



## ANALISIS PENGUJIAN DINAMIS TIANG BOR DENGAN PILE DRIVING ANALYZER DAN ANALISIS CAPWAP JEMBATAN SIGOMPOL 2

Tisara Sita<sup>1</sup>, Dian Rusmanawati<sup>2</sup>, Vinayaka Gheanada Afifah<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Jawa Tengah-DI Yogyakarta

<sup>1</sup>[tisarasita@pu.go.id](mailto:tisarasita@pu.go.id), <sup>2</sup>[dianrusma@pu.go.id](mailto:dianrusma@pu.go.id), <sup>3</sup>[vinayakagheanada@pu.go.id](mailto:vinayakagheanada@pu.go.id)

### ABSTRAK

Pondasi merupakan bagian yang sangat penting dalam dunia konstruksi. Kegagalan pondasi dapat berakibat bangunan yang berdiri di atasnya tidak berfungsi sebagaimana mestinya. *Pile Driving Analyzer* (PDA) adalah suatu cara pengujian pondasi tiang dengan menggunakan data digital komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelerometer* dan menghasilkan kurva gaya dan kecepatan ketika tiang dipukul menggunakan *hammer*. Hasil dari pengujian PDA terdiri dari kapasitas tiang, energi palu, dan penurunan. Perangkat tambahan lain dari alat PDA adalah *software* CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*). CAPWAP adalah sebuah *software* yang digunakan untuk mengestimasi daya dukung total pondasi tiang serta daya dukung selimut dan daya dukung ujung pondasi tiang. Program ini menganalisis data gaya dan kecepatan yang diperoleh dari pengujian PDA di lapangan. Karakteristik drop hammer yang dipakai untuk pengujian ini adalah menggunakan jenis *drop hammer* dengan berat palu sebesar 8 ton. Pengujian dilakukan dengan melakukan pemukulan pada tiang yang diuji dalam keadaan sudah tertanam, pada pengujian ini tiang bor yang diuji ditumbuk sebanyak satu dan dua kali, penumbukan dihentikan setelah diperoleh kualitas rekaman yang cukup baik dan energi pukulan relatif yang cukup tinggi. Hasil pengujian dinamis dengan *Pile Driving Analyzer* (PDA) dan analisis CAPWAP yang dilaksanakan di Paket I.4-Pembangunan Jalan Kawasan Industri Terpadu (KIT) Batang diperoleh analisis CAPWAP yang lebih akurat yaitu daya dukung tiang keempat tiang dalam kondisi cukup seragam pada saat pengujian.

Kata kunci: Tiang bor, *Pile Driving Analyzer*, *Case Pile Wave Analysis Program*

### ABSTRACT

*In the field of construction, the foundation is crucial. If the foundation fails, the structure it supports could not be functional. Pile Driving Analyzer (PDA) is a method of testing pile foundations using digital computer data obtained from the strain transducer and accelerometer and producing force and velocity curves when the pile is hit with a hammer. The results of the PDA test consist of pile capacity, hammer energy, and settlement. Another enhancement of the PDA tool is the CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) software. CAPWAP is a software used to estimate the total bearing capacity of pile foundations as well as blanket bearing capacity and pile foundation tip bearing capacity. This program analyzes force and velocity data obtained from field testing of PDAs. The characteristics of the drop hammer used for this test is to use a drop hammer type with a hammer weight of 8 tons. The test is carried out by beating the tested pile in an embedded state, in this test the tested drill pile is pounded once and twice, the pounding is stopped after a fairly good recording quality and relatively high hitting energy are obtained. The results of dynamic testing using the Pile Driving Analyzer (PDA) and CAPWAP analysis carried out in Package I.4-Road Construction of the Batang Integrated Industrial Estate obtained a more accurate CAPWAP analysis, namely the carrying capacity of the four piles in fairly uniform testing conditions.*

Keyword: Bored pile, *Pile Driving Analyzer*, *Case Pile Wave Analysis Program*

### 1. PENDAHULUAN

Pondasi merupakan bagian yang sangat penting dalam dunia konstruksi. Kegagalan pondasi dapat berakibat bangunan yang berdiri di atasnya tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Pengujian *Pile Driving Analyzer* (PDA) adalah salah satu pengujian yang dilakukan untuk mengetahui daya dukung ultimit pondasi tiang. *Pile Driving Analyzer* (PDA) adalah suatu cara pengujian pondasi tiang dengan menggunakan data digital komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelerometer* dan menghasilkan kurva gaya dan kecepatan ketika tiang dipukul menggunakan *hammer*. Hasil dari pengujian PDA terdiri dari kapasitas tiang, energi palu, dan penurunan.



Perangkat tambahan lain dari alat PDA adalah software CAPWAP. Daya dukung ultimit yang dihasilkan PDA dan *software* CAPWAP terkadang berbeda jauh. Hal ini perlu diteliti penyebab perbedaan antara PDA dan *software* CAPWAP serta mengetahui seberapa besar perbedaan nilai daya dukung pondasi tiang yang dihasilkan dengan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA) terhadap analisis dengan menggunakan *software* CAPWAP, sehingga dalam pengujian daya dukung pondasi tiang dengan menggunakan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA) ini menghasilkan nilai daya dukung yang representatif. Penggunaan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA) dengan baik, terutama dalam penggunaan di lapangan, maupun dalam menganalisis dengan menggunakan *software* CAPWAP harus dilakukan sesuai dengan prosedur.

PDA (*Pile Driving Analyzer*) adalah jenis pengujian tiang pancang yang digunakan pondasi bangunan menggunakan alat khusus berupa monitor tablet yang terintegrasi dengan sensor *strain transducer* dan *accelerometer* serta terhubung dengan palu atau *hammer* menggunakan kapasitas tertentu. Parameter yang diukur menggunakan pengujian PDA *Test* yaitu daya dukung tiang pancang, *displacement* tiang, nilai keutuhan tiang, nilai efisiensi energi yang ditransfer dari *hammer* ke tiang. Namun, untuk pelaksanaannya harus menunggu 28 hari sejak tiang pondasi dipasang karena sudah memiliki kekuatan untuk menahan tekanan dari pukulan *hammer*.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pondasi tiang umumnya digunakan sebagai alat meneruskan beban ke dalam lapisan tanah keras, melalui perlawanan selimut (*skin friction*) dan perlawanan ujung (*end bearing*) tiang (Nakazawa dan Sosrodarsono, 1983). Terdapat beberapa jenis pondasi tiang berdasarkan material asal, yaitu beton cetak di tempat (*in situ*) dan pra cetak (*precast*), baja, kayu, dan batu. Penampang pondasi tiang dan metode pemasangan sangat bervariasi. Ada banyak jenis pondasi tiang berdasarkan sistem pelaksanaannya. Beberapa diantaranya adalah sebagai berikut (Curtin dkk, 2006):

1. Pondasi tiang pancang (*driven piles*)  
Pondasi tiang pancang dapat digunakan di area tanah, yang relatif lunak. Pondasi tiang pancang dicetak terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam tanah. Pondasi tiang pancang dimasukkan ke dalam tanah sampai pada lapisan tanah keras. Ada beberapa bentuk penampang dari pondasi tiang pancang, yaitu persegi, persegi panjang, melingkar, dan heksagonal.
2. Pondasi tiang bor (*bored piles*)  
Pondasi tiang bor biasanya dibuat dengan menggunakan tulangan yang telah dirakit, kemudian dimasukkan ke dalam lubang bor dengan kedalaman tertentu. Selanjutnya lubang yang telah berisi tulangan diisi dengan beton.
3. Pondasi tiang sekrup (*screw piles*)  
Pondasi tiang sekrup (*screw piles*) biasanya dilaksanakan dengan cara memutar pondasi sekrup tersebut ke dalam tanah dengan menggunakan mesin. Pondasi tiang sekrup biasanya kedalamannya tidak sedalam pondasi tiang pancang maupun pondasi tiang bor.

*Pile Driving Analyzer Test* atau PDA *Test* (Kamalendran dan Rajavaran, 2007) merupakan pengujian di lapangan untuk mendapatkan data *Force* (F) dan *velocity* (v) pada pondasi dalam, seperti tiang pancang dan *bored pile*, yang kemudian akan dianalisis secara komputasi. Pelaksanaan PDA *Test* mengacu pada ASTM D4945 (*Standart Test Method for High Strain Dynamic Testing of Deep Foundation*) karena PDA *Test* termasuk salah satu dari uji *High Strain Dynamic Testing* (HSDT). Pada pondasi tiang pancang, PDA *Test* berguna untuk *monitoring* kapasitas tiang, integritas tiang, dan energi dari *hammer* di lapangan. Prosedur *Case Method* menganalisa data kecepatan (*velocity*) dan gaya (*force*) yang diambil dari pukulan *hammer* secara *real time* sehingga didapatkan nilai daya dukung pondasi tiang tunggal. Pengujian PDA dengan menggunakan "*Case Method*" dapat mengetahui:

1. Daya dukung pondasi tiang tunggal;
2. Integritas atau keutuhan tiang dan sambungan;
3. Efisiensi dari transfer energi pukulan *hammer*/alat pancang.

Tahap pelaksanaan pengujian dengan PDA meliputi:



1. Pemasangan Instrumen Regangan dan percepatan gelombang akibat *impact* alat pancang diukur dengan menggunakan *strain transducer* dan *accelerometer*. Jumlah *strain transducer* dan *accelerometer* masing-masing adalah dua buah dan dipasang pada bagian atas tiang (1,5D – 2D dari kepala tiang). Tujuan pemasangan dua buah untuk masing-masing pengukuran untuk mendapatkan data yang baik (rata-rata) di samping sebagai faktor keamanan apabila salah satu instrumen tidak bekerja dengan baik. Pemasangan instrumen pada tiang pancang *spun pile*, dipasang pada garis netral tiang dengan melakukan pengeboran lubang pada tiang.
2. Pengujian Data awal yang dibutuhkan untuk pengujian adalah tanggal pengecoran, panjang tiang, panjang tiang tertanam dan ukuran penampang tiang. Tanggal pengecoran tiang berguna untuk mengetahui umur tiang yang akan diuji. Pengujian dilakukan dengan melakukan pemukulan ulang (*re-strike*) pada tiang yang diuji dalam keadaan sudah terpancang sebanyak 30-40 pukulan. Penumbukan dihentikan setelah diperoleh kualitas rekaman yang cukup baik dan energi pukulan relatif yang cukup tinggi. Kualitas rekaman tergantung dari pemasangan instrumen, bekerjanya komputer dan sistem elektronik. Apabila instrumen tidak terpasang dengan baik atau sistem komputer tidak bekerja seperti yang diharapkan, hal ini akan segera diketahui dari beberapa rekaman *blow* yang pertama.

Berikut data yang diperoleh dari test PDA, meliputi:

1. RMX = Daya dukung tiang (ton)
2. RSU = Daya dukung tiang (ton)  
\*Untuk penggunaan RMX dan RSU dilihat dari grafik negatif pada garis warna biru, jika garis negatif itu berada diantara garis tegak maka digunakan RSU, jika di luar maka digunakan RMX
3. EMX = Energi maksimum yang di transfer (ton.m)
4. CSX = Daya tekan maksimum (MPa)
5. TSX = Daya tarik maksimum (MPa)
6. STK = Tinggi jatuh palu (m)
7. DMX = Penurunan maksimum (mm)  
\*Perkiraan penurunan maksimum yang dapat di alami oleh *pile* tersebut
8. DFN = Penurunan Permanen (mm)  
\*Jika nilai yang terbaca negatif, maka DFN menjadi penurunan *rebound*, yang berarti *pile* tersebut tidak mengalami penurunan tetapi memental (kembali ke tempat semula)
9. FMX = Gaya tekan maksimum (ton)
10. LE = Panjang tiang di bawah instrumen (m)
11. AR = Luas penampang tiang (cm<sup>2</sup>)
12. EM = Modulus elastisitas (t/ cm<sup>2</sup>)
13. SP = Berat jenis beton (t/ cm<sup>3</sup>)
14. WS = Cepat rambat (m/s)
15. WC = Cepat rambat (m/s)
16. JC = *Damping Factor* (tergantung dengan kondisi dan jenis tanah di lapangan)

Catatan: *Safety factor* pada PDA test adalah 2,25 dari daya dukung desain.

Menurut Nji (2012) *Case Wave Analyze Program* (CAPWAP) merupakan Analisa lanjutan yang dilakukan setelah pengujian PDA yang merupakan salah satu metoda *Signal Matching Analysis* (SMA). Analisa ini menggunakan data yang diperoleh dari pengujian PDA berupa F dan v untuk memberikan hasil analisa yang lebih detail. Hasil analisa CAPWAP tersebut memberikan data lebih rinci dari pengujian PDA Test seperti perkiraan daya dukung tiang, distribusi kekuatan lapisan tanah dan simulasi pembebanan statik. Hasil analisis CAPWAP dari uji PDA didapat nilai daya dukung ultimat CAPWAP mendekati  $\pm 20\%$  dari hasil *Static Load Test* (SLT).

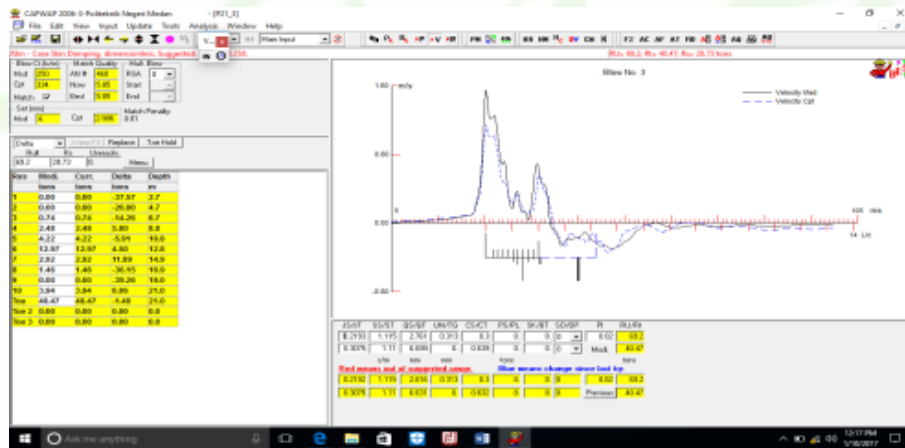
### 3. METODOLOGI PENELITIAN



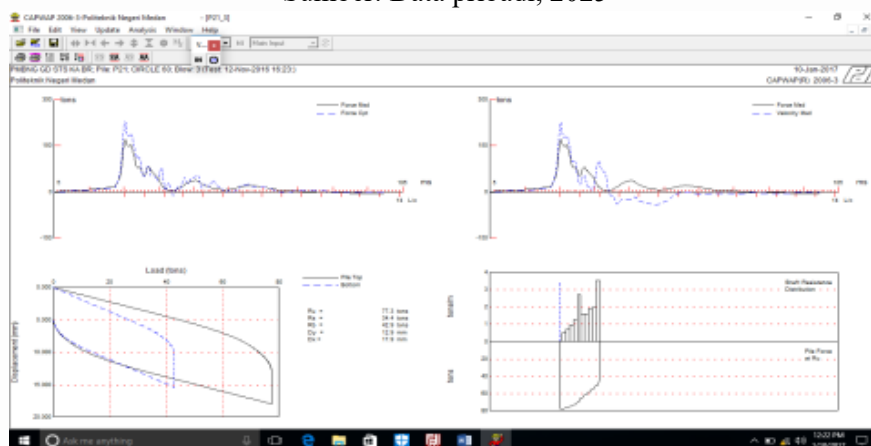
Prosedur pengujian berdasarkan persyaratan yang telah ditetapkan, maka berikut diuraikan pelaksanaan pekerjaan yang merupakan tahapan atau cara kerja dalam penyelidikan tanah tersebut (Pile Dynamic, 2009). Pengujian tiang dengan cara dinamis didasarkan pada analisis data hasil rekaman getaran gelombang yang terjadi pada waktu tiang dipukul dengan palu. Regangan dan percepatan gelombang akibat impak palu diukur dengan menggunakan *strain transducer* dan *accelerometer*. Dua buah *strain transducer* dan dua buah *accelerometer* dipasang pada bagian atas tiang (minimum 1,5-2 diameter dari kepala tiang).

Tujuan pemasangan dua buah instrumen untuk masing-masing pengukuran adalah untuk mendapatkan data yang baik (rata-rata) disamping sebagai faktor keamanan apabila salah satu instrumen tidak bekerja dengan baik. Hasil pengukuran direkam dengan alat *Pile Driving Analyzer* (PDA), dan dianalisis dengan cara yang dikenal dengan nama ‘*Case Method*’, berdasarkan teori gelombang satu dimensi (*one dimensional wave theory*). Hasil rekaman PDA dianalisis lebih lanjut dengan CAPWAP, untuk memperoleh perkiraan daya dukung tiang, distribusi kekuatan lapisan tanah dan simulasi pembebanan statik. Pemasangan instrumen harus dilakukan demikian rupa untuk sedapat mungkin menghindari pengaruh ‘lentur’ yang dapat terjadi selama pengujian.

CAPWAP (*CAsE Pile Wave Analysis Program*), seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2, adalah sebuah *software* yang digunakan untuk mengestimasi daya dukung total pondasi tiang serta daya dukung selimut dan daya dukung ujung pondasi tiang. Program ini menganalisis data gaya dan kecepatan yang diperoleh dari pengujian PDA di lapangan.

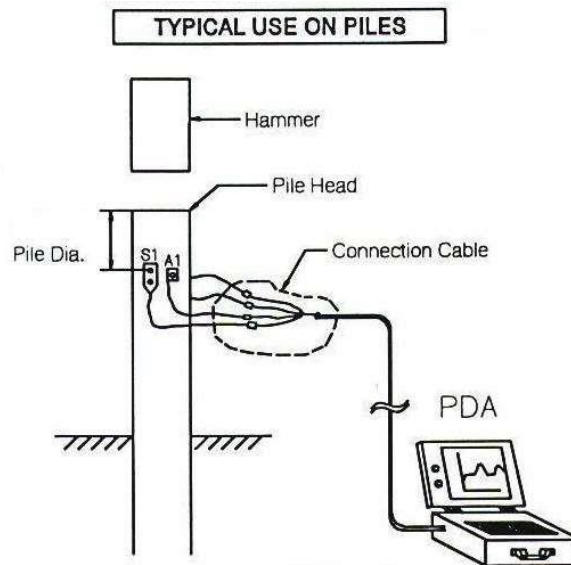


Gambar 1. Layar Analisis CAPWAP  
Sumber: Data pribadi, 2025



Gambar 2. Grafik dari Analisis  
Sumber: Data pribadi, 2025

Software CAPWAP (*Case Pile Wave Analysis Program*) ini merupakan satu paket dengan alat PDA. Software CAPWAP ini dilengkapi dengan sebuah *dongle* dalam mengoperasikannya. Software CAPWAP merupakan salah satu metode *Signal Matching Analysis (SMA)*. Software CAPWAP ini dapat di-*update* setiap tahun dan didukung penuh produsen PDA yang ada di USA. Pada tiang bor, *strain transducer* dan *accelerometer* dipasang pada garis diametral. Skematik pengujian PDA dapat diamati pada Gambar 3.



Gambar 3. Skematik Pengujian PDA  
Sumber: Data pribadi, 2025

Pengujian PDA dilaksanakan berdasarkan ASTM D4945-08. Pekerjaan persiapan dilaksanakan sebelum pengujian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Kondisi kepala tiang sebaiknya rata, simetris dan tegak lurus;
2. Pasang *strain transducer* pada garis netral dan *accelerometer* di lokasi berlawanan secara diametral, dengan jarak minimal  $1,5 \times \text{diameter (D)}$  dari kepala tiang;
3. Persiapkan palu dengan berat yang disyaratkan;
4. Masukkan kalibrasi *strain transducer* dan *accelerometer* kemudian periksa koneksitas peralatan pengujian secara keseluruhan;
5. Masukkan data tiang dan palu dalam PDA PAX;
6. Setelah semua siap, periksa kembali data yang telah dimasukkan sebelum pengujian dilaksanakan.

Setelah persiapan selesai dilaksanakan, maka pengujian dilakukan dengan menjatuhkan palu ke kepala tiang hingga diperoleh energi yang cukup dan tegangan tidak terlampaui agar kepala tiang tidak rusak. Saat pemukulan, beberapa variabel akan terekam dalam komputer PDA. Komputer PDA memberikan keluaran yang berasal dari *strain transducer* dan *accelerometer* pondasi tiang, dan data tersebut dievaluasi sebagai berikut:

1. Data *strain* dikombinasikan dengan modulus elastisitas dan luas penampang tiang, memberikan tekanan vertikal pada tiang. Data *acceleration* diintegrasikan dengan waktu hasil partikel percepatan perjalanan gelombang melalui tiang;
2. Data *acceleration* diintegrasikan dengan waktu hasil perpindahan pondasi selama *hammer* dijatuhkan ke pondasi.

Pengujian dilakukan terhadap tiang bor dalam keadaan sudah tertanam. Gambar 4 menunjukkan lokasi tiang bor yang diuji, sedangkan karakteristik tiang bor yang diuji dapat diamati pada Tabel 1.



Gambar 4. Lokasi Tiang Bor yang Diuji

Sumber: Data pribadi, 2025

Tabel 1. Karakteristik tiang bor yang diuji

Nomor tiang	Dimensi tiang ( $\varnothing$ [mm];L[m])	Panjang bawah instrumen [m]	Panjang tiang tertanam [m]	Tanggal di cor	Tanggal di uji
PJKITB-ABT1-3	146,5;17	15,6	15	05.08.21	20.08.21
PJKITB-ABT1-9	146,5;17	15,4	15,3	03.08.21	20.08.21
PJKITB-ABT2-16	143,3;17	15,3	15,2	09.08.21	21.08.21
PJKITB-ABT2-17	143,3;17	15,2	15	10.08.21	21.08.21

Sumber: Data pribadi, 2025

Karakteristik *drop hammer* yang dipakai untuk pengujian ini adalah menggunakan jenis *drop hammer* dengan berat palu sebesar 8 ton. Prosedur pengujian dilakukan sesuai dengan peraturan ASTM D4945. Pengujian dilakukan dengan melakukan pemukulan pada tiang yang diuji dalam keadaan sudah tertanam, pada pengujian ini tiang bor yang diuji ditumbuk sebanyak satu dan dua kali, penumbukan dihentikan setelah diperoleh kualitas rekaman yang cukup baik dan energi pukulan relatif yang cukup tinggi.

Kualitas rekaman tergantung dari pemasangan instrumen serta proses pada komputer dan sistem elektronik. Apabila instrumen tidak terpasang dengan baik atau sistem komputer tidak bekerja seperti yang diharapkan, hal ini akan segera diketahui dari beberapa rekaman ‘*blow*’ yang pertama. Selama pengujian di proyek ini, semua sistem elektronik bekerja sesuai dengan rencana. Jumlah pukulan yang diperlukan ditentukan oleh fluktuasi besarnya energi yang sesungguhnya diterima oleh tiang. Hal ini sepenuhnya tergantung dari efisiensi *hammer* yang digunakan.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Keutuhan Tiang

Analisis mengenai keutuhan tiang berdasarkan hasil rekaman PDA dengan melihat karakteristik kurva ‘F’ (gaya) dan ‘V’ (kecepatan). Dari hasil analisis kurva ‘F’ dan ‘V’ diperoleh indikasi bahwa keempat tiang dalam kondisi cukup seragam pada saat pengujian.



## 2. Efisiensi Energi Drop Hammer

Energi maksimum yang diterima oleh tiang selama pengujian dengan menggunakan *drop hammer* 8 ton. Tabel 2 menunjukkan tabel hasil efisiensi energi *drop hammer* saat pengujian.

Tabel 2. Hasil efisiensi energi drop hammer saat pengujian

Drop hammer (ton)	Energi ditransfer [tonm]	Energi potensial [tonm]	Efisiensi energy [%]
8	8,97	12	74,7

Sumber: Data pribadi, 2025

## 3. Daya Dukung Tiang

Daya dukung aksial tiang diperkirakan dengan menganalisis rekaman yang terbaik, yaitu rekaman gelombang yang dihasilkan oleh pukulan yang memberikan energi tertinggi dan diusahakan untuk memilih pukulan yang mula-mula, pada saat dimana ‘gaya lengketan tanah’ yang bekerja pada dinding tiang dan ‘gaya tahanan ujung’ yang bekerja pada ujung tiang masih maksimum.

Perkiraan daya dukung aksial tiang dilakukan dengan ‘*Case Method*’. Daya dukung aksial tiang yang diuji terdiri dari tahanan ujung (*end bearing*) dan lengketan (*skin friction*). Hasil PDA dianalisis lebih lanjut dengan CAPWAP untuk menghasilkan distribusi daya dukung tanah sepanjang tiang. Analisis CAPWAP menggunakan model yang realistis sesuai dengan kondisi tanah dan tiang yang lebih rinci, maka daya dukung tiang yang rekomendasikan adalah daya dukung yang telah dianalisa lebih lanjut dengan CAPWAP. Hasil daya dukung tiang pada saat pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil daya dukung tiang pada saat pengujian

Nomor tiang	Daya dukung tiang [ton]				Keterangan
	PDA	CAPWAP			
		Total	Lengketan	Tahanan ujung	
PJKITB-ABT1-3	717	812,4	670	142,4	Daya dukung tiang hampir termobilisasi maksimum
PJKITB-ABT1-9	1652	1486,1	1128,2	357,9	Daya dukung tiang belum termobilisasi maksimum
PJKITB-ABT2-16	1861	1851,4	1513,6	337,8	Daya dukung tiang belum termobilisasi maksimum
PJKITB-ABT2-17	1617	1537,7	1139,7	398	Daya dukung tiang belum termobilisasi maksimum

Sumber: Data pribadi, 2025

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pengujian dinamis menggunakan Pile Driving Analyzer (PDA) dan analisis CAPWAP pada proyek Paket I.4 – Pembangunan Jalan Kawasan Industri Terpadu (KIT) Batang, Jawa Tengah, menunjukkan bahwa analisis CAPWAP mampu memberikan estimasi daya dukung tiang yang lebih akurat. Keempat tiang yang diuji menunjukkan nilai daya dukung yang relatif seragam, menandakan kualitas pelaksanaan pengeboran dan pengecoran yang konsisten serta kondisi tanah yang relatif homogen di lokasi pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

ASTM D4945 (*Standart Test Method for High Strain Dynamic Testing of Deep Foundation*) Annual Book of ASTM Standards, 2008., Easton, MD, USA.





- Curtin, W.G., Shaw, G., Parkinson, G.I., Golding, J.M., and Seward, N.J., 2006. *Structural Foundation Designers' Manual*. Blackwell Publishing Asia Pty Ltd, 550 Swanston Street, Carlton, Victoria 3053, Australia.
- Hardiyatmo, Hary Christady, 2002. *Teknik Pondasi 2*. Gajah Mada University Press, Yogyakarta.
- Kamalendran, A., dan Rajavarani, L.N., 2007., “*Comparison of Ultimate Bearing Capacity Obtained By Pile Driving Analyzer And Maintained Load Test*”. Thesis, University Technology Malaysia, Malaysia.
- Nakazawa, K., dan Sosrodarsono, S, 1983. *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*. Pradya Paramita, Jakarta.
- Nji, L.T. 2012. “PDA Test”. <https://lauwtjunji.weebly.com/pda-test.html>. Diakses pada 10 Februari 2022].
- Pile Dynamic, Inc. 2009., “*PDA-W Manual of Operation*”, Cleveland, Ohio 44128, USA.