



ANALISIS PENURUNAN LANTAI SISTEM PENAHANAN SEKUNDER PADA TANGKI BBM DI AREA OPERASIONAL TAMBANG GURIMBANG

Adang Surahman¹, L. Budi Bambang Prastyo²

Institut Teknologi Sains Bandung
E-mail: adang.surahman@itsb.ac.id

ABSTRACT

Settlement of the secondary containment floor at fuel oil (BBM) storage facilities can reduce containment effectiveness and increase operational and environmental risk. At the Gurimbang Mining Operational Area fuel storage facility, floor settlement produced a gap between the containment floor and the tank foundation, with field-observed deformation ranging from 8.6 cm to 24 cm. This study analyzes the influence of the existing soil characteristics on this settlement and formulates an appropriate technical soil-improvement recommendation, using a quantitative descriptive-analytical approach that combines Cone Penetration Test (CPT) data, foundation structural modeling in AFES (Automatic Foundation Engineering System), and soil deformation modeling in PLAXIS with the Mohr-Coulomb material model. The AFES analysis shows the existing tank foundation remains stable under all operating load combinations, so the observed settlement is not a structural failure. The PLAXIS model gives a maximum vertical deformation of 26 cm, consistent with the field deformation of 24 cm at Point A and 22.5 cm at Point B, with an average error of 11.95%. The dominant cause is a High Plasticity Clay (CH) layer with high compressibility and low permeability, which drives long-term consolidation settlement under the tank's sustained static load. Deep Soil Mixing (DSM) is recommended as the technical soil-improvement solution to increase soil stiffness and bearing capacity and to reduce further differential settlement of the containment floor.

Keywords: *settlement; secondary containment; AFES; PLAXIS; deep soil mixing.*

ABSTRAK

Penurunan (settlement) pada lantai sistem penahanan sekunder (secondary containment) fasilitas penyimpanan bahan bakar minyak (BBM) di Area Operasional Tambang Gurimbang telah menimbulkan celah antara lantai containment dan pondasi tangki, dengan deformasi lapangan yang teramati berkisar antara 8,6 cm hingga 24 cm. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik tanah eksisting terhadap terjadinya settlement tersebut serta merumuskan rekomendasi teknis perbaikan tanah yang sesuai. Pendekatan yang digunakan

Article History

Received: July 2026
Reviewed: July 2026
Published: July 2026

Plagiarism Checker No 235

Prefix DOI :

[10.8734/Kohesi.v1i2.365](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



bersifat kuantitatif deskriptif-analitis melalui evaluasi data Cone Penetration Test (CPT) dan parameter geoteknik, pemodelan struktur pondasi eksisting menggunakan perangkat lunak AFES (Automatic Foundation Engineering System), serta pemodelan deformasi tanah menggunakan PLAXIS dengan model material Mohr-Coulomb. Hasil analisis AFES menunjukkan bahwa struktur pondasi tangki eksisting masih berada dalam kondisi stabil terhadap seluruh kombinasi pembebanan operasional (kondisi kosong, operasi, dan uji hidrostatik), sehingga settlement yang terjadi bukan disebabkan oleh kegagalan struktur. Hasil pemodelan PLAXIS menunjukkan deformasi vertikal maksimum sebesar 26 cm, sejalan dengan deformasi lapangan sebesar 24 cm pada Titik A dan 22,5 cm pada Titik B, dengan galat rata-rata model numerik terhadap kondisi aktual sebesar 11,95%. Penyebab utama settlement teridentifikasi sebagai karakteristik tanah lempung plastisitas tinggi (High Plasticity Clay/CH) yang memiliki kompresibilitas tinggi dan permeabilitas rendah, sehingga memicu konsolidasi jangka panjang di bawah beban statis tangki. Berdasarkan temuan tersebut, metode Deep Soil Mixing (DSM) direkomendasikan sebagai solusi perbaikan tanah untuk meningkatkan kekakuan dan daya dukung lapisan tanah lunak serta mengurangi potensi differential settlement pada area containment.

Kata Kunci: *settlement; secondary containment; AFES; PLAXIS; deep soil mixing*

1. PENDAHULUAN

Kegiatan operasional pertambangan sangat bergantung pada ketersediaan bahan bakar minyak (BBM) sebagai sumber energi utama bagi alat berat, kendaraan operasional, generator, dan peralatan penunjang produksi lainnya. Fasilitas penyimpanan BBM karenanya menjadi infrastruktur kritis yang menjamin keberlangsungan produksi secara aman dan berkesinambungan. Gangguan pada fasilitas ini – baik akibat kebocoran, tumpahan, maupun kegagalan struktur pendukung – berpotensi menghentikan rantai pasok energi bagi seluruh armada operasional tambang, sehingga aspek keandalan strukturnya perlu mendapat perhatian yang setara dengan aspek keselamatan proses (process safety) [2].

Untuk meminimalkan risiko pencemaran tanah dan air tanah akibat kebocoran atau tumpahan bahan bakar, tangki penyimpanan BBM umumnya dilengkapi sistem penahanan sekunder (secondary containment) yang berfungsi menampung cairan apabila terjadi kegagalan pada tangki utama (primary containment). National Fire Protection Association [11] mensyaratkan sistem penahanan sekunder dirancang untuk menampung sekurang-kurangnya 110% volume tangki terbesar dalam area penampungan, sementara American Petroleum Institute API 650 turut mensyaratkan keberadaan fasilitas penahanan sekunder sebagai bagian dari pengendalian risiko kebocoran tangki penyimpanan minyak. Kedua ketentuan ini menempatkan rantai containment bukan sekadar elemen pelengkap, melainkan komponen mitigasi risiko lingkungan yang keandalannya harus terjaga sepanjang umur layan fasilitas [10].



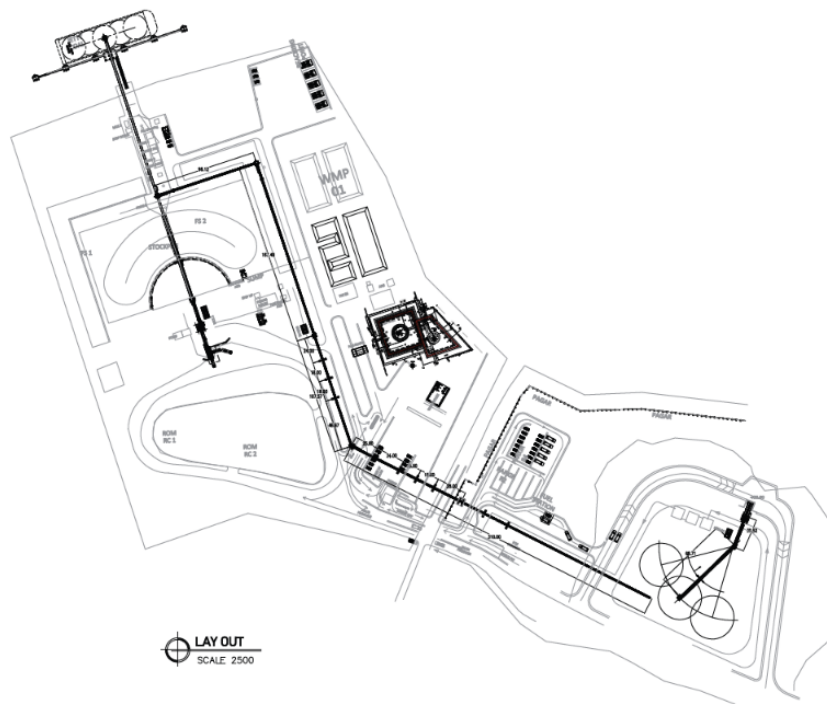
Keandalan rantai containment sebagai komponen penahan sekunder sangat dipengaruhi oleh kondisi struktur dan tanah pendukungnya. Menurut Das dan Sobhan [5], settlement adalah penurunan vertikal permukaan tanah akibat deformasi lapisan tanah karena pengaruh beban di atasnya, yang dapat terjadi secara merata (uniform settlement) maupun tidak merata (differential settlement). Differential settlement merupakan bentuk penurunan yang paling berisiko karena dapat menimbulkan distorsi struktur, perubahan kemiringan, dan retakan pada elemen konstruksi meskipun besaran settlement total relatif kecil. Pada struktur tangki timbun (above-ground storage tank), differential settlement lebih kritis dibandingkan uniform settlement karena dapat mengganggu kelurusan dinding tangki (tank shell out-of-plumbness) dan menimbulkan tegangan tambahan pada sambungan las dasar tangki [1].

Pada fasilitas penyimpanan BBM di Area Operasional Tambang Gurimbang, Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, teramati penurunan pada rantai sistem penahanan sekunder yang mengakibatkan terbentuknya celah antara rantai containment dan pondasi tangki, dengan besar penurunan berkisar 8,6-24 cm. Celah tersebut berpotensi menjadi jalur masuk air ke bawah slab pondasi, memicu penurunan daya dukung tanah pendukung, settlement lanjutan, kemiringan tangki, serta kerusakan pada sistem perpipaan fuel dan hydrant akibat tarikan atau deformasi jaringan pipa yang terhubung ke tangki. Dalam jangka panjang, kondisi ini juga berisiko meningkatkan biaya perawatan (maintenance cost) fasilitas secara tidak terjadwal apabila tidak segera ditangani berdasarkan pemahaman mekanisme penurunan yang tepat [4].

Kondisi tersebut mendasari perlunya kajian geoteknik untuk mengidentifikasi mekanisme penurunan serta menyusun rekomendasi teknis perbaikan tanah yang tepat, dengan menggabungkan evaluasi struktur pondasi eksisting menggunakan perangkat lunak AFES dan pemodelan deformasi tanah menggunakan PLAXIS berbasis metode elemen hingga. Pendekatan gabungan struktur-tanah ini penting karena settlement pada fasilitas tangki dapat bersumber dari dua mekanisme yang berbeda – kegagalan atau defisiensi struktur pondasi di satu sisi, dan deformasi tanah pendukung di sisi lain – yang keduanya memerlukan alat analisis dan strategi penanganan yang berbeda pula [3].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis dalam bentuk studi kasus (case study), dilaksanakan pada fasilitas penyimpanan BBM Gurimbang Mine Operation (GMO), Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur. Lokasi ini dipilih karena teridentifikasi mengalami settlement pada rantai secondary containment dan berada pada zona tanah lempung plastisitas tinggi yang representatif untuk mengkaji hubungan antara karakteristik geoteknik dan perilaku settlement pada fasilitas tangki timbun. Tata letak (layout) objek penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

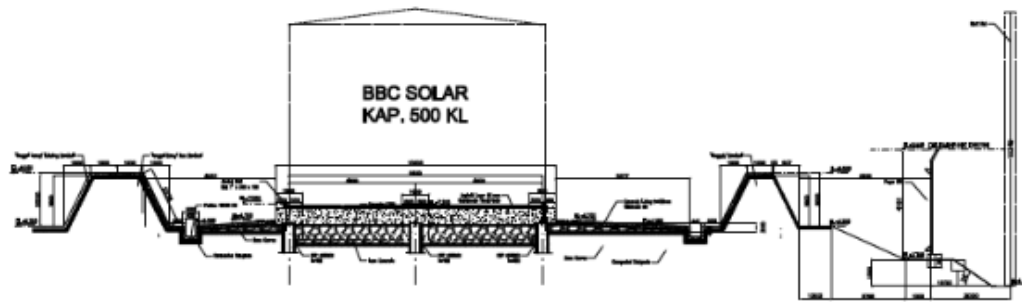


Gambar 1. Layout objek penelitian pada fasilitas penyimpanan BBM Gurimbang

Data yang digunakan terdiri dari data primer – observasi visual, dokumentasi kondisi eksisting, dan pengukuran settlement pada titik pengamatan A dan B – serta data sekunder berupa laporan investigasi tanah (data CPT, borelog, dan SPT), as-built drawing fasilitas, data teknis tangki, serta data monitoring settlement yang tersedia. Geometri struktur tangki dan pondasi eksisting yang digunakan sebagai input pemodelan dirangkum pada Tabel 2, dan potongan melintang tangki eksisting ditunjukkan pada Gambar 2.

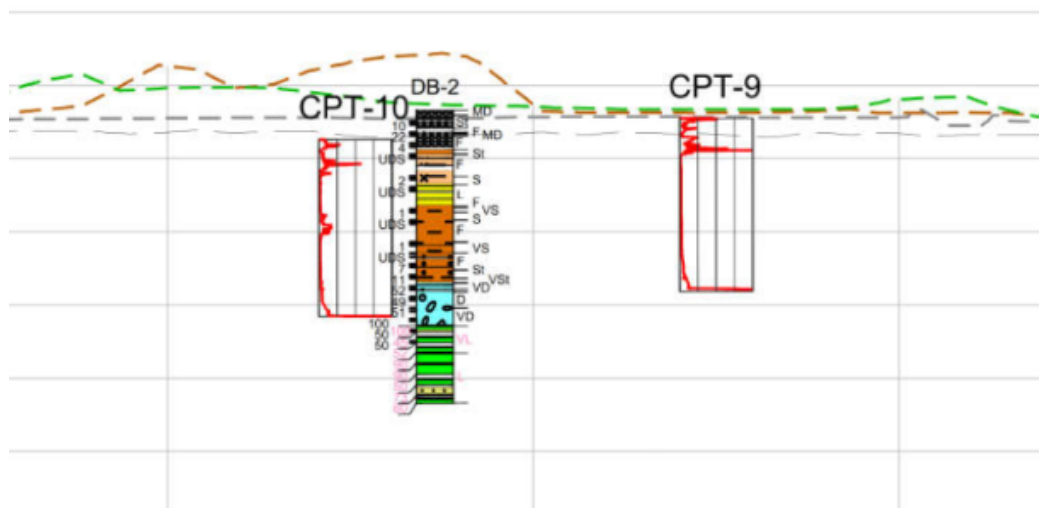
Tabel 2. Data geometri struktur eksisting

Parameter	Nilai	Satuan
Diameter tangki	9,6	M
Tinggi tangki	5,0	M
Diameter pondasi (ring foundation)	10,6	M
Tebal pondasi	1,0	M
Panjang lantai secondary containment	5,0	M
Tebal slab containment	0,3	M
Elevasi eksisting	+6,70	M



Gambar 2. Potongan melintang tangki BBM dan lantai secondary containment eksisting

Data tanah yang digunakan berasal dari data sekunder hasil investigasi geoteknik pada titik uji terdekat dengan lokasi penelitian, yaitu Cone Penetration Test (CPT) 9 dan CPT 11, dilengkapi data borelog dan Standard Penetration Test (SPT). Data tersebut digunakan untuk menentukan stratigrafi tanah, jenis tanah dominan, serta parameter geoteknik input pemodelan sebagaimana dirangkum pada Tabel 3. Hasil klasifikasi menunjukkan lapisan tanah didominasi lempung plastisitas tinggi (High Plasticity Clay/CH) dari permukaan hingga kedalaman signifikan, sebagaimana ditunjukkan pada potongan vertikal CPT 9 (Gambar 3).



Gambar 3. Potongan vertikal (section) hasil Cone Penetration Test CPT 9

Tabel 3. Parameter geoteknik tanah eksisting yang digunakan dalam pemodelan

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Berat isi tanah (unsaturated)	γ_{unsat}	18	kN/m^3
Berat isi tanah (saturated)	γ_{sat}	20	kN/m^3
Sudut geser dalam	ϕ	22	$^{\circ}$
Modulus elastisitas beton	E_c	4700/25	MPa
Rasio Poisson	ν	0,3	-
Indeks kompresi	C_c	0,2	-

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Koefisien konsolidasi	Cv	1×10^{-8}	m ² /tahun

Beban yang digunakan meliputi berat struktur eksisting (erection weight 157,0 ton), beban operasi (operation weight 4.559,7 ton), beban uji hidrostatik (test weight 3.607,4 ton), beban hidup L = 24,5 ton pada eksentrisitas $e = 0,212D = 2,77$ m sehingga menghasilkan momen $ML = 67,9$ ton.m, beban angin W = 29,95 ton dengan momen $M_{we} = 406,12$ ton.m, serta beban gempa dengan gaya geser $V = 136,8$ ton dan momen $M_v = 1.855$ ton.m. Seluruh beban tersebut dikombinasikan mengikuti tiga kondisi operasional utama – kosong, operasi, dan uji – sebagaimana dirangkum pada Tabel 4, dan dievaluasi terhadap kapasitas desain pondasi eksisting pada AFES.

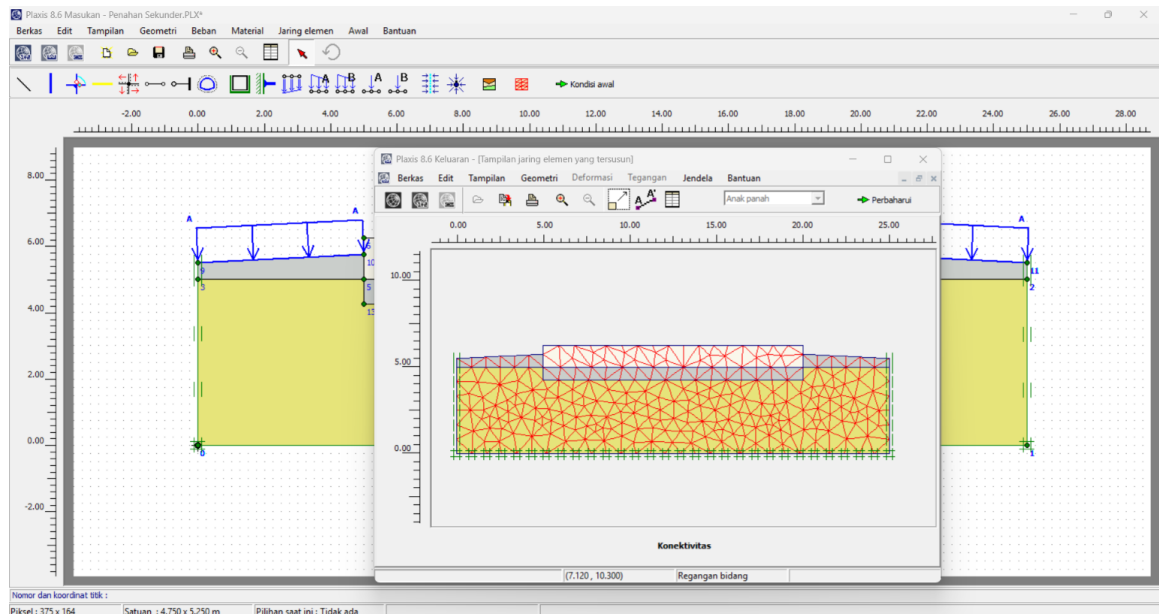
Tabel 4. Ringkasan kombinasi pembebanan yang dievaluasi pada AFES

No. Kombinasi	Deskripsi Kombinasi Pembebanan	Kondisi
101-105	Kondisi kosong (empty): SW + Empty, dikombinasikan dengan beban hidup dan/atau angin	Empty
106-113	Kondisi operasi (operation): SW + Operation, dikombinasikan dengan beban hidup, angin, dan/atau gempa (0,7 SL2)	Operation
114-118	Kondisi uji hidrostatik (test): SW + Test, dikombinasikan dengan beban hidup dan/atau angin	Test

Pemodelan struktur pondasi tangki dilakukan menggunakan perangkat lunak AFES dengan input berupa data geometri, material properties, serta seluruh kombinasi pembebanan pada Tabel 4. Evaluasi dilakukan terhadap bearing pressure, base reaction, dan contact pressure pada tiap kombinasi beban untuk memverifikasi stabilitas struktur eksisting melalui design capacity check. Tekanan kontak (contact pressure) hasil AFES selanjutnya diteruskan sebagai beban input pada pemodelan deformasi tanah menggunakan PLAXIS, sehingga kedua tahap analisis saling terhubung dalam satu rangkaian evaluasi struktur-tanah.

Analisis deformasi tanah dilakukan menggunakan metode elemen hingga (finite element method) pada perangkat lunak PLAXIS dengan model konstitutif Mohr-Coulomb, yang dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku elastoplastik tanah dengan lima parameter input utama – modulus elastisitas (E), rasio Poisson (ν), kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan sudut dilatansi (ψ) – yang relatif sederhana namun representatif untuk analisis deformasi tahap awal. Tahapan pemodelan meliputi: (1) penyusunan soil stratigraphy berdasarkan data borehole dan SPT; (2) input material model tanah, beton pondasi, dan rantai kerja; (3) mesh generation untuk mendiskretisasi domain tanah menjadi elemen hingga (Gambar 4); dan (4) simulasi construction

stage secara bertahap (staged construction) untuk merepresentasikan urutan pembebanan aktual, mengingat tanah lempung berkompresibilitas tinggi memberikan respons konsolidasi yang berkembang seiring waktu, bukan seketika.



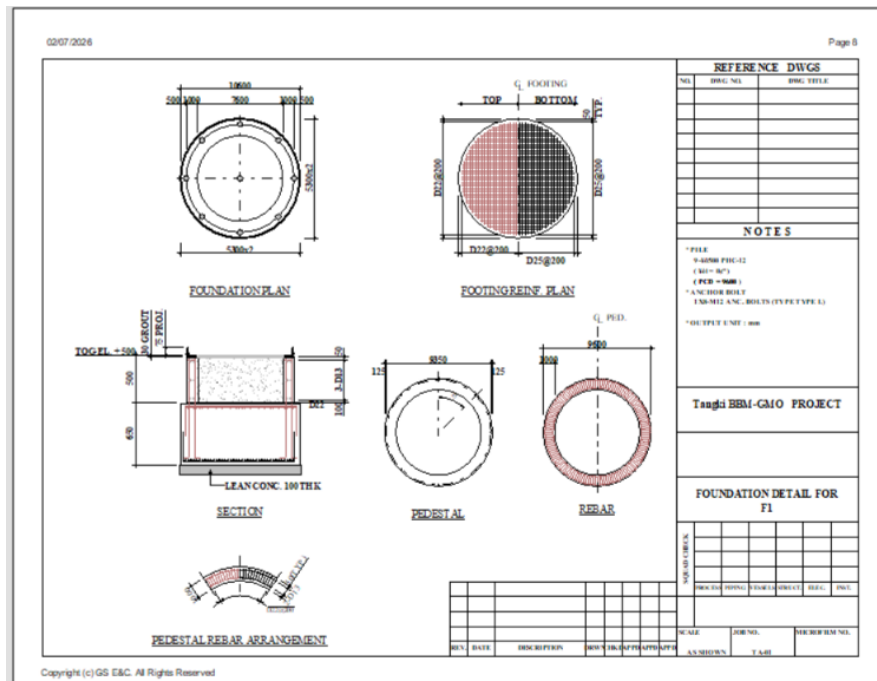
Gambar 4. Mesh elemen hingga (finite element mesh) model tanah pada PLAXIS

Keluaran model berupa total displacement, vertical displacement, kontur settlement, dan differential settlement, yang selanjutnya dibandingkan terhadap deformasi hasil pengukuran lapangan pada Titik A dan Titik B untuk menilai tingkat kesesuaian (validasi) model numerik terhadap kondisi aktual.

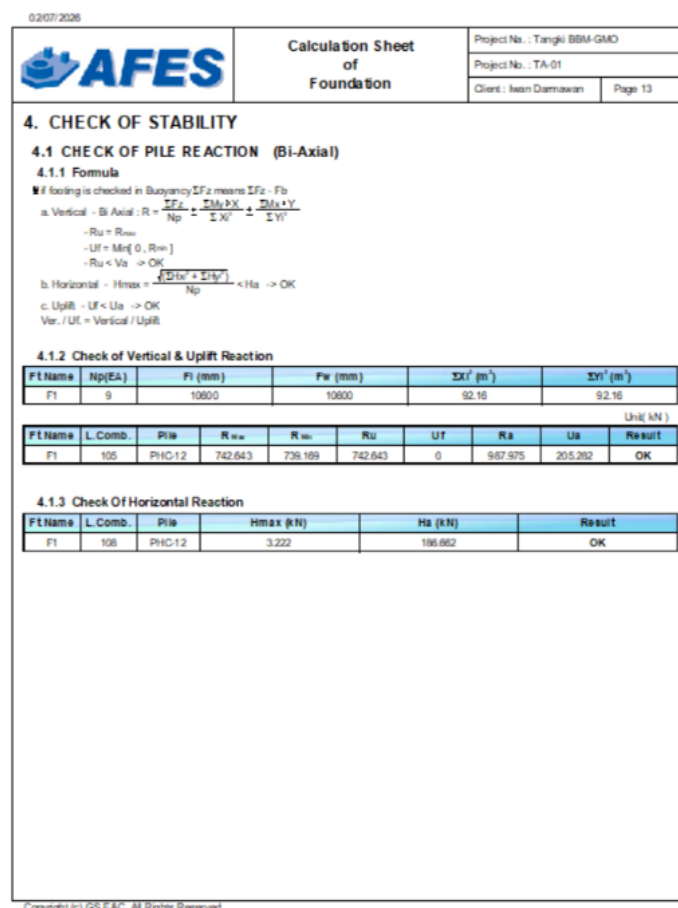
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Stabilitas Struktur Pondasi (AFES)

Hasil analisis AFES terhadap seluruh kombinasi pembebanan – kondisi kosong, operasi, dan uji hidrostatik, termasuk kombinasi dengan beban hidup, angin, dan gempa – menunjukkan bahwa struktur pondasi tangki eksisting masih berada dalam kondisi stabil dan mampu menahan pembebanan operasional yang bekerja. Contoh keluaran perhitungan kapasitas dan kontrol reaksi pondasi ditunjukkan pada Gambar 5, sedangkan rekapitulasi kontrol stabilitas terhadap reaksi tumpuan pondasi (pile/footing reaction) ditunjukkan pada Gambar 6. Seluruh parameter yang dievaluasi – bearing pressure, base reaction, dan contact pressure – memberikan status “OK” terhadap kapasitas desain, tanpa indikasi kegagalan struktur maupun keruntuhan pondasi.



Gambar 5. Detail geometri fondasi eksisting (foundation, pedestal, dan penulangan) yang dievaluasi pada AFES



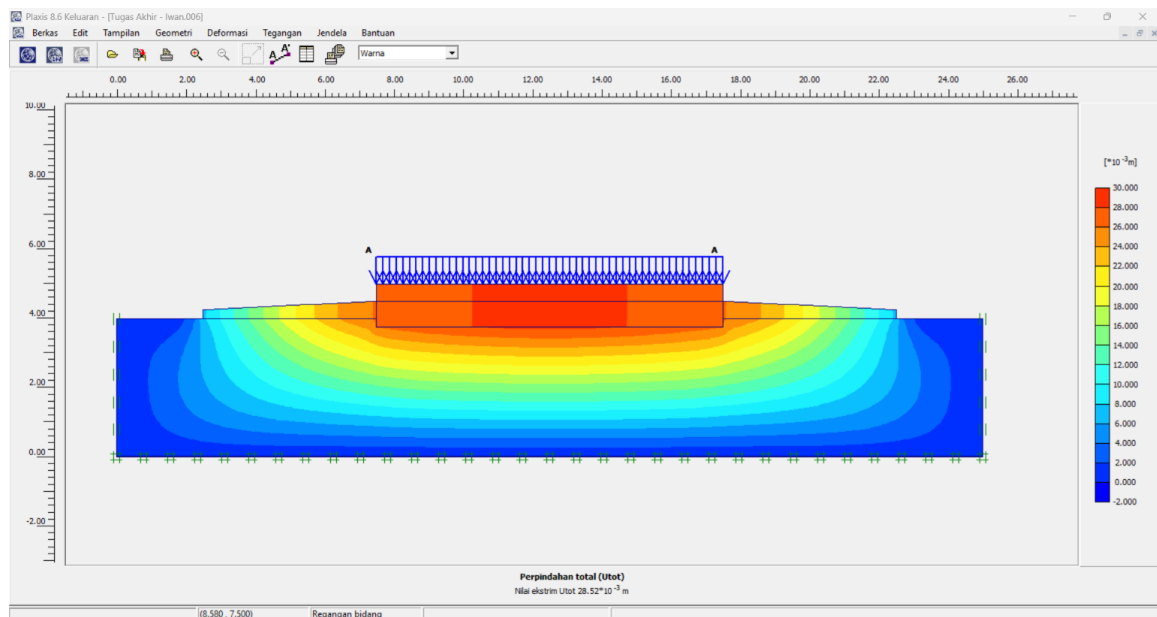
Gambar 6. Rekapitulasi kontrol stabilitas (check of pile reaction) struktur pondasi eksisting pada AFES

Dengan demikian, penurunan (settlement) yang teramati pada lantai sistem penahanan sekunder bukan disebabkan oleh ketidakmampuan struktur pondasi dalam memikul beban, melainkan lebih dipengaruhi oleh kondisi tanah pendukung di bawahnya. Temuan ini menjadi

dasar bagi analisis lanjutan yang difokuskan pada perilaku deformasi tanah menggunakan PLAXIS pada subbagian berikut.

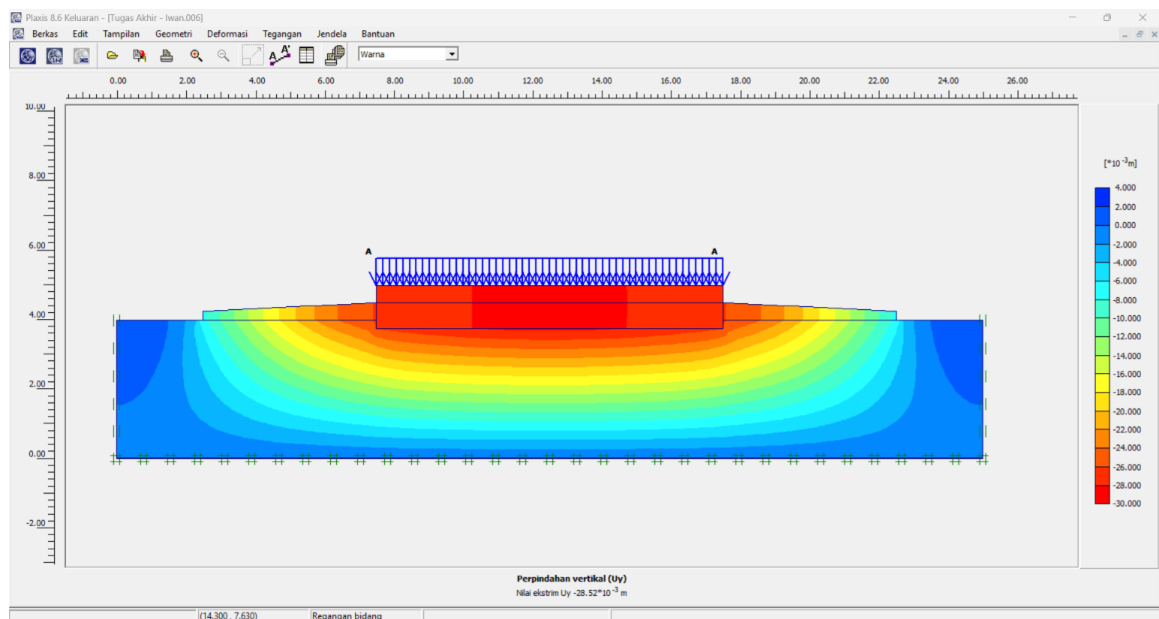
3.2 Hasil Pemodelan Deformasi Tanah (PLAXIS)

Hasil pemodelan total displacement pada PLAXIS ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai perpindahan total ekstrem tercatat sebesar $28,52 \times 10^{-3}$ m ($\approx 28,5$ cm) pada zona di bawah beban tangki, dengan pola kontur yang terpusat pada area kontak antara pondasi dan tanah – mengindikasikan bahwa redistribusi tegangan terbesar terjadi tepat di bawah beban terpusat tangki.



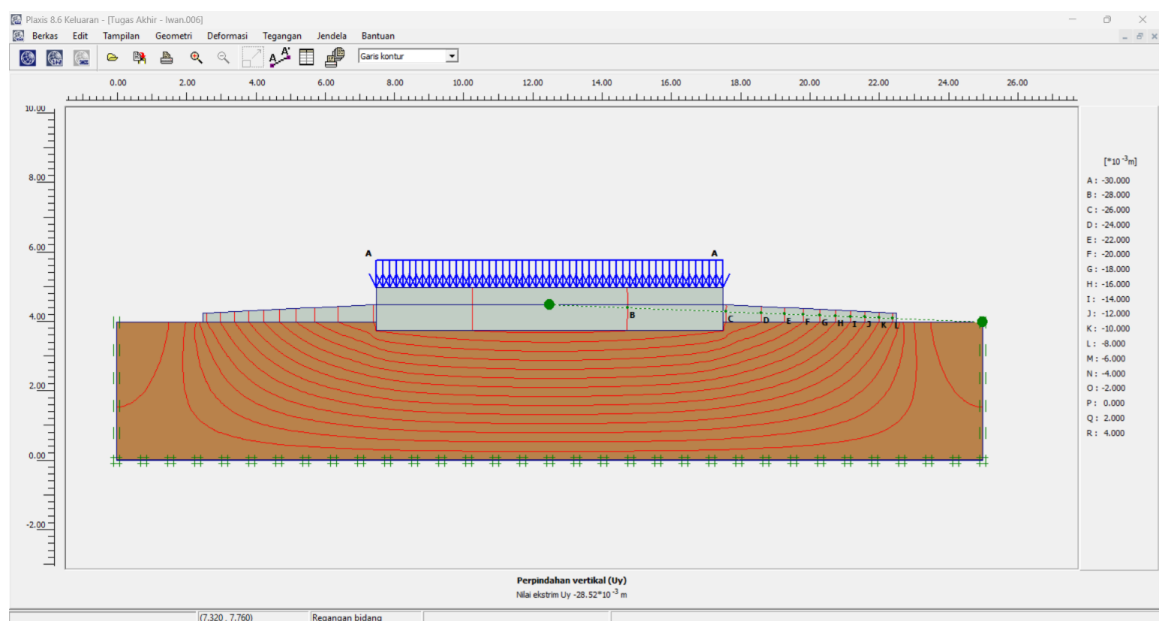
Gambar 7. Kontur total displacement hasil pemodelan PLAXIS

Vertical displacement merupakan parameter utama dalam analisis settlement karena secara langsung merepresentasikan besarnya penurunan tanah akibat pembebanan. Hasil pemodelan menunjukkan deformasi vertikal maksimum sebesar 26 cm pada area pembebanan tangki (Gambar 8), konsisten dengan rentang deformasi lapangan yang teramati sebesar 8,6-24 cm pada berbagai titik di sekeliling containment.



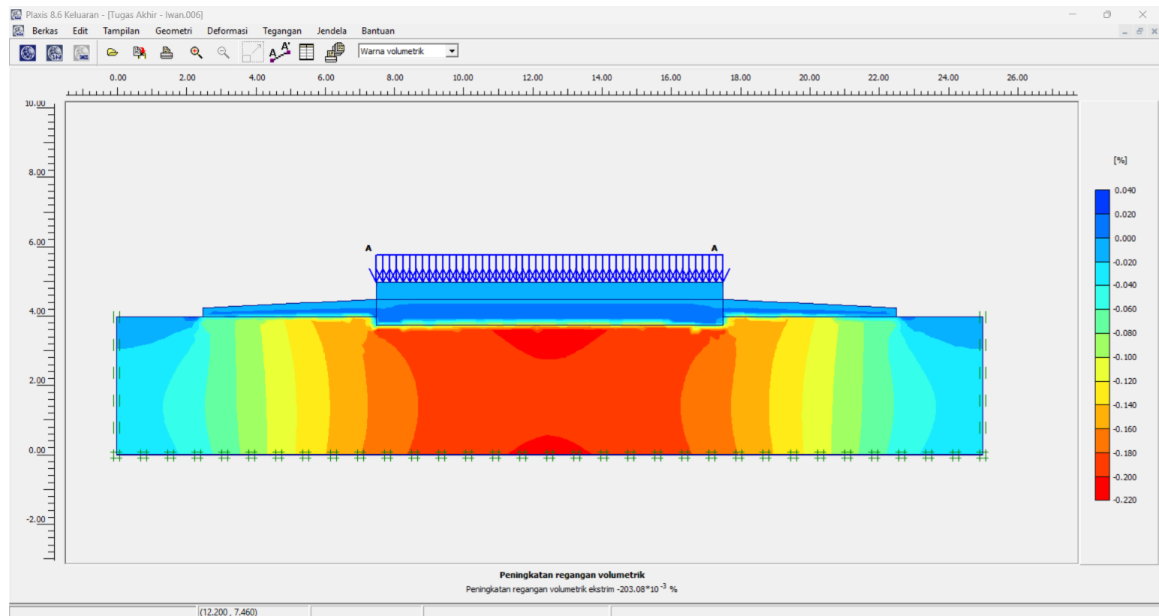
Gambar 8. Kontur vertical displacement hasil pemodelan PLAXIS

Kontur settlement pada Gambar 9 memperlihatkan pola distribusi penurunan yang menurun secara gradual dari titik pusat beban tangki ke arah tepi model, dengan garis-garis kontur yang lebih rapat di area bawah tangki – menandakan gradien deformasi yang tinggi pada zona tersebut dan mendukung diperlukannya perhatian khusus pada area di sekitar tepi pondasi, tempat rantai containment berada.



Gambar 9. Kontur settlement (garis kontur perpindahan vertikal) hasil pemodelan PLAXIS

Differential settlement, yaitu perbedaan besarnya settlement antar titik pada struktur, menjadi perhatian utama karena dapat menyebabkan distorsi meskipun settlement total relatif kecil. Hasil pemodelan pada Gambar 10 menunjukkan adanya perbedaan penurunan antara area di bawah tangki dan area rantai containment di sekelilingnya, yang secara langsung menjelaskan mekanisme terbentuknya celah antara rantai containment dan pondasi tangki yang teramati di lapangan [6].



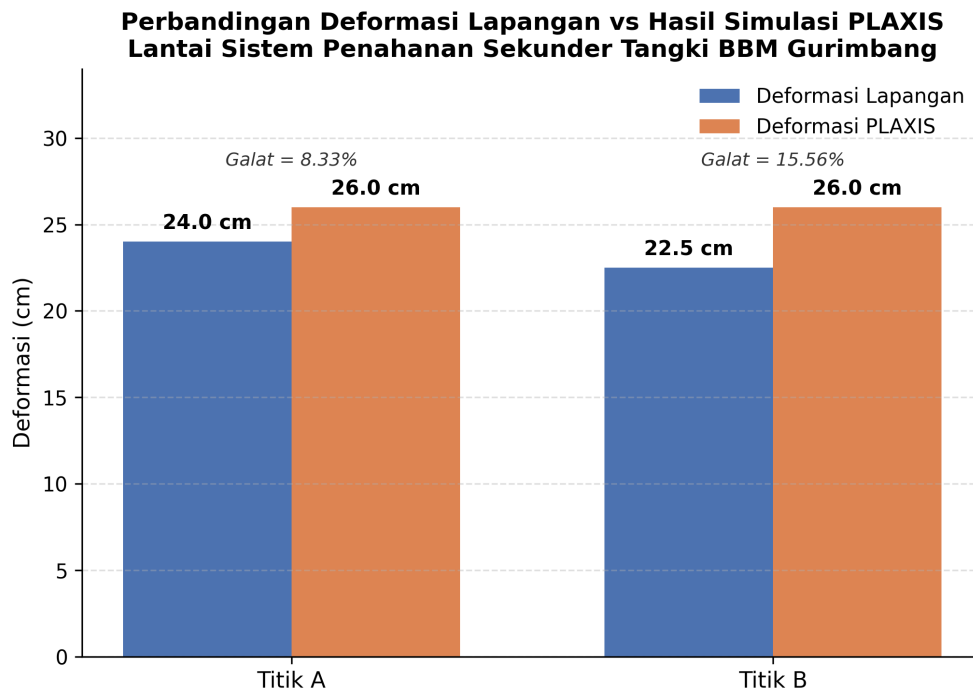
Gambar 10. Kontur differential settlement antara area pondasi tangki dan lantai secondary containment

3.3 Validasi Model Numerik terhadap Data Lapangan

Perbandingan antara deformasi hasil simulasi PLAXIS dan deformasi hasil pengukuran lapangan disajikan pada Tabel 5 dan divisualisasikan pada Gambar 11. Deformasi maksimum hasil simulasi PLAXIS sebesar 26 cm, sedangkan deformasi aktual lapangan sebesar 24 cm pada Titik A dan 22,5 cm pada Titik B, dengan selisih masing-masing 2 cm dan 3,5 cm. Galat (error) yang diperoleh adalah 8,33% pada Titik A dan 15,56% pada Titik B, dengan galat rata-rata 11,95%. Nilai galat yang berada di bawah 20% menunjukkan bahwa parameter geoteknik dan asumsi pembebanan yang digunakan dalam model Mohr-Coulomb mampu merepresentasikan perilaku deformasi tanah secara cukup realistis terhadap kondisi aktual lapangan, sehingga model numerik ini dapat digunakan sebagai dasar yang layak untuk perumusan rekomendasi perbaikan tanah pada subbagian berikutnya.

Tabel 5. Perbandingan deformasi hasil pengukuran lapangan dan simulasi PLAXIS

Titik Pengamatan	Deformasi Lapangan (cm)	Deformasi PLAXIS (cm)	Galat / Error (%)
A	24,0	26,0	8,33
B	22,5	26,0	15,56
Rata-rata	—	—	11,95



Gambar 11. Perbandingan deformasi lapangan vs hasil PLAXIS pada Titik A dan Titik B

3.4 Mekanisme dan Penyebab Settlement

Berdasarkan data investigasi tanah, lapisan tanah pada area penelitian didominasi oleh tanah lempung plastisitas tinggi (High Plasticity Clay/CH) yang memiliki karakteristik kompresibilitas tinggi, permeabilitas rendah, dan kemampuan drainase yang lambat. Kondisi ini menyebabkan tanah sangat rentan mengalami settlement konsolidasi di bawah pembebanan statis jangka panjang dari struktur tangki. Sesuai teori konsolidasi Terzaghi, pembebanan tangki meningkatkan tekanan air pori dalam tanah, yang kemudian berdisipasi secara bertahap; seiring proses tersebut, tegangan efektif meningkat dan volume tanah mengalami penurunan. Nilai modulus elastisitas tanah lempung CH yang relatif rendah dibandingkan tanah granular turut menyebabkan tanah lebih mudah mengalami deformasi vertikal, sementara permeabilitas rendah membuat disipasi tekanan air pori – dan karenanya settlement konsolidasi – berlangsung dalam jangka waktu yang panjang, sejalan dengan rentang settlement 8,6-24 cm yang telah terakumulasi hingga saat observasi dilakukan [7].

Dipadukan dengan hasil AFES pada subbagian 3.1 yang menunjukkan struktur pondasi tetap stabil pada seluruh kombinasi pembebanan, dapat disimpulkan bahwa mekanisme settlement pada lokasi penelitian murni bersifat geoteknik (soil-driven), bukan struktural (structure-driven) – sebuah pembedaan yang penting secara praktis karena kedua mekanisme tersebut menuntut strategi penanganan yang sepenuhnya berbeda: perkuatan struktur pondasi pada kasus kegagalan struktural, atau perbaikan tanah pendukung pada kasus seperti yang ditemukan di sini.

3.5 Pengaruh Karakteristik Tanah terhadap Settlement

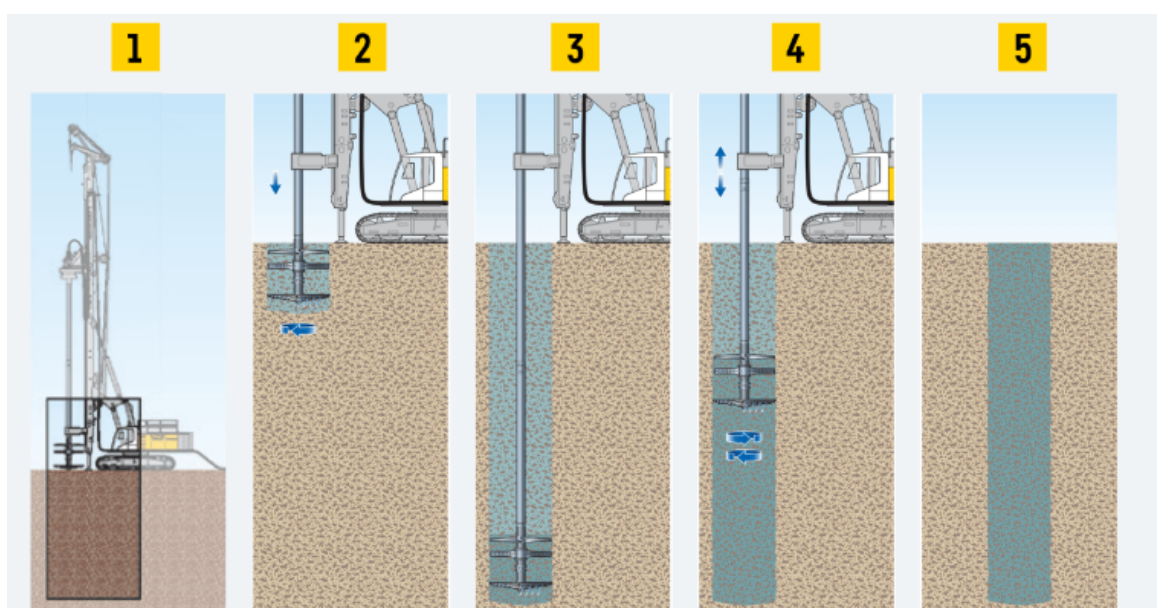
Karakteristik tanah pada lokasi penelitian memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap besarnya settlement yang terjadi pada lantai sistem penahanan sekunder. Tanah

lempung CH pada lokasi penelitian umumnya memiliki kadar air alami yang tinggi, struktur butiran yang halus, serta rongga pori yang relatif kecil sehingga menyebabkan kemampuan drainase tanah menjadi rendah. Kondisi tersebut mengakibatkan tanah memiliki kecenderungan mengalami deformasi yang lebih besar ketika menerima pembebanan statis secara terus-menerus. Salah satu karakteristik utama tanah lempung yang paling berpengaruh terhadap settlement adalah kompresibilitas tanah: semakin tinggi kompresibilitas suatu tanah, semakin besar perubahan volume yang terjadi akibat peningkatan tegangan efektif. Kondisi ini sesuai dengan hasil analisis PLAXIS yang menunjukkan deformasi vertikal maksimum mencapai 26 cm pada area pembebanan [13].

Selain kompresibilitas, ketidakseragaman stratigrafi tanah juga berkontribusi terhadap terbentuknya differential settlement. Variasi ketebalan lapisan tanah lunak dan perbedaan sifat mekanik antarlapisan menyebabkan distribusi deformasi menjadi tidak merata pada area penelitian, sebagaimana tercermin dari perbedaan nilai deformasi antara Titik A dan Titik B (selisih 1,5 cm). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa karakteristik utama tanah yang paling memengaruhi settlement pada lokasi penelitian adalah kompresibilitas tinggi, permeabilitas rendah, dan heterogenitas lapisan tanah, yang secara bersama-sama meningkatkan potensi penurunan pada lantai sistem penahanan sekunder [12].

3.6 Rekomendasi Teknis Perbaikan Tanah: Deep Soil Mixing (DSM)

Berdasarkan mekanisme settlement yang teridentifikasi, metode Deep Soil Mixing (DSM) direkomendasikan sebagai solusi teknis perbaikan tanah. Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 12, DSM dilakukan dengan menurunkan alat pencampur (mixing tool) ke dalam tanah sambil menginjeksikan bahan pengikat (umumnya semen dalam bentuk slurry atau serbuk kering), mengaduknya secara mekanis di sepanjang kedalaman rencana, kemudian menarik kembali alat tersebut hingga terbentuk kolom tanah-semen (soil-cement column) yang menerus dari permukaan hingga kedalaman target, dengan kekuatan dan kekakuan yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanah asli [9].



Gambar 12. Ilustrasi tahapan pelaksanaan metode Deep Soil Mixing (DSM)



Metode ini dinilai sesuai untuk tanah lempung plastisitas tinggi karena mampu meningkatkan kuat geser tanah, memperbesar daya dukung, dan mengurangi deformasi akibat pembebanan, sejalan dengan kajian Kirsch dan Bell [8] mengenai efektivitas DSM dalam meningkatkan kekakuan dan daya dukung tanah lunak. Pelaksanaan DSM juga dapat dilakukan secara lokal pada area yang mengalami settlement tanpa memerlukan pembongkaran total struktur di sekitarnya, sehingga sesuai diterapkan pada fasilitas operasional eksisting yang tetap harus beroperasi selama masa perbaikan. Dengan meningkatnya kekakuan lapisan tanah, distribusi beban dari pondasi tangki menuju tanah pendukung menjadi lebih merata, sehingga potensi differential settlement pada area containment dapat diminimalkan secara signifikan dalam jangka panjang.

KESIMPULAN

Karakteristik tanah eksisting di lokasi fasilitas penyimpanan BBM Gurimbang memiliki pengaruh signifikan terhadap terjadinya settlement pada lantai sistem penahanan sekunder. Hasil analisis AFES menunjukkan struktur pondasi eksisting masih dalam kondisi stabil terhadap seluruh kombinasi pembebanan operasional, sehingga settlement yang terjadi lebih dominan disebabkan oleh karakteristik geoteknik tanah – yaitu tanah lempung plastisitas tinggi (High Plasticity Clay/CH) dengan kompresibilitas tinggi dan permeabilitas rendah – daripada kegagalan struktur pondasi. Pemodelan numerik PLAXIS menghasilkan deformasi maksimum 26 cm, dengan tingkat kesesuaian yang baik terhadap deformasi lapangan (24 cm di Titik A dan 22,5 cm di Titik B), ditunjukkan oleh galat rata-rata 11,95% yang berada jauh di bawah ambang 20%, sehingga model numerik dapat dinyatakan valid untuk merepresentasikan perilaku settlement pada kondisi eksisting. Metode Deep Soil Mixing (DSM) direkomendasikan sebagai solusi perbaikan tanah yang efektif untuk meningkatkan kekakuan dan daya dukung lapisan lempung lunak serta mengurangi potensi differential settlement jangka panjang pada lantai sistem penahanan sekunder.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Petroleum Institute, *API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage*, 13th ed. Washington, DC, USA: API, 2020.
- [2] American Petroleum Institute, *API Standard 653: Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction*, 5th ed. Washington, DC, USA: API, 2021.
- [3] J. E. Bowles, *Foundation Analysis and Design*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1997.
- [4] R. B. J. Brinkgreve et al., *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft, Netherlands: Bentley Systems, 2023.
- [5] B. M. Das and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [6] H. C. Hardiyatmo, *Mekanika Tanah 2*, Edisi Ketujuh. Yogyakarta, Indonesia: Gadjah Mada University Press, 2018.
- [7] F. Ibrahim, G. S. Sandjaja, and A. Kawanda, "Studi kasus perbandingan analisis penurunan akibat timbunan di Tangerang, Banten," *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, vol. 2, no. 2, pp. 85-94, 2019.



- [8] F. Kirsch and A. Bell, *Ground Improvement by Deep Soil Mixing*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [9] D. N. Mahpud, I. N. Hamdhan, and V. F. Trestyawan, "Analisis penurunan tanah kondisi eksisting pada tangki minyak di Kalimantan Timur menggunakan model 2D," in *Prosiding Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir FTSP Institut Teknologi Nasional Bandung*, Bandung, Indonesia, 2023, pp. 679-684.
- [10] Mutamakin and S. Anwar, "Analisa penurunan pondasi tangki timbun air baku 54-T-101B di PT Pertamina Refinery Unit VI Balongan dengan melakukan penyelidikan tanah," *Jurnal Konstruksi*, vol. 5, no. 1, pp. 27-36, 2016.
- [11] National Fire Protection Association, *NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code*. Quincy, MA, USA: NFPA, 2021.
- [12] K. Terzaghi, R. B. Peck, and G. Mesri, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1996.
- [13] I. Thusyanthan and H. Enriquez, "Design guidance for evaluating storage tank settlements and acceptable tank settlement criteria," in *Proc. 20th Int. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE)*, Sydney, Australia, 2022.