

# JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

## Teknik Sipil dan Perencanaan

---

### ANALISIS DAMPAK *MUD PUMPING* TERHADAP KERUSAKAN *SLEEPER* PADA JALUR KERETA API TANJUNG KARANG – REJOSARI (STUDI KASUS DIVRE IV TANJUNG KARANG)

Muhammad Rizki Arif<sup>1\*</sup>, Roy Jones Lumban Siantar<sup>1</sup>, Febriyadi<sup>1</sup>, Arif Setyaji<sup>1</sup>,  
Nurwanda Sari<sup>1</sup>, Nur Annisa Mardhotillah<sup>1</sup>, Nur Syahidah Aini<sup>1</sup>, Rahmatika Dwi Putri Jori<sup>1</sup>

<sup>1\*)</sup> Program Studi Teknik Perkeretaapian, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan.  
Email Penulis Korespondensi : [muhammad.arif@ka.itera.ac.id](mailto:muhammad.arif@ka.itera.ac.id)  
Nomor HP Penulis Korespondensi : 082182800440

#### ABSTRACT

This study analyzes the impact of mud pumping on track stability and damage to K-550-type monoblock concrete sleepers on the Tanjung Karang–Rejosari line (DIVRE IV Tanjung Karang). This Class I track, with a gauge of 1,067 mm, carries an annual load of 82,883.21 tons. Mud pumping causes water mixed with mud to rise to the surface of the ballast, which disrupts load distribution and the stability of the track structure. The research methodology comprises four main stages: (1) field observations at four critical locations (Km 13+8/9, Km 14+2/3, Km 25+2/3, and Km 28+5/6); (2) measurements using a Dynamic Cone Penetrometer (DCP) and a densometer to obtain RC, CBR, and Evd parameters; (3) track geometry evaluation to detect elevation deviations; and (4) technical analysis of sleepers based on an elastic modulus of 150,093.30 kg/cm<sup>2</sup> and a permissible stress of 210 kg/cm<sup>2</sup>. The research results indicate that the most critical condition is at Km 25+2/3, with an RC value of 14.37 kN/m, a CBR of 3.85%, and an Evd of 41.6 MN/m<sup>2</sup>. Overall, several segments have CBR values below the safe threshold (15–24%), indicating a significant decrease in ballast density due to mud pumping. Technical analysis confirms that mud accumulation disrupts the distribution of effective stress and accelerates sleeper deterioration. As a mitigation measure, it is recommended to install woven geotextile, replace the ballast material, and implement periodic monitoring using DCP/densometer instruments to maintain track stability within acceptable limits and extend the service life of the railway infrastructure.

**Keyword:** *Mud Pumping, Concrete Sleeper, Railway, DCP, Track Stability*

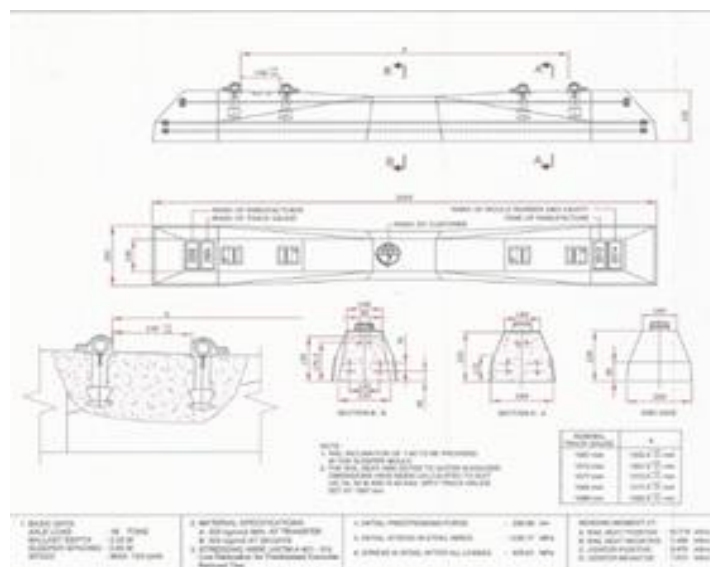
## 1. PENDAHULUAN

Perkeretaapian merupakan moda transportasi massal strategis yang mengintegrasikan mobilitas masyarakat dan distribusi logistik dengan keunggulan efisiensi energi, penggunaan lahan yang hemat, serta tingkat keselamatan yang tinggi. Dalam operasionalnya, keandalan kereta api sangat bergantung pada interaksi dinamis antara komponen sarana dan prasarana yang harus memenuhi standar teknis tertentu [1]. Di wilayah DIVRE IV Tanjung Karang, Provinsi Lampung, tantangan utama prasarana muncul dari tingginya frekuensi dan beban angkutan barang, khususnya batubara melalui rangkaian kereta api BABARANJANG. Dengan kapasitas 50–60 gerbong per rangkaian dan beban muatan mencapai 20–75 ton per gerbong, jalur rel menerima beban gandar ekstrem yang harus didistribusikan secara merata oleh bantalan (*sleeper*) ke lapisan ballast hingga ke tanah dasar.

Ketidakmampuan struktur dalam mendistribusikan beban tersebut sering kali dipicu oleh fenomena *mud pumping*. Fenomena ini terjadi akibat intrusi material halus (lumpur) dari tanah dasar ke dalam rongga

*ballast* yang dipicu oleh kadar air tinggi dan tekanan pori berlebih akibat beban berulang kereta api [2]. Keberadaan genangan lumpur di lapisan *ballast* tidak hanya merusak geometri jalan rel, tetapi juga menyebabkan degradasi struktural pada *sleeper* beton monoblok tipe K-550, yang pada tahap lanjut dapat memicu terjadinya patahan atau kegagalan struktur jalur.

Meskipun dampak *mud pumping* telah banyak diulas dalam konteks pemeliharaan jalan rel secara umum, masih terdapat keterbatasan data kuantitatif mengenai ambang batas toleransi stabilitas jalur yang dihubungkan langsung dengan parameter kekuatan tanah di lokasi spesifik DIVRE IV Tanjung Karang. Sebagian besar pemeliharaan rutin masih mengandalkan inspeksi visual, yang sering kali terlambat dalam mendeteksi penurunan daya dukung di bawah lapisan permukaan. Gap penelitian ini terletak pada penggunaan metode pengujian semi-destruktif menggunakan Dynamic Cone Penetrometer (DCP) atau Densometer untuk mengukur nilai California Bearing Ratio (CBR) dan modulus deformasi dinamis (Evd) secara in-situ sebagai dasar penentuan prosedur perawatan teknis. Berdasarkan kondisi tersebut, rumusan masalah penelitian ini adalah: (1) Bagaimana karakteristik teknis kerusakan sleeper beton akibat fenomena *mud pumping* pada segmen Tanjung Karang–Rejosari. (2) Sejauh mana penurunan stabilitas jalur berdasarkan parameter CBR dan Evd di titik-titik kritis. (3) Bagaimana efektivitas penggunaan alat DCP dalam menentukan batas toleransi perawatan jalur. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis korelasi antara intensitas *mud pumping* dengan tingkat kerusakan sleeper beton serta merumuskan rekomendasi pemeliharaan berbasis data kepadatan tanah menggunakan Densometer. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada optimalisasi umur layanan prasarana kereta api di jalur dengan beban gandar tinggi [3].



Sumber: PT. Bina Sarana Dirgantara

**Gambar 1.** Desain Sleeper Kereta Api

## 2. METODE

Dalam pengumpulan data penelitian, pengolahan data dapat terbagi beberapa jenis, penelitian kuantitatif dan penelitian kualitatif. Penelitian kuantitatif bersifat data numerik dan statistik dan memiliki tujuan menguji hipotesis dan menggeneralisasikan data yang didapatkan dengan pendekatan deduktif dengan cara merumuskan data hipotesis dengan metode survei, analisis data dan perhitungan variabel untuk menghasilkan data berupa angka. Penelitian kualitatif data yang dihasilkan berupa mendeskripsikan berupa kata dan gambaran dan memiliki tujuan memahami permasalahan dalam suatu fenomena dengan metode induktif yaitu pengumpulan data yang didapatkan secara deskriptif dan naratif yang pengambilan data melalui wawancara dan perbandingan teori yang menghasilkan hipotesis. Penelitian ini mengikuti alur kerja sistematis yang dimulai dari identifikasi masalah di lapangan hingga perumusan

rekomendasi pemeliharaan. Tahapan penelitian dirancang untuk mengorelasikan parameter mekanika tanah dengan stabilitas struktural bantalan.

## 2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan pada jalur kereta api segmen Tanjung Karang–Rejosari yang merupakan bagian dari wilayah operasional DIVRE IV Tanjung Karang, Provinsi Lampung. Segmen ini merupakan jalur kelas I dengan beban lalu lintas tinggi yang didominasi oleh angkutan batubara rangkaian panjang (Babaranjang).

## 2.2 Objek dan Titik Pengamatan

Objek penelitian adalah bantalan (*sleeper*) beton monoblok tipe K-550 dan struktur lapisan *ballast* yang mengalami *mud pumping*. Pengamatan difokuskan pada empat titik lokasi kritis:

- Km 14+2/3
- Km 28+5/6

## 2.3 Data Primer dan Sekunder

Data Primer diperoleh dari data pengukuran *sleeper* dan deformasi yang terjadi pada *sleeper* serta melakukan observasi pada lapangan pada lintas kereta api Tanjung Karang – Rejosari. Data sekunder yang digunakan adalah Data Gapeka (grafik perjalanan kereta api) untuk mengetahui jumlah frekuensi pada perjalanan kereta api pada lintas jalur Tanjung Karang – Rejosari. Data *sleeper* dan spesifikasi *sleeper* untuk mengetahui kondisi *sleeper* dan spesifikasi *sleeper* yang digunakan. Data pendukung seperti tinjauan pustaka dan penelitian terdahulu yang digunakan untuk mengkaji data dan mendukung penelitian tugas akhir serta menjadi referensi dalam pengolahan data. Peraturan dan aturan yang mengenai *sleeper* yang digunakan untuk menganalisis data pada *sleeper* apakah sesuai aturan dalam pemasangan dan kondisi *sleeper*. Data *mud pumping* seperti metode kerja dan data *mud pumping* yang terjadi pada lintas Tanjung Karang – Rejosari.

## 2.3 Instrumen dan Prosedur Pengukuran

Prinsip kerja data *Dynamic Cone Penetrometer* didasarkan pada pengukuran respons material terhadap energi tumbukan (575 Joule) yang diberikan oleh kereta api saat melintasi jalur Tanjung Karang – Rejosari yang menghasilkan nilai RC (resistansi conus tipikal) penurunan akibat pembebanan yang terjadi pada alat densometer/dcp yang tinggi jatuh ring (H) dalam satuan milimeter (mm) bernilai 575 joule, DCP Index didapatkan dari nilai dihitung dengan membagi total kedalaman penetrasi (dalam mm) dengan jumlah kereta api yang melewati jalur, sehingga mengakibatkan penurunan pada *ring* DCP pada saat terjadi pebebanan dari kereta api yang melintas.

Densometer (*Light Weight Deflectometer*) sebuah alat yang digunakan untuk mengukur parameter kekakuan lapisan melalui beban dinamis guna mendapatkan nilai Modulus Deformasi Dinamis (Evd). Pengukuran dilakukan dengan menempatkan alat pada titik yang teridentifikasi *mud pumping*, melakukan tumbukan/penekanan, dan mencatat nilai penetrasi setiap interval tumbukan hingga kedalaman tertentu sesuai standar prosedur operasional.

## 2.4 Analisis Data

Data lapangan diproses menggunakan korelasi statistik untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah. Penentuan nilai *California Bearing Ratio* (CBR) dari data DCP menggunakan persamaan Kleyn (1975):

$$\log(\text{CBR}) = 2,62 - 1,27 \log(\text{DCP}) \quad (1)$$

Dimana:

- DCP = Laju penetrasi (mm/tumbukan)  
2,62 = konstanta regresi/*intercept*, titik potong/nilai dasar dalam hubungan antara CBR dan DCP “berfungsi sebagai penyesuaian”.

1,27 = Koefisien regresi/*slope* adalah angka ini untuk menentukan kemiringan atau pengaruh dari nilai CBR “(-) tanda minus menunjukkan hubungan terbalik, semakin besar nilai penetrasi DCP (tanah lebih lunak), semakin kecil nilai CBR (daya dukung tanah lebih rendah).

Logaritma (log) = logaritma digunakan untuk menyederhanakan hubungan dari DCP dan CBR.

## 2.5 Kriteria Evaluasi

Evaluasi Visual yaitu mengidentifikasi munculnya material halus (lumpur) yang mengotori lapisan *ballast* dan genangan air. Evaluasi Parameter Terukur yaitu membandingkan hasil uji lapangan dengan ambang batas standar teknis. RC (Indeks DCP): 8 – 15 MPa. E<sub>vd</sub> (Modulus Dinamis): 26 – 40 MN/m<sup>2</sup>. CBR (Kepadatan Tanah): 15 – 24%.

Spesifikasi tabel yang digunakan pada saat akan melaksanakan penelitian sebagai berikut sebagai acuan dan landasan pada saat perhitungan dan observasi:

1. Tabel berat lokomotif dan gerbong [4]

**Tabel 1. Jenis dan Berat Lokomotif dan Gerbong**

No	Jenis Gerbong	Berat Kosong (Ton)	Berat Muat (Ton)	Berat Total (Ton)
1	GD 30 TON (INKA)	19	30	49
2	GD 30 TON (ARAD - RUMANIA)	12	30	42
3	GD 40 TON	12	40	52
4	GD 45 TON	14	42	56
5	GD 50 TON	26	45	71
6	GD 45 TON	16.7	50	66.7
7	GT	22	50	72
8	GK (KKW)	18	30	48
9	GB (ZZOW)	18	30	48
10	GB (KBBW)	22	50	72
11	GB (YYW)	14	30	44

Sumber: Peraturan Dirjen KA 2015

**Tabel 2. Jenis dan Berat Lokomotif dan Gerbong [4]**

No	Jenis Lokomotif	Berat (Ton)
1	BB 203	78.4
2	BB 204	55
3	BB 301	52
4	BB 302	44
5	BB 303	42.8
6	BB 304	52
7	CC 201	84
8	CC 202	108
9	CC 203	84
10	CC 204	84
11	CC 205	106.4
12	CC 206	88.2
13	CC 300	90

Sumber: Peraturan Dirjen KA 2015

2. Tabel Peraturan kelas jalan rel Peraturan Menteri 60 Tahun 2012 [1], Lampiran Jalan rel

**Tabel 3.** Tegangan dan kelas jalan rel [5]

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (Juta Ton/Tahun)	Kecepatan Rencana (kg)	Beban Gandar (Ton)	Beban Roda Dinamis (Kg)	Jenis Rel	Tegangan Dasar Rel (Kg/Cm <sup>2</sup> )	Tegangan Ijin (kg/cm <sup>2</sup> )
I	> 20	150	18	19940	R - 60	1042,3	1325
					R - 54	1176,8	
II	10 - 20	140	18	16041	R - 54	1128,2	1325
					R - 50	1231,8	
					R - 54	1097,7	
III	5 - 10	125	18	15542	R - 50	1138,8	1663
					R - 42	1476,3	
					R - 54	1031	
IV	2.5 - 5	115	18	14843	R - 50	1125,8	1843
					R - 42	1410	
					R - 42	1343,5	
V	> 2.5	100	18	14144	R - 42	1343,5	2000

Sumber: PM 60 tahun 2012

3. Tabel dan komponen dan spesifikasi bantalan(*sleeper*) monoblok PT. Bina Sarana Dirgantara.

**Tabel 4.** Spesifikasi *Sleeper* Beton [6]

Komponen	Spesifikasi
Tipe	<i>Sleeper</i> Monoblok Beton Bertulang
Panjang total	2000 mm
Lebar Atas	140 mm
Lebar Bawah	216 mm
Tinggi (tebal)	250 mm
Berat	± 200 kg
Jarak antar dudukan rel	1067 mm (untuk jalur rel 1.067 mm)
Mutu beton	K-550 ( $f'c = 41,3$ MPa)
Jenis tulangan	Baja U-55
Metode produksi	Sistem Pre-Tension dengan Steam Curing
PC Wire Low Relaxation	D 7 mm
Ketahanan lentur beton	≥ 25 kN/m
Umur rencana pakai	± 50 tahun

Sumber: PT. Bina Sarana Dirgantara

**Tabel 5.** Dimensi *Sleeper* [7]

Dimensi <i>Sleeper</i> Bagian Bawah Rel	Dimensi <i>Sleeper</i> Bagian Tengah
Luas Penampang (A1)= 456 Cm <sup>2</sup>	Luas Penampang (A2)= 400,75 Cm <sup>2</sup>
Momen Inersia (Ix-1) = 15.139,09 Cm <sup>4</sup>	Momen Inersia (Ix-1) = 10.190,02Cm <sup>4</sup>
Y1(a) = 10,368 Cm	Y1(a) = 9,055 Cm
Y1(b) = 9,64 Cm	Y1(b) = 8,445 Cm
Momen Tahanan Atas (W1(a))= 1460,46 Cm <sup>3</sup>	Momen Tahanan Atas W1(a)= 1.125,35 Cm <sup>3</sup>
Momen Tahanan Bawah (W1(b)) = 1.571,26 Cm <sup>3</sup>	Momen Tahanan Bawah W1(b) = 1.206,63 Cm <sup>3</sup>

Sumber: PT. Bina Sarana Dirgantara

**Tabel 6.** Klasifikasi Material Berdasarkan Pengujian Nilai CBR [8]

Material	CBR %
Agregat pecah padat-bergradasi.	100
Agregat alami padat-bergradasi.	80
Batu Kapur.	80
Pasir campuran.	50 - 80
Pasir berbutir kasar.	20 - 50
Pasir berbutir halus.	10 - 20
Tanah Lempung.	< 3

Sumber: Website pengujian CBR yang dilakukan perusahaan PT. Tunas Lima Warna

**Tabel 7.** Tabel penilaian *Subgrade* dan Rekomendasi Teknis [9].

CBR (%)	Kategori	Kondisi Subgrade	Rekomendasi Teknis
> 30	Sangat Baik	Tanah sangat padat, drainase baik, stabilitas tinggi.	Cocok untuk jalur utama berkecepatan tinggi dan beban berat.
15 – 24	Baik	Subgrade cukup stabil dan kaku, drainase memadai.	Dapat digunakan untuk jalur utama dan sekunder dengan kekuatan minimal.
4 – 14	Cukup	Tanah kurang padat, rawan deformasi jika jenuh air.	Butuh kekuatan tambahan (geotekstil, <i>ballast</i> baru, kekuatan <i>subgrade</i> ).
< 3	Buruk	<i>Subgrade</i> sangat lemah, rentan terhadap penurunan & <i>mud pumping</i> .	Tidak layak untuk jalur langsung, perlu perbaikan tanah atau penggantian material.

Sumber: Website pengujian CBR yang dilakukan perusahaan PT. Tunas Lima Warna.

**Tabel 8.** Standar Aturan Perawatan PT. Kereta Api Indonesia Kelas Jalan III [10]

BATASAN	SKILU (mm)	PERTINGGIAN (mm)	LEBAR JALAN REL 1067 mm
PERHATIAN	6	11	+21 / -2
PRIORITAS	12	21	+24 / -4
PERINGATAN	22	32	+30 / -8

Sumber: PT. Bina Sarana Dirgantara

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Frekuensi dan Perhitungan Passing tonnage Pada Lintas Tanjung Karang – Rejosari.

Frekuensi kereta api adalah jumlah perjalanan kereta api yang melewati lintasan tersebut dalam satu hari atau waktu [11] pada lintasan Tanjung Karang – Rejosari pengangkutan kereta api terdapat 26 frekuensi kereta api dalam 1 hari. Untuk kereta api BABARANJANG terdapat 26 frekuensi perjalanan untuk pergi jika ditambahkan untuk waktu balik maka terdapat 52 frekuensi perjalanan pulang pergi untuk melintasi jalur kereta api lintas Tanjung Karang – Rejosari. *Passing tonnage* adalah istilah yang digunakan untuk mengukur total berat muatan/daya angkut yang melewati sebuah titik tertentu di jalur kereta api selama periode waktu tertentu, dalam jangka waktu tertentu dengan satuan ton/tahun [1]. Serta gerbong kereta api barang batubara (Babaranjang). *Tonnage Equivalent* Kereta api Babaranjang pada lintas Tanjung Karang – Rejosari dapat dihitung menggunakan:

Perhitungan *Tonnage Equivalent* (TE)

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1) \quad (2)$$

Dimana:

TE = Tonase ekivalen (ton/hari).

K<sub>b</sub> = 1.5 beban gandar < 18 Ton dan 1.3 beban gandar > 18 ton.

T<sub>b</sub> = Tonase gerbong dan barang per hari.

K<sub>1</sub> = Koefisien yang besarnya telah ditentukan sebesar 1,4.

T<sub>1</sub> = Tonase lokomotif per hari.

(Sumber: Kementerian Perhubungan, DJKA, UIC (*union international des, chemins de far*))

$$\begin{aligned} TE &= 0 + (1,3 \times 149.084) + (1,4 \times 11.065,6) \\ &= 193.809,2 + 15.492,8 = 209.302 \text{ ton/hari} \end{aligned}$$

Perhitungan Total *Passing Tonnage* Tahunan

$$T = 360 \times S \times TE \quad (3)$$

Dimana:

360 = Jumlah hari dalam 1 Tahun.

S = 1.0 untuk lintasan tanpa kereta api penumpang.

TE = Kapasitas angkut lintas (ton/tahun).

T = Beban lintas tahunan (ton/tahun)

(Sumber: Forum Studi Transportasi Antar Perguruan Tinggi (FSTPT), 2021).

$$\begin{aligned} T &= 360 \times 1,1 \times 209.302 \\ &= 82.883.592 \text{ ton/tahun} \end{aligned}$$

Dengan nilai **82.883.592 ton/tahun**, maka jalur Tanjung Karang – Rejosari diklasifikasikan sebagai Jalan Rel Kelas I karena di atas > 20 Juta Ton/Tahun.

### 3.2 Perhitungan Pada Struktur Jalur Kereta Api Pada Lintas Tanjung Karang – Rejosari.

Beban vertikal yang bekerja pada rel tidak hanya berasal dari beban statis (berat kereta api), tetapi juga dipengaruhi oleh beban lainnya salah satunya *mud pumping*, maka perlu dilakukan perhitungan terhadap beban statis dengan tambahan beban dinamis. Formula yang digunakan dengan pendekatan rumus Talboot. Untuk perhitungan sebagai berikut:

Perhitungan Beban Dinamis [12]

$$P_d = P + 0,01 \times P \left( \left( \frac{V}{1,609} \right) - 5 \right) \quad (4)$$

Dimana:

P = Beban Roda Kereta Api

V = Kecepatan kereta api lintas Tanjung Karang – Rejosari 50 – 70 Km/jam.

0,01 = Faktor penambahan beban sebesar satu persen jika melewati 5 Mph.

1,609 = Faktor konversi dari kilometer ke mill (karena mengikuti standar AREMA).

5 = Faktor konstanta batas kecepatan pada 5 Mph.

(Sumber: Peraturan Dinas 10 Tahun 1986)

Perhitungan:

$$P_d = 9.000 + 0,01 \times 9.000 \times \left( \left( \frac{70}{1,609} \right) - 5 \right)$$

$$P_d = 12.465 \text{ kg}$$

Hasil: Beban dinamis yang diterima oleh rel dari pembebanan kereta api dari berat roda kereta api adalah 12.465 kg.

a. Penentuan Koefisien Kekakuan Jalur Rel R54 ( $\lambda$ )

$$\lambda = \left( \frac{K}{(4 \times E \times I_x)} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Dimana:

K = (Modulus/kekakuan jalur kereta api) 180 Kg/cm<sup>2</sup>

$\lambda$  = (Lambda/koefisien kekakuan jalur)

E = (Elastisitas rel R54)  $2 \times 10^6$

$I_x$  = (Inersia rel R54) 2346 cm<sup>4</sup>

(Sumber: Peraturan Dinas 10 Tahun 1986)

$$\lambda = \left( \frac{180}{(4 \times 2 \times 10^6 \times 2346)} \right)^{1/4}$$

Perhitungan: 0,00989 cm<sup>-1</sup>

b. Perhitungan Momen Lentur Maksimum (Maximum Bending Moment)

Rumus:

$$M_o = P_d / (4 \times \lambda) \quad (6)$$

Dimana:

$M_o$  = Momen lentur maksimum

$P_d$  = Beban dinamis roda

4 = konstanta dari rumus Boef (*beam on elastic foundation*)

$\lambda$  = (Lambda/koefisien kekakuan jalur) 0,00989cm<sup>-1</sup>

(Sumber: Peraturan Dinas 10 Tahun 1986)

$$M_o = 12.465 (4 \times 0,00989) = 315.000 \text{ kg/cm}$$

c. Perhitungan Tegangan Lentur pada Rel R54.

Rumus:

$$\delta = (M \times y) / I_x \quad (7)$$

Dimana:

M = Momen Lentur rel R54

y = Jarak tepi bawah rel R54 ke garis netral

$I_x$  = Momen Inersia rel R54

0,85 = konfigurasi 6 roda pada kereta api CC.

$\delta$  = Tegangan Ijin Jalur Kereta Api R54 (kg/cm<sup>2</sup>)

(Sumber: PM No. 60 Tahun 2012)

$$M = 0,85 \times M_o = 0,85 \times 315.000 = 267.700 \text{ kg/cm}$$

Tegangan Ijin Jalur Kereta Api:

$$y = 7,62 \text{ cm}$$

$$I_x = 2346 \text{ cm}^4$$

Perhitungan:

$$\Delta = \frac{(y \times I_x)}{2.346} \quad (8)$$

$$\delta = (277,410 \times 7,62) / 2.346 = 892,03 \text{ kg/cm}^2$$

Hasil =  $869,4 \text{ kg/cm}^2 < 1325 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow$  MEMENUHI SYARAT sesuai **Tabel 2.**

d. Perhitungan Tegangan Dasar pada Rel (*Base Stress*).

Rumus:

$$S_{base} = M_o / W_b \quad (9)$$

Dimana:

$$W_X = (\text{moment of resistance R54}) / \text{momen resisten rel R54 } 279,2 \text{ (cm}^3)$$

$$M_o = \text{Momen lentur maksimum} = 315.000 \text{ (kg/cm)}$$

$$S_{base} = \text{Tegangan dasar pada rel (kg/ cm}^2)$$

(Sumber: PM No. 60 Tahun 2012)

$$W_b = 297 \text{ cm}^3$$

Perhitungan:

$$S_{base} = 315.000 / 297 = 1.060,3 \text{ kg/cm}^2$$

Perbandingan dengan (Peraturan Menteri Perhubungan, 2012) sesuai dengan **Tabel 2.**

$1.060,3 \text{ kg/cm}^2 < 1.176,8 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow$  MEMENUHI SYARAT sesuai pada **Tabel 2.**

Berdasarkan seluruh hasil perhitungan dan analisis teknis beban dinamis kereta api yang bekerja berada dalam kapasitas struktur jalan rel pada lintas Tanjung Karang - Rejosari. momen lentur dan tegangan yang timbul pada rel dan rel tidak melebihi batas ijin yang ditentukan oleh PM No. 60 Tahun 2012 [1] Lampiran 1.5 dan Peraturan Dinas PT. KAI tahun 2008 pasal 4 standar jalan rel. Dengan demikian, struktur jalan rel pada lintas Tanjung Karang – Rejosari dinyatakan memenuhi syarat teknis untuk dilewati oleh kereta api dengan kecepatan hingga 70 km/jam.

Perhitungan beban vertikal pada Struktur Jalur Tanjung Karang – Rejosari.

a. Beban Dinamis Jalur Kereta Api.

Dimana:

$I_p$  = Faktor Dinamis

$V$  = Kecepatan Kereta Api (Km/Jam)

$$I_p = 1 + 0,01 ((V / 1,609) - 5) \quad (10)$$

(Sumber: Prof.Dr.Ir Danang Parikesit dan tim, halaman 159, 2021)

$$I_p = 1 + 0,01 ((70 / 1,609) - 5)$$

**$I_p = 1,38505$  dibulatkan menjadi **1,38****

**Tabel 9.** Beban Dinamis Jalur Kereta Api PT. Kereta Api Indonesia Divisi Regional IV Tanjung Karang

<b>Beban Dinamis Kereta Api Batubara Kosong</b>	<b>Beban Dinamis Kereta Api Batubara Isi</b>
Ps kosong = $61 \cdot 22 \cdot 212,8$	Ps Isi = $61 \cdot 72 \cdot 212,8$
Ps Kosong = 285.577 ton/hari	Ps Isi = 934.617,6 ton/hari
Faktor Dinamis = Beban Statis*Faktor Dinamis	Faktor Dinamis = Beban Statis*Faktor Dinamis
Ps Kosong = 285.577 ton/hari*1,38 = 394.092 ton. Berat rangkaian kosong kereta api	Isi = 934.617,6 ton/hari*1,38 = 1.289,771 ton/hari. Berat rangkaian isian kereta api

Dari hasil Tabel 9 maka didapatkan bahwa akibat pengaruh koefisien beban dinamis jalur kereta api didapatkan penambahan beban signifikan dari faktor kecepatan kereta api dan faktor permasalahan jalur kereta api dan salah satu permasalahannya disebabkan oleh *mud pumping* pada struktur jalur kereta api.

### 3.3 Beban Statis Jalur Kereta Api.

Beban statis kereta api adalah gaya vertikal yang ditimbulkan oleh berat kereta api (terutama berat gandar) saat kereta api dalam keadaan diam, sehingga tidak ada pengaruh dinamis seperti getaran, tumbukan, atau akselerasi pada kereta api". perhitungan untuk kereta api BARATARAHAH untuk pengangkutan batubara pada lintas jalur Tanjung Karang – Rejosari untuk beban statis sebagai berikut.

Dimana:

Plok (Berat Lokomotif CC 205. Karena kereta BARATARAHAH diangkut dengan 2 lokomotif CC 205 maka (berat lokomotif  $\times$  2) =  $(106,4 \times 2) = 212,8$

Jumlah Gandar = CC 205 memiliki 3 gandar maka  $(3 \times 2) = 6$  Gandar KA

2 = jumlah sisi rel kereta api

4 = Jumlah gandar pada gerbong kereta api.

26 = Frekuensi kereta api pada jalur Tanjung Karang – Rejosari.

61 = Jumlah gerbong kereta api BARATARAHAH untuk pengangkutan batubara.

$$a. \text{ Lokomotif} = \frac{\text{Plok}}{\text{Jumlah Gandar}} \quad (11)$$

$$\text{Lokomotif} = \frac{212,8}{6} = 17,73 \text{ ton/hari.}$$

Maka untuk berat statis lokomotif kereta api CC 205 17,73 Ton, pada satu beban gandar lokomotif CC 205 kereta api baratarahan untuk pengangkutan batubara, yang melintas pada jalur Tanjung Karang - Rejosari.

$$b. \text{ Gerbong Isi} = \frac{72}{4} = 9 \text{ ton} \times 61 \text{ Gerbong} = 549 \text{ ton.}$$

Maka untuk berat statis gerbong kereta api saat terisi batubara sebesar 549 Ton. Hasil didapatkan dari berat beban statis gerbong isi, dikalikan dengan jumlah gerbong kereta api baratarahan.

$$c. \text{ Gerbong Kosongan} = \frac{22}{4} = 2,75 \text{ ton/hari} \times 61 = 167,75 \text{ ton.}$$

Maka untuk berat statis gerbong kereta api saat beban kosong sebesar 167,75 Ton. Hasil didapatkan dari berat beban statis gerbong kosong, dikalikan dengan jumlah gerbong kereta api baratarahan.

### 3.4 Karakteristik dan Spesifikasi dan Perhitungan Sleeper PT. Bina Sarana Dirgantara (BSD)

Melakukan perbandingan data observasi langsung yang terjadi di lapangan dan data yang didapatkan dari perusahaan PT. Bina Sarana Dirgantara dan membandingkan dengan syarat spesifikasi Rancangan dan Standar Nasional Indonesia untuk sleeper beton 2024 dan PM 60 Tahun 2012 [1]. Dalam penelitian ini, *sleeper* yang digunakan merupakan tipe monoblok beton bertulang produksi PT. Bina Sarana Dirgantara pada jalur kereta api ukuran 1067 mm. Dalam penelitian ini menggunakan *sleeper* beton monoblok milik PT. Bina Sarana Dirgantara (BSD), dalam melaksanakan penelitian menggunakan metode kuantitatif dan observasi langsung ke lapangan.

**Tabel 10.** Data Spesifikasi observasi Pengukuran *Sleeper* BSD.  
**DATA OBSERVASI SPESIFIKASI SLEEPER JALUR 1067 mm**

Data Lapangan Lintas TNK -RJS	Data Perusahaan PT BSD.	Peraturan <i>Sleeper</i> RSNI 2024	Peraturan Menteri No 60 Tahun 2012
Panjang = 2000 mm	Panjang = 2000 mm	Panjang = 2000 mm	Panjang = 2000 mm
Tinggi = 220 mm	Tinggi = 250 mm	Tinggi = 150 – 250	Tinggi = 220 mm
L <sub>bawah</sub> = 216 mm	L <sub>bawah</sub> = 216 mm	L <sub>bawah</sub> = 200 – 300	Lebar Maksimum = 260
L <sub>atas</sub> = 140 mm	L <sub>atas</sub> = 140 mm	L <sub>atas</sub> = 150 – 200	mm
Mutu Beton = 550 kg/cm <sup>2</sup>	Mutu Beton = 550 kg/cm <sup>2</sup>	Mutu Beton = ≥ 50,00 Mpa	Mutu Beton = 500 kg/cm <sup>2</sup>
Speed = 50-70 Km/Jam (lintas Tanjung Karang-Rejosari)	Speed = 120 Km/Jam	Speed = 120 – 160 Km/Jam	Speed = 120 Km/Jam ( Kelas Jalan I)

Pada Tabel 10 menjelaskan tentang perbandingan data observasi langsung yang terjadi di lapangan dan data yang didapatkan dari perusahaan PT. Bina Sarana Dirgantara dan membandingkan dengan syarat spesifikasi Rancangan Standar Nasional Indonesia untuk sleeper beton 2024 dan PM 60 Tahun 2012. Dalam penelitian ini, *sleeper* yang digunakan merupakan tipe monoblok beton bertulang produksi PT. Bina Sarana Dirgantara pada jalur kereta api 1067 mm. Pada Tabel 10 dapat disimpulkan bahwa spesifikasi dan hasil pengamatan observasi pada *sleeper* BSD sudah memenuhi syarat dari pengukuran dan pengamatan lapangan.

**Tabel 11.** Komponen dan Spesifikasi *Sleeper* PT. Bina Sarana Dirgantara (BSD)

Komponen	Spesifikasi
Tipe	<i>Sleeper</i> Monoblok Beton Bertulang
Panjang total	2000 mm
Lebar Atas	140 mm
Lebar Bawah	216 mm
Tinggi (tebal)	250 mm
Berat	± 200 kg
Jarak antar dudukan rel	1067 mm (untuk jalur rel 1.067 mm)
Mutu beton	K-550 (f <sub>c</sub> = 41,3 MPa)
Jenis tulangan	Baja U-55
Metode produksi	Sistem Pre-Tension dengan <i>Steam Curing</i>
PC <i>Wire Low Relaxation</i>	Ø 7 mm
Ketahanan lentur beton	≥ 25 kN/m
Umur rencana pakai	± 50 tahun

Sumber: Data dari perusahaan PT. Bina Sarana Dirgantara

Pada Tabel 11 menjelaskan tentang parameter spesifikasi dan kekuatan *sleeper* merek PT. Bina Sarana Dirgantara dan komponen yang ada di dalam *sleeper*. *Sleeper* beton monoblok milik PT. Bina Sarana Dirgantara memiliki kekuatan daya tekan K-550 dan masa umur pakai ±50 tahun [13].

### 3.5 Permasalahan dan Identifikasi *Mud Pumping* dengan alat DCP/Densometer

*Mud pumping* menjadi permasalahan yang terus terjadi pada struktur jalan rel terutama pada lintas jalur Tanjung Karang - Rejosari dan akibat *mud pumping* mengakibatkan ketidakstabilan pada jalan rel seperti skilu, pertinggian dan lebar jalur kereta api yang tidak sesuai serta patahan pada *sleeper*. *Mud pumping* permasalahan pada jalur kereta api yang dipicu oleh tiga faktor utama yaitu kontaminasi *ballast* oleh partikel halus, keberadaan air berlebih, dan beban dinamis siklik (beban berulang-ulang) dari lalu lintas kereta api [14].

Berikut adalah hasil sebelum dan sesudah perawatan akibat *mud pumping* dan hasil dari penggunaan alat *dynamic cone penetrometer*/Densometer

a. Km 28+5/6 (Lintasan Lurus)

Penentuan nilai CBR, RC dan Evd akibat *mud pumping* dengan alat *dynamic cone*

*penetrometer*/Densometer dan hasil sebelum dan sesudah dilakukan perawatan pada jalur di Km 28+5/6 pada sampel di lintas Tanjung Karang – Rejosari

DCP Index = 10 mm/blow

CBR = 22,39%

RC = 57,5 Kn/m

Evd = 128 Mn/m<sup>2</sup>

**Tabel 12.** Sebelum dan Sesudah Perawatan Pada *Mud Pumping* Km 28+5/6

<i>Sleeper</i> Ke-	Parameter	Sebelum Perawatan (mm)	Sesudah Perawatan (mm)	Standar (mm)	Status Kepatuhan (Sesudah)
56	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	0	0	30 – 110	
	Skilu	0	0	Maks 2.5	
62	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	0	0	30 – 110	
	Skilu	0	0	Maks 2.5	
68	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	0	0	30 – 110	
	Skilu	0	0	Maks 2.5	
74	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	0	0	30 – 110	
	Skilu	2	0	Maks 2.5	

b. Km 14+2/3 (Lintasan Lengkung)

Penentuan nilai CBR, RC dan Evd akibat *mud pumping* dengan alat *dynamic cone penetrometer*/Densometer dan hasil sebelum dan sesudah dilakukan perawatan pada jalur di Km 25+2/3 pada sampel di lintas Tanjung Karang – Rejosari

DCP Index = 13 mm/blow

CBR = 16,03%

RC = 44,23 Kn/m

Evd = 103,9 Mn/m<sup>2</sup>

**Tabel 13.** Sebelum dan Sesudah Perawatan Pada *Mud Pumping* Km 14+2/3

<i>Sleeper</i> Ke-	Parameter	Sebelum Perawatan (mm)	Sesudah Perawatan (mm)	Standar (mm)	Status Kepatuhan (Sesudah)
93	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	63	30	30 – 110	
	Skilu	2	0	Maks 2.5	
95	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	60	30	30 – 110	
	Skilu	3	0	Maks 2.5	



<i>Sleeper</i> Ke-	Parameter	Sebelum Perawatan (mm)	Sesudah Perawatan (mm)	Standar (mm)	Status Kepatuhan (Sesudah)
96	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	60	30	30 – 110	
	Skilu	3	0	Maks 2.5	
101	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	5	0	30 – 110	
	Skilu	0	0	Maks 2.5	
104	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	70	30	30 – 110	
	Skilu	1	0	Maks 2.5	
116	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	64	30	30 – 110	
	Skilu	3	0	Maks 2.5	
117	Lebar Jalur	1067	1067	1065 – 1071	Memenuhi
	Pertinggian	64	30	30 – 110	
	Skilu	0	0	Maks 2.5	


### 3.6 Kegagalan Struktur Sleeper Beton Akibat Mud pumping

Kegagalan dan kerusakan pada *sleeper* beton akibat rongga yang terbentuk pada *ballast* yang terisi oleh menahan air hujan yang dapat memasukkan partikel halus dan air kedalam rongga. Beban berulang ulang kereta api di lintasan kereta api memompa lumpur keluar (*mud pumping*), lalu menghisap kembali material halus dan air ke dalam rongga. Lumpur ini mengotori *ballast*, menyumbat saluran drainase dan melemahkan ikatan antar *ballast*, sehingga terciptanya rongga [15].

Saat *sleeper* bertumpu di atas ballas yang berrongga, beban dinamis berulang menyebabkan partikel *ballast* bergeser dan melonggar sedikit demi sedikit yang mengakibatkan kurangnya daya dukung *ballast* terhadap *sleeper* [16]. Karena kepadatan *ballast* dan daya dukung *subgrade* yang berkurang menyebabkan penurunan pada *sleeper* di area yang mengalami rongga, sehingga *sleeper* menggantung dan *sleeper* mengalami retakan dan partikel air menyebabkan korosi pada bagian tendon/besi dalam *sleeper* yang menyebabkan patahan berikut tabel matriks resiko akibat *mud pumping*.

**Tabel 14.** Matriks Resiko dan Tindakan Pada *Sleeper*

Kategori	Ciri Utama	Tingkat Risiko & Tindakan
<b>Aman</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rongga ballast &lt; 6 mm pada salah satu sisi ballast.</li> <li>- Modulus Deformasi Dinamis Estimasi (Evd) 40 – 60.</li> <li>- Lendutan kecil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tingkat risiko patahan masih aman dan sleeper masih kuat.</li> <li>- Tindakan: pengecekan rutin karena masih mengalami retak rambut.</li> </ul>
<b>Sedang</b>		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rongga ballast salah satu sisi 6 – 12 mm.</li> <li>- Modulus Deformasi Dinamis Estimasi (Evd) 20 – 40.</li> <li>- Lendutan menengah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tindakan: pengecekan rutin, tamping, dan penguatan drainase.</li> <li>- Retakan sleeper dapat ditambah dengan semen silika beton.</li> </ul>

Kategori	Ciri Utama	Tingkat Risiko & Tindakan
<b>Bahaya</b> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rongga ballast &gt; 12 mm.</li> <li>- Modulus Deformasi Dinamis Estimasi (Evd) 15 – 26.</li> <li>- Lendutan besar, menyebabkan retak dalam pada tengah sleeper serta deformasi ballast.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tindakan: kereta api mengurangi kecepatan.</li> <li>- Pembersihan ballast total.</li> <li>- Stabilisasi sub grade atau pemasangan geotekstil woven/non woven.</li> </ul>

### 3.7 Solusi Permasalahan Mud pumping Terhadap Kerusakan Sleeper Kereta Api

#### a. Metode Pergantian *Ballast* (*Ballast Replacement Method*)

Metode pergantian *ballast* dilakukan dengan cara mengganti batu *ballast* yang sudah tercampur lumpur dengan batu *ballast* baru yang bersih. Contoh adalah metode *Skim Reconditioning* yang biasa digunakan di Australia [17]. Pada metode ini, rel dan *sleeper* harus dilepas terlebih dahulu, lalu batu *ballast* yang kotor digali dan dibuang. Setelah itu permukaan dasar diratakan kembali untuk membentuk lapisan pendukung (*capping*), lalu di isi ulang dengan batu *ballast* baru sebelum rel dan *sleeper* dipasang kembali. Langkah ini bertujuan untuk mengembalikan fungsi struktur jalan rel agar mampu menahan beban kereta api dan mengalirkan air secara baik. Dengan demikian, kestabilan dan keselamatan lintasan kereta api dapat ditingkatkan namun, metode ini membutuhkan biaya dan waktu yang cukup besar karena melibatkan pembongkaran jalur kereta api. Selain itu, jika penyebab utama seperti masalah drainase tidak diselesaikan, lumpur bisa kembali naik ke permukaan, dan masalah *mud pumping* akan muncul lagi dalam waktu dekat.

#### b. Metode Geotekstil Woven (*The method used is geotextile weaving*)

Geotekstil woven adalah bahan sintesis yang dibuat dari serat-polimer yang dirajut secara tekstil, memiliki sifat kekuatan tarik tinggi, permeabilitas baik, dan tahan terhadap bahan kimia serta lingkungan. Metode ini sangat efektif untuk mencegah *mud pumping* tanpa perlu membongkar seluruh struktur rel. Ini menjadikannya sebagai alternatif yang lebih hemat waktu dan biaya dibandingkan penggantian *ballast* secara total. Berdasarkan sejumlah penelitian yang dipublikasikan dalam jurnal [17] pemasangan geotekstil woven dapat memperpanjang masa perawatan hingga 25 kali lipat dibanding kan pergantian *ballast*. Jalur kereta api pada bagian rel akan lebih stabil, tahan lama, dan frekuensi perawatan jauh berkurang karena geotekstil woven memiliki kekuatan daya tarik yang kuat dan filtrasi/saring yang baik.

#### c. Penggunaan Alat *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dalam Penanganan *Mud pumping*

Alat ini digunakan untuk mengukur kekuatan dan kepadatan tanah dasar secara cepat dan praktis. Alat ini mencatat seberapa dalam kerucut menembus tanah setiap kali hentakan pada beban kereta api yang melintas. Hasilnya berupa indeks penetrasi (biasanya dalam mm/pukulan), yang dapat digunakan untuk memperkirakan nilai CBR (*California Bearing Ratio*) penggunaan DCP sangat membantu dalam menilai apakah tanah dasar cukup kuat untuk herakan statis dan dinamis dari menerima beban rel dan kereta api, atau perlu dilakukan perkuatan terlebih dahulu. Dengan begitu, DCP menjadi alat pendeteksi awal yang sangat penting dalam menentukan jenis tindakan yang tepat. Hasil alat DCP menunjukkan tanah dasar sangat lunak (penetrasi tinggi per pukulan), maka kemungkinan besar *mud pumping* disebabkan oleh kekuatan tanah yang rendah, dan perlu lapisan perkuatan tambahan.

## 4. KESIMPULAN

Adapun kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian diatas adalah sebagai berikut:

1. Karakteristik Mud Pumping dan Dampaknya Terhadap Jalur pada penelitian ini yaitu fenomena *mud pumping* merupakan faktor utama degradasi struktur dan instabilitas jalan rel pada lintas Tanjung Karang–Rejosari. Proses ini merusak fungsi lapisan *ballast* dengan menciptakan rongga yang memicu kondisi *hanging sleeper*. Akibatnya, terjadi penyimpangan parameter geometri

- lintasan meliputi lebar sepur (*gauge*), pertinggian (*superelevation*), dan skilu (*twist*) yang melampaui batas toleransi dalam PM No. 60 Tahun 2012 [1] dan PD No. 10 Tahun 1986 [7].
2. Pengaruh Terhadap *Sleeper* dan Stabilitas Lintasan yaitu beban dinamis tinggi (35.104,8 – 157.876,6 ton/hari) pada jalur Kelas I ini mengakibatkan kegagalan fatik berupa retak beton pada sleeper K-550 BSD. Retakan tersebut menjadi jalur infiltrasi air yang memicu korosi pada tendon prategang, sehingga menurunkan kekuatan efektif tulangan dari 2394,5 kg/cm<sup>2</sup> menjadi 1881,4 kg/cm<sup>2</sup>. Penurunan kekuatan ini secara langsung mereduksi kemampuan *sleeper* dalam menahan gaya longitudinal, lateral, dan vertikal, yang memaksa diberlakukannya pembatasan kecepatan (*speed restriction*) demi keselamatan operasional.
  3. Parameter Teknis untuk Deteksi Dini dan Pemeliharaan adalah penggunaan instrumen *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *Densometer* terbukti efektif sebagai parameter deteksi dini stabilitas jalur. Batas toleransi teknis yang ditetapkan berdasarkan hasil analisis adalah nilai RC sebesar 8–15 MPa, modulus deformasi (Evd) 26–40 MN/m<sup>2</sup>, dan nilai CBR 15–24%. Kondisi kritis yang memerlukan penanganan segera diidentifikasi apabila nilai CBR turun di bawah 3% atau ditemukan kerusakan pada lebih dari empat sleeper secara berurutan sesuai standar PM No. 31 Tahun 2011 [18] Sesuai dengan landasan Peraturan Menteri No 60 Tahun 2012 [1] yang didukung Peraturan Dinas PT.KAI no 10 Tahun 1986 [7]. Apabila kerusakan ditemukan pada lebih dari empat *sleeper* secara beruntun dengan nilai CBR < 3% serta deviasi *skilu* melebihi ambang batas, maka jalur wajib diberlakukan Semboyan 3 sebagai penghentian sementara perjalanan kereta api. Langkah ini memastikan dilakukan perbaikan darurat secara segera untuk menjaga keselamatan operasional kereta api.

Berdasarkan hasil penelitian, dirumuskan beberapa rekomendasi teknis dan implikasi kebijakan pemeliharaan sebagai berikut:

1. Penerapan Teknologi Material yaitu diperlukan pemasangan geotekstil *woven* serta penggantian material *ballast* secara menyeluruh pada titik-titik yang teridentifikasi mengalami *mud pumping* berat untuk memutus infiltrasi material halus.
2. Integrasi Instrumen Digital yaitu disarankan untuk mengintegrasikan penggunaan DCP/Densometer dalam SOP pemeriksaan rutin prasarana guna mendapatkan data kondisi tanah dasar secara kuantitatif, bukan sekadar observasi visual.
3. Manajemen Keselamatan yaitu apabila deviasi skilu melebihi 12 mm/m dan kapasitas dukung tanah di bawah ambang batas minimum, otoritas terkait harus segera memberlakukan semboyan penghentian atau pembatasan kecepatan tinggi untuk mencegah risiko *derailment*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. KAI Divre IV Tanjungkarang atas dukungan dan kerja sama yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang telah membantu kelancaran proses penelitian, baik secara teknis maupun administratif. Tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada para dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, serta motivasi selama proses penelitian berlangsung. Penghargaan yang tinggi juga diberikan kepada Institut Teknologi Sumatera (ITERA) beserta unit terkait yang telah menyediakan fasilitas dan dukungan akademik, sehingga penelitian ini dapat berjalan sesuai dengan tujuan yang diharapkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Peraturan Menteri Perhubungan. (2012). PM 60 Tahun 2012. p.8
- [2] T. T. Nguyen, B. Indraratna, R. Kelly, N. M. Phan, and F. Haryono, “MUD PUMPING UNDER RAILTRACKS : MECHANISMS , ASSESSMENTS AND SOLUTIONS,” vol. 54, no. 4, pp. 59–80, 2019.
- [3] B. Marquis and G. Robert, “Application of Nadal Limit in The Prediction of Wheel Climb

- Derailment,” pp. 1–8, 2011.
- [4] Kementerian Perhubungan, “Perdirjen Perkeretaapian Nomor KU.203/SK.298/DJKA/12/15,” 2015, *Kementerian Perhubungan, Jakarta*.
- [5] S. Kumar, “Natural Frequencies of Beams with Axial Material Gradation Resting on Two Parameter Elastic Foundation,” vol. 19, no. 6, 2022.
- [6] P. Punetha, “Dynamic Behaviour of Ballasted Railway Track with Special Reference to Transition Zones,” no. January, 2022.
- [7] PT. KAI, “Peraturan Dinas No.10 KAI 1986,” 1986.
- [8] S. F. Akbar, “Analisis Skilu pada Rel Lengkung No 14 KM 7+931-8+071 dan No 15 KM 8+137-8+253 di DIVRE IV Tanjung Karang (Studi Kasus Lintas Garuntang-Tanjung Karang),” 2024.
- [9] S. S. Rao, *Fifth Edition*.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, “Komite Teknis 45-02 RSNi2 8828-1-2019,” 2019.
- [11] Pemerintah Republik Indonesia, “Peraturan Pemerintah RI No.72 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas dan Angkutan Kereta Api,” 2009.
- [12] W. Hasyim and Y. Prakasa, “Performance of Recycled Concrete Made from Railway Sleeper : Experimental Study,” vol. 4, no. 2, pp. 104–112, 2021.
- [13] H. R. Iqbalian and M. R. Radyanto, “Perbaikan Berkelanjutan Melalui Pengendalian Kualitas Pada Produk Bantalan Rel Kereta Dengan Menerapkan Metode Quality Control Circle ( QCC ) dan Lean Six Sigma ( LSS ) Pada PT Balton Kurnia Abadi,” vol. 19, no. 2, pp. 365–372, 2022.
- [14] D. N. Little, W. W. Crockford, and V. K. R. Gaddam, “Resilient Modulus of Asphalt Concrete,” no. 2, 1992.
- [15] B. Prediction, “University of Newcastle Research Online,” vol. 31, no. 100651, 2021.
- [16] A. Yuliyanto, G. R. Prayogi, F. D. Hutabarat, M. Abi, and B. Nadi, “Evaluasi rel dan bantalan berdasarkan beban angkut lintas dan kinerja operasi kereta api ( studi kasus : jalan rel Tanjung Karang- Rejosari ),” vol. 13, pp. 26–34, 2024.
- [17] S. T. Ageng, S. Yulindasari, and K. Edi, “Metode Penanganan Mud Pumping pada Jalan Rel Wilayah UPT Resor Jalan Rel III.3 Payakabung,” *J. Ilm. Indones.*, vol. 8, no. 4, 2023.
- [18] Pemerintah Republik Indonesia, “PM No.31 Tahun 2011,” 2011.