

Analisis Efektivitas Metode Deep Soil Mixing dalam Meningkatkan Stabilitas Tanah Lunak pada Konstruksi Jalan Tol

Ababiel Ashabussidiq^{1*}, Jerrico Naufal Hibban², Rifqi Brilyant Arief³, Rinda Karlinasari⁴

¹⁻⁴ Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia

email: ababielashabussidiq@gmail.com¹, jerriconaufal31@gmail.com²

Article Info :

Received:
12-01-2026
Revised:
24-02-2026
Accepted:
27-02-2026

Abstract

The construction of toll roads on soft soil frequently encounters geotechnical problems in the form of excessive ground settlement and low embankment stability, which may lead to structural failure if appropriate ground improvement measures are not implemented. Deep Soil Mixing (DSM) is a ground improvement technique in which in-situ soil is mixed with a binding agent to increase shear strength and reduce soil compressibility. This study aims to analyze the effectiveness of the DSM method in improving the stability of soft soil for toll road construction and to evaluate the influence of variations in column spacing and depth on soil deformation and safety factors. The study was conducted as a case study of the Probolinggo–Banyuwangi Toll Road Development Project, Package 2, at STA 16+550–STA 16+600, using analytical approaches and numerical modeling based on the finite element method with PLAXIS 2D software. Analyses were performed for conditions without ground improvement and with DSM improvement using two configurations, namely a column spacing of 1.5 m with a depth of 8 m and a column spacing of 1 m with a depth of 6 m. The results indicate that the application of the DSM method significantly increases the safety factor and reduces soft soil deformation, with a closer column spacing configuration demonstrating more optimal performance in enhancing embankment stability.

Keywords: Soft Soil, Deep Soil Mixing, Soil Stability, Deformation, Toll Road.

Abstrak

Pembangunan jalan tol di atas tanah lunak sering menghadapi permasalahan geoteknik berupa penurunan tanah yang besar dan stabilitas timbunan yang rendah, sehingga berpotensi menyebabkan kegagalan struktur apabila tidak dilakukan perbaikan tanah. Metode Deep Soil Mixing (DSM) merupakan salah satu teknik perbaikan tanah yang dilakukan dengan mencampurkan tanah secara in-situ dengan bahan pengikat untuk meningkatkan kuat geser dan mengurangi kompresibilitas tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas metode DSM dalam meningkatkan stabilitas tanah lunak pada konstruksi jalan tol serta meninjau pengaruh variasi jarak dan kedalaman kolom DSM terhadap deformasi dan angka keamanan. Studi kasus dilakukan pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 2 STA 16+550–STA 16+600 dengan menggunakan pendekatan analitis dan pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga melalui perangkat lunak PLAXIS 2D. Analisis dilakukan pada kondisi tanpa perbaikan dan dengan perbaikan DSM menggunakan dua konfigurasi, yaitu jarak kolom 1,5 m dengan kedalaman 8 m serta jarak kolom 1 m dengan kedalaman 6 m. Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan metode DSM mampu meningkatkan angka keamanan dan mengurangi deformasi tanah lunak secara signifikan, di mana konfigurasi dengan jarak kolom yang lebih rapat memberikan kinerja yang lebih optimal dalam meningkatkan stabilitas timbunan.

Kata kunci: Tanah Lunak, Deep Soil Mixing, Stabilitas Tanah, Deformasi, Jalan Tol.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Pembangunan jalan tol pada bentang trase yang panjang sering kali melintasi kawasan dengan karakteristik tanah lunak yang memiliki daya dukung rendah serta tingkat kompresibilitas tinggi sehingga memerlukan intervensi teknis sejak tahap awal perencanaan konstruksi. Sari et al. (2023) menunjukkan bahwa timbunan jalan tol yang dibangun di atas tanah lunak berpotensi mengalami penurunan konsolidasi jangka panjang yang mempengaruhi kinerja struktural perkerasan secara signifikan. Wibawa dan Prawira (2025) mengemukakan bahwa kondisi tanah dasar dengan parameter mekanik rendah dapat menghambat distribusi beban konstruksi secara merata sehingga meningkatkan risiko deformasi. Anggraini et al. (2018) menilai bahwa tanpa adanya upaya stabilisasi yang memadai,

tanah lunak tidak mampu menahan beban lalu lintas maupun timbunan secara optimal pada konstruksi jalan tol.

Tanah lunak memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi yang menyebabkan terjadinya settlement berlebih ketika menerima beban konstruksi di atasnya selama masa pelayanan infrastruktur berlangsung. Bouassida dan Porbaha (2004) menjelaskan bahwa peningkatan beban pada tanah kohesif lunak tanpa perkuatan akan memicu kegagalan daya dukung akibat rendahnya kuat geser tanah asli. Laia et al. (2025) menambahkan bahwa deformasi vertikal pada lapisan tanah lunak sering kali berkembang secara progresif hingga mempengaruhi stabilitas global timbunan. Aryandi et al. (2025) mencatat bahwa fenomena kompresi sekunder juga menjadi faktor kritis yang perlu diperhitungkan dalam pembangunan timbunan jalan tol di atas tanah lunak.

Deep Soil Mixing (DSM) dikenal sebagai metode stabilisasi tanah yang dilakukan melalui pencampuran tanah lunak dengan bahan pengikat berupa slurry semen menggunakan alat mekanis berputar hingga terbentuk kolom soil-cement yang lebih kaku dibandingkan tanah asli. Porbaha (1998) menyatakan bahwa teknologi deep mixing mampu meningkatkan sifat mekanik tanah melalui proses reaksi kimia antara partikel tanah dan bahan pengikat selama masa curing berlangsung. Hamdhan dan Akbar (2022) menilai bahwa pembentukan kolom stabilisasi dengan teknik DSM dapat memperbaiki parameter kuat geser tanah serta mengurangi potensi deformasi akibat pembebanan. Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) juga menegaskan bahwa stabilisasi tanah-semen tipe kolom mampu meningkatkan kapasitas dukung tanah dasar pada konstruksi infrastruktur jalan.

Implementasi metode DSM pada tanah lunak memberikan kontribusi terhadap peningkatan stabilitas timbunan melalui reduksi nilai kompresibilitas serta peningkatan kekakuan lapisan tanah dasar. Bouassida dan Porbaha (2004) menjelaskan bahwa kolom stabilisasi yang tersusun dalam konfigurasi tertentu mampu meningkatkan daya dukung ultimit tanah kohesif lunak. Anggraini et al. (2018) menunjukkan bahwa penggunaan kolom stabilisasi pada tanah dasar jalan tol dapat mengurangi penurunan diferensial selama masa konstruksi berlangsung. Wibawa dan Prawira (2025) mengidentifikasi bahwa teknik stabilisasi berbasis kolom efektif dalam mendistribusikan beban timbunan secara lebih merata.

Efektivitas metode DSM tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi bahan pengikat yang digunakan tetapi juga oleh konfigurasi geometri kolom seperti jarak antar kolom dan kedalaman pemasangan. Hamdhan dan Akbar (2022) menyebutkan bahwa variasi kedalaman kolom stabilisasi berperan dalam mengontrol deformasi lateral maupun vertikal pada tanah lunak. Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) mengatur bahwa desain kolom stabilisasi harus mempertimbangkan jarak dan diameter untuk mencapai stabilitas optimal. Laia et al. (2025) menilai bahwa interaksi antar kolom dalam suatu sistem grid turut menentukan kinerja stabilitas lereng dan timbunan.

Pengaruh konfigurasi kolom DSM terhadap perilaku deformasi tanah lunak menjadi aspek penting dalam analisis kinerja perbaikan tanah pada konstruksi jalan tol. Aryandi et al. (2025) mencatat bahwa pengaturan jarak kolom dapat meminimalkan efek kompresi sekunder pada timbunan jalan tol. Sari et al. (2023) menunjukkan bahwa monitoring settlement pada proyek jalan tol di Semarang–Demak mengindikasikan pentingnya desain stabilisasi tanah yang tepat. Porbaha (1998) menggarisbawahi bahwa kombinasi parameter desain kolom sangat menentukan peningkatan stabilitas tanah dasar.

Analisis terhadap variasi kedalaman dan jarak kolom DSM diperlukan untuk mengetahui sejauh mana metode ini mampu meningkatkan stabilitas tanah lunak serta mengendalikan deformasi akibat pembebanan konstruksi. Bouassida dan Porbaha (2004) menekankan bahwa kinerja sistem kolom stabilisasi berkaitan erat dengan distribusi tegangan yang terjadi pada tanah dasar. Hamdhan dan Akbar (2022) menilai bahwa parameter geometri kolom berkontribusi terhadap peningkatan faktor keamanan timbunan. Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) menyarankan bahwa pendekatan desain berbasis analisis stabilitas perlu diterapkan dalam perencanaan stabilisasi tanah-semen tipe kolom.

Penelitian ini difokuskan pada analisis efektivitas metode Deep Soil Mixing dalam meningkatkan stabilitas tanah lunak pada konstruksi jalan tol melalui evaluasi deformasi serta konfigurasi kolom stabilisasi berdasarkan variasi jarak dan kedalaman pemasangan. Kajian dilakukan untuk memahami peningkatan daya dukung tanah setelah proses stabilisasi diterapkan pada kondisi lapangan. Pendekatan analitis digunakan untuk membandingkan kinerja sistem stabilisasi terhadap perubahan parameter mekanik tanah dasar. Hasil analisis diharapkan memberikan gambaran teknis mengenai penerapan metode DSM dalam meningkatkan stabilitas konstruksi jalan tol di atas tanah lunak.

METODE PENELITIAN

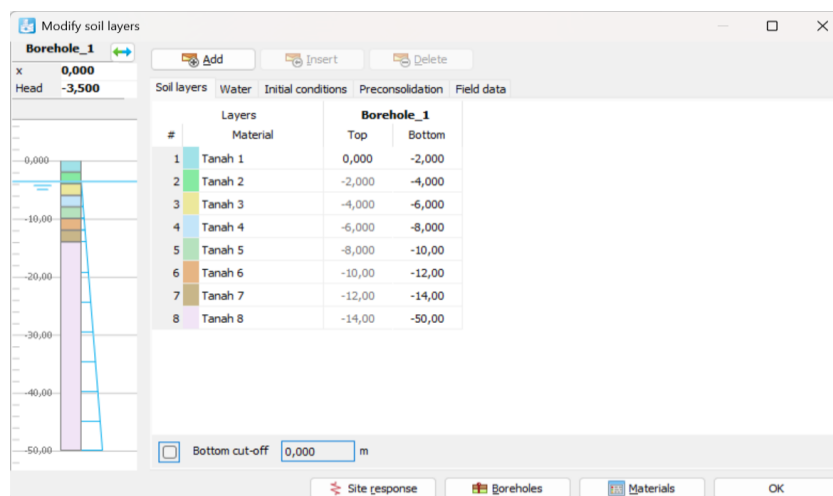
Penelitian ini mengambil studi kasus pada proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo–Banyuwangi Paket 2 STA 16+550–STA 16+600 yang berada pada kondisi tanah lunak sehingga memerlukan perbaikan sebelum pelaksanaan konstruksi. Data yang digunakan berupa data sekunder yang diperoleh dari hasil penelitian terdahulu serta dokumentasi teknis proyek, meliputi data lapangan Standard Penetration Test (SPT), hasil pengujian tanah di laboratorium, serta dokumen pelaksanaan seperti shop drawing dan spesifikasi teknis. Parameter tanah yang diperoleh dari nilai N-SPT dan pengujian laboratorium digunakan sebagai variabel bebas dalam analisis penelitian. Variasi jarak dan kedalaman kolom Deep Soil Mixing (DSM) ditetapkan sebagai variabel terikat untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap stabilitas tanah lunak.

Proses analisis dilakukan menggunakan pendekatan analitis dan numerik melalui pemodelan elemen hingga berbasis perangkat lunak PLAXIS 2D untuk mengkaji deformasi serta distribusi tegangan tanah akibat pembebanan timbunan. Pemodelan diawali dengan penentuan geometri tanah, properti material berdasarkan data geoteknik, serta penyusunan tahapan konstruksi pada sistem DSM. Perhitungan deformasi timbunan juga dilakukan secara manual menggunakan metode analitis sebagai pembandingan terhadap hasil simulasi numerik. Perbandingan hasil kedua pendekatan tersebut digunakan untuk memastikan validitas analisis dalam menilai efektivitas variasi jarak dan kedalaman kolom DSM terhadap peningkatan stabilitas tanah lunak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan *Borehole* dan *Material Set*

Langkah pertama penelitian dimulai dengan pembuatan *borehole* pada PLAXIS 2D untuk menentukan ketebalan tiap lapisan tanah berdasarkan data N-SPT pada tabel 3.1. Berdasarkan tabel tersebut, tiap lapisan tanah dimodelkan setebal 2 m dan muka air tanah ditentukan pada kedalaman 3,5 m yang ditunjukkan pada gambar 1. Untuk lapisan 8, ketebalan tanah ditentukan hingga kedalaman 50 m untuk menghindari *boundary effect* yang dapat mengurangi akurasi perhitungan.



Gambar 1. Pembuatan *borehole*

Sumber: dokumentasi penulis

Setelah pembuatan *borehole*, dilakukan pembuatan *material set* untuk kemudian dimasukkan ke masing-masing lapisan tanah, timbunan tanah, dan DSM. Pada tanah dengan $N-SPT \leq 4$, digunakan model material *soft soil* karena dengan nilai N-SPT tersebut, konsistensi tanah sangat lunak dan memiliki kompresibilitas yang tinggi. Untuk tanah dengan $N-SPT > 4$ dan tanah timbunan, digunakan model material Mohr-Coulomb. Lalu pada DSM, model material yang digunakan adalah linear elastic karena merupakan material *soil-cement* dengan kekakuan lebih tinggi dibanding tanah sekitarnya, sehingga deformasi yang terjadi relatif kecil. Tabel 1 dan 2 menunjukkan material set dengan parameter yang digunakan dalam analisis numerik ini.

Tabel 1. Material set DSM, timbunan, dan lapisan tanah 1-3

Parameter	DSM	Timbunan	Tanah 1	Tanah 2	Tanah 3
Depth (m)	-	-	0 – 2	2 – 4	4 – 6
N-SPT	-	-	4	1	5
Material Model	Linear Elastic (Non porous)	Mohr-Coulomb (Drained)	Soft Soil	Soft soil	Mohr-Coulomb
γ (kN/m ³)	20	19	16,2	16,8	16,8
γ_{sat} (kN/m ³)	20	20	16,9	16,94	17,28
E(kN/m ²)	705082	20.000	5333	3000	6667
Poisson's ratio	0,26	0,3	0,35	0,35	0,35
Cohesion C	-	5	26,67	15	33,33
Friction angle (ϕ)	-	34	10	11	10
Compression index C_c	-	-	0,35	0,26	-
Swelling index C_s	-	-	0,07	0,02	-
Permeability (m/day) K_x	-	1,00E-04	1,00E-09	3,00E-08	1,00E-07
Permeability (m/day) K_y	-	1,00E-04	1,00E-09	3,00E-08	1,00E-07

Tabel 2. Material set dan lapisan tanah 4-8

Parameter	Tanah 4	Tanah 5	Tanah 6	Tanah 7	Tanah 8
Depth (m)	6 – 8	8 – 10	10 – 12	12 – 14	14 – 16
N-SPT	6	9	5	27	14
Material Model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb (Drained)	Mohr-Coulomb (Drained)
γ (kN/m ³)	17	17,1	16,8	21	19
γ_{sat} (kN/m ³)	17,55	17,61	17,28	21,5	21,5
E(kN/m ²)	2400	3000	6667	20118	13891
Poisson's ratio	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Cohesion C	12	15	33,33	180	93,33
Friction angle (ϕ)	27	29	10	38,24	31,73
Compression index C_c	0,29	0,2	-	-	-
Swelling index C_s	0,01	0,01	-	-	-
Permeability K_x (m/day)	1,00E-09	3,00E-08	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-06
Permeability K_y (m/day)	1,00E-09	3,00E-08	1,00E-08	1,00E-05	1,00E-06

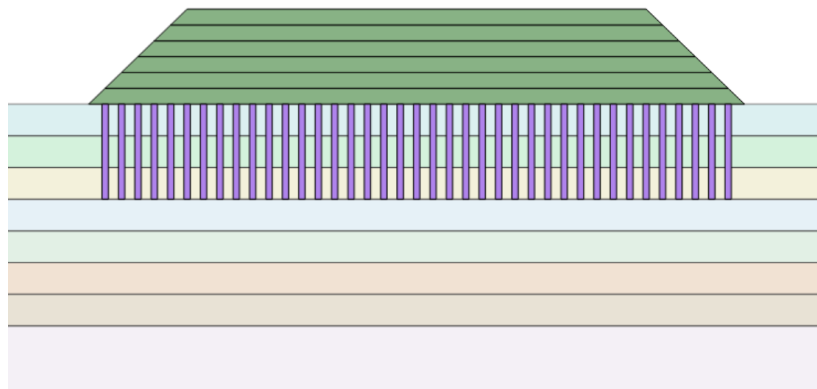
Pembuatan Geometri Timbunan dan DSM

Timbunan dimodelkan dengan lebar puncak 28 m, ditentukan berdasarkan standar geometrik jalan tol antarkota. Jalan terdiri dari 2 jalur lalu lintas dengan total 4 lajur, masing-masing selebar 3,6 m. Selain itu disediakan bahu luar selebar 3,0 m dan bahu dalam selebar 1,5 m pada masing-masing sisi. Median jalan direncanakan dengan lebar 3 m. Ketinggian jalan tol ditentukan 6 m dan kemiringan lereng timbunan ditentukan 1:1 sehingga didapatkan lebar dasar timbunan selebar 40 m.

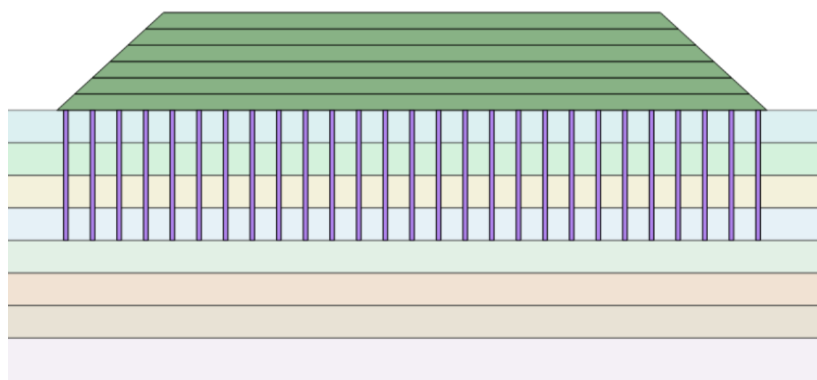
Kolom DSM dimodelkan dengan *soil cluster* menggunakan pendekatan *strip equivalent*, ditunjukkan tabel 3, yaitu kolom berbentuk silinder diubah menjadi bentuk persegi panjang dengan fitur *soil rectangle* pada model dua dimensi. Lebar *strip* DSM dihitung berdasarkan luas penampang kolom dibagi jarak antar kolom. Kedalaman DSM disesuaikan dengan variasi yang dianalisis pada setiap model.

Tabel 3. *Strip equivalent* DSM

Variasi DSM	Tebal <i>strip equivalent</i> (m)
Jarak 1 m kedalaman 6 m	0,39
Jarak 1.5 m kedalaman 8 m	0,26



Gambar 2. Timbunan dan DSM jarak 1 m kedalaman 6 m

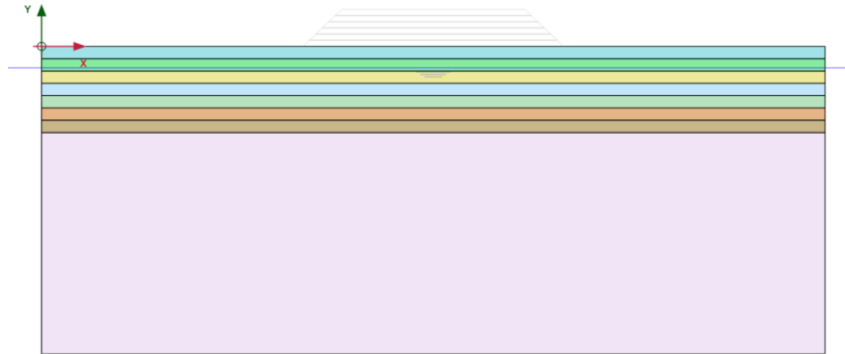


Gambar 3. Timbunan dan DSM jarak 1.5 m kedalaman 8 m

Kolom-kolom DSM ditempatkan di bawah area timbunan dengan pola berselang-seling antara DSM dan tanah asli, sesuai dengan kondisi di lapangan. Gambar 2 dan 3 menunjukkan model geometri timbunan dan DSM. Pada fase pembuatan geometri ini juga, beban lalu lintas (*service load*) sebesar 15 kN/m² dimodelkan sebagai beban merata (*line load*) yang bekerja di atas timbunan.

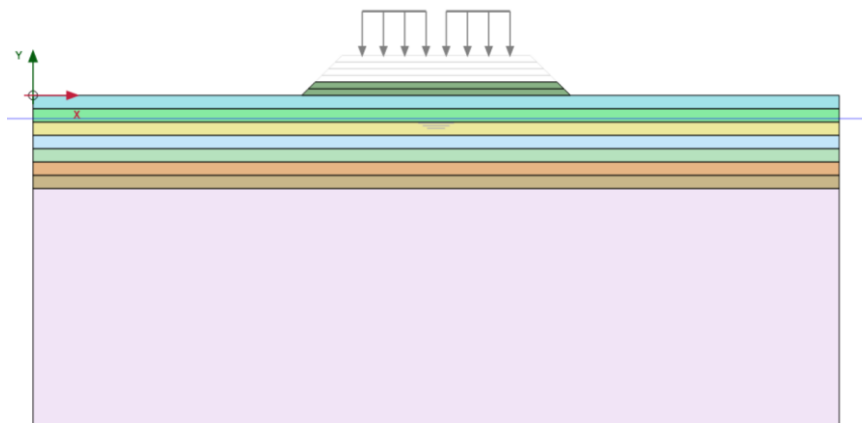
Tahapan Konstruksi

Proses konstruksi dimodelkan secara bertahap untuk merepresentasikan kondisi pelaksanaan di lapangan. Analisis dimulai dari kondisi awal (*initial phase*) tanah asli tanpa timbunan. Kondisi awal ditunjukkan pada gambar 4



Gambar 4. Kondisi awal (*initial phase*)

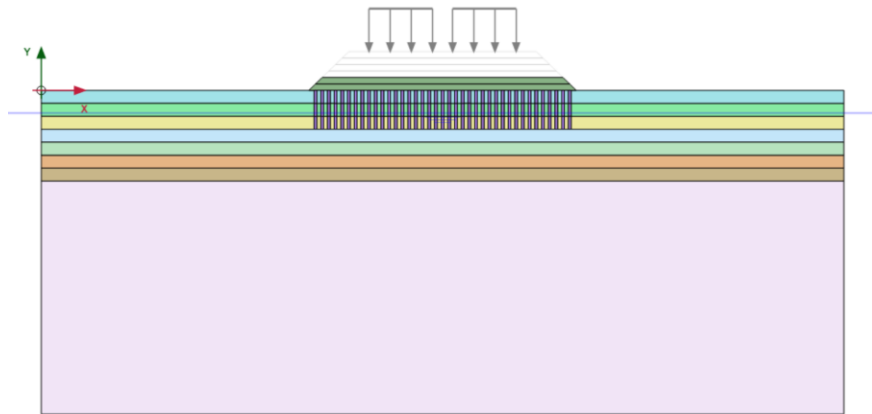
Pembangunan timbunan dilakukan secara berlapis dengan membagi tinggi timbunan total 6 m menjadi 6 lapisan, masing-masing setebal 1 m. Setiap lapisan timbunan diaktifkan dengan durasi 7 hari untuk merepresentasikan waktu pembuatan timbunan. Fase timbunan tanpa DSM ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 5. Fase timbunan tanpa DSM

sumber: dokumentasi penulis

Pada model dengan perbaikan DSM yang ditunjukkan gambar 6, elemen DSM diaktifkan setelah fase inisial. Fase pembuatan DSM ditentukan 28 hari untuk merepresentasikan waktu curing kolom *soil-cement*. Setelah fase pembuatan DSM, timbunan pertama hingga keenam diaktifkan dengan masing masing waktu konstruksi 7 hari. Setelah seluruh lapisan timbunan selesai diaktifkan, diberikan waktu konsolidasi 28 hari untuk akhir fase konstruksi, dilanjutkan dengan pengaktifan beban *service load*. Setelah beban diaktifkan, dilakukan fase konsolidasi selama 1 tahun, 3 tahun, dan 10 tahun.



Gambar 6. Fase timbunan dengan perbaikan DSM

Sumber: dokumentasi penulis

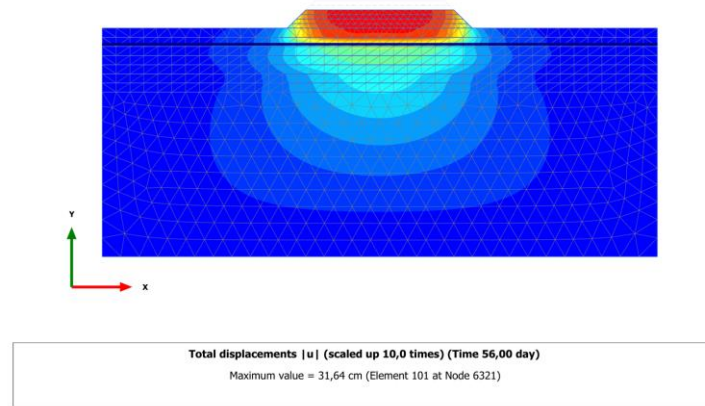
Tabel 4 menunjukkan seluruh tahap analisis serta waktu yang ditentukan dalam analisis.

Tabel 4. Tahapan analisis

No	Tahap Analisis	Hari	Total Hari
1.	Initial Phase	0	0
2.	Deep Soil Mixing	28	28
3.	Timbunan 1 m	7	35
4.	Timbunan 2 m	7	42
5.	Timbunan 3 m	7	49
6.	Timbunan 4 m	7	56
7.	Timbunan 5 m	7	63
8.	Timbunan 6 m	7	70
9.	Akhir Konstruksi	28	98
10.	Service Load	1	99
11.	Konsolidasi 1 Tahun	365	464
12.	Konsolidasi 3 Tahun	730	1.095
13.	Konsolidasi 10 Tahun	2.555	3.650

Kondisi Tanpa Perbaikan

Pada kondisi tanpa perbaikan tanah, fase konstruksi timbunan 5 gagal dan kalkulasi berhenti pada fase timbunan 4. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tanah dasar tidak mampu menahan beban timbunan akibat rendahnya kuat geser tanah. Hasil analisis timbunan 4 menunjukkan deformasi maksimal tanah sebesar 31,64 cm dengan waktu 56 hari. Hasil tersebut ditunjukkan oleh gambar 8.



Gambar 7. Kondisi tanpa perbaikan
Sumber: dokumentasi penulis

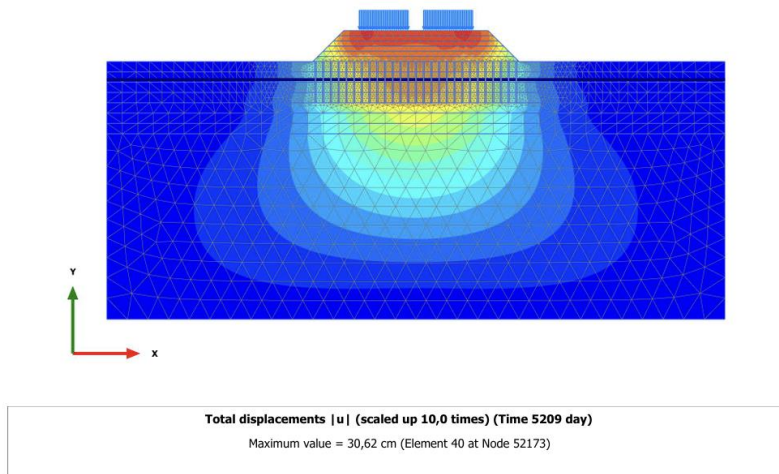
Hasil analisis numerik kemudian dikomparasikan dengan perhitungan analitis menggunakan rumus tinggi kritis timbunan (persamaan 2. 10). Nilai kohesi tanah dasar (c) yang digunakan dalam perhitungan diambil dari nilai terendah, yaitu sebesar 15 kN/m^2 , yang dianggap mewakili kondisi tanah paling kritis. Perhitungan menunjukkan bahwa tinggi kritis timbunan adalah 3,95 m. Hasil ini dianggap mendekati output analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D, di mana pembuatan timbunan hingga ketinggian 4 m masih dapat dilakukan, namun mengalami kegagalan pada tahap timbunan berikutnya (5 m).

Perbaikan DSM Jarak 1,5 m dan Kedalaman 8 m

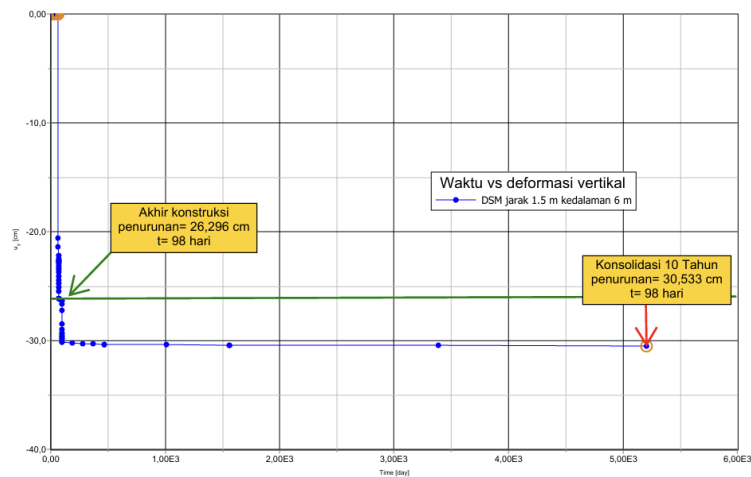
Model perbaikan tanah dengan jarak DSM 1,5 m dan kedalaman 8 m merupakan konfigurasi eksisting yang ada pada proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 2 STA 16+550–STA 16+600. Konfigurasi ini digunakan sebagai acuan dalam pemodelan numerik karena merepresentasikan kondisi perbaikan tanah yang direncanakan di lapangan, baik dari segi pola pemasangan maupun kedalaman kolom DSM terhadap lapisan tanah lunak.

Hasil analisis pada Gambar 8 menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi adalah sebesar 30,62 cm. Untuk melihat besarnya penurunan pada timbunan, ditentukan satu titik pengamatan (node) pada bagian puncak timbunan sebagai acuan deformasi vertikal. Titik ini dipilih karena dapat mewakili penurunan yang terjadi akibat beban timbunan dan beban lalu lintas (*service load*) yang bekerja selama masa operasional. Hasil pengamatan penurunan pada titik tersebut ditampilkan dalam bentuk kurva pada Gambar 9.

Kurva pada Gambar 9 menunjukkan penurunan pada fase akhir konstruksi sebesar 26,296 cm, sedangkan pada fase konsolidasi 10 tahun mencapai 25,299 cm. Nilai penurunan setelah konstruksi tersebut masih berada di bawah batas penurunan maksimum yang diizinkan untuk jalan tol dalam periode 10 tahun, yaitu sebesar 10 cm.



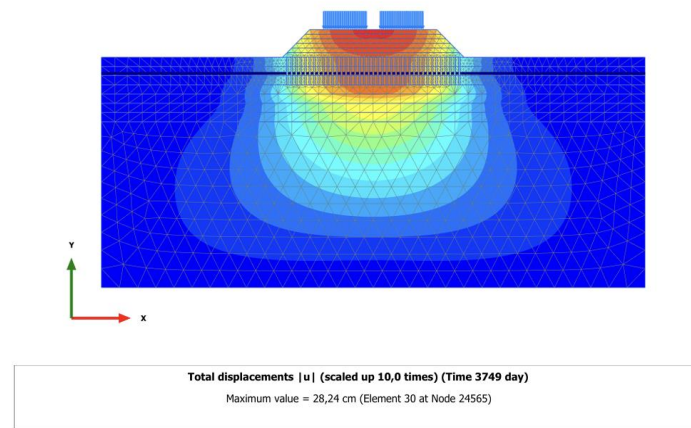
Gambar 8. Perbaikan DSM Jarak 1.5 m dan Kedalaman 8 m
Sumber: dokumentasi penulis



Gambar 9. Kurva penurunan vs waktu DSM jarak 1,5 m kedalaman 8 m
Sumber: dokumentasi penulis

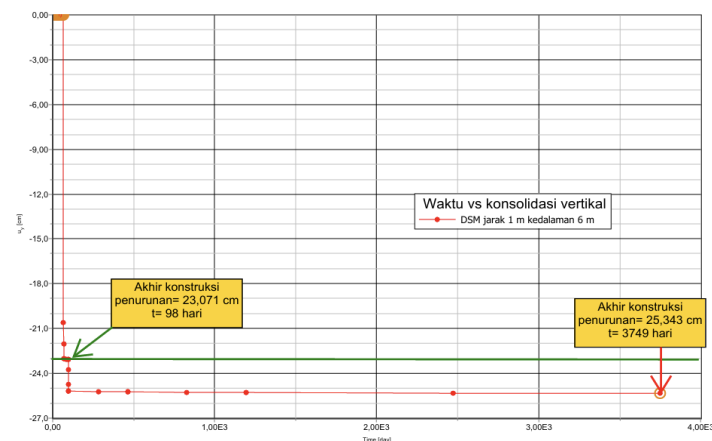
Perbaikan DSM Jarak 1 m dan Kedalaman 6 m

Model perbaikan tanah dengan jarak DSM 1 m dan kedalaman 6 m merupakan konfigurasi dengan jarak kolom lebih rapat dibandingkan model eksisting yang digunakan pada proyek Pembangunan Jalan Tol Probolinggo-Banyuwangi Paket 2 STA 16+550–STA 16+600. Kedalaman 6 m ditentukan karena ujung kolom menumpu lapisan tanah dengan konsistensi *firm* (lapisan tanah 4).



Gambar 10. Perbaikan DSM Jarak 1 m dan Kedalaman 6 m
Sumber: dokumentasi penulis

Hasil analisis pada gambar 10 menunjukkan deformasi maksimal sebesar 28,24 cm. Untuk mengetahui besarnya penurunan yang terjadi pada timbunan, ditetapkan titik pengamatan (node) pada bagian puncak timbunan sebagai acuan deformasi vertikal. Grafik hasil pengamatan penurunan pada titik tersebut ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Kurva penurunan vs waktu DSM jarak 1 m kedalaman 6 m
Sumber: dokumentasi penulis

Gambar 11 menunjukkan penurunan pada fase akhir konstruksi sebesar 23,071 cm, sedangkan pada fase konsolidasi 10 tahun mencapai 25,343 cm. Dari fase akhir konstruksi hingga fase konsolidasi 10 tahun terjadi tambahan penurunan sebesar 2,272 cm. Nilai penurunan ini lebih kecil dibandingkan dengan penurunan pada konfigurasi DSM eksisting, yang menunjukkan nilai 4,237 cm.

Kondisi Tanpa Perbaikan

Pada kondisi tanpa perbaikan tanah, nilai angka keamanan yang diperoleh hanya sampai pada timbunan 5, yaitu 1,275. Pada fase timbunan ke 6, terjadi kegagalan kalkulasi yang menunjukkan bahwa timbunan tidak stabil dan berpotensi mengalami kegagalan lereng akibat rendahnya kuat geser tanah dasar. Nilai angka keamanan tiap fase timbunan ditunjukkan tabel 5.

Tabel 5. Angka keamanan tanpa DSM

Fase	Angka Keamanan
Timbunan 1	4,845

Timbunan 2	1,896
Timbunan 3	1,520
Timbunan 4	1,330
Timbunan 5	-
Timbunan 6	-

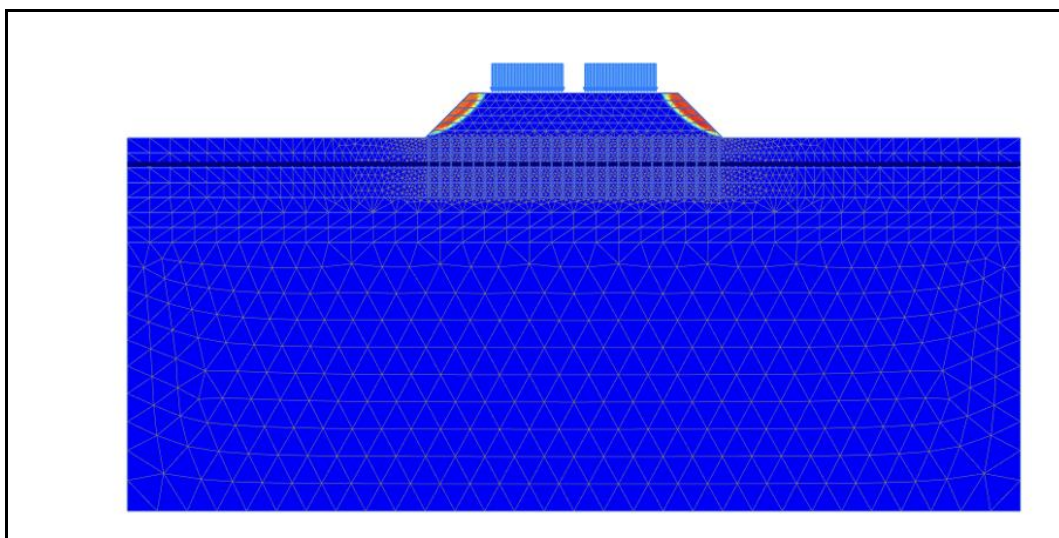
Perbaikan DSM Jarak 1.5 m dan Kedalaman 8 m

Hasil analisis angka keamanan pada model perbaikan DSM dengan jarak kolom 1,5 m dan kedalaman 8 m menunjukkan bahwa nilai angka keamanan meningkat dibandingkan kondisi tanpa perbaikan DSM. Pada tahap timbunan terakhir, diperoleh nilai angka keamanan sebesar 1,076 dan setelah konsolidasi 10 tahun diperoleh nilai 1,083. Nilai angka keamanan pada setiap tahap analisis disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Angka keamanan DSM jarak 1,5 m kedalaman 8 m

Fase	Angka Keamanan
SF Timbunan 1	7,086
SF Timbunan 2	1,832
SF Timbunan 3	1,466
SF Timbunan 4	1,274
SF Timbunan 5	1,168
SF Timbunan 6	1,076
SF Akhir Konstruksi	1,088
SF <i>Service load</i>	1,080
SF Konsolidasi 1 Tahun	1,79
SF Konsolidasi 3 Tahun	1,104
SF Konsolidasi 10 Tahun	1,083

Pada konfigurasi DSM eksisting ini, diperoleh nilai *area replacement ratio* (a_s) sebesar 0,17 yang berada sedikit di bawah kisaran 0,2–0,4. Gambar 12 menunjukkan bidang gelincir dan angka keamanan setelah konsolidasi 10 tahun.



SF Konsolidasi 10 Tahun = 1,083 cm

Gambar 12. Perbaikan DSM Jarak 1,5 m dan Kedalaman 8 m

Sumber: dokumentasi penulis

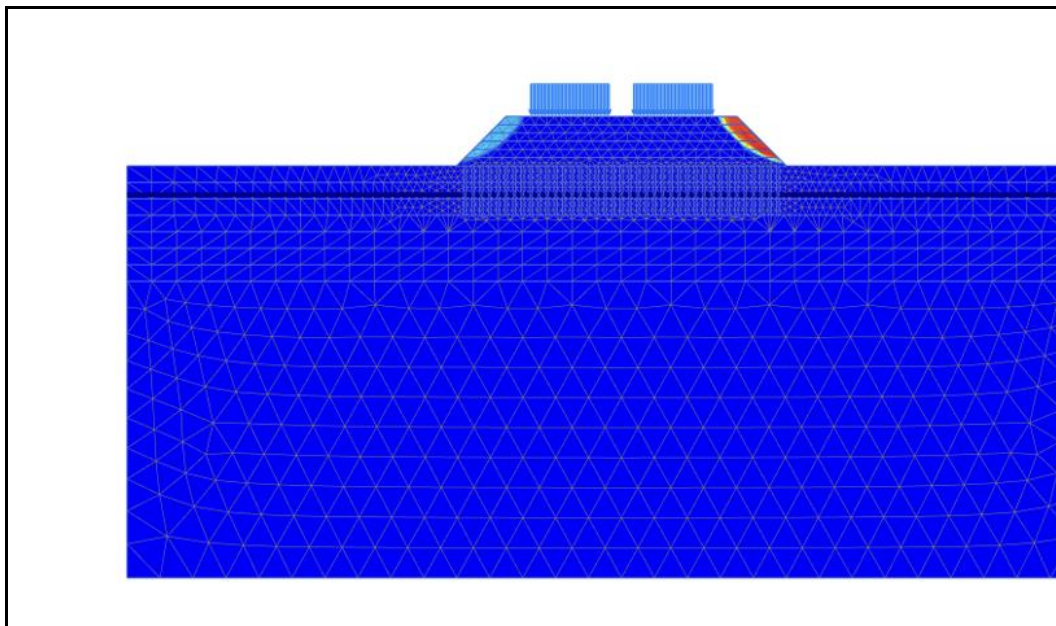
Perbaikan DSM Jarak DSM jarak 1 m kedalaman 6 m

Hasil analisis angka keamanan pada model perbaikan DSM dengan jarak kolom 1 m dan kedalaman 6 m menunjukkan nilai angka keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan DSM eksisting. Pada tahap timbunan ke-6, diperoleh nilai angka keamanan sebesar 1,101 dan setelah konsolidasi 10 tahun diperoleh nilai 1,100. Nilai angka keamanan pada masing-masing tahap analisis disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Angka keamanan DSM jarak 1 m kedalaman 6 m

Fase	Angka Keamanan
SF Timbunan 1	7,510
SF Timbunan 2	1,868
SF Timbunan 3	1,484
SF Timbunan 4	1,299
SF Timbunan 5	1,171
SF Timbunan 6	1,101
SF Akhir Konstruksi	1,086
SF <i>Service load</i>	1,091
SF Konsolidasi 1 Tahun	1,095
SF Konsolidasi 3 Tahun	1,198
SF Konsolidasi 10 Tahun	1,100

Peningkatan angka keamanan tersebut berkaitan dengan konfigurasi perbaikan tanah yang digunakan. Pada model dengan spasi kolom DSM 1 m dan diameter kolom 0,7 m, diperoleh nilai *area replacement ratio* (a_s) sebesar 0,385. Gambar 4.12 menunjukkan bidang gelincir dan angka keamanan setelah konsolidasi 10 tahun.



SF Konsolidasi 10 Tahun = 1,100

Gambar 13. Perbaikan DSM Jarak 1,5 m dan Kedalaman 8 m

Sumber: dokumentasi penulis.

Peningkatan Stabilitas Tanah Lunak Setelah Perbaikan dengan Metode DSM Diterapkan

Hasil pemodelan numerik menunjukkan bahwa kondisi tanah lunak tanpa perbaikan tidak mampu mempertahankan stabilitas hingga ketinggian timbunan rencana 6 m karena analisis berhenti pada fase timbunan ke-4 dengan deformasi maksimum mencapai 31,64 cm pada hari ke-56. Nilai angka keamanan pada kondisi tanpa perbaikan tercatat menurun bertahap dari 4,845 pada timbunan pertama menjadi 1,330 pada timbunan keempat dan tidak terdefinisi pada tahap berikutnya akibat kegagalan kalkulasi. Fenomena ini merefleksikan rendahnya kuat geser tanah dasar sebagaimana dijelaskan Bouassida dan Porbaha (2004) bahwa tanah kohesif lunak tanpa perkuatan memiliki kapasitas dukung ultimit yang terbatas terhadap beban timbunan. Karakteristik tanah lunak dengan kompresibilitas tinggi yang dibahas Sari et al. (2023) juga menjelaskan kecenderungan terjadinya instabilitas progresif ketika beban konstruksi meningkat secara bertahap. Kondisi tersebut selaras dengan temuan Aslam dan Gofar (2022) yang menyatakan bahwa embankment di atas tanah lunak memerlukan sistem stabilisasi untuk mencapai faktor keamanan yang memadai.

Model perbaikan DSM dengan jarak kolom 1,5 m dan kedalaman 8 m menunjukkan peningkatan stabilitas yang ditandai dengan keberhasilan konstruksi hingga timbunan 6 m serta nilai angka keamanan 1,076 pada tahap tersebut. Nilai angka keamanan meningkat menjadi 1,083 setelah fase konsolidasi 10 tahun, mencerminkan kondisi stabil jangka panjang pada sistem perkuatan. Peningkatan ini konsisten dengan konsep peningkatan daya dukung kelompok kolom stabilisasi yang dijelaskan Porbaha (1998) sebagai hasil interaksi tanah–semen dengan tanah asli. Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) menegaskan bahwa stabilisasi tanah-semen tipe kolom dirancang untuk meningkatkan stabilitas global timbunan melalui peningkatan kekakuan massa tanah. Temuan ini juga sejalan dengan Anggraini et al. (2018) yang melaporkan peningkatan performa stabilitas pada tanah dasar jalan tol setelah penerapan kolom stabilisasi.

Konfigurasi DSM jarak 1 m dan kedalaman 6 m memperlihatkan nilai angka keamanan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi eksisting, yakni 1,101 pada timbunan ke-6 dan 1,100 setelah konsolidasi 10 tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa perapatan jarak kolom berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas global timbunan secara lebih signifikan. Wintoro et al. (2025) menjelaskan bahwa jarak antar kolom yang lebih rapat meningkatkan efektivitas sistem perkuatan melalui distribusi tegangan yang lebih merata. Laia et al. (2025) juga menekankan bahwa konfigurasi sistem perkuatan berpengaruh langsung terhadap peningkatan faktor keamanan lereng timbunan pada proyek jalan tol. Hasil ini memperkuat pandangan Hamdhan dan Akbar (2022) bahwa parameter geometri kolom deep mixing menjadi faktor dominan dalam peningkatan stabilitas tanah lunak.

Perbandingan nilai angka keamanan antara kondisi tanpa perbaikan dan dengan DSM menunjukkan selisih signifikan terutama pada tahap timbunan akhir, di mana tanpa perbaikan tidak mencapai kondisi stabil pada ketinggian 5 m. Nilai tinggi kritis timbunan hasil perhitungan analitis sebesar 3,95 m memperkuat validitas hasil numerik yang menunjukkan kegagalan pada fase setelah 4 m. Permana et al. (2023) mengemukakan bahwa peningkatan daya dukung tanah melalui sistem perkuatan akan menaikkan tinggi kritis timbunan secara signifikan. Karminto (2023) menyebutkan bahwa teknologi perbaikan tanah modern difokuskan pada peningkatan faktor keamanan terhadap kegagalan geser global. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa DSM mampu menggeser kondisi tanah dari keadaan kritis menuju kondisi stabil sesuai prinsip peningkatan kapasitas dukung yang diuraikan Bouassida dan Porbaha (2004).

Nilai area replacement ratio pada konfigurasi eksisting sebesar 0,17 berada sedikit di bawah rentang rekomendasi 0,2–0,4 untuk peningkatan stabilitas optimal sebagaimana dikemukakan Muttuvel et al. (2021). Konfigurasi jarak 1 m dengan diameter kolom 0,7 m menghasilkan nilai area replacement ratio sebesar 0,385 yang berada dalam rentang rekomendasi tersebut sehingga peningkatan stabilitas menjadi lebih signifikan. Lumanauw et al. (2024) menjelaskan bahwa proporsi campuran semen pada metode deep mixing berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan kolom dan stabilitas massa tanah secara keseluruhan. Tyas et al. (2022) juga melaporkan bahwa peningkatan rasio penggantian area secara langsung meningkatkan faktor keamanan dan mengurangi potensi kegagalan. Temuan ini

memperlihatkan hubungan linear antara peningkatan rasio kolom terhadap kenaikan nilai faktor keamanan timbunan.

Hasil analisis keseluruhan menunjukkan bahwa penerapan DSM secara nyata meningkatkan stabilitas tanah lunak pada konstruksi jalan tol dibandingkan kondisi tanpa perbaikan. Nilai faktor keamanan yang berada di atas 1,0 hingga periode konsolidasi 10 tahun menunjukkan keberlanjutan stabilitas jangka panjang sistem timbunan. Aini et al. (2023) menegaskan bahwa metode perbaikan tanah harus dievaluasi hingga fase operasional untuk memastikan keamanan struktur secara berkelanjutan. Muis dan Wulandari (2023) menyatakan bahwa kombinasi metode stabilisasi yang tepat dapat mengendalikan risiko kegagalan sekaligus menjaga kinerja timbunan. Putra et al. (2021) serta Fathonah et al. (2024) menambahkan bahwa perubahan sifat mekanik tanah akibat stabilisasi material berperan penting dalam meningkatkan ketahanan struktur terhadap beban jangka panjang.

Pengaruh Perbaikan Metode DSM terhadap Deformasi yang Terjadi pada Tanah Lunak

Hasil analisis deformasi pada kondisi tanah lunak tanpa perbaikan menunjukkan terjadinya penurunan maksimum sebesar 31,64 cm pada fase timbunan keempat dalam waktu konstruksi 56 hari. Nilai deformasi tersebut mencerminkan ketidakmampuan tanah dasar dalam menahan beban bertahap akibat sifat kompresibel yang tinggi sebagaimana dijelaskan Sari et al. (2023) pada timbunan jalan tol di atas tanah lunak. Tyas et al. (2022) menyebutkan bahwa tanah dengan konsistensi sangat lunak akan mengalami deformasi vertikal yang signifikan pada fase awal pembebanan konstruksi. Kondisi ini sejalan dengan pernyataan Aslam dan Gofar (2022) yang menekankan bahwa stabilisasi tanah diperlukan untuk mengendalikan penurunan yang terjadi selama konstruksi embankment. Hamdhan dan Firuliadhim (2025) juga mengemukakan bahwa peningkatan kadar air pada tanah lempung lunak berkontribusi terhadap besarnya deformasi awal ketika menerima beban eksternal.

Model DSM dengan jarak kolom 1,5 m dan kedalaman 8 m menghasilkan deformasi maksimum sebesar 30,62 cm berdasarkan hasil pemodelan numerik. Nilai penurunan vertikal pada puncak timbunan tercatat sebesar 26,296 cm pada fase akhir konstruksi dan mencapai 25,299 cm setelah fase konsolidasi selama 10 tahun. Angka tersebut menunjukkan adanya reduksi deformasi seiring waktu akibat peningkatan kekakuan tanah hasil interaksi soil–cement sebagaimana dijelaskan Porbaha (1998). Lumanauw et al. (2024) menjelaskan bahwa metode deep mixing meningkatkan modulus elastisitas tanah sehingga respons deformasi terhadap beban menjadi lebih kecil. Wibawa dan Prawira (2025) menambahkan bahwa teknik stabilisasi tanah modern berfungsi untuk mengurangi deformasi akibat konsolidasi sekunder pada konstruksi timbunan.

Konfigurasi DSM dengan jarak kolom 1 m dan kedalaman 6 m menunjukkan deformasi maksimum sebesar 28,24 cm yang lebih kecil dibandingkan konfigurasi eksisting. Nilai penurunan pada fase akhir konstruksi tercatat sebesar 23,071 cm dan meningkat menjadi 25,343 cm setelah konsolidasi 10 tahun. Tambahan penurunan sebesar 2,272 cm menunjukkan bahwa deformasi jangka panjang tetap terjadi namun dalam batas yang terkendali. Bouassida dan Porbaha (2004) menjelaskan bahwa kolom stabilisasi mampu mengurangi deformasi melalui peningkatan kapasitas dukung kelompok tanah yang diperkuat. Hamdhan dan Akbar (2022) menyatakan bahwa kombinasi metode deep mixing dalam pemodelan numerik mampu menekan deformasi hingga batas toleransi desain.

Perbandingan antara konfigurasi DSM eksisting dan konfigurasi jarak 1 m menunjukkan bahwa perapatan jarak kolom memberikan pengaruh terhadap reduksi deformasi timbunan. Nilai tambahan penurunan pada konfigurasi eksisting mencapai 4,237 cm dalam periode konsolidasi 10 tahun. Konfigurasi jarak 1 m hanya menunjukkan tambahan penurunan sebesar 2,272 cm dalam periode yang sama. Wintoro et al. (2025) menjelaskan bahwa jarak kolom yang lebih rapat meningkatkan distribusi tegangan secara merata sehingga deformasi menjadi lebih kecil. Permana et al. (2023) juga menekankan bahwa sistem perkuatan tanah berperan dalam mengendalikan deformasi vertikal pada area transisi timbunan.

Respon deformasi pada tanah lunak dengan perbaikan DSM menunjukkan tren penurunan yang lebih stabil dibandingkan kondisi tanpa perbaikan. Nilai penurunan pasca konstruksi masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan untuk jalan tol dalam periode operasional 10 tahun. Direktorat Jenderal Bina Marga (2024) menyatakan bahwa batas penurunan maksimum menjadi parameter penting dalam evaluasi kinerja timbunan jalan tol. Muis dan Wulandari (2023) menjelaskan bahwa reduksi penurunan dapat dicapai melalui peningkatan kekakuan tanah hasil stabilisasi kolom. Lebang dan

Yunianti (2023) juga menegaskan bahwa teknik perbaikan tanah mampu mengurangi deformasi akibat beban dinamis lalu lintas.

Evaluasi deformasi jangka panjang menunjukkan bahwa metode DSM efektif dalam mengendalikan settlement selama masa layanan konstruksi jalan tol. Nilai deformasi yang lebih kecil pada konfigurasi DSM jarak 1 m mencerminkan peningkatan kinerja sistem stabilisasi terhadap pembebanan berulang. Aini et al. (2023) menjelaskan bahwa pengendalian penurunan jangka panjang sangat penting untuk menjaga integritas struktur perkerasan jalan. Anggraini et al. (2018) menyatakan bahwa perkuatan kolom stabilisasi mampu meningkatkan performa tanah dasar dalam jangka panjang. Putra et al. (2021) serta Fathonah et al. (2024) menambahkan bahwa stabilisasi mekanis dan material memberikan kontribusi terhadap penurunan deformasi yang terjadi akibat beban operasional.

Efektivitas Variasi Jarak dan Kedalaman Kolom DSM terhadap Stabilitas Tanah Lunak

Variasi jarak dan kedalaman kolom Deep Soil Mixing (DSM) menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan stabilitas tanah lunak berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan PLAXIS 2D. Pemodelan yang dilakukan memperlihatkan bahwa semakin rapat jarak antar kolom DSM, maka nilai deformasi vertikal yang terjadi pada timbunan mengalami penurunan secara bertahap. Kondisi tersebut disebabkan oleh meningkatnya kontribusi kekakuan tanah hasil perbaikan yang mampu mendistribusikan beban timbunan secara lebih merata ke lapisan tanah yang lebih dalam sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada lapisan tanah lunak di permukaan.

Kedalaman kolom DSM juga berperan penting dalam meningkatkan daya dukung tanah dasar timbunan. Kolom DSM yang menembus hingga lapisan tanah yang memiliki nilai kuat geser lebih tinggi mampu berfungsi sebagai elemen penyalur beban vertikal secara efektif. Simulasi menunjukkan bahwa kolom dengan kedalaman yang lebih besar menghasilkan nilai penurunan yang lebih kecil dibandingkan dengan kolom yang tidak mencapai lapisan tanah keras. Kondisi ini mengindikasikan bahwa transfer beban dari timbunan menuju lapisan tanah yang lebih stabil menjadi lebih optimal sehingga potensi terjadinya penurunan diferensial dapat diminimalisasi.

Distribusi tegangan yang dihasilkan dari variasi konfigurasi DSM memperlihatkan bahwa kombinasi jarak kolom yang lebih rapat dengan kedalaman yang lebih besar mampu meningkatkan faktor keamanan lereng timbunan. Tegangan efektif yang semula terpusat pada lapisan tanah lunak mengalami redistribusi menuju kolom DSM yang memiliki modulus elastisitas lebih tinggi dibandingkan tanah asli. Keadaan tersebut menyebabkan berkurangnya potensi deformasi lateral yang umumnya menjadi penyebab utama kegagalan stabilitas pada konstruksi timbunan di atas tanah lunak.

Hasil analisis deformasi total menunjukkan bahwa konfigurasi DSM dengan rasio jarak terhadap diameter kolom yang lebih kecil memberikan kinerja stabilisasi yang lebih baik. Penurunan maksimum yang terjadi pada permukaan timbunan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya jumlah kolom DSM dalam suatu area perbaikan tanah. Peningkatan jumlah kolom tersebut berimplikasi langsung terhadap peningkatan area perkuatan sehingga sistem perbaikan tanah mampu bekerja sebagai struktur komposit antara tanah dan kolom stabilisasi.

Evaluasi terhadap hasil simulasi juga menunjukkan adanya hubungan linier antara peningkatan kedalaman kolom DSM dengan penurunan nilai settlement yang terjadi. Kondisi tersebut menegaskan bahwa penetrasi kolom hingga mencapai lapisan tanah dengan nilai N-SPT yang lebih tinggi berkontribusi terhadap peningkatan kekakuan sistem tanah secara keseluruhan. Mekanisme ini memungkinkan beban timbunan untuk ditransfer secara lebih efektif menuju lapisan tanah yang memiliki kapasitas dukung lebih baik sehingga deformasi jangka panjang akibat konsolidasi dapat ditekan.

Berdasarkan perbandingan hasil analisis numerik dan perhitungan manual, variasi konfigurasi DSM yang optimal ditunjukkan oleh kombinasi jarak kolom yang relatif rapat dengan kedalaman yang mencapai lapisan tanah pendukung. Konfigurasi tersebut memberikan nilai deformasi yang paling kecil serta faktor keamanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi lainnya. Penerapan metode DSM dengan parameter konfigurasi yang tepat terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas timbunan jalan tol yang dibangun di atas tanah lunak.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan analitis dan analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D, metode Deep Soil Mixing (DSM) terbukti efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah lunak dan mengurangi

deformasi akibat beban timbunan. Tanah tanpa perbaikan hanya mampu menahan timbunan hingga tinggi kritis sekitar 3,95 m secara analitis dan sekitar 4,0 m secara numerik, sedangkan tanah yang diperbaiki dengan kolom DSM tetap stabil hingga akhir masa pengamatan selama 10 tahun setelah konstruksi. Analisis terhadap dua variasi desain menunjukkan bahwa konfigurasi DSM dengan jarak 1 m dan kedalaman 6 m menghasilkan deformasi yang lebih kecil, yaitu penurunan sebesar 23,071 cm pada akhir konstruksi dan 25,343 cm setelah konsolidasi 10 tahun (tambahan 2,272 cm), dibandingkan dengan variasi jarak 1,5 m dan kedalaman 8 m yang menghasilkan penurunan sebesar 26,296 cm pada akhir konstruksi dan 30,533 cm setelah 10 tahun (tambahan 4,237 cm). Dari sisi stabilitas, model DSM jarak 1 m dan kedalaman 6 m juga menunjukkan kinerja yang lebih optimal dengan faktor keamanan sebesar 1,100 dan area replacement ratio (as) sebesar 0,385 pada fase konsolidasi 10 tahun, dibandingkan model jarak 1,5 m dan kedalaman 8 m yang menghasilkan faktor keamanan 1,083 dengan as sebesar 0,17, sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi DSM dengan jarak 1 m dan kedalaman 6 m merupakan konfigurasi yang paling efektif dan konsisten dalam meningkatkan kestabilan timbunan pada tanah lunak.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, I. A., Maulana, E. I., & Santoso, H. T. (2023). Evaluasi Metode Perbaikan Tanah Lunak dengan Preloading Kombinasi PVD-PHD pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Semarang-Demak Paket II. *Bentang: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 11(1), 21-36. <https://doi.org/10.33558/bentang.v1i1.4622>.
- Anggraini, A. D., Rifaâ, A., & Faris, F. (2018). Perbaikan Tanah Dasar Jalan Tol Semarang â€“Demak Menggunakan Bahan Aditif Dan Perkuatan Kolom Stabilisasi. *Rekayasa Sipil*, 12(1), 22-31. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil/2018.012.01.4>.
- Aryandi, S. K., Mochtar, I. B., Endah, N., & Artanto, A. A. (2025). Design of Toll Road Embankment With Secondary Compression Mitigation After Pvd Installation and Solutions For The Probolinggo–Banyuwangi Toll Road Construction Project Package 2 Sta 16+ 300–Sta 16+ 700. *Journal of Infrastructure & Facility Asset Management*, 7(1). <http://dx.doi.org/10.12962%2Fjifam.v7i1.22418>.
- Aslam, Z., & Gofar, N. (2022). The effect of soil stabilization and reinforcement on the stability of embankment on soft soil. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 356-367. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.4613>.
- Bouassida, M., & Porbaha, A. (2004). Ultimate bearing capacity of soft clays reinforced by a group of columns—application to a deep mixing technique. *Soils and foundations*, 44(3), 91-101. https://doi.org/10.3208/sandf.44.3_91.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). *Pedoman Perancangan Stabilisasi Tanah-Semen Tipe Kolom*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Fathonah, W., Kusuma, R. I., Mina, E., Baehaki, B., & Rizka, B. (2024). The Effect of Fly Ash-Based Geopolymer Proportion on the Specific Gravity of Mixed Soil. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 13(2), 220-231. <https://dx.doi.org/10.62870/fondasi.v13i2.32682>.
- Hamdhan, I. N., & Akbar, R. M. (2022). Pemodelan Perbaikan Tanah Lunak Dengan Kombinasi Metode Vacuum Preloading Dan Deep Mixing Column. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 5(4), 857-870. <https://doi.org/10.24912/jmts.v5i4.20338>.
- Hamdhan, I. N., & Firuliadhim, G. (2025). Perbaikan Nilai Kadar Air Dan Indeks Plastisitas Tanah Lempung Lunak Menggunakan Bahan Tambah Expanded Polystyrene (EPS) Dan Residium Cracking Catalyst 15 (RCC 15). *Wahana Teknik Sipil: Jurnal Pengembangan Teknik Sipil*, 30(1), 152-160. <https://doi.org/10.32497/wahanats.v30i1.6424>.
- Karminto, K. (2023). Teknologi Terbaru Teknik Perbaikan Tanah Pada Tanah Lunak Yakni Pondasi Dalam Dan Sheetpile L> 12M. *Jurnal Darma Agung*, 31(2). <http://dx.doi.org/10.46930/ojsuda.v31i2.3092>.
- Laia, B., Giawa, J. F. K., Mendrofa, K. B., Harefa, A. C., & Gulo, L. T. B. J. (2025). Perbandingan Kinerja Sistem Perkuatan Tanah Pada Penanganan Lereng Tidak Stabil Di Proyek Jalan Tol. *Jurnal Ilmu Teknik Sipil Indonesia*, 1(1), 19-24. <https://doi.org/10.70134/jitesna.v1i1.748>.

- Lebang, P., & Yunianti, N. H. (2023). Stabilisasi Perbaikan Tanah Lempung di Ruas Jalan Tol Seksi IV Makassar Dengan Metode Grouting. *EMPOWERMENT: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 1(2), 98-110. <https://doi.org/10.35965/je.v1i2.3925>.
- Lumanauw, P. W., Pinasang, D. B., Tampi, R. W., & Lonan, P. T. (2024). Stabilisasi Tanah Gambut Dengan Semen Menggunakan Metode Deep Mixing. In *Prosiding Seminar Nasional Produk Terapan Unggulan Vokasi* (Vol. 3, No. 1, pp. 92-109).
- Muis, A., & Wulandari, S. (2023). Analisis Penurunan Gabungan Prefabricated Vertical Drain dan Stone Column Untuk Perbaikan Tanah Lunak. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 29(1), 23-31. <https://doi.org/10.14710/mkts.v29i1.48050>.
- Permana, A., Despa, D., & Septiana, T. (2023, May). Metode Cerucuk Matras Beton Sebagai Perkuatan Daya Dukung Tanah di Area Transisi Antara Area Timbunan di Area Tanah Lunak Dengan Struktur. In *Seminar Nasional Insinyur Profesional (SNIP)* (Vol. 3, No. 1). <https://doi.org/10.23960/snip.v3i1.384>.
- Porbaha, A. (1998). State of the art in deep mixing technology: part I. Basic concepts and overview. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2(2), 81-92. <https://doi.org/10.1680/gi.1998.020204>.
- Putra, P. P., Ma'ruf, M. F., Ridwansyah, M. A., Kurniawan, R., & Carisa, C. N. (2021). Perubahan potensi mengembang tanah ekspansif yang distabilisasi secara fisis dan mekanis. *Construction and material journal*, 3(1), 1-14. <https://doi.org/10.32722/cmj.v3i1.3686>.
- Sari, U. C., Wardani, S. P. R., Muntohar, A. S., Partono, W., & Sadono, K. W. (2023). Consolidation settlement prediction and monitoring of toll road embankment at STA 23+ 650 Semarang–Demak Toll Road section. In *E3s Web of Conferences* (Vol. 429, p. 04026). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342904026>.
- Tyas, M. D. A., Isnaniati, I., & Utama, D. A. (2022). Pengaruh Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Deep Mixing Terhadap Besarnya Penurunan. *Konstruksia*, 14(1), 140-151. <https://doi.org/10.24853/jk.14.1.140-151>.
- Wibawa, M. R., & Prawira, Y. (2025). Studi Literatur Mengenai Berbagai Teknik Stabilisasi Tanah Sebagai Solusi Permasalahan Geoteknik. *Jurnal Teknik Silitek*, 5(03), 1677-1686. <https://doi.org/10.51135/qjq7vc11>.
- Wintoro, B., Yudistia, D., Putri, N. Y., & Somantri, A. K. (2025). Pengaruh Diameter dan Jarak Stone Column Terhadap Perkuatan Tanah Dasar Di Proyek Jalan Tol Yogyakarta Bawen Seksi I Paket I STA 71+ 875–72+ 100. *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, 7(2), 66-75. <https://doi.org/10.47600/jtst.v7i2.1157>.