

Pengendalian Efek Getaran Terhadap Gedung Terdekat Saat Driving Pondasi Spun Pile Gedung GIS Substation (Studi Kasus: Gedung GIS Substation Data Center JKT 11 Microsoft)

Teguh Joko Pamuji * , Jimmy Chandra

Program Studi Program Profesi Insinyur, Fakultas Biosains, Teknologi, dan Inovasi, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Jalan Jenderal Sudirman 51, Jakarta 12930

Article Info	Abstract
<p><i>Article history:</i></p> <p>Received 15 December 2025</p> <p>Accepted 27 March 2026</p> <p><i>Keywords:</i> Pre-Boring, Pile Vibration, GIS, Substation</p>	<p><i>GIS (Gas Insulated Switchgear) is one of the greatest innovations in the substation sector, enabling construction in dense urban areas. Therefore, the construction of GIS buildings takes great care to consider the impact on the surrounding environment, particularly vibrations caused by driving piles into the GIS building foundation. Controlling potential impacts during foundation works is essential. This study examines the control methods for mitigating the vibration effects generated during spun pile driving. A mitigation solution is proposed through the implementation of pre-boring before pile driving, enabling a significant reduction and control of vibration levels to prevent damage to existing infrastructure.</i></p>

Info Artikel	Abstrak
<p><i>Histori Artikel:</i></p> <p>Diserahkan: 15 Desember 2025</p> <p>Diterima: 27 Maret 2026</p> <p>Kata Kunci: Pre-Boring, Pile Vibration, GIS, Substation</p>	<p>GIS (Gas Insulated Switchgear) adalah salah satu inovasi terbaik di sektor gardu induk, yang memungkinkan pembangunan di daerah perkotaan padat. Oleh karena itu, pembangunan gedung GIS sangat memperhatikan dampak terhadap lingkungan sekitarnya, khususnya getaran yang disebabkan oleh pemancangan tiang pondasi gedung GIS. Maka dari itu pengendalian dampak vibrasi selama pekerjaan pondasi sangat penting. Studi ini meneliti metode pengendalian untuk mengurangi efek getaran yang dihasilkan selama pemancangan tiang pancang. Solusi mitigasi diusulkan melalui penerapan pengeboran awal sebelum pemancangan tiang, yang memungkinkan pengurangan dan pengendalian tingkat getaran secara signifikan untuk mencegah kerusakan pada infrastruktur yang ada.</p>

1. PENDAHULUAN DAN DASAR TEORI

Pesatnya pertumbuhan industri pusat data (*data center*) di Indonesia telah mendorong pembangunan infrastruktur digital secara masif, seringkali berlokasi di area urban yang padat dan berdekatan dengan fasilitas kritis lainnya. Salah satu proyek strategis dalam ekosistem ini adalah pembangunan *Gas Insulated Substation* (GIS) yang berfungsi sebagai jantung pasokan daya listrik untuk menjamin operasional data center yang stabil dan tanpa henti.

Pembangunan gedung GIS ini memerlukan pondasi yang kuat dan dalam, di mana metode yang umum digunakan adalah pemancangan tiang pancang beton pracetak (*driving spun pile*). Namun, pelaksanaan metode ini secara konvensional menimbulkan tantangan signifikan, terutama terkait efek getaran tanah (*ground vibration*) yang dihasilkan. Getaran ini berpotensi mengganggu struktur gedung terdekat, merusak peralatan sensitif, dan mengancam integritas operasional fasilitas di sekitarnya.

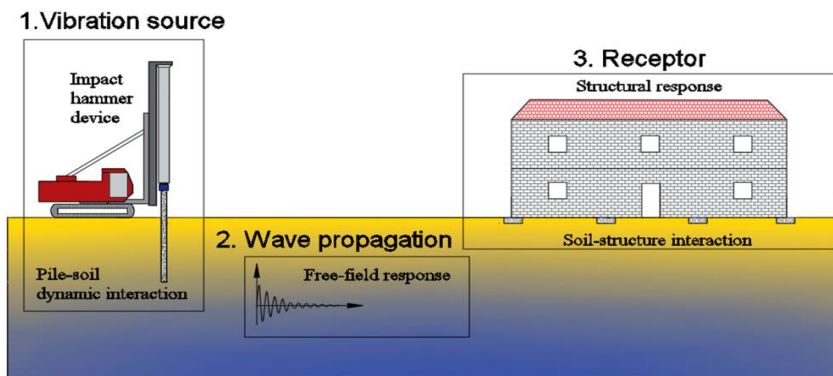
*Corresponding author. Teguh Joko Pamuji
Email address: teguhjokopamuji@gmail.com

Sejumlah kecil studi telah menyelidiki kerusakan struktur akibat penurunan (*settlement*) yang disebabkan oleh pemancangan tiang atau operasi konstruksi lainnya. Sebagai contoh, Lacy dan Gould (1985) mendeskripsikan kerusakan akibat penurunan dari pemancangan tiang pancang baja (H-piles) di dekat sebuah bangunan, di mana akumulasi penurunan mencapai 61 mm sementara kecepatan partikel maksimum yang terukur pada bangunan tersebut hanya 2,5 mm/detik. Penurunan yang merusak akibat pemadatan vibrasi (*shakedown*) pada pasir lepas dapat terjadi ketika amplitudo regangan geser melebihi ambang batas yang diterima secara umum sebesar 0,01% (Mohamad dan Dobry 1987), meskipun getaran pada struktur tidak melampaui ambang batas kerusakan langsung.

Studi kasus ini berfokus pada proyek pembangunan Gedung GIS Substation Data Center JKT 11 Microsoft. Lokasi proyek yang berada di area dengan keterbatasan spasial dan berdekatan langsung dengan infrastruktur eksisting menuntut pendekatan mitigasi getaran yang cermat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mendokumentasikan strategi pengendalian efek getaran yang diterapkan selama pelaksanaan *driving* pondasi *spun pile* di lokasi tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

PPV (Peak Particle Velocity) adalah nilai kecepatan sesaat maksimum dari pergerakan partikel tanah atau struktur bangunan akibat getaran biasanya diukur dalam milimeter per detik (mm/s).



Gambar 1.
Skema Representatif dari Vibration (Colaço et al, 2022)

Nilai PPV minimum yang diperbolehkan untuk project ini adalah ± 20mm/s, bisa dilihat di Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1.
Allowable PPV Value for Each Type of Structure

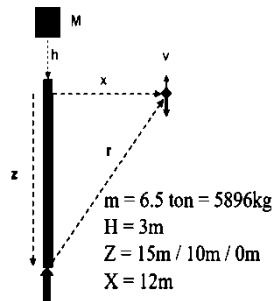
No	Sensitivity degree	Structure	AASHTO (1990)	Swiss Standard SN640312 (SNV 1992)	British Standard BS 7385-2 (BSI 1993)	Eurocode 3 (CEN 1993)	FHWA Dynamic Compaction (Lukas 1995)	German Standard DIN 4150-3 (DIN 1999)	Minimum	Maximum
1	Highly	Historic-museum Hospital-library Nuclear-marine	2.54 (0.1)*	7.62 (0.3)	-	4 (0.15)	-	3 (0.1)	2.54 (0.1)	7.62 (0.3)
2	Upper-intermediate	Hotel/motel Residential building Church/mosque/synagogue	5.08-12.7 (0.2-0.5)	12.7-17.78 (0.5-0.7)	15-20 (0.6-0.8)	10 (0.4)	-	5 (0.2)	5 (0.2)	20 (0.8)
3	Intermediate	Commercial/industrial Underground tunnel Bridge-factory	25.4-38.1 (1-1.5)	17.78-30.48 (0.7-1.2)	50 (2)	20-30 (0.8-1.2)	-	20 (0.8)	20 (0.8)	50 (2)
4	Less	Gas/oil pipeline Waterpipe Electricity cable Telecommunication cable	-	-	-	40 (1.6)	76 (3)	-	-	76 (3)

*Units are mm/s (in/s)

Menurut Massarsch (2015), secara empiris nilai PPV didapat dari rumus berikut ini:

$$PPV = k\sqrt{\frac{mgh}{z^2 + x^2}} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan rumus diatas, maka kita bisa menghitung PPV pada saat memulai pemancangan sebagai berikut:



- $k : 0.75$
- $m : 6500 \text{ kg}$
- $g : 9.8$
- $h : 3 \text{ m}$
- $z : 0 \text{ m}$
- $r : 0 \text{ m}$

empiric fator 0.25 ~ 1.5, recommend use 0.75
 berat Hammer (dalam unit short ton)
 gravitasi
 tinggi jatuh Hammer
 kedalaman pile
 Jarak titik vibrasi ke alat ukur/bangunan terdekat

$$PPV = 0.75\sqrt{\frac{5896 \times 9.8 \times 3}{0^2 + 12^2}} = 26 \text{ mm/s}$$

Melebihi *allowable PPV = 20mm/s*

Jika menggunakan *Pre-Boring* 10m, analisa PPV sebagai berikut:

$$PPV = 0.75\sqrt{\frac{5896 \times 9.8 \times 3}{10^2 + 12^2}} = 20 \text{ mm/s}$$

Memenuhi *allowable PPV = 20mm/s*

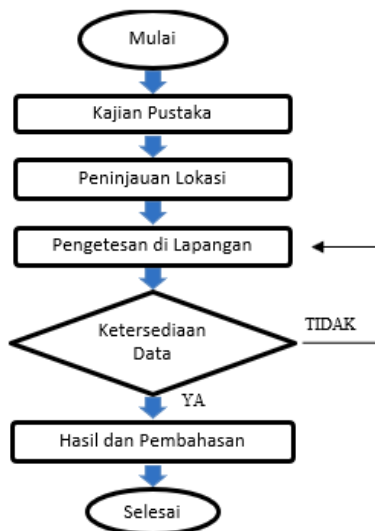
Jika end bearing/final set panjang pile 15m, maka analisa PPv sebagai berikut:

$$PPV = 0.75\sqrt{\frac{5896 \times 9.8 \times 3}{15^2 + 12^2}} = 16 \text{ mm/s}$$

Memenuhi *allowable PPV = 20mm/s*

3. METODA PELAKSANAAN

Tahapan dari penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut:



Gambar 2.
 Diagram Alir Penelitian (Sumber: Penulis, 2025)

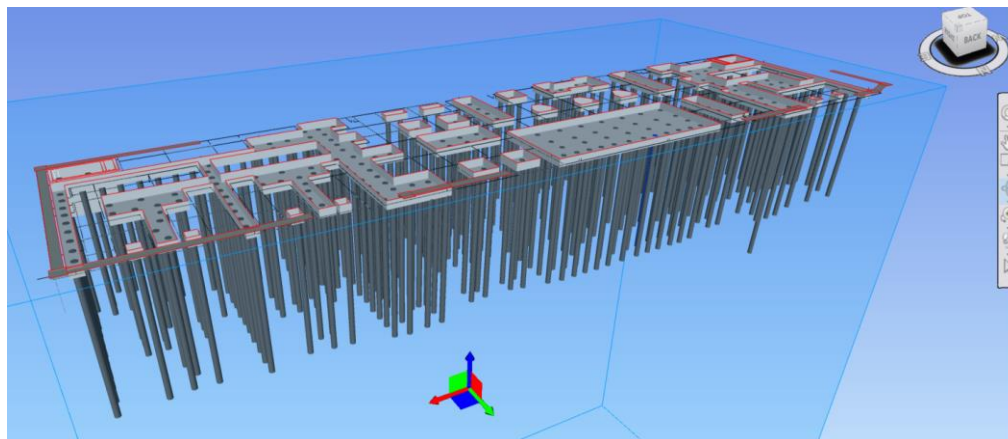
3.1 Lokasi Pelaksanaan Penelitian

Lokasi dari penelitian ini adalah Proyek Gedung GIS Substation JKT11 Data Center Microsoft Cikarang, Bekasi, Jawa Barat.



Gambar 3.

Peta Lokasi Penelitian (Sumber: Google Maps, 2025)



Gambar 4.

Spun Pile Model at BIM (Sumber: Penulis, 2025)

3.2 Gambaran Perusahaan

GIS Substation JKT11 Microsoft merupakan bagian tidak terpisahkan dari fasilitas Data Center milik Microsoft, yang mana *GIS Substation* ini menyuplai kebutuhan kelistrikan dari Data Center system. Siemens Energy Indonesia sebagai *Main Contractor* menaungi beberapa *subcontractor* seperti PT Indonesia Pondasi Raya (Indopora) untuk pekerjaan *Piling* dan Shimizu Total Join Operation (*STJO*) untuk pekerjaan *Civil*, *Structure* dan *Architecture*. Dalam Analisa *Vibration* ini Siemens Energy Indonesia bekerjasama dengan Geochem Survey sebagai *Geotechnical Consultant*.

3.3 Metode Pelaksanaan Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah deskriptif kualitatif dengan melakukan kajian pustaka dan pengumpulan data dengan meninjau langsung saat *Vibration Test*. Informasi disajikan dari pengumpulan data hasil tes dan dokumentasi dari kegiatan pengetesan.

Analisis mencakup evaluasi metode pemantauan getaran, penerapan teknik mitigasi (seperti *modifikasi* metode pelaksanaan *driving pile* dengan *pre-boring*), serta penilaian

kepatuhan terhadap standar keamanan getaran yang berlaku, demi memastikan pembangunan proyek vital ini berjalan lancar tanpa mengorbankan stabilitas lingkungan sekitarnya.

4. PEMBAHASAN DAN HASIL TEST

Pembahasan hasil *vibration test* saat *driving pile* dan hasilnya dijelaskan dibawah ini:

4.1 Data Pekerjaan Piling

Pekerjaan *Piling* ini dilakukan dengan menggunakan Spun Pile dengan spesifikasi sebagai berikut:

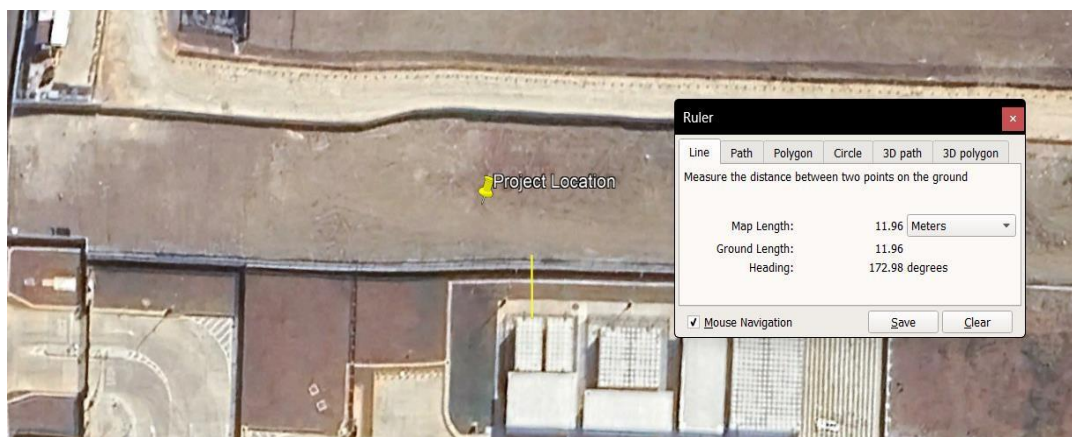
- Diameter Spun Pile : 600 mm
- Mutu Beton Spun Pile : $F_c' 70$ MPa
- Allowable axial load Spun Pile : 3142.2 kN When $M=0$ kNm
- Tension Load Spun Pile : 1729.9 kN
- Code Reference Spun Pile : *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 - 14), Recommendations for Design, Manufacture, & Installation of Concrete Piles (ACI 543R-12), Indonesia Concrete Code (SNI 2847 - 2019), PCI Design Handbook Manual*

Alat pancang yang digunakan untuk pemancangan dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Berat Hammer : 6.5 ton
- Tinggi jatuh Hammer : 3 m

4.2 Analisa Hasil Vibration Test

Analisis pekerjaan *Vibration Test* ini dilakukan karena adanya kekhawatiran dari pihak *owner* akan adanya dampak negatif dari getaran yang diakibatkan oleh proses piling yang menggunakan drop hammer (Driven Pile) yang berjarak terdekat 11.96 m dari fasilitas building Data Center terdekat. Penggunaan tipe drop hammer dilakukan karena efektivitas dan mobilitas alat pancang di area yang terbatas yang tidak memungkinkan penggunaan tipe alat pancang hidrolik.



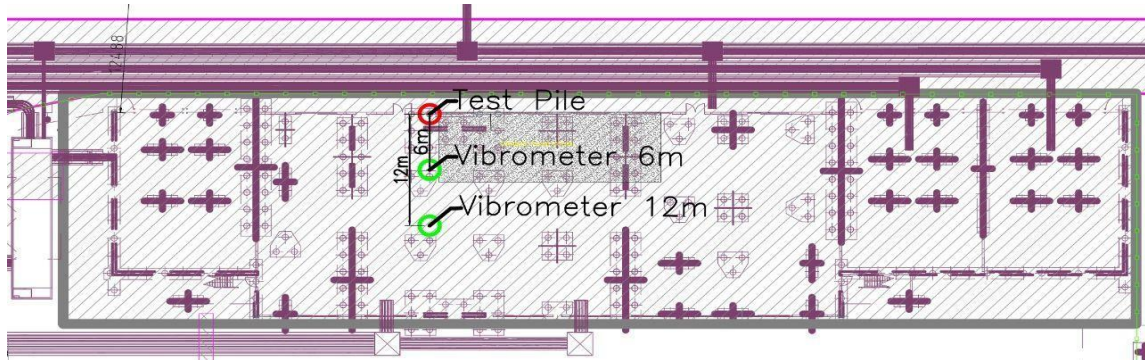
Gambar 5.

Jarak antara pile dengan fasilitas existing terdekat (Sumber: Google Maps, 2024)

4.2.1 Prosedur Vibration Test Saat Pemancangan

Pekerjaan pemancangan dilakukan pada tiang yang memiliki jarak terjauh dari bangunan dan lebih dekat ke lahan terbuka untuk menghindari risiko terhadap lingkungan

sekitar. Pengujian vibrometer dilakukan pada dua titik untuk menentukan bagaimana propagasi gelombang getaran terjadi: satu titik pada jarak 6 m dari tiang uji dan titik kedua pada jarak 12 m ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Vibrometer Location (Sumber: Penulis, 2025)

Vibrometer dan ilustrasi penggunaannya untuk merekam PPV aktual di lapangan ditunjukkan pada **Gambar 7**.



Gambar 7. Vibrometer (Sumber: Penulis, 2025)

Ilustrasi hasil pengukuran vibrometer ditunjukkan pada **Tabel 2**. Pengujian lapangan melibatkan pengukuran ketika tiang berada di permukaan, pada kedalaman 5 m, 10 m, 15 m, dan, jika memungkinkan, 23 m. Pada setiap kedalaman, dilakukan dua kali pembacaan, dengan setiap pembacaan direkam selama 10 pukulan. Kedalaman preboring dapat disesuaikan berdasarkan hasil pemantauan untuk mencapai PPV minimum yang diizinkan, yaitu ± 20 mm/s. Berdasarkan hasil pengukuran vibrometer, kedalaman preboring mungkin perlu diperpanjang jika terbukti bahwa 5 m tidak cukup.

Tabel 2.

Vibrometer Result

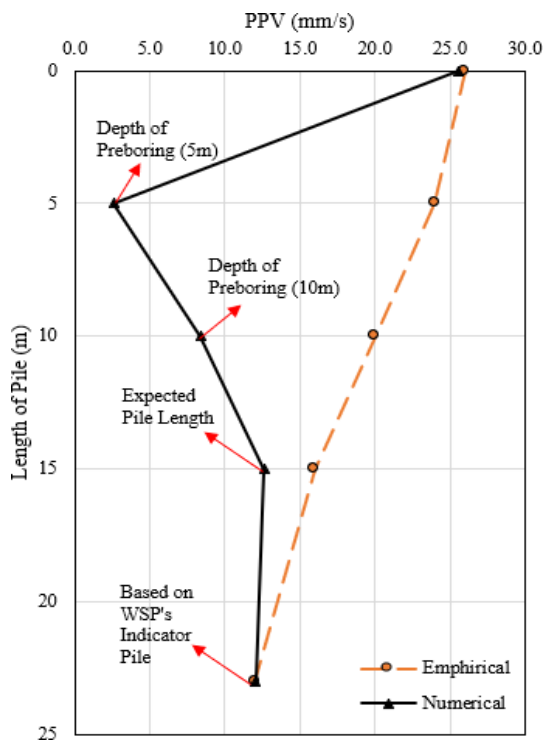
Pile Diameter (m)	Pile lenght (m)	PPV (mm/s)		Settlement (mm)
		Empirical	Numerical	
0.6	15			
	10			
	5			
	0			

4.2.2 *Vibration Test Result without Pre-Boring*

Hasil *Vibration test* tanpa *Pre-Boring* bisa dilihat di **Tabel 3** dan **Gambar 8** dibawah ini:

Tabel 3.*Vibrometer Result without Pre-Boring*

Pile Diameter (m)	Pile length (m)	PPV (mm/s)		Settlement (mm)
		Empirical	Numerical	
0.6	23	12.00	12.07	0.42
	15	16.00	12.60	0.19
	10	20.00	8.40	0.15
	5	24.00	2.60	0.10
	0	26.00	25.60	0.60
2 Driving Piles (0.6)	15	-	19.32	0.40



Gambar 8. *Vibrometer Result vs Pile Length*
(Sumber: Final Report for Vibration Study, 2024)

Resume hasil *vibration test* tanpa Pre-Boring:

1. Berdasarkan **Tabel 3**, dampak pemancangan tiang pada permukaan tanah melebihi nilai PPV yang diizinkan.
2. Getaran tanah dapat dikurangi dengan menurunkan kekakuan tanah (impedansi), yang dapat dicapai dengan metode preboring (Grizi et al. (2016) and Heung et al. (2007) dan atau dengan mengurangi tinggi jatuh *Hammer* (MS Langley, 1985)
3. Ditunjukkan bahwa PPV maksimum pada saat dua tiang dipancang secara bersamaan yaitu sebesar 19,3 mm/s, yang masih memenuhi PPV yang diizinkan dan dibatasi hingga 6 m. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerusakan pada bangunan di sekitarnya.
4. Melakukan pengukuran getaran untuk menentukan propagasi PPV akibat aktivitas pemancangan di lokasi.
5. Berdasarkan hasil pengukuran getaran, kedalaman preboring mungkin perlu diperpanjang jika terbukti bahwa 10 m tidak mencukupi.

4.2.3 Metoda Pelaksanaan *Vibration Test with Pre-Boring*

Vibration test dilakukan beberapa kali sampai data menunjukkan adanya propagasi PPV ± 20 mm/s. Untuk mencapai PPV ± 20 mm/s dilakukan dengan skema:

1. Melakukan beberapa titik preboring dengan kedalaman 10 m dengan tinggi jatuh *hammer* 3 m dan berat *hammer* 6,5 ton.
2. Beberapa titik pemancangan dengan *Pre-Boring* di poin 1 dilakukan di lokasi yang menyebar dan jauh dari building terdekat.
3. Jika dalam 5 kali tes PPV ± 20 mm/s tidak tercapai, maka sumber energi getaran yang harus dikurangi (tinggi jatuh *hammer* dikurangi).

4.2.4 *Vibration Test Result with Pre-Boring*

Pengerjaan *Vibration Test* dengan *Pre-Boring* dilakukan di lokasi yang terjauh dari bangunan terdekat sampai ditemukan hasil ± 20 mm/s. Hasil pengukuran *vibrometer* ditunjukkan pada Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8.

- *Vibration Test Result #1*

Date: **19 October 2024**

Pile No.: **51**

Distance Test to Pile (m): **6**

Weight of Hammer (ton): **6.5**

Height of fall Hammer (m): **3**

Pre-Boring Depth (m): **10**

Tabel 4.

PPV Result Summary of Pile No. 51

Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	8.611	6.200	8.022	0.139	0.201	0.160
	Until 5m	9.474	8.716	10.570	0.219	0.311	0.182
5-10	First 10 blow	8.397	5.752	8.956	0.165	0.220	0.118
	Until 10m	32.665	12.830	37.957	0.607	0.411	0.437
10-15	First 10 blow	57.580	16.850	50.373	1.119	0.684	0.580
	Until 15m	58.157	24.389	60.333	1.104	0.658	0.802

- *Vibration Test Result #2*

Date: **23 October 2024**

Distance Test to Pile (m): **6**

Tabel 5.

PPV Result Summary of Pile No. 191

Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	8.611	6.200	8.022	0.139	0.201	0.160
	Until 5m	9.474	8.716	10.570	0.219	0.311	0.182
5-10	First 10 blow	8.397	5.752	8.956	0.165	0.220	0.118
	Until 10m	32.665	12.830	37.957	0.607	0.411	0.437
10-15	First 10 blow	57.580	16.850	50.373	1.119	0.684	0.580
	Until 15m	58.157	24.389	60.333	1.104	0.658	0.802

- *Vibration Test Result #3*

Date: **23 October 2024**

Distance Test to Pile (m): **12**

Tabel 6.*PPV Result Summary of Pile No. 12*

Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	0.921	1.221	2.133	0.020	0.020	0.018
	Until 5m	1.964	1.954	3.167	0.027	0.025	0.030
5-10	First 10 blow	1.919	1.224	2.254	0.030	0.018	0.022
	Until 10m	11.004	4.415	7.307	0.169	0.073	0.077
10-15	First 10 blow	31.269	10.796	16.015	0.667	0.145	0.197
	Until start of the Final Set	58.946	11.172	18.335	1.087	0.273	0.241
	Final Set	59.131	11.506	17.529	1.190	0.283	0.243

- *Vibration Test Result #4*

*Date: 24 October 2024**Distance Test to Pile (m): 18***Tabel 7.***PPV Result Summary of Pile No. 47*

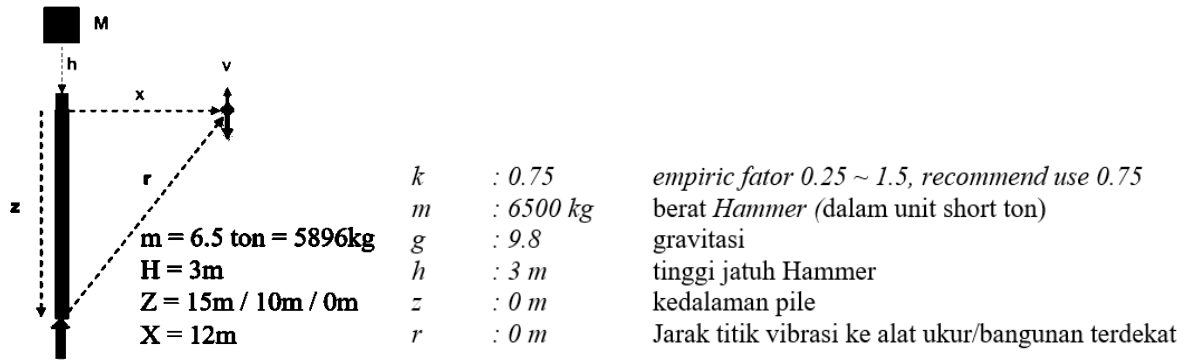
Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	1.839	1.979	2.335	0.014	0.018	0.019
	Until 5m	2.598	2.799	4.074	0.026	0.028	0.032
5-10	First 10 blow	2.444	2.483	4.431	0.023	0.026	0.045
	Until 10m	7.826	3.593	9.096	0.099	0.039	0.092
10-15	First 10 blow	9.918	3.933	11.592	0.153	0.068	0.137
	Until 15m	12.498	3.933	11.920	0.183	0.074	0.134
15-17	First 10 blow	12.555	3.043	9.437	0.181	0.068	0.102
	Until start of the Final Set	17.968	3.810	10.469	0.274	0.126	0.130
	Final Set	17.665	3.646	8.89	0.266	0.105	0.123

- *Vibration Test Result #5*

*Date: 24 October 2024**Distance Test to Pile (m): 15***Tabel 8.***PPV Result Summary of Pile No. 48*

Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	0.234	0.237	0.329	0.003	0.003	0.003
	Until 5m	0.726	0.657	1.197	0.010	0.008	0.010
5-10	First 10 blow	1.728	1.049	2.074	0.026	0.014	0.020
	Until 10m	4.968	2.598	4.853	0.082	0.040	0.051
10-15	First 10 blow	14.913	6.472	9.884	0.240	0.106	0.108
	Until 15m	21.381	7.196	9.896	0.379	0.113	0.113
15-17	First 10 blow	21.463	5.758	8.695	0.384	0.111	0.109
	Until start of the Final Set	23.889	6.064	8.938	0.439	0.128	0.126
	Final Set	23.034	5.683	8.229	0.394	0.108	0.115

Dengan menggunakan persamaan empiris, faktor empiris (k, x) akan dikorelasikan dengan hasil pemantauan getaran dari panjang tiang > 10 m. Hasil korelasi empiris ditunjukkan pada Tabel 9 dan Gambar 9.



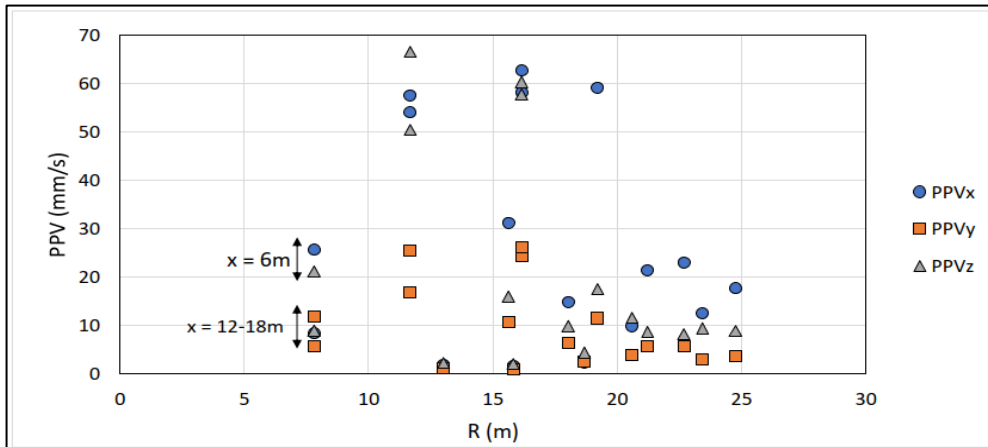
$$PPV = k \left(\frac{\sqrt{W}}{R} \right)^x = k \left(\frac{\sqrt{mgh}}{Z^2 + X^2} \right)^x \dots\dots\dots (2)$$

x: jarak horizontal titik vibrasi ke lat ukur/bangunan terdekat
 W: impact energy transferred from the hammer to the pile

Tabel 9.

Distance from Vibration Source to Observation Point on the Ground Surface (r)

Pile No	Pile Length (Z,m)	X (m)	R (m)
Pile 51	5	6	7.81
Pile 191	5	6	7.81
Pile 189	5	12	13.00
Pile 48	5	15	15.81
Pile 47	5	18	18.68
Pile 51	10	6	11.66
Pile 191	10	6	11.66
Pile 189	10	12	15.62
Pile 48	10	15	18.03
Pile 47	10	18	20.59
Pile 51	15	6	16.16
Pile 191	15	6	16.16
Pile 189	15	12	19.21
Pile 48	15	15	21.21
Pile 47	15	18	23.43
Pile 48	17	15	22.67
Pile 47	17	18	24.76
Pile 51	5	6	7.81
Pile 191	5	6	7.81
Pile 189	5	12	13.00



Gambar 9. *PPV Summary*
(Sumber: Final Report for Vibration Study, 2024)

Tabel 9 dan Gambar 8 menunjukkan nilai $R > 10$ dari sumber getaran ke permukaan tanah, sedangkan nilai k dan x aktual di lapangan ada di Tabel 10.

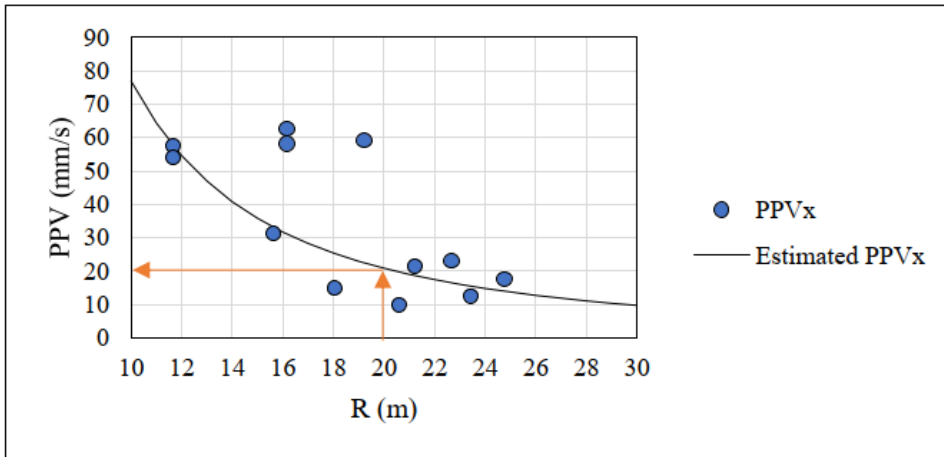
Tabel 10.
Empirical Factor on Actual Condition

Empirical Factor	
Kx	0.062
Xx	1.880
Ky	0.003
Xy	2.460
Kz	0.002
Xz	2.820

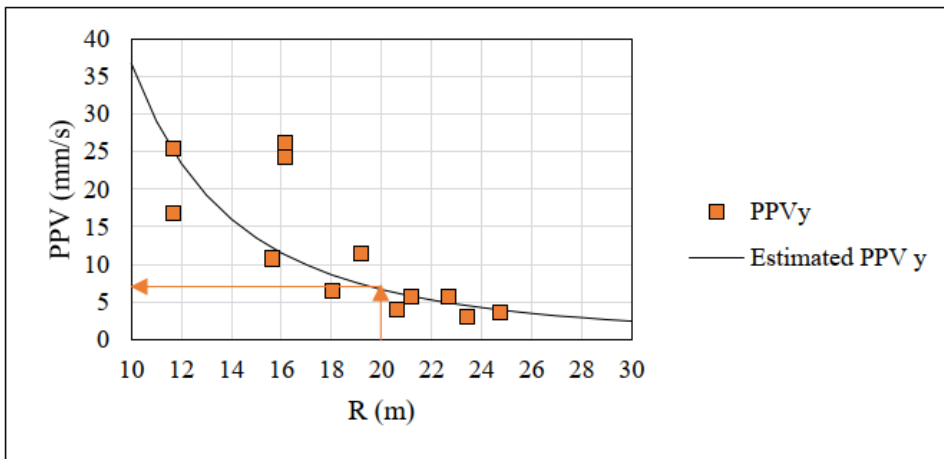
Dengan rumus yang sama dan mengisi faktor m (Hammer mas): 6.5 ton dan tinggi jatuh Hammer: 3 m, lokasi safety di mana $PPV \pm 20$ mm/s ada di $r = 20$ m atau $x = 14$ m dari gedung terdekat, hal ini tersaji dalam Tabel 11.

Tabel 11.
PPV Curve Fitting Method (Actual Condition)

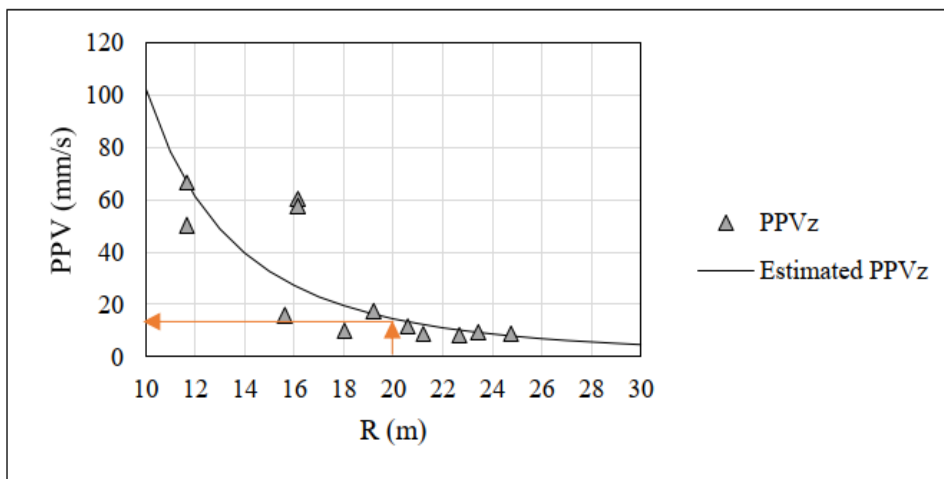
R (m)	PPVx (mm/s)	PPVy (mm/s)	PPVz (mm/s)
10	76.92	36.73	102.70
11	64.28	29.04	78.46
12	54.56	23.44	61.37
13	46.93	19.24	48.95
14	40.81	16.03	39.70
15	35.84	13.52	32.67
16	31.74	11.54	27.23
17	28.32	9.94	22.94
18	25.43	8.63	19.52
19	22.96	7.55	16.76
20	20.85	6.66	14.50
21	19.02	5.90	12.63
22	17.42	5.26	11.08
23	16.02	4.72	9.77
24	14.79	4.25	8.66
25	13.70	3.84	7.72
26	12.72	3.49	6.91
27	11.85	3.18	6.21
28	11.06	2.91	5.60
29	10.36	2.67	5.08
30	9.72	2.45	4.61



Gambar 10 *Estimated PPVx on Actual Condition*



Gambar 11 *Estimated PPVy on Actual Condition*



Gambar 12 *Estimated PPVz on Actual Condition*

Mengingat building terdekat dengan piling work x: $12\text{ m} < 14\text{ m}$, maka menurut MS Langley (1985), solusinya adalah dengan mengurangi besaran energi yang dihasilkan (W) dengan cara mengurangi tinggi jatuh *hammer* (h), dalam hal ini dari 3 m menjadi 1.7 m sehingga $\text{max PPV} \pm 20\text{ mm/s}$ didapat di $R: 15\text{ m}$ atau $x: 12\text{ m}$ sesuai dengan **Tabel 12**.

Tabel 12.*PPV Curve Fitting Method (Actual Condition)*

R (m)	PPVx (mm/s)	PPVy (mm/s)	PPVz (mm/s)
10.00	45.05	18.24	46.05
11.00	37.65	14.42	35.18
12.00	31.96	11.64	27.51
13.00	27.49	9.56	21.95
14.00	23.91	7.96	17.80
15.00	20.99	6.72	14.65
16.00	18.59	5.73	12.21
17.00	16.59	4.94	10.29
18.00	14.89	4.29	8.75
19.00	13.45	3.75	7.51
20.00	12.21	3.31	6.50
21.00	11.14	2.93	5.66
22.00	10.21	2.61	4.97
23.00	9.39	2.34	4.38
24.00	8.66	2.11	3.88
25.00	8.02	1.91	3.46
26.00	7.45	1.73	3.10
27.00	6.94	1.58	2.78
28.00	6.48	1.44	2.51
29.00	6.07	1.32	2.28
30.00	5.69	1.22	2.07

*R=15m (distance to nearest building = 12m, with depth of preboring = 10m)

Setelah dilakukan penyesuaian tinggi jatuh *hammer* menjadi 1.7 m, dilakukan *re-test* untuk melihat *actual* PPV di *Vibration Test* #6. Hasil *re-test* aktual PPV ditunjukkan pada Tabel 13.

- Vibration Test Result* #6

Date: 31 October 2024

Pile No.: 114

Distance Test to Pile (m): 12

Weight of Hammer (ton): 6.5

Height of fall Hammer (m): 1.7

Pre-Boring Depth (m): 10

Tabel 13.*PPV Result Summary of Pile No. 114*

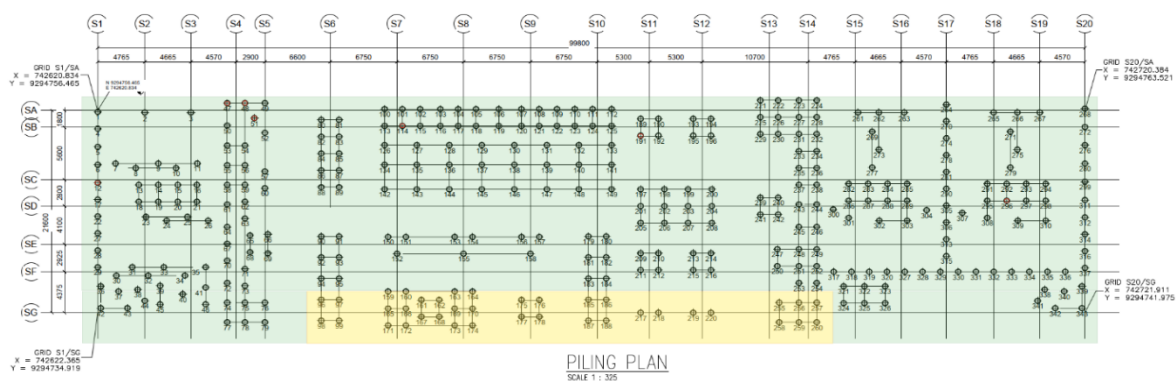
Pile Length (m)	Blow	PPV (mm/sec)			PPA (g)		
		x	y	z	x	y	Z
0-5	First 10 blow	3.254	1.882	3.311	0.035	0.030	0.043
	Until 5m	3.164	3.296	3.443	0.052	0.091	0.055
5-10	First 10 blow	2.653	1.644	4.358	0.033	0.019	0.035
	Until 10m	7.755	4.763	11.272	0.080	0.061	0.095
10-15	First 10 blow	12.574	6.143	14.726	0.110	0.078	0.131
	Until 15m	20.728	10.040	21.061	0.289	0.127	0.234
15-17	First 10 blow	21.472	8.814	19.573	0.309	0.115	0.236
	Until 17m	21.667	8.509	19.537	0.339	0.111	0.240
Dolly	First 10 blow	21.173	6.640	18.377	0.407	0.089	0.242
	Until start of the Final Set	19.927	6.781	17.514	0.379	0.084	0.230
	Final Set	21.552	7.391	17.411	0.371	0.084	0.225

Berdasarkan hasil pemantauan getaran yang diuji ulang pada Tiang Pancang No. 296, PPV maksimum yang terjadi adalah 21,667 mm/s yang sangat dekat dengan PPV yang diizinkan sebesar 20 mm/s ($PPV = 21,667 \text{ mm/s} \approx PPV \text{ yang diizinkan} = 20 \text{ mm/s}$). Oleh karena itu, aman untuk melakukan pekerjaan pemancangan dalam jarak 12 m dari bangunan terdekat dengan ketinggian jatuhnya *hammer* 1,7 m.

Berdasarkan hasil *Vibration Test* #1–#5 yang dilakukan dengan *Pre-Boring* 10 m dan tinggi jatuh *hammer* 3 m, diketahui bahwa PPV memenuhi $\pm 20 \text{ mm/s}$ pada jarak (x) 14 m ke bangunan terdekat, sehingga dibutuhkan untuk mengurangi energi yang ada dengan cara mengurangi tinggi jatuh *hammer* menjadi 1,7 m.

Pada *Vibration test* #6, terkonfirmasi bahwa penggunaan *Pre-Boring* 10 m dan pengurangan energi dengan menurunkan tinggi jatuh *hammer* menjadi 1,7 m berhasil membuat maksimum PPV yang terjadi menjadi $\pm 21,66 \text{ mm} \approx PPV \text{ mendekati batas yang diizinkan} = 20 \text{ mm/s}$.

Berikut adalah zonasi pemancangan dari evaluasi actual vibration test di Gambar 12.



Gambar 13.

Metoda Pemancangan hasil evaluasi *Vibration Test*

Zona Biru: *Pre-Boring* 10m, Berat *Hammer* 6.5ton, Tinggi jatuh *hammer*: 3 m

Zona kuning: *Pre-Boring* 10m, Berat *Hammer* 6.5ton, Tinggi jatuh *hammer*: 1.7 m

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan rangkaian pengujian getaran (*vibration test*) yang dilakukan pada pekerjaan pemancangan tiang spun pile di proyek Gedung GIS Substation JKT11 Data Center Microsoft, diperoleh kesimpulan bahwa penerapan strategi mitigasi getaran yang dilakukan sudah berhasil mengendalikan risiko dari pekerjaan pemancangan yang dilakukan.

Secara keseluruhan, penerapan strategi mitigasi getaran yang tepat memungkinkan pelaksanaan pekerjaan fondasi pada area terbatas tanpa mengganggu atau merusak fasilitas sekitar.

Saran yang bisa dilakukan jika melakukan pemantauan *Vibration* saat pemancangan adalah:

1. Pengujian getaran tanpa *pre-boring* sebaiknya selalu dilakukan di awal pada lokasi terjauh dari bangunan atau fasilitas sensitif untuk memperoleh nilai dasar (*baseline*) PPV di lapangan. Hal ini penting agar tim proyek dapat memahami karakteristik getaran aktual sebelum dilakukan tindakan mitigasi.
2. Jika pengujian awal menunjukkan nilai PPV melebihi ambang batas, maka *pre-*

boring wajib diterapkan, terutama di area yang berdekatan dengan gedung eksisting. Kedalaman *pre-boring* dapat disesuaikan berdasarkan hasil pemantauan lapangan, dan tidak harus terpaku pada satu nilai kedalaman.

3. Apabila penggunaan *pre-boring* belum cukup menurunkan PPV, maka energi pemancangan perlu dikendalikan dengan menurunkan tinggi jatuhan *hammer*. Penyesuaian ini sebaiknya ditetapkan melalui beberapa kali pengujian bertahap untuk menemukan parameter energi yang aman dan efisien.
4. Penentuan zona aman pemancangan perlu ditetapkan sebelum pekerjaan dimulai. Zonasi tersebut harus mempertimbangkan:
 - Jarak ke bangunan terdekat,
 - Nilai PPV aktual,
 - Parameter *hammer* (berat dan tinggi jatuhan),
 - Hasil evaluasi kondisi tanah dan propagasi getaran.
5. Pemantauan getaran harus dilakukan secara kontinu, terutama ketika kondisi lapangan berubah (perubahan elevasi, jenis tanah, panjang tiang, atau metode kerja). Dengan pemantauan terus-menerus, potensi risiko dapat segera diidentifikasi dan diantisipasi.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Massarsch (2015). Engineering Assessment of Ground Vibrations Caused by Impact Pile Driving .*Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, 46 (2), 54-63
2. Lacy, H.S. and Gould, J.P. (1985). Settlement from Pile Driving in Sands, *Proceedings of a Symposium sponsored by the Geotechnical Engineering Division in conjunction with the ASCE Convention in Detroit*. pp. 152 173.
3. Aires Colaço, Miguel Antas Ferreira, Pedro Alves Costa (2022) Empirical, Experimental and Numerical Prediction of Ground-borne Vibrations Induced by Impact Pile Driving, *MDPI*, 5(1), 80-95.
4. M.S. Langley (1985). Vibrations from Piling - Methods of Assessment and Case Studies, *Proceedings of Institute of Acoustics Vol 7 Part 1*.
5. Grizi, A., Athanasopoulos-Zekkos, A., Woods, R.D., (2016). Ground Vibration Measurements near Impact Pile Driving. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 142(8)
6. Heung, W., Morgan, K., Yoon, Y.H., Gobin, R., Gollamudi, S., (2007). Vibration due to Driving Concrete Piles Using Open-Ended Diesel Hammer in Central and South Florida, *7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics: Field Measurements in Geomechanics, ASCE*.