

Analisis Penguatan Poliuretan Pada Jalur Kereta Api Di Zona Transisi Menggunakan Metode Slicing

W. Aris Munandar^{1*}, Latif Budi Suparma¹, Suryo Hapsoro Tri Utomo²

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

*Corresponding author: wahanaarismunandar@mail.ugm.ac.id

INTISARI

Pemeliharaan jalur kereta api, terutama di zona transisi dan jaringan berkecepatan tinggi, penting untuk keamanan dan efisiensi. Penelitian ini fokus pada penerapan poliuretan pada lapisan balas untuk memperkuat struktur, dengan tujuan mengukur penurunan jalur dan membandingkan peningkatan antara jalur yang diperkuat dan tidak. Pemeriksaan keamanan berkala diperlukan untuk menangani penurunan dan memastikan transisi yang lancar antara tanggul dan penopang.

Penelitian ini menggunakan analisis numerik semu untuk mengevaluasi penurunan jalur kereta api dengan atau tanpa penguatan poliuretan. Metodologi melibatkan penggunaan data sifat tanah dari literatur, dengan penerapan metode Li-Selig untuk mengukur penurunan. Metode *slicing* digunakan untuk menggabungkan lapisan tanah dalam struktur tanah dasar di zona transisi, dengan pembagian zona menjadi lima area yang dihitung.

Zona transisi pada jalur kereta terdiri dari balas, sub-balas, dan subgrade. Penguatan balas dengan poliuretan dan subgrade dengan UGM dan CBM meningkatkan ketahanan struktur. Penurunan jalur mencapai maksimum 52.782 mm, dengan rata-rata 36.879 mm setelah penguatan, menunjukkan peningkatan yang signifikan. Kedalaman penguatan poliuretan pada balas memengaruhi besarnya penurunan. Penelitian merekomendasikan pertimbangan faktor cuaca, curah hujan, dan banjir, serta eksplorasi penggabungan poliuretan, geogrid, dan geotekstil.

Kata kunci: Perkuatan Poliuretan, Zona Transisi, Kereta Api Berkecepatan Tinggi, Metode *Slicing*.

1 Pendahuluan

Proyeksi peningkatan aktivitas kereta penumpang menekankan perlunya investasi infrastruktur tambahan, keunggulan kompetitif, dan inovasi teknologi (IEA, 2019). Untuk mendukung transportasi kereta penumpang dengan volume tinggi, jalur kereta api perlu dirancang dan dipelihara sesuai dengan persyaratan tertentu, terutama di zona transisi dan jaringan kereta api berkecepatan tinggi (Sañudo, R. et al., 2022). Gaya vertikal dan lateral yang tinggi di zona transisi menyebabkan gaya restorasi tinggi dan deformasi vertikal yang signifikan (Kennedy et al., 2013). Kondisi ideal di zona transisi adalah transisi tegangan vertikal yang halus dari penopang hingga permukaan tanah (Wang et al., 2018).

Menurut Varandas et al. (2014), beban kerja pemeliharaan tiga hingga delapan kali lebih tinggi daripada jalur standar. Kondisi ini disebabkan oleh kerusakan fisik pada komponen jalur seperti deformasi jalur, deformasi permanen rel, per pada suspensi, dan retak atau patah pada pelat atau balok beton (Woodward et al., 2012 dan Li et al., 2010). Biaya pemeliharaan di zona transisi di Amerika Serikat diperkirakan mencapai USD 200 juta, sementara biaya di Eropa diperkirakan mencapai €85 juta (Sañudo, R. et al., 2016).

Ada beberapa pendekatan untuk meningkatkan kinerja jalur di zona transisi. Penggunaan poliuretan memiliki keuntungan signifikan dalam penguatan pemeliharaan tanah. Penerapan penguatan poliuretan di zona transisi balas rel telah terbukti meningkatkan daya tahan, stabilitas, dan kinerja keseluruhan jalur di area yang rentan (Kennedy et al., 2013). Menurut (Kennedy, 2011), *polyurethane-reinforced balas track* (PRBT) dapat meningkatkan integritas struktural jalur balas dan memenuhi persyaratan stabilitas tinggi dari jalur kereta api berkecepatan tinggi. Studi ini menganalisis evolusi hukum kualitas struktural PRBT setelah diluncurkan ke layanan kereta api, dan memberikan referensi untuk optimasi struktural dan operasi pemeliharaan. Menggabungkan bahan poliuretan dengan penguatan substruktur di bawah penopang, yang juga berfungsi sebagai struktur penyangga lateral, meningkatkan kekakuan struktur terhadap gaya lateral yang dihasilkan oleh kereta yang melintas.

2 Metodologi

Penelitian ini menggunakan Analisis Numerik Pseudo dan menggunakan metode *slicing* yang membagi struktur jalan kereta dalam zona transisi kedalam beberapa bagian/*section*. Analisa ini bertujuan untuk menganalisis efek penguatan zona transisi menggunakan poliuretan terhadap tingkat penurunan yang dialami pada jalur balas. Karena kelengkapan data terbatas dalam penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan data dari berbagai sumber, termasuk penelitian oleh Woodward et al. (2014, 2012) untuk properti superstruktur, Kennedy et al. (2013) untuk properti poliuretan yang selanjutnya disebut dengan XiTrack dan Cai et al. (2020) untuk properti dasar tanah di zona transisi. Studi ini melakukan perhitungan analitis untuk menentukan nilai penurunan untuk setiap komponen jalur, kemudian menentukan nilai penurunan gabungan untuk semua komponen (total penurunan) dengan menggunakan rumus (1). Analisis ini memberikan wawasan tentang efektivitas penguatan poliuretan dalam mengurangi penurunan pada jalur balas, yang dapat meningkatkan kinerja dan daya tahan jalur kereta api di zona transisi.

$$\epsilon_N = \epsilon_1 N^b \tag{1}$$

ϵ_N adalah regangan plastis setelah N siklus pembebanan, ϵ_1 adalah regangan plastis pada siklus pembebanan pertama, b merupakan nilai konstanta.

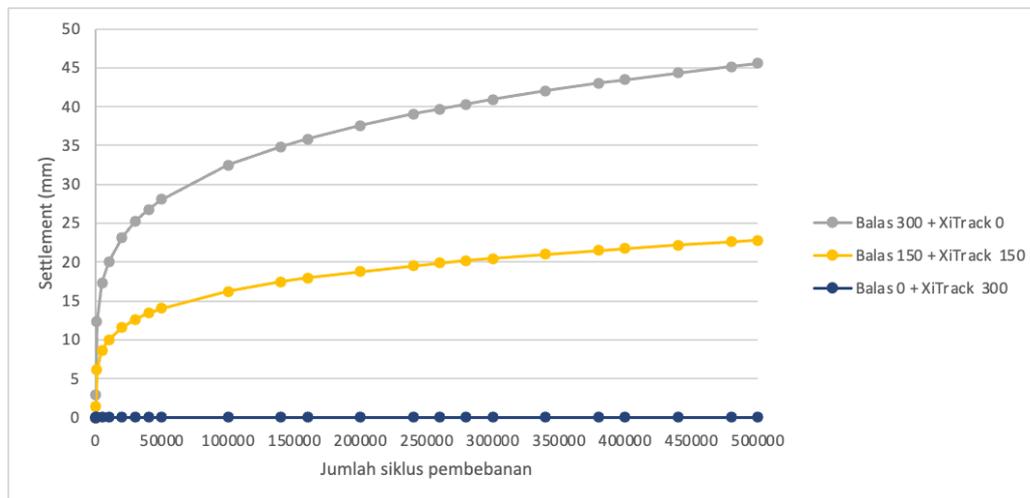
3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Balas Tanpa Perkuatan

Dari data properti balas yang diperoleh, perhitungan dilakukan untuk menemukan regangan plastis setelah 0-500.000 siklus berdasarkan rumus (2) dari Kennedy, J. et al. (2013):

$$\epsilon_N(\%) = 0,96 \times N^{0,21} \tag{2}$$

ϵ_N adalah regangan plastis setelah N siklus pembebanan, N merupakan jumlah siklus pembebanan. Data yang dihitung disajikan dalam diagram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.,



Gambar 1. Deformasi permanen dari pemindahan berat dengan dan tanpa lapisan balas yang diperkuat

Gambar 1 mendeskripsikan penurunan permanen balas pada berbagai kedalaman penguatan mulai dari tanpa penguatan, setengah penguatan, hingga lapisan balas yang sepenuhnya diperkuat dan diberikan beban hingga 500.000 siklus. Selama 100.000 siklus pertama, tingkat penurunan keseluruhan meningkat drastis hingga hampir 10% dari kedalaman total, kemudian secara bertahap meningkatkan jumlah penurunan hingga akhir siklus beban (500.000 siklus). Penurunan tertinggi dialami oleh tipe balas 300 mm, dengan nilai penurunan maksimum mencapai lebih dari 45 mm. Namun, jumlah penurunan yang terjadi ketika seluruh lapisan balas (300 mm) diterapkan hampir nol. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa semua balas pada setiap ketebalan memiliki penurunan yang tinggi dan terus meningkat secara konstan.

3.2 Hasil Perhitungan Subbalas

Ini menentukan penurunan permanen subbalas menggunakan perhitungan yang tidak memerlukan parameter dari penelitian sebelumnya.

$$\epsilon_N(\%) = 1,7 \times 10^{-7} N \tag{2}$$

ϵ_N adalah regangan plastis setelah N siklus pembebanan, dengan N sebagai jumlah siklus beban hingga 500.000 dan kedalaman subbalas sebesar 100 mm. Hasilnya terlihat pada Gambar 2.

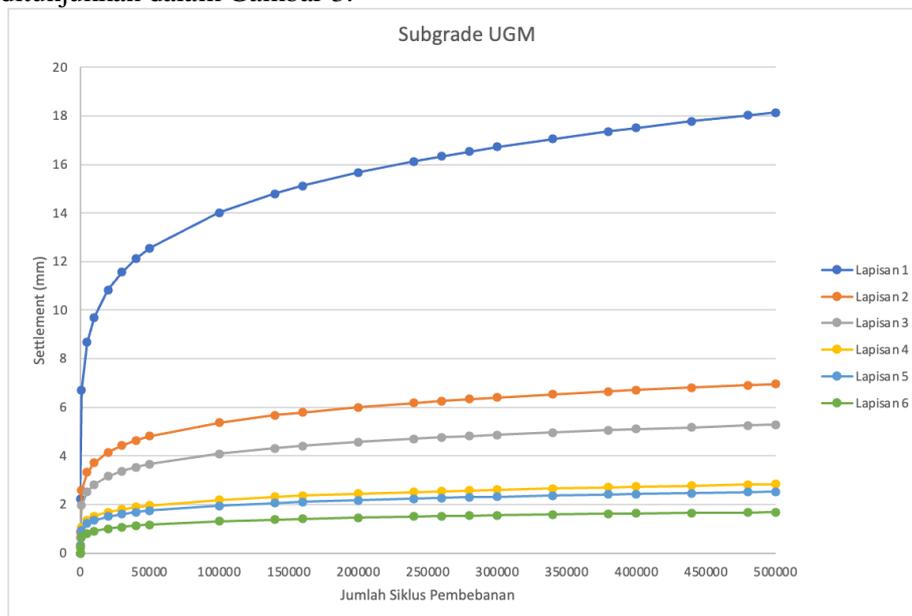


Gambar 2. Penurunan permanen subbalas dibandingkan dengan penguatan balas.

Gambar 2 mengilustrasikan penurunan permanen subbalas terhadap jumlah siklus beban. Penurunan subbalas meningkat dengan cepat, melampaui penurunan balas setelah 200.000 siklus beban, dan mencapai puncak lebih dari 0,08 mm. Meskipun nilai penurunan telah meningkat, hasilnya masih di bawah 1 milimeter, yang berarti masih baik.

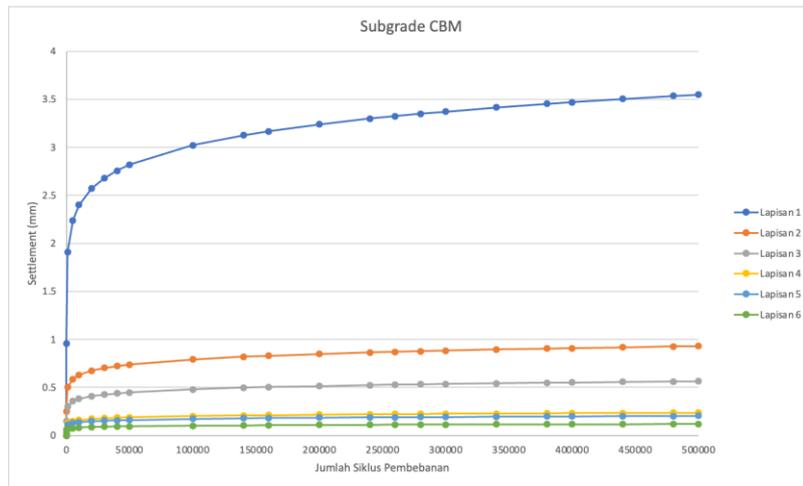
3.3 Hasil Analisa Pada Lapisan Tanah Dasar (Subgrade).

Penurunan lapangan bawah dihitung menggunakan metode Li-Selig (Kennedy, 2011). Subgrade dibagi menjadi dua material, yaitu UGM (*Unbound granular material*) dan CBM (*Cement bound granular material*). Material ini memiliki parameter yang berbeda, sehingga harus dihitung secara terpisah untuk menentukan nilai regangan plastis. Hasil perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Regangan plastis dari material UGM pada lapisan dasar

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara jumlah siklus beban dan regangan plastis pada material tanah UGM. Dari lapisan 1 hingga lapisan 6 dalam struktur dasar, terdapat peningkatan bertahap dalam jumlah penurunan. Lapisan 1 memiliki nilai penurunan tertinggi dibandingkan dengan lapisan lainnya, dengan peningkatan dramatis setelah 100.000 siklus beban. Selanjutnya, penurunannya bertambah secara bertahap hingga mencapai lebih dari 18 mm pada 500.000 siklus. Lapisan 2 hingga 6 mengalami penurunan masing-masing antara 7 dan 1 mm. Langkah selanjutnya adalah menentukan material lain dalam subgrade, yaitu CBM, dengan rumus perhitungan yang sama tetapi propertinya berbeda (Cai et al., 2020). Hasilnya ditunjukkan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Penurunan permanen dari material CBM di subgrade

Tren hasil penyelesaian material CBM mirip dengan UGM, dengan hanya satu lapisan yang meningkat secara signifikan pada lapisan teratas, kemudian mencapai plateau hampir 3 mm setelah setengah juta siklus beban. Dibandingkan dengan penurunan di lapisan dua hingga enam, yang mencapai kurang dari 1 mm pada akhir siklus beban sebanyak 500.000. Hasil ini menunjukkan bahwa material CBM memiliki penurunan yang lebih rendah.

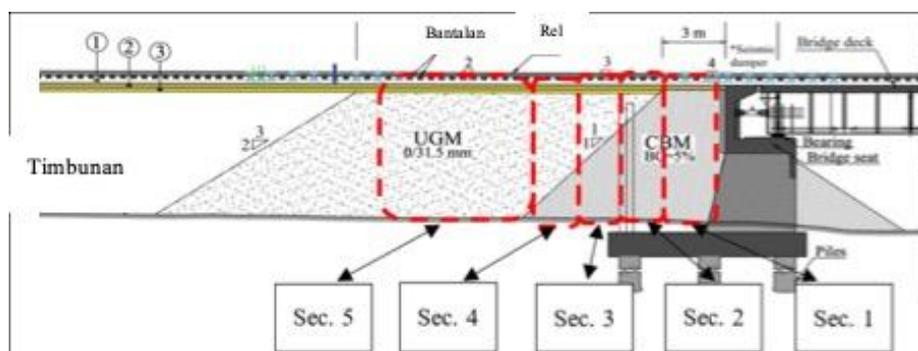
3.4 Efek Penurunan Total pada Zona Transisi Berdasarkan Metode *Slicing*

Setelah menentukan semua solusi di setiap lapisan material, tahap berikutnya menggabungkan hasil di zona transisi menggunakan metode *slicing* yang diusulkan. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan campuran berbagai lapisan material, seperti pada bagian 2-4 zona transisi yang ditunjukkan dalam Gambar 5. Setelah itu, tentukan kedalaman di setiap lapisan dan setiap bagian yang dijelaskan dalam properti kedalaman di setiap lapisan struktur.

Tabel 3. Properti kedalaman di setiap lapisan struktural

Kedalaman (mm)	5	4	3	2	1
Balas	100	100	100	100	100
XiTRACK	200	200	200	200	200
Sub Balas	100	100	100	100	100
Subgrade					
CBM	0	1,500	4,500	7,500	9,000
UGM	9,000	7,500	4,500	1,500	0

Kedalaman balas total sebesar 300 mm dan subbalas dengan kedalaman 100mm, dan XiTRACK sedalam 150 mm. Penguatan pada balas dianggap sebagai persyaratan untuk kinerja maksimum, tetapi masih ada ruang bagi balas untuk dipelihara menggunakan mesin xitamper. Proporsi dalam lapisan tanah dasar diatur dalam berbagai angka, seperti dijelaskan dalam tabel di atas, dengan bagian yang berbeda di setiap bagian. Langkah terakhir menghitung penurunan di semua lapisan per bagian, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5.



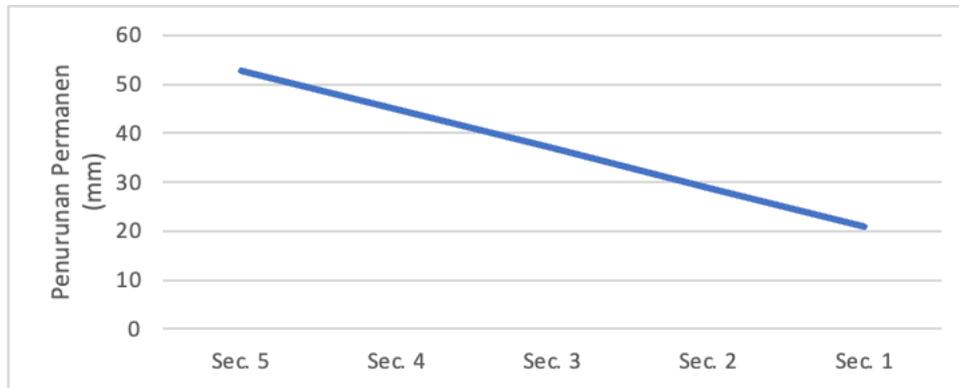
Gambar 5. Skema perhitungan penurunan total di zona transisi (dimodifikasi dari Paixão et al. (2014))

Bagian (*Sec.*) lima memiliki area bagian terbesar karena materialnya sama, dan perhitungan beban dilakukan pada gaya horizontal. Hasil perhitungan dijelaskan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil penyelesaian setiap lapisan jalur berdasarkan bagian di zona transisi

	Penurunan (mm)				
	Sec. 5	Sec. 4	Sec. 3	Sec. 2	Sec. 1
Balas	15.185	15.185	15.185	15.185	15.185
XiTrack	0.02003	0.02003	0.02003	0.02003	0.02003
Sub Balas	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085
Subgrade	37.408	29.456	21.505	13.553	5.601
CBM	0	1.400	2.800	4.201	5.601
UGM	37.408	28.056	18.704	9.352	0
Total	52.782	44.831	36.879	28.928	20.976

Dari data perhitungan penurunan yang disajikan dalam Tabel 4, nilai penurunan tertinggi diperoleh pada lapisan tanah dasar dengan rentang dari 5 mm hingga lebih dari 37 mm. Sementara nilai penurunan tertinggi selanjutnya berasal dari lapisan balas, yang berada dalam rentang 15 mm. Kemudian, bagian dengan nilai tertinggi adalah bagian 5 yang terjauh dari penopang dengan nilai penurunan lebih dari 52 mm. Di sisi lain, bagian 1 memiliki nilai penurunan terendah dibandingkan dengan nilai penurunan bagian lain, yaitu sekitar 20 mm. Di sisi lain, lapisan dengan nilai penurunan terendah adalah lapisan XiTRACK dan subbalas dengan penurunan permanen masing-masing sebesar 0,02 mm dan 0,085 mm. Selanjutnya, nilai penyelesaian total untuk setiap bagian disajikan didalam gambar 6.



Gambar 6. Total penurunan permanen di semua lapisan per bagian zona transisi

Grafik pada Gambar 6 menggambarkan nilai total penyelesaian jalur zona transisi di lima bagian. Setiap bagian diberi label dari 1 hingga 5, dan nilai penyelesaian diberikan dalam milimeter (mm): Bagian 1: 20,98 mm, Bagian 2: 28,93 mm, Bagian 3: 36,88 mm, Bagian 4: 44,83 mm, Bagian 5: 52,78 mm. Kumpulan data ini menunjukkan tren penyelesaian yang meningkat dari Bagian 1 hingga Bagian 5. Nilai penyelesaian secara bertahap menjadi lebih besar seiring peralihan antar bagian. Grafik ini menunjukkan zona transisi. Zona transisi adalah area di mana geometri atau kondisi jalur berubah, seringkali dari satu jenis medan ke jenis lain atau karena perubahan metode konstruksi atau properti tanah. Nilai-nilai tidak tampak meningkat pada tingkat konstan.

Sebaliknya, peningkatan penurunan tampaknya mempercepat ketika beban bergerak lebih jauh ke dalam zona transisi. Grafik penurunan total jalur di zona transisi menunjukkan tren penurunan yang meningkat secara halus saat kereta bergerak dari satu bagian ke bagian lain. Dalam kasus lain, simulasi perhitungan untuk lapisan balas yang akan diterapkan dilakukan dalam dua kondisi, yaitu jalur dengan balas penuh tanpa penguatan sepanjang 300 mm dan kondisi kedua dengan balas yang diperkuat sepenuhnya dengan poliuretan hingga kedalaman 300 mm, menghasilkan perhitungan penurunan total seperti dijelaskan dalam Tabel 5.

Tabel 5: Hasil perhitungan penurunan total balas penuh dengan dan tanpa penguatan (satuan dalam mm).

No	Material	Sec. 5	Sec. 4	Sec. 3	Sec. 2	Sec. 1
1	Balas	45.554	45.554	45.554	45.554	45.554
2	XiTRACK	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030
3	Sub Balas	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085
4	Subgrade (7)+(8)	37.408	29.456	21.505	13.553	5.601
5	CBM	0	1.400	2.801	4.201	5.601
6	UGM	37.408	28.056	18.704	9.352	0

Perkuatan seluruhnya (2)+(3)+(4)	37.523	29.571	21.620	13.668	5.716
Tanpa perkuatan (1)+(3)+(4)	60.285	52.333	44.381	36.430	28.478

Tabel 5 menunjukkan perbedaan yang signifikan antara nilai penurunan pada kondisi balas yang diperlakukan dengan poliuretan dan lapisan balas tanpa penguatan di semua bagian zona transisi. Penurunan total rata-rata pada jalur adalah 37 mm dan 60 mm untuk kondisi jalur yang diperkuat dan tidak diperkuat, secara berturut-turut. Secara keseluruhan, jalur dengan penguatan poliuretan meningkat sebesar 51,354% dibandingkan dengan kondisi awal.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis metode *slicing* terhadap penurunan total jalur kereta api memberikan pemahaman menyeluruh tentang perilaku penurunan jalur kereta api di bawah kondisi beban yang berbeda. Zona transisi terdiri dari komponen ballast, subballast, dan subgrade yang dapat diperkuat dengan teknologi poliuretan. Penyelesaian tanah dasar dapat dilakukan dengan menggunakan material UGM dan CBM. Penurunan lintasan meningkat secara signifikan dari 54,82% menjadi 88,84% setelah perkuatan, dengan perkuatan yang lebih dalam mengurangi nilai penurunan.

Analisis numerik melibatkan penggunaan model matematika dan algoritma untuk memecahkan masalah rekayasa yang kompleks. Dalam konteks jalur kereta api, analisis numerik menghitung penurunan, deformasi, dan tegangan dalam struktur jalur di bawah kondisi beban yang berbeda. Analisis numerik juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain jalur dan memprediksi perilaku jalur kereta api dalam jangka panjang. Kesimpulan yang diambil dari analisis metode *slicing* ini menunjukkan bahwa kombinasi simulasi komputer, pengujian laboratorium, dan analisis numerik diperlukan untuk memahami sepenuhnya perilaku penurunan jalur kereta api. Menggabungkan setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing serta memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh tentang masalah tersebut. Hasil yang diperoleh dari metode ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain jalur, mengurangi biaya pemeliharaan, dan meningkatkan keamanan serta keandalan dalam sistem kereta api.

REFERENSI

- Cai, Y., Xu, L., Liu, W., Shang, Y., Su, N. and Feng, D. 2020. Field Test Study on the Dynamic Response of the cement-improved Expansive Soil Subgrade of a heavy-haul railway. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 128, p105878.
- IEA. 2019. The Future of Rail Opportunities for energy and the environment. International Energy Agency.
- Kennedy, J. 2011. A Full-Scale Laboratory Investigation into Railway Track Substructure Performance and Ballast Reinforcement. PhD thesis, Herriot-Watt University.
- Kennedy, J., Woodward, P.K., Medero, G. and Banimahd, M. 2013. Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast. *Construction and Building Materials*. 44, pp.615-625
- Li, D., Otter, D. and Carr, G. 2010. Railway Bridge Approaches under Heavy Axle Load Traffic: Problems, Causes, and Remedies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 224(5), pp.383–390.
- Sañudo, R., dell'Olio, L., Casado, J.A., Carrascal, I.A. and Diego, S. 2016. Track transitions in railways: A review. *Construction and Building Materials*. 112, pp.140-157.
- Sañudo, R., Jardí, I., Martínez, J.-C., Sánchez, F.-J., Miranda, M., Alonso, B., dell'Olio, L. and Moura, J.-L. 2022. Monitoring Track Transition Zones in Railways. *Sensors*. 22(1), p76.
- Varandas, J.N., Paixão, A., Fortunato, E., Hölscher, P. and Calçada, R. 2014. Numerical Modelling of Railway Bridge Approaches: Influence of Soil Non-Linearity. *International Journal of Railway Technology*. 3(4), pp.73-95.
- Wang, H., Markine, V. and Liu, X. 2018. Experimental analysis of railway track settlement in transition zones. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 232(6), pp.1774-1789.
- Woodward, P.K., El Kacimi, A., Laghrouche, O., Medero, G. and Banimahd, M. 2012. Application of polyurethane geocomposites to help maintain track geometry for high-speed ballasted railway tracks. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*. 13(11), pp.836–849.
- 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 ballast. *Transportation Geotechnics*. 1(4), pp.214–224.