

ANALISIS MODULUS REAKSI TANAH LAPISAN SUB BALLAST PADA PROYEK PEMBANGUNAN JALUR GANDA KA ELEVATED ANTARA SOLO BALAPAN – KADIPIRO

Misbahul Huda, Alfia Magfirona*

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Sukoharjo, Jawa Tengah

*Email: am389@ums.ac.id

Abstrak

Proyek pembangunan jalur ganda kereta api *elevated* antara Solo Balapan sampai Kadipiro merupakan bagian strategis dalam pengembangan jaringan kereta api yang bertujuan meningkatkan kapasitas dan efisiensi transportasi kereta api di wilayah Surakarta. Lapisan *sub ballast* berfungsi menyalurkan beban dari rel ke tanah dasar dan harus mampu menahan beban dinamis yang tinggi akibat frekuensi perjalanan kereta yang padat. Dengan pengujian *plate bearing* yang bertujuan mengukur modulus reaksi tanah (K) lapisan *sub ballast* secara langsung demi memastikan kestabilan jalur rel selama operasional serta meminimalkan risiko penurunan atau deformasi jalur. Hasil pengujian diperoleh nilai K sebesar 232,1 MN/m³ hingga 240,8 MN/m³, hasil tersebut melampaui spesifikasi teknis minimum sebesar 110 MN/m³, menunjukkan lapisan *sub ballast* kuat dan mendukung beban kereta api secara optimal. Proyek jalur ganda ini penting untuk meningkatkan kapasitas, efisiensi, keselamatan, dan estetika transportasi di wilayah strategis Surakarta serta memastikan ketahanan dan keberlanjutan infrastrukturnya.

Kata Kunci: Modulus reaksi tanah, sub ballast, uji *plate bearing*

Abstract

The construction project of the double-track elevated railway line from Solo Balapan to Kadipiro represents a strategic component in the development of the railway network, aimed at enhancing the capacity and efficiency of railway transportation in the Surakarta region. The sub-ballast layer functions to transfer loads from the rails to the subgrade and must withstand high dynamic loads due to the dense frequency of train operations. Plate bearing testing was conducted to directly measure the subgrade reaction modulus (K) of the sub-ballast layer, ensuring track stability during operations and minimizing the risk of settlement or track deformation. The test results yielded K values ranging from 232.1 MN/m³ to 240.8 MN/m³, surpassing the minimum technical specification of 110 MN/m³, indicating that the sub-ballast layer is robust and optimally supports railway loads. This double-track project is crucial for improving capacity, efficiency, safety, and aesthetics of transportation in the strategic Surakarta region, while ensuring the resilience and sustainability of its infrastructure.

Keywords: Subgrade reaction modulus, sub-ballast, plate bearing test

1. PENDAHULUAN

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang berfungsi untuk menghubungkan antar daerah (angkutan orang maupun barang secara massal) dan juga memiliki peran penting dalam mewujudkan, memperkuat, dan memantapkan ketahanan nasional (Kemenhub, 2025). Menyadari betapa pentingnya peran kereta api, maka dibutuhkan pembangunan dan perbaikan infrastruktur serta fasilitas utama yang menjadi kunci penentu keberhasilan sistem transportasi kereta api (Siregar, et al., 2020).

Proyek pembangunan jalur ganda kereta api *elevated* antara Solo Balapan sampai Kadipiro merupakan bagian strategis dalam pengembangan jaringan kereta api yang bertujuan meningkatkan kapasitas dan efisiensi transportasi kereta api di wilayah Surakarta. Jalur sepanjang sekitar 1,8 kilometer ini didesain untuk mengatasi kemacetan lalu lintas di Simpang Joglo serta meningkatkan keselamatan dengan menghilangkan perlintasan sebidang (Respati, et al., 2023). Selain itu, proyek ini juga mengedepankan aspek estetika dengan motif lokal sebagai ikon kota Solo yang mendukung pembangunan kota modern dan berkelanjutan. Pembangunan jalur ganda *elevated* ini sudah memasuki tahap akhir dan beroperasi sebagian sejak Oktober 2024, memberikan kontribusi signifikan pada transportasi dan ekonomi daerah sekitar (DJKA, 2025).

Salah satu aspek penting dalam pembangunan jalur kereta api *elevated* adalah modulus reaksi tanah (K) lapisan *sub ballast* yang berfungsi sebagai penyalur beban dari rel dan struktur atas ke tanah dasar (Prabawa, 2023). Lapisan *sub ballast* harus mampu menahan beban dinamis tinggi akibat frekuensi perjalanan kereta yang padat serta beban roda statis dan dinamis yang berulang (Cahyono & Rifa'i, 2019). Pengujian *Plate Bearing* dilakukan untuk mengukur kapasitas daya dukung lapisan *sub ballast* ini secara langsung, guna

memastikan kestabilan jalur rel selama operasional dan meminimalkan risiko penurunan atau deformasi jalur (Pradana, et al., 2025).

Pengujian *Plate Bearing* terhadap *sub ballast* pada proyek jalur ganda KA *elevated* menjadi tahap krusial untuk mengevaluasi performa lapisan tersebut dalam mendukung beban yang diterima. Data hasil pengujian ini bermanfaat untuk merencanakan pemeliharaan yang tepat seperti pemadatan ulang atau penambahan *ballast* agar kestabilan jalur tetap terjaga dalam jangka panjang (Havino, et al., 2024). Selain itu, hasil pengujian juga berkontribusi terhadap mitigasi risiko struktural akibat penurunan *ballast* yang dapat berdampak pada keamanan dan kenyamanan transportasi kereta api di jalur *elevated* (Narindraswari & Sianipar, 2023).

Dengan demikian, analisis daya dukung *sub ballast* melalui pengujian *plate bearing* sangat relevan pembangunan jalur ganda KA *elevated* Solo Balapan – Kadipiro. Proyek ini tidak hanya sekadar membangun jalur baru, tetapi juga memastikan ketahanan dan keberlanjutan infrastruktur dengan evaluasi mendetail pada lapisan penyangga rel, menjamin efisiensi, keselamatan, dan kenyamanan transportasi kereta api di wilayah padat penduduk dan strategis ini.

2. METODOLOGI

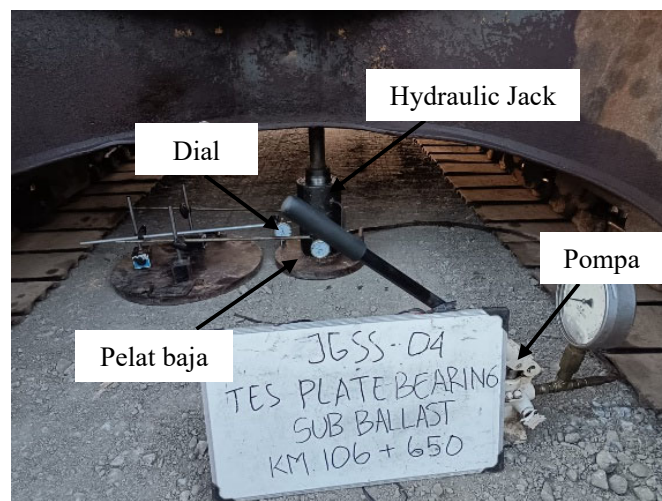
Penelitian ini menggunakan data sekunder yang telah diproses sebelumnya oleh kontraktor proyek dan kemudian digunakan oleh peneliti untuk analisis. Data yang digunakan berupa hasil uji *plate bearing* yang dilakukan oleh tim *Quality Control* dari PT. Istana Putra Agung yang berlokasi di Jl. Kalingga Tim. Utama No. 108, Kadipiro, Kec. Banjarsari, Kota Surakarta, Jawa Tengah. Data parameter tanah yang digunakan dalam analisis ini disajikan dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter Tanah yang digunakan

Parameter	Nilai
Jenis Tanah	Pasir Batu (<i>Granular</i>)
Kadar Air	8,89 %
Berat Jenis	2,78
Berat Isi Basah	2,438 gr/cm ³
Berat Isi Kering	2,239 gr/cm ³
Kepadatan Lapangan	100,61 %

(Sumber: (PT. IPA, 2025))

Pengujian *plate bearing* dilakukan menggunakan alat yang memiliki komponen utama seperti pelat baja (bulat atau persegi) yang berfungsi sebagai penerima beban dan menyalurkan beban ke tanah, *hydraulic jack* dengan pompa yang berfungsi memberikan tekanan secara hidrolik ke pelat baja, pengukur dial (*dial gauge*) yang berfungsi untuk melihat penurunan atau deformasi yang terjadi pada tanah, dan batang baja sebagai referensi beban sesuai dengan ASTM D-1196.



Gambar 1. Alat Uji *Plate Bearing* (Dokumentasi)

Prosedur pengujian dari *plate bearing* yaitu, letakkan pelat baja di area yang telah ditentukan, pasang sistem pembebanan seperti *hydraulic jack* di atas pelat baja, pasang *dial gauge* pada pelat referensi yang posisinya diam dan arahkan ujungnya menyentuh pelat baja, mencatat pembacaan awal dari ketiga *dial*, setelah itu pompa *hydraulic jack* hingga mencapai beban yang telah ditentukan (250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000, 2250, 2500 kgf), setiap tahapan beban diberikan waktu 5 menit, kemudian mencatat pembacaan *dial* tiap beban yang diberikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder, dilanjutkan dengan analisis modulus reaksi tanah (K). Terdapat tiga titik uji dimana pengujian ini dilakukan pada km. 106+600 s.d. 106+900. Data hasil uji disajikan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Plate Bearing

Beban (kgf)	km. 106+865			km. 106+750			km. 106+650		
	Pembacaan dial ($1/100$ mm)			Pembacaan dial ($1/100$ mm)			Pembacaan dial ($1/100$ mm)		
	Dial 1	Dial 2	Dial 3	Dial 1	Dial 2	Dial 3	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	805	908	895	714	753	955	750	862	909
250	790	893	880	700	739	941	736	848	895
500	773	878	863	685	724	926	721	833	878
750	758	863	853	673	712	911	706	818	862
1000	744	849	837	661	700	897	692	804	852
1250	729	834	825	648	687	881	676	788	836
1500	714	819	810	630	669	863	658	770	820
1750	694	804	800	615	654	848	643	755	805
2000	674	789	783	602	639	833	628	740	793
2250	659	774	768	587	624	818	613	725	776
2500	639	754	748	567	604	798	593	705	756

(Sumber: (PT. IPA, 2025))

Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan analisis menurut (Bowles, 1982) dengan langkah-langkah seperti berikut.

1. Tekanan Tanah (q)

Tekanan tanah merupakan hubungan antara beban yang diberikan (P) dengan luas penampang pelat yang digunakan (A). Untuk menentukan nilai tekanan tanah dapat digunakan rumus sebagai berikut.

$$q = \frac{P}{A}$$

dengan :

q = Tekanan Tanah (kgf/cm²)

P = Beban (kgf)

A = Luas Penampang (cm²)

Sehingga berdasarkan data pada Tabel 1. diperoleh nilai hasil perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 q &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{250}{\frac{1}{4} \times \pi \times 30^2} \\
 &= 0,35 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

2. Rata-rata Dial

$$\begin{aligned}
 \text{Rata - rata Dial} &= \frac{\Sigma \text{ dial}}{n \text{ dial}} \\
 &= \frac{805 + 908 + 895}{3}
 \end{aligned}$$

$$= 869,33 \text{ mm}$$

3. Rata-rata Penurunan, (s)

$$\begin{aligned} s_n &= s_{n-1} + \left(\frac{\text{Rata - rata Dial}_{n-1} - \text{Rata - rata Dial}_n}{100} \right) \\ &= 0,000 + \left(\frac{869,33 - 854,33}{100} \right) \\ &= 0,150 \text{ cm} \end{aligned}$$

4. Modulus Reaksi Tanah (K)

Modulus reaksi tanah merupakan hubungan antara tekanan tanah dengan penurunan yang terjadi, sehingga untuk menentukan nilai modulus reaksi tanah, dapat digunakan persamaan berikut.

$$K = \frac{q}{s}$$

dengan :

K = Modulus Reaksi Tanah (kg/cm³)

q = Tekanan Tanah (kgf/cm²)

s = Penurunan (cm)

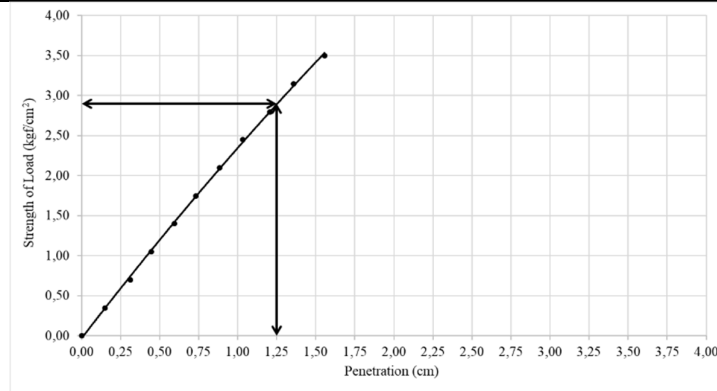
Tekanan izin yang diperoleh berdasarkan spesifikasi teknis, digunakan untuk menentukan nilai penurunan pada kondisi izin, dimana diperoleh sebesar 1,25 cm. Kemudian, nilai modulus reaksi tanah dapat ditentukan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} K &= \frac{\text{Tekanan tanah pada penurunan 1,250 cm}}{0,125} \\ &= \frac{2,901}{0,125} \\ &= 23,21 \text{ kg/cm}^3 \end{aligned}$$

Hasil analisis secara keseluruhan dari pengujian *plate bearing* disajikan pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 5 berikut.

Tabel 3. Hasil Analisis Uji *Plate Bearing* km. 106+865

Beban yang digunakan		Tekanan Beban	Waktu t	Pembacaan Dial				Rata-rata Penurunan s	Remarks
				Dial Gauge No. 1	Dial Gauge No. 2	Dial Gauge No. 3	Rata-rata Dial		
L	(kgf)	(kgf/cm ²)	(min)	No. 1	No. 2	No. 3		(cm)	K Value (kg/cm ³)
0	0	0,00	0	805	908	895	869,33	0,000	K = $\frac{2,901}{0,125}$ = 23,21
247	250	0,35	5	790	893	880	854,33	0,150	
494	500	0,70	5	773	878	863	838,00	0,313	
742	750	1,05	5	758	863	853	824,67	0,447	
989	1000	1,40	5	744	849	837	810,00	0,593	
1236	1250	1,75	5	729	834	825	796,00	0,733	
1484	1500	2,10	5	714	819	810	781,00	0,883	
1731	1750	2,45	5	694	804	800	766,00	1,033	
1978	2000	2,80	5	674	789	783	748,67	1,207	
2225	2250	3,15	5	659	774	768	733,67	1,357	
2473	2500	3,50	5	639	754	748	713,67	1,557	



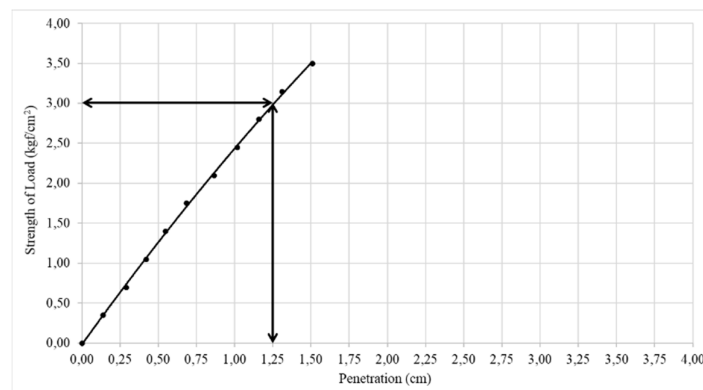
Gambar 2. Grafik Hubungan Antara *Strength of Load* dengan *Penetration* km. 106+865

Berdasarkan Tabel 3, nilai modulus reaksi tanah (K) yang diperoleh sebesar $232,1 \text{ MN/m}^3$ dari hasil analisis uji *plate bearing* pada lokasi *sub ballast* jalur kereta api telah memenuhi dan bahkan melampaui spesifikasi teknis minimum sebesar 110 MN/m^3 yang disyaratkan untuk konstruksi jalan rel kereta api. Hasil ini membuktikan bahwa lapisan *sub ballast* di area pengujian memiliki tingkat kekakuan yang tinggi serta sangat mendukung penyaluran beban-beban kereta api secara optimal terhadap tanah dasar di bawahnya.

Berdasarkan Gambar 2, menunjukkan pola bahwa semakin besar beban yang diberikan pada plat, maka penetrasi atau penurunan plat terhadap tanah juga semakin bertambah.

Tabel 4. Hasil Analisis Uji *Plate Bearing* km. 106+750

Beban yang digunakan L	Tekanan Beban	Waktu t	Pembacaan Dial				Rata-rata Penurunan s	Remarks K Value
			Dial Gauge No. 1	Dial Gauge No. 2	Dial Gauge No. 3	Rata-rata Dial		
(kgf)	(kgf/cm²)	(min)					(cm)	(kg/cm³)
0	0	0	714	753	955	807,33	0,000	
247	250	5	700	739	941	793,33	0,140	$K = 24,08$
494	500	5	685	724	926	778,33	0,290	$\text{kg/cm}^3 \rightarrow$
742	750	5	673	712	911	765,33	0,420	$240,8$
989	1000	5	661	700	897	752,67	0,547	$\text{MN/m}^3 >$
1236	1250	5	648	687	881	738,67	0,687	110 MN/m^3
1484	1500	5	630	669	863	720,67	0,867	(Spek)
1731	1750	5	615	654	848	705,67	1,017	$K = \frac{3,010}{0,125}$
1978	2000	5	602	639	833	691,33	1,160	
2225	2250	5	587	624	818	676,33	1,310	$= 24,08$
2473	2500	5	567	604	798	656,33	1,510	



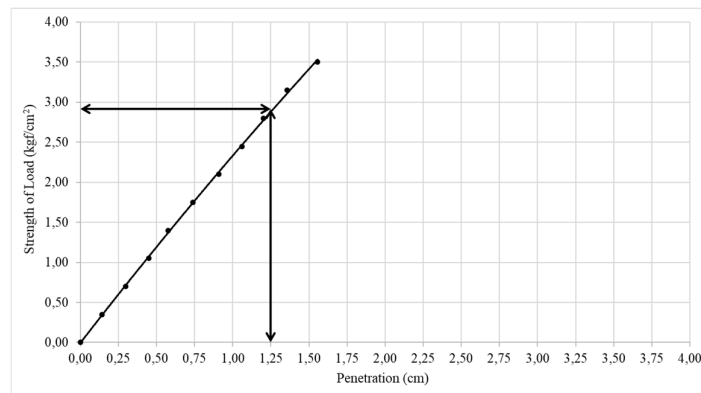
Gambar 3 Grafik Hubungan Antara *Strength of Load* dengan *Penetration* km. 106+750

Berdasarkan Tabel 4, nilai modulus reaksi tanah (K) yang diperoleh sebesar $240,8 \text{ MN/m}^3$ dari hasil analisis uji plate bearing pada lokasi sub ballast jalur kereta api telah memenuhi dan bahkan melampaui spesifikasi teknis minimum sebesar 110 MN/m^3 yang disyaratkan untuk konstruksi jalan rel kereta api. Hasil ini membuktikan bahwa lapisan *sub ballast* di area pengujian memiliki tingkat kekakuan yang tinggi serta sangat mendukung penyaluran beban-beban kereta api secara optimal terhadap tanah dasar di bawahnya.

Berdasarkan Gambar 3, menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diberikan pada plat, maka penetrasi atau penurunan plat terhadap tanah juga semakin bertambah.

Tabel 5. Hasil Analisis Uji Plate Bearing km. 106+650

Beban yang digunakan L	Tekanan Beban	Waktu t	Pembacaan Dial			Rata-rata Dial	Rata-rata Penurunan s	Remarks K Value
			Dial Gauge No. 1	Dial Gauge No. 2	Dial Gauge No. 3			
(kgf)	(kgf/cm ²)	(min)					(cm)	(kg/cm ³)
0	0	0,00	750	862	909	840,33	0,000	
247	250	0,35	736	848	895	826,33	0,140	K = 23,29 kg/cm ³ → 232,9 MN/m ³ > 110 MN/m ³ (Spek)
494	500	0,70	721	833	878	810,67	0,297	
742	750	1,05	706	818	862	795,33	0,450	
989	1000	1,40	692	804	852	782,67	0,577	
1236	1250	1,75	676	788	836	766,67	0,737	
1484	1500	2,10	658	770	820	749,33	0,910	K = $\frac{2,912}{0,125}$ = 23,29
1731	1750	2,45	643	755	805	734,33	1,060	
1978	2000	2,80	628	740	793	720,33	1,200	
2225	2250	3,15	613	725	776	704,67	1,357	
2473	2500	3,50	593	705	756	684,67	1,557	

Gambar 4 Grafik Hubungan Antara *Strength of Load* dengan *Penetration* km. 106+650

Berdasarkan Tabel 5, nilai modulus reaksi tanah (K) yang diperoleh sebesar $232,9 \text{ MN/m}^3$ dari hasil analisis uji plate bearing pada lokasi sub ballast jalur kereta api telah memenuhi dan bahkan melampaui spesifikasi teknis minimum sebesar 110 MN/m^3 yang disyaratkan untuk konstruksi jalan rel kereta api. Hasil ini membuktikan bahwa lapisan *sub ballast* di area pengujian memiliki tingkat kekakuan yang tinggi serta sangat mendukung penyaluran beban-beban kereta api secara optimal terhadap tanah dasar di bawahnya.

Berdasarkan Gambar 3, menunjukkan pola bahwa semakin besar beban yang diberikan pada plat, maka penetrasi atau penurunan plat terhadap tanah juga semakin bertambah.

Hasil uji plate bearing pada lapisan sub ballast menunjukkan variasi nilai modulus reaksi tanah (K) di tiga titik pengujian disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perbandingan Nilai Modulus Reaksi Tanah (K)

STA	Nilai K (MN/m ³)	Keterangan
106+865	232,1 > 110	Memenuhi
106+750	240,8 > 110	Memenuhi
106+650	232,9 > 110	Memenuhi

Berdasarkan Tabel 6, nilai K tertinggi sebesar 240,8 MN/m³ terdapat pada STA 106+750, sedangkan nilai terendah sebesar 232,1 MN/m³ terdapat pada STA 106+865. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa adanya variasi kualitas pemadatan pada material *sub ballast*, selain itu pada saat pengujian di lapangan terjadi lintasan kereta api pada jalur di sebelahnya dengan jarak kurang lebih 5 meter, sehingga getaran akibat lintasan kereta tersebut dapat berpotensi menyebabkan *dynamic loading* tambahan pada pelat uji dan mengganggu stabilisasi penurunan tanah di bawah pelat.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis pengujian *plate bearing* pada lapisan *sub ballast* di jalur ganda kereta api elevated Solo Balapan-Kadipiro menunjukkan nilai modulus reaksi tanah (K) pada ketiga titik uji berkisar antara 232,1 hingga 240,8 MN/m³, yang signifikan melebihi standar teknis minimum 110 MN/m³. Hal ini membuktikan bahwa lapisan *sub ballast* memiliki kekakuan tinggi dan mampu menyalurkan beban kereta api dengan optimal ke tanah dasar, sehingga memberikan kestabilan jalur selama operasional. Data juga memperlihatkan pola bahwa semakin besar beban pada pelat, penetrasi plat terhadap tanah juga meningkat. Dengan demikian, pengujian ini sangat relevan untuk mendukung pembangunan jalur ganda *elevated*, memastikan infrastruktur yang tahan lama, aman, serta nyaman bagi pengguna transportasi kereta api di kawasan padat penduduk dan strategis ini. Hasil pengujian juga memberikan acuan penting untuk perawatan dan mitigasi risiko penurunan *ballast* yang berpotensi mengganggu keselamatan operasional kereta api.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D-1196, n.d. *Standard Test Method for Nonrepetitive Static Plate Tests of Soils and Flexible Pavement Components for Use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements*, s.l.: s.n.
- Bowles, J. E., 1982. *Foundation Analysis And Design*. 3rd ed. Singapore: s.n.
- BPSDM Kementrian Perhubungan, 2023. *Laporan Pengembangan Sumber Daya Manusia Transportasi*, Jakarta: Kementrian Perhubungan .
- Cahyono, W. & Rifa'i, A., 2019. Stabilisasi Tanah Dasar Dengan Bahan Aditif Akibat Beban Siklik Jalan Rel Kereta Cepat Jakarta-Bandung. *E-Journal UMM*, Volume 17, pp. 1-11.
- DJKA, 2025. *Pekerjaan Jalur Ganda KA Solo Balapan - Kadipiro - Kalioso Terus Dikebut, Erection Girder Jadi Tahapan Krusial*, Solo: Balai Teknik Perkeretaapian Kelas I Semarang.
- Havino, A., Prativi, A., Sutra, N. & Dewi, P., 2024. Perencanaan Struktur Bawah Jembatan Kereta Api di Politeknik Perkeretaapian Indonesia Madiun. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, Volume VIII, pp. 8-13.
- Kemenhub, 2025. *Dukungan Sektor Transportasi dalam Asta Cita Kabinet Merah Putih*, Jakarta: s.n.
- Narindraswari, T. D. T. & Sianipar, K. K. H., 2023. *Laporan Kerja Praktik Proyek Pembangunan Jalur Kereta Api Elevated Antara Solo Balapan - Kadipiro km. 104+700 s.d. km. 107+000 (Tahap 1)*, Surabaya: Departemen Teknik Sipil Institut Teknologi Sepuluh November.
- Prabawa, H. I., 2023. Analisis Usia Layan Tanah Dasar Pada Struktur Jalan Kereta Api Berdasarkan Perbedaan Ketebalan Balas. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia*, Volume VII, pp. 47-53.
- Pradana, P. A. C., Purnamasari, F. & Alfiansyah, A. D., 2025. Analisis Penurunan Ballast Akibat Beban Tahunan Kereta Api (Passing Tonnage) Pada Segmen Jember-Kalisat. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, Volume 13, pp. 9-17.
- PT. IPA, 2025. *Dokumen Hasil Pengujian Plate Bearing*, s.l.: Tidak Dipublikasikan.
- PT. IPA, 2025. *Dokumen Teknis: Spesifikasi Pengujian*, s.l.: Tidak Dipublikasikan.
- Respati, S. W., Yasisara, A. R. P. P. & Ain, M. I., 2023. Double Track Railway Planning Between Solo Balapan - Adi Soemarmo International Airport. *Nusantara Civil Engineering Journal*, Volume II, pp. 129-143.

Siregar, A., Kustiani, I., Widyawati, R. & Purba, A., 2020. Analisis Pola Perjalanan Kereta Api Studi Kasus Pembangunan Jalur Ganda Gedebage-Cicalengka. *Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri*, pp. 1-9.