

Evaluasi Penurunan Jalur Kereta Api Lintas Cikampek – Cirebon Berdasarkan Penyelidikan Tanah CPT dengan Plaxis 3D

ADI AKBAR¹, DESTI SANTI PRATIWI², DICKY ARISIKAM³

1. Institut Teknologi Nasional Bandung

2. Institut Teknologi Nasional Bandung

3. Lixicon Indonesia

Email : adi.akbar@mhs.itenas.ac.id

ABSTRAK

Segmen jalur rel Cikampek–Cirebon mengalami penurunan berulang akibat kondisi tanah dasar yang didominasi lempung lunak, sehingga diberlakukan perbaikan sementara dan penurunan kecepatan menjadi 80 km/jam. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi besarnya penurunan, faktor keamanan, serta waktu konsolidasi pada kondisi eksisting tanpa perkuatan, baik akibat beban kereta maupun gempa. Analisis dilakukan dengan metode numerik menggunakan PLAXIS 3D, dengan parameter tanah hasil korelasi CPT. Beban kereta dimodelkan sebagai beban statis ekuivalen dengan pendekatan Profillidis pada kecepatan 80 km/jam, sedangkan beban gempa dimodelkan secara pseudostatik. Hasil analisis menunjukkan penurunan sebesar 0,7031 m dengan waktu konsolidasi sekitar 1265 hari, serta faktor keamanan hanya 1,264, masih di bawah syarat minimum regulasi. Untuk kondisi gempa, faktor keamanan tidak memenuhi kriteria bahkan menunjukkan potensi keruntuhan. Dengan demikian, kondisi eksisting tetap tidak aman dan memerlukan metode perbaikan tanah yang lebih efektif.

Kata kunci: Penurunan Tanah Lunak, Plaxis 3D, Kereta Api

1. PENDAHULUAN

Segmen jalur rel Cikampek–Cirebon mengalami penurunan berulang, sehingga dilakukan perbaikan sementara dan pembatasan kecepatan 80 km/jam untuk menjaga keselamatan serta menghindari kecelakaan. Kondisi ini dipengaruhi oleh tanah lunak di lokasi penelitian yang umumnya memiliki kadar air tinggi, daya dukung rendah, dan membutuhkan waktu konsolidasi yang lama, sehingga deformasi akan terus berulang hingga dilakukan penanganan permanen. Penelitian ini bertujuan mengkaji besarnya penurunan pada kondisi eksisting dengan kecepatan operasi yang telah diturunkan menjadi 80 km/jam, untuk mengetahui kesesuaiannya dengan regulasi yang berlaku serta memperkirakan besarnya penurunan dan lama konsolidasi yang terjadi. Analisis dilakukan menggunakan pemodelan numerik PLAXIS 3D dengan parameter hasil korelasi data penyelidikan tanah (CPT). Pembebanan kereta dimodelkan sebagai beban statis menggunakan pendekatan Profillidis dengan mempertimbangkan pengaruh kecepatan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini mengevaluasi kondisi eksisting jalur rel lintas Cikampek–Cirebon pada kecepatan 80 km/jam yang terdampak penurunan berulang akibat tanah lunak. Data hasil penyelidikan tanah

(CPT) dikorelasikan untuk memperoleh parameter analisis, lalu dimodelkan dengan PLAXIS 3D menggunakan geometri lapangan. Pembebanan kereta direpresentasikan sebagai beban statis dengan pendekatan Profillidis pada 80 km/jam. Hasil analisis berupa penurunan, faktor keamanan dan waktu konsolidasi kemudian dibandingkan dengan regulasi operasi dan persyaratan geoteknik yang berlaku.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Parameter Tanah

Parameter tanah diperoleh dari hasil CPT yang dikorelasikan dengan studi literatur seperti Bowles (1988), serta Ameratunga (2016). Sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1**

Table 1 Parameter Tanah *Existing*

	Tanah <i>Existing</i>										Unit
Jenis Tanah	Clay (Lapis 1)	Clay (Lapis 2)	Clay (Lapis 3)	Sand (Lapis 4)	Clay (Lapis 5)	Clay (Lapis 6)	Sand (Lapis 7)	Clay (Lapis 8)	Sandy Silt (Lapis 9)	Sand (Lapis 10)	-
Konsistensi Tanah	Very Soft	Stiff	Very Soft	Very Loose	Very Soft	Very Soft	Loose	Very Stiff	Medium Dense	Dense	-
Soil Model	Soft Soil	Soft Soil	Soft Soil	Hardening Soil	Soft Soil	Soft Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	Hardening Soil	-
Drainage Type	UD (A)	UD (A)	UD (A)	D	UD (A)	UD (A)	D	UD (A)	D	Drained	-
Kedalaman	0 - 1,2	1,2 - 1,4	1,4 - 2,4	2,4 - 2,6	2,6 - 4,4	4,4 - 5,8	5,8 - 6	6 - 12,8	12,8 - 13,8	13,8 - 15,4	m
qc	0,14	1,47	0,27	1,77	0,56	1,32	3,43	3,81	9,71	15,38	-
Fr	5,17	0	26,25	1,11	14,34	12,6	2	10,24	5,61	2,15	-
γ Unsat	16	17	13	17	13	13	17	17	15	17	kN/m ²
γ Sat	17	18	15	19	15	15	19	18	17	19	kN/m ²
E'	-	-	-	7060	-	-	12000	20000	20000	25000	kN/m ²
Eoed	-	-	-	7060	-	-	12000	20000	20000	25000	kN/m ²
Eur	-	-	-	21180	-	-	36000	60000	60000	75000	kN/m ²
λ^*	0,119	0,011	0,062	-	0,03	0,013	-	-	-	-	-
k^*	0,011	0,001	0,006	-	0,003	0,001	-	-	-	-	-
Kx, Ky, Kz	0,0000864	8,64E-06	8,64E-06	0,864	8,64E-06	8,64E-06	0,864	8,64E-06	0,864	8,64E-06	m/day

3.2 Parameter Struktur Rel

Data struktur rel yang digunakan dalam analisis ini mengacu pada hasil studi terdahulu yaitu Koch & Ray, (2024) yang dapat dilihat pada **Tabel 2**. Parameter ballast yang digunakan mengacu pada hasil studi terdahulu Shahraki et al. (2014) yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Table 2 Parameter Rel dan Bantalan

<i>Cross Section (A)</i>	<i>Unit</i>	<i>Rail</i>	<i>Sleeper</i>
<i>Cross Section (A)</i>	m ²	0,0077	0,0513
<i>Unit Weight (γ)</i>	kN/m ³	78	25
<i>Young Modulus (E)</i>	kN/m ³	200000000	36000000
<i>Momen Inertia Around the Second Axis (I3)</i>	m ⁴	0,00003055	0,0253
<i>Momen Inertia Around the third Axis (I2)</i>	m ⁴	0,00000513	0,000245

(Sumber : Koch & Ray (2024))

Table 3 Parameter *Ballast*

	<i>Ballast</i>	<i>Unit</i>
<i>Material</i>	<i>Mohr Columb</i>	-
<i>Type</i>	<i>Drained</i>	-
γ Unsat	19	kN/m ³
γ Sat	21	kN/m ³
E _{eff}	300000	kN/m ³
V	0,3	kN/m ³
C _{eff}	30	kN/m ²
φ'	35	°
ψ	5	°

(Sumber: Shahraki et al. (2014))

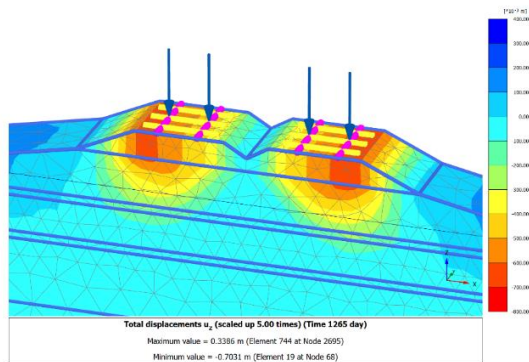
3.3 Pembebanan

Analisis pembebanan jalur rel mempertimbangkan beban mati dari komponen rel (rel, bantalan, ballast, dan lapisan di atas subgrade) serta beban hidup dari kereta api. Beban mati dihitung berdasarkan berat isi material sesuai PM 60/2012, sedangkan beban hidup didasarkan pada beban gandar maksimum 18 ton. Beban per roda dihitung sebagai setengah beban gandar, kemudian dikoreksi dengan faktor dinamis menggunakan persamaan Talbot dan Profillidis untuk merepresentasikan pengaruh kecepatan. Distribusi beban ke bantalan mengikuti pola Profillidis (2006), di mana beban dari roda tersebar ke beberapa bantalan dengan persentase tertentu, lalu dikonversi menjadi beban aksial per bantalan pada model. Kecepatan yang digunakan dilapangan yang telah diturunkan yaitu 80 km/jam didapatkan, hasil perhitungan pembebanan kereta menghasilkan reaksi maksimum sebesar 140,668 kN, atau setara 70,334 kN/m per roda. Analisis hanya menggunakan satu gandar representatif, mengacu pada Esveld (2001) dan Powrie et al. (2019) yang menjelaskan bahwa beban roda tidak bekerja serentak pada seluruh bantalan, melainkan diteruskan secara lokal dan bergantian seiring pergerakan kereta. Berdasarkan distribusi beban Profillidis (2006), bagian tengah gandar menanggung porsi terbesar sehingga nilai ini dipilih sebagai representasi kondisi paling kritis. Selain itu, pembebanan gempa menggunakan pendekatan pseudostatik dengan nilai PGA 0,4 g dilanjutkan mengkalikan amplifikasi situs, dan koefisien horizontal sehingga menghasilkan beban sebesar 0,180 g.

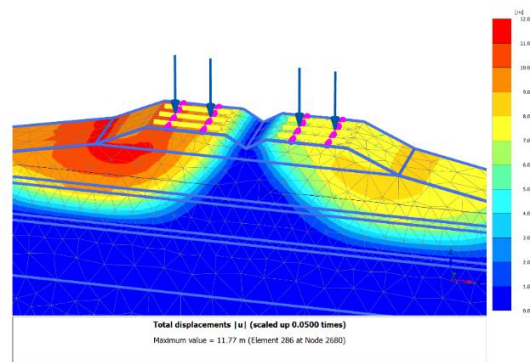
3.5 Analisis Penurunan

Berdasarkan peta geologi (Geologi ESDM, 1992) dan data sebaran tanah lunak (Badan Geologi, 2019), lokasi penelitian termasuk dalam tanah *alluvial* dengan dominasi lempung lunak. Hasil penyelidikan tanah (CPT) juga menunjukkan konsistensi tanah sangat lunak hingga kedalaman 6 m, yang menjadi penyebab utama terjadinya penurunan berulang. Hasil analisis menghasilkan penurunan sebesar 0,7031 m dengan waktu konsolidasi 1265 hari, serta faktor keamanan hanya 1,264. Nilai tersebut tidak memenuhi syarat regulasi, yaitu maksimum 20 cm untuk batas

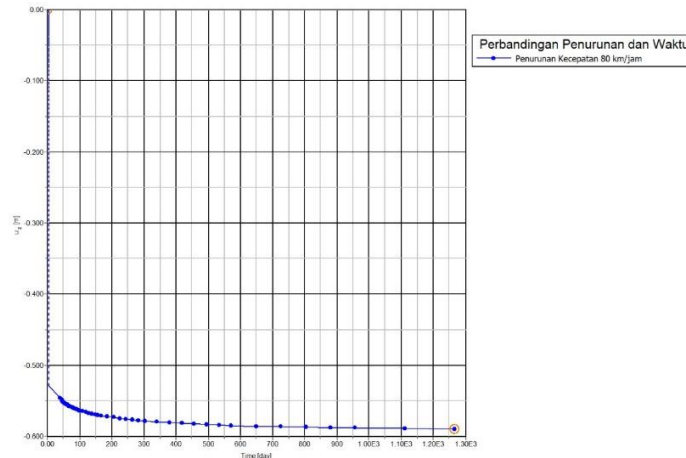
penurunan (PM 60/2012) dan minimum 1,5 untuk faktor keamanan (SNI 8460:2017). Meskipun telah dilakukan perbaikan sementara dan penurunan kecepatan operasi menjadi 80 km/jam, kondisi eksisting tetap tidak aman dan memerlukan perbaikan tanah yang lebih efektif. Analisis terhadap gempa dengan pendekatan *pseudostatik* juga menunjukkan hasil yang tidak sesuai dengan regulasi bahkan mengindikasikan potensi keruntuhan. Hasil analisis penurunan ditunjukkan pada **Gambar 1**, faktor keamanan pada **Gambar 2**, perbandingan penurunan dan waktu konsolidasi akibat pembebanan kereta api pada **Gambar 3**, serta rekapitulasi nilai faktor keamanan pada **Tabel 4**.



Gambar 1 Penurunan Existing Kecepatan 80 Km/jam



Gambar 2 Faktor Keamanan Existing Kecepatan 80 Km/jam



Gambar 3 Perbandingan Penurunan dan Waktu Pada Kondisi Existing

Table 4 Hasil Analisis *Existing* Faktor Keamanan

Keterangan	Hasil	Syarat	Keterangan
Faktor Keamanan <i>Existing</i> dengan Kecepatan 80 km/jam	1,179	1,5	Tidak Aman
Faktor Keamanan <i>Existing</i> Terhadap Gempa	<i>Collapse</i>	1,1	Tidak Aman

4. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan berulang pada lintas Cikampek–Cirebon disebabkan oleh kondisi tanah *alluvial* dengan dominasi lempung lunak hingga kedalaman ± 6 m (Geologi ESDM, 1992; Badan Geologi, 2019). Hal ini terbukti dari hasil CPT yang mengonfirmasi konsistensi tanah sangat lunak di lapangan. Analisis numerik dengan PLAXIS 3D pada kecepatan operasi 80 km/jam menghasilkan penurunan sebesar 0,7031 m dengan waktu konsolidasi sekitar 1265 hari, serta faktor keamanan hanya 1,264. Nilai ini jauh melampaui batas regulasi, yaitu $\leq 0,20$ m untuk penurunan (PM 60/2012) dan $\geq 1,5$ untuk faktor keamanan (SNI 8460:2017). Analisis gempa dengan pendekatan pseudostatik juga tidak memenuhi kriteria, bahkan menunjukkan potensi keruntuhan. Dengan demikian, meskipun telah dilakukan perbaikan sementara dan penurunan kecepatan operasi menjadi 80 km/jam, kondisi eksisting masih tidak aman dan berpotensi membahayakan keselamatan. Oleh karena itu, diperlukan metode perbaikan tanah yang lebih efektif untuk menurunkan besarnya penurunan sekaligus meningkatkan faktor keamanan jalur rel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung atas dukungan fasilitas, kepada dosen pembimbing dan penguji atas masukan konstruktif, serta kepada semua pihak yang telah membantu menyediakan data, juga keluarga dan rekan atas doa dan dukungan selama penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Ameratunga, J., Sivakugan, N., & Das, B. M. (2016). *Correlations of soil and rock properties in geotechnical engineering*.
- Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2019). *Atlas sebaran tanah lunak Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-atlas-sebaran-tanah-lunak.pdf>
- Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (1992). *Peta geologi lembar Indramayu, Jawa* (skala 1:100.000) [Peta geologi raster]. GeoMap, Pusat Survei Geologi.
- Badan Standarisasi Nasional, 2012, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung, SNI-1726-2012, Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2017. Persyaratan Perancangan Geoteknik, SNI 8460. Jakarta : Badan Standardisasi Nasional.
- Bowles, J. E., & Guo, Y. (1996). *Foundation analysis and design* (Vol. 5, p. 127). New York: McGraw-hill.
- Esveld, C., & Esveld, C. (2001). *Modern railway track* (Vol. 385). Zaltbommel: MRT-productions.
- Powrie, W., Le Pen, L., Milne, D., & Thompson, D. (2019). Train loading effects in railway geotechnical engineering: Ground response, analysis, measurement and interpretation. *Transportation Geotechnics*, 21, 100261.
- Profillidis, V. (2016). *Railway management and engineering*. Routledge.