method Incorporating Failure Mechanism Analysis and Test Observation Data," *Lubricants*, vol. 11, no. 8, 2023.
- [11] S. Kim et al., "A Review of Hydraulic Cylinder Faults, Diagnostics and Prognostics," *Machines*, 2024.
- [12] N. Vangapally et al., "Lead-Acid Batteries and Lead–Carbon Hybrid Systems: A Review," *Journal of Power Sources*, vol. 579, 2023.
- [13] A. Asserghine et al., "Inducing and Real-Time Monitoring of Lead (De)Sulfation Processes Using Scanning Electrochemical Microscopy," *Electrochimica Acta*, vol. 466, 2023.
- [14] D. E. O. Juanico et al., "Revitalizing Lead-Acid Battery Technology: A Comprehensive Review on Material and Operation-Based Interventions," *Frontiers in Batteries and Electrochemistry*, vol. 2, 2024.
- [15] H. Aatola, M. Larmi, T. Sarjovaara, and S. Mikkonen, "Biofuel Blend and Emulsification for Diesel Engines," *Fuel*, vol. 87, pp. 3783–3790, 2008.