

EVALUASI DAMPAK GETARAN TANAH AKIBAT PEKERJAAN FONDASI TIANG BOR TERHADAP BANGUNAN CAGAR BUDAYA

Vienti Hadsari^{1*} dan Sumiyati Gunawan¹

¹Departemen Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No. 44, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

*vienti.hadsari@uajy.ac.id

Masuk: 27-05-2025, revisi: 17-06-2025, diterima untuk diterbitkan: 30-06-2025

ABSTRACT

Bored pile penetration in construction projects in densely populated areas needs to be considered because it has the potential to cause vibrations that can be transmitted to surrounding buildings. The intensity of the vibration decreases with increasing distance from the vibration source. Mitigation of the risk of structural failure is assessed using vibration intensity, commonly called Peak Particle Velocity (PPV). The PPV value must not exceed the value set by the Indonesian National Standard (SNI), hoping not to damage surrounding buildings. This study analyzes the PPV value due to bored pile penetration in a 7-story building project in Yogyakarta, against the nearest cultural heritage building, empirically. The PPV value is compared to the limit value set by SNI 7571:2010 to determine the vibration influence zone and its mitigation. Deformation of the soil caused by vibrations during bored pile penetration is also calculated for a certain distance from the vibration source. The results of the study showed that ground vibrations due to bored pile foundation work that is safe according to SNI are at a minimum distance of 44.70 meters from the vibration center if using a bored pile rotary speed of 8 rpm/minute, and a minimum distance of 95 meters from the vibration center if using a bored pile rotary speed of 36 rpm/minute. Within this distance, the capacity of the drilling machine used is too large for this project because it produces a PPV greater than the standard set by SNI and can damage nearby cultural heritage. The analysis shows that ground deformation caused by vibrations does not significantly impact surrounding structures.

Keywords: bored-pile; ground vibration; peak-particle-velocity; mitigation

ABSTRAK

Penetrasi tiang bor pada proyek konstruksi di daerah padat penduduk perlu menjadi perhatian karena berpotensi menimbulkan getaran yang dapat ditransmisikan pada bangunan di sekitarnya. Intensitas getaran tersebut semakin berkurang seiring bertambahnya jarak dari sumber getaran. Mitigasi resiko kegagalan struktur, dinilai dengan menggunakan intensitas getaran, biasa disebut *Peak Particle Velocity* (PPV). Nilai PPV tersebut tidak boleh melebihi nilai yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI), dengan harapan tidak merusak bangunan di sekitarnya. Penelitian ini menganalisis nilai PPV akibat penetrasi tiang bor pada proyek gedung 7-lantai di Yogyakarta, terhadap bangunan cagar budaya terdekat, secara empiris. Nilai PPV tersebut dibandingkan terhadap batas nilai yang ditetapkan oleh SNI 7571:2010 untuk menentukan zona pengaruh getaran dan mitigasinya. Deformasi pada tanah yang diakibatkan oleh getaran saat penetrasi tiang bor juga dihitung untuk jarak tertentu dari sumber getaran. Hasil penelitian menunjukkan getaran tanah akibat pekerjaan pondasi tiang bor yang aman menurut SNI berada pada jarak minimum 44,70 meter dari pusat getaran jika menggunakan kecepatan rotasi tiang bor 8 rpm/menit, dan jarak minimum 95 meter dari pusat getaran jika menggunakan kecepatan rotasi tiang bor 36 rpm/menit. Dalam jarak tersebut, kapasitas mesin bor yang digunakan terlalu besar untuk proyek ini karena menghasilkan PPV yang lebih besar dari standar yang ditetapkan oleh SNI, dan dapat merusak cagar budaya terdekat. Analisis deformasi yang ditimbulkan karena getaran tersebut menunjukkan bahwa deformasi tanah tidak berdampak signifikan untuk struktur di sekitarnya.

Kata Kunci: pengeboran; getaran-tanah; *peak-particle-velocity*; mitigasi

1. PENDAHULUAN

Proses konstruksi yang dilaksanakan di tengah kawasan padat penduduk mulai marak dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini dikarenakan adanya keterbatasan lahan di kota besar yang menyebabkan pembangunan harus dilakukan dengan memanfaatkan lahan yang ada di tengah pemukiman, melalui pembangunan konstruksi baru maupun renovasi konstruksi lama. Kondisi ini menimbulkan tantangan utama bagi pelaksana di lapangan maupun pemilik usaha

konstruksi, untuk memastikan proses konstruksi yang akan berlangsung tidak menimbulkan dampak negatif pada bangunan eksisting di sekitarnya. Terlebih lagi, jika aktivitas konstruksi tersebut dibangun pada lokasi yang dekat dengan bangunan cagar budaya, bangunan, maupun infrastruktur yang sensitif terhadap gangguan eksternal.

Getaran dan efek getaran dibedakan menjadi tiga (Bachmann, 1995): getaran yang sifatnya kontinyu (getaran yang berlangsung lama selama periode tertentu), impulsif (getaran besar yang berdurasi pendek dan disertai dengan efek redaman yang semakin melemah), dan getaran berselang (getaran impulsif yang berulang). Getaran pada tanah dan bangunan yang timbul sebagai akibat dari aktivitas industri, beban lalu lintas, maupun kegiatan konstruksi seperti pekerjaan tanah (*earthworks*), pekerjaan pondasi (tiang pancang maupun *bored-pile*), maupun pemadatan tanah di lapangan dapat digolongkan ke dalam getaran berselang (Bachmann, 1995). Getaran yang dihasilkan dari energi alat pemadatan, misalnya, akan merambat dengan cepat pada permukaan *subgrade* tanah, dari pusat getaran menuju bangunan di sekitarnya. Intensitas getaran yang dirasakan oleh bangunan disekitar sumber getaran dipengaruhi oleh frekuensi getaran tersebut, durasi getaran, dan jarak dari sumber getaran ke bangunan di sekitarnya. Semakin jauh jarak dari pusat getaran ke bangunan di sekitarnya, semakin kecil pula intensitas getarannya. Properti tanah seperti nilai redaman (*damping*) dan geometri redamannya berpengaruh pada seberapa besar intensitas getarannya (Amick & Gendreau, 2000; Kim & Lee, 2000). Praktek di lapangan, pengukuran terhadap intensitas getaran dilakukan dengan penempatan akselerometer di lapangan yang dilakukan pada jarak tertentu. Pengukuran tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai amplitudo getaran dan menentukan batas zona pengaruh getaran. Penentuan batas zona pengaruh getaran dapat dilakukan mengingat semakin jauh jarak dari sumber getaran, nilai intensitas getarannya akan semakin kecil. Walaupun pada zona yang terdekat dengan sumber getaran dapat terjadi kerusakan struktur, namun kerusakan tersebut dapat disebabkan oleh rambatan gelombang getaran itu sendiri (Woods, 1997) maupun deformasi tanah (Turkel, 2023).

Bored-pile sering dipilih sebagai metode instalasi pondasi pada daerah yang padat penduduk karena minimumnya getaran yang ditimbulkan. Metode ini merupakan kombinasi dari pengeboran (*rotary drilling*) dan penuangan beton ke dalam lubang bor tersebut (*grouting*). Namun, untuk kemungkinan penggunaan metode tersebut di lokasi yang padat penduduknya perlu dikaji lebih dalam, mengingat parameter operasional seperti : getaran mekanis pada *rotary-rigs* yang terlalu besar dan kesalahan pemilihan kecepatan putar (*rotary speed*), dapat mempengaruhi intensitas getaran yang dihasilkan. Selain itu, interaksi *drilling rigs* dengan kondisi tanah yang kompleks seperti kekakuan tanah yang tidak homogen, ditemukannya lapisan batuan pada lubang yang dibor, dan akumulasi *drilling slag* pada mata bor, dapat menghasilkan intensitas getaran yang bervariasi.

Penelitian ini menganalisis potensi dampak getaran yang ditimbulkan oleh penetrasi *bored-pile* pada proyek gedung 7-lantai di Yogyakarta yang berlokasi di daerah padat penduduk dan dekat dengan bangunan cagar budaya. Mitigasi terhadap dampak tersebut disajikan pada akhir laporan beserta dengan analisis potensi deformasi tanah yang terjadi, sebagai upaya mitigasi terhadap keamanan konstruksi di sekitarnya.

1. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak penetrasi *bored-pile* untuk bangunan eksisting di sekitarnya, termasuk dengan mitigasinya untuk meminimalisir kerusakan yang ditimbulkan. Penilaian terhadap dampak dan intensitas getaran dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran terhadap percepatan (*acceleration*), kecepatan (*velocity*), maupun perpindahan gelombang getaran (*displacement*) per satuan waktu (Kramer, 1996). Dari ketiganya, pengukuran berdasarkan *Peak Particle Velocity* (PPV) atau dikenal dengan kecepatan puncak partikel, adalah yang paling sering dipakai karena memiliki korelasi terhadap retak halus pada struktur (Dowding, 1996). Selain itu, PPV dapat digunakan sebagai indikator kerusakan mengingat bahwa tegangan dinamik dianggap proporsional terhadap kecepatan partikelnya (Athanasopoulos & Pelekis, 2000). Semakin tinggi nilai PPV, semakin tinggi pula nilai regangan tanahnya.

Peak particle velocity (PPV)

Pengukuran terhadap kecepatan partikel dilakukan untuk tiga komponen ortogonal *x, y* dan *z*. Dowding (Dowding, 1996) menyebut resultan ketiganya sebagai *Square Root of The Sum of Squares* (SRSS), yang dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$v_{\max(x,y,z)} = \sqrt{v_{x,\max}^2 + v_{y,\max}^2 + v_{z,\max}^2} \quad (1)$$

Setelahnya, Athanasopoulos dan Pelekis (Athanasopoulos & Pelekis, 2000) menyatakan bahwa nilai yang dihasilkan dari SRSS terlalu tinggi dari nilai getaran yang riil di lapangan mengingat besarnya intensitas getaran dipengaruhi oleh atenuasi pada tanah (*n*), input energi (*E* – Joule), dan besarnya getaran berangsur berkurang seiring dengan

bertambahnya jarak (D). Attewell dan Farmer (Attewell & Farmer, 1973) terlebih dahulu menjelaskan hubungan parameter tersebut sebagai Persamaan 2.

$$PPV = k \left[\frac{D}{\sqrt{E}} \right]^{-n} \quad (2)$$

Parameter k adalah konstanta tanah, yang pada penelitian ini, nilai yang dipakai adalah $k = 1.5$ dan $n = 1$ untuk tanah padat (Whyley & Sarsby, 1992). Attewell, Selby, and O'Donnell (1992) menggunakan data untuk mengembangkan regresi kuadratik seperti terlihat pada Persamaan 3.

$$\log(PPV) = -a + 1.38 \log \left(\frac{\sqrt{E}}{D} \right) = 0.234 \log^2 \left(\frac{\sqrt{E}}{D} \right) \quad (3)$$

Koefisien a adalah 0,519 (berdasarkan regresi linier), 0.296 (1,5 kali standar deviasi), maupun 0,073 (1x standar deviasi).

Batas getaran yang diperbolehkan untuk keamanan struktur

Penentuan jarak aman dari pengaruh getaran dilakukan terhadap nilai PPV yang direkomendasikan, untuk mitigasi terhadap potensi kerusakan struktur. Eurocode 3 menetapkan efek getaran terhadap nilai PPV yang dapat diterima oleh manusia, berdasarkan beberapa nilai periode konstruksi. Nilai PPV 2 mm/s ditetapkan aman untuk bangunan. Di sisi lain, *The United States Bureau of Mines (USBM)* menetapkan tingkat getaran untuk kerusakan struktur terjadi pada ambang batas PPV 5 hingga 50,8 mm/s. Standar Nasional Indonesia (SNI 7571:2010) menetapkan nilai PPV yang aman berdasarkan lima jenis bangunan, seperti terlihat pada Tabel 1. Selain peraturan tersebut, Kementerian Negara Lingkungan Hidup, melalui Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 tahun 1996, menetapkan nilai PPV yang aman berdasarkan empat jenis bangunan (Tabel 2).

Tabel 1. Nilai PPV berdasarkan kelas dan jenis bangunan (SNI 7571:2010)

Kelas	Jenis Bangunan	PPV (mm/detik)
1	Bangunan kuno yang dilindungi Undang-Undang Benda Cagar Budaya (Undang-undang No. 6 tahun 1992)	2
2	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen saja, termasuk bangunan dengan pondasi dari kayu dan lantainya diberi adukan semen.	3
3	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen diikat dengan slope beton.	5
4	Bangunan dengan pondasi pasangan bata dan adukan semen slop beton, kolom, dan rangka diikat dengan ring balk.	7-20
5	Bangunan dengan pondasi, pasangan bata dan adukan semen, slope beton, kolom dan diikat dengan rangka baja.	12-40

Tabel 2. Persyaratan PPV berdasarkan kelas dan jenis bangunan (Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 Tahun 1996)

Kelas	Jenis Bangunan	Kecepatan Getaran Maksimum (mm/detik)
1	Peruntukan dan bangunan kuno yang mempunyai nilai sejarah yang tinggi	2
2	Bangunan dengan kerusakan yang sudah ada, tampak keretakan-keretakan pada tembok	5
3	Bangunan untuk dalam kondisi teknis yang baik, ada kerusakan-kerusakan kecil seperti : plesteran yang retak	10
4	Bangunan "kuat" (misalnya: bangunan industri terbuat dari beton atau baja)	10-40

Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 2, untuk bangunan cagar budaya, nilai maksimum PPV yang disyaratkan adalah 2 mm/detik.

Deformasi pada tanah akibat getaran yang ditimbulkan dari proses penetrasi fondasi *tiang bor*

Deformasi pada tanah pasir, sebagai akibat dari getaran, nilainya lebih besar daripada deformasi di tanah lempung (Turkel, 2023). Dalam penelitian ini, deformasi tanah akibat penetrasi tiang bor dihitung berdasarkan Persamaan 4.

$$\ln Y = 2.27 + 1.19x_1 - 0.7x_1^2 + 0.49x_2 - 0.68x_2^2 - 0.8x_3 + 1.09x_3^2 - 0.46x_4 + 0.06x_4^2 + 0.45x_5 - 0.38x_5^2 - 0.19x_6 - 0.10x_7 \quad (4)$$

Persamaan 4 tersebut diperoleh dengan mempertimbangkan nilai PPV antara 2,0 mm/s hingga 18 mm/s, jumlah siklus getaran, tingkat tegangan deviatorik, tekanan pengekan, gradasi tanah, kepadatan relatif, dan kondisi kadar air (w) atau saturasi tanah. Y adalah *settlement* dan variabel x_i adalah faktor utama yang mempengaruhi penurunan tanah.

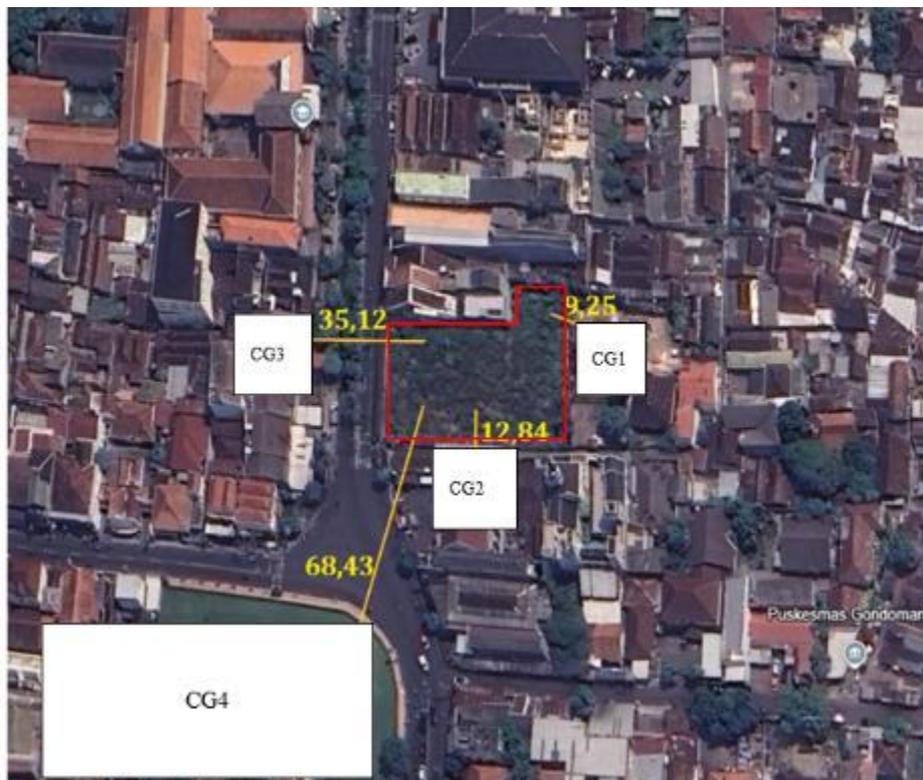
Deformasi pada tanah (penurunan) dihitung terhadap nilai penurunan yang diijinkan dalam SNI 8460:2017, seperti yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Klasifikasi tipikal kerusakan berdasarkan kemiringan dan penurunan bangunan maksimum (SNI 8460:2017)

Kategori Resiko	Kemiringan Bangunan Maksimum	Penurunan Bangunan Maksimum (mm)	Deskripsi Resiko
1	<1/500	<10	Diabaikan: kerusakan dangkal tidak mungkin terjadi
2	1/500 hingga 1/200	10 hingga 50	Kecil: kerusakan dangkal dapat terjadi namun bukan kerusakan struktural yang signifikan
3	1/200 hingga 1/50	50 hingga 75	Sedang: kerusakan dangkal dengan kerusakan struktural pada bangunan diperkirakan terjadi, kemungkinan kerusakan pipa relatif kaku
4	>1/50	>75	Tinggi: kerusakan struktural bangunan dan pipa kaku atau pipa lainnya

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kondisi tanah di lokasi studi



Gambar 1. Denah Lokasi (Sumber: Google earth)

Lokasi studi untuk penelitian ini berada di wilayah Yogyakarta (lokasi proyek ditandai dengan garis merah dalam Gambar 1) dengan kondisi tanah pada lokasi studi didominasi oleh tanah pasir. Menurut klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) berada diantara SW (pasir dengan gradasi baik) hingga SM (pasir berlanau). Berat

volume tanah basahnya berkisar antara 1.6 gr/cm³ hingga 1,73 gr/cm³, sedangkan nilai sudut geser dalamnya bervariasi antara 31,74° hingga 33,97° dengan nilai kohesi 0,14 kg/cm² hingga 0,24 kg/cm². Lapisan tanah keras, dengan N_{SPT} >50, berada pada kedalaman kurang lebih 14 meter. Ketinggian muka air tanah ditemukan pada kedalaman ± 9 meter. Bangunan gedung 7-lantai direncanakan dibangun di lokasi ini dengan menggunakan pondasi tiang yang dasar pondasinya terletak pada kedalaman 20 meter.

Tabel 4 memperlihatkan jarak dari pondasi terluar bangunan gedung 7-lantai menuju ke cagar budaya (CG) terdekat.

Tabel 4. Jarak dari titik pondasi terhadap bangunan sekitar

Titik	Jarak titik terluar pondasi terhadap bangunan - (m)
CG1	9,25
CG2	12,84
CG3	35,12
CG4	68,43

Spesifikasi alat berat fondasi tiang bor

Alat berat yang digunakan untuk pengeboran fondasi adalah menggunakan *hydraulic bored-pile* tipe CUMMINSB5.9-C, dengan spesifikasi teknis seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi alat pengeboran fondasi tiang bor

Deskripsi	Satuan	Parameter
Mesin		
<i>Rated power</i>	kW	133
<i>Rotary drive</i>		
<i>Maximum output torque</i>	kN.m	150
<i>Rotary speed</i>	rpm/menit	8-36
<i>Max. Drilling diameter</i>	mm	800
<i>Max. Drilling depth</i>	m	20
<i>Max. Extraction force</i>	kN	400
<i>Hydraulic system</i>		
<i>Working pressure</i>	MPa	32
<i>Machine</i>	t	48/43

Hasil analisis PPV terhadap jarak dari pusat getaran

Tabel 6 menyajikan analisis hubungan jarak terhadap PPV berdasarkan kecepatan rotasi minimum *bored-pile* (8 rpm/menit) dan rated power 30.000 Joule. Untuk kecepatan rotasi maksimum *bored-pile* (36 rpm/menit) dan rated power 133.000 Joule, dapat dilihat pada Tabel 7. Perhitungan PPV pada Tabel 6 dan Tabel 7 dianalisis berdasarkan Persamaan 2 dan Persamaan 3. Validasi Persamaan 2 dan Persamaan 3, dengan pengukuran aktual di lapangan telah dilakukan dan disajikan oleh Khoeri and Isvara (2024).

Tabel 6. Analisis hubungan jarak terhadap PPV, menggunakan kecepatan rotasi terkecil: 8 rpm/menit

Jarak, D (m)	PPV (mm/s)	
	Rumus 3 (Attewell et al., 1992)	Rumus 2 (Attewell & Farmer, 1973)
250	0,18	0,36
225	0,21	0,40
200	0,25	0,45
175	0,30	0,51
150	0,36	0,60
125	0,47	0,71

Jarak, <i>D</i> (m)	PPV (mm/s)	
	Rumus 3 (Attewell et al., 1992)	Rumus 2 (Attewell & Farmer, 1973)
100	0,62	0,89
95	0,66	0,94

Tabel 6 (*Lanjutan*). Analisis hubungan jarak terhadap PPV, menggunakan kecepatan rotasi terkecil: 8 rpm/menit

Jarak, <i>D</i> (m)	PPV (mm/s)	
	Rumus 3 (Attewell et al., 1992)	Rumus 2 (Attewell & Farmer, 1973)
90	0,71	0,99
85	0,76	1,05
80	0,82	1,12
75	0,89	1,19
70	0,96	1,28
65	1,05	1,37
60	1,16	1,49
55	1,28	1,62
50	1,43	1,79
45	1,60	1,98
40	1,82	2,23
35	2,10	2,55
30	2,47	2,98
25	2,97	3,57
20	3,68	4,46
15	4,79	5,95
10	6,74	8,93
5	11,19	17,85

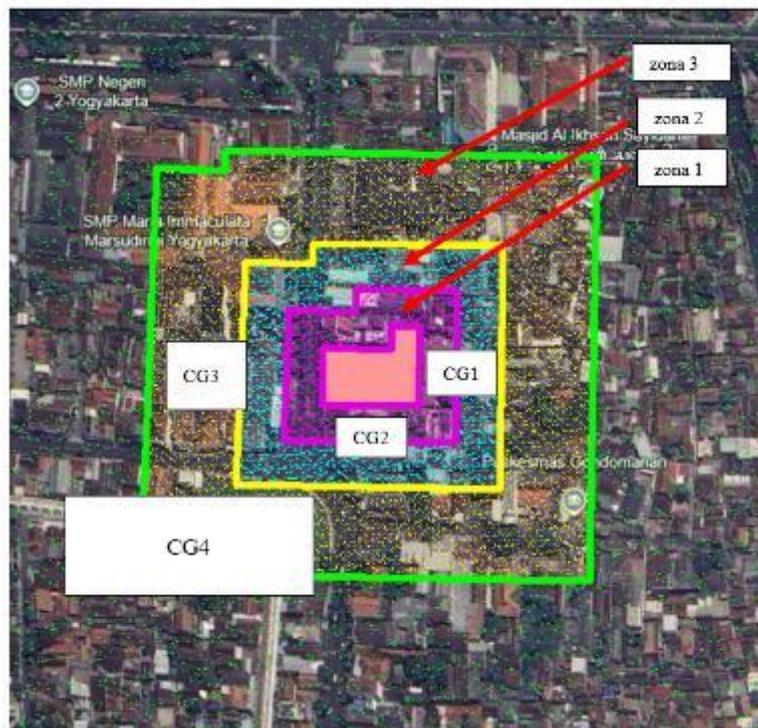
Tabel 7. Analisis hubungan jarak terhadap PPV, menggunakan kecepatan rotasi terbesar: 36 rpm/menit

Jarak, <i>D</i> (m)	PPV (mm/s)	
	Rumus 3 (Attewell et al., 1992)	Rumus 2 (Attewell & Farmer, 1973)
250	0,50	0,76
225	0,58	0,84
200	0,67	0,95
175	0,79	1,08
150	0,95	1,26
125	1,18	1,51
100	1,52	1,89
95	1,61	1,99
90	1,71	2,10
85	1,82	2,23
80	1,94	2,37
75	2,08	2,52
70	2,24	2,70
65	2,42	2,91
60	2,62	3,15
55	2,86	3,44
50	3,15	3,79
45	3,48	4,21
40	3,89	4,73

Jarak, <i>D</i> (m)	PPV (mm/s)	
	Rumus 3 (Attewell et al., 1992)	Rumus 2 (Attewell & Farmer, 1973)
35	4,40	5,41
30	5,04	6,31
25	5,89	7,57
20	7,06	9,46
15	8,79	12,62
10	11,63	18,93
5	17,37	37,85

Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai PPV yang dihitung berdasarkan persamaan 2 lebih tinggi dari persamaan 3. Hal ini dikarenakan perhitungan PPV pada persamaan 3 sudah memperhitungkan pengaruh atenuasi tanah. Dimana, semakin jauh dengan sumber getaran, nilai PPV semakin kecil seiring dengan intensitas getaran tanah yang semakin kecil. Kekonsistenan nilai terlihat pada data untuk *rotary speed* 8 rpm/menit maupun 36 rpm/menit bahwa semakin dekat dengan sumber getaran, nilai PPV akan semakin besar.

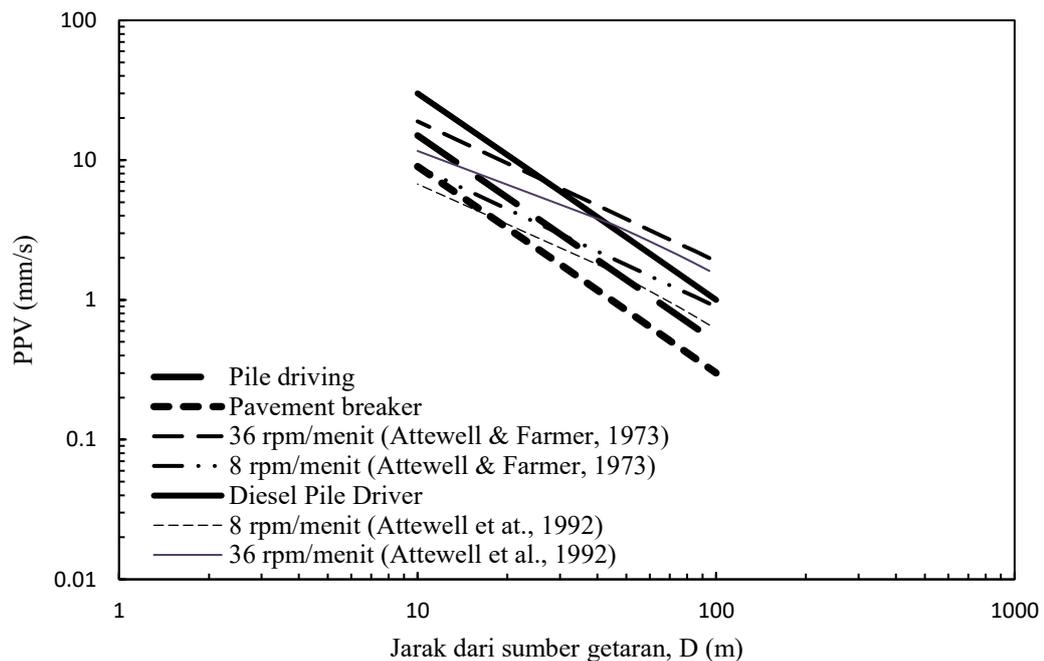
Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 (1996) mengklasifikasikan tipe kerusakan berdasarkan PPV dan tipe bangunan. Dokumen tersebut menjadi dasar pembuatan peta pengaruh sumber getaran pada Gambar 2. Peta ini dibuat dengan menggunakan perhitungan *bored-pile* dengan *rotary speed* 8 rpm/menit. Zona 1 merupakan zona terdekat dengan pusat getaran yang dapat menyebabkan kerusakan arsitektural dan struktural pada bangunan terdekat. Zona 2 merupakan zona dengan potensi terjadinya kerusakan arsitektural pada bangunan, sedangkan Zona 3 merupakan zona yang masih dapat merasakan getaran dari sumber getaran, namun tidak menimbulkan kerusakan pada bangunan, baik struktural maupun arsitektural. Batas terluar dari zona pengaruh getaran digambarkan dengan garis warna hijau. Proses penetrasi fondasi *bored-pile* pada proyek gedung 7-lantai tersebut dapat menyebabkan cagar budaya 1 dan 2 mengalami kerusakan arsitektural dan struktural, mengingat kedua cagar budaya tersebut berada pada zona 1 dan zona 2. Di sisi lain, seperti terlihat pada Gambar 2, proses konstruksi fondasi tidak akan menyebabkan terganggunya cagar budaya 3 dan 4.



Gambar 2. Prediksi zona pengaruh getaran menurut Kementerian Lingkungan Hidup (1996)

Untuk kontrol terhadap nilai PPV terhitung, pada Gambar 3 disajikan grafik hubungan PPV terhadap jarak berdasarkan tipe alat berat yang berbeda : *pile driver*, *pavement breaker* dan *diesel pile driver*, yang dimodifikasi dari Wiss (1981). Jika data dari Tabel 6 dan Tabel 7 ditambahkan pada grafik tersebut, data yang dihitung dari Attewell and Farmer (1973) dan Attewell et al. (1992) pada penelitian ini terlihat sesuai dengan data dari Wiss (1981), terutama untuk kecepatan 8 rpm/menit. Besaran nilai PPV dari *bored-pile* seharusnya berada di antara getaran dari *pavement breaker* dan *pile driving*, mengingat energi yang dihasilkan pada *bored-pile* berada di antara energi pada *pile-driver* dan *pavement breaker*. Meskipun demikian, kemiringan garis yang dihasilkan berbeda mengingat Wiss (1981) tidak memperhitungkan atenuasi dalam mendapatkan data tersebut. Dengan memperhitungkan prinsip atenuasi, hubungan PPV terhadap jarak dari sumber getaran pada proyek gedung 7-lantai di Yogyakarta ini dapat dideskripsikan melalui Persamaan 5.

$$PPV = 7,044D^{-1,02} \quad (5)$$



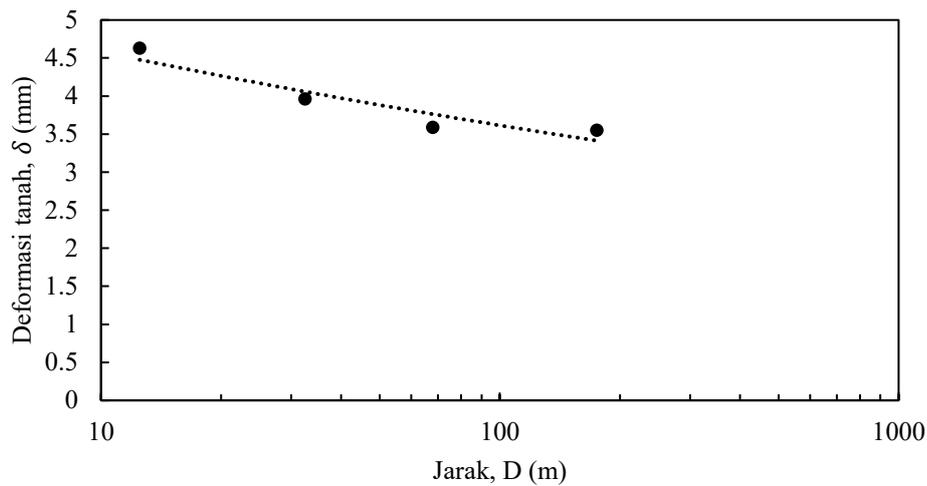
Gambar 3. Besaran PPV sebagai fungsi jarak (dimodifikasi dari Wiss (1981))

Hasil analisis PPV terhadap jarak dan deformasi

Deformasi pada tanah akibat getaran *bored-pile* dapat terlihat pada Tabel 8 dan

Gambar 4. Analisis perhitungan pada Tabel 8 dan Gambar 4 didapatkan dari Persamaan 4. Dimana, deformasi tanah berupa penurunan semakin meningkat pada jarak yang semakin dekat dengan sumber getaran. Namun demikian, menurut Tabel 3, deformasi tersebut dapat diabaikan dan tidak akan menyebabkan kerusakan pada tanah. Hubungan antara deformasi tanah (δ) dengan jarak (D) pada proyek gedung 7-lantai di Yogyakarta ini, dapat dideskripsikan melalui Persamaan 6.

$$\delta = 5,8026D^{-0,103} \quad (6)$$



Gambar 4. Hubungan deformasi tanah (mm) dengan jarak (m)

Tabel 8. Deformasi tanah akibat getaran

Jarak, D (m)	Deformasi tanah, δ (mm)
175,0	3,551
67,9	3,587
32,5	3,959
12,5	4,626

3. KESIMPULAN DAN SARAN MITIGASI

Penelitian ini menganalisis potensi dampak getaran yang ditimbulkan oleh penetrasi *bored-pile* pada proyek gedung 7-lantai di Yogyakarta yang berlokasi di daerah padat penduduk dan dekat dengan bangunan cagar budaya. Mitigasi terhadap dampak tersebut beserta analisis potensi deformasi tanah yang terjadi menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan alat berat berupa *bored-pile* dengan kapasitas seperti yang tertera dalam Tabel 5 tidak dianjurkan untuk digunakan dalam proyek gedung 7-lantai ini, mengingat efek getaran yang dihasilkan dapat merusak bangunan cagar budaya 1 dan 2 (PPV yang dihasilkan > 2 mm/detik), baik arsitektural maupun strukturalnya. Nilai PPV yang didapatkan dari alat *bored pile* dengan *rotary speed* terkecil berada di antara energi *pavement breaker* dan *pile driving*, walaupun dengan nilai atenuasi yang berbeda.
2. Penggunaan alat berat dengan kapasitas yang lebih kecil maupun metode instalasi fondasi yang lain dapat dipertimbangkan, terutama yang berpotensi menghasilkan getaran yang lebih kecil.
3. Getaran pada penetrasi *bored-pile* menyebabkan deformasi tanah di sekitarnya. Semakin jauh dari pusat getaran, nilai deformasi tanah semakin kecil. Nilai deformasi tanah berkisar 3,551 mm pada jarak terjauh dari sumber getaran sampai dengan 4,626 mm pada jarak terdekat dengan sumber getaran. Berdasarkan Tabel 3 SNI 8460:2017, maka, deformasi tanah ini dapat diabaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amick, H., & Gendreau, M. (2000). *Construction vibrations and their impact on vibration-sensitive facilities*. Paper presented at the Construction congress VI: building together for a better tomorrow in an increasingly complex world.
- Athanasopoulos, G., & Pelekis, P. (2000). Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(5), 371-387.
- Attewell, P., & Farmer, I. (1973). Modern piling: Part two-attenuation of ground vibrations from pile driving. *Ground engineering*.

- Attewell, P., Selby, A., & O'Donnell, L. (1992). Estimation of ground vibration from driven piling based on statistical analyses of recorded data. *Geotechnical & Geological Engineering*, 10, 41-59.
- Bachmann, H. (1995). *Vibration problems in structures: practical guidelines*: Springer Science & Business Media.
- Dowding, C. H. (1996). *Construction vibrations*.
- Hidup, M. N. L. (1996). Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 49 Tahun 1996 Tentang: Baku Tingkat Getaran. In: Program.
- Khoeri, H., & Isvara, W. (2024). Analisis resiko getaran tanah akibat pengeboran rencana pondasi jembatan yang bersimpangan dengan jalur pipa gas. *Jurnal Teknik Sipil: Rancang Bangun*, 10(2), 95-100.
- Kim, D.-S., & Lee, J.-S. (2000). Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19(2), 115-126. doi:[https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00002-6)
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*: Pearson Education India.
- Turkel, B. (2023). Investigation of Ground Deformations and Vibrations Due to Impact Pile Driving: Measurements and Prediction Model.
- Whyley, P., & Sarsby, R. (1992). Ground borne vibration from piling. *Ground engineering*, 26(4).
- Wiss, J. F. (1981). Construction vibrations: State-of-the-art. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(2), 167-181.
- Woods, R. D. (1997). *Dynamic effects of pile installations on adjacent structures* (Vol. 7): Transportation Research Board.