

# Analisis Tingkat Gangguan Pengoperasian pada Kereta Pemeliharaan Jalan Rel (KPJR) (Studi Kasus Gangguan pada Unit *Levelling* Mesin MTT 09-32 *Duomatic* CSM)

Nindra Prabu Wijaya\*, Djoko Setyanto

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51 Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received 15 January 2026</p> <p>Accepted 19 January 2026</p> <p><i>Keywords:</i> MTT 09-32 <i>Duomatic</i> CSM, <i>Operating Interruptions</i>, <i>Levelling Units</i>, <i>Rail</i> <i>Road Maintenance</i>, <i>Troubleshooting</i>.</p>	<p><i>This paper discusses the technical analysis and handling of operational disruptions in KPJR MTT 09-32 Duomatic CSM, especially the case of levelling units at PT Kereta Api Indonesia (Persero). This disruption has a direct impact on the process of repairing and maintaining the geometry of the rail road and has the potential to disrupt train travel. Through the methods of literature study, field observation, technician interviews, and examinations using wiring diagrams and SPS Diagnosis, it was found that the root of the problem lies in the damage to the burnt relay and worn connectors. Handling steps are carried out through a thorough inspection, replacement of damaged components, and retesting of the system until the levelling unit can function normally again. The results show the effectiveness of the repair with minimal downtime and relatively cost efficiency. The recommendations submitted include the preparation of troubleshooting SOPs, and training technicians in early detection of potential disturbances.</i></p>

Info Artikel	Abstrak
<p><i>Histori Artikel:</i></p> <p>Diserahkan: 15 Januari 2026</p> <p>Diterima: 19 Januari 2026</p> <p>Kata Kunci: MTT 09-32 <i>Duomatic</i> CSM, Gangguan Pengoperasian, Unit <i>Levelling</i>, Perawatan Jalan Rel, <i>Troubleshooting</i>.</p>	<p>Makalah ini membahas analisis teknis dan penanganan gangguan pengoperasian pada KPJR MTT 09-32 <i>Duomatic</i> CSM, khususnya kasus unit <i>levelling</i> di PT Kereta Api Indonesia (Persero). Gangguan ini berimbas langsung pada proses perbaikan dan perawatan geometri jalan rel serta potensi mengganggu perjalanan kereta api. Melalui metode studi literatur, observasi lapangan, wawancara teknisi, serta pemeriksaan menggunakan <i>wiring</i> diagram dan SPS Diagnosis, ditemukan bahwa akar permasalahan terletak pada kerusakan relay yang terbakar dan konektor yang aus. Langkah penanganan dilakukan melalui inspeksi menyeluruh, penggantian komponen rusak, serta pengujian ulang sistem hingga unit <i>levelling</i> dapat berfungsi normal kembali. Hasil menunjukkan efektivitas perbaikan dengan waktu henti operasi yang minimal serta biaya yang relatif efisien. Rekomendasi yang diajukan meliputi penyusunan SOP <i>troubleshooting</i>, dan pelatihan teknisi dalam mendeteksi dini potensi gangguan.</p>

## 1. PENDAHULUAN

Transportasi kereta api merupakan salah satu moda utama di Indonesia yang memiliki peran vital dalam menunjang mobilitas manusia dan distribusi barang. Untuk memastikan layanan kereta api tetap aman, andal, dan efisien, diperlukan infrastruktur jalan rel yang senantiasa dalam kondisi prima. Oleh karena itu, keberadaan sarana khusus seperti Kereta Pemeliharaan Jalan Rel (KPJR) menjadi krusial. KPJR ini beroperasi di berbagai wilayah

\*Corresponding author. Nindra Prabu Wijaya  
Email address: [nindra\\_prabuwijaya@yahoo.com](mailto:nindra_prabuwijaya@yahoo.com)

Jawa (Daerah Operasi) dan wilayah Sumatera (daerah regional) termasuk di Balaiyasa Mekanik Prabumulih.

MTT 09-32 Duomatic CSM merupakan salah satu mesin modern yang digunakan oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero) untuk melaksanakan pekerjaan pemadatan *ballast* (batu kricak) serta koreksi geometri jalan rel. KPJR ini bekerja dengan memadatkan *ballast* (batu kricak) di bawah bantalan rel secara presisi, sehingga posisi rel tetap stabil dan sesuai standar geometris. Ketersediaan dan keandalan operasional KPJR secara langsung berpengaruh terhadap kualitas perawatan jalur, keselamatan perjalanan kereta api, serta efisiensi operasional perusahaan.

Namun demikian, dalam praktik di lapangan sering muncul permasalahan teknis, khususnya gangguan pada unit levelling. Salah satu bentuk gangguan yang signifikan adalah kegagalan unit *levelling* tidak bisa memberikan nilai sehingga geometri jalan rel menjadi rusak. Gangguan ini mengakibatkan proses pengangkatan, penggeseran, penimbangan dan pemadatan *ballast* (batu kricak) tidak bisa dilakukan sehingga pekerjaan perawatan jalur rel tertunda. Dampak lebih lanjut adalah terganggunya jadwal perjalanan kereta, potensi penurunan keselamatan operasional, serta bertambahnya biaya perawatan akibat perbaikan darurat yang harus dilakukan.

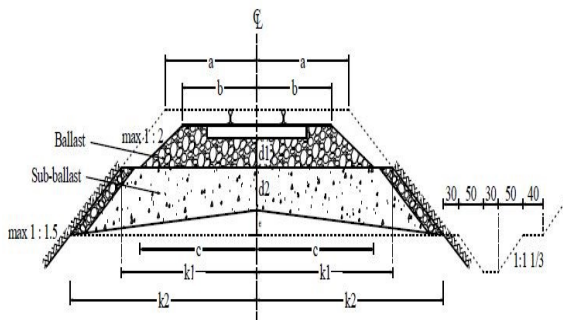
Kasus serupa terjadi 20% dalam setahun di Balaiyasa Mekanik Prabumulih, sebuah fasilitas strategis milik PT KAI yang berfungsi sebagai pusat pemeliharaan dan perbaikan sarana perawatan jalan rel area Sumatera. Balaiyasa ini memiliki tanggung jawab besar dalam memastikan bahwa seluruh armada KPJR dapat berfungsi optimal sebelum diterjunkan kembali ke lapangan. Fenomena gangguan unit *levelling* di lokasi tersebut memberikan peluang studi kasus yang sangat relevan untuk dikaji dalam kerangka profesi keinsinyuran.

Dari perspektif keinsinyuran, permasalahan ini menarik karena melibatkan integrasi antara sistem elektrik, mekanikal, dan hidrolis. Sistem kelistrikan menjadi pusat kendali pergerakan unit levelling, microcontroller, aktuator, dan kontrol logika. Kerusakan kecil seperti sekering putus atau konektor longgar dapat mengakibatkan gangguan besar pada keseluruhan fungsi unit. Oleh sebab itu, analisis mendalam terhadap gangguan pengoperasian MTT ini sangat penting, tidak hanya untuk mengatasi permasalahan saat ini, tetapi juga untuk menyusun strategi preventif di masa depan.

Penyusunan makalah ini sejalan dengan semangat profesi insinyur yang menuntut penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi secara sistematis untuk menyelesaikan persoalan nyata di masyarakat. Dengan menganalisis gangguan teknis pada KPJR, seorang insinyur tidak hanya dituntut menemukan solusi perbaikan, tetapi juga menyusun rekomendasi berbasis praktik terbaik (*best practices*), termasuk penyusunan SOP *troubleshooting*, pelatihan teknisi, serta perancangan sistem pemeliharaan preventif yang lebih efektif. Hal ini sesuai dengan kode etik profesi keinsinyuran yang menekankan keselamatan publik, efisiensi, dan keberlanjutan. Konstruksi jalan rel, *ballast*, dan *Multi Tie Tamper 09-32 Duomatic CSM* satu kesatuan konstruksi yang terbuat dari baja, beton atau konstruksi lain yang terletak di atas, di bawah, di permukaan tanah atau bergantung beserta perangkatnya yang mengarahkan jalannya kereta api.

Komponen jalan rel itu terdiri dari 2 bangunan yaitu bangunan atas dan bangunan bawah sebagai berikut:

1. Bangunan atas terdiri dari rel, penambat, bantalan, dan *ballast*.
2. Bangunan bawah terdiri dari *ballast* sirtu dan tanah.



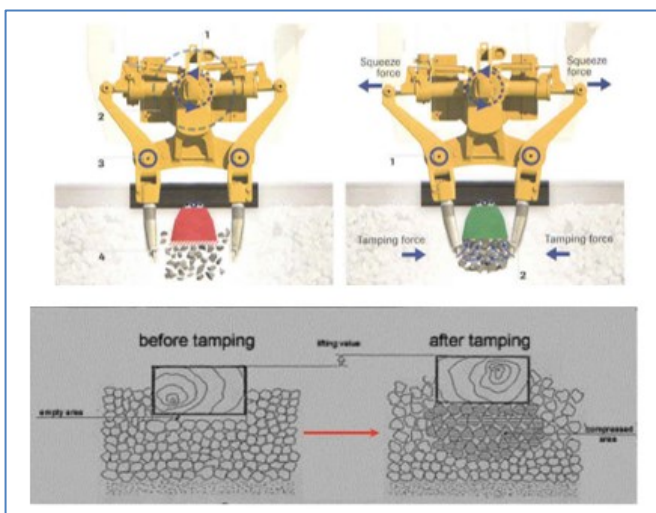
**Gambar 1.**  
Konstruksi Jalan Rel (PT. Kereta Api Indonesia, 2016)

*Ballast* itu terdiri dari dari batu pecahan bersudut lancip lolos saringan 2-6 cm. Kondisi sirtu yang baik itu tidak mengandung banyak lumpur dan tanah dengan kepadatan < 8 persen pengujian kepadatan.

Ballast itu sendiri memiliki fungsi yaitu:

1. Untuk meredam getaran jalan rel saat rangkaian kereta melintas.
2. Menjaga *trek* rel agar tidak ambles.
3. Menjaga *trek* rel agar tetap berada di tempatnya.
4. Sebagai lapisan yang mudah direlokasi untuk menyesuaikan dan meratakan ketinggian *trek* (*levelling*).
5. Memperlancar proses drainase air hujan.
6. Mencegah tumbuhnya rumput yang dapat mengganggu drainase air hujan.
7. Menyebarkan *axle load* dari *trek* rel ke lapisan landasan di bawahnya.

Ballast yang ditabur biasanya adalah batu krikak (bebatuan yang dihancurkan menjadi ukuran yang kecil) dengan diameter sekitar 28-50 mm dengan sudut yang tajam (bentuknya tidak bulat). Ukuran partikel ballast yang terlalu kecil akan mengurangi kemampuan drainase, dan ukuran yang terlalu besar akan mengurangi kemampuannya dalam mentransfer *axle load* saat rangkaian kereta api melintas (PT. Kereta Api Indonesia, 2012).



**Gambar 2.**  
Perbandingan *Ballast* Sebelum dan Sesudah di *Tamping* (Wackerlig, H.U., 1988)

*Multi tie tamper* adalah alat berat yang digunakan untuk perawatan jalan rel di bidang transportasi khususnya dalam perkeretaapian. *Multi tie tamper* ini berfungsi memadatkan *ballast* dan menormalisasikan geometri jalan rel sesuai data lintas tersebut. Prinsip kerja *multi tie tamper* yaitu *lifting* atau angkatan, *lining* atau geseran, *levelling* atau kerataan peninggian, dan *tamping* atau pemadatan secara bersamaan dan otomatis sesuai yang dikehendaki dengan tepat dan benar. Pemadatan disini sama seperti mesin *press*, tapi yang dipress adalah batuan-batuan berukuran kecil yang ada di bawah bantalan, nama lain batuan-batuan itu adalah ballast.

Dalam hal ini, KPJR 09-32CSM digunakan untuk menstabilkan posisi rel dan bantalan dengan cara memadatkan *ballast* (batu kricak) di bawah bantalan menggunakan unit *tamping* bervibrasi. Proses ini bertujuan untuk mengembalikan geometri jalur rel ke kondisi ideal, sehingga menjamin kenyamanan, keamanan, dan efisiensi operasional kereta api.



**Gambar 3.**

Perbandingan Jalan Rel (Holwirth, C., 2009)

Mesin ini dilengkapi dengan sistem perangkat pengukuran geometri rel yang dikendalikan secara elektronik oleh beberapa *microcontroller card*. Keunggulan utama dari tipe 09-32 CSM adalah kemampuannya untuk bekerja secara berkelanjutan (*continuous tamping*) tanpa harus berhenti di setiap titik, sehingga meningkatkan produktivitas dalam pekerjaan pemeliharaan rel.



**Gambar 4.**

KPJR 09-32 CSM

Proses *levelling* pada pertinggian sebuah rel sangat esensial dan penting dalam menjaga kestabilan kereta saat melintasi rel dengan kecepatan yang telah ditentukan. Kereta yang melintas memiliki gaya lempar keluar (*centrifugal force*) saat melewati lengkung. Dengan banyaknya kereta yang melintas pada jalan rel tersebut, maka geometri jalan rel akan berubah seiring dengan kapasitas dan kuantitas kereta yang lewat. Hal inilah yang dapat menyebabkan kereta bisa terjadi goyangan keras ataupun anjlok jika geometri jalan rel tidak dirawat secara benar. *Levelling* diperlukan untuk menjaga nilai pertinggian antara rel kiri dan kanan agar tetap dengan nilai dan toleransi sesuai ketentuan terutama pada rel lengkung. Secara logikanya, *levelling* mirip seperti sebuah timbangan yang mengukur perbedaan tinggi rel kanan dan kiri. Sinkronisasi antara sebuah *transducer* angkatan, pendulum, dan juga *trolley* sebagai media ukur yang bersentuhan langsung dengan rel, menentukan berapa nilai yang harus dibuat pada sebuah lengkung di jalan rel (Berger, E., 2017).



**Gambar 5.**

*Points Levelling dan Measuring Principles* (Berger, E., 2019)

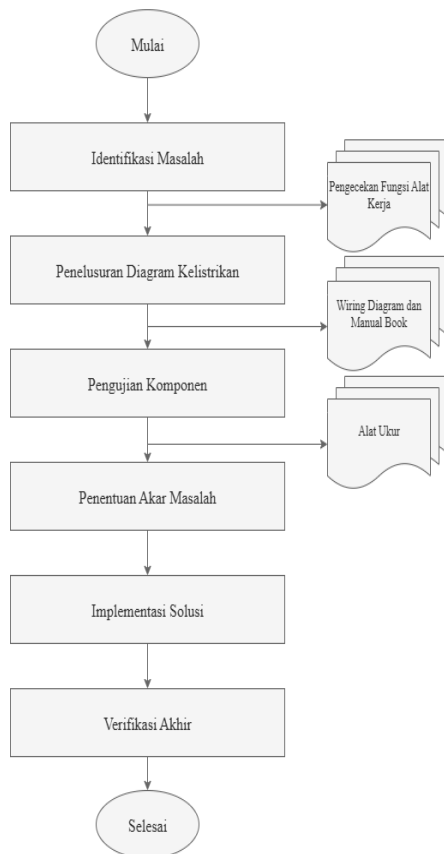
## 2. METODE PELAKSANAAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis teknis melalui metode studi kasus untuk mengidentifikasi dan menganalisis penanganan gangguan kelistrikan pada Kereta Pemeliharaan Jalan Rel (KPJR). Metode ini dipilih karena sangat efektif untuk menangani masalah yang bersifat spesifik, teknis, dan merupakan gangguan berulang yang memerlukan analisis mendalam. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi akar penyebab masalah secara akurat dengan fokus pada sistem kelistrikan yang diduga menjadi sumber utama gangguan.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa cara, yaitu:

1. Studi Literatur  
Mempelajari dokumen teknis seperti operator's manual dan *wiring* diagram dari Plasser & Theurer, serta Standar Operasional Prosedur (SOP) dari PT KAI (Persero).
2. Observasi Lapangan  
Melakukan pengamatan langsung terhadap KPJR yang mengalami gangguan untuk memahami gejala dan kondisi fisik komponen kelistrikan.
3. Wawancara  
Berdiskusi dengan teknisi senior dan operator di Balaiyasa Mekanik Prabumulih untuk mendapatkan informasi mengenai riwayat gangguan dan prosedur penanganan yang biasa dilakukan.
4. Analisis Teknis  
Melakukan pemeriksaan dan pengukuran tegangan, arus, dan resistansi pada komponen-komponen yang dicurigai menjadi penyebab masalah, seperti *relay*, *switch*, dan *microcontroller* pada *transducer*.
5. Simulasi & Uji Fungsi  
Pengujian pasca perbaikan untuk memastikan efektivitas solusi.

Proses analisis dilakukan secara sistematis, mulai dari identifikasi masalah, penelusuran diagram kelistrikan, pengujian komponen, penentuan akar masalah, implementasi solusi, hingga verifikasi akhir.



**Gambar 6.**  
Diagram Alur Proses Analisis

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Formulasi Masalah

Kereta Pemeliharaan Jalan Rel (KPJR) tipe 09-32 CSM merupakan salah satu aset penting dalam kegiatan perawatan jalan rel khususnya dalam proses penstabilan dan perataan bantalan rel melalui unit *levelling*. Namun dalam operasionalnya di lapangan sering terjadi gangguan pada sistem kelistrikan yang menyebabkan unit *levelling* tidak bisa memberikan nilai angkatan sebagaimana mestinya. Permasalahan ini berdampak pada terganggunya jadwal dan kualitas pemeliharaan jalur rel serta berpotensi memperburuk kondisi sarana apabila tidak ditangani secara tepat dan cepat. Oleh karena itu diperlukan analisis teknis mendalam untuk mengidentifikasi sumber gangguan baik dari sisi kelistrikan, kontrol sistem, maupun komponen mekanik terkait.

#### 3.2. Mekanisme Kelistrikan Levelling Unit MTT 09-32 Duomatic CSM

Unit *levelling* pada MTT tipe 09-32 *Duomatic* CSM bekerja dengan sistem kontrol elektrik yang mengatur pergerakan aktuator hidrolis. Arus listrik yang masuk dan keluar diatur dari sebuah *microcontroller card* ke *adapter card*, lalu dialirkan ke komponen seperti *relay*, *proximity switch* dan terakhir ke *levelling transducer* menuju ke *valve hidrolis* dan aktuator/silinder hidrolis. Apabila aliran listrik terputus atau terjadi gangguan pada komponen kelistrikan, maka aktuator tidak menerima sinyal dan unit *levelling* tidak bisa memberikan nilai angkatan rel kanan maupun kiri sehingga silinder hidrolis untuk mengangkat rel tidak bergerak. Hasil studi literatur dan observasi menunjukkan bahwa

sistem ini sangat bergantung pada kondisi *levelling transducer* dan juga konektor kabel pada *transducer*.

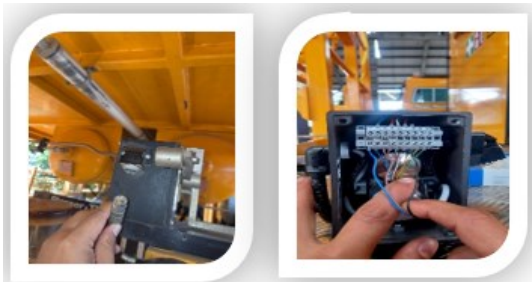
### 3.3. Identifikasi Penyebab Gangguan

Berdasarkan observasi lapangan, wawancara teknisi, dan pemeriksaan teknis, ditemukan beberapa penyebab utama gangguan, yaitu: beberapa cara, yaitu:

1. Relay Aus/Terbakar  
Kontak relay tidak lagi menghantarkan arus dengan baik akibat keausan/terbakar.
2. Konektor Longgar  
Sambungan kabel yang tidak rapat menyebabkan putusnya aliran listrik.
3. Korosi pada Kabel  
Kelembaban dan kurangnya perawatan periodik memicu oksidasi pada kabel.
4. Kurangnya Inspeksi Rutin  
Komponen kecil sering terabaikan dalam pemeliharaan, sehingga kerusakan tidak terdeteksi lebih awal.



**Gambar 7.**  
*Relay Aus/Terbakar*



**Gambar 8.**  
*Connector Longgar*

Analisis data gangguan dilakukan dengan pendekatan kuantitatif dan deskriptif berdasarkan catatan pemeliharaan Balai Yasa Mekanik Prabumulih selama periode Januari–Desember 2023. Data diklasifikasikan berdasarkan jenis komponen penyebab, frekuensi kejadian, lama perbaikan, dan kontribusinya terhadap total *downtime* tahunan.

Distribusi probabilitas kegagalan dihitung untuk memperkirakan kecenderungan munculnya gangguan pada komponen kelistrikan. Dengan total 30 kasus dan 4 jenis gangguan, probabilitas tiap jenis komponen dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

a. Total *Downtime* per Jenis Gangguan

Setiap nilai *downtime* (jam) merupakan hasil perkalian antara jumlah gangguan dengan rata-rata waktu perbaikan :

$$D_i = n_i \times t_i \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

- $D_i$ : total *downtime* untuk jenis gangguan ke-i (jam)
- $n_i$ : jumlah kejadian gangguan
- $t_i$ : rata-rata waktu perbaikan per kejadian (jam)

b. Kontribusi terhadap Total *Downtime*

Dihitung menggunakan rumus proporsionalitas :

$$K_i = \frac{D_i}{D_{total}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

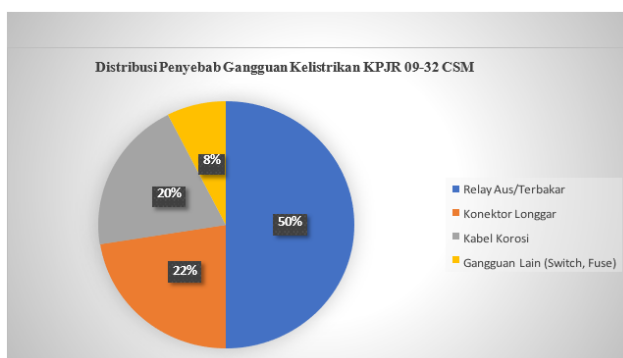
- $K_i$  : kontribusi total *downtime* (%)
- $n_i$  : jumlah kejadian gangguan
- $D_t$  : total *downtime* kumulatif (jam)

Berdasarkan rumus perhitungan sebelumnya, hasil analisis kuantitatif waktu perbaikan dan kontribusi *downtime* masing- masing jenis gangguan, yang merupakan rekapitulasi data gangguan unit *levelling* KPJR di Balai Yasa Mekanik Prabumulih tahun 2023, ditampilkan pada tabel di bawah ini

**Tabel 1.**  
Jenis dan Jumlah Gangguan pada Unit *Levelling* di Balai Yasa Mekanik Prabumulih

No	Jenis Gangguan	Jumlah Gangguan	Rata-rata Waktu Perbaikan (jam)	<i>Downtime</i> (jam)	Kontribusi (%)
1	Relay Aus/Terbakar	12	2.5	30	50%
2	Konektor Longgar	9	1.5	13.5	22,5%
3	Kabel Korosi	6	2	12	20%
4	Gangguan Lain (Switch, Fuse)	3	1.5	4.5	7,5%
<b>Total</b>		30		60	100%

Berdasarkan Tabel 1 mengenai jenis dan jumlah gangguan pada unit *levelling* di Balai Yasa Mekanik Prabumulih, diperoleh grafik yang menggambarkan proporsi masing-masing jenis gangguan terhadap kontribusi total kejadian.



**Gambar 9.**  
Grafik Distribusi Penyebab Gangguan Kelistrikan KPJR 09-32 CSM

Berdasarkan grafik distribusi penyebab gangguan kelistrikan KPJR 09-32 CSM menunjukkan probabilitas tertinggi pada komponen *relay* aus/terbakar sebesar 50% dengan dampak paling besar terhadap total *downtime*, maka harus menjadi prioritas utama perawatan preventif dan *redesign* sistem *relay* panel.

### 3.4. Analisis Keandalan Sistem

Sebelum melakukan perhitungan perlu dibuat terkait sistem kerja menggunakan diagram *function block diagram* untuk menggambarkan pola kerja dari sistem monitoring kelistrikan preventif. Makalah ini mengusulkan konsep rekayasa berupa rancangan sistem monitoring sederhana berbasis mikrokontroler untuk mendeteksi anomali pada arus atau tegangan di terminal *relay* dan konektor. Prinsip kerja sistem adalah sebagai berikut:

- Sensor tegangan mengukur output dari setiap *relay* utama.
- Jika terdeteksi nilai < 15 V pada *power supply* atau kehilangan sinyal, modul mikrokontroller akan menyalakan indikator LED dan mengirim notifikasi ke dashboard lokal (misalnya berbasis *google sheets* atau database internal Balaiyasa Mekanik Prabumulih).
- Data anomali tersimpan sebagai log preventif yang digunakan untuk analisis tren kegagalan.

Diagram konseptual sistem dapat dijelaskan sebagai berikut:



**Gambar 10.**  
Blok Diagram Sistem Monitoring Kelistrikan Preventif

Adapun analisis keandalan dilakukan menggunakan data statistik waktu antar kegagalan dan waktu perbaikan sebagai berikut:

- Parameter Keandalan

$$\begin{aligned}
 \text{Mean Time To Failure (MTTF)} &= \frac{I_{\text{operasi}}}{N_{\text{kerusakan}}} \\
 \text{Mean Time To Repair (MTTR)} &= \frac{I_{\text{perbaikan}}}{N_{\text{kerusakan}}} \\
 \text{Failure Rate } (\lambda) &= \frac{1}{\text{MTTF}}
 \end{aligned}$$

**Tabel 2.**  
Parameter Keandalan

Parameter	Rumus	Nilai	Satuan
Mean Time To Failure (MTTF)	$\frac{1200}{30}$	40	jam
Mean Time To Repair (MTTR)	$\frac{60}{30}$	2	jam
Failure Rate ( $\lambda$ )	$\frac{1}{40}$	0.025	1/jam

- Analisis Keandalan  
Berdasarkan perawatan dipilih periode ini karena pengukuran selama 1 bulan rata-rata masa operasional yang dilakukan itu adalah 100 jam

**Tabel 3.**

Periode Perawatan dalam 1 Tahun

Periode	Interval Waktu	Rata-rata Masa Operasional
P1	1 bulan	± 100 jam operasi
P3	3 bulan	± 300 jam operasi
P6	6 bulan	± 600 jam operasi
P12	12 bulan	± 1.200 jam operasi

Reliabilitas sistem dihitung dengan:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (3)$$

Untuk periode operasi 100 jam:

$$R(100) = e^{-0.025(100)} = 0.0821$$

Untuk periode operasi 100 jam:  $R(100) = e^{-0.025(100)} = 0.0821$  Artinya, peluang sistem bekerja tanpa kegagalan selama 100 jam adalah 8.21%.

**Tabel 4.**

Nilai Fungsi Keandalan

Reliability	Rumus	R(t)	Interpretasi
R(0)	$e^0$	10000	Sistem baru beroperasi (100% andal)
R(100)	$e^{-2,5}$	0.0821	8.21% peluang masih berfungsi
R(300)	$e^{-7,5}$	0.00055	0.055% peluang masih berfungsi
R(600)	$e^{-15}$	$3.06 \times 10^{-7}$	Hampir pasti gagal
R(1200)	$e^{-30}$	$9.36 \times 10^{-14}$	Tidak mungkin masih berfungsi

Artinya probabilitas sistem berfungsi tanpa kegagalan hanya 8,21%, sehingga perlu dilakukan peningkatan desain agar keandalan mencapai  $\geq 80\%$  dalam 100 jam operasi.

- Analisis Peningkatan *Reliability* di atas 80%  
Target keandalan sistem untuk mencapai  $R(100) \geq 0.80$ . Berdasarkan hubungan eksponensial:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow \lambda = -\frac{\ln(R(t))}{t} =$$

Substitusi nilai :

$$\lambda = -\frac{\ln(0.80)}{100} = 0.002231 / \text{jam}$$

Interpretasi:

Agar sistem tetap memiliki 80% peluang berfungsi setelah 100 jam, laju kegagalan harus  $\leq 0.00223/\text{jam}$ , atau dengan kata lain:

$$MTTF \geq \frac{1}{\lambda} = 449 \text{ jam}$$

Dengan demikian, agar reliabilitas mencapai  $\geq 80\%$  dalam 100 jam operasi, MTTF sistem harus ditingkatkan dari 40 jam menjadi minimal 449 jam (peningkatan  $\pm 1022\%$ )

- Penurunan Laju Kegagalan ( $\lambda$ ) per komponen  
Untuk menentukan target penurunan  $\lambda$  dapat menggunakan rumus berikut :

$$\lambda_{baru} = \lambda_{awal} \times (1 - Efi)$$

Untuk menentukan efektivitas perbaikan ( $Ef\%$ ) dapat menggunakan pedoman sebagai berikut :

**Tabel 5.**  
Referensi Efektifitas Perbaikan

Kategori Perbaikan	Contoh Intervensi	Rentang Efektivitas ( $Ef\%$ )	Penjelasan
Perbaikan Minor (Inspeksi/SOP)	Penambahan checklist, pembersihan, torsi ulang	10–40%	Pengaruh terbatas, bergantung disiplin teknisi
Perbaikan Sedang (Material & Prosedur)	Pelumas dielektrik, konektor bersegel, perbaikan kabel	50–80%	Menurunkan frekuensi gangguan secara signifikan
Perbaikan Besar (Desain & Teknologi Baru)	Ganti komponen IP tinggi, gold contact, redundant relay, monitoring digital	85–95%	Memberikan pengurangan $\lambda$ paling besar

Dari data kontribusi gangguan, dilakukan pendekatan proposional *failure rate allocation*, di mana total laju kegagalan ( $\lambda_t$ ) = 0.025 dibagi menurut kontribusi tiap komponen sebagai berikut:

**Tabel 6.**  
Penurunan Laju Kegagalan per Komponen

Komponen	Kontribusi (%)	$\lambda$ Awal (1/jam)	Rekomendasi Teknis	Target Penurunan $\lambda$	$\lambda$ Baru (1/jam)
Relay Aus/Terbakar	50	0.0125	Ganti relay IP67 kontak emas, pasang <i>snubber diode</i> , <i>preventive replacement</i> setiap 400 jam	-95%	0.00063
Konektor Longgar	22.5	0.0056	Gunakan konektor lukis dengan pengunci bayonet, pelumas dielektrik, torsi standar, inspeksi P3	-90%	0.00056
Kabel Korosi	20	0.0050	Gunakan kabel XLPE/ETFE tahan panas & lembab, rerouting dan <i>clamping</i> setiap 200 mm	-85%	0.00075
Switch/Fuse	7.5	0.0019	Ganti fuse HRC, switch IP65, inspeksi arus kontak pada P6	-70%	0.00057
<b>Total Sistem</b>	100	<b>0.025</b>	—	—	<b>0.00251</b>

Dengan  $\lambda_{total}$  baru = 0.00251/jam:  $R(100) = e^{-\lambda t} = e^{-0.00251(100)} = 0.778$ . Masih di bawah target (77,8%). Kemudian dilakukan rekayasa tambahan (redundansi relay kritikal & monitoring sensor tegangan/arus) maka laju kegagalan  $\pm 17\%$  :

$$\lambda_{baru,opt} = 0.00251 \times (1 - 0,17) \approx 0,00208 \text{ /jam}$$

$$R(100) = e^{-\lambda t} = e^{-0,00208 \times 100} = e^{-0,208} \approx 0,812$$

Analisis Availability:

$$MTTF_{baru} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.00208} = 480 \text{ jam}$$

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$$

Ketersediaan alat dihitung dari kombinasi MTFF dan MTTR:

$$A = \frac{40}{40+2} = 0,952 = 95,2 \%$$

Setelah rekayasa sistem diterapkan (MTFF = 480 jam, MTTR = 2 jam), diperoleh:

$$A = \frac{480}{480+2} = 0,9969 = 99,6 \%$$

### 3.5. Analisis Efisiensi Waktu Perbaikan

Analisis efisiensi waktu perbaikan bertujuan untuk mengukur sejauh mana penerapan SOP *troubleshooting* dan sistem inspeksi rutin berdampak terhadap penurunan waktu henti operasi (*downtime*) pada unit KPJR. Data diambil dari hasil observasi dan log perawatan selama dua periode, Sebelum implementasi SOP *troubleshooting* dan sesudah implementasi SOP *troubleshooting* pada penerapan sistem perbaikan terstruktur.

$$E = \frac{t_{lama} - t_{baru}}{t_{lama}} \times 100\%$$

**Tabel 7.**

Penurunan Laju Kegagalan per Komponen

Tahapan Perbaikan	Sebelum Implementasi SOP Troubleshooting (jam)	Sesudah Implementasi SOP Troubleshooting (jam)	Efisiensi (%)
Identifikasi Gangguan	1.8	0.6	66.7
Penggantian Komponen	2.5	1.2	52.0
Uji Coba	0.9	0.3	66.7
<b>Total</b>	<b>5.2</b>	<b>2.1</b>	<b>59.6</b>

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendekatan sistematis melalui SOP dan *checklist* memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi kerja. Sebelum adanya panduan baku, proses identifikasi gangguan sering dilakukan secara *trial-error*, menyebabkan waktu perbaikan lebih panjang karena teknisi harus menelusuri seluruh rangkaian kelistrikan secara manual.

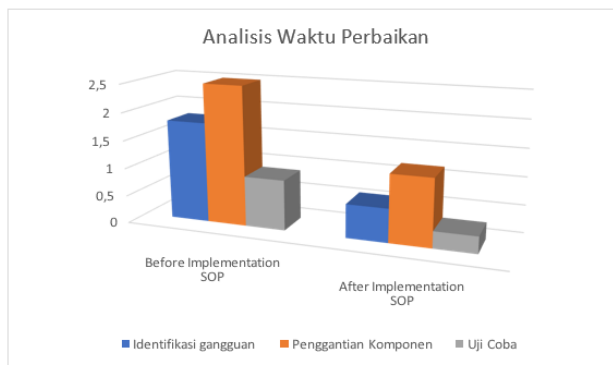
Setelah implementasi SOP *troubleshooting*, proses perbaikan menjadi lebih terarah dengan urutan pemeriksaan standar, seperti:

- Inspeksi visual terhadap relay, kabel, dan konektor.
- Pengukuran tegangan dan resistansi untuk memastikan aliran listrik normal.
- Penggantian komponen rusak seperti relay dan kabel yang tidak berfungsi.
- Pemasangan kembali konektor agar lebih rapat dan aman dari getaran.
- Pengujian ulang sistem dengan mengoperasikan unit tamping hingga berfungsi normal.

Selain mempercepat proses perbaikan, penerapan sistem ini juga menurunkan risiko *human error* dan meningkatkan akurasi diagnosis. Dari hasil tersebut, diperoleh total penghematan waktu kerja teknisi sebesar 59,6% yang secara langsung meningkatkan ketersediaan alat di lapangan. Bila dikonversikan ke nilai produktivitas, peningkatan efisiensi ini setara dengan tambahan kapasitas kerja satu unit KPJR selama 80 jam operasional per tahun.



**Gambar 11.**  
Pengukuran Tegangan pada Panel



**Gambar 12.**  
Grafik Analisis Waktu Perbaikan

Dengan melakukan penerapan Perawatan P1 secara rutin dan penerapan prosedur sesuai SOP, diperoleh peningkatan keandalan sistem (*reliability*) hingga 81,2% dalam 100 jam operasi, serta *availability* meningkat dari 95,2% menjadi 99,7%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penerapan perawatan terjadwal dan kepatuhan terhadap SOP mampu menekan laju kegagalan sistem secara signifikan dan memperpanjang umur operasi komponen kelistrikan pada unit *levelling* KPJR.

### 3.6. Evaluasi Perbaikan

Komponen pengganti tersedia di gudang pemeliharaan dan tidak memerlukan impor atau pemesanan jangka panjang. Biaya penggantian komponen kelistrikan jauh lebih rendah dibandingkan perombakan sistem kontrol atau modifikasi unit.

Solusi ini lebih ekonomis dan tidak memerlukan downtime yang lama, sehingga tidak mengganggu jadwal operasional alat berat KPJR secara keseluruhan.

Dari sisi teknis, solusi yang diterapkan dinilai efektif karena komponen pengganti tersedia di gudang pemeliharaan dan tidak memerlukan impor atau pemesanan jangka panjang sebagai berikut:

- Waktu perbaikan relatif singkat dan tidak menyebabkan *downtime* panjang.
- Biaya yang dikeluarkan efisien karena hanya mengganti komponen kecil, bukan seluruh modul kontrol.
- Risiko kerusakan tambahan pada sistem mekanik atau hidrolik dapat dihindari.

Dari sisi manajerial, hasil ini menunjukkan pentingnya adanya SOP *troubleshooting* dan *checklist* inspeksi rutin agar masalah serupa dapat dicegah.

### 3.7. Rekomendasi Pemeliharaan

Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi, beberapa rekomendasi yang diajukan adalah:

- Penyusunan SOP *troubleshooting* khusus sistem kelistrikan KPJR.
- Penerapan *checklist* inspeksi rutin pada komponen relay, kabel, dan konektor.
- Pelatihan teknis bagi teknisi Balaiyasa untuk mendeteksi dini potensi gangguan.
- Pemantauan preventif melalui pencatatan periodik kondisi komponen kelistrikan.

Dengan penerapan langkah-langkah tersebut keandalan KPJR dapat ditingkatkan, *downtime* operasi dapat diminimalisir, dan efektivitas perawatan jalur rel menjadi lebih optimal.

### 3.8. Evaluasi Inovasi dan Implikasi

Inovasi yang dikembangkan memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efektivitas pemeliharaan alat berat perkeretaapian. Penerapan sistem monitoring kelistrikan memungkinkan teknisi mendeteksi dini potensi gangguan, memperpendek waktu perbaikan, serta meningkatkan keselamatan kerja.

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai analisis gangguan kelistrikan pada unit *levelling* KPJR tipe 09- 32 CSM di Balaiyasa Mekanik Prabumulih PT KAI (Persero), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. Mekanisme kelistrikan unit *levelling* bekerja dengan mengandalkan aliran arus melalui relay, kabel, dan konektor untuk mengaktifkan aktuator hidrolis. Gangguan pada salah satu komponen ini menyebabkan unit *levelling* tidak dapat berfungsi sehingga nilai angkatan pada saat mesin mengangkat rel tidak memberikan nilai.
- b. Faktor penyebab gangguan utama adalah relay yang terbakar dan juga connector yang longgar bakar maka menimbulkan eror pada *transducer* sebagai alat ukur pada saat rel diangkat.
- c. Penerapan SOP *troubleshooting* dan *checklist* inspeksi berhasil menurunkan *downtime* hingga 59,6%. Ini menunjukkan sangat pentingnya peran SOP *troubleshooting* dalam penanganan gangguan.
- d. Pemantauan dengan *checklist* secara rutin membantu meminimalisir gangguan-gangguan yang sama terjadi berulang.
- e. Inovasi rekayasa berupa rancangan sistem monitoring kelistrikan berbasis mikrokontroler memberikan kontribusi kebaruan dalam penerapan *predictive maintenance* KPJR.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

1. Berger, E. (2017). *Levelling and Lining System on Tamping Machines*. 1–26.
2. Berger, E. (2019). *General Description Proportional*. 1–13.
3. Holwirth, C. (2009). *Lining System*. July, 1–27.
4. PT. Kereta Api Indonesia. (2012). *Perjana 6A tentang Metode Perawatan Jalan Rel*. 1–299.
5. PT. Kereta Api Indonesia. (2016). *Peraturan Dinas IOA*. Bulan November.
6. Wackerlig, H. U. (1988). *Basic Principles for the Storage of Chemicals*.