MEKANISME KEGAGALAN TERMOMEKANIS DAN SEIZURE PADA KOMPONEN SILINDER ENGINE DIESEL CATERPILLAR 3512

Abdul Halim[1,*)], Muhammad Taufik[1)], Faisyal[1)], Abdul Muis[1)], Nurali Fuad Fajaruddin[1)]

[1]Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Samarinda, Samarinda, Indonesia

E-mail: halim72@polnes.ac.id

Abstract

The Caterpillar 3512 Diesel Engine serves as a high-performance primary mover in heavy equipment, operating under high thermal conditions. This study aims to analyze the causes, impacts, and types of component damage resulting from engine seizure induced by cooling system overheating. The research methodology involved direct observation at the PT Trakindo Utama Samarinda workshop, interviews with senior technicians, literature reviews, and digital documentation. ECM data retrieval via the Cat ET Tool revealed an active fault code for Low Engine Coolant Level (E2143). Based on visual and physical investigations, an external leak caused by a loose or damaged radiator cap/relief valve was identified as the root cause of continuous coolant loss. The impact of this seizure included a drastic drop in mechanical performance leading to catastrophic engine breakdown. Extensive physical damage was identified across all 12 cylinders, characterized by adhesive wear (skirt scuffing) on the pistons, abrasive wear (material embedded and severe scratching) on the piston pin bores, severe thermal discoloration on the connecting rods, and thermal degradation (melting) of the cylinder liner seals. To prevent recurring failures, it is highly recommended to implement rigid daily coolant level inspections, strictly adhere to maintenance schedules, utilize factory-standard lubricants and coolants, and perform component reconditioning based on the Guideline for Reusable Parts (GRPTS).

Keywords *: Seizure, Component Failure, Cooling System, 3512 Engine.*

Abstrak

Engine Diesel 3512 Caterpillar merupakan penggerak utama pada alat berat yang menghasilkan performa tinggi namun juga temperatur kerja yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyebab, dampak, serta jenis kerusakan komponen akibat fenomena seizure yang diawali oleh overheating pada sistem pendingin. Metode penelitian yang digunakan meliputi observasi langsung di workshop PT Trakindo Utama Samarinda, wawancara teknisi senior, studi literatur, dan dokumentasi. Hasil pemeriksaan data ECM melalui Cat ET Tool menunjukkan adanya kode indikasi Low Engine Coolant Level (E2143). Berdasarkan investigasi visual dan fisik, ditemukan kebocoran eksternal pada tutup radiator atau relief valve yang kendor/rusak sebagai akar penyebab hilangnya cairan pendingin secara berkelanjutan. Dampak dari seizure ini meliputi penurunan performa drastis hingga kegagalan total (engine breakdown). Kerusakan fisik teridentifikasi secara menyeluruh pada 12 silinder meliputi skirt scuffing (keausan adhesif) pada piston, material embedded dan goresan (scratch) pada bore pin piston (keausan abrasif), diskolorasi akibat panas tinggi pada connecting rod, serta pelelehan (melting) pada seal liner. Upaya antisipasi yang direkomendasikan adalah inspeksi harian level coolant, kepatuhan terhadap jadwal perawatan (schedule maintenance), penggunaan pelumas/pendingin standar pabrik, serta perbaikan berbasis Guideline for Reusable Parts (GRPTS).

Kata kunci : Seizure, Kerusakan Komponen, Sistem Pendingin, Engine 3512.

PENDAHULUAN

Engine diesel berdaya tinggi pada aplikasi alat berat beroperasi pada kondisi beban termal dan mekanis yang tinggi sehingga kestabilan sistem pendinginan menjadi salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan engine. Sistem pendinginan tidak hanya berfungsi mempertahankan temperatur operasi, tetapi juga berperan dalam menjaga kondisi termal komponen piston, cylinder liner, dan komponen bergerak lainnya. Penelitian pada heavy-duty diesel engine menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan panas pada sistem pendinginan piston memiliki pengaruh terhadap distribusi temperatur dan kemampuan komponen dalam mempertahankan integritas termalnya (Apaydin & Doner, 2024).

Kondisi temperatur yang berlebihan dapat meningkatkan ekspansi termal piston, mengurangi running clearance, dan meningkatkan risiko kontak abnormal antara piston dan cylinder liner. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa beban termal merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi thermal fatigue, deformasi, dan umur piston diesel (Xiong et al., 2025). Studi lain juga menunjukkan bahwa temperatur tinggi dapat meningkatkan thermal stress pada piston dan berkontribusi terhadap penurunan keandalan komponen apabila kemampuan pelepasan panas tidak memadai (Ghoujehzadeh et al., 2025).

Analisis komprehensif oleh pakar menunjukkan bahwa gesekan pada rakitan piston dan dinding silinder menyumbang antara 30% hingga 65% dari total kerugian mekanis pada motor pembakaran dalam Radisavljević, A., et al. (2025). Ketika terjadi anomali sistem pendingin, degradasi sifat material paduan aluminium piston mulai terdeteksi secara signifikan pada suhu 300°C dan dapat mengalami pelelehan parsial pada temperatur ekstrem, memicu macetnya pergerakan torak (stuck/seizure). Lebih lanjut, pelepasan material bebas akibat pengikisan parah antara piston dan liner akan menumpuk seperti bola salju (snowball effect) yang mengunci pergerakan mekanis secara mendadak Sonar, D. K. (2017).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas aspek termal piston, scuffing, thermal fatigue, dan mekanisme keausan cylinder liner, kajian berbasis kasus lapangan yang mengintegrasikan data diagnostik Electronic Control Module (ECM) dengan pemeriksaan fisik kerusakan multi-silinder pada engine diesel heavy-duty masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis mekanisme kegagalan

termomekanis dan seizure pada Engine Diesel Caterpillar 3512 berdasarkan integrasi data fault code ECM, observasi kondisi sistem pendinginan, serta pemeriksaan fisik piston, piston pin bore, connecting rod, dan cylinder liner pada seluruh 12 silinder.

Pendekatan tersebut diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam membangun hubungan antara indikasi diagnostik low engine coolant level, gangguan termal, degradasi pelumasan, dan pola kerusakan komponen hingga terjadinya engine seizure. Dengan demikian, penelitian tidak hanya mengidentifikasi bentuk kerusakan akhir, tetapi juga menyusun rangkaian mekanisme kegagalan berdasarkan bukti diagnostik dan inspeksi fisik yang tersedia.

Kajian ini bertujuan mengidentifikasi akar penyebab terjadinya kondisi seizure, menganalisis dampak fungsional mekanis, memetakan detail kerusakan fisik pada setiap silinder, serta merumuskan langkah preventif terintegrasi di lapangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Analisis kegagalan pada mesin diesel berkinerja tinggi melibatkan pemahaman komprehensif mengenai interaksi beban termomekanis dan degradasi material. Menurut Gupta (2015), overheating seizure pada komponen piston hanya dapat terjadi ketika lapisan film oli (oil film) yang memisahkan piston dan dinding silinder terkikis atau terbakar habis. Ketika dua permukaan logam yang bergerak kehilangan lubrikasi, keausan tipe scuffing akan terjadi akibat proses pengelasan mikro (micro-welding) antar-material yang kemudian pecah kembali saat terjadi gerakan mekanis Gufta (2015). Fenomena ini diperparah oleh karakteristik material piston modern. Singh et al. (2014) menjelaskan bahwa mayoritas piston mengaplikasikan paduan aluminium karena bobotnya yang ringan, namun material ini memiliki koefisien ekspansi termal yang sangat sensitif terhadap lonjakan temperatur ruang bakar.

Di sisi lain, batas kritis ketahanan komponen tidak hanya bertumpu pada aspek mekanis, melainkan juga kestabilan fluida pendingin. Skibin et al. (2021) mengemukakan bahwa peningkatan tekanan efektif rata-rata pada mesin diesel modern menuntut sistem pendingin bekerja ekstra keras; kegagalan dalam menjaga temperatur kerja silinder liner dapat memicu retak fatik termal serta mempercepat pengendapan karbon yang menginisiasi terjadinya piston scuffing. Ketika kemacetan mesin (engine seizure) atau penguncian stroke piston benar-benar terjadi, dampak kerusakannya akan menjalar secara destruktif ke komponen transmisi daya lainnya. Berdasarkan studi repertoar kegagalan

oleh Strozzi et al. (2016), momen inersia dan gaya pembakaran yang tertahan mendadak saat seizure jamak mengakibatkan deformasi plastis ekstrem hingga patahan tekuk (catastrophic buckling) pada batang penghubung (connecting rod).

METODE PENELITIAN

Penelitian Penelitian deskriptif kualitatif ini mengombinasikan empat teknik pengumpulan data:

1. Observasi Langsung: Pembongkaran (disassembly), pembersihan (cleaning) dengan solar/thinner, dan inspeksi visual komponen Engine 3512 di workshop.
2. Wawancara: Diskusi teknis dengan Senior Teknisi mengenai riwayat kendala performa unit.
3. Studi Literatur: Pengacuan silang pada Service Information System (SIS) Caterpillar dan prinsip Applied Failure Analysis (AFA).
4. Dokumentasi: Perekaman data kesalahan ECM (Electronic Control Module) dan pengambilan foto aktual kerusakan fisik.

Objek yang diteliti oleh penulis adalah Engine 3512 Caterpillar. Penulis berfokus pada dampak yang ditimbulkan dari Seizure yang menjadi salah satu masalah yang sering terjadi pada Engine alat berat.



Gambar 1. *Engine 3512*
Sumber : Dokumentasi Pribadi

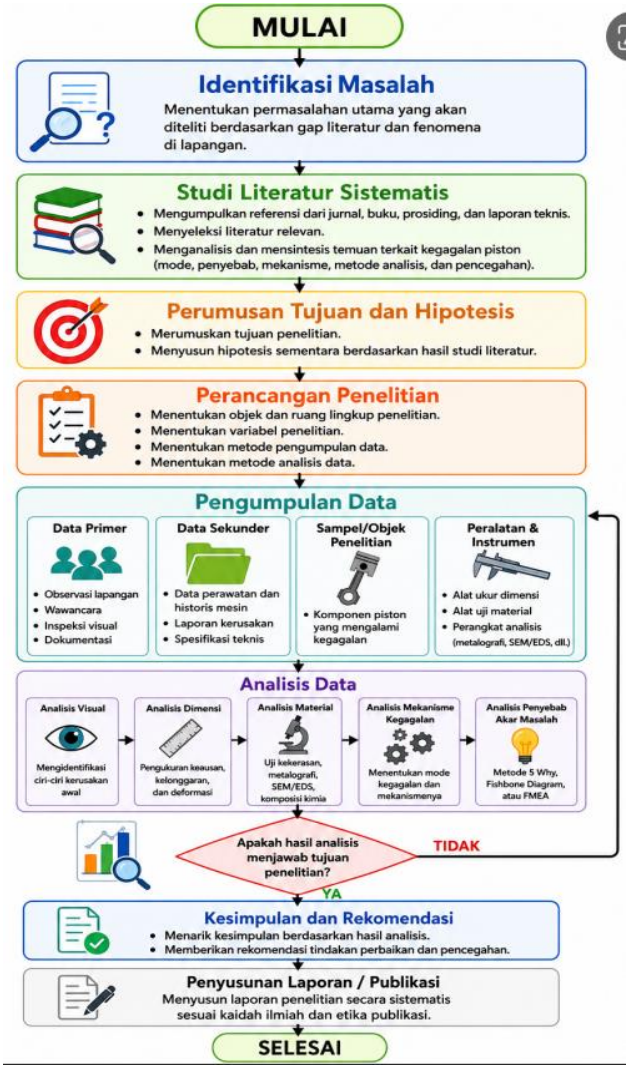
Spesifikasi *engine*

Tabel 1. *Spesifikasi Engine*

Uraian	Keterangan
Merk	Caterpillar
Model	3512
Serial Number	65Z00790
Jumlah *Cylinder*	*12 Cylinder*
Kapasitas Pelumasan *Engine*	318 Liter
Kapasitas Pendingin *Engine*	160 Liter
Jenis Cairan Pendingin	Cat ELC dan Cat ELI

Sumber: Technical Manual Hitachi Euclid EH4500 hal 163

Flow Chart Penelitian



Gambar 2. *Flow Chart* Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Data Masukan ECM (Electronic Control Module)

Hasil pemindaian menggunakan Cat ET Tool menunjukkan adanya kode kesalahan aktif E2143 (Low Engine Coolant Level), yang mengindikasikan bahwa level cairan pendingin berada di bawah batas operasi yang dipersyaratkan. Kondisi tersebut dapat menurunkan kemampuan sistem pendingin dalam menyerap dan membuang panas dari engine sehingga meningkatkan risiko overheating. Berdasarkan inspeksi visual, area tutup radiator/relief valve diduga menjadi salah satu jalur kehilangan coolant. Namun demikian, berdasarkan data pemeriksaan yang tersedia, hubungan kausal antara kerusakan tutup radiator/relief valve dan kehilangan coolant belum dapat dikonfirmasi secara definitif karena belum didukung oleh hasil cooling system pressure test, pemeriksaan spesifik kondisi relief valve, atau rekaman riwayat penambahan coolant. Oleh karena itu, tutup radiator/relief valve dalam penelitian ini diposisikan sebagai dugaan sumber kehilangan coolant, sedangkan kondisi low coolant level merupakan temuan diagnostik yang terkonfirmasi melalui ECM.

2. Evaluasi Visual Kerusakan Komponen Utama

Berdasarkan pembongkaran menyeluruh, berikut hasil analisis kerusakan fisik pada komponen silinder 1 hingga 12:

a. **Piston (Silinder 1–12):**
   - **Gejala Dominan:** *Skirt Scuffing* pada seluruh dinding piston. Secara metalurgi, ekspansi termal berlebih membuat material aluminium pada piston memuai melewati batas toleransi kelonggaran (*clearance*) terhadap dinding *liner*. Hal ini mengikis lapisan film oli (*adhesive wear*), menyebabkan material piston menempel dan tergesek parah dengan *liner*.
   - **Bore Pin & Pin Piston:** Ditemukan *material embedded* akibat serpihan logam yang mengunci pada bore silinder 1, 2, 3, 4, dan 10. Sementara itu, silinder 5, 6, 7, 8, 9, 11, dan 12 mengalami *scratch* parah (*abrasive wear*). Komponen pin piston mengalami penumpukan noda air (*watermark*) dan perubahan warna (*discoloration*) akibat kegagalan pelumas menahan panas.



Gambar 3. *material embedded akibat serpihan logam*
Sumber: Data lapangan





Gambar 4. *scratch parah (abrasive wear)*
Sumber: Data lapangan

b. **Connecting Rod (Silinder 1–12):**

- Sisi *Bore Pin Piston* pada seluruh *connecting rod* menunjukkan diskolorasi pekat (perubahan warna kehitaman/kebiruan) akibat paparan konduksi panas yang berlebih dari area pin piston.





Contoh Connecting Rod 4 (sampel)

Gambar 4. *connecting rod menunjukkan diskolorasi pekat (perubahan warna kehitaman/kebiruan)*
Sumber: Data lapangan

c. **Cylinder Liner (Silinder 1–12):**
   - **Dinding Dalam:** Mengalami goresan vertikal yang dalam (*scratch*) searah dengan gerakan naik-turun piston akibat gesekan langsung logam-ke-logam tanpa sekat oli.
   - **Karet Seal & Band:** Komponen *Seal Band* dan *Seal Liner* teridentifikasi hancur (*broken*) dan meleleh (*melting*). Paparan suhu tinggi secara kontinu mengubah karakteristik elastis karet menjadi keras dan rapuh hingga kehilangan fungsi penyekatan fluidanya.

Cylinder Liner 1 (sampel)



➢ Pada saat pemeriksaan pada *Seal Band* terlihat seal telah rusak.*(Broken)*	
➢ Pada pemeriksaan pada dinding *Liner* bagian dalam terdapat goresan. *(Scratch)*	

➢ Pada pemeriksaan *Seal Liner* ditemukan seal telah meleleh. *(Melting)*	

Gambar 5. Dinding dalam scratch dan seal bend broken
Sumber : Dokumentasi Pribadi

3 Diskusi Komparatif Hasil Investigasi Terhadap Riset Terkini

Hasil temuan kerusakan masif berupa skirt scuffing pada ke-12 silinder Engine Caterpillar 3512 ini sejalan dengan analisis tribologi modern. Karakteristik goresan vertikal kasar (scratch) pada dinding silinder dan piston mengonfirmasi terjadinya kontak langsung antar-logam (metal-to-metal contact) tanpa batas pelumas. Sesuai dengan hasil eksperimen akustik dan getaran oleh Öztürk (2016), onset kerusakan lokal akibat hilangnya tekanan atau kualitas film oli akibat temperatur tinggi (oil overheating) memicu percepatan aus abrasif ekstrem sebelum sensor suhu global sempat merespons secara linier.

Lebih lanjut, temuan deformasi termal dan pelelehan (melting) pada komponen non-logam seperti seal liner membuktikan bahwa temperatur lokal di sekitar ruang bakar melampaui batas ketahanan termal material karet sintetik. Korelasi ini didukung oleh studi Gołębiowski et al. (2025) yang menegaskan bahwa paparan beban termal ekstrem di dalam silinder mengakibatkan degradasi termomekanis instan pada material sekelilingnya, sekaligus merusak aditif anti-keausan (anti-wear/anti-seizure) pada pelumas, sehingga memicu eskalasi akumulasi partikel logam abrasif (Fe dan Cu) di dalam ruang bakar yang mempercepat kemacetan total mesin (seizure).

Setiap pembersih udara adalah filter tipe kering dua tahap. Tahap pertama, atau pra-pembersih, berisi pemisah sentrifugal yang dapat membersihkan sendiri yang menghilangkan hingga 95% dari kontaminan. Filter tahap kedua terdiri dari dua konsentris, silinder dan elemen kertas berlipat. Untuk setiap elemen kertas berlipat

merupakan filter 4 mikron. Elemen-elemen ini mudah dapat diakses untuk pemeriksaan atau servis.

Untuk *primary element,* diganti setiap pemakaian 500 jam dan bisa digunakan sampai 3 kali pemakaian, apabila terdapat tanda warna hijau dan biru, tandanya masih dapat dipakai, Setelah diganti dapat dicuci dan digunakan kembali tetapi apabila terdapat tanda warna merah, tandanya sudah tidak dapat dipakai kembali. Sedangkan untuk *safety element,* dilakukan penggantian setiap 2000 jam dan tidak ada penggunaan kembali.

Berdasarkan hasil pengukuran pada piston dan ring terdapat peningkatan jarak antara ujung ring piston. Untuk setiap peningkatan jarak ring 0,03 mm (0,001 inci), lubang liner silinder bertambah dengan nilai berikut : 0,08 mm (0,003 inci).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi terhadap Engine Diesel Caterpillar 3512, fenomena seizure pada seluruh 12 silinder menunjukkan pola kerusakan yang konsisten dengan kondisi overheating berat yang diikuti oleh degradasi film pelumas dan kontak langsung antara piston dengan cylinder liner. Temuan fisik berupa skirt scuffing, scratch pada bore pin dan dinding liner, diskolorasi pada connecting rod, serta kerusakan dan melting pada seal liner menunjukkan adanya paparan beban termal dan gesekan yang berlangsung secara intensif.

Data diagnostik dari Cat ET Tool menunjukkan adanya fault code E2143 (Low Engine Coolant Level), sehingga kondisi kekurangan coolant merupakan temuan yang terkonfirmasi secara elektronik. Berdasarkan inspeksi visual, tutup radiator/relief valve diduga berkontribusi terhadap kehilangan coolant dan selanjutnya meningkatkan risiko overheating. Namun, bukti yang tersedia dalam penelitian ini belum cukup untuk menetapkan tutup radiator/relief valve sebagai akar penyebab tunggal secara definitif karena belum didukung oleh cooling system pressure test, pemeriksaan karakteristik relief valve, riwayat penambahan coolant, data temperatur engine sebelum kerusakan, dan rekaman pemeliharaan yang relevan.

Dengan demikian, mekanisme kegagalan yang paling kuat berdasarkan data penelitian adalah rangkaian low coolant level → penurunan kemampuan pelepasan panas → overheating → degradasi film pelumas → peningkatan kontak piston–liner → scuffing/scratching → seizure. Sementara itu, tutup radiator/relief valve dapat

dikategorikan sebagai dugaan sumber kehilangan coolant yang memerlukan verifikasi lebih lanjut.

Untuk mencegah kejadian serupa, direkomendasikan penerapan inspeksi harian terhadap level coolant dan indikasi kebocoran, pemeriksaan kondisi radiator cap/relief valve, pemantauan fault code ECM melalui Cat ET, pelaksanaan cooling system pressure test setelah ditemukan indikasi kehilangan coolant, serta dokumentasi riwayat penambahan coolant dan temperatur operasi. Rekondisi atau penggantian

DAFTAR PUSTAKA

Apaydin, S., & Doner, N. (2024). Effects of piston cooling gallery geometry on temperature and flow in a heavy-duty diesel engine. Thermal Science and Engineering Progress, 51, 102644. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102644

Ghoujehzadeh, A., Mohtadi-Bonab, M. A., & Jahani, D. (2025). Optimization and finite element analysis of an aluminum piston in the Peugeot XU7JPL3 engine for enhanced efficiency and durability. *Discover Mechanical Engineering, 4*, 6. https://doi.org/10.1007/s44245-025-00091-w

Gupta, R. K. (2015). *Investigation of seizure failure of heavy duty engine piston: A review*. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences (IRJEAS), 3*(4), 1–12.

Gołębiowski, W., et al. (2025). Degradation of anti-wear additives and tribological properties of engine oils at extended oil change intervals in city buses. *Scientific Reports, 15*(1), 12297.

Munaji, M., & Winardi, Y. (2017). Studi kasus analisis kegagalan material piston sepeda motor. *Jurnal REM (Rekayasa Energi Manufaktur), 2*(2), 77–80.

Öztürk, U. E. (2016). An application of early fault detection for the crankshaft and piston of an internal combustion engine. *Vibroengineering PROCEDIA, 9*, 15–20.

Radisavljević, A., et al. (2025, July). *Analysis of pistons failures in internal combustion engines* [Technical report]. ResearchGate.

Singh, R. C., Lal, R., Ranganath, M. S., & Chaudhary, R. (2014). Failure of piston in IC engines: A review. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 4*(9), 1–10.

Skibin, A. P., Belova, O. V., Volkov, V. Y., & Sivachev, V. M. (2021). Determination of the medium-speed diesel engine thermal state taking into account the coolant boiling. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2412, No. 1, Article 030049).

Sonar, D. K. (2017). Failure of piston & piston pin in IC engine: A review. *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR), 2*(3), 45–53.

Strozzi, A., Baldini, A., Giacopini, M., Bertocchi, E., & Mantovani, S. (2016). A repertoire of failures in connecting rods for internal combustion engines, and

indications on traditional and advanced design methods. *Engineering Failure Analysis, 60*, 20–39.

Trakindo Utama. (2009). *Buku ajar applied failure analysis*. Cileungsi Training Center PT Trakindo Utama.

Tuwidiarko, A. (2021). *Analisis retaknya torak yang berpengaruh terhadap kerja motor diesel utama di kapal MV. OMS IJEN* (Karya tulis ilmiah diploma). Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang.

Xiong, P., Wang, M., Qiao, X., Feng, Z., Wu, G., Yao, S., & others. (2025). The thermal fatigue acceleration test method, damage mechanism, and life prediction model of diesel engine Al-Si alloy piston. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 48(11), 4734–4748. https://doi.org/10.1111/ffe.70045