

Analisis Respon Statis dan Dinamis Jalur Kereta Api Kecepatan Tinggi Menggunakan Pemodelan Tiga Dimensi

M. Burhanuddin, I. Muthohar*, T. Rahman¹

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: imam.muthohar@ugm.ac.id

INTISARI

Pembangunan jalur kereta api kecepatan tinggi menghadirkan tantangan tersendiri dan seringkali trase jalur harus melewati area dengan tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah. Salah satu faktor yang harus diperhatikan adalah beban dinamis yang timbul akibat dari kecepatan kereta. Penelitian ini ditujukan untuk mengetahui beban dinamis kereta serta lendutan yang terjadi pada jalur kereta api.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pemodelan *pseudo-analysis* menggunakan Plaxis 3D. Desain jalur kereta api mengacu pada desain jalur Kereta Cepat Jakarta-Bandung dengan beban dinamis kereta CR400AF pada kecepatan 360 kph. Perhitungan beban dinamis mengacu pada beberapa literatur sedangkan data material struktur jalur KA didapatkan dari hasil uji tanah di Bandung, Jawa Barat serta beberapa literatur dan standar. Penelitian ini fokus pada lendutan yang terjadi pada tiga model jalur kereta api; jalur balas tanpa perkuatan, jalur balas yang diperkuat aspal, dan jalur balas yang diperkuat geogrid.

Model jalur tanpa perkuatan mengalami lendutan paling besar sebesar 3,45 mm, kemudian lendutan jalur yang diperkuat dengan aspal adalah 2,38 milimeter dan jalur dengan perkuatan geogrid adalah 2,25 milimeter. Kedua metode perkuatan jalur tersebut mampu menurunkan nilai lendutan sekitar 34,9%. Berdasarkan hasil pemodelan, jalur yang diperkuat geogrid memberikan peningkatan kekakuan jalur kereta api dan distribusi beban yang lebih baik, disusul dengan jalur yang diperkuat aspal, yang dibuktikan dengan pengurangan lendutan yang terjadi.

Kata kunci: Beban Dinamis, Lendutan Jalur, Pemodelan 3D, Perkuatan Aspal, Perkuatan Geogrid.

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Untuk menjamin pengoperasian yang aman, kereta api kecepatan tinggi memerlukan jalur yang lebih lurus dan infrastruktur yang lebih kuat. Para insinyur sering menghadapi tantangan jalur kereta yang harus melewati tempat-tempat dengan tanah lunak, yang bermasalah dan menyebabkan lendutan jalur kereta api yang signifikan karena daya dukungnya yang rendah (TRB, 1985). Tegangan dan deformasi tanah dasar dapat dipengaruhi secara signifikan oleh beban dan kecepatan kereta api. Peningkatan kecepatan kereta menyebabkan peningkatan besarnya tegangan dan deformasi, Menurut (Dong et al., 2018), pada jalur yang dibangun di atas tanah lunak dan/atau kecepatan kereta api melebihi sekitar 50% kecepatan rambat gelombang *Rayleigh*, maka terjadi lendutan rel yang lebih tinggi.

Untuk mengatasi masalah ini, beberapa ahli dan peneliti telah merumuskan berbagai langkah, termasuk penggunaan struktur jalur kereta dengan kekakuan yang bervariasi, geogrid, serta teknik perbaikan tanah (Roshan et al., 2022). Namun menurut (Selig et al., 1994), salah satu penyebab utama kerusakan geometri jalur kereta api adalah kerusakan balas akibat beban dari gerakan kereta api. (Suiker et al., 2005) menemukan bahwa penurunan jalur kereta api juga disebabkan oleh penyebaran lateral partikel balas.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis beban dinamis kereta CR400AF yang bekerja pada jalur kereta cepat Indonesia.
2. Melakukan analisis elemen hingga tiga dimensi menggunakan PLAXIS3D untuk mengetahui lendutan jalur kereta cepat Indonesia.
3. Mengevaluasi pengaruh perkuatan aspal, dan perkuatan geogrid terhadap lendutan serta respon dinamis jalur kereta cepat saat dikenai beban dinamis kereta CR400AF.

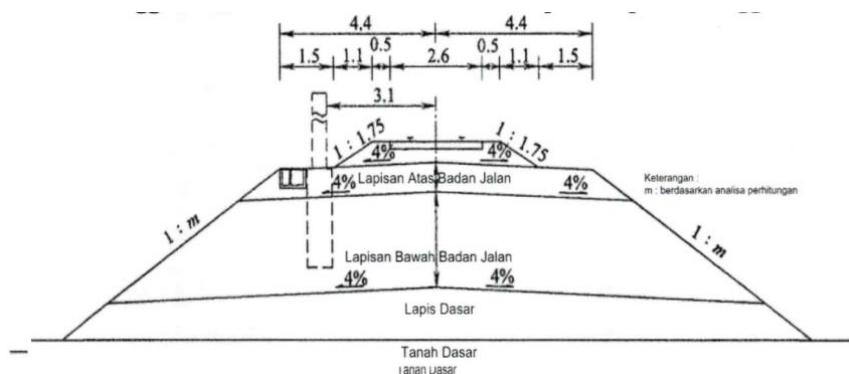
2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian diawali dengan pengamatan permasalahan pada jalur kereta api kecepatan tinggi yang terkait beban dan kecepatan kereta. Perhitungan beban dinamis kereta mengacu pada data kereta CR400AF yang digunakan pada kereta cepat Jakarta-Bandung. Pemodelan struktur jalur kereta api mengacu pada desain jalur lurus pada timbunan sesuai Peraturan Menteri Perhubungan RI nomor PM 7 tahun 2022. Data tanah yang digunakan merujuk pada data hasil uji sondir tanah di KM 161+300 pada proyek pembangunan jalur ganda Bandung-Cicalengka dan dilakukan interpretasi hasil uji CPT untuk mendapatkan kategorisasi tipe perilaku tanah (*Soil Behaviour Type/SBT*) (Robertson. PK, 2016). Data material lain seperti balas, subbalas, perilaku balas yang diperkuat aspal dan balas yang diperkuat geogrid merujuk pada SNI serta penelitian-penelitian terdahulu.

2.2 Struktur dan Material Penyusun Jalur Kereta Api

Gambar 1 menunjukkan desain jalur kereta api kecepatan tinggi pada timbunan. Detail parameter tanah dasar pada lokasi studi ditunjukkan pada tabel 1.



Gambar 1. Penampang jalur tunggal dengan timbunan untuk kereta api kecepatan tinggi (KEMENHUB,2022).

Tabel 1. Parameter tanah dasar (Yashilla Eka Karya, 2022).

Kedalaman m	Tanah Lapisan	γ_d kN/m^3	γ_{sat} kN/m^3	E kN/m^3	ν	C' kN/m^2	ϕ ($^\circ$)
0 – 2.2	Lempung lanauan	12.11	16.9	1.38×10^4	0,35	20	30
2.2 – 7.5	Lempung, sedang	15.2	17	1.24×10^4	0,30	34	20
7.5 – 10	Lempung	15.28	19.03	2.5×10^4	0,35	20	30
10 -12	Lempung pasiran	14	18	2×10^4	0,30	20	30

Sifat-sifat grup A dan grup B material timbunan sebagaimana disebutkan pada PM 7 tahun 2022, mengacu (OSHA, 2009) sifat standar material timbunan grup A dan grup B sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Parameter material timbunan mengacu (OSHA, 2009).

Jenis tanah	γ_d kN/m^3	γ_{sat} kN/m^3	E kN/m^2	ν	c' (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)
Material timbunan grup A	22	23	200000	0,2	30.1	41
Material timbunan grup B	15.9	17	10.000	0,2	20	30

Spesifikasi rel yang digunakan adalah rel tipe UIC 60 (TB/T 3276-2011) dan bantalan dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Parameter rel dan bantalan

Parameter	Nilai	
	Rel	Bantalan
Berat rel per satuan panjang	60kg/m	360kg
Modulus elastisitas (E)	$210kN/mm^2$	25.500MPa
Modulus young		$2,6 \times 10^7 kN/m^2$

Tabel 4 dan tabel 5 menjelaskan parameter balas, subbalas, balas dengan perkuatan aspal serta balas dengan perkuatan geogrid.

Tabel 4. Parameter Material balas, subbalas dan balas dengan perkuatan aspal (Setiawan, 2021).

Material	Model	Perilaku	Parameter					
			γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E' (kN/m ²)	ν	c' (kN/m ²)	ϕ (°)
Balas	MC	D	19	19	2×10^5	0.2	5	40
Subalast	MC	D	22	23	1.5×10^5	0.3	10	40
ARB	LE		23.5	23.5	2.29×10^5	0.35		

MC, model *Mohr-Coloumb*. D, *drained*. LE, model *Linear Elastic*

Tabel 5. Parameter material balas dengan perkuatan aspal (Setiawan et al., 2019)

Material	Model	γ_{unsat} (kN/m ³)	Parameter						
			E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	P_{ref} (kN/m ²)	ν_{ur}	c' (kN/m ²)	ϕ (°)
GRB	HS	15.3	150	150	450	100	0.2	5	50

HS, model *hardening soil*

2.3 Pembebanan statis dan dinamis

Seperti telah dijelaskan di atas, spesifikasi teknis kereta CR400AF memiliki beban gandar 17 t, dan diameter roda 920 mm dengan kecepatan desain maksimum 360 km/jam (JKT-BDG HSR, 2016). Sebagai input pemodelan beban statis digunakan beban titik 83.3 kN (setengah beban gandar) yang bekerja pada tiap rel. Sedangkan pembebanan dinamis dihitung berdasarkan persamaan (Li, Dingqing et al., 2016) sebagai berikut :

$$P_d = \phi \cdot P_s \tag{1}$$

dimana P_d adalah beban dinamis, ϕ adalah faktor amplifikasi dinamis (>1) yang didapatkan dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan, dan P_s adalah beban statis.

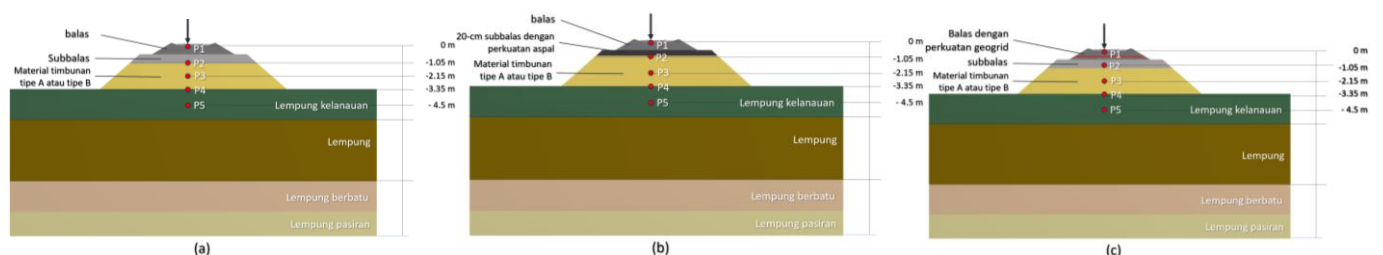
Beban dinamis dimodelkan menggunakan *moving load*. Plaxis 3D menggunakan simulasi domain waktu, sehingga apabila kereta bergerak terlalu cepat, maka akan sulit untuk mengamati area tertentu pada jalur. Karena keterbatasan ini, kecepatan beban dinamis ditetapkan sebesar 20 m/detik dengan beban dinamis yang dihitung pada kecepatan 360 km/jam. Input pembebanan dinamis pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel.6.

Tabel 6. Parameter material balas dengan perkuatan aspal (Setiawan et al., 2019)

Panjang (m)	Kecepatan (m/s)	Frekuensi. (Hz)	Beban Bergerak (kN)	Jarak roda (m)	Jarak bogie (m)
27.2	20	40	126.43	2.5	15.3

2.4 Titik pengamatan

Pengamatan respon jalur kereta apiterhadap pembebanan statis dan dinamis berupa Lendutan jalur kereta serta distribusi tegangan dilakukan melalui beberapa titik pengamatan sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Titik pengamatan pada tiap lapisan struktur rel kereta api (a) jalur balas tanpa perkuatan (b) jalur balas dengan perkuatan aspal (c) jalur balas dengan perkuatan geogrid

Kedalaman yang diamati adalah titik-titik di bawah bantalan, di bawah subbalas, di atas timbunan, di permukaan tanah dan titik 1 m di bawah permukaan tanah. Selain itu dilakukan pengamatan lendutan rel pada lima bantalan di sekitar titik pembebanan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perhitungan Beban Dinamis

Kecepatan maksimum desain kereta CR400AF adalah 360 km/jam. Dalam studi ini, perhitungan beban dinamis hanya akan mempertimbangkan pengaruh kecepatan dan beban kereta api. Beban dinamis kereta api dapat dihitung menggunakan rumus (Li, Dingqing et al., 2016) dengan perhitungan faktor amplifikasi dinamis merujuk pada berbagai literatur sebagaimana terlihat pada tabel 7.

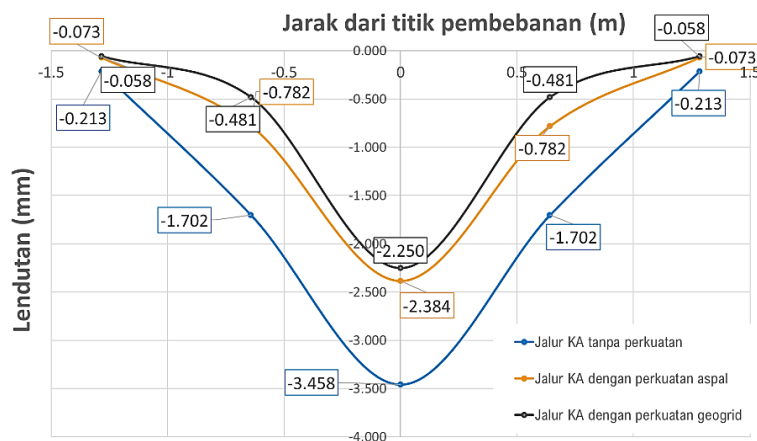
Tabel 7. Hasil perhitungan faktor amplifikasi dinamis dan beban dinamis.

Sumber	Persamaan ϕ	DAF (ϕ)	Beban dinamis (kN)
Talbot	$1 + \frac{33V}{100D}$	1.32	109.73
South African Railways	$1 + 0.312 \frac{V}{D}$	1.30	108.29
Sadeghi	$1.098 + 0.00129V + 2.59(10^{-6})V^2$	1.52	126.43
AREMA	$1 + \frac{0.0052V}{D}$	1.00	83.80
China Railways	$1 + \alpha V$, with $\alpha = 0.3$	1.30	108.40

3.2 Pembebanan Statis

3.2.1 Lendutan jalur kereta api

Gambar 3. membandingkan lendutan ketiga model jalur kereta api saat dibebani beban statis sebesar 83,3 kN . Model jalur tanpa perkuatan mengalami lendutan paling besar sebesar 3,45 mm, kemudian jalur dengan perkuatan aspal sebesar 2,38 mm dan jalur dengan perkuatan geogrid sebesar 2,25 mm. Kedua metode perkuatan jalur tersebut mampu menurunkan nilai lendutan sekitar 34,9%.

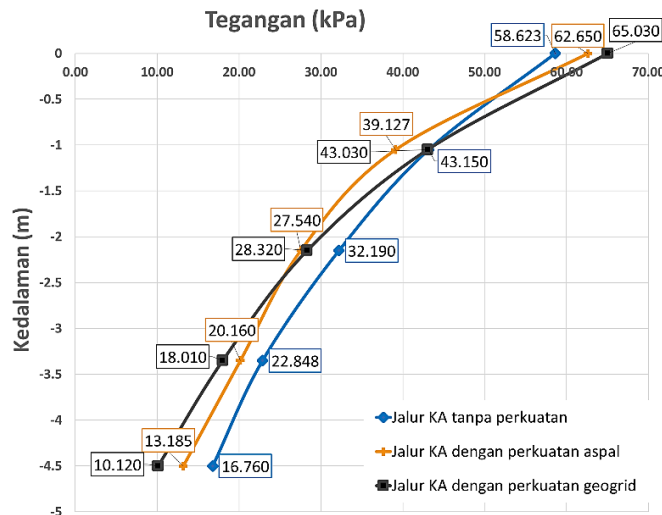


Gambar 3. Lendutan rel disebabkan oleh beban gandar statis sebesar 83,3 kN pada tiga model struktur rel

Daya dukung jalur kereta sebanding dengan nilai kekakuannya. Menurut (Li, L. et al., 2021) struktur yang menunjukkan lendutan paling kecil ketika dikenai beban memiliki kekakuan yang paling besar. Gambar.3 juga memperlihatkan bahwa model jalur kereta tanpa perkuatan mempunyai profil cekungan lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan kedua model jalur kereta apidengan perkuatan. Akibat kekakuan jalur kereta yang rendah, rel akan mudah mengalami lendutan dan beban roda didistribusikan ke area yang lebih luas. Hal ini berarti jumlah bantalan yang menumpu beban lebih banyak, sehingga menghasilkan cekungan lendutan yang besar. Setelah struktur diperkuat, lendutan berkurang dan beban roda didistribusikan pada area yang lebih sempit, yang dibuktikan dengan kurva yang lebih curam.

3.2.2 Distribusi tegangan pada elemen jalur kereta api

Gambar 4. menunjukkan distribusi beban pada ketiga struktur jalur kereta. Gaya kontak roda-rel paling kecil terdapat pada model jalur tanpa perkuatan dan paling besar pada model jalur yang diperkuat geogrid. Ketika rel dengan kekakuan rendah dibebani maka terjadi Lendutan yang tinggi seperti terlihat pada Gambar.3. Hal ini menghasilkan sebaran beban yang lebih baik pada bantalan, sehingga area yang terkena beban lebih besar, sehingga tegangan kontak roda-rel berkurang (Powrie, et al., 2016).

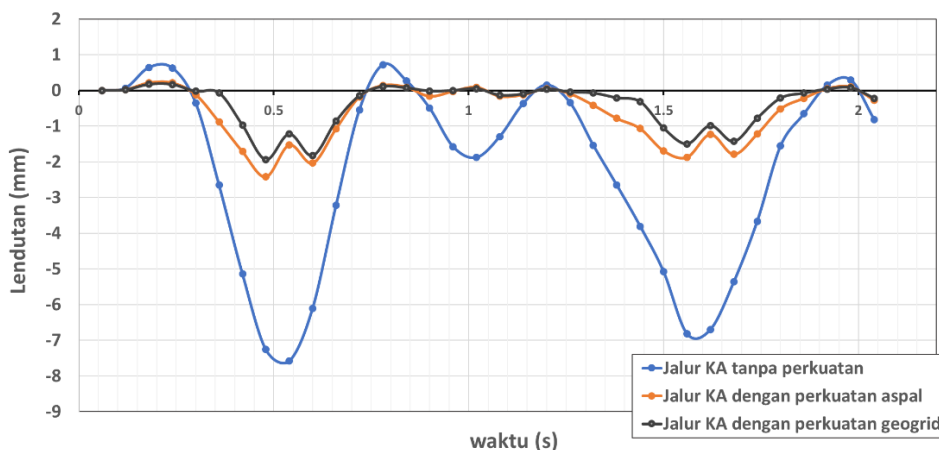


Gambar 4. Perbandingan distribusi tegangan pada ketiga model jalur kereta

Namun demikian, gambar 4 menunjukkan nilai tegangan pada tanah dasar kedua model jalur yang diperkuat lebih kecil dibandingkan jalur tanpa perkuatan. Menurut (Rimoldi et al., 2022), balas yang diperkuat dapat mengurangi tegangan tanah dasar melalui distribusi beban yang lebih baik. balas yang diperkuat meningkatkan *interlocking* dan adhesi partikel balas, sehingga meningkatkan distribusi beban. Partikel balas yang saling terkait juga beban lalu lintas kereta api melintasi tanah dasar secara lebih merata, sehingga mengurangi konsentrasi tegangan lokal (Selig, Ernest Theodore et al., 1982).

3.3 Pembebanan Dinamis

Gambar.5. membandingkan respon jalur kereta apidinamis dari ketiga model lintasan. Berdasarkan grafik terlihat lendutan terbesar terjadi tepat di bawah roda, dan lendutan semakin berkurang ketika roda telah melewati titik pengamatan. Lendutan akibat beban dinamis pada jalur kereta apitanpa perkuatan lebih besar dibandingkan dengan lendutan pada kedua jalur kereta apidengan perkuatan. Pada model jalur dengan modulus yang lebih tinggi (jalur kereta dengan perkuatan), lendutan yang terjadi dapat menggambarkan setiap roda, dan rel kembali hampir ke titik awal ketika roda meninggalkan titik pengamatan. Namun, pada jalur kereta apidengan modulus yang lebih rendah (jalur kereta tanpa perkuatan), rasio relatif gerak puncak-ke-lembah yang terkait dengan jalur kereta apibogie dan gandar berubah sehingga posisi roda tidak dapat teramati.



Gambar 5. Perbandingan profil respon dinamis ketiga model jalur kereta.

4 KESIMPULAN

Sebagaimana dinyatakan dalam berbagai publikasi, gaya dinamis yang dihasilkan oleh kereta api yang bergerak dipengaruhi oleh beban kereta api, kecepatan, kondisi sarana, geometri, dan kondisi jalur kereta. Dalam analisis ini, pengaruh kondisi kendaraan dan jalur kereta tidak diperhitungkan, dengan asumsi bahwa kereta baru dioperasikan pada jalur kereta api lurus yang baru selesai dibangun. Perhitungan beban dinamis pada kecepatan maksimum 360 km/jam terbesar didapatkan melalui persamaan Sadeghi sebesar 126,43 kN. Selanjutnya dilakukan pemodelan jalur kereta api elemen hingga 3D dengan model jalur kereta api sepanjang 70 meter dengan lebar 20 meter, ketinggian timbunan 3 meter, dan kedalaman 15,3 meter untuk mengamati respon statis dan dinamis jalur tanpa perkuatan, jalur balas dengan perkuatan aspal, dan jalur balas yang diperkuat geogrid. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model jalur tanpa perkuatan mengalami lendutan paling besar sebesar 3,45 mm, kemudian lendutan jalur yang diperkuat dengan aspal adalah 2,38 milimeter dan jalur dengan perkuatan geogrid adalah 2,25 milimeter. Kedua metode perkuatan jalur tersebut mampu menurunkan nilai lendutan sekitar 34,9%. Balas yang diperkuat geogrid meningkatkan interlocking dan adhesi partikel balas, sehingga meningkatkan distribusi beban. Studi tentang respons dinamis jalur kereta api menunjukkan bahwa dengan meningkatnya kekakuan lintasan, profil respon dinamis jalur memiliki fleksibilitas yang lebih baik dan rel cepat kembali ke posisi awal hal ini akan meningkatkan kenyamanan pengendaraan (*train ride index*).

REFERENSI

- Dong, K., Connolly, DP, Laghrouche, O., Woodward, PK and Alves Costa, P. (2018). "The stiffening of soft soils on railway lines." *Transportation Geotechnics*. 17, 178-191.
- Esen, A.F., Woodward, P.K., Laghrouche, O. and Connolly, D.P. (2022). "Stress distribution in reinforced railway structures." *Transportation Geotechnics*. 32, 699.
- Fischer, S. (2022). "Geogrid reinforcement of balasted railway superstructure for stabilization of the railway track geometry – A case study." *Geotextiles and Geomembranes*. 50(5), 1036-1051.
- Indraratna, B., Ngo, N.T. and Rujikiatkamjorn, C. (2011). "Behavior of geogrid-reinforced balast under various levels of fouling." *Geotextiles and Geomembranes*. 29(3), 313-322.
- JKT-BDG High Speed Rail. (2016). "*Detailed Engineering Design, Volume IV-Track*." Unpublished.
- PT Yashila Eka Karya, (2022). "Laporan Akhir Sondir Tanah Pembangunan Jalur Ganda KA Km 160+500 - Km 162+000 Antara Kiaracandong - Cicalengka Tahap II Segmen Kiaracandong - Gedebage dan Segmen Haurpugur - Cicalengka." *PT Yashilla Eka Karya*, Bandung, Indonesia.
- Rimoldi, P., Pezzano, P. and Trovato, F. (2022). "Design Method for Geogrid Stabilisation of Railway Ballast and Subballast." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*: IOP Publishing, 012026.
- Robertson, P.K. (2009). "Interpretation of cone penetration tests - a unified approach." *Canadian geotechnical journal*. 46(11), 1337-1355.
- Robertson, P.K. (2016). "Cone penetration test (CPT) - based soil behaviour type (SBT) classification system - an update." *Canadian Geotechnical Journal*. 53(12), 1910-1927.
- Powrie, W., and Pen, L.L. (2016). "*A Guide to Track Stiffness*." University of Southampton., University Road, Southampton, United Kingdom.
- Setiawan, D.M. (2022). "Stress-strain characteristics and service life of conventional and asphaltic underlayment track under heavy load Babarajang trains traffic." *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 31(1), 22-36.
- Setiawan, D.M. and Budiyanoro, C. (2019). "The Role of Scrap Rubber, Asphalt and Manual Compaction against the Quality of Balas Layer." *Jordan Journal of Civil Engineering*, . Volume 13, No. 4..
- TRB, (1985). "*Rail Passenger Service, Electrification, and Training*." Transportation Research Record., Washington D.C, United States of America.
- Van Dyk, B.J., Edwards, J.R., Dersch, M.S., Ruppert, C.J. and Barkan, C.P. (2017). "Evaluation of dynamic and impact wheel load factors and their application in design processes." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 231(1), 33-43.
- Woodward, P.K., Kennedy, J., Laghrouche, O., Connolly, D.P. and Medero, G. (2014). "Study of railway track stiffness modification by polyurethane reinforcement of the balast." *Transportation Geotechnics*. 1(4), 214-224.