

Analisis Deformasi Lateral dan Getaran Tanah Akibat Pemancangan Tiang pada Pipa Minyak dan Gas

* Arraya Fredericko Romanza¹, Yerry Kahaditu Firmansyah¹, Dian Purnamawati Solin¹

¹Civil Engineering, Faculty of Engineering and Science, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur
[*22035010063@student.upnjatim.ac.id](mailto:22035010063@student.upnjatim.ac.id)

Abstract

The reclamation project of Triangle Island within the Java Integrated Industrial Port Estate (JIPE) necessitates the installation of driven deep foundations in soft clay deposits adjacent to existing oil and gas pipelines. The pile driving process induces lateral soil deformation and ground vibration, posing a severe threat to pipeline integrity. This study evaluates the geotechnical impacts of pile driving and proposes effective mitigation measures. The structural viability of the foundation was initially validated using the Nakazawa method with corrected parameters for bearing capacity, alongside immediate settlement analysis using the Bowles equivalent raft approach for a 37-meter deep, 600 mm diameter steel pipe pile group. Subsequently, two-dimensional numerical modeling using finite element methods was conducted to simulate lateral soil displacement and ground vibration generated by a Junttan HHK 7A hydraulic impact hammer. Several mitigation scenarios, primarily focusing on pre-boring configurations, were analyzed. The unmitigated numerical results demonstrate that stress and lateral displacement around the pipeline approach or exceed allowable design limits. However, the implementation of optimized pre-boring significantly attenuates soil heave and vibration response, keeping pipeline deformations within safe operational thresholds. These findings provide a robust analytical reference for designing pile foundations in reclamation areas near critical buried hydrocarbon infrastructure.

Keywords: Ground Vibration; Lateral Deformation; Pile Driving; Finite Element Method; Oil and Gas Pipelines

Abstrak

Proyek reklamasi Pulau Segitiga di kawasan *Java Integrated Industrial Port Estate (JIPE)* membutuhkan pondasi dalam yang dipancang pada endapan lempung lunak di dekat jalur pipa minyak dan gas eksisting. Proses pemancangan tiang memicu deformasi lateral dan getaran tanah yang mengancam integritas pipa. Penelitian ini mengevaluasi dampak geoteknik pemancangan dan mengusulkan langkah mitigasi yang efektif. Kelayakan struktural pondasi awalnya divalidasi menggunakan metode Nakazawa dengan parameter terkoreksi untuk daya dukung, serta analisis penurunan segera menggunakan pendekatan rakit ekuivalen Bowles untuk kelompok tiang pipa baja berdiameter 600 mm dengan kedalaman 37 meter. Selanjutnya, pemodelan numerik dua dimensi melalui finite element methods dilakukan untuk mensimulasikan perpindahan lateral dan getaran tanah yang dihasilkan oleh alat pancang *hydraulic impact hammer* Junttan HHK 7A. Beberapa skenario mitigasi, dengan fokus utama pada konfigurasi *pre-boring*, dianalisis secara komprehensif. Hasil numerik tanpa mitigasi menunjukkan bahwa tegangan dan perpindahan lateral di sekitar pipa mendekati atau melebihi batas desain yang diizinkan. Namun, penerapan metode *pre-boring* secara signifikan meredam pergerakan dan getaran tanah, menjaga deformasi pipa tetap berada dalam ambang batas operasional yang aman. Temuan ini memberikan referensi analitis yang kuat untuk pelaksanaan pekerjaan pondasi tiang pancang di area reklamasi yang berdekatan dengan infrastruktur kritis bawah tanah.

Kata Kunci: Getaran pada tanah; Desakan Lateral; Pemancangan ; Finite Element Method; Pipa Migas

INTRODUCTION

Pengembangan kawasan industri terpadu, seperti Kawasan Pelabuhan Industri Terpadu Jawa (JIPE) di Indonesia, berperan sebagai katalis vital bagi pertumbuhan ekonomi nasional dan efisiensi logistik global. Namun, perluasan pelabuhan melalui reklamasi besar-besaran seringkali menghadapi tantangan geoteknik yang mendalam. Meskipun daerah pesisir ini biasanya didominasi oleh pasir, keberadaan lapisan tebal tanah liat lunak hingga sangat lunak menimbulkan risiko signifikan selama fase konstruksi (Solin et al., 2022). Pembangunan fasilitas pelabuhan yang berat memerlukan pemasangan pondasi tiang pancang yang dalam. Pemancangan tiang pancang ini ke dalam tanah lunak yang sangat kohesif, terutama ketika menggunakan palu konvensional, secara intrinsik menimbulkan gangguan tanah yang parah (Massarsch & Fellenius, 2015). Bahaya utama yang dihasilkan selama proses ini, yaitu perpindahan tanah lateral yang berlebihan dan getaran yang ditimbulkan oleh tanah, menimbulkan ancaman kritis terhadap infrastruktur di sekitarnya, khususnya pipa migas bertekanan tinggi yang

terletak di sekitar zona konstruksi (Nguyen & Nguyen, 2023).

Evaluasi geoteknik mendasar dimulai dengan klasifikasi tanah yang akurat dan desain kapasitas pondasi. Berdasarkan investigasi lapangan yang menggunakan data Uji Penetrasi Standar (N-SPT) yang dikoreksi untuk energi palu, diameter lubang bor, dan tekanan beban berlebih untuk mendapatkan N60, profil tanah liat lunak dicirikan oleh kekuatan geser yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi (Bazaraa, 1967) (Das, 2013). Sebelum menilai dampak lingkungan, stabilitas struktural tiang pancang perlu dievaluasi. Kapasitas daya dukung aksial dan lateral dari kelompok tiang pancang yang dipancarkan dihitung menggunakan metode Nakazawa, yang menggabungkan parameter tanah yang dikoreksi untuk memastikan fondasi dapat dengan aman menopang beban reklamasi dan struktural yang dimaksudkan dengan faktor keamanan yang memadai (Sosrodarsono & Nakazawa, 2000).

Namun, memastikan kapasitas daya dukung belum sepenuhnya cukup dalam mengatasi tanah liat lunak. Selama pemasangan tiang pancang, volume tiang pancang

yang dimasukkan memaksa tanah di sekitarnya untuk mengembang secara radial. Fenomena ini secara teoritis dimodelkan dan dianalisis menggunakan metode Ekspansi Rongga Silindris (CCE) (Kabeta, 2022) (Francescon, 1983). Dalam kondisi tanpa drainase, teori CCE menjelaskan bagaimana penetrasi tiang pancang secara terus-menerus secara drastis meningkatkan kelebihan tekanan air pori. Peningkatan tekanan ini menyebabkan perpindahan tanah secara lateral (*soil heave*) yang dapat mencapai 1,5% hingga 3% dari kedalaman penetrasi tiang pancang. Jika tidak dimitigasi, perpindahan ini akan menekan struktur terkubur di sekitarnya secara paksa, sehingga mengakibatkan deformasi geometris yang parah (Vytiniotis et al., 2018).

Secara simultan, energi dampak yang disalurkan oleh *hydraulic impact hammer* menghasilkan gelombang seismik yang merambat melalui media tanah. Intensitas gelombang dinamis ini dikuantifikasi menggunakan model atenuasi *Peak Particle Velocity* (PPV). Nilai PPV yang tinggi, ditambah dengan perpindahan lateral yang signifikan, mengancam integritas struktural pipa gas API 5L Grade X52 eksisting. Untuk menilai ketahanan pipa, kondisi tegangannya dievaluasi berdasarkan kriteria tegangan kombinasi yang diuraikan dalam API RP 1102 (American Petroleum Institute, 1993). Selain itu, karena pipa baja merupakan struktur fleksibel, batas kelayanannya (*serviceability*) sangat ditentukan oleh deformasi geometris. Menurut AWWA M11, defleksi vertikal (ovalitas) pipa baja berlapis (*flexible-coated*) tidak boleh melebihi 5% dari diameter luarnya guna mencegah retaknya lapisan pelindung (*coating*) dan kegagalan tekuk (*buckling*) yang fatal (Dechant & Bambei, 2017).

Mengingat lingkungan proyek reklamasi Pulau Segitiga yang berisiko tinggi, pendekatan kuantitatif yang ketat terhadap mitigasi bersifat mutlak. Penelitian ini memanfaatkan analisis *Finite Element Method* (FEM) melalui pemodelan numerik untuk menangkap interaksi kompleks antara tanah, tiang, dan pipa eksisting. Untuk mengatasi risiko kombinasi dari perpindahan lateral yang berlebihan dan getaran (PPV), teknik *pre-boring* dimasukkan ke dalam model. Alih-alih menggunakan penghalang fisik tradisional, metode ini menciptakan zona pelepasan tegangan (*stress-relief zone*) dengan mengebor tanah terlebih dahulu, sehingga secara efektif mengurangi tekanan yang dilepaskan ke lingkungan sekitar selama proses pemancangan.

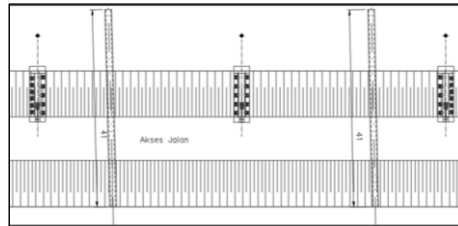
Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kapasitas daya dukung pondasi secara sistematis sekaligus mengukur tingkat perpindahan dan getaran aktual yang dihasilkan. Dengan memvalidasi efektivitas strategi *pre-boring*, penelitian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pergerakan tanah tetap berada di bawah ambang batas aman. Pada akhirnya, analisis ini berfungsi sebagai pengaman kritis bagi integritas operasional pipa gas selama berlangsungnya ekspansi pelabuhan tersebut.

METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan manual yang dipadukan dengan pemodelan numerik tingkat lanjut guna

mengevaluasi dampak merugikan dari pemancangan tiang terhadap infrastruktur eksisting, serta merumuskan strategi mitigasi struktural dengan reliabilitas tinggi. Alur kerja analisis disusun secara sistematis, dimulai dari karakterisasi lokasi dan evaluasi daya dukung pondasi, dilanjutkan dengan prediksi gangguan lingkungan (perpindahan dan getaran), dan diakhiri dengan simulasi langkah-langkah mitigasi menggunakan *Finite element methods* (FEM)

Analisis Lapangan dan Klasifikasi Tanah



Gambar 1. Denah Tiang Pancang dan Pipa Migas
Source: PT. Berlian Manyar Sejahtera (2023)

Tabel 1. Hasil Pengujian SPT Lapangan

Kedalaman (m)	Klasifikasi Tanah	Deskripsi Tanah	N-SPT	
			Pukulan	
0 - 1	Pasir	Sangat Lepas	2.0	
1 - 10	Lempung	Sangat Lunak	1.0	
10 - 16	Lempung	Lunak	3.0	
16 - 27	Pasir	Sedang	21.0	
27 - 36	Pasir	Sedang	28.0	
36 - 41	Pasir	Sedang	17.0	
41 - 44	Pasir	Padat	41.0	
44 - 50	Pasir	Sedang	21.0	
50 - 60	Pasir	Padat	37.0	

Sumber: PT. Berlian Manyar Sejahtera (2023)

Tahap awal penelitian difokuskan pada interpretasi kondisi geoteknik yang kompleks di lokasi reklamasi Pulau Segitiga, JIPE. Data lapangan primer diperoleh melalui Uji Penetrasi Standar (N-SPT) serta evaluasi laboratorium yang komprehensif. Untuk menjamin keandalan parameter yang digunakan dalam analisis selanjutnya, nilai pukulan N-SPT pada pengujian lapangan dikoreksi secara sistematis menjadi N_{60} , dengan mempertimbangkan efisiensi energi *hammer*, diameter lubang bor, dan tekanan *overburden* (Terzaghi & Peck, 1967) Berdasarkan *Unified Soil Classification System* (USCS), profil stratigrafi dominan di lokasi tersebut diklasifikasikan sebagai lempung dengan plastisitas tinggi dengan konsistensi lunak hingga sangat lunak. Parameter fisik dan mekanis yang krusial seperti modulus elastisitas E , kohesi c , dan sudut geser ϕ

merupakan elemen penting dalam perencanaan daya dukung pondasi (Abong Sandan & Priadi, 2014)

Analisis Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang

Untuk memastikan sistem pondasi dapat menahan beban operasional pelabuhan yang berat tanpa mengalami kegagalan geoteknik, dilakukan studi kelayakan struktural yang mendalam sebelum menangani gangguan tanah sekunder. Hal ini melibatkan perhitungan kapasitas kelompok tiang untuk tahanan aksial dan lateral menggunakan metode Nakazawa (Sosrodarsono & Nakazawa, 2000), yang memanfaatkan parameter N_{60} yang telah terstandarisasi. Verifikasi tersebut sangat penting untuk memastikan bahwa kedalaman pemancangan tiang sedalam 37 m yang direncanakan telah sesuai dengan standar keamanan, sehingga meminimalkan risiko kegagalan utama selama fase operasional fasilitas tersebut.

$$Ra = \frac{1}{n}Ru = \frac{1}{n}(qd \cdot A + U \cdot \Sigma l_i f_i) \quad (1)$$

Dimana:

- Ra = Daya dukung izin (ton)
- Ru = Daya dukung ultimit (ton)
- Rp = Kapasitas ujung tiang (ton)
- Rf = Gesekan selimut tiang (ton)
- qd = Kapasitas ujung tiang (ton/m²)
- A = Luas penampang ujung (m²)
- U = Keliling tiang (m)
- l_i = Panjang ekuivalen tiang (m)
- f_i = Gesekan selimut tiang (ton/m²)
- n = Faktor keamanan, n=3

Fondasi dalam yang digunakan untuk proyek ini menggunakan tiang pipa baja (*Steel Pipe Piles* - SPP) spesifikasi tinggi yang diproduksi oleh PT Steel Pipe Industry of Indonesia (SPINDO). Setiap unit tiang memiliki karakteristik diameter luar sebesar 600 mm dan tebal dinding 15,9 mm, yang memberikan luas penampang yang diperlukan untuk menahan beban aksial dan lateral yang tinggi. Tiang-tiang tersebut dirancang untuk mencapai target kedalaman pemancangan 37 meter guna memastikan tiang mencapai lapisan tanah pendukung (*bearing stratum*) yang kompeten. Untuk memfasilitasi instalasi yang presisi, digunakan sistem *hydraulic impact hammer* dengan efisiensi tinggi, yang dipilih karena kemampuannya dalam menyalurkan transfer energi yang konsisten sekaligus menjaga integritas struktural tiang selama proses pemancangan. Spesifikasi teknis peralatan tersebut adalah sebagai berikut:

- Model : Junttan HHK 7A
- Carrier unit : Komatsu PC400-8
- Ram weight : 7000 kg
- Hammer impact energy : 82 kNm
- Maximum stroke : 1,2 meters
- Total unit weight : 45 tons

Analisis Desakan Tanah Akibat Pemancangan

Untuk memprediksi besarnya pergerakan tanah lateral yang dipicu oleh efek Ekspansi Rongga Silinder (*Cylindrical Cavity Expansion* - CCE) selama pemancangan tiang (Bouckovalasi, 1996), penelitian ini menggabungkan perhitungan analitis dengan simulasi numerik. Pada tahap awal, perpindahan lateral dasar yang disebabkan oleh penetrasi tiang ke dalam lempung dikalkulasi secara manual menggunakan pendekatan metode Francescon, yang dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\delta = \sqrt{R^2 + \beta r^2} - R \quad (2)$$

Whereas:

- δ = Desakan tanah (m)
- β = Rasio Perpindahan
- r = Radius tiang (m)
- R = Jarak radial tiang (m)

Untuk memvalidasi estimasi analitis tersebut dan memvisualisasikan bagaimana perpindahan merambat secara spasial menuju pipa gas, skenario ini selanjutnya dimodelkan menggunakan metode elemen hingga di bawah kondisi *plane strain*. Nilai deformasi akhir yang diperoleh dari proses ini dievaluasi secara ketat terhadap ambang batas keamanan: batas maksimum pergerakan tanah sebesar 2,5 cm (SNI 8460:2017) dan toleransi ovalitas pipa sebesar 5% sebagaimana diisyaratkan oleh dokumen AWWA M11 (Dechant & Bambei, 2017).

Analisis Getaran Tanah Akibat Pemancangan

Selain menyebabkan pergeseran tanah secara fisik, tumbukan dari *hydraulic impact hammer* secara alami menghasilkan gelombang seismik. Karena pemodelan numerik dinamis pada lempung lunak memerlukan sumber daya komputasi yang sangat kompleks dan modul perangkat lunak khusus, penelitian ini memilih pendekatan analitis yang lebih praktis (Mukhanov et al., 2025). Dalam mengestimasi intensitas getaran yang mencapai pipa eksisting, digunakan model atenuasi empiris *Peak Particle Velocity* (PPV) yang dikembangkan oleh Attewell dan Farmer (Massarsch & Fellenius, 2015). Kecepatan gelombang yang merambat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$V = K \cdot \frac{\sqrt{W_o}}{r} \quad (3)$$

Whereas:

- V = Peak Particle Velocity
- K = Faktor atenuasi tanah empiris
- W_o = Energi impak palu (Nm)
- r = Jarak radial dari tiang pancang (m)

Nilai PPV yang dihitung kemudian dibandingkan secara langsung dengan batas getaran yang diizinkan untuk

struktur terkubur. Langkah ini sangat krusial untuk memverifikasi bahwa energi getaran yang mengenai pipa gas API 5L Grade X52 tidak memicu kelelahan material (*material fatigue*) atau menyebabkan tegangan yang melampaui *Specified Minimum Yield Strength* (SMYS), dengan kepatuhan ketat terhadap pedoman keselamatan (American Petroleum Institute, 1993)

Strategi Mitigasi Getaran dan Perpindahan Tanah Akibat Pemancangan Tiang

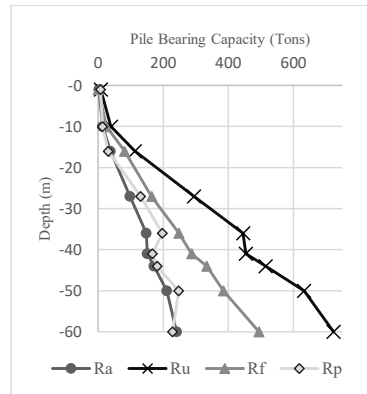
Dalam mengatasi risiko gabungan dari perpindahan tanah dan getaran berlebihan yang mengancam integritas pipa, penelitian ini menerapkan metode *pre-boring* sebagai strategi mitigasi utama. Secara geoteknik, pembuatan lubang pandu (*pilot hole*) sebelum instalasi tiang menciptakan rongga awal yang secara drastis mengurangi volume tanah yang terdesak paksa oleh penampang tiang. Pendekatan proaktif ini secara efektif meredam efek ekspansi rongga (*cavity expansion*) dan mencegah kenaikan tekanan air pori berlebih yang berbahaya di dalam lapisan lempung lunak (Meiliana et al., 2023a). Dalam lingkungan metode elemen hingga (MEH), mitigasi ini disimulasikan selama fase konstruksi bertahap (*staged construction*) dengan menonaktifkan klaster tanah tertentu (yang merepresentasikan lubang bor) hingga kedalaman yang ditentukan sebelum elemen tiang diaktifkan. Keberhasilan strategi ini dikonfirmasi apabila deformasi tanah lateral yang mencapai pipa berhasil ditekan di bawah ambang batas 2,5 cm (SNI 8460:2017), Guna memastikan pipa tetap aman secara struktural sesuai dengan standar API RP 1102 dan AWWA M11.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi Tanah dan Daya Dukung Fondasi

Dalam perancangan pondasi, guna menetapkan garis dasar (*baseline*) yang andal untuk analisis, data mentah Standard Penetration Test (N-SPT) dari lapangan dikoreksi secara matematis menjadi N60 untuk mengetahui kuat geser tanah yang sebenarnya secara akurat, sebagaimana diringkas dalam Table 2. Profil lempung yang sangat lunak ini rentan terhadap perpindahan lateral yang signifikan ketika mengalami

peningkatan volume secara tiba-tiba seperti pada proses pemancangan tiang. Mengingat kondisi tanah yang sensitif tersebut, integritas struktural pondasi tiang diverifikasi menggunakan metode Nakazawa sebelum dilakukan simulasi dampak dari proses instalasinya



Gambar 2 Grafik Daya Dukung Fondasi Tiang
Source: Hasil Pengolahan Data (2026)

Grafik tersebut secara spesifik memplot kurva pertumbuhan progresif untuk kapasitas dukung ujung R_p dan gesekan selimut R_f , yang diakumulasikan untuk menentukan kapasitas dukung ultimit R_u dan kapasitas dukung izin akhir R_a .

Analisis Desakan Tanah Akibat Pemancangan Tiang

Menyusul validasi struktural pada pondasi, penilaian dampak akibat pemancangan dimulai dengan estimasi analitis. Berdasarkan perhitungan manual menggunakan pendekatan Cylindrical Cavity Expansion (CCE). Sebelum dilakukan pemodelan numerik yang lebih kompleks, penelitian ini menetapkan ambang batas dasar (*baseline*) menggunakan perhitungan analitis untuk memprediksi besarnya desakan tanah akibat ekspansi rongga (*cavity expansion*). Perhitungan ini didasarkan pada asumsi bahwa volume tanah yang dipindahkan oleh tiang pancang akan

Commented [GD2]: Selain dibedakan warna, dibedakan juga type marker bersangkutan supaya lebih mudah dibandingkan. Gunakan bentuk persegi, segitiga, silang, dll

Commented [GD1]: Perbaiki "indentasi" baris pertama

Tabel 2 Klasifikasi Tanah dan Koreksi Nilai N-SPT

Depth (m)	N-SPT Blow	Deskripsi Tanah	Koreksi N-SPT			N-SPT	c' (kN/m ³)	φ' (Derajat)	E (kN/m ²)
			N60	(N1)60	(N1)60 - corr				
0 - 1	2	Very Loose Sand	1.875	3.89	2.00	2.00	1	27.25	6800
1 - 10	1	Very Soft Clay	1.1875	1.47	1.00	1.47	4	10	1750
10 - 16	3	Soft Clay	3.75	4.94	3.00	4.94	12.33	15	2250
16 - 27	21	Medium Sand	26.25	24.99	20.00	20.00	1	38.34	14400
27 - 36	28	Medium Sand	35	34.56	24.78	24.78	1	40.82	17200
36 - 41	17	Medium Sand	21.25	29.88	22.44	22.44	1	36.73	12800
41 - 44	41	Dense Sand	51.25	67.77	41.39	41.39	1	44.71	22400
44 - 50	21	Medium Sand	26.25	30.31	22.66	22.66	1	38.34	14400
50 - 60	37	Dense Sand	46.25	42.93	28.97	28.97	1	43.59	20800

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

menyebabkan perpindahan lateral pada massa tanah di sekitarnya.

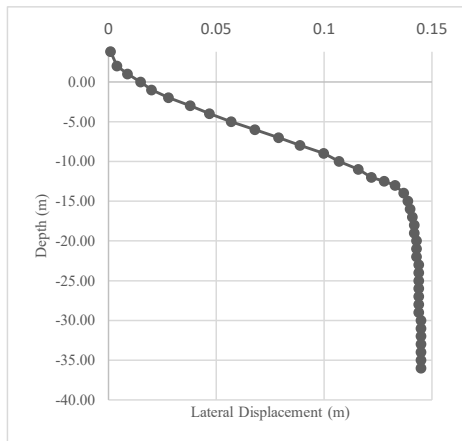
Parameter yang digunakan dalam analisis ini meliputi r sebagai radius tiang, R sebagai jarak radial dari pusat tiang menuju titik pengamatan, dan δ sebagai nilai desakan atau perpindahan lateral yang dihasilkan. Adapun untuk menentukan nilai rasio perpindahan (β) di dasarkan pada penelitian oleh Meiliana et al., 2023 digunakan nilai 1 untuk tiang tertutup, lonjakan penambahan volume ke dalam lempung lunak tak terdrainase diproyeksikan akan memicu perpindahan tanah lateral ringkasan hasil perhitungan manual tersebut disajikan pada tabel berikut ini

Tabel 3 Perhitungan Manual Nilai Desakan Lateral Pada Tanah

Tiang	Nilai Desakan			
	R m	r m	β	δ m
1	15	0.3	1	0.0030
2	15.2	0.3	1	0.0030
3	15.5	0.3	1	0.0029
4	15.76	0.3	1	0.0029
5	16	0.3	1	0.0028

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Dalam memvalidasi estimasi tersebut dan memetakan secara akurat bagaimana sebaran perpindahan terjadi secara vertikal terhadap posisi pipa, dilakukan simulasi menggunakan finite element method (FEM). Profil pergerakan tanah lateral yang terdistribusi pada berbagai variasi kedalaman di sepanjang pipa tersebut diilustrasikan pada Figure 2.



Gambar 3 Nilai Desakan Lateral Akibat Proses Pemancangan

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Berdasarkan model numerik tersebut didapati bahwa perpindahan tidak terjadi secara seragam, melainkan terkonsentrasi secara signifikan pada kedalaman kritis 30 m, dengan nilai puncak mencapai 14,5 cm (0,145 m). Besaran ini secara drastis melampaui batas pergerakan tanah yang diizinkan sebesar 2,5 cm yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017, dan melanggar toleransi ovalitas maksimum 5% yang ditetapkan oleh AWWA M11.

Analisis Getaran Tanah Akibat Pemancangan Tiang

Getaran yang terjadi sebagai dampak dari aktifitas pemancangan memperparah ancaman fisik yang ekstrem ini, penilaian getaran analitis menggunakan metode Atwell dan Farmer untuk mencari nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) dimana akan digunakan K dengan nilai 1,5 sebagai konstanta untuk kondisi tanah pada lapangan, menurut (Whyley & Sarsby, 1992) nilai K 1,5 merupakan *upper bound* untuk kondisi tanah sangat padat

Tabel 4. Perhitungan Manual Nilai Getaran Pada Tanah

Empirical soil attenuation	K	1,5	-
Radial Pile Distance	r	15	m
Hammer Impact Energy	Wo	84	kNm
	Junttan HHK-7A	82000	Nm
Peak Particle Velocity	V	28,98	mm/sec

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2026)

Pada koordinat pipa tersebut gabungan antara desakan lateral yang masif dan energi getaran dinamis memicu tegangan kombinasi (*combined stress*) yang secara berbahaya mendekati *Specified Minimum Yield Strength* (SMYS) dari pipa. Karena skenario dasar (*baseline*) ini secara fundamental melanggar pedoman keselamatan yang ketat dari API RP 1102, maka penerapan strategi mitigasi segera bersifat wajib.

Perbandingan Temuan Penelitian

Untuk menekan bahaya perpindahan tanah dan getaran yang telah teridentifikasi secara efektif, metode *pre-boring* diterapkan dan dievaluasi pada dua kedalaman yang berbeda: 12,5 meter dan 16 meter. Simulasi finite element methods (FEM) simulations menunjukkan tren penurunan deformasi tanah yang jelas seiring dengan bertambahnya kedalaman pengeboran. Meskipun skenario 12,5 meter memberikan pengurangan beban, pergerakan lateral tetap berada di dekat ambang batas kritis. Mitigasi optimal akhirnya dicapai pada kedalaman 18 meter, di mana lubang pelepasan tegangan (*stress-relief hole*) secara efektif menciptakan rongga yang cukup untuk menyerap ekspansi volume tanah selama proses pemancangan tiang.

Commented [GD5]: Pada bagian kesimpulan tertulis sebesar 14,6 cm (terdapat perbedaan angka). Meskipun perbedaannya kecil namun bisa menimbulkan pertanyaan mengenai keakuratan & konsistensi data

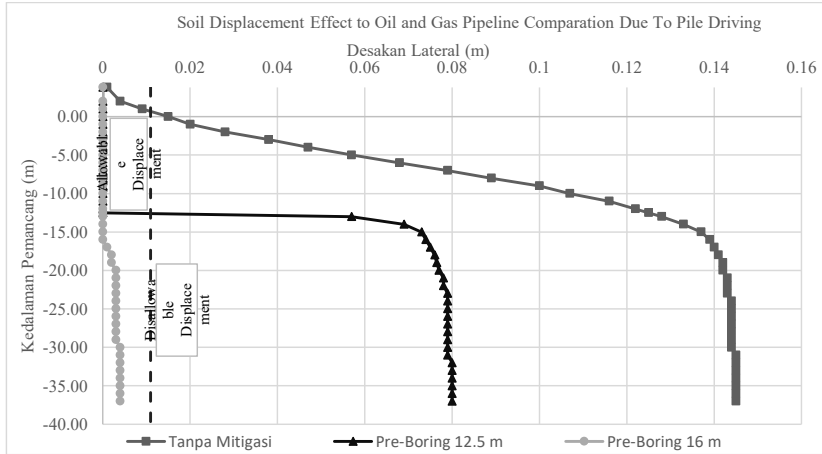
Commented [GD3]: Bagaimana β dihitung/ditentukan, serta cantumkan nilai β yang aktual digunakan. Tanpa ini, hasil Tabel 3 tidak dapat direproduksi

Commented [GD4]: Berikan satuan

Commented [GD6]: Tambahkan paragraf singkat yang menjelaskan dasar pemilihan K = 1,5

Commented [GD7]: Pada bagian kesimpulan tertulis sebesar 29,0 mm/s (terdapat perbedaan angka). Meskipun perbedaannya kecil namun bisa menimbulkan pertanyaan mengenai keakuratan & konsistensi data

Commented [GD8]: Dua skenario yang dianalisis disebutkan adalah 12,5 m dan 16 m, tetapi kesimpulan akhir menyatakan optimal di 18 m yang mana kedalaman yang tidak pernah disebut sebelumnya sebagai skenario. Saran perbaikan: sebutkan semua skenario yang benar-benar dianalisis (misalnya: tanpa mitigasi, 12,5 m, 16 m, 18 m) supaya angka yang disebutkan konsisten pada skenario-kurva-kesimpulan



Gambar 4 Perbandingan Nilai Desakan Sebelum dan Sesudah Mitigasi
Source: Hasil Pengolahan Data (2026)

Hasil akhir menunjukkan bahwa penggunaan kedalaman *pre-boring* 18 m berhasil memangkas perpindahan tanah lateral dari nilai dasar (*baseline*) 14,6 cm menjadi hanya 0,7 cm. Reduksi ini mengembalikan status keamanan proyek ke dalam "zona hijau", karena nilai tersebut kini berada jauh di bawah ambang batas 2,5 cm yang disyaratkan oleh SNI 8460:2017 serta menjaga integritas geometris pipa sesuai dengan standar AWWA M11.

Secara simultan, dampak dari *hydraulic impact hammer* pada jarak 15 meter dievaluasi kembali secara analitis. Rongga akibat *pre-boring* sedalam 16 meter secara signifikan mengganggu perambatan gelombang (Massarsch & Fellenius, 2015), yang secara efektif menurunkan konstanta transmisi tanah K dari 1.5 menjadi 0.9. Atenuasi ini mengurangi intensitas getaran dari 29,0 mm/s menjadi 17,4 mm/s, sehingga berada jauh di bawah ambang batas 30 mm/s yang ditetapkan oleh DIN 4150-3 (Deutsches Institut für Normung, 2016). Mitigasi aksi ganda (*dual-action*) ini, yang menekan perpindahan fisik sekaligus energi dinamis, menjamin bahwa pipa migas tetap berada dalam batas margin keamanan API RP 1102.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis numerik dan evaluasi analitis mengenai dampak pemancangan terhadap pipa gas eksisting di area reklamasi JIPE, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Kegagalan Skenario Dasar (*Baseline Scenario*): Pemancangan konvensional pada tanah lempung lunak dengan plastisitas tinggi (CH) memicu perpindahan tanah lateral sebesar 14,5 cm. Nilai ini secara signifikan melampaui batas aman 2,5 cm (SNI 8460:2017) dan berisiko menyebabkan

ovalitas pipa melebihi 5%. Selain itu, getaran yang dihasilkan mencapai 28,98 mm/s, yang jika dikombinasikan dengan tekanan tanah statis, mengancam integritas pipa berdasarkan standar API RP 1102.

2. Efektivitas Mitigasi *Pre-boring*: Penerapan kedalaman *pre-boring* sejauh 16 meter terbukti menjadi solusi yang paling efektif. Metode ini berhasil memangkas perpindahan tanah lateral menjadi hanya 0,4 cm, sehingga sepenuhnya memulihkan status keamanan teknis proyek..
3. Reduksi Getaran Berbasis Impedansi: Mengacu pada model Massarsch & Fellenius (2015) rongga akibat *pre-boring* berfungsi sebagai penghalang impedansi (*impedance barrier*) yang memotong intensitas getaran sebesar 50%. Hal ini menurunkan nilai PPV menjadi 17,4 mm/s, guna memastikan pipa terlindungi dari risiko kelelahan dinamis (*dynamic fatigue*) sesuai dengan standar DIN 4150-3.

Rekomendasi operasional untuk menjaga infrastruktur minyak dan gas yang ada di lingkungan lempung lunak, direkomendasikan agar aktivitas pemancangan dalam jarak kritis (15 meter) direkomendasikan menggunakan metode pengeboran awal (*pre-boring*) hal ini bertujuan untuk mendisipasikan tekanan air pori berlebih dan energi impak palu secara efektif.

DAFTAR PUSTAKA

Abong Sandan, M., & Priadi, E. (2014). *DISTRIBUSI DAYA DUKUNG KELOMPOK TIANG PADA TANAH LUNAK KOTA PONTIANAK*.

- American Petroleum Institute. (1993). *API RP 1102*.
- Bazaraa, A. (1967). *Use of the Standard Penetration Test for Estimating Settlements of Shallow Foundations on Sand*.
- Bouckovalasi, G. (1996). *The Japanese Geotechnical Society NII-Electronic Library Service EVALUATION OF CYCLIC ANCHOR PILES MODEL TESTS ON IN CLAY*.
- Das. (2013). *principles-of-foundation-engineering-9th-edition-si-edition_compress*.
- Dechant, Dennis., & Bambei, J. H. . (2017). *M11 -- steel water pipe: a guide for design and installation*. American Water Works Association.
- Deutsches Institut für Normung. (2016). *DIN 4150-3:2016-12*. www.din.de
- Francescon, M. (1983). Model pile tests in clay, stresses and displacements due to installation and axial loading. *Ph. D Thesis, Cambridge University*. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1573950399307216512.bib?lang=en>
- Kabeta, W. F. (2022). Effects of full displacement pile installation on the stress and deformation state of surrounding soil: review. *Archives of Civil Engineering*, 68(4), 445–466. <https://doi.org/10.24425/ace.2022.143048>
- Massarsch, K. R., & Fellenius, B. H. (2015a). Engineering Assessment of Ground Vibrations Caused by Impact Pile Driving. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46(2).
- Massarsch, K. R., & Fellenius, B. H. (2015b). Engineering Assessment of Ground Vibrations Caused by Impact Pile Driving. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46(2).
- Meiliana, F. R., Solin, D. P., & Farichah, H. (2023a). ANALISIS MITIGASI DESAKAN AKIBAT PEMANCANGAN PADA GEDUNG WORKSHOP UPN "VETERAN" JAWA TIMUR. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 6(3). <https://doi.org/10.24815/jarsp.v6i3.33442>
- Meiliana, F. R., Solin, D. P., & Farichah, H. (2023b). ANALISIS MITIGASI DESAKAN AKIBAT PEMANCANGAN PADA GEDUNG WORKSHOP UPN "VETERAN" JAWA TIMUR. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 6(3). <https://doi.org/10.24815/jarsp.v6i3.33442>
- Mukhanov, D., Zhussupbekov, A., Kaliakin, V., Teulenova, G., Zhakulin, A., & Zhakulina, A. (2025). *COMPREHENSIVE VIBRATION ANALYSIS OF DRIVEN PILES AT AN INDUSTRIAL DEVELOPMENT SITE IN KAZAKHSTAN: 9 IMPLICATIONS FOR CONSTRUCTION SAFETY AND ENGINEERING PRACTICES*. <https://doi.org/10.21660/2022.000.0000>
- Nguyen, T. N., & Nguyen, T. A. (2023). THE EFFECT OF PILE DRIVING PROCESS ON STRESS AND STRAIN OF NEIGHBORING BUILDING'S FOUNDATIONS: AN APPLICATION IN VIETNAM. *International Journal of GEOMATE*, 24(104), 1–10. <https://doi.org/10.21660/2023.104.3688>
- Solin, D. P., Estikhamah, F., & Farichah, H. (2022). *Analisis Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang pada Tanah Berlempung Berdasarkan Data Penyelidikan Tanah*. 7(1).
- Sosrodarsono, suyono, & Nakazawa, kazuto. (2000). *MEKANIKA TANAH & TEKNIK PONDASI*.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice Second Edition*. John Wiley & Sons.
- Vytiniotis, A., Casey, B., & Sykora, D. W. (2018). *Lateral Soil Movements Due to Pile Driving: A Case Study in Soft Clays*.
- Whyley, & Sarsby. (1992). *Ground Borne Vibration From Piling*.