



Optimasi Penggunaan Pondasi *Micropile* sebagai Pondasi Mesin Turbin

(Studi Kasus Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo)

Muhammad Rusydan^{1*}, Agus Tugas², Abdul Halim³

¹⁻³ Universitas Widyagama Malang, Indonesia

Email: aremaqwertyl2@gmail.com^{1*}, agustugas@widyagama.ac.id², halim@widyagama.ac.id³

*Penulis Korespondensi: aremaqwertyl2@gmail.com¹

Abstract. *The foundation of turbine machines in industrial buildings must be able to withstand static and dynamic loads caused by operational vibrations. Generally, reinforced concrete block foundations are used due to their good stability. However, under certain conditions such as limited land, decreased soil bearing capacity, and the need for structural rehabilitation, their application becomes less effective. Therefore, this study aims to analyze the use of Micropile foundations as an alternative for turbine machine foundations at Candi Baru Sugar Factory, Sidoarjo. The research method includes literature studies, soil data collection through Cone Penetration Test (CPT), machine technical data analysis, and the design and analysis of Micropile foundations. The analysis covers bearing capacity, settlement, dynamic response, pile cap design, and cost estimation. The results indicate that Micropiles with a diameter of 0.20 m, a length of 2 m, five piles, and a pile cap size of 2 m × 2 m × 4.5 m are able to safely and stably support the machine load. In addition, this system is considered more efficient in terms of construction time and implementation. Therefore, Micropile foundations are recommended as an effective and economical alternative for turbine machine foundations.*

Keywords: *Dynamic Load; Machine Foundation; Micropile; Turbine Machine Foundation; Turbine.*

Abstrak. Pondasi mesin turbin pada bangunan industri harus mampu menahan beban statis dan dinamis akibat getaran selama proses operasi. Umumnya, pondasi blok beton bertulang digunakan karena memiliki kestabilan yang baik, namun pada kondisi tertentu seperti keterbatasan lahan, penurunan daya dukung tanah, dan kebutuhan rehabilitasi struktur, penggunaannya menjadi kurang efektif. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penggunaan pondasi Micropile sebagai alternatif pondasi mesin turbin di Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo. Metode penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data tanah melalui uji sondir (CPT), pengumpulan data teknis mesin, serta perencanaan dan analisis pondasi Micropile. Analisis dilakukan terhadap daya dukung, penurunan, respon dinamis, dan perencanaan pile cap, serta perhitungan rencana anggaran biaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Micropile dengan diameter 0,20 m dan panjang 2 m, jumlah 5 buah, serta pile cap berukuran 2 m × 2 m × 4,5 m mampu menahan beban mesin secara aman dan stabil. Selain itu, sistem ini dinilai lebih efisien dari segi waktu dan pelaksanaan. Oleh karena itu, pondasi Micropile direkomendasikan sebagai alternatif yang efektif dan ekonomis untuk pondasi mesin turbin.

Kata kunci: Beban Dinamis; Micropile; Pondasi Mesin Turbin; Pondasi Mesin; Turbin.

1. LATAR BELAKANG

Pondasi merupakan salah satu elemen struktural yang sangat penting dalam suatu bangunan, khususnya pada bangunan industri yang menopang mesin-mesin berat. Pondasi berfungsi untuk menyalurkan beban statis dan dinamis dari struktur atas ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai. Kesalahan dalam perencanaan pondasi dapat menyebabkan penurunan kinerja struktur, kerusakan bangunan, hingga gangguan operasional mesin.

Pada bangunan industri seperti pabrik dan pembangkit listrik, Menurut Chaitanya et al. (2023) pondasi harus mampu menahan beban dinamis akibat getaran mesin yang beroperasi secara terus-menerus. Umumnya, pondasi blok beton bertulang digunakan karena memiliki kestabilan yang baik serta kemampuan dalam meredam getaran (Karki & Maskey, 2024).

Namun, dalam beberapa kondisi, seperti keterbatasan lahan, penurunan daya dukung tanah, tingginya biaya konstruksi, serta kebutuhan rehabilitasi struktur lama, penggunaan pondasi blok menjadi kurang efektif.

Menurut Susila et al. (2024) salah satu alternatif yang dapat digunakan adalah pondasi Micropile. Micropile merupakan pondasi berdiameter kecil yang memiliki kapasitas daya dukung tinggi dan dapat diaplikasikan pada kondisi tanah yang kurang baik (Elsawwaf et al., 2023). Selain itu, metode pelaksanaannya relatif fleksibel dan cocok untuk proyek penguatan atau perbaikan pondasi eksisting.

Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo saat ini merencanakan pemasangan mesin turbin baru yang memerlukan sistem pondasi yang andal dan ekonomis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji penggunaan pondasi Micropile sebagai alternatif pengganti pondasi blok dalam menopang mesin turbin, ditinjau dari aspek teknis, kestabilan, dan efisiensi biaya.

2. KAJIAN TEORITIS

Pondasi merupakan elemen struktur bawah yang berfungsi menyalurkan beban bangunan ke tanah sehingga kestabilan konstruksi dan kontrol penurunan dapat terjamin. Pemilihan jenis pondasi harus mempertimbangkan kondisi tanah, kedalaman lapisan keras, serta efisiensi pelaksanaan sebagaimana dijelaskan oleh Vianca & Sari (2023) yang menekankan pentingnya kesesuaian jenis pondasi terhadap karakteristik tanah silty clay. Hal ini diperkuat oleh Situmorang et al. (2024) yang menyatakan bahwa analisis daya dukung tiang harus berbasis data penyelidikan tanah seperti sondir untuk menjamin keamanan struktur. Menurut Beredugo & Novak (1972) pada konteks pondasi mesin, sistem tidak hanya menerima beban statis tetapi juga beban dinamis akibat putaran dan gaya tak seimbang mesin, sehingga perencanaan harus mempertimbangkan interaksi tanah–pondasi–struktur secara menyeluruh.

Pondasi mesin dirancang agar mampu mengontrol respons dinamis dan mencegah terjadinya resonansi, yaitu kondisi ketika frekuensi alami sistem mendekati frekuensi operasi mesin. Menurut Srinivasulu (1976), pondasi mesin harus memenuhi tiga kriteria utama: memiliki kekakuan yang cukup, massa yang memadai untuk meredam getaran, serta distribusi beban yang merata ke tanah pendukung. Studi numerik oleh Ahmed et al. (2023) menunjukkan bahwa massa mesin harus dimasukkan dalam analisis modal untuk memperoleh frekuensi alami yang realistis. Selain itu, Ahmed et al. (2023) menegaskan bahwa peningkatan kekakuan tanah dan pondasi secara signifikan dapat menurunkan amplitudo getaran dan menghindari fenomena amplifikasi dinamis.

Micropile merupakan salah satu alternatif pondasi dalam yang efektif pada kondisi tanah lunak atau ruang terbatas (Chaitanya et al., 2023). Penelitian oleh Sheikhabaei & Dissertation (2023) menggunakan pendekatan Finite Element Method (FEM) tiga dimensi menunjukkan bahwa respons dinamis kelompok Micropile sangat dipengaruhi oleh rasio jarak antar tiang (s/D), kekakuan tanah, serta interaksi nonlinier tanah–struktur. Studi lain oleh Yang et al. (2021) mengungkap adanya efek kelompok (group effect) yang memengaruhi distribusi gaya aksial dan momen lentur pada Micropile. Studi lainnya oleh Jadhav et al. (2023) dapat meningkatkan banyak masalah stabilitas yang terjadi. Sementara itu, Mlhem (2024) membuktikan bahwa variasi sudut kemiringan Micropile dapat meningkatkan kapasitas daya dukung secara signifikan dibandingkan konfigurasi vertikal. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa desain Micropile tidak hanya bergantung pada kapasitas individual tiang, tetapi juga konfigurasi dan interaksi kelompoknya.

Dalam konteks reduksi getaran, penelitian Bazoobandi et al. (2024) menyatakan bahwa kedalaman penanaman pondasi memiliki pengaruh lebih besar dibandingkan berat pondasi dalam mengurangi getaran primer. Secara teoritis, menurut Prakash & Puri (1988) pondasi tertanam mengalami peningkatan frekuensi alami dan penurunan amplitudo akibat kontribusi tahanan tanah samping, sehingga lebih efektif dalam meredam getaran dibanding pondasi tidak tertanam. Menurut Situmorang et al. (2024) Berdasarkan landasan teori dan penelitian terdahulu tersebut, dapat dipahami bahwa penggunaan Micropile sebagai pondasi mesin turbin berpotensi memberikan kinerja dinamis yang lebih baik dibanding pondasi blok konvensional, terutama pada tanah lempung dengan kebutuhan kontrol getaran yang ketat.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan analitis untuk mengevaluasi kinerja pondasi Micropile sebagai alternatif pondasi mesin turbin di Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo. Objek penelitian adalah sistem pondasi mesin turbin yang direncanakan menggunakan Micropile sebagai pengganti pondasi blok konvensional.

Penelitian dilakukan di area instalasi mesin turbin Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo, Jawa Timur. Objek kajian meliputi kondisi tanah, karakteristik mesin turbin, serta sistem pondasi Micropile yang direncanakan.

Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori mengenai pondasi mesin, beban dinamis, interaksi tanah–struktur, serta penerapan Micropile. Literatur yang digunakan meliputi buku teknik sipil, jurnal ilmiah, standar perencanaan, dan penelitian terdahulu. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data sekunder yang meliputi data

tanah hasil uji sondir (CPT), data teknis mesin turbin, serta data material dan konstruksi pondasi. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses perencanaan dan analisis.

Perencanaan pondasi Micropile dilakukan dengan menentukan parameter desain berupa diameter, panjang, jumlah, jarak antar tiang, dan konfigurasi kelompok tiang. Selain itu, direncanakan pula dimensi pile cap sebagai elemen distribusi beban. Perencanaan didasarkan pada kondisi tanah, beban mesin, serta standar teknis yang berlaku.

Analisis daya dukung meliputi perhitungan kapasitas aksial tiang tunggal dan kelompok berdasarkan parameter tanah dan dimensi tiang. Perhitungan dilakukan untuk memperoleh daya dukung ultimit dan daya dukung izin. Selain itu, dilakukan evaluasi terhadap penurunan tanah akibat beban kerja agar tidak melebihi batas yang diizinkan.

Analisis dinamis dilakukan untuk mengevaluasi respon pondasi terhadap beban getaran mesin. Analisis meliputi perhitungan konstanta kekakuan, redaman, dan amplitudo getaran pada arah vertikal, horizontal, dan rocking. Tujuan analisis ini adalah untuk memastikan bahwa frekuensi alami sistem pondasi tidak beresonansi dengan frekuensi operasi mesin turbin.

Kontrol keamanan dilakukan dengan membandingkan hasil analisis daya dukung dan respon dinamis terhadap persyaratan standar perencanaan. Aspek yang diperiksa meliputi kapasitas aksial dan lateral, stabilitas struktur, serta batas getaran yang diizinkan. Sistem pondasi dinyatakan aman apabila memenuhi faktor keamanan yang ditetapkan.

Analisis biaya dilakukan melalui perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) berdasarkan volume pekerjaan, kebutuhan material, upah tenaga kerja, dan harga satuan pekerjaan. Biaya pondasi Micropile kemudian dibandingkan dengan biaya pondasi blok konvensional untuk menilai efisiensi ekonomi.

Hasil perhitungan daya dukung, respon dinamis, dan analisis biaya dianalisis secara komprehensif. Pembahasan difokuskan pada kinerja teknis, efektivitas peredaman getaran, serta aspek ekonomi penggunaan Micropile. Berdasarkan hasil analisis tersebut, disusun kesimpulan dan rekomendasi untuk penerapan di lapangan serta pengembangan penelitian selanjutnya.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Dinamis dan Respon Sistem Pondasi

Penelitian ini dilakukan pada pondasi mesin turbin di Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo dengan tahapan pengumpulan data berupa data spesifikasi mesin (frekuensi operasi 10.000 rpm), data tanah hasil sondir, serta data dimensi struktur pondasi. Analisis dilakukan terhadap respon dinamis sistem pondasi Micropile meliputi arah vertikal, horizontal, dan rocking.

Berdasarkan hasil rekapitulasi pada Gambar 1., diperoleh frekuensi natural sistem masing-masing sebesar 1596,670 rpm (vertikal), 1141,102 rpm (horizontal), dan 1373,260 rpm (rocking). Nilai ini berada di luar rentang frekuensi operasi mesin, sehingga tidak terjadi resonansi. Secara teoritis, kondisi ini memenuhi kriteria desain pondasi mesin menurut teori dinamika struktur dimana rasio frekuensi operasi terhadap frekuensi natural harus $< 0,8$ untuk menghindari amplifikasi getaran.

No	Parameter	Vertkal	Horizontal	Rocking
1	Jari jari tiang	0.1	0.1	0.1
2	konstanta kekakuan	1483651.000	757792.236	2217876.181
3	Konstanta redaman	4619.665	6756.240	3262.327
4	Rasio redaman	0.260	0.532	0.106
5	Frekuensi natural	1596.670	1141.102	1373.260
6	Frekuensi resonansi	1717.134	1734.026	1388.868
7	gaya unbalanced F(t)	35.907	35.907	76.088
8	Amplitudo pada frekuensi resonansi	0.000000417	0.000000232	0.000000012
9	Amplitudo pada frekuensi operasi	0.000000000	0.000000211	0.000000224
10	Amplitudo akibat rocking	0.000000012	0.000000052	
11	Amplitudo total (Z)	0.000000429	0.000000495	

Gambar 1. Respon Sistem Pondasi

Amplitudo getaran dihitung menggunakan persamaan respon dinamis:

$$A_{\phi} = \frac{m_1 \cdot e \cdot z'}{I_g} \cdot \frac{(\omega_e/\omega_n)^2}{\sqrt{(1 - (\omega_e/\omega_n)^2)^2 + 4D^2(\omega_e/\omega_n)^2}}$$

Hasil perhitungan menunjukkan amplitudo horizontal saat operasi sebesar 0,000000211 rad dan amplitudo rocking sebesar 0,000000224 rad. Amplitudo total vertikal dan horizontal masing-masing sebesar 0,000000429 mm dan 0,000000495 mm, jauh lebih kecil dibandingkan batas izin 0,02 mm (vertikal) dan 0,04 mm (horizontal). Hal ini menunjukkan sistem pondasi memiliki kekakuan dan redaman yang memadai dalam mereduksi respons getaran mesin.

Daya Dukung dan Beban Dinamis Pondasi

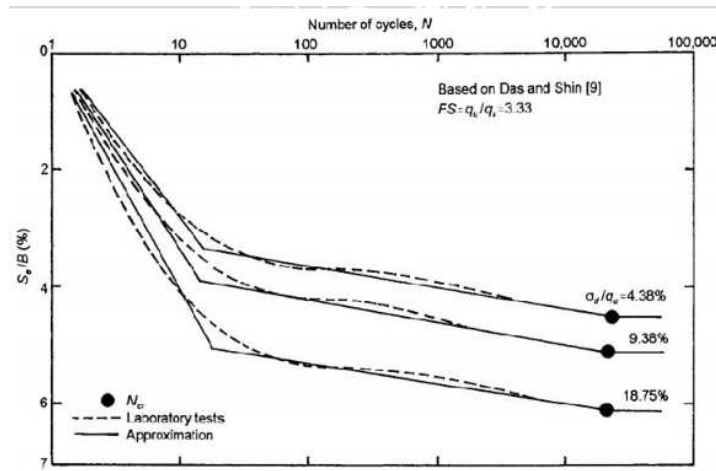
Daya dukung pondasi terhadap kombinasi beban statis dan dinamis dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{max} = W + F_{dinmax}$$

dengan beban dinamis maksimum diperoleh dari:

$$F_{dinmax} = Z\sqrt{k^2 + (c\omega_e)^2}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh $F_{dinmax} = 36,7076 \text{ kN}$, sehingga total beban maksimum menjadi 557,3154 kN. Beban yang diterima tiap Micropile (5 tiang) sebesar 7,342 kN akibat beban dinamis, relatif kecil dibandingkan beban statis. Hal ini memperkuat bahwa kontribusi beban dinamis terhadap kapasitas tiang tidak signifikan, sejalan dengan konsep interaksi tanah–struktur dimana massa blok pondasi berfungsi sebagai peredam alami sistem.



Gambar 2. Hubungan S_e/B dengan N untuk σ_d 4.38%, 9.38% dan 15.75%

Penurunan tanah akibat vibrasi dianalisis berdasarkan penyebaran tegangan dinamis (Gambar 4.5 Area Penyebaran Beban Dinamis). Hubungan antara rasio S_e/B terhadap jumlah pukulan (N) ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil analisis menunjukkan penurunan pada layer terdalam sebesar 3 mm, masih dalam batas toleransi penurunan pondasi mesin. Secara teoritis, nilai ini konsisten dengan pendekatan elastis dimana deformasi tanah sebanding dengan distribusi tegangan dinamis yang relatif kecil.

Perencanaan Penulangan Blok dan Micropile

Perencanaan tulangan blok pondasi dilakukan berdasarkan momen ultimit hasil analisis struktur. Nilai momen arah X dan Y sebesar 12.150,883 kgm. Kapasitas nominal dihitung dengan:

$$M_n = \frac{M_u}{\phi}$$

dan rasio tulangan:

$$\rho = \frac{1}{m} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2mR_n}{f_y}} \right]$$

Hasil perhitungan menunjukkan kebutuhan luas tulangan tarik sebesar 29.436,666 mm² dan digunakan tulangan 104D19. Pemeriksaan menunjukkan $A_{s\text{tersedia}} > A_{s\text{perlu}}$, sehingga desain dinyatakan aman. Untuk Micropile diameter 20 cm diperoleh kebutuhan tulangan pokok 6Ø12 dengan spiral Ø8–50 mm. Hasil ini memenuhi ketentuan rasio tulangan minimum dan standar SNI, serta sesuai teori kapasitas kolom tekan–lentur.

Perbandingan Teknis dan Ekonomis Pondasi

Parameter Ratio	Pondasi Micropile	Pondasi Blok
Frekuensi Vertikal	0.00002145	0.17
Frekuensi Horizontal	0.00001238	0.055
Frekuensi Rocking	0.000002942	0.29
Amplitudo Vertikal	0.000000429	0.00000
Amplitudo Horizontal	0.000000495	0.00008
Amplitudo Rocking	0.000000235	0.0437
RAB	Rp. 66.000.000	Rp. 76.500.000

Gambar 3. Perbandingan Pondasi blok dan micropile

Perbandingan dengan pondasi blok konvensional ditunjukkan pada Gambar 3. Dari aspek dinamis, amplitudo rocking pondasi blok sebesar 0,0437 mm, jauh lebih besar dibanding Micropile (0,000000235 mm). Hal ini menunjukkan sistem Micropile memiliki kekakuan dan performa dinamis yang lebih baik dalam meredam getaran mesin.

No	Nama Pekerjaan	Volume	Satuan	Harga satuan	Harga total
PEKERJAAN GALIAN					
1	Pekerjaan penggalian tanah	6	m ³	Rp 80,000	Rp 480,000
2	Pengeboran tiang <i>Micropile</i>	10	m	Rp 700,000	Rp 7,000,000
3	Pembuangan tanah bekas galian	1	ls	Rp 2,500,000	Rp 2,500,000
PEKERJAAN BETON					
1	Cor beton Pondasi <i>Micropile</i> Ø20 cm K300	0.314	m ³	Rp 1,800,000	Rp 565,200
2	Penulangan pondasi <i>Micropile</i> Ø20 cm	16.82	kg	Rp 16,000	Rp 269,067
3	Cor beton blok Pondasi 2 x 2 x 4.5 m	18	m ³	Rp 1,800,000	Rp 32,400,000
4	Penulangan blok pondasi 2 x 2 x 4.5 m	1397.625	kg	Rp 16,000	Rp 22,362,000
				Total	Rp 65,576,267
				Dibulatkan	Rp 66,000,000

Gambar 4. RAB Pemasangan pondasi mesin turbin PG Candi Baru

Dari aspek ekonomi, hasil RAB pada Gambar 4. menunjukkan biaya pondasi Micropile sebesar Rp 66.000.000, sedangkan pondasi blok sebesar Rp 76.500.000. Dengan demikian terjadi efisiensi biaya sebesar 13,7%. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya mengenai efektivitas Micropile pada kondisi tanah lunak yang menunjukkan keunggulan dari sisi teknis maupun biaya. Implikasi praktis dari penelitian ini adalah bahwa pondasi Micropile tidak hanya aman secara struktural dan dinamis, tetapi juga lebih efisien serta minim gangguan terhadap operasional pabrik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis perencanaan dan evaluasi teknis yang telah dilakukan pada pondasi mesin turbin di Pabrik Gula Candi Baru Sidoarjo, dapat disimpulkan bahwa alternatif pondasi Micropile mampu memberikan kinerja struktural yang aman dan stabil terhadap beban statis maupun dinamis. Dimensi optimum yang diperoleh yaitu Micropile berdiameter 0,2 m dengan panjang 2 m dan jumlah 5 tiang dalam satu kelompok dengan konfigurasi pile cap $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 4,5\text{ m}$ telah memenuhi persyaratan daya dukung tanah serta faktor keamanan yang disyaratkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung aksial dan lateral pondasi Micropile berada dalam kondisi aman terhadap kombinasi beban kerja mesin turbin. Evaluasi penurunan total dan diferensial masih berada dalam batas toleransi pondasi mesin sehingga tidak menimbulkan potensi gangguan operasional seperti misalignment poros. Dari aspek dinamis, peningkatan kekakuan sistem akibat penggunaan kelompok Micropile mampu menggeser frekuensi alami sistem menjauhi frekuensi operasi mesin, sehingga risiko resonansi dapat dihindari. Dari sisi ekonomis, hasil analisis Rencana Anggaran Biaya menunjukkan bahwa penggunaan pondasi Micropile lebih efisien dibandingkan pondasi blok eksisting dengan selisih biaya sebesar Rp 66.000.000 atau sekitar 13,7% lebih ekonomis. Dengan demikian, secara teknis dan finansial, pondasi Micropile dapat direkomendasikan sebagai alternatif perkuatan atau pengganti pondasi blok konvensional pada mesin turbin industri dengan kondisi tanah serupa. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya,

disarankan dilakukan analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method) untuk memperoleh gambaran distribusi tegangan dan deformasi tanah yang lebih detail akibat beban dinamis mesin. Selain itu, pengujian lapangan berupa uji beban statik maupun monitoring getaran saat mesin beroperasi akan memberikan validasi empiris terhadap hasil perhitungan teoritis. Penelitian lanjutan juga dapat mempertimbangkan variasi diameter, panjang, dan konfigurasi jumlah Micropile untuk memperoleh optimasi desain yang lebih komprehensif. Evaluasi terhadap pengaruh kondisi tanah yang berbeda serta variasi tipe mesin

industri juga penting dilakukan agar hasil penelitian dapat diaplikasikan secara lebih luas pada berbagai sektor industri.

DAFTAR REFERENSI

- Ahmed, A., Fattah, M., & Mohsen, M. (2023). Static and dynamic analysis of a high-speed turbo machine foundation. *Engineering and Technology Journal*, 41(11). <https://doi.org/10.30684/etj.2023.142820.1547>
- Bazoobandi, S., Shamekhi Amiri, M., & Keramati, M. (2024). Laboratory evaluation of vibration isolation of dynamic loads caused by machine foundations by surface trenches. *Shock and Vibration*, 2024(1). <https://doi.org/10.1155/2024/9215081>
- Beredugo, Y. O., & Novak, M. (1972). The effect of embedment on footing vibrations.
- Chaitanya, J. S. N., Divya, K., & Kalyan, G. S. S. (2023). A review on micro piles. *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, 2, 694–697. <https://doi.org/10.56726/irjmets33506>
- Elsawwaf, A., Nazir, A., Azzam, W., & Farouk, A. (2023). The behavior of micropiled raft foundations subjected to combined vertical and lateral loading: Numerical study. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(3). <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11246-y>
- Jadhav, S. S., Kushwah, R. P. S., & Tech, M. (2023). Foundation design for micropiling (preliminary design of micropile). *International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science*, 8, 1906–1915. <https://doi.org/10.56726/irjmets44195>
- Karki, S., & Maskey, P. N. (2024). Dynamic response of machine foundation: A study of structural dynamics on soil conditions. *Journal of the Society of Civil Engineers*, 12(1). <https://doi.org/10.3126/jsce.v12i1.80017>
- Mlhem, M. (2024). Static behaviour of micropiles foundation with different inclination angles on slopes.
- Prakash, S., & Puri, V. K. (1988). *Foundations for machines*.
- Sheikhbahaei, A.-M. (2023). *Vertical dynamic study of micropile groups using a non-linear soil behavior* (Dissertation).
- Situmorang, H. K., Darmiyanti, L., & Indriasari. (2024). Analisis daya dukung pondasi tiang pancang berdasarkan data sondir pada proyek pembangunan boarding school. *Anggapa*, 3, 19–28.
- Srinivasulu, P. (1976). *Handbook of machine foundations* (G. S. Ramaswamy, Ed.).
- Susila, E., Ary, W. R., Sahadewa, A., Putri, K. M. E., Zulkifli, E., & Sadono, K. W. (2024). Dynamic responses of a block machine foundation and a pile group foundation systems on stratified residual soils in Indonesia by lumped mass and finite element methods. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(2), 244–265. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.2.6>

- Vianca, I., & Sari, Y. A. (2023). Bored pile foundation planning for 7-level story low-rise apartment in silty clay soil in Cakung area, East Jakarta. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(2), 319–333. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i2.9068>
- Yang, T., Men, Y., Rutherford, C. J., & Zhang, Z. (2021). Static and dynamic response of micropiles used for reinforcing slopes. *Applied Sciences*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146341>