



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Kajian Penurunan Badan Jalan Kereta Api Km. 139+800 – Km. 141+000 Antara Tulungbuyut – Negeri Agung Lintas Tarahan – Tanjungenim.

Amril Ma'ruf Siregar^{1,*}, Nur Arifaini¹, Ahmad Herison¹, Ika Kustiani²

¹Prodi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jalan Soemantri Brojonegoro Gedung Meneng Kota Bandar Lampung

²Prodi Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jalan Soemantri Brojonegoro Gedung Meneng Kota Bandar

INFORMASI ARTIKEL

ABSTRAK

Riwayat artikel:

Diterima 12/01/2026

Direvisi 15/04/2026

Kata kunci:

Penurunan Tanah

Finite Element

Retaining Wall

Perbaikan Drainase

Permasalahan penyebab penurunan tanah (*settlement*) pada jalur kereta lintas Tarahan–Tanjungenim, khususnya segmen Km. 139+800–Km. 141+000 antara Tulung Buyut–Negeri Agung adalah terjadinya penurunan daya dukung tanah dasar akibat buruknya sistem drainase serta peningkatan beban dinamis berulang dari rangkaian Babaranjang. Pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan yaitu metode deskriptif–kuantitatif dengan rancangan studi kasus berdasarkan hasil survey dan investigasi di lapangan. Hasil uji sondir menunjukkan nilai *cone resistance* di lokasi penelitian adalah sebesar 14–66 kg/cm². Berdasarkan hasil perhitungan curah hujan rancangan dengan kala ulang 10 tahun, diperoleh intensitas sebesar 511,18 mm

Simulasi perhitungan kestabilan dilakukan dengan metode *Finite Element* memperlihatkan bahwa kondisi eksisting memiliki FS sebesar 1,08 dalam kondisi statik dan 0,90 dalam kondisi dinamik. Hal ini menunjukkan ketidakstabilan signifikan pada saat curah hujan tinggi atau beban kereta berat melintas. Setelah dilakukan perkuatan dengan menggunakan konstruksi *retaining wall* dan perbaikan drainase, hasil pemodelan menunjukkan peningkatan SF menjadi 2,50 (statik) dan 1,93 (dinamik), dengan penurunan vertikal berkurang hingga 4,2 cm. Pada kasus *mud pumping*, simulasi menunjukkan perbaikan menggunakan sistem *cross drain* dan *long drain* mampu menekan penurunan hingga 3,1 cm dan meningkatkan faktor keamanan menjadi 1,75. Temuan ini membuktikan bahwa melalui kombinasi perkuatan mekanik dan perbaikan sistem drainase efektif dalam meningkatkan stabilitas badan jalan KA

1. Pendahuluan

Stabilitas tanah dasar (*subgrade*) merupakan faktor krusial dalam menunjang kinerja dan keselamatan infrastruktur transportasi, khususnya pada jalur kereta api yang menanggung beban dinamis secara berulang. Salah satu permasalahan geoteknik yang sering terjadi adalah penurunan tanah (*settlement*) yang mengakibatkan deformasi lintasan rel dan berpotensi menimbulkan gangguan operasional. Kondisi tersebut terlihat jelas pada segmen Km. 139+800 – Km. 141+000

antara Tulung Buyut – Negeri Agung, bagian dari jalur vital lintas Tarahan–Tanjungenim yang menjadi rute utama pengangkutan batu bara Babaranjang. Fenomena penurunan di lokasi ini menandai pentingnya analisis mendalam terhadap interaksi antara karakteristik tanah lempung lunak, sistem drainase, dan beban siklik jangka panjang dari kereta berat.

Berbagai studi sebelumnya telah membahas metode stabilisasi subgrade dan perbaikan tanah lunak menggunakan pendekatan geoteknik modern, termasuk

* Penulis korespondensi.

E-mail: amrilmarufs@gmail.com

penggunaan material geosintetik dan sistem drainase vertikal. Namun, kajian yang secara komprehensif mengintegrasikan kondisi geologi lokal tanah tropis residu, karakteristik beban dinamis Babaranjang, serta simulasi alternatif penanganan yang responsif terhadap kondisi eksisting masih terbatas, terutama di wilayah Sumatera Selatan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku tanah lunak akibat beban dinamis jangka panjang kereta Babaranjang serta mengevaluasi efektivitas beberapa alternatif perkuatan tanah dan sistem drainase dalam menurunkan akumulasi tekanan pori. Kajian ini diharapkan menghasilkan model penanganan penurunan tanah yang responsif terhadap kondisi aktual lapangan dan dapat direplikasi pada wilayah lain dengan karakteristik serupa. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi sebagai inovasi teknologi perkeretaapian berbasis desain terukur dan prediktif.

Penurunan tanah (*settlement*) merupakan salah satu fenomena geoteknik yang memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan dan keandalan infrastruktur transportasi, khususnya jalur kereta api. Terzaghi (1943) mengklasifikasikan penurunan menjadi tiga kategori utama: penurunan segera (*immediate settlement*), konsolidasi primer, dan konsolidasi sekunder. Pada tanah lempung lunak, penurunan umumnya didominasi oleh proses konsolidasi akibat lambatnya disipasi tekanan air pori. Dalam konteks rel kereta api, Selig dan Waters (1994) menekankan bahwa beban berulang dari lalu lintas kereta menimbulkan penurunan kumulatif bahkan setelah konsolidasi primer selesai, terutama pada tanah jenuh berpermeabilitas rendah. Fenomena ini menunjukkan pentingnya pendekatan geoteknik yang komprehensif untuk memahami interaksi antara beban dinamis, karakteristik tanah, dan kondisi drainase terhadap perilaku penurunan jangka Panjang

Upaya stabilisasi tanah dasar telah banyak dilakukan melalui berbagai metode rekayasa. Bowles (1997) menjelaskan bahwa teknik stabilisasi dapat berupa pencampuran kimiawi, perkuatan mekanis, maupun penggunaan material sintetis. Di antara berbagai inovasi, penggunaan geosintetik menjadi salah satu metode yang paling adaptif. Koerner (2012) menyebutkan bahwa geosintetik berfungsi sebagai pemisah, penguat, dan sistem drainase yang efektif. Han dan Yang (2013) membuktikan bahwa pemasangan geosintetik di bawah lapisan ballast mampu mengurangi penurunan tanah hingga 60% pada kondisi lempung lunak. Selain perkuatan tanah, sistem drainase juga memainkan peran kunci dalam mempercepat konsolidasi. Terzaghi dan Peck (1967) menekankan bahwa sistem drainase yang baik mempercepat disipasi tekanan air pori, sementara Zhang et al. (2017) menyoroti bahwa kombinasi drainase aktif dan perkuatan subgrade menghasilkan peningkatan signifikan dalam stabilitas rel. Dari aspek struktural,

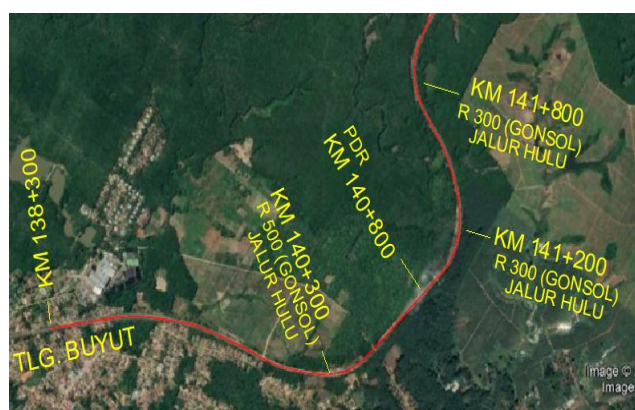
Indraratna et al. (2011) serta Shih et al. (2018) mengembangkan teknologi *under sleeper pads* dan *track slab system* yang terbukti efektif mendistribusikan beban vertikal serta mengurangi deformasi diferensial. Pendekatan-pendekatan tersebut menunjukkan adanya pergeseran paradigma dari metode pemeliharaan reaktif menuju desain preventif berbasis rekayasa material dan sistem struktur.

2. Metodologi

2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif dengan rancangan studi kasus pada lokasi jalur kereta api Km. 139+800 – Km. 141+000 antara Tulung Buyut – Negeri Agung, lintas Tarahan–Tanjungenim. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis integratif antara kondisi aktual lapangan, data geoteknik, dan simulasi numerik untuk memahami perilaku penurunan tanah akibat beban dinamis Babaranjang. Penelitian bersifat terapan dengan fokus pada pengembangan alternatif penanganan penurunan tanah berbasis data empiris dan model mekanistik.

Lokasi penelitian ditetapkan berdasarkan laporan Balai Teknik Perkeretaapian Wilayah Sumatera Bagian Selatan (BTP Sumbagsel) dan PT KAI Divre IV Tanjungkarang yaitu 139+800 – Km. 141+000 antara Tulung Buyut – Negeri Agung dimana hasil identifikasi menunjukkan bahwa segmen ini sebagai area dengan penurunan tanah signifikan dan risiko tinggi terhadap kestabilan lintasan. Penelitian dilaksanakan selama empat bulan, dari Agustus hingga November 2025, bertepatan dengan musim hujan yang berpengaruh terhadap akumulasi tekanan air pori dan perubahan geometri rel.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian (Sumber : Google Earth)

Instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi peralatan pengukuran topografi (*Total Station*), serta perangkat drone untuk foto udara. Data hasil pengujian

diperoleh dari data sekunder berupa data hasil penyelidikan tanah (sondir) dan data hujan dari stasiun hujan terdekat yaitu stasiun hujan Blambangan Umpu. Prses analisis data dilakukan dengan mengolah hasil pengukuran dan parameter teknis tanah dan kondisi drainase aktual. Validitas data diperoleh melalui triangulasi metode, yaitu membandingkan hasil uji lapangan, pengujian laboratorium, dan data sekunder dari PT KAI serta BTP Sumbagsel. Penulisan bab dan sub-bab dalam artikel ini dapat lebih mudah menggunakan “*heading 1*” (untuk bab), dan “*heading 2*” untuk sub-bab. Dapat dilihat bahwa penulisan bab dan sub-bab menggunakan rata kiri dan *sentence case*.

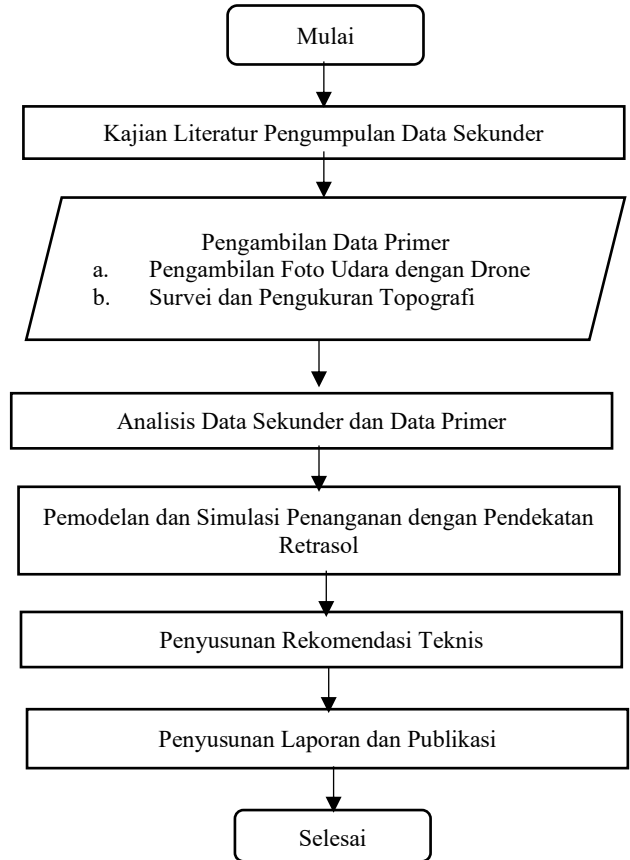
2.2. Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) untuk memodelkan perilaku tanah terhadap beban dinamis dan evaluasi stabilitas lereng (Amalia,2021). Analisis meliputi pengolahan data topografi untuk menentukan perubahan elevasi, perhitungan konsolidasi primer dan sekunder berdasarkan teori Terzaghi, serta simulasi variasi perkuatan dan drainase menggunakan parameter hasil uji tanah. Pemodelan dilakukan pada potongan melintang lereng dengan kondisi paling kritis, kemudian diuji secara iteratif untuk memperoleh desain yang paling optimal dan stabil.

Data dikumpulkan melalui tiga sumber utama: (1) data primer hasil survei topografi, geoteknik, dan foto udara; (2) data sekunder berupa laporan kondisi subgrade, riwayat pemeliharaan rel, peta geologi, serta data hidrologi dan curah hujan; dan (3) studi literatur yang mencakup teori konsolidasi Terzaghi (1943), konsep stabilisasi tanah Bowles (1997), dan aplikasi geosintetik Koerner (2012). Prosedur pengumpulan dilakukan secara sistematis melalui tahapan observasi, pengujian, dan dokumentasi visual untuk memastikan konsistensi hasil.

Hasil analisis teknis selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan rekomendasi desain penanganan penurunan tanah dengan pendekatan *Railway Embankment Treatment Solution (Retasol)*, yang mencakup perkuatan geoteknik, perbaikan drainase, dan optimalisasi struktur pendukung lintasan. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan solusi teknis yang efektif, aplikatif, serta dapat direplikasi pada kondisi serupa di wilayah lain.

Gambar di bawah ini menunjukkan diagram alir pelaksanaan penelitian Kajian Penurunan Badan Jalan Kereta Api Km. 139+800 – Km. 141+000 Antara Tulungbuyut – Negeri Agung Lintas Tarahan – Tanjungenim.



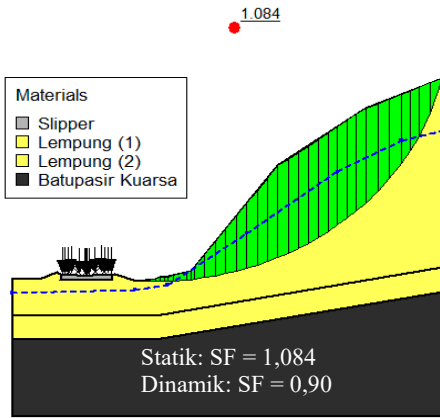
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil perhitungan dan analisis data hidrologi menunjukkan bahwa daerah penelitian memiliki curah hujan tahunan tinggi, mencapai 3.000–3.500 mm/tahun di bagian barat dan 2.000–3.000 mm/tahun di bagian timur. Analisis data curah hujan maksimum (2004–2023) dari Stasiun Blambangan Umpu dan Martapura menunjukkan nilai puncak sebesar 504 mm dan 502,8 mm, dengan distribusi yang paling sesuai mengikuti Log Pearson Tipe III, sebagaimana dianalisis melalui uji *skewness* dan *kurtosis* (Sri Harto, 1989). Berdasarkan hasil perhitungan curah hujan rancangan dengan kala ulang 10 tahun, diperoleh intensitas sebesar 511,18 mm di Stasiun Blambangan Umpu dan 453,10 mm di Stasiun Martapura. Hasil ini menjadi dasar dalam menentukan dimensi drainase permukaan dan perencanaan sistem drainase di lokasi penelitian.

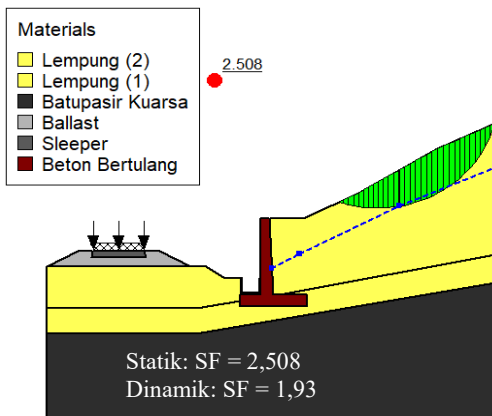
Uji mekanika tanah lapangan menunjukkan bahwa tanah di lokasi penelitian didominasi oleh lempung lunak hingga sedang dengan nilai *cone resistance (qc)* antara 14–66 kg/cm² pada kedalaman 1–3 meter. Nilai ini menunjukkan konsistensi lunak sampai sangat kaku di bawah permukaan, dengan lapisan atas yang sangat rentan terhadap deformasi. Simulasi kestabilan lereng menggunakan metode Finite

Element (FEM) memperlihatkan bahwa kondisi eksisting memiliki faktor keamanan (SF) sebesar 1,084 dalam kondisi statik dan 0,90 dalam kondisi dinamik, menunjukkan ketidakstabilan signifikan pada saat curah hujan tinggi atau beban kereta berat melintas. Hasil Pemodelan kondisi eksisting dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 3. Analisis Stabilitas Lereng Kondisi Eksisting

Setelah dilakukan desain *retaining wall* dan perbaikan drainase, hasil pemodelan menunjukkan peningkatan SF menjadi 2,508 (statik) dan 1,93 (dinamik), dengan penurunan vertikal berkurang hingga 4,2 cm. Pada kasus *mud pumping*, simulasi menunjukkan perbaikan menggunakan sistem *cross drain* dan *long drain* mampu menekan penurunan hingga 3,1 cm dan meningkatkan faktor keamanan menjadi 1,75.



Gambar 4. Analisis Stabilitas Lereng dengan Perkuatan

Perhitungan debit saluran drainase berdasarkan intensitas curah hujan kala ulang lima tahunan menghasilkan nilai debit 0,467 m³/dtk, sementara kapasitas saluran *U-ditch* berukuran 0,6 × 0,6 m mencapai 0,672 m³/dtk, sehingga desain dinilai aman. Perbaikan sistem drainase ini tidak hanya mempercepat

disipasi air pori, tetapi juga mengurangi risiko erosi ballast dan kerusakan subgrade pada lintasan rel.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penurunan tanah dan *mud pumping* pada jalur kereta lintas Tarahan–Tanjungenim disebabkan oleh kombinasi antara kondisi tanah lempung tropis berplastisitas tinggi, sistem drainase yang tidak efektif, dan pembebanan siklik dari rangkaian Babaranjang. Temuan ini sejalan dengan teori konsolidasi Terzaghi (1943) yang menjelaskan bahwa tanah berpermeabilitas rendah akan mengalami disipasi tekanan air pori secara lambat, mengakibatkan deformasi jangka panjang. Kondisi lapangan memperkuat hasil studi Indraratna dan Salim (2005) bahwa beban dinamis berulang dapat mempercepat degradasi subgrade melalui penurunan modulus elastisitas dan kerusakan struktur mikro tanah

Efektivitas perkuatan tanah menggunakan retaining wall pada lokasi penelitian sejalan dengan penelitian Han dan Yang (2013) yang menemukan bahwa sistem geosintetik dan perkuatan struktural dapat mengurangi penurunan hingga 60% pada tanah lempung lunak. Hasil simulasi FEM dalam penelitian ini menunjukkan angka peningkatan keamanan lereng lebih dari 80% setelah pemasangan dinding penahan tanah dan sistem drainase terpadu, membuktikan bahwa pendekatan integratif antara stabilisasi mekanik dan perbaikan hidrologi lebih efektif dibandingkan metode tunggal. Hal ini juga sejalan dengan hasil Zhang et al. (2017) yang menekankan pentingnya kombinasi perkuatan subgrade dan drainase aktif untuk mempercepat pemulihan stabilitas tanah

4. Kesimpulan

Penurunan tanah (*settlement*) pada jalur kereta lintas Tarahan–Tanjungenim (Km. 139+800–Km. 141+000) disebabkan oleh kombinasi tanah lempung lunak tropis, curah hujan tinggi, dan beban dinamis berulang dari rangkaian Babaranjang. Nilai *cone resistance (qc)* berkisar 14–66 kg/cm², menunjukkan kondisi konsistensi lunak–sedang dengan daya dukung rendah. Faktor keamanan (*safety factor*) eksisting sebesar 1,08 (statik) dan 0,90 (dinamik), meningkat menjadi 2,50 (statik) dan 1,93 (dinamik) setelah penerapan sistem *retaining wall* dan drainase terpadu. Penurunan vertikal berkurang lebih dari 50%, membuktikan efektivitas desain yang dilaksanakan

Ucapan terima kasih

Ucapan terima kasih diucapkan kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah mendanai kegiatan penelitian ini melalui skema Dipa FT TA 2025.

Daftar Pustaka

- B. Indraratna and W. Salim, "Mechanics of ballasted rail tracks: A geotechnical perspective," in *Advances in Rail Geotechnology*, B. Indraratna and W. Salim, Eds. Leiden, Netherlands: CRC Press/Balkema, 2005, pp. 1–36.
- B. Indraratna, W. Salim, and C. Rujikiatkamjorn, *Advanced Rail Geotechnology - Ballasted Track*. Leiden, Netherlands: CRC Press/Balkema, 2011.
- R. M. Koerner, *Designing with Geosynthetics*, 6th ed. Bloomington, IN, USA: Xlibris Corporation, 2012.
- E. T. Selig and J. M. Waters, *Track Geotechnology and Substructure Management*. London, U.K.: Thomas Telford, 1994.
- J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.
- J. Han and Y. Yang, "Influence of geosynthetic reinforcement on the performance of ballasted track over soft clay," *Geotextiles and Geomembranes*, vol. 36, pp. 33–40, 2013.
- J.-Y. Shih, D.-H. Tsai, and C.-H. Chen, "Performance evaluation of under sleeper pads and track slab systems in high-speed railways," *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, vol. 144, no. 6, 2018, Art. no. 04018024.
- M. E. Z. Amalia, F. H. Latief, and R. P. S. Hadi, "Finite Element Analysis of Railway Embankment Stability Under Cyclic Loading," *International Journal of Geomate*, vol. 20, no. 81, pp. 173–180, May 2021.
- S. Harto, *Analisis Hidrologi*. Yogyakarta, Indonesia: BPFE-Yogyakarta, 1989.
- K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1943.
- K. Terzaghi and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1967.
- Y. Zhang, M. A. Ismail, and Z. Wang, "Combined effect of subgrade reinforcement and drainage on railway track performance," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 143, no. 5, 2017, Art. no. 04017007.