



Evaluasi Daya Dukung Fondasi Tiang Menggunakan PDA dan CAPWAP pada Gardu Induk

Rabiya^{1*}, Suratmin², Nur Aida³

^{1,2,3}*Teknik Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Ketapang, Indonesia*

*Email : rabiya@politap.ac.id

Abstract: Extra-high voltage substations require reliable pile foundations to ensure structural stability and safety. One method of evaluating the bearing capacity of pile foundations in the field is dynamic testing using a Pile Driving Analyzer or PDA combined with CAPWAP analysis. This study aims to evaluate the bearing capacity of pile foundations at extra-high voltage substations based on PDA test results and compare them with analytical calculations using the Meyerhof method. The testing was conducted on two installed pile foundations using the high strain dynamic testing method in accordance with the ASTM D4945 standard. Field data was obtained from measurements of force and velocity during hammering, then analyzed using CAPWAP software to determine the characteristics of tip resistance and skin friction. The analysis results showed that the ultimate bearing capacity based on the Meyerhof method was 1884.96 kN, while the CAPWAP analysis results showed a lower end bearing capacity, namely 167.3 kN for pole P-1 and 11.6 kN for pole P-2. This significant difference indicates that the dynamic test results are greatly influenced by soil conditions and soil-pile interaction in the field. This finding emphasizes the importance of using dynamic tests as a field evaluation to verify analytical calculation results in pile foundation design.

Keywords: PDA Test; CAPWAP; Pole Strength; Substation

1. PENDAHULUAN



Gambar 1. Alat *Pile Driving Analyzer Test*

Pile Driving Analyzer (PDA) Test merupakan metode uji dinamis tegangan tinggi yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas daya dukung fondasi tiang secara langsung di lapangan. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur respon gaya dan kecepatan akibat tumbukan palu pada kepala tiang, sehingga memungkinkan estimasi kapasitas ultimit serta evaluasi integritas tiang (Ulfi dkk., 2025). Pada penelitian ini, PDA Test digunakan sebagai alat utama untuk memperoleh data dinamis fondasi tiang yang telah terpasang

pada gardu induk tegangan ekstra tinggi. Keunggulan metode ini terletak pada efisiensi waktu pelaksanaan, biaya yang relatif lebih rendah dibanding uji beban statik, serta kemampuannya memberikan gambaran perilaku interaksi tanah–tiang secara aktual di lapangan sesuai standar ASTM D4945 (Veronica dkk., 2025).

CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) merupakan perangkat lunak analisis lanjutan yang digunakan untuk menginterpretasikan data hasil PDA *Test* melalui pemodelan rambatan gelombang pada tiang. Analisis CAPWAP memungkinkan pemisahan komponen daya dukung menjadi tahanan ujung dan gesekan selimut, serta memberikan distribusi tahanan sepanjang tiang (Ardiansyah dkk., 2024). Pada penelitian ini, CAPWAP digunakan untuk menganalisis data hasil uji PDA pada dua fondasi tiang, yang menunjukkan perbedaan signifikan antara daya dukung analitis dan hasil uji dinamis. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kondisi tanah, karakteristik lapisan pendukung, serta mekanisme transfer beban sangat berpengaruh terhadap respons dinamis tiang, sehingga CAPWAP berperan penting dalam memberikan evaluasi daya dukung yang lebih realistis dibandingkan perhitungan teoritis semata (Rumbyarso, 2024).

Pole strength atau kekuatan fondasi tiang merupakan kemampuan tiang dalam menahan beban aksial dan mentransfernya secara aman ke lapisan tanah pendukung. Kekuatan ini dipengaruhi oleh dimensi tiang, material penyusun, panjang penetrasi, serta kondisi tanah di sekitarnya (Karyatama dkk., 2025). Berdasarkan hasil penelitian, nilai daya dukung ujung yang diperoleh dari analisis CAPWAP jauh lebih rendah dibandingkan hasil perhitungan menggunakan metode Meyerhof, yang menunjukkan bahwa kekuatan aktual fondasi tiang di lapangan tidak selalu tercermin secara akurat oleh pendekatan analitis. Oleh karena itu, evaluasi pole strength melalui uji dinamis menjadi penting untuk memastikan bahwa fondasi tiang memiliki kapasitas yang memadai terhadap beban rencana serta memenuhi persyaratan keamanan struktur (Nurjannah, 2024).

Gardu induk tegangan ekstra tinggi merupakan infrastruktur strategis yang memerlukan tingkat keandalan struktur yang tinggi, khususnya pada sistem fondasinya (Firuliadhim dkk., 2019). Beban besar dari peralatan listrik, struktur pendukung, serta pengaruh dinamis lingkungan menuntut fondasi tiang dengan daya dukung dan stabilitas yang terjamin (Rabiya dkk., 2020). Dalam konteks penelitian ini, evaluasi fondasi tiang pada gardu induk dilakukan untuk memastikan bahwa kapasitas daya dukung aktual di lapangan sesuai dengan kebutuhan struktur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan uji dinamis PDA dan analisis CAPWAP sangat relevan untuk mendukung perencanaan dan evaluasi fondasi gardu induk, sehingga dapat meminimalkan risiko kegagalan struktur dan meningkatkan keselamatan serta keberlanjutan operasional sistem kelistrikan.

Penelitian terdahulu terkait evaluasi daya dukung fondasi tiang telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan pendekatan yang beragam. Hasil uji dinamis PDA memiliki perbedaan tertentu terhadap estimasi daya dukung berbasis data SPT, terutama pada

kondisi tanah berlapis, sehingga uji dinamis diperlukan sebagai verifikasi lapangan (Santoso dkk., 2020). Kombinasi data N-SPT, PDA, dan analisis CAPWAP mampu memberikan estimasi daya dukung dan penurunan fondasi tiang yang lebih andal dibandingkan metode analitis tunggal (Hakim dkk., 2023). Kapasitas ultimit fondasi tiang hasil uji PDA memiliki selisih yang relatif kecil dibandingkan hasil analisis numerik menggunakan Plaxis 3D, sehingga metode uji dinamis dinilai efektif untuk validasi desain fondasi (Purnomo, 2025). Hasil uji PDA pada fondasi tiang jembatan cenderung lebih konservatif dibandingkan metode kalendering, namun tetap memenuhi kriteria keamanan struktur (Syahrul, 2022). Selanjutnya, estimasi daya dukung fondasi tiang berdasarkan data SPT memerlukan perbandingan dengan hasil uji PDA agar nilai kapasitas yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi lapangan (Sibuea dkk., 2025). Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih difokuskan pada bangunan gedung dan jembatan, serta belum secara spesifik mengkaji perbedaan signifikan antara metode analitis dan uji dinamis pada fondasi tiang gardu induk tegangan ekstra tinggi, sehingga penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut melalui evaluasi daya dukung fondasi tiang menggunakan uji PDA dan analisis CAPWAP pada infrastruktur kelistrikan.

Berdasarkan celah penelitian tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi daya dukung fondasi tiang pada gardu induk tegangan ekstra tinggi berdasarkan hasil uji dinamis *Pile Driving Analyzer* (PDA) dan analisis CAPWAP, serta membandingkannya dengan hasil perhitungan analitis menggunakan metode Meyerhof. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai kapasitas daya dukung aktual fondasi tiang di lapangan dan menjadi bahan pertimbangan dalam perencanaan serta evaluasi fondasi tiang pada infrastruktur kelistrikan berisiko tinggi.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimental lapangan, yang bertujuan untuk mengevaluasi daya dukung fondasi tiang berdasarkan hasil pengujian dinamis menggunakan *Pile Driving Analyzer* (PDA) dan analisis CAPWAP, serta membandingkannya dengan hasil perhitungan analitis menggunakan metode Meyerhof. Penelitian bersifat komparatif karena membandingkan dua pendekatan evaluasi daya dukung, yaitu metode analitis dan metode pengujian dinamis berbasis respons gelombang pada tiang (Jaenuri dkk., 2021). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kesesuaian dan perbedaan antara kapasitas teoritis dan kapasitas aktual fondasi tiang di lapangan.

Penelitian ini dilaksanakan pada proyek pembangunan gardu induk tegangan ekstra tinggi yang berlokasi di Provinsi Jawa Barat pada tahun 2025. Objek penelitian berupa dua unit fondasi tiang pancang yang telah terpasang dan direncanakan sebagai penopang struktur peralatan utama gardu induk. Lokasi penelitian dipilih karena memiliki kondisi tanah yang bervariasi dan beban struktur yang besar, sehingga diperlukan evaluasi daya dukung fondasi secara aktual melalui pengujian lapangan guna memastikan keamanan dan kinerja struktur.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengujian lapangan menggunakan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA) sesuai standar ASTM D4945. Data yang dikumpulkan berupa sinyal gaya dan kecepatan yang diukur menggunakan strain transducer dan accelerometer yang dipasang pada kepala tiang saat proses pemukulan palu. Data sekunder berupa spesifikasi tiang, panjang tiang, diameter, data hammer, serta data penyelidikan tanah diperoleh dari dokumen perencanaan proyek dan laporan penyelidikan geoteknik. Seluruh data hasil pengujian direkam secara digital melalui monitor PDA dan selanjutnya digunakan sebagai input dalam analisis CAPWAP.

Data hasil pengujian PDA dianalisis menggunakan perangkat lunak CAPWAP untuk memperoleh estimasi daya dukung ultimit tiang serta distribusi tahanan ujung dan gesekan selimut sepanjang batang tiang. Hasil analisis dinamis tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis menggunakan metode Meyerhof berdasarkan parameter tanah dan dimensi tiang yang tersedia. Analisis dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan nilai daya dukung ujung dan total kapasitas tiang dari kedua metode untuk mengidentifikasi tingkat perbedaan serta mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi respons tanah–tiang di lapangan.

Perhitungan daya dukung fondasi tiang secara analitis dalam penelitian ini menggunakan metode Meyerhof, yang menyatakan bahwa kapasitas ultimit tiang merupakan jumlah dari tahanan ujung dan tahanan gesekan selimut (Sulardi, 2018) yang secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q_u = Q_b + Q_s$$

Dimana Q_u merupakan daya dukung ultimit tiang dengan satuan kN, Q_b merupakan tahanan ujung tiang dengan satuan kN dan Q_s merupakan tahanan gesekan selimut dengan satuan kN.

Untuk tanah granular, tahanan ujung dihitung menggunakan persamaan :

$$Q_b = A_b \times q_s$$

Sedangkan tahanan gesekan selimut dihitung dengan :

$$Q_s = \sum (A_s \times f_s)$$

Dimana A_b merupakan luas penampang ujung tiang dengan satuan m², Q_b merupakan tekanan tanah di ujung tiang dengan satuan kPa, A_s merupakan luas selimut tiang dengan satuan m² dan f_s merupakan tahanan gesek satuan tanah dengan satuan kPa.

Hasil perhitungan analitis ini kemudian dibandingkan dengan hasil daya dukung ultimit yang diperoleh dari analisis CAPWAP berbasis data PDA untuk mengevaluasi kesesuaian antara metode teoritis dan kondisi aktual di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dinamis fondasi tiang dalam penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode *High Strain Dynamic Testing* sesuai standar ASTM D4945. Pengujian dilakukan pada dua unit tiang pancang yang telah terpasang pada konstruksi gardu induk tegangan ekstra tinggi, yaitu tiang P-1 dan P-2. Data yang diperoleh berupa sinyal gaya dan kecepatan akibat tumbukan palu pada kepala tiang, yang kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak CAPWAP untuk memperoleh estimasi kapasitas daya dukung ultimit serta distribusi tahanan ujung dan gesekan selimut sepanjang batang tiang.

Tabel 1. Parameter dan Hasil Perhitungan Daya Dukung Tiang dengan Metode Meyerhof

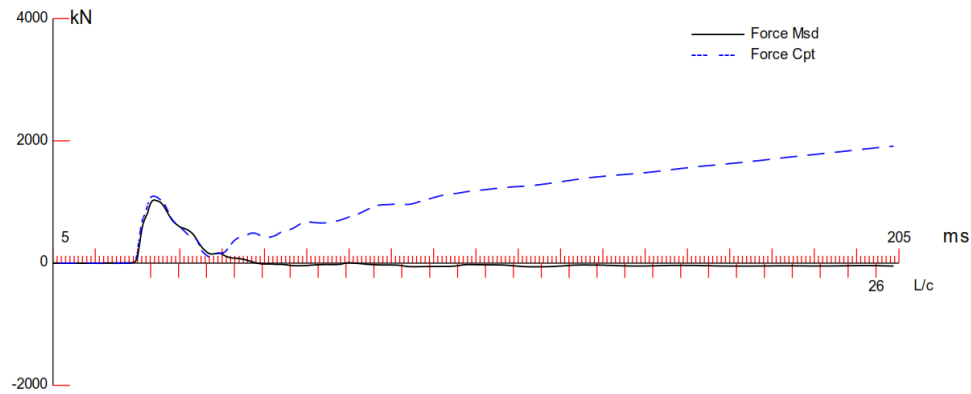
Parameter	Value	Unit	Note
L	20	m	
d	0,4	m	
L/d	50		
σ_r	100	KPa	
A_b	0,125664	m ²	
N	60		
N_{60}	37,5		
f_b	15000	KPa	Tanah granular
	11250	KPa	Tanah kohesif
Q_b	1884,96	kN	Tanah granular
	1413,72	kN	Tanah kohesif

Berdasarkan hasil perhitungan analitis menggunakan metode Meyerhof, diperoleh nilai daya dukung ultimit sebesar 1884,96 kN untuk kedua tiang dengan asumsi kondisi tanah granular dan dimensi tiang yang seragam. Nilai ini digunakan sebagai acuan teoritis dalam mengevaluasi hasil pengujian dinamis di lapangan.

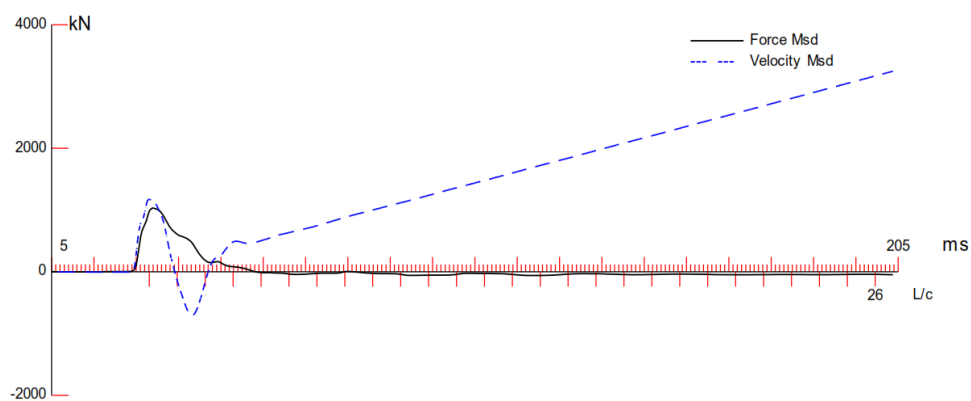
Tabel 2. Hasil Perkiraan Nilai Kapasitas Kinerja Tiang dengan PDA *Test* dan Dianalisis di CAPWAP

Nama pile	Perkiraan (ujung tiang)	Hasil analisis pengujian menggunakan CAPWAP	Panjang tiang hasil CAPWAP
P-1	1884,96	167,3	9-11
P-2	1884,96	11,6	7-10

Hasil analisis CAPWAP menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung ujung aktual kedua tiang jauh lebih rendah dibandingkan hasil perhitungan analitis. Untuk tiang P-1 diperoleh daya dukung ujung sebesar 167,3 kN, sedangkan pada tiang P-2 hanya sebesar 11,6 kN. Perbedaan yang signifikan ini mengindikasikan bahwa kapasitas dukung aktual fondasi tiang sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat, kedalaman penetrasi efektif tiang terhadap lapisan tanah keras, serta mekanisme transfer beban antara tanah dan tiang selama proses pemancangan.

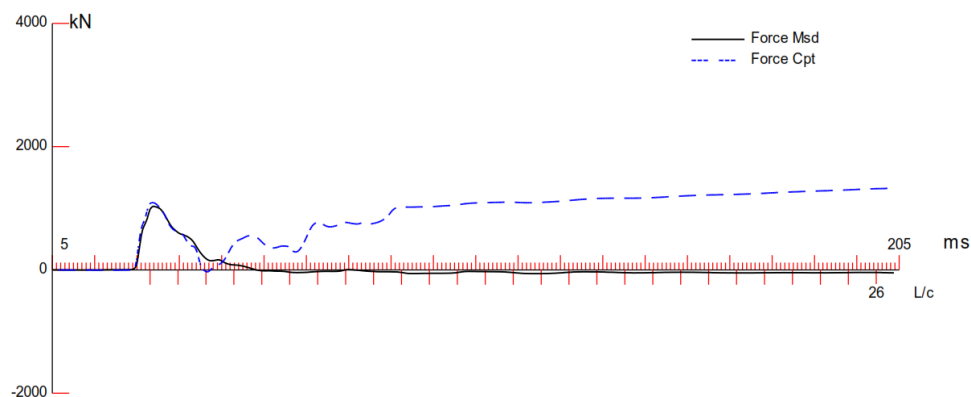


Gambar 2. Analisis CAPWAP *Pile Pertama (Force)*

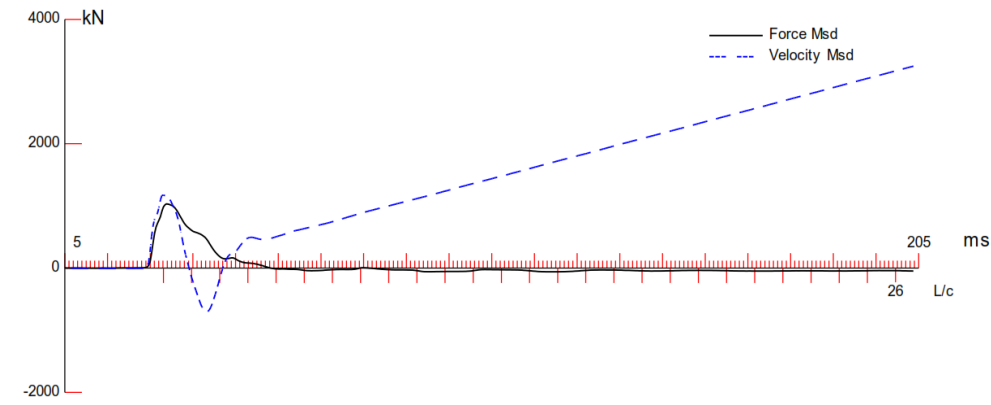


Gambar 3. Analisis CAPWAP *Pile Pertama (Velocity)*

Secara khusus, rendahnya nilai daya dukung ujung pada tiang P-2 menunjukkan bahwa ujung tiang belum mencapai lapisan tanah keras yang mampu memberikan tahanan ujung optimal, sehingga mekanisme daya dukung lebih didominasi oleh gesekan selimut sepanjang batang tiang. Kondisi ini diperkuat oleh hasil distribusi tahanan selimut dari analisis CAPWAP yang menunjukkan adanya kontribusi gesekan sepanjang tiang, namun dengan nilai yang belum cukup untuk mengimbangi rendahnya tahanan ujung.



Gambar 4. Analisis CAPWAP *Pile Kedua (Force)*



Gambar 5. Analisis CAPWAP *Pile* Kedua (*Velocity*)

Hasil respons gaya dan kecepatan yang diperoleh dari analisis CAPWAP pada kedua tiang memperlihatkan adanya perambatan gelombang yang stabil selama proses tumbukan, yang mengindikasikan bahwa integritas struktural tiang dalam kondisi baik dan tidak mengalami kerusakan signifikan selama pemancangan. Selain itu, deformasi kecil yang teridentifikasi pada bagian atas tiang menunjukkan terjadinya pemadatan tanah di sekitar tiang, yang berpotensi meningkatkan kapasitas gesekan selimut pada tahap layanan jangka panjang melalui mekanisme setup tanah.

Perbandingan antara hasil analitis metode Meyerhof dan hasil uji dinamis menunjukkan bahwa pendekatan teoritis cenderung memberikan estimasi kapasitas daya dukung yang lebih besar dibandingkan kondisi aktual di lapangan. Hal ini sejalan dengan temuan Santoso dan Hartono (2020) serta Hakim dan Hadi (2023) yang menyatakan bahwa metode analitis berbasis parameter tanah seringkali belum mampu merepresentasikan kompleksitas interaksi tanah–tiang secara aktual, khususnya pada tanah berlapis atau tanah lunak. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menegaskan pentingnya penggunaan uji dinamis PDA dan analisis CAPWAP sebagai alat verifikasi lapangan dalam perencanaan dan evaluasi fondasi tiang, terutama pada infrastruktur strategis seperti gardu induk tegangan ekstra tinggi yang menuntut tingkat keandalan struktur yang tinggi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa hasil pengujian dinamis menggunakan *Pile Driving Analyzer* (PDA) dan analisis CAPWAP menghasilkan nilai daya dukung fondasi tiang yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis menggunakan metode Meyerhof, khususnya pada tiang P-2, yang mengindikasikan bahwa ujung tiang belum mencapai lapisan tanah keras dan mekanisme daya dukung lebih didominasi oleh gesekan selimut. Perbedaan ini menegaskan bahwa pendekatan analitis berbasis parameter tanah cenderung memberikan estimasi kapasitas yang lebih besar dibandingkan kondisi aktual di lapangan. Oleh karena itu, penggunaan uji dinamis PDA dan analisis CAPWAP sangat penting sebagai alat verifikasi lapangan dalam perencanaan dan evaluasi fondasi tiang, terutama pada infrastruktur strategis

seperti gardu induk tegangan ekstra tinggi yang memerlukan tingkat keandalan struktur yang tinggi..

REFERENSI

- Ardiansyah, M. E., Aliehudien, A., & Gunasti, A. (2024). Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang dengan Alat Berat Drop Hammer dan Hydraulic Static Pile Driver (HSPD). *Indonesian Journal Publisher*, 1(1), 57 - 68.
- Firuliadhim, G., & Rabiya. (2019). Analisis Daya Dukung Tiang Bor dengan ALAT Pile Driving Analyzer Test pada Variasi Diameter Tiang. *POTENSI*, 21(2), 70 - 73.
- Hakim, M. F. N., & Hadi, M. A. (2023). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Fondasi Berdasarkan Data N-SPT diverifikasi dengan Nilai PDA dan CAPWAP. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, (pp. 236 - 247).
- Jaenuri, Chayati, N., Alimuddin, & Feril, H. (2021). Analisis Kekuatan Fondasi terhadap Struktur Tower Transmisi Type CC+9 500 kV. *Seminar Nasional Ketekniksipilan, Infrastrukturu dan Industri Jasa Konstruksi (KIIJK)*, (pp. 211 - 218).
- Karyatama, C. C., Despa, D., Widyawati, R., Habibi, B. M., & S, M. N. (2025). Daya Dukung Tiang Pancang berdasarkan Pengujian Sondir dan Kalendering pada Jembatan Talang Air Panemangan. *Jurnal Profesi Insinyur (JPI)*, 6(1), 77 - 82.
- Nurjanah, A. (2024). Analysis of Bearing Capacity of Pile Foundation Using Analytical Method and Finite Element Method. *Eduvest - Journal of Universal Studies*, 4(5), 3960 - 3979.
- Purnomo, A. F. D. (2025). Perbandingan Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang menggunakan Software Plaxis 3D dan Hasil Tes PDA (Studi Kasus Gedung Tower 03 CW 01 ITS). *Kohesi: Jurnal Sains dan Teknologi*, 9(11), 41 - 50.
- Rabiya, Syahri, & Somantri, A. K. (2020). Experimental Study of Bearing Capacity Pile Foundation on Peat Soil by Properties Improvement using Electrokinetic Method and Clamshell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (pp. 1 - 7).
- Rumbyarso, Y. P. (2024). Analisis Komparasi Daya Dukung Spun Pile dengan Manual, PDA Test dan All Pike. *N U S A N T A R A Journal of Science and Technology*, 1(2), 1 - 10.
- Santoso, H. T., & Hartono, J. (2020). Analisis Perbandingan Daya Dukung Fondasi Tiang Pancang berdasar Hasil Uji SPT dan Pengujian Dinamis. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 4(1), 31 - 38.
- Sibuea, H. O., Fansuri, M. H., & Siagian, G. A. (2025). Perbandingan Daya Dukung Fondasi Berbasis Data SPT dan PDA Test (Studi Kasus: Proyek RS Pon). *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 20(2), 31 - 39.

- Sulardi. (2018). Uji Kinerja Daya Dukung Individu Fondasi Tiang dengan Alat Instrument Kontrol Pile Drive Analyzer Test di Revinery Unit V Balikpapan. *JURNAL KACAPURI : Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 1(2), 69 - 76.
- Syahrul. (2022). Korelasi Kalendering dan Pile Driving Analyzer pada Daya Dukung Substruktur Tiang Pancang Jembatan Encahaq Kutai Barat. *Sebatik*, 26(1), 182 - 193.
- Ulfi, K., Sandi, D. M., & Hutasoit, E. O. (2025). Rasio Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal dari Penyelidikan Tanah terhadap PDA. *Journal of Applied Civil Engineering and Infrastructure Technology (JACEIT)*, 6(1), 1 - 7.
- Veronica, C., & Sutandi, A. (2025). Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang berdasarkan Uji Sondir dan Tes PDA di Proyek Ruko X. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(1), 99 - 108.