

Analisis Usia Layan Tanah Dasar Pada Struktur Jalan Kereta Api Berdasarkan Perbedaan Ketebalan Balas

Hanafi Isnanta Prabawa^{1,2}, hana011@brin.go.id
Pusat Riset Teknologi Transportasi¹, Badan Riset dan Inovasi Nasional²

ABSTRAK

Jalan kereta api merupakan komponen penting dalam operasional kereta api. Struktur jalan kereta api terdiri dari lapisan balas, sub-balas, dan tanah dasar. Tanah dasar merupakan bagian yang terletak di lapisan paling bawah pada struktur jalan kereta api sehingga membuat lapisan ini menopang keseluruhan struktur yang ada di atasnya. Apabila terjadi kerusakan pada tanah dasar, maka akan terjadi banyak ketidaksesuaian pada struktur lapisan di atasnya serta berkurangnya stabilitas struktur jalan kereta api. Salah satu cara untuk mencegah terjadinya kerusakan pada tanah dasar adalah dengan melakukan perawatan sebelum mencapai usia layannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan balas terhadap usia layan tanah dasar. Analisis dilakukan secara numerik dengan menggunakan *software* ANSYS 2023 untuk mengetahui tegangan tekan vertikal yang digunakan pada perhitungan usia layan. Pada ketebalan balas 200 mm usia layan tanah dasar adalah 43,7 tahun. Berdasarkan PM 60/2012, ketebalan minimal balas adalah 300 mm. Pada ketebalan tersebut, usia layan tanah dasar adalah 62,27 tahun, sedangkan pada ketebalan balas 500 mm usia layan tanah dasar mencapai 98,99 tahun.

Kata Kunci: Usia Layan, Tanah Dasar, Jalan Kereta Api, Balas, Tegangan Tekan Vertikal

ABSTRACT

Railway track is important component in the operational of railway. Railway track structure consist of layers of ballast, sub-ballast, and subgrade. Subgrade located at the bottom of railway track structure thus make this layer hold the whole structure above. In case of damage to the subgrade, then there will be a lot of mismatches in the structure of the overlying layers and reduced stability of the railway track structure. One way to prevent damage on the subgrade is by doing maintenance berfore reaching its service life. This research aims to find out the effect of ballast thickness to subgrade service life. The Analysis was performed numerically using ANSYS 2023 software to determine vertical compressive stress used in the service life calculation. At a ballast thickness of 200 mm the subgrade service life is 43.7 years. Based on PM 60/2012, the minimum ballast thickness is 300 mm. At this thickness, the subgrade service life is 62.7 year, while at the ballast thickness of 500 mm the subgrade service life is up to 98.99 years.

Keywords: Service Life, Subgrade, Railway Track, Ballast, Vertical Compressive Stress.

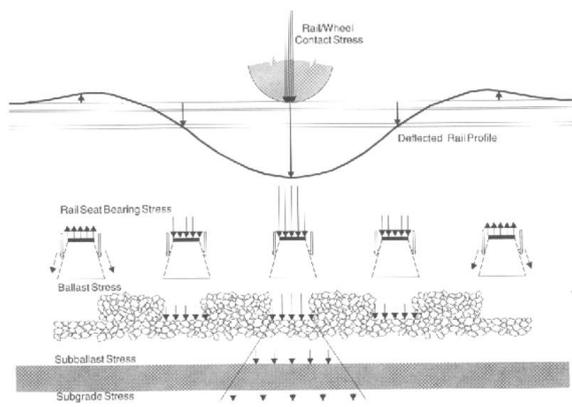
1 PENDAHULUAN

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi yang memiliki kapasitas yang tinggi dalam mengangkut penumpang ataupun barang. Tercatat pada tahun 2022, moda angkutan kereta api mengangkut lebih dari 277 juta penumpang dan membawa lebih dari 61,9 juta ton angkutan barang, meningkat cukup tinggi dari tahun sebelumnya yang mengangkut 154,5 juta penumpang dan 50,2 juta ton pada tahun 2021 [1], [2]. Sementara itu Kementerian Perhubungan melalui dokumen Rencana Induk Perkeretaapian Nasional (RIPNas) memperkirakan bahwa sektor perkeretaapian di Indonesia dapat mengangkut hingga 929,5 juta penumpang dan 995,5 juta ton angkutan barang pada tahun 2030 [3].

Pada umumnya terdapat 2 jenis konstruksi jalan kereta api, yaitu tipe *ballasted* (dengan balas) dan *ballastless* (tanpa balas). Jalan kereta api dengan balas memiliki kelebihan biaya konstruksinya yang lebih rendah, namun memerlukan perawatan yang lebih sering untuk menjaga kualitas tiap lapisannya. Sedangkan jalan kereta api tanpa balas memiliki kelebihan mampu menahan beban yang lebih tinggi serta tidak memerlukan perawatan yang terlalu sering, namun biaya konstruksi yang dibutuhkan hingga 40% lebih tinggi daripada jalan kereta api dengan balas [4]–[6].

Sebagian besar jenis jalan kereta api yang ada di Indonesia adalah jalan kereta api dengan balas. Konstruksi jenis ini terdiri dari beberapa lapis, yaitu lapisan balas, sub-balas, dan tanah dasar (*subgrade*). Lapisan balas merupakan lapisan yang tersusun dari material batu pecah yang berfungsi sebagai tempat

peletakkan bagian struktur atas dari jalan kereta api berupa rel, penambat, dan bantalan. Lapisan sub-ballas merupakan lapisan penyaring antara lapisan balas dan tanah dasar dan mampu untuk mengalirkan air dengan baik. Sedangkan lapisan tanah dasar merupakan lapisan terakhir yang berfungsi untuk menerima beban kereta api yang diteruskan oleh lapisan di atasnya [7]. Distribusi beban pada struktur jalan kereta api ditunjukkan pada Gambar 1 [8]. Beban dari roda kereta api diteruskan melalui rel ke bantalan, kemudian dari bantalan bebannya akan disebar melalui lapisan balas, sub-balas hingga tanah dasar. Sehingga tanah dasar menerima konsentrasi beban terkecil dibanding lapisan yang lain.



[Ma1]

Gambar 1. Distribusi Beban Struktur Jalan Kereta Api [8]

Indonesia memiliki peraturan tentang dimensi dan ketebalan balas untuk jalan kereta api yang tercantum pada Peraturan Menteri Perhubungan No. 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api [7]. Dimensi dan spesifikasi untuk jalur kereta api dengan lebar sepur 1067 mm ditampilkan pada Tabel 1.

Dengan meningkatnya jumlah angkutan penumpang dan barang pada kereta api, tentunya hal ini akan mempengaruhi periode perawatan dan usia layan jalan kereta api. Perawatan jalan kereta api juga dibedakan berdasarkan lapisannya. Balas merupakan lapisan yang memiliki periode perawatan paling tinggi dibanding lapisan lainnya karena menerima konsentrasi tegangan yang paling tinggi dikarenakan beban kereta api yang melintas di atas jalan kereta api. Periode perawatan lapisan balas juga dapat dilihat dari ketinggian lapisannya, apabila ketinggiannya sudah jauh dari standar maka sudah perlu dilakukan penambahan balas. Namun berbeda dengan lapisan balas, lapisan tanah dasar tidak dapat dilihat secara langsung untuk menentukan periode perawatannya, untuk itu diperlukan perkiraan usia layan tanah dasar hingga periode perawatannya. Rose, et. al [9] menggunakan aplikasi Kentrack untuk menentukan usia layan tanah dasar dengan variasi konstruksi granular, aspal dan campuran granular dengan aspal. Diketahui bahwa konstruksi jalan kereta api campuran menghasilkan usia layan yang lebih tinggi dibandingkan jenis jalan kereta api lainnya.

Tabel 1. Spesifikasi Jalan Kereta Api dengan Lebar Sepur 1067 mm

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (Ton/Tahun)	Kecepatan Maksimum (Km/Jam)	Beban Gandar Maksimal (Ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	
					Jarak antar sumbu bantalan (mm)	Tebal Balas (mm)
I	$> 20 \times 10^6$	120	18	R.60/R.54	Beton 600	300
II	$10 \times 10^6 - 20 \times 10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 600	300
III	$5 \times 10^6 - 10 \times 10^6$	100	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 600	300
IV	$2.5 \times 10^6 - 5 \times 10^6$	90	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 600	250
V	$< 2.5 \times 10^6$	80	18	R.42	Kayu/Baja 600	250

Usman, et. al. [10] mengidentifikasi beberapa kerusakan tanah dasar pada jalur kereta api, diantaranya kegagalan dikarenakan kenaikan gaya geser yang progresif, terjadinya deformasi pada tanah dasar yang terlalu berlebihan, serta gesekan tanah yang berlebihan dikarenakan adanya pompaan lumpur (*mud pumping*). Kerusakan-kerusakan ini sangat berbahaya

bagi perjalanan kereta api karena mengurangi kekuatan dari tanah dasar itu sendiri dan menyebabkan berkurangnya stabilitas pada tanah dasar.

Kalliainen, et. al. [11] mencoba mencari tahu perilaku struktur jalan kereta api dengan menggunakan aplikasi PLAXIS 3D FEM dengan beberapa variasi properti

material pada lapisan jalan kereta api. Beberapa parameter yang diamati adalah deformasi vertikal, stress vertikal dan regangan geser pada tiap lapisan balas, sub-balas dan tanah dasar. Shahraki, et. al. [12] melakukan simulasi numerik pada lokasi transisi antara konstruksi jalan kereta api dengan balas dan tanpa balas untuk mengetahui perubahan kekakuannya. Beberapa hal yang diamati adalah defleksi, percepatan, dan stress vertikal di atas rel, balas, dan tanah dasar.

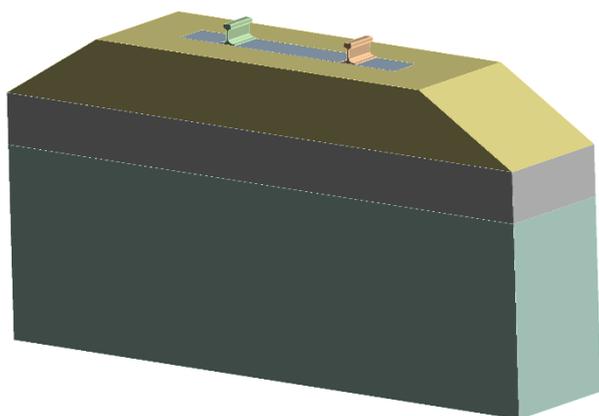
Prabawa dan Primadiyanti [13] melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi ketebalan balas dan sub-balas terhadap tanah dasar dengan menggunakan aplikasi KENTRACK. Dengan total ketebalan yang sama, terdapat perbedaan pada tegangan vertikal dan usia layan pada ketebalan balas dan sub-balas yang berbeda. Namun hasil penelitian masih sulit diterapkan untuk perawatan jalan kereta api eksisting dikarenakan posisi sub-balas berada di bawah balas dan dalam melakukan perawatan akan sulit dikarenakan tidak dapat diamati secara langsung.

2 METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik dengan *software* ANSYS 2023 dengan model 3D untuk mengetahui tekanan vertikal yang diterima pada permukaan lapisan tanah dasar. Model, properti material, dan beban yang digunakan pada simulasi akan dijelaskan di bawah.

2.1 Model Simulasi

Model pada simulasi mengacu pada kelas jalan dengan beban gandar maksimal 18 ton, menggunakan tipe rel R.54, dan bantalan beton. Tabel 2 menunjukkan dimensi model yang digunakan dalam simulasi dan Gambar 2 menunjukkan tampilan 3D model yang digunakan. Tebal balas disimulasikan dengan tebal lapisan antara 200 mm – 500 mm dengan interval 50 mm.



Gambar 2. Model Simulasi

Tabel 2. Dimensi Model

Lapisan	Dimensi (mm)
	PxLxT
Bantalan	2000 x 260 x 220
Balas	4700 x 1000 x (250-500)
Sub-balas	4700 x 1000 x 400
Tanah Dasar	4700 x 1000 x 1500

2.2 Material Properti Model Simulasi

Pada penelitian ini, semua material dianggap memiliki sifat material elastis linier. Beberapa parameter yang digunakan dalam properti material adalah massa jenis, modulus young, dan rasio poisson. Tabel 3 menunjukkan material properti dari tiap lapisan jalan kereta api. Material properti rel mengacu pada [12] sedangkan material properti lapisan lainnya mengacu pada [14].

Tabel 3. Material Properti

Lapisan	Massa Jenis (kg/m ³)	Modulus Young (MPa)	Rasio Poisson
Rel	6186	210,000	0.3
Bantalan	2300	29,100	0.3
Balas	1900	130	0.2
Sub-balas	1900	120	0.3
Tanah dasar	2000	80	0.3

2.3 Beban pada Struktur Jalan Kereta Api

Sebagian besar jalur kereta api di Indonesia digunakan untuk perjalanan kereta api penumpang, sehingga beban yang akan digunakan merupakan beban kereta api penumpang. Salah satu kereta penumpang yang digunakan pada kereta api di Indonesia adalah Kereta Kelas Eksekutif *Stainless Steel* yang diproduksi oleh PT. Industri Kereta Api (Persero) atau biasa dikenal dengan PT. INKA. Kereta ini memiliki beban gandar maksimal 15 ton dan dapat melaju hingga kecepatan 120 km/jam [15].

Maka untuk mengetahui beban dinamis gandar saat kereta api berjalan dapat menggunakan rumus talbot [16] sebagai berikut:

$$I_p = 1 + 0,01 \left(\frac{v}{1,609} - 5 \right) \quad (1)$$

$$P_d = P_s \times I_p \quad (2)$$

Dengan, I_p adalah faktor konversi, v adalah kecepatan kereta, P_s adalah beban statis kereta, dan P_d adalah beban dinamis kereta. Sehingga dapat diketahui beban dinamis dengan menggunakan Persamaan (1) dan (2) adalah 25,43 ton tiap gandarnya.

2.4 Usia Layan Tanah Dasar

Tanah dasar merupakan lapisan terakhir pada struktur jalan kereta api. Lapisan ini menahan beban yang diteruskan oleh lapisan-lapisan di atasnya. Untuk itu perlu diketahui resiliensi, ketahanan, dan usia layannya agar dapat ditentukan jadwal perawatan yang tepat, karena lapisan ini tidak dapat diamati secara langsung untuk menentukan kondisinya.

Untuk menghitung usia layan tanah dasar, perlu diketahui terlebih dahulu jumlah repetisi beban kereta api lewat yang diijinkan melalui Persamaan (3), kemudian dapat dicari usia layannya dengan menggunakan Persamaan (4) [17].

$$N_d = 4,837 \times 10^{-5} \sigma_c^{-3,734} E_s^{3,583} \quad (3)$$

$$L = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_p} \frac{N_p}{N_d}} \quad (4)$$

Dimana,

N_d adalah jumlah pengulangan beban yang diijinkan pada tanah dasar,

σ_c adalah tegangan tekan di permukaan tanah dasar (psi),

E_s adalah modulus elastisitas tanah dasar (psi),

L adalah usia layan tanah dasar (tahun),

N_p adalah prediksi jumlah pengulangan beban pada tanah dasar selama satu tahun.

2.5 Prediksi Jumlah Pengulangan Beban

Untuk menghitung usia layan tanah dasar, diperlukan prediksi jumlah pengulangan beban selama satu tahun. Dalam persamaan (4), satu kereta yang terdiri dari 4 pasang roda dihitung sebagai satu pengulangan. Tabel 4 menunjukkan perhitungan jumlah pengulangan beban apabila diperkirakan ada 50 rangkaian kereta api yang terdiri dari 10 kereta per harinya. Dari tabel tersebut dapat diketahui bahwa dalam satu tahun terjadi pengulangan beban sebanyak 182.500 kali.

Tabel 4. Perhitungan Jumlah Pengulangan Beban

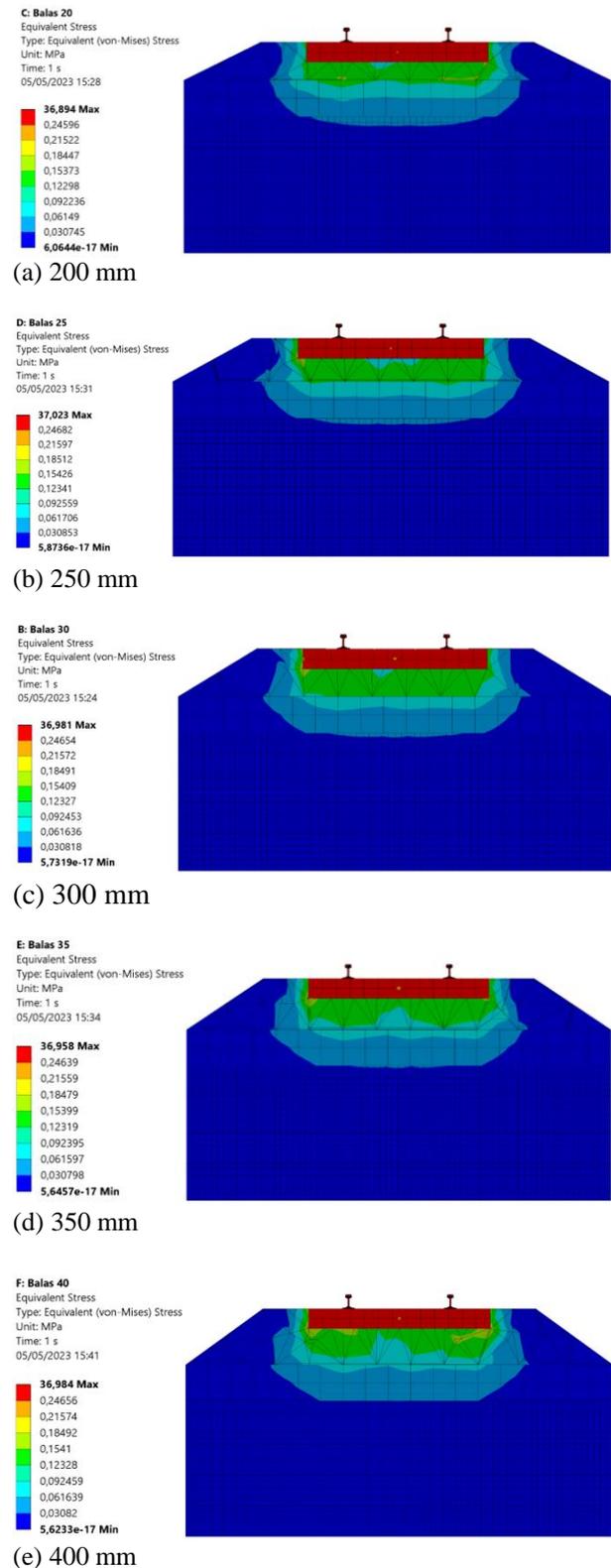
Parameter	Nilai
Jumlah rangkaian kereta api per hari	50 rangkaian
Jumlah kereta tiap rangkaian	10 kereta
Jumlah pengulangan per hari	500 kali
Jumlah pengulangan per tahun (365 hari)	182.500 kali

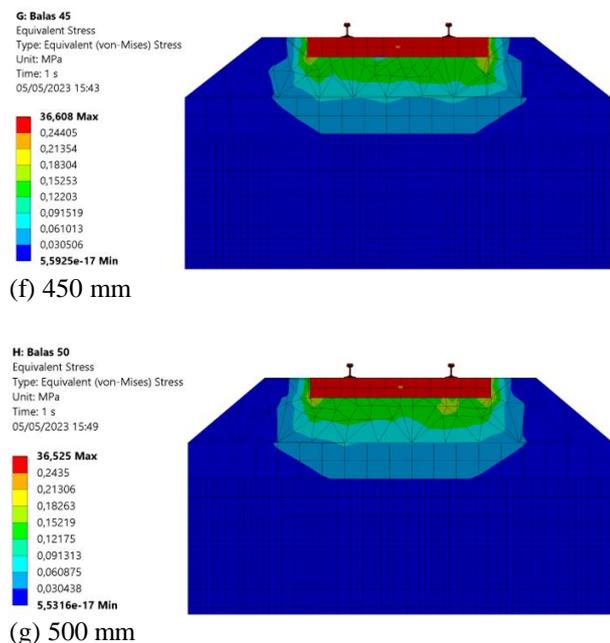
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tegangan

Gambar 3 menunjukkan sebaran tegangan ekuivalen pada seluruh lapisan struktur jalan kereta api. Dapat terlihat bahwa pada ketebalan balas 20 cm, tegangan

yang diterima oleh lapisan tanah dasar masih cukup tinggi dan semakin berkurang seiring dengan penambahan tebal balas.





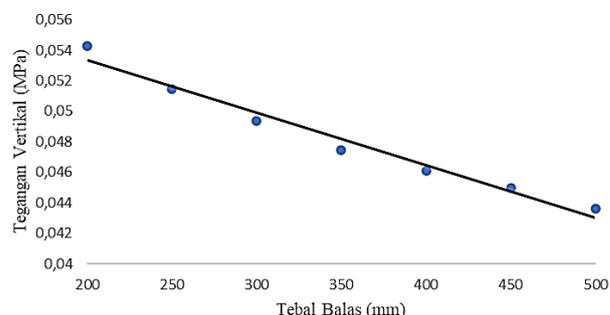
Gambar 3. Persebaran Tegangan Ekuivalen Pada Simulasi

Sedangkan tegangan tekan vertikal pada permukaan tanah dasar berdasarkan hasil simulasi ditampilkan dalam Gambar 4. Dari hasil tersebut, diketahui bahwa tegangan tekan vertikal tertinggi yang diterima oleh tanah dasar terjadi pada model simulasi dengan tebal balas 200 mm, yaitu sebesar 0,0543 MPa, diikuti dengan model dengan tebal balas 250 mm sebesar 0,0515 MPa dan berturut-turut hingga model dengan tebal balas 500 mm sebesar 0,0436 MPa. Gambar 4 menunjukkan bahwa seluruh nilai tegangan tekan vertikal berubah secara linier, sehingga dari grafik

tersebut dapat dicari persamaan regresi liniernya yang ditampilkan pada Persamaan 5.

$$Y = -3E^{-05}X + 0,0603 \quad (5)$$

Dengan Y adalah tegangan tekan vertikal (MPa) dan X adalah tebal balas (mm).



Gambar 4. Hubungan Tebal Balas dan Tegangan Tekan Vertikal Pada Permukaan Tanah Dasar

3.2 Usia Layan Tanah Dasar

Usia layan tanah dasar yang didapatkan berdasarkan hasil perhitungan dari Persamaan (3) dan Persamaan (4) ditampilkan dalam Tabel 5. Dari hasil perhitungan tersebut dapat terlihat bahwa ketebalan balas 200 mm memberikan usia layan terhadap tanah dasar 43,7 tahun. Sedangkan tebal balas sesuai dengan PM 60 Tahun 2012, yaitu 300 mm, menunjukkan dapat memberikan usia layan tanah dasar lebih dari 62 tahun. Sedangkan balas dengan ketebalan 500 mm dapat memberikan usia layan bagi tanah dasar mencapai lebih dari 98 tahun.

Tabel 5. Hasil Perhitungan Usia Layan Tanah Dasar

Tebal Balas (mm)	Tegangan Tekan Vertikal (MPa)	Tegangan Tekan Vertikal (psi)	Jumlah Pengulangan Beban yang Diijinkan	Usia Layan Tanah Dasar (Tahun)
200	5,43E-02	7,872227526	7978162,268	43,71596
250	5,15E-02	7,463800518	9734165,281	53,33789
300	4,94E-02	7,160381022	11365797,77	62,27834
350	4,75E-02	6,88640424	13148233,32	72,04511
400	4,61E-02	6,683641116	14700511,52	80,55075
450	4,50E-02	6,521198556	16115094,05	88,30189
500	4,36E-02	6,324672066	18065729,64	98,9903

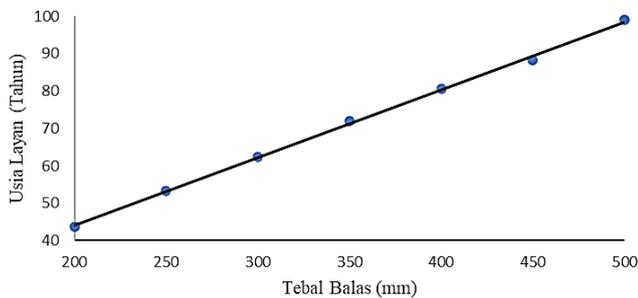
Dari tabel tersebut dapat terlihat bahwa usia layan tanah dasar semakin tinggi seiring dengan kenaikan tebal balas. Hasil tersebut kemudian ditampilkan dalam bentuk tabel pada Gambar 5 untuk kemudian dapat diketahui persamaan regresi liniernya yang ditunjukkan pada Persamaan 6.

$$Y = 0,1814X + 7,8113 \quad (6)$$

Dengan Y adalah usia layan tanah dasar dalam satuan tahun dan X adalah tebal balas dalam milimeter.

Dari Gambar 4 dan Gambar 5 dapat diketahui bahwa semakin tebal lapisan balas akan menyebabkan tegangan tekan vertikal yang diterima oleh tanah dasar semakin kecil dikarenakan persebaran tegangan yang disebabkan oleh beban kereta yang secara langsung oleh rel didistribusikan secara merata dan nilainya akan semakin mengecil hingga mencapai tanah dasar. Hal ini

pula yang kemudian dapat memperpanjang usia layan tanah dasar. Hasil penelitian oleh Setiawan [18] turut menunjukkan bahwa penambahan ketebalan lapisan sub-balas pada struktur jalan kereta api memperpanjang usia layan tanah dasar. Dengan ketebalan sub-balas 0 cm didapatkan usia layan tanah dasar adalah 1,83 tahun dan berturut-turut naik hingga 13 tahun dengan ketebalan sub-balas 30 cm.



Gambar 5. Hubungan Tebal Balas dan Usia Layan Tanah Dasar

Dengan begitu, menjaga ketebalan struktur lapisan jalan kereta api khususnya lapisan balas menjadi sangat penting agar dapat mengurangi kemungkinan kerusakan pada tanah dasar yang dapat berakibat pada berkurangnya usia layan tanah dasar. Jika usia layan tanah dasar berkurang, maka perawatannya akan lebih rumit dikarenakan harus mengangkat struktur lapisan-lapisan di atasnya terlebih dahulu. Hal ini juga dapat mengakibatkan gangguan perjalanan kereta api selama perbaikan tanah dasar. Sehingga apabila sudah diketahui usia layan tanah dasarnya, perbaikan tanah dasar dapat dijadwalkan tanpa menunggu kerusakan pada tanah dasar.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini mencari tahu pengaruh dari ketebalan balas bagi usia layan tanah dasar. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa tegangan tekan vertikal pada tanah dasar semakin mengecil seiring dengan bertambahnya ketebalan balas. Pada ketebalan balas 200 mm, didapatkan tegangan tekan vertikal terbesar yang terjadi pada tanah dasar adalah 0,0543 MPa. Sedangkan berdasarkan PM 60 Tahun 2012, tebal balas minimal adalah 300 mm dan didapatkan tegangan tekan vertikal terbesarnya adalah 0,0494 MPa, sedangkan pada ketebalan 500 mm tegangan tekan vertikalnya semakin turun hingga 0,0436 MPa. Penurunan tegangan terjadi secara linier sehingga didapatkan persamaan regresi liniernya $Y = -3E^{-05}X + 0,0603$. Selain itu, semakin tebal lapisan balas akan berdampak pada umur layan tanah dasar yang menjadi semakin panjang. Pada ketebalan balas 200 mm usia layan tanah dasar mencapai 43,7 tahun sedangkan pada ketebalan 300 mm usia layan tanah

dasar adalah 62,27 tahun. Sementara itu, dengan ketebalan balas terbesar pada simulasi, yaitu 500 mm, usia layan tanah dasar mencapai 98,99 tahun. Kenaikan usia layan tanah dasar terjadi secara linier, sehingga didapatkan persamaan regresi liniernya $Y = 0,1814X + 7,8113$ [Ma3]. Hasil penelitian ini menunjukkan pentingnya menjaga ketebalan balas untuk mengurangi potensi kerusakan pada tanah dasar serta untuk memperpanjang usia layan tanah dasar. Sehingga diharapkan stakeholder terkait dapat memperhatikan ketebalan balas pada tiap lintas jalur kereta api.

Untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan analisis untuk mengamati parameter lainnya, seperti penurunan tanah dasar serta adanya penambahan kondisi suhu, curah hujan, dan sebagainya. Selain itu, pada penelitian ini, struktur jalan kereta api hanya dievaluasi dengan beban statik. Lebih lanjut diperlukan analisis untuk mengamati kondisi struktur dengan beban dinamis sehingga pola tekanan vertikal, penurunan, maupun parameter lainnya dapat terlihat secara lebih jelas. Pengujian skala laboratorium juga diperlukan untuk memvalidasi hasil pengukuran.

REFERENSI

- [1] Badan Pusat Statistik, "Jumlah Penumpang dan Barang Berdasarkan Moda Transportasi Kereta Api," 2023. [Online]. Available: <https://www.bps.go.id/indicator/17/2051/1/jumlah-penumpang-berdasarkan-moda-transportasi-kereta-api.html>.
- [2] PT. Kereta Api Indonesia, "Annual Report 2021 PT Kereta Api Indonesia," 2022.
- [3] Kementerian Perhubungan, "Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KP 2128 Tahun 2018," *Peratur. Menteri Perhub. Republik Indones. Nomor KP 2128 Tahun 2018*, pp. 1–8, 2018.
- [4] C. Esveld, *Modern Railway Tracks*, vol. 1, no. 1. 2001.
- [5] G. Michas, "Slab Track Systems for High-Speed Railways," *MSc Thesis*, p. 95, 2012.
- [6] F. G. Praticò and M. Giunta, "Proposal of a Key Performance Indicator for Railway Track Based on LCC and RAMS Analyses," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 2, p. 04017104, 2018, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001422.
- [7] Kementerian Perhubungan, "Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api," *PM. No. 60 Tahun 2012*, pp. 1–57, 2012.

- [8] Arbie, "Evaluasi Kelaikan Jalan Rel Kereta Api Lintas Bogor-Sukabumi," *J. Penelit. Transp. Darat*, vol. 17, no. 1, pp. 55–64, 2015. Design," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 173–192, 2022.
- [9] J. G. Rose and R. R. Souleyrette, "Kentrack 4.0: A Railway Trackbed Structural Design Program," pp. 1–14, 2016.
- [10] K. Usman, M. Burrow, and G. Ghataora, "Railway track subgrade failure mechanisms using a fault chart approach," *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 547–555, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.060.
- [11] A. Kalliainen, P. Kolisoja, and A. Nurmikolu, "3D Finite Element Model as a Tool for Analyzing the Structural Behavior of a Railway Track," *Procedia Eng.*, vol. 143, no. Ictg, pp. 820–827, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.133.
- [12] M. Shahraki, C. Warnakulasooriya, and K. J. Witt, "Numerical study of transition zone between ballasted and ballastless railway track," *Transp. Geotech.*, vol. 3, pp. 58–67, 2015, doi: 10.1016/j.trgeo.2015.05.001.
- [13] H. I. Prabawa and S. P. Primadiyanti, "The Effect of Ballast And Sub-Ballast Thickness Variation on Subgrade," in *10th International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA 2022)*, 2022.
- [14] D. M. Setiawan, "Evaluation of Indonesia's Conventional Track Performance Based on Mechanistic Approach," *Int. J. Sustain. Constr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 5, pp. 185–201, 2022, doi: 10.30880/ijscet.2022.13.01.017.
- [15] PT. Industri Kereta Api, "Kereta Kelas Eksekutif Stainless Steel," 2017. <https://www.inka.co.id/product/view/72>.
- [16] S. A. P. Rosyidi, *Rekayasa Jalan Kereta Api: Tinjauan Struktur Jalan Rel*. Yogyakarta: Lembaga Penelitian, Publikasi dan Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Yogyakarta (LP3M-UMY), 2015.
- [17] J. G. Rose, S. Liu, and R. R. Souleyrette, "Kentrack 4.0: A railway trackbed structural design program," in *2014 Joint Rail Conference, JRC 2014*, 2014, doi: 10.1115/JRC2014-3752.
- [18] D. M. Setiawan, "Sub-grade Service Life and Construction Cost of Ballasted, Asphaltic Underlayment and Combination Rail Track