



**ANALISIS RESIKO GETARAN TANAH AKIBAT PENGEBORAN RENCANA PONDASI  
JEMBATAN YANG BERSIMPANGAN DENGAN JALUR PIPA GAS**  
*RISK ANALYSIS OF GROUND VIBRATION DUE TO DRILLING FOR BRIDGE  
FOUNDATION INTERSECTING WITH GAS PIPELINE ROUTE*

**Heri Khoeri<sup>1\*</sup>, dan Wisnu Isvara<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jakarta

<sup>2</sup> Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

**Abstrak**

Rencana pembangunan perumahan di Desa Cihuni, Kecamatan Pagedangan, Kabupaten Tangerang membutuhkan akses jalan yang melintasi jalur pipa milik PT. Pertamina Gas yang tertanam di bawah tanah. Pelaksanaan konstruksi di atas pipa gas tentunya berpotensi membahayakan keamanan pipa gas. Untuk mengetahui potensi resiko akibat getaran yang diakibatkan oleh pengeboran pondasi pada pipa gas yang tertanam dan mengetahui tindakan pencegahan dan atau perlindungan khusus apabila risiko pada pipa gas berada pada level yang tidak dapat diterima sesuai dengan klasifikasi resiko dilakukanlah penelitian ini. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan mesin bor yang bertenaga 133kW dengan frekuensi putaran 36 rpm berpotensi menimbulkan getaran, PPV sebesar 33.15 mm/det saat mengenai pipa gas, hal ini melampaui kriteria maksimum yang diijinkan yaitu 30 mm/det, tentunya berpotensi merusak pipa. Sementara hasil analisis menunjukkan getaran akibat pengeboran tidak berpotensi menyebabkan likuifaksi dengan faktor keamanan sebesar 15. Untuk memitigasi hal tersebut alternatif yang dapat dilakukan adalah membatasi kecepatan putaran mesin bor sampai dengan 29.5 rpm atau menurunkan dasar pile cap sedalam 2.6 m, dan memasang *accelerometer* untuk memonitor besaran getaran dan menurunkan rpm atau menghentikan kegiatan konstruksi saat terindikasi ppv mendekati 30 mm/det.

**Kata Kunci:** Analisis resiko, getaran, jembatan, likuifaksi, pipa gas

**Abstract**

*The housing development plan in Cihuni Village, Pagedangan District, Tangerang Regency requires road access that crosses the underground pipelines owned by PT. Pertamina Gas. Construction activities above gas pipelines certainly pose potential risks to pipeline safety. To assess the potential risks due to vibrations caused by drilling foundations near the buried gas pipelines and to determine preventive measures and/or specific protections if the risk to the gas pipelines reaches an unacceptable level according to risk classification, this study was conducted. The analysis results indicate that the use of a 133 kW-powered drilling machine with a rotation frequency of 36 rpm has the potential to generate vibrations, with PPV of 33.15 mm/s when hitting the gas pipeline, exceeding the allowed maximum criterion of 30 mm/s, thus potentially damaging the pipeline. However, the analysis results indicate that the vibrations caused by drilling do not have the potential to cause liquefaction, with a Safety Factor of 15. To mitigate this issue, alternatives that can be considered include limiting the rotation speed of the drilling machine to 29.5 rpm or reducing the depth of the pile cap by 2.6 m, and installing accelerometers to monitor the magnitude of vibrations and reduce rpm or stop construction activities when the PPV approaches 30 mm/s.*

**Keywords:** risk analysis, vibration, bridge, liquifaction, gas pipe

**PENDAHULUAN**

Rencana pembangunan perumahan di Desa Cihuni, Kecamatan Pagedangan, Kabupaten Tangerang membutuhkan akses jalan yang melintasi jalur pipa milik PT. Pertamina Gas yang tertanam di bawah tanah. Untuk menghindari resiko adanya beban tambahan akibat lalu lintas kendaraan di atas jalur pipa gas direncanakan pembangunan jembatan. Namun pada saat pelaksanaan konstruksi jembatan akan tetap ada kegiatan di sekitar jalur pipa gas yang berpotensi bahaya pada pipa gas. Untuk memastikan keamanan pipa gas pada saat pelaksanaan konstruksi perlu dilakukan analisis kajian resiko pembangunan

jembatan terhadap jalur pipa gas sebagai syarat mutlak perizinan pembangunan.

Pipa-pipa minyak dan gas rentan terhadap bencana alam dan dapat memiliki dampak serius pada lingkungan. Kerusakan potensial pada infrastruktur pipa berkontribusi pada peningkatan risiko paparan yang berdampak serius pada lingkungan. Oleh karena itu integritas strukturalnya menjadi perhatian serius bagi perusahaan minyak dan gas, pemerintah, dan berbagai pemangku kepentingan karena berpotensi menyebabkan kerugian lingkungan, infrastruktur, dan keuangan jika terjadi kegagalan struktural (Badida et al., 2019).

(\*)Corresponding author

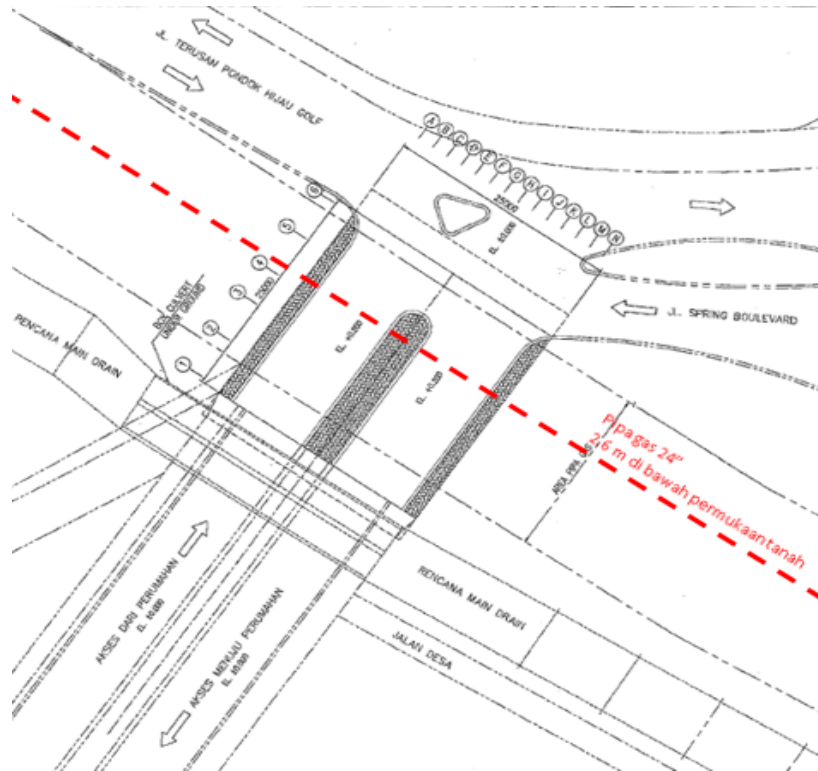
Telp : 08158255374

E-mail : [heri.khoeri@umj.ac.id](mailto:heri.khoeri@umj.ac.id), <https://hesa.co.id>

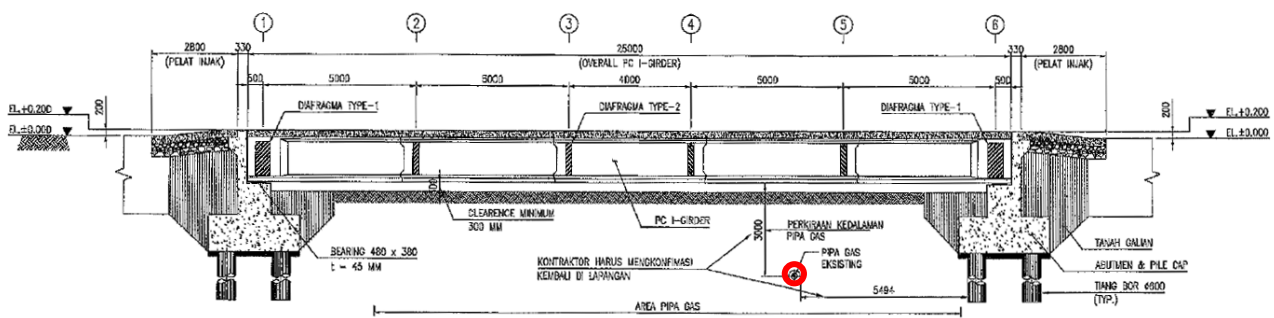
<http://doi.org/xxx>

Received 26 April 2024; Accepted 15 Oktober 2024; Available online 31 Oktober 2024

E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928



Gambar 1. Lokasi Crossing Rencana Jembatan dengan Jalur Pipa



Gambar 2. Posisi dan Kedalaman Pipa pada Lokasi Crossing dengan Rencana Jembatan

Lokasi *crossing* rencana jembatan dengan jalur pipa seperti pada Gambar 1. Gambaran potongan melintang rencana *crossing* jembatan dengan pipa gas PT. Pertamina Gas dapat dilihat di Gambar 2.

Kegagalan pipa gas bawah tanah perkotaan telah menyebabkan kecelakaan kebakaran dan ledakan yang signifikan dengan kerugian besar (Wang et al., 2017). Penilaian risiko adalah salah satu alat utama yang digunakan industri minyak dan gas untuk menilai bahaya dan risiko di fasilitas mereka di seluruh dunia. Penilaian risiko kualitatif dan kuantitatif dilakukan pada berbagai fase: tahap konseptual, tahap desain, tahap konstruksi, tahap operasional, tahap pembongkaran, dan lainnya. Penilaian risiko kuantitatif dilakukan selama tahap desain rinci untuk menentukan jarak dan tata letak peralatan untuk operasi dan pemeliharaan yang aman dari industri minyak dan gas. Tata letak peralatan dan jaraknya didasarkan pada jarak aman yang harus

dilakukan pada berbagai studi keselamatan desain (Abdoul Nasser et al., 2021).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi risiko akibat getaran yang diakibatkan oleh pengeboran pondasi pada pipa gas yang tertanam dan memberikan rekomendasi tindakan pencegahan dan atau perlindungan khusus apabila risiko pada pipa gas berada pada level yang tidak dapat diterima sesuai dengan klasifikasi risiko.

## TINJAUAN PUSTAKA

Getaran adalah berbagai kuantitas dalam waktu yang dapat diwakili sebagai perpindahan suatu titik (*amplitude*), tingkat perubahan perpindahan (*particle velocity*), dan tingkat perubahan kecepatan (*particle acceleration*) (Whyley & Sarsby, 1992).

Tingkat getaran tanah tergantung pada energi dari sumber getaran, properti tanah, jarak sumber getaran, karakteristik propagasi gelombang, karakteristik

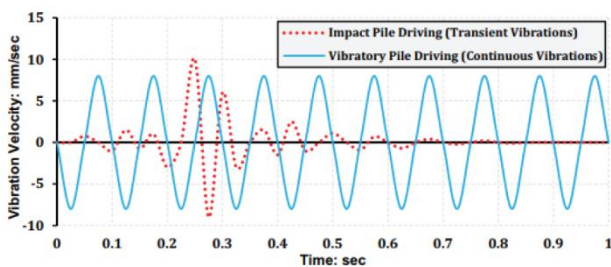
dinamis dan kerentanan struktur yang ditinjau. Getaran tanah dapat dihitung atau diprediksi sebelum awal konstruksi.

Sistem getaran lengkap terdiri dari sumber, jalur dan reseptor. Setiap bagian dari sistem mengubah karakteristik getaran. Getaran tanah akibat pengeboran dan pemadatan tanah dapat mempengaruhi pipa gas karena adanya deformasi pada tanah. Sementara itu, getaran pipa dan tanah akan memengaruhi distribusi tegangan, terutama di bagian tanah bergelombang, yang akan menyebabkan retakan pipa dalam kasus yang serius (Zhang et al., 2017, 2021).

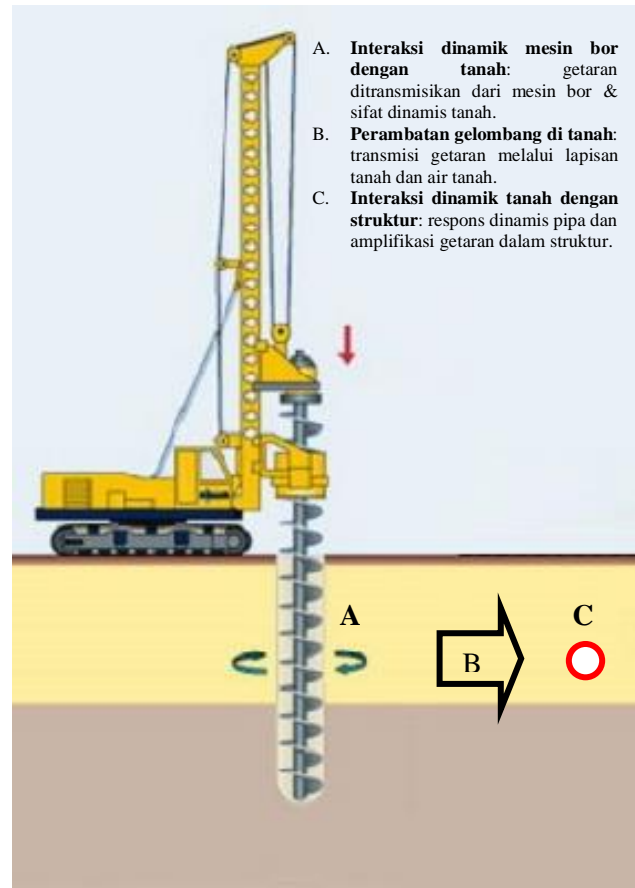
Sistem getaran lengkap terdiri dari sumber, jalur dan reseptor. Setiap bagian dari sistem mengubah karakteristik getaran. Getaran tanah akibat pengeboran dan pemadatan tanah dapat mempengaruhi pipa gas karena adanya deformasi pada tanah.

Rantai transmisi getaran akibat pemancangan tiang, diawali ketika *hammer* mengenai kepala tiang, menimbulkan gelombang tegangan (atau regangan) dinamik yang menghasilkan getaran. Getaran kemudian menyebar pada frekuensi dan amplitudo tertentu di bawah pile (di dalam tanah), dan menuju ke struktur yang berdekatan (Massarsch & Westerberg, 1995). Diadopsi dari teori tersebut maka pada kasus pengeboran pondasi jembatan rantai transmisi getaran dimulai ketika mata bor mengenai tanah terjadi gelombang tegangan (atau regangan) yang menghasilkan getaran yang kemudian menyebar pada frekuensi dan amplitudo ke sekitarnya termasuk ke pipa gas yang berada di dekatnya (**Gambar 4**).

**Gambar 3** menjelaskan propagasi gelombang ketika *mata bor* di aplikasikan ke tanah, terjadi peningkatan getaran ke tanah, dan merambat ke tanah disekitarnya. Perambatan gelombang terjadi di seluruh lapisan tanah dalam bentuk getaran sebagai akibat dampak *pengeboran* atau getaran kontinu. Perlu dicatat bahwa getaran tanah yang dihasilkan dari kegiatan konstruksi dapat diklasifikasikan menjadi getaran sementara dan terus menerus. Akhirnya, getaran tanah berdampak pada struktur apa pun di jalurnya, dan kerusakan struktural dapat terjadi melalui interaksi tanah-struktur (A'yun, 2018).



**Gambar 3.** Propagasi Gelombang (Pergerakan Getaran Tanah)  
Sumber: (A'yun, 2018).



**Gambar 4.** Ilustrasi Propagasi Gelombang Akibat Pengeboran Pondasi Jembatan

Sumber: Adaptasi dari rantai transmisi getaran (Massarsch & Westerberg, 1995), disesuaikan dengan kondisi drilled shaft (Khoeri, Badaruddin, et al., 2024)

Penentuan *peak particle velocity (PPV)* selama konstruksi dapat dilakukan dengan empat pendekatan yaitu: PVS, SRSS, *peak undirectional velocity* dan *peak vertical velocity*. Besarnya nilai PPV (dalam arah vertikal sama dengan dalam arah horizontal) dihitung dengan menggunakan persamaan skala jarak sebagai berikut (Attewell & Farmer, 1973):

$$PPV = k \left[ \frac{D}{\sqrt{W_t}} \right]^{-n} \quad (1)$$

dengan,

$PPV$  = Peak Particle Velocity (mm/detik)

$k$  = Konstanta tanah yang ditentukan melalui percobaan ( $m^2/sJ^{0.5}$ )

$W_t$  = Input energi (J)

$D$  = Jarak radial pile dan titik monitor (m)

$n$  = *attenuation rate* (1 sampai 2)

$k$  dan  $n$  disebut sebagai faktor tempat (*site factor*). Nilai tersebut menyatakan energi yang ditransferkan dari kegiatan pengeboran ke tanah sekitarnya. Harga konstanta-konstanta pada persamaan di atas telah banyak dipublish di berbagai literatur

**Tabel 1.** Nilai parameter  $n$  dan  $k$

Parameter		Jenis Tanah	Sumber
$n$	$k$		
1	1		(Attewell & Farmer, 1973)
1	0.25	soft or loose	(Whyley & Sarsby, 1992)
	0.75	stiff or medium dense	
	1.5	stiff or dense	
0.87	0.76		(Attewell et al., 1992)
	3	stiff or medium dense	(Crabb et al., 1998)
1	0.75		(BSI, 1992)
1	0.75	Soft cohesive	(CEN, 1998)
	0.5	Stiff cohesive	
	0.75	Very Stiff cohesive	
1	0.5-1	Impact Driving (soft to stiff)	(ArcelorMittal, 2008)
	0.75	Vibratory Driving	

Beberapa peraturan dan penelitian memberikan rekomendasi batasan  $PPV$  agar tidak terjadi kerusakan struktural pipa gas seperti pada **Tabel 2**:

**Tabel 2.** Batasan getaran pada pipa

No	Kondisi	Batasan PPV (mm/det)	Jarak ijin (m)	Referensi
1	Baja (termasuk pipa baja yang dilas)	100		(DIN, 2016)
	Lempung, beton, logam (dengan atau tanpa flange)	80		
	Bata, plastik	50		
2	Getaran <i>intermitten</i> atau <i>transient</i>	30		(BSI, 2014)
	Getaran Menerus	15		
3	Level aman	40	1.92	(Hamidi et al., 2018, 2019)
	Level kerusakan struktur	76	1.16	

Beban akibat pengeboran titik podasi termasuk dalam beban siklik (dinamik). Gelombang getaran dari mesin bor berbentuk harmonik dan bersifat sementara (transient) seperti beban gempa. Pasir lepas yang jenuh air akan lebih mudah mencair (liquefied) akibat beban siklik, bila dibandingkan terhadap lempung yang tidak mudah mencair, karena tahanannya yang lebih besar terhadap beban siklik (Yasuhara et al., 1996). Deformasi selama pembebanan siklik akan tergantung pada kepadatan tanah, besar dan durasi beban siklik, serta jumlah pembalikan tegangan geser. Jika pembalikan tegangan (stress reversal) terjadi, tegangan geser yang efektif bisa mencapai nol, maka pencairan (*liquefaction*) siklik dapat terjadi.

Likuifaksi adalah perubahan sifat tanah menjadi seperti benda cair akibat peningkatan tekanan air pori yang menyebabkan tanah kehilangan ketahanan gesernya (Faculty of Societal Safety Sciences, 2018).

Likuifaksi terjadi di tanah jenuh. Peningkatan tekanan air ke titik dimana partikel tanah dapat dengan mudah bergerak terhadap satu sama lain yang dipicu oleh getaran dalam tanah yang umumnya

karena gempa, namun kegiatan konstruksi juga dapat memicunya. Hal ini menyebabkan kontak antar partikel tanah dan kuat geser tanah menurun yang dapat menyebabkan penurunan tanah (*settlement*) dan kerusakan struktur di atasnya (Khoeri, Pradana, et al., 2024). Tanah yang berpotensi tinggi mengalami likuifaksi adalah pasir, juga tanah berpartikel bulat dan seragam karena volume porinya tinggi, namun tidak menutup kemungkinan tanah jenis lain juga akan mengalami likuifaksi.

Pada lokasi konstruksi, diterapkan ambang getaran tanah akibat pemancangan pondasi yang berpotensi menyebabkan likuifaksi di tanah lempung dengan nilai  $PPV$ , dimana 10 cm/detik (4 in/s) berpotensi mengakibatkan bahaya likuifaksi di tanah lempung (Svinkin, 2008).

Analisis potensi likuifaksi bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan ( $SF$ ) yang diperoleh dengan membandingkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* ( $CRR$ ) yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan *soil liquefaction* dan *Cyclic Stress Ratio* ( $CSR$ ) yang merupakan tegangan geser siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif lain, likuifaksi akan terjadi untuk  $SF < 1$ .  $CSR$  merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa (getaran) dengan tegangan vertikal efektif di setiap lapisan. Nilai  $CSR$  pada suatu lapisan tanah sangat dipengaruhi oleh nilai percepatan gempa. Nilai percepatan rata-rata akibat getaran adalah 0,65 dari percepatan maksimum, maka nilai tegangan geser rata-rata dapat dihitung dengan persamaan berikut (Seed & Idriss, 1982):

$$\tau_{cyc} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v \tag{2}$$

Karena kolom tanah tidak berperilaku seperti sebuah struktur yang kaku saat terjadi getaran (tanah dapat mengalami deformasi), maka dimasukkan sebuah faktor reduksi kedalaman,  $r_d$  terhadap persamaan tersebut sehingga (Seed & Idriss, 1982):

$$\tau_{cyc} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d \tag{3}$$

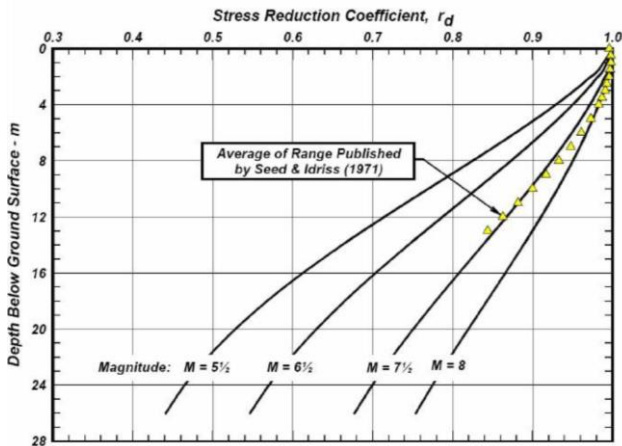
Untuk mendapatkan nilai  $CSR$  maka kedua sisi dinormalisasi dengan tegangan vertikal efektif, sehingga dapat dituliskan (Seed & Idriss, 1982):

$$CSR = \frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \tag{4}$$

dengan,

- $a_{max}$  = Percepatan maksimum akibat getaran (m/s<sup>2</sup>)
- $g$  = Percepatan gravitasi bumi (m/s<sup>2</sup>)
- $r_d$  = Faktor reduksi terhadap tegangan
- $\sigma_v$  = Tegangan vertikal total (N/m<sup>2</sup>)
- $\sigma'_v$  = Tegangan vertikal efektif (N/ m<sup>2</sup>)
- $\sigma'_v = \sigma_v - u$
- $u = H\gamma_w$
- $u$  = Tekanan air pori
- $H$  = Kedalaman (m)
- $\gamma_w$  = Berat volume air (N/m<sup>3</sup>)

Faktor reduksi merupakan nilai yang dapat mengurangi tegangan di dalam tanah. Besar dari nilai reduksi tanah berdasarkan pada kedalamannya, dimana semakin jauh ke dalam tanah maka faktor reduksi akan semakin kecil seperti yang terlihat dalam **Gambar 5** (Seed & Idriss, 1971).



**Gambar 5.** Grafik Faktor Reduksi,  $r_d$   
Sumber: (Seed & Idriss, 1971)

## METODE

Penelitian dilakukan pada lokasi crossing jalur pipa gas dan rencana pembangunan jembatan (**Gambar 1**).

Tahapan penelitian yang dimulai dari inspeksi pendahuluan dan pengumpulan data sekunder, investigasi tanah, interpretasi parameter geoteknik, estimasi getaran akibat rencana instalasi pondasi bor, analisis kriteria pemenuhan keamanan pipa akibat getaran dan analisis potensi likuifaksi.

### Metode inspeksi Pendahuluan

Inspeksi pendahuluan dilakukan dengan melakukan penggalian untuk memastikan lokasi, kedalaman dan dimensi pipa yang tertanam.

### Metode penyelidikan tanah

Investigasi Tanah, investigasi yang dilakukan meliputi pengeboran tanah, standard penetration test (SPT), pengambilan contoh tanah tidak terganggu (UDS) (BSN, 2019), dan pengujian laboratorium UDS (index dan engineering properties) (BSN, 1998), (ASTM, 2017) (BSN, 2008), (ASTM, 2020), (BSN, 2018), (ASTM, 2018), (ASTM, 2023).

### Metode estimasi PPV

Estimasi getaran dilakukan dengan menggunakan formula dari persamaan (1) dengan parameter yang paling mendekati dengan hasil penyelidikan tanah dan metode konstruksi seperti yang diberikan pada **Tabel 1**.

## Metode analisis pemenuhan kriteria keamanan pipa akibat getaran

Analisis pemenuhan kriteria keamanan pipa akibat getaran akan mengacu pada standar yang berlaku [(DIN, 2016), (BSI, 2014), dan (Hamidi et al., 2018, 2019) yang diadaptasi dari ASCE seperti yang diberikan pada Tabel 2]. Jika memenuhi akan dilanjutkan ke analisis selanjutnya yaitu analisis potensi likuifaksi, namun jika tidak memenuhi akan dilakukan mitigasi untuk menurunkan tingkat getaran yang terjadi.

## Metode analisis potensi likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan melihat nilai faktor keamanan ( $SF$ ) yang diperoleh dari perbandingan *Cyclic Resistance Ratio* ( $CRR$ ) dan *Cyclic Stress Ratio* ( $CSR$ ), dimana kondisi aman apabila  $SF > 1$ . Jika  $SF < 1$  maka akan dilakukan upaya mitigasi agar tidak terjadi potensi likuifaksi pada saat pelaksanaan konstruksi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil inspeksi awal

Berdasarkan hasil inspeksi awal diketahui data teknis pipa sebagai berikut (PT. Pertamina Gas & PT. Mikasa Pama Internasional, 2022):

**Tabel 3.** Data hasil inspeksi awal pipa gas

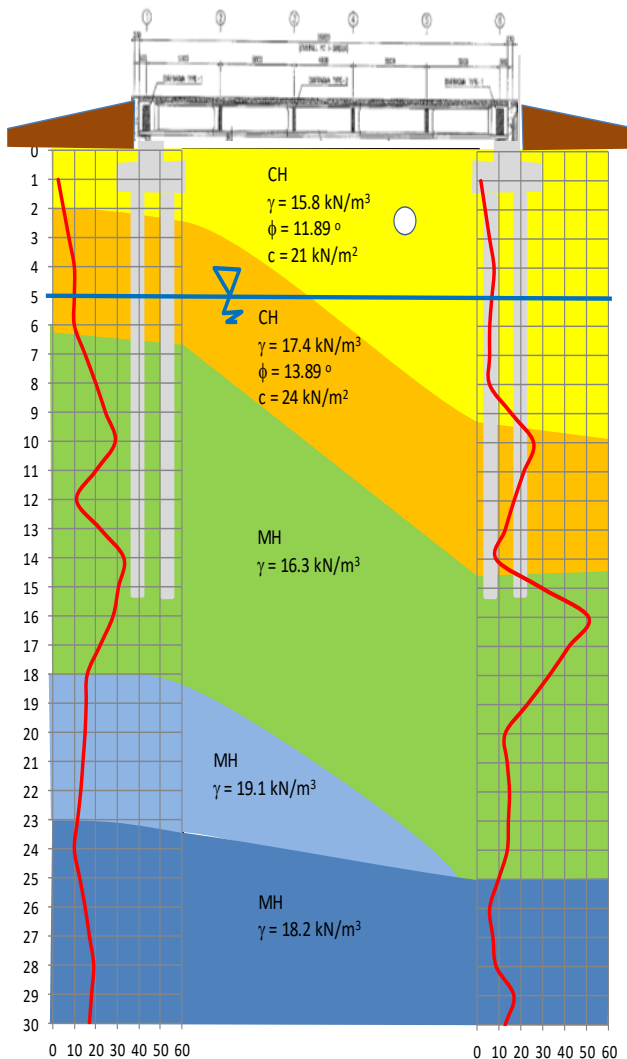
Deskripsi	Keterangan
ROW	PTG
Lebar ROW	20
Ruas pipa	PTG-NGR-BTG KP132
OD pipa (Inch)	24
Kedalaman T.O.P (m)	2.6
Jenis pipa	Carbon Steel
Fluida	Gas
Tekanan	145-330
Koordinat	6°15'40.1"S 106°38'5"E



**Gambar 6.** Dokumentasi pemeriksaan awal pipa  
Sumber: Hasil inspeksi lapangan

### Hasil penyelidikan tanah

Hasil investigasi tanah yang disuperimposed pada gambar rencana dan posisi pipa dalam potongan memanjang seperti pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Potongan memanjang rencana jembatan, potongan melintang pipa, N-SPT dan interpretasi borelog  
Sumber: Hasil penyelidikan lapangan

### Perhitungan PPV

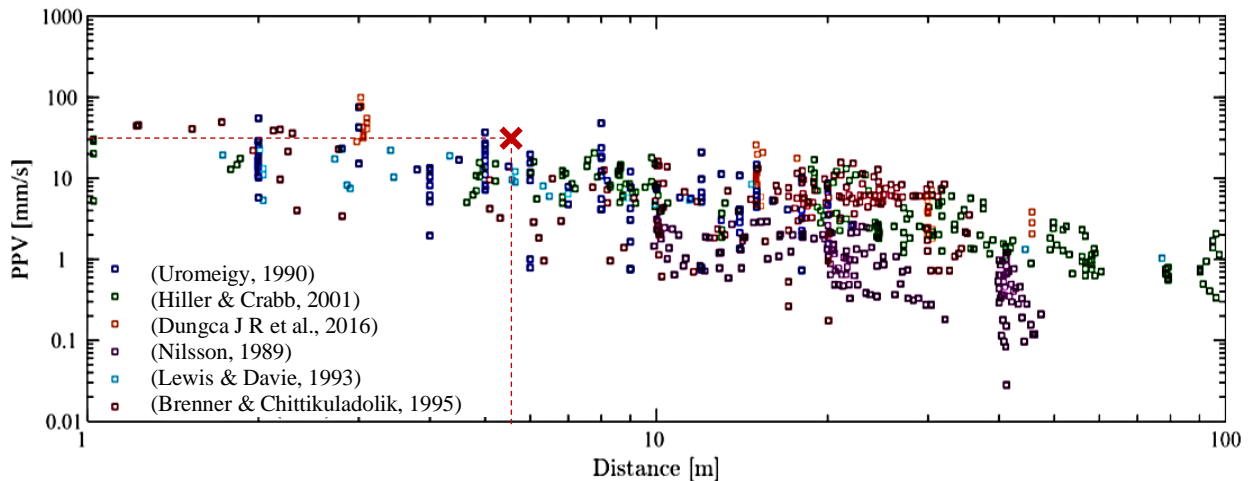
Parameter yang mempengaruhi PPV berdasarkan persamaan (1), salah satunya adalah *power drilling machine* yang direncanakan digunakan pada saat pengeboran, dalam hal ini adalah *Rig XR150DIII* (Gambar 8), dengan spesifikasi seperti diberikan dalam Tabel 4.



**Gambar 8.** Alat Pengeboran pondasi

**Tabel 4.** Spesifikasi Alat Pengeboran

Deskripsi	Satuan	Parameter
<b>Engine</b>		
Model	-	CUMMINS B5.9-C
Rated Power	(kW)	133
<b>Rotary Drive</b>		
Max.output torque	(kN·m)	150
Rotary speed	(r/min)	8~36
Max.Drilling Diameter	(mm)	φ800
Max.Drilling Depth	(m)	20
Max.Extraction Force	(kN)	400
<b>Main Winch</b>		
Max.single-rope speed	(m/min)	75
Diameter of the steel wire rope	(mm)	28
Auxiliary Winch		
Max.single-rope speed	(kN)	50
Diameter of the steel wire rope	(m/min)	60
<b>Drilling Mast Inclination</b>		
Lateral	(°)	3
<b>Undercarrige</b>		
Max.traveling speed	(km/h)	3.2
Max.grade ability	(%)	40
Min Ground Clearance	(mm)	352
Track Shoe Width	(mm)	700
Distance between tracks	(mm)	3100~4100
<b>Hydraulic System</b>		
Working pressure	(MPa)	32
Machine	Working (t)	48/43
/Transportation Quality		
<b>Dimensionv</b>		
Working condition	(mm)	8620X4100X22845
Transportation condition	(mm)	13610X3100X3040



**Gambar 9.** Data getaran akibat pemancangan tiang pondasi dari beberapa literatur (Colaço et al., 2022) yang disuperimposed nilai estimasi PPV pada rencana kembangan

Dari **Tabel 4** diperoleh  $k = 0.5 \text{ m}^2/\text{sJ}^{0.5}$ ;  $W_t = 133 \text{ kW} = 133000 \text{ J}$ ;  $D = 5.5 \text{ m}$  dan  $n = 1$ , maka:

$$PPV = k \left[ \frac{D}{\sqrt{W_t}} \right]^{-n} = 0.5 \left[ \frac{5.5}{\sqrt{133000}} \right]^{-1} = 33.15 \text{ mm/det}$$

Getaran yang dihasilkan dari hasil perhitungan menggunakan parameter-parameter Tabel 1, masih dalam range PPV hasil pengukuran aktual lapangan dari beberapa penelitian sebelumnya (**Gambar 9**). Dengan kondisi ini maka nilai estimasi PPV yang diperoleh dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

**Pemenuhan kriteria keamanan pipa akibat getaran**

Getaran yang ditimbulkan akibat pengeboran pondasi,  $PPV = 33.15 \text{ mm/det}$  masih dibawah batas maksimum yang disatkan DIN yaitu  $100 \text{ mm/det}$  (DIN, 2016), dan juga tidak melampaui level aman yang disyaratkan ASCE yaitu  $40 \text{ mm/det}$  (Hamidi et al., 2019), namun melampaui batasan getaran *transient* (sementara) yang disyaratkan oleh BSI yaitu  $30 \text{ mm/det}$  (BSI, 2014), untuk alasan keamanan walaupun sudah memenuhi 2 (dua) kriteria, karena estimasi  $PPV$  yang terjadi 10.5% di atas batas yang ditetapkan oleh BSI, maka harus dilakukan upaya mitigasi untuk mengurangi  $PPV$  yang terjadi.

Alternatif yang dapat dilakukan diantaranya adalah dengan mengurangi kecepatan putar mesin bor pada saat operasi. Dari persamaan (1) dapat diketahui batasan power yang digunakan untuk mengurangi  $PPV$  menjadi  $30 \text{ mm/det}$ , seperti pada persamaan (5).

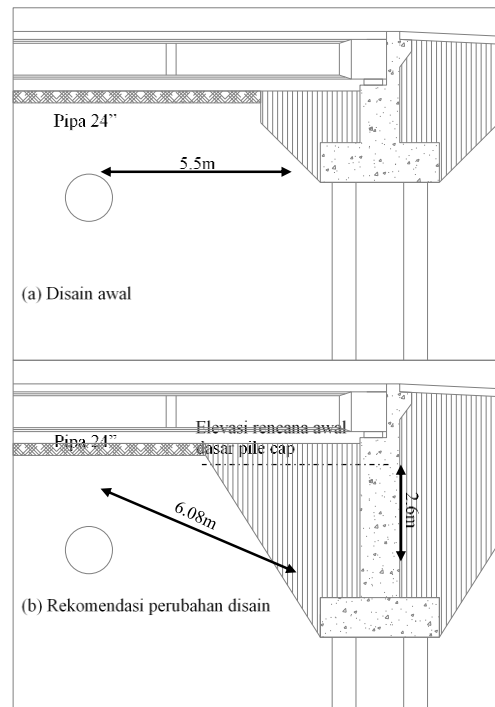
$$W_t = D^2 \sqrt{\frac{PPV^2}{k^2}} = 5.5^2 \sqrt{\frac{30^2}{0.5^2}} = 108900 \text{ Joule} \tag{5}$$

Sehingga kecepatan putar,  $\omega$  (*rpm*), dapat dihitung:

$$\omega = \frac{W_t \text{ limit}}{W_t \text{ max}} \omega_{\text{max}} = \frac{108900}{133000} \times 36 = 29.5 \text{ rpm} \tag{6}$$

Alternatif lainnya adalah dengan menurunkan level *pile cap* sehingga jarak terdekat sumber getaran dengan pipa sehingga  $PPV$  yang sampai ke pipa tidak melebihi  $30 \text{ mm/det}$ . Dari persamaan (1), dengan membatasi  $PPV=30 \text{ m/det}$ , diperoleh:

$$D = \left( \frac{k}{PPV} \right)^{\frac{1}{n}} \sqrt{W_t} = \left( \frac{0.5}{30} \right)^{\frac{1}{1}} \sqrt{133000} = 6.08 \text{ m} \tag{7}$$



**Gambar 10.** (a) Disain awal; (b) Rekomendasi perubahan desain

**Tabel 5.** Perhitungan CSR

Lapisan	Kedalaman (m)	h (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (kN/m <sup>2</sup> )	$h_w$ (m)	$u$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'$ (kN/m <sup>2</sup> )	$r_d$	CSR
1	0 - 7	7	15.21	106.44	2	19.62	86.82	0.95	0.0046
2	7 - 12	5	17.07	191.79	7	68.67	123.12	0.85	0.0053
3	12 - 22	10	15.99	351.69	17	166.77	184.92	0.59	0.0044
4	22 - 23	1	18.74	370.43	18	176.58	193.85	0.50	0.0038
5	23 - 30	7	17.85	495.41	25	245.25	250.16	0.50	0.0039

**Tabel 6.** Perhitungan CRR

Lapisan	Kedalaman (m)	h (m)	$N_{av}$	$C_N$	$N1_{(60)}$	FC (%)	$\square$	$\square$	$N1(60)_{cs}$	CRR
1	0 - 7	7	6	1.063	3.775	11.685	1.445	0.950	5.032	0.072
2	7 - 12	5	17	0.892	9.843	33.603	4.912	0.795	16.812	0.179
3	12 - 22	10	26	0.728	11.864	25.556	4.345	0.861	19.237	0.206
4	22 - 23	1	15	0.711	6.575	19.750	3.571	0.902	12.890	0.140
5	23 - 30	7	11	0.626	4.362	19.824	3.584	0.902	10.235	0.115

**Hasil analisis terhadap potensi likuifaksi**

Percepatan getaran max akibat pengeboran pondasi diperoleh dengan perhitungan sebagai berikut (Bai & Dong Xu, 2019):

$$v = A\omega \cos \omega t \tag{8}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \sin \omega t \tag{9}$$

dengan  $\omega_{max} = 36 \text{ rpm} = 0.6 \text{ hz}$  (Tabel 4),  $v = PPV = 33.15 \text{ mm/det}$ , dan  $A = \frac{v}{\omega} = 55.25$ , maka  $a_{max} = 59.7 \text{ mm/det}^2$ .

Selanjutnya perhitungan CSR pada tiap-tiap lapisan tanah seperti diberikan pada

**Tabel 5.** Sedangkan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) merupakan nilai ketahanan suatu lapisan tanah terhadap tegangan cyclic yang dihitung dari data uji lapangan dimana dalam penelitian ini digunakan data SPT. Penentuan nilai  $(N1)_{60}$  menggunakan faktor koreksi dan normalisasi dengan persamaan berikut (Idriss & Boulanger, 2008):

$$CRR = \frac{1}{34 - (N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{1}{(10(N1)_{60cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \tag{10}$$

$$(N1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \tag{11}$$

dengan  $N_m$  adalah nilai SPT, dan yang lainnya adalah faktor koreksi. Likuifaksi dipengaruhi oleh plastisitas tanah, menentukan faktor koreksi  $(N1)_{60cs}$  sebagaimana persamaan berikut:

$$(N1)_{60cs} = \alpha + \beta(N1)_{60} \tag{12}$$

Nilai-nilai  $\alpha$  dan  $\beta$  dipengaruhi oleh persentase *finest content*, FC, seperti persamaan

$$\alpha = 0, \beta = 1, \text{ maka } FC \leq 5\%;$$

$$\alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{FC^2}\right), \beta = \left(0.99 - \frac{FC^{1.5}}{1000}\right), \tag{13}$$

$$\text{maka } 5\% < FC < 35\%;$$

$$\alpha = 5.0, \beta = 1.2, \text{ maka } FC \geq 35\%.$$

Selanjutnya perhitungan CRR untuk tiap-tiap lapisan tanah seperti diberikan pada

**Tabel 5.** Perhitungan CSR

La pis an	Kedalam an (m)	h ( m )	$\gamma$ ( k N/ m <sup>3</sup> )	$\sigma$ ( k N/ m <sup>2</sup> )	$h_w$ ( m )	$u$ ( k N/ m <sup>2</sup> )	$\sigma'$ ( kN /m <sup>2</sup> )	$r$ $a$	C S R
									0
				15.	106		19.	86.	9
1	0 - 7	7		21	.44	2	62	82	5
									0
				17.	191		68.	123	8
2	7 - 12	5		07	.79	7	67	.12	5
									0
				15.	351		166	184	5
3	12 - 22	10		99	.69	17	.77	.92	9
									0
				18.	370		176	193	5
4	22 - 23	1		74	.43	18	.58	.85	0
									0
				17.	495		245	250	5
5	23 - 30	7		85	.41	25	.25	.16	0
									39

**Tabel 6.**

Faktor keamanan, SF merupakan perbandingan dari nilai *cyclic stress ratio* (CSR) dan *cyclic resistance ratio* (CRR) ditunjukkan pada persamaan (14) dan SF tiap lapisan diberikan pada Tabel 7 :

$$SF = \frac{CSR}{CRR} \tag{14}$$

**Tabel 7.** Perhitungan Safety Factor CSR/SRR

Lapisan	Kedalaman (m)	CSR	CRR	SF
Lapisan 1	0 - 7	0.0046	0.072	15.757
Lapisan 2	7 - 12	0.0053	0.179	34.008
Lapisan 3	12 - 22	0.0044	0.206	46.725
Lapisan 4	22 - 23	0.0038	0.140	36.925
Lapisan 5	23 - 30	0.0039	0.115	29.421

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh bahwa getaran akibat pengeboran tiang dan getaran akibat penggunaan alat pemadat tanah dinamik tidak berpotensi menyebabkan likuifaksi.

**KESIMPULAN**

Rencana pengeboran pondasi jembatan dengan menggunakan alat pengeboran bertenaga 133kW dan frekuensi 36 rpm berpotensi menimbulkan getaran,



PPV sebesar 33.15 mm/det saat mengenai pipa gas yang tertanam, hal ini menurut BS yang membatasi PPV sebesar 30 mm/det tentunya berpotensi merusak pipa, walaupun menurut ASCE dan DIN masih dalam batas aman. Jenis tanah lempung lunak berpotensi mengalami likuifaksi yang dapat mengakibatkan pipa gas *buckling* saat pengeboran pondasi dilakukan. Namun dari hasil perhitungan menunjukkan getaran akibat pengeboran tiang tidak berpotensi menyebabkan likuifaksi dengan faktor keamanan, *SF* yang merupakan perbandingan *cyclic stress ratio (CSR)* dan *cyclic resistance ratio (CRR)* sebesar 15.

Untuk memitigasi hal tersebut alternatif yang dapat dilakukan adalah membatasi kecepatan putaran mesin bor sampai dengan 29.5rpm atau menurunkan dasar pile cap sedalam 2.6 m, sehingga getaran yang mengenai pipa tidak lebih dari 30 mm/det, dan memasang *accelerometer* untuk memonitor besaran getaran dan menurunkan rpm atau menghentikan kegiatan konstruksi saat terindikasi ppv mendekati 30 mm/det.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Lembaga Teknologi Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan PT. Hesa Laras Cemerlang, <https://hesa.co.id> yang telah mendukung penuh penelitian ini.

## REFERENSI

- Abdoul Nasser, A. H., Ndalila, P. D., Mawugbe, E. A., Emmanuel Kouame, M., Arthur Paterne, M., & Li, Y. (2021). Mitigation of Risks Associated with Gas Pipeline Failure by Using Quantitative Risk Management Approach: A Descriptive Study on Gas Industry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10), 1098. <https://doi.org/10.3390/jmse9101098>
- ArcelorMittal. (2008). *Piling Handbook* (8th ed.). ArcelorMittal Commercial RPS.
- ASTM. (2017). *ASTM D4318-17e1, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
- ASTM. (2018). *D2573M-18, Standard Test Method for Field Vane Shear Test in Saturated Fine-Grained Soils*.
- ASTM. (2020). *ASTM D4767-20, Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- ASTM. (2023). *ASTM D2850-23, Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*.
- Attewell, P. B., & Farmer, I. W. (1973). Attenuation of Ground Vibration from Pile Driving. *Ground Engineering Journal*, 3(7), 26–29.
- Attewell, P. B., Selby, A. R., & O'Donnell, L. (1992). Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data. *Geotechnical and Geological Engineering*, 10(1), 41–59. <https://doi.org/10.1007/BF00881970>
- A'yun, S. F. (2018). *Analisis risiko pada pipa gas terhadap rencana pembangunan flyover Teluk Lamong*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badida, P., Balasubramaniam, Y., & Jayaprakash, J. (2019). Risk evaluation of oil and natural gas pipelines due to natural hazards using fuzzy fault tree analysis. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 66, 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.010>
- Bai, Y., & Dong Xu, Z. (2019). *Dynamics of Structures* (1st ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119605775>
- BSI. (1992). *BS 5228-4-1992; Noise Control On Construction and Open Sites. Part 4, Code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations*. BSI.
- BSI. (2014). *BS 5228-2:2009+A1:2014 Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites - Vibration*. BSI.
- BSN. (1998). *SNI 03-4804-1998, Metode pengujian berat isi dan rongga udara dalam agregat (439/BSN-I/HK/08/1998)*. Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. (2008). *SNI 3423:2008, Cara uji analisis ukuran butir tanah*. Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. (2018). *SNI 2813:2018, Cara Uji Kuat Geser Langsung Tanah Terkonsolidasi dan Terdrainase*. Badan Standarisasi Nasional.
- BSN. (2019). *SNI 4153:2019, Metode uji penetrasi standar (SPT) dan pengambilan contoh tanah dengan tabung belah (ASTM D 1586-11, IDT) (458/KEP/BSN/10/2019)*. Badan Standarisasi Nasional.
- CEN. (1998). *European Committee for Standardization. European Prestandard ENV 1993-5, Eurocode 3: Design of steel structures - Part 5: Piling*. CEN.
- Colaço, A., Ferreira, M. A., & Costa, P. A. (2022). Empirical, Experimental and Numerical Prediction of Ground-Borne Vibrations Induced by Impact Pile Driving. *Vibration*, 5(1), 80–95. <https://doi.org/10.3390/vibration5010004>
- Crabb, G. I., Hiller, D., & Wilson, P. E. (1998). *Measurement and prediction of ground-borne vibration due to construction operations*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:106891691>
- DIN. (2016). *DIN 4150-3 Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures*. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard).

- Faculty of Societal Safety Sciences, K. U. (Ed.). (2018). *The Fukushima and Tohoku Disaster*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04143-8>
- Hamidi, A., Farshi Homayoun Rooz, A., & Pourjenabi, M. (2018). Allowable Distance from Impact Pile Driving to Prevent Structural Damage Considering Limits in Different Standards. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 23(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000354](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000354)
- Hamidi, A., Farshi Homayoun Rooz, A., & Pourjenabi, M. (2019). Closure to “Allowable Distance from Impact Pile Driving to Prevent Structural Damage Considering Limits in Different Standards” by Amir Hamidi, Abtin Farshi Homayoun Rooz, and Majid Pourjenabi. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 24(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000403](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000403)
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake engineering Research Institute (EERI).
- Khoeri, H., Badaruddin, B., & Isvara, W. (2024). Asesmen Geoteknik Keretakan Cold Water Pipe (CWP) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap dan Rekomendasi Perbaikan. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 144–151.
- Khoeri, H., Pradana, R., Isvara, W., & Irwanto, R. (2024). Geotechnical Stability Assessment and Soil Improvement Recommendations using Soil Grouting and Drainage Tunnels (Case study: Retaining wall displacement at a transmission tower site). *BENTANG: Jurnal Teoritis Dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 12(2).
- Massarsch, K. R., & Westerberg, E. (1995). The active design concept applied to soil compaction. *Bengt B. Broms Symposium in Geotechnical Engineering*, 262–276.
- PT. Pertamina Gas, & PT. Mikasa Pama Internasional. (2022). *Berita Acara Survey Bersama Identifikasi Lokasi Crossing antara PT Pertamina Gas yang diwakili oleh tim dari Direktorat Teknik & Operasi/ OWJA/ Distrik Bitung dan PT Mikasa Pama Internasional*.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 97(9), 1249–1273. <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). *Ground Motion and Soil Liquefaction During Earthquake*. Earthquake Engineering Research Institute Monograph.
- Svinkin, M. R. (2008, August 14). Soil and Structure Vibrations from Construction and Industrial. *Sixth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. <https://scholarsmine.mst.edu/icchgehttps://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session13/8>
- Wang, W., Shen, K., Wang, B., Dong, C., Khan, F., & Wang, Q. (2017). Failure probability analysis of the urban buried gas pipelines using Bayesian networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 678–686. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.040>
- Whyley, P. J., & Sarsby, R. W. (1992). Ground borne vibration from piling. *Journal Ground Engineering*.
- XCMG. (2021). *XR150D CFA Technical Data Sheet*. XCMG Foundation Indonesia Service Center.
- Yasuhara, K., Murakami, S., & Toyota, N. (1996). Earthquake-Induced Residual Settlements in Soft Soils. *Eleventh World Conference in Earthquake Engineering*.
- Zhang, H., Qin, M., Liao, K., Wang, K., & He, G. (2021). Pipe-soil vibration characteristics of natural gas pipelines during the pigging process. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 95, 104148. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104148>
- Zhang, H., Zhang, S., Liu, S., & Wang, Y. (2017). Collisional vibration of PIGs (pipeline inspection gauges) passing through girth welds in pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 37, 15–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.035>