

Pengaruh Perkuatan Geotekstil terhadap *Track Behaviour* pada Zona Transisi

A. Nurdiantono, I. Muthohar^{1*}, D. Parikesit¹

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

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

INTISARI

Zona transisi pada jalur kereta api adalah area di mana struktur jalur-tanah berubah secara tiba-tiba. Perbedaan kekakuan lintasan pada transisi lintasan menimbulkan masalah seperti degradasi yang cepat, gangguan geometri lintasan, *ballast flying*, amplifikasi gaya roda atau rel, dan kegagalan bantalan. Penurunan plastis yang berlebihan dapat terjadi akibat penguatan gaya roda atau rel dan kegagalan bantalan. Penurunan plastis yang berlebihan ini merusak geometri lintasan, sehingga memerlukan pemeliharaan yang mahal secara berkala. Blok pendekat adalah salah satu langkah mitigasi yang telah digunakan untuk memitigasi superstruktur dan substruktur lintasan. Kekuatan atau kekakuan tanah dasar memiliki pengaruh yang paling signifikan terhadap kinerja blok pendekat. Pengaruh perkuatan geotekstil terhadap penurunan vertikal lintasan dan kekakuan lintasan pada zona transisi diselidiki dalam studi ini. Dengan menggunakan perangkat lunak Plaxis 3D, metode elemen hingga diterapkan untuk menyelidiki model lintasan. Sifat mekanik material lintasan diperoleh dari tinjauan pustaka, penelitian terdahulu, dan standar yang berlaku pada zona transisi. Tanah dasar akan diperkuat dengan geotekstil, perkuatan geotekstil digunakan untuk meningkatkan daya dukung tanah dasar. Lima varian perkuatan geotekstil dianalisa untuk menentukan penurunan dan kekakuan lintasan. Beban disimulasikan dengan menggunakan beban kereta api yang bergerak dengan kecepatan 50 m/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkuatan geotekstil dapat membantu meminimalkan perbedaan penurunan di zona transisi hingga 20,8% dibandingkan tanpa perkuatan.

Kata kunci: zona transisi, perkuatan geotekstil, analisis elemen hingga, penurunan lintasan

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan jaringan kereta api global yang sedang mengalami pertumbuhan yang cepat, kereta api menjadi lebih cepat, lebih berat, dan memiliki jeda waktu yang lebih sedikit di antara jalur yang berurutan. Perluasan jaringan kereta api telah menyebabkan rel kereta api melewati berbagai topografi untuk menjangkau kota-kota yang sebelumnya tidak terjangkau oleh jaringan kereta api. Topografi tersebut dapat berupa bukit, lembah, atau sungai yang biasanya memiliki tanjakan atau turunan yang ekstrim. Padahal, kereta api harus berjalan pada kemiringan tertentu agar dapat bekerja secara efisien dari segi energi, tidak kehilangan traksi, dan bekerja secara optimal sesuai dengan kapasitasnya (Xin et al., 2014; Kang et al., 2018). Oleh karena itu, struktur sipil seperti jembatan, viaduk, dan terowongan harus dibangun untuk membuat alinyemen vertikal lintasan serdatar mungkin. Jembatan, viaduk, dan terowongan merupakan struktur yang harus direncanakan dan dibangun selama pembangunan jalan rel kereta api untuk memastikan geometri lintasan dan perataan lintasan sesuai dengan yang direncanakan dan memenuhi standar yang telah ditentukan. Adanya struktur-struktur tersebut menghasilkan sebuah lokasi yang disebut dengan zona transisi (Gallego Giner & López Pita, 2009). Perbedaan kekakuan lintasan pada zona transisi menyebabkan masalah seperti penurunan lintasan secara tiba-tiba, gangguan geometri lintasan, *flying ballast*, amplifikasi gaya roda atau rel, dan kegagalan bantalan (Banimahd et al., 2012). Dapat diamati bahwa daerah transisi memiliki penurunan yang lebih besar daripada lintasan terbuka, meskipun memiliki kekakuan yang lebih besar. Penurunan yang berlebihan ini menyebabkan degradasi geometri lintasan, sehingga memerlukan perbaikan pemeliharaan yang rutin dan mahal (Zhu & Heitor, 2022).

Blok pendekat (*approach block*) adalah solusi struktural untuk mengurangi variasi *track behaviour* antara lintasan dengan kekakuan yang lebih tinggi dan lintasan dengan kekakuan yang lebih rendah. Masalah di zona transisi sering kali disebabkan oleh ketidakaturan struktur dan pondasi di atas lintasan (Sañudo et al., 2016). Beberapa penelitian menyajikan cara-cara untuk meningkatkan kinerja zona transisi dengan memungkinkan perubahan kekakuan lintasan yang lebih bertahap. Kekakuan pada lintasan pendekat atau tanggul dapat ditingkatkan dengan menambahkan material dan/atau mengubah sifat-sifat komponen yang ada (Chumylen et al., 2022).

Perbaikan tanah adalah suatu Solusi yang dapat digunakan untuk meminimalkan perbedaan penurunan jalur ketika kereta api bergerak melalui zona transisi. Menurut studi yang dilakukan oleh Shahraki et al. (2015) dan Chumylen et al. (2022) menunjukkan bahwa sistem ini dapat menawarkan peningkatan kekakuan yang progresif dari abutmen

(jembatan atau terowongan) ke jalur terbuka. Hal ini dicapai dengan memberikan tingkat kekakuan yang lebih tinggi dari pada jalur terbuka, tetapi lebih rendah dari pada abutmen. Perbaikan tanah dapat dilakukan dengan teknik modifikasi, yang melibatkan proses inklusi, pengurangan, dan perkuatan. Perubahan ini dicapai melalui pemanfaatan elemen struktur atau material alternatif yang dimasukkan ke dalam tanah, seperti geosintetik (Nicholson, 2015).

Selama beberapa dekade terakhir, geosintetik telah digunakan secara luas selama perbaikan jalan untuk meningkatkan stabilitas tanah karena geosintetik menawarkan berbagai keuntungan seperti efektivitas biaya, kemudahan pemasangan, dan lebih sedikit pekerjaan tanah (Yap et al., 2017). Penggunaan perkuatan geotekstil sebagai perkuatan tanah dasar dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kekakuan pada zona transisi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perkuatan geotekstil pada tanah dasar terhadap penurunan pada zona transisi. Penelitian ini akan menggunakan analisis elemen hingga untuk mengkaji pengaruh susunan perkuatan geotekstil terhadap penurunan vertikal lintasan akibat pembebanan kereta api. Perilaku mekanis dari perkuatan geotekstil akan diamati dalam studi ini untuk menentukan kekakuan lintasan yang dihasilkan.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Prosedur Penelitian

Analisis elemen hingga tiga dimensi dilakukan dalam penelitian ini untuk menentukan dampak inklusi geotekstil terhadap penurunan lintasan pada zona transisi. Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak geoteknik Plaxis 3D. Berikut ini adalah langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian.

1. Melakukan studi literatur mengenai jenis perkuatan dan desain perkuatan. Pada tahap ini akan dilakukan studi literatur mengenai perkuatan tanah dasar pada zona transisi. Salah satu fokus tinjauan pustaka pada bagian ini adalah perkuatan dengan menggunakan geotekstil dan bagaimana mendesain perkuatan dengan menggunakan geotekstil.
2. Penentuan desain yang digunakan untuk analisis. Pada tahap ini akan ditentukan desain blok pendekat yang akan digunakan berdasarkan tinjauan pustaka dari penelitian atau publikasi yang telah dilakukan sebelumnya serta standar yang berlaku di dunia.
3. Kompilasi data yang akan digunakan untuk analisis. Data yang akan digunakan untuk penelitian ini adalah data sekunder yang diambil dari penelitian sebelumnya atau standar yang telah dipublikasikan. Data yang akan digunakan adalah data sifat material, data dimensi, dan data beban.
4. Membuat model tiga dimensi untuk analisis elemen hingga. Desain yang telah ditentukan akan dimasukkan ke dalam model elemen hingga 3D. Selain model desain, model lain yang akan dimasukkan adalah model material. Model material adalah sifat-sifat material yang akan menggambarkan model secara keseluruhan. Pada tahap ini, model beban juga akan dimasukkan ke dalam model 3D.
5. *Input* parameter untuk analisis elemen hingga. Pada tahap ini, *input* parameter untuk analisis elemen hingga akan dilakukan. Parameter ini akan menentukan perilaku material ketika beban dari kereta api melewati *approach block*.
6. Analisis elemen hingga menggunakan Plaxis 3D. Pada tahap ini, model 3D yang telah dibuat sebelumnya akan dianalisa menggunakan metode elemen hingga

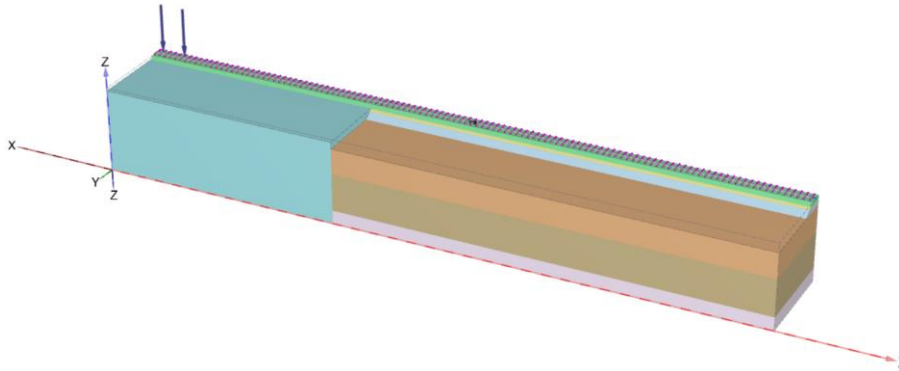
2.2 Data dan Model untuk Analisis Elemen Hingga Tiga Dimensi

2.2.1 Model Substruktur

1. Konfigurasi dan geometri model substruktur.

Model substruktur memiliki panjang 70 meter, lebar 20 meter dan kedalaman 9 meter. Ukuran ini memastikan bahwa penurunan yang terjadi akibat beban dari kereta api dapat diamati dengan baik. Studi yang dilakukan oleh Illanes (2022) menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara model dengan panjang 100 m dan lebar 40 m dan model dengan panjang 70 meter dan lebar 20 meter. Karena sumbu *y* memiliki geometri yang simetris, maka hanya setengah dari total sumbu *y* yang digunakan dalam penelitian ini. Model jembatan memiliki panjang 25 m. Diharapkan dengan panjang tersebut, penurunan lintasan, kekakuan lintasan, dan percepatan lintasan dapat teramati dengan baik. Tanah alami pada model ini terdiri dari 3 lapisan tanah: lanau, lempung, dan pasir. Selain itu, lapisan *capping* diposisikan tepat di atas tanah alami. Lapisan *capping* berfungsi untuk menghaluskan permukaan tanah alami dan memiliki ketebalan 0,5 m. Konfigurasi ini diadopsi dari penelitian sebelumnya oleh Illanes (2022) dan Zhu and Heitor (2022). Blok

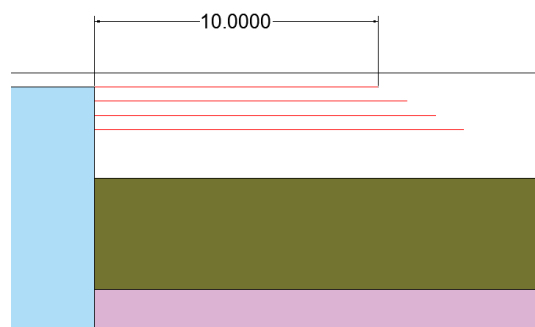
pendekatan terdiri dari lapis bawah dengan perkuatan geotekstil dan memiliki panjang 10 meter di permukaan tanah. Geotekstil disusun berlapis-lapis hingga kedalaman tertentu. Gambar 1 menunjukkan model substruktur yang digunakan.



Gambar 1. Gambar isometrik dari model substruktur

2. Sifat material untuk model substruktur

Sifat-sifat material untuk model substruktur yang diadopsi untuk penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu dan tinjauan literatur tentang material yang umum digunakan untuk rel kereta api. Parameter yang digunakan dalam studi ini adalah sifat mekanik. Sementara itu, parameter untuk air tanah, *interface*, dan beban awal mengikuti parameter *default* atau parameter yang dihitung secara otomatis oleh perangkat lunak Plaxis 3D. Sifat-sifat yang digunakan dalam analisis elemen hingga pada penelitian ini untuk tanah adalah berat tak jenuh (γ_{unsat}), berat jenuh (γ_{sat}), Poisson's ratio (ν), modulus Young (E'), kohesi efektif (c'), dan sudut gesek (ϕ). Sifat-sifat ini diperlukan untuk memvalidasi material dengan model Mohr-Coulomb dalam perangkat lunak Plaxis 3D. Tabel 4.2 merangkum properti material yang diambil dari penelitian sebelumnya atau tinjauan pustaka oleh Paixão et al. (2015), Zhu and Heitor (2022), dan Illanes (2022). Selanjutnya, properti yang digunakan untuk analisis perkuatan geotekstil adalah kuat tarik (EA1). Parameter ini sudah dapat memvalidasi model geotekstil di Plaxis 3D dengan perilaku elastis. Untuk gambar dua dimensi perkuatan geotekstil ditunjukkan pada Gambar 2.



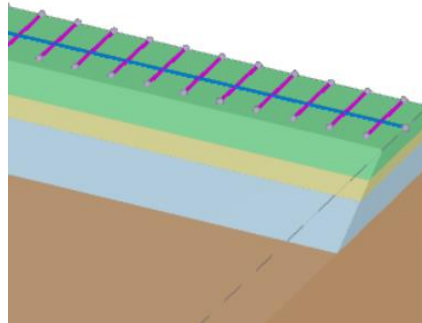
Gambar 2. Gambar dua dimensi dari perkuatan geotekstil

2.2.2 Model Superstruktur

1. Konfigurasi dan Geometri Model Superstruktur

Konfigurasi superstruktur yang digunakan dalam model pada penelitian ini terdiri dari rel, bantalan, balas, dan subbalas, yang mengikuti standar yang berlaku yaitu kode UIC code 719 R (UIC, 2008). Selain itu, model ini telah digunakan oleh penelitian yang telah diselesaikan sebelumnya oleh Illanes (2022), Zhu and Heitor (2022), dan Koch and Hudacsek (2017). Superstruktur terbentang sepanjang panjang substruktur yang dimodelkan atau sepanjang 70 m. Dengan konfigurasi jalur dengan balas, balas terletak tepat di bawah bantalan, yang berfungsi sebagai penopang beban kereta, mendistribusikan gaya, meredam getaran, dan menyediakan drainase yang memadai dengan material granularnya. Di bawah balas diletakkan subbalas. Subbalas terdiri dari material kerikil atau pasir yang berfungsi sebagai pemisah antara balas dan tanah dasar,

mendistribusikan beban lebih jauh, dan menyediakan drainase yang memadai (Li et al., 2015). Desain dari model superstruktur ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Gambar tiga dimensi dari model superstruktur

2. Sifat-sifat Material untuk Model Superstruktur

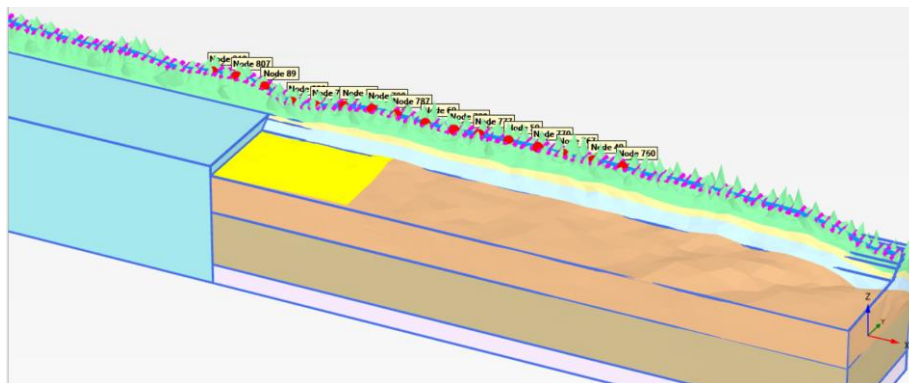
Sifat-sifat yang digunakan dalam analisis elemen hingga pada penelitian ini untuk tanah adalah berat tak jenuh (γ_{unsat}), berat jenuh (γ_{sat}), Poisson's ratio (ν), modulus Young (E'), kohesi efektif (c'), dan sudut gesek (ϕ). Sifat-sifat ini diperlukan untuk memvalidasi material dengan model Mohr-Cuolomb dalam perangkat lunak Plaxis 3D. Tabel 4.2 merangkum properti material yang diambil dari penelitian sebelumnya atau tinjauan pustaka oleh Paixão et al. (2015), Zhu and Heitor (2022), dan Illanes (2022).

2.2.3 Model Pembebanan Bergerak

Model beban bergerak atau beban dinamis yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari beban titik (dalam hal ini, beban dari kereta api) yang bergerak pada jalur yang telah ditentukan (rel). Model ini merepresentasikan sebuah kereta api ICE yang bergerak dengan kecepatan 180 km/jam atau 50 m/s dengan beban gandar sebesar 17 ton. Model beban kereta ini sebelumnya telah digunakan dalam analisis dinamis oleh Shahraki et al. (2015). Studi tersebut juga menggunakan model tanah Mohr-Cuolomb. Beban yang bergerak terdiri dari 4 gandar dengan dua bogie yang diberi jarak. Untuk studi ini, model hanya diwakili oleh satu bogie.

2.3 Metode Analisis

Karena pada perangkat lunak Plaxis 3D analisis dilakukan secara diskrit dimana satu titik diamati dalam rentang waktu tertentu, maka diperlukan suatu konversi untuk dapat menggambarkan penurunan lintasan yang terjadi di sepanjang lintasan. Untuk pengamatan penurunan lintasan, diambil beberapa titik pengamatan dengan jarak antara 20 meter hingga 50 meter. Jarak setiap titik pengamatan adalah dua meter sehingga terdapat 16 titik pengamatan yang digunakan untuk mengamati penurunan lintasan. Titik pengamatan diwakili oleh *node* pada *mesh* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Titik-titik observasi untuk penurunan lintasan

3 HASIL DAN ANALISIS

3.1 Desain Zona Transisi yang Diperkuat Geotekstil

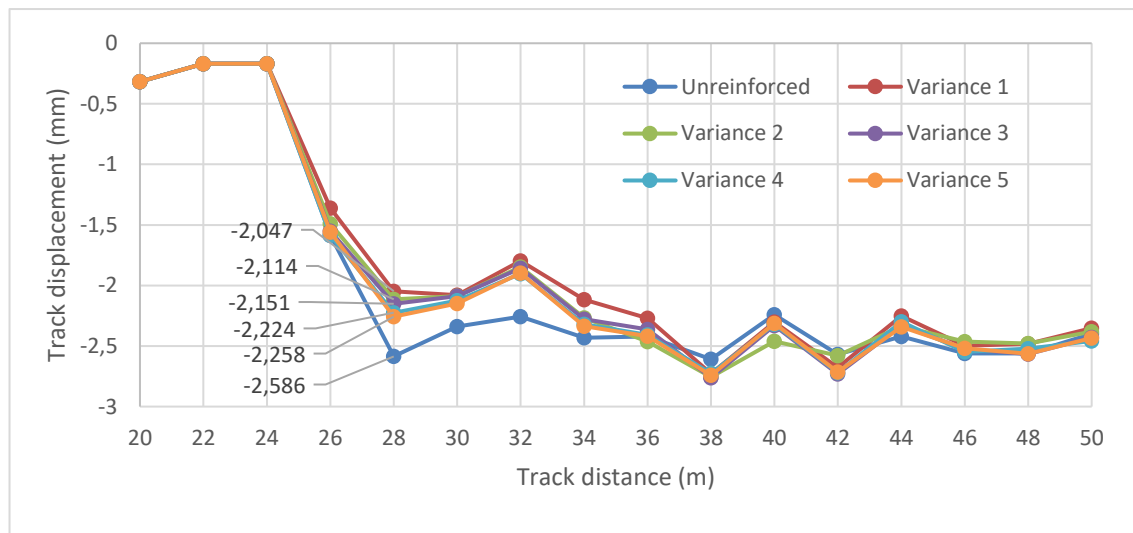
Perkuatan geotekstil atau inklusi geotekstil dilakukan dengan cara menempatkan geotekstil pada bidang horizontal untuk membentuk lapisan perkuatan. Beberapa penelitian menunjukkan pengaruh penempatan lapisan geotekstil terhadap daya dukung tanah, daya dukung geotekstil yang diperkuat dipengaruhi oleh jarak spasi dan jumlah lapisan. Kedalaman perkuatan maksimum adalah 2 meter dari *capping layer* atau 3 meter dari titik beban pada rel. Dengan kedalaman tersebut, diharapkan tegangan dari beban kereta api dapat dikurangi seperti yang tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Rangkuman variasi desain perkuatan geotekstil

Kode	Variasi	Kedalaman	Lapisan
-	Tanpa perkuatan	-	-
Variasi 1	Lapisan geotekstil setiap 10 cm	1 meter	11 lapisan
Variasi 2	Lapisan geotekstil setiap 25 cm	2 meter	9 lapisan
Variasi 3	Lapisan geotekstil setiap 50 cm	2 meter	5 lapisan
Variasi 4	Lapisan geotekstil setiap 75 cm	2,25 meter	4 lapisan
Variasi 5	Lapisan geotekstil setiap 100 cm	2 meter	3 lapisan

3.2 Penurunan lintasan di sepanjang zona transisi

Gambar 5 membandingkan penurunan lintasan pada masa transisi pada semua kondisi. Pada kondisi tanpa perkuatan, terjadi penurunan lintasan yang tertinggi dibandingkan dengan kondisi lainnya. Pada kondisi ini, tidak ada penurunan bertahap antara abutmen dan lintasan terbuka seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Kondisi ini dapat menyebabkan gaya dinamis yang lebih tinggi pada lintasan dan menyebabkan keausan yang lebih tinggi pada komponen lintasan dan penurunan plastis yang lebih tinggi dari waktu ke waktu (Shahraki et al., 2015).



Gambar 5. Perbandingan penurunan lintasan yang terjadi pada setiap kondisi

Secara umum, pada semua kondisi penurunan lintasan berkurang dibandingkan dengan kondisi tanpa perkuatan. Kondisi var 1 memberikan pengurangan penurunan lintasan terbesar yaitu sebesar 20,84%, sedangkan kondisi var 5 memberikan pengurangan penurunan lintasan terkecil yaitu sebesar 12,68%. Penambahan lapisan geotekstil dapat memberikan perbaikan pada tanah dasar yang ditandai dengan berkurangnya penurunan lintasan, Pengurangan penurunan dapat terjadi karena perkuatan geotekstil dapat meningkatkan daya dukung dan kuat tekan tanah (Naeini & Mirzakhani, 2008; Negi & Singh, 2020; Yousif, 2015). Peningkatan daya dukung tersebut terjadi karena penerapan lapisan geotekstil dapat mengurangi tegangan geser yang terjadi pada tanah dan memberikan dukungan vertikal pada tanah di sekitarnya dari lokasi pembebanan (Holtz et al., 1998; Yousif, 2015; Zornberg & Thompson, 2012).

4 KESIMPULAN

Enam kondisi zona transisi dianalisis dalam penelitian ini yang diberi kode var 1, var 2, var 3, var 4, dan var 5. Kondisi pertama adalah zona transisi tanpa perbaikan tanah dasar. Kondisi kedua sampai keenam adalah zona transisi dengan perkuatan geotekstil yang divariasikan berdasarkan jarak dan jumlah lapisan. Kedalaman perkuatan yang digunakan adalah 3 meter dari permukaan lintasan. Penurunan lintasan terbesar terjadi pada zona transisi tanpa perkuatan dengan penurunan sebesar 2,586 mm. Sedangkan penurunan lintasan terkecil terjadi pada kondisi var 1 dengan penurunan sebesar 2.047 mm, diikuti oleh var 2, var 3, var 4, dan var 5. Secara keseluruhan pada semua kondisi perkuatan, penurunan lintasan mengalami pengurangan, pengurangan penurunan lintasan terbesar terjadi pada kondisi var 1 dengan pengurangan sebesar 20,8%.

REFERENSI

- Chumyem, P., Connolly, D. P., Woodward, P. K., & Markine, V. (2022). *The effect of soil improvement and auxiliary rails at railway track transition zones*. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, 107200.
- Holtz, R. D., Christopher, B. R., & Berg, R. R. (1998). *Geosynthetic Design And Construction Guidelines. Participant Notebook. Nhi Course No. 13213 (REVISED APRIL 1998)*.
- Illanes, J. L. (2022). *Effect of Material Stiffness and Water Retention on Track Degradation at Transition Zones* University of Leeds. Leeds.
- Koch, E., & Hudacsek, P. (2017). *3D Dynamic Modeling of Transition Zones*. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(9), 1310-1316.
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T., & Chrismer, S. (2015). *Railway Geotechnics*. CRC Press.
- Naeini, S., & Mirzakhani, M. (2008). *The Effect of Geotextile and Grading on the Bearing Ratio of Granular Soils*. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 13.
- Negi, M. S., & Singh, S. K. (2020). *Improvement of Subgrade Characteristics with Inclusion of Geotextiles*. In V. S. Kanwar & S. K. Shukla, *Sustainable Civil Engineering Practices* Singapore.
- Nicholson, P. (2015). *Soil improvement and ground modification methods*. Butterworth-Heinemann Oxford, England.
- Paixão, A., Fortunato, E., & Calçada, R. (2015). *Design and construction of backfills for railway track transition zones*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 229(1), 58-70.
- Shahraki, M., Warnakulasooriya, C., & Witt, K. J. (2015). *Numerical study of transition zone between ballasted and ballastless railway track*. *Transportation Geotechnics*, 3, 58-67.
- UIC. (2008). *Earthworks and track bed for railway lines*. In (Vol. 719 R): International Union of Railways.
- Yap, H. C., Khabbaz, H., & Singh, J. (2017). *Numerical analysis of geosynthetics and engineering fill in performance of reconditioned ballasted track*. *Australian Geomechanics Journal*.
- Yousif, H. F. (2015). *Effect of Expansive Subgrade Soil on Reinforced Subbase Layer* University of Technology. Iraq.
- Zhu, F., & Heitor, A. (2022). *Influence of Water Content on Track Degradation at Transition Zones*. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 9(1), 32-53.
- Zornberg, J. G., & Thompson, N. (2012). *Application Guide and Specifications for Geotextiles in Roadway Applications*. C. f. T. R. T. U. o. T. a. Austin.