

BAB IV

PILE DRIVING ANALYZER

4.1. Umum

Penggunaan uji dinamik pondasi tiang pancang dikembangkan pada sebuah proyek penelitian di Case Institute of Technology oleh Goble (1964.). Cara penelitiannya dengan merekam dan menganalisis gelombang tumbukan yang terjadi pada waktu tiang dipancang. Akhir tahun 1960 penelitian tersebut berhasil menetapkan hubungan dasar antara karakteristik gelombang satu dimensi yang menjalar di tiang selama pemancangan dengan daya dukung statis pondasi tiang tersebut. Hal ini merupakan titik awal penggunaan cara dinamis untuk menguji daya dukung statis pondasi tiang.

Pada saat ini pengujian secara dinamis dengan alat perekam untuk menganalisis gelombang akibat tumbukan palu pancang dikenal dengan nama Pile Driving Analyzer (PDA).

Tata cara pengujian dinamis telah diatur dalam American Society for Testing Method (ASTM) D4945-89 Standard Test Method for High-Strain Dynamics Testing of Pile.

Ketika tiang di tumbuk, PDA mengukur regangan dan percepatan yang dengan menggunakan alat 'strain transducer' dan 'accelerometer' yang dipasang pada bagian atas tiang seperti terlihat pada gambar 4.4. Hasil pengukuran ini

dipergunakan untuk memperkirakan daya dukung tiang dengan menggunakan Case Method, yaitu suatu metoda yang dikembangkan berdasarkan teori gelombang satu dimensi. Parameter-parameter tiang yang dapat diinformasikan oleh PDA adalah sebagai berikut :

1. Menghitung dan menampilkan kapasitas tiang dengan menggunakan Case Method.
2. Menghitung dan menampilkan energi pemancangan yang terjadi pada kepala tiang.
3. Menghitung gaya maksimum pada lokasi pengukuran (tempat 'transducer' dipasang).
4. Menerima dan menampilkan kecepatan maksimum pada lokasi pengukuran (tempat 'accelerometer").
5. Menskala rekaman pengukuran dan rekaman yang terjadi untuk disimpan pada sebuah tape recorder.
6. Menampilkan pengukuran rekaman gaya dan kecepatan dalam bentuk yang dapat dengan mudah diamati dan dievaluasi oleh operator PDA.
7. Menampilkan pengukuran rekaman gaya dan kecepatan pada sebuah plotter untuk diuji dan dievaluasi di lapangan.

4.2. Analisis

Pada saat sebuah tiang mengalami gaya aksial tiba-tiba, maka akan timbul sebuah gelombang yang merambat pada tiang tersebut. Perambatan gelombang yang diperoleh dapat diselesaikan menggunakan sebuah persamaan diferensial yang

dapat ditulis dalam bentuk:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4-1)$$

dengan:

x = sebuah jarak tempat pada batang (m)

u = peralihan dari batang pada ujung x (m)

ρ = kerapatan massa (kg/m^3)

= γ/g

γ = berat jenis tiang (N/m^3)

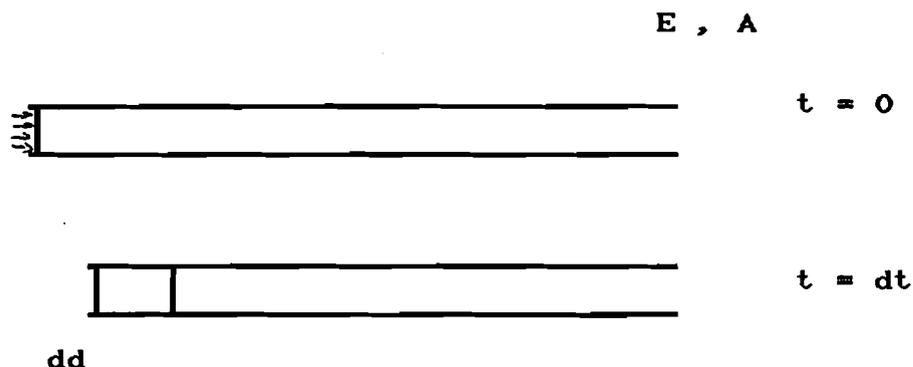
g = gravitasi bumi (m/t^2)

E = modulus elastisitas tiang (kg/cm^2)

Persamaan diatas dikenal dengan nama persamaan gelombang mekanik satu dimensi.

4.2.1. Gelombang mekanik satu dimensi

Apabila sebuah batang dengan luas penampang A dan panjang L , ditumbuk salah satu ujungnya dengan gaya sebesar P seperti tampak pada gambar 4.1., maka gelombang tumbukan akan merambat sepanjang batang tersebut.



Gambar 4.1. Perambatan Gelombang Satu Dimensi pada Batang

Setelah waktu dt , gelombang telah merambat sejauh dL , dengan kecepatan C , maka:

$$C = \frac{dL}{dt} \quad (4-2)$$

Selama waktu dt , tongkat akan mengalami perpendekan sebesar dd , maka regangan yang dialami batang:

$$\epsilon = \frac{dd}{dL} \quad (4-3)$$

Titik A di ujung batang mengalami perpindahan sejauh dd dalam waktu dt , sehingga kecepatan perpindahan titik A atau lebih dikenal dengan kecepatan partikel adalah:

$$v = \frac{dd}{dt} \quad (4-4)$$

Apabila ketiga persamaan di atas digabungkan, akan diperoleh:

$$v = \epsilon \cdot C \text{ atau } \epsilon = \frac{v}{C} \quad (4-5)$$

Dengan menggunakan hukum Hooke akan diperoleh hubungan antara gaya bekerja pada batang dengan besaran-besaran yang telah dihitung di atas dalam bentuk:

$$\epsilon = \frac{P}{E \cdot A}$$

$$P = \frac{EA}{C} v \quad (4-6)$$

Karena E , A , dan C adalah konstanta maka dapat kita lambangkan dengan $Z = \frac{EA}{C}$, maka:

$$P = Z \cdot v \quad (4-7)$$

Persamaan (4-7) disebut Proportional Condition. Besaran Z disebut "impedance" atau "dynamic stiffness".

Dapat disimpulkan bahwa akibat gelombang satu dimensi yang merambat pada satu arah yang sama, besarnya gaya yang bekerja berbanding lurus dengan kecepatan partikel. Kondisi tongkat adalah linier, elastis dan berpenampang seragam.

4.2.2. Aplikasi untuk pondasi tiang

Gelombang yang terjadi pada pondasi tiang sewaktu dipancang baik pada tiang pancang atau ditumbuk pada tiang bor dapat dianggap sebagai gelombang satu dimensi. Gelombang yang ditimbulkan oleh tumbukan palu merambat ke bawah. Perambatan gelombang ini akan menimbulkan reaksi dari elemen tanah di sekitar tiang, sehingga menimbulkan gelombang balik dengan arah rambatannya ke atas.

Ketika gelombang yang pertama tiba di ujung bawah tiang, gelombang tersebut akan dipantulkan kembali dengan arah perambatan ke atas. Gelombang pantulan ini juga akan menimbulkan reaksi tanah yang memberikan gelombang ke bawah.

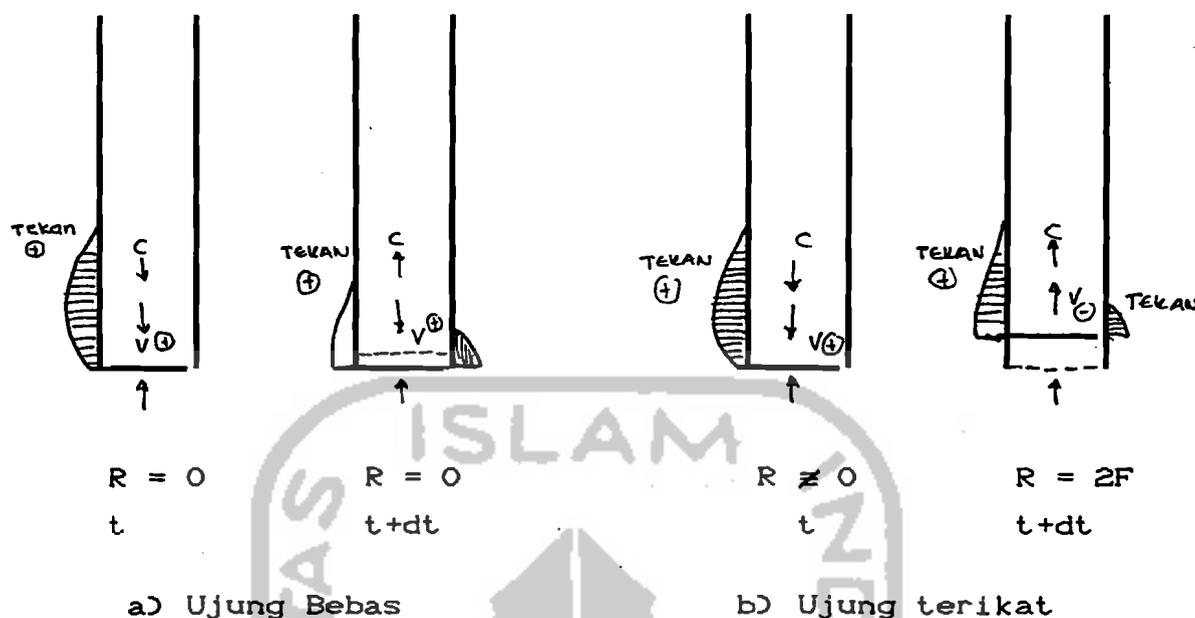
Akibat dari gaya tumbukan dalam tiang terjadi beberapa gelombang dan dikelompokkan menjadi gelombang ke atas dan bawah. Perambatan gelombang tersebut dapat menyebabkan terjadinya gaya tekan maupun gaya tarik, dan kecepatan partikel v arahnya ke atas atau ke bawah.

Perjanjian tanda yang telah disepakati adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1. Perjanjian Tanda

Tanda	Gaya (F)	Kec. partikel V
Positif	Tekan	Ke bawah
Negatif	Tarik	Ke atas

Pada gambar 4.2. diperlihatkan gelombang tumbukan yang merambat pada dua buah pondasi tiang dengan keadaan yang berlainan, yaitu keadaan ujung bawah bebas dan keadaan ujung bawah terjepit.



Gambar 4.2. Perambatan Gelombang pada Pondasi Tiang dengan keadaan ujung yang berbeda.

Pada keadaan pondasi dengan ujung bebas, gelombang tumbukan mencapai ujung dengan tidak terjadi reaksi tanah ($R=0$). Karena syarat keseimbangan gaya pada ujung tiang tetap harus dipenuhi, maka gelombang tumbukan (tekan, F positif) akan dipantulkan menjadi gelombang tarik (F negatif) menyebabkan titik-titik pada tiang bergerak ke bawah (perambatan gelombang ke atas), jadi kecepatan partikel V (positif), menjadi dua kali sebelumnya.

Untuk keadaan ujung tiang terjepit, pada saat gelombang mencapai ujung tiang maka gelombang akan dipantulkan sebagai gelombang tekan (F positif) yang besarnya sama dengan anggapan rendaman tidak ada. Arah rambatan menuju ke atas dan gerakan vertikal juga ke atas (V negatif). Diujung bawah tiang, kecepatan partikel = 0, karena kecepatan akibat gelom-

bang tumbukan dan gelombang pantulan saling menghilangkan.

Dari kedua contoh di atas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk gelombang yang merambat ke atas, gelombang tekan (F positif) menyebabkan gerakan partikel ke atas (V negatif), sedangkan gelombang tarik (F negatif) menyebabkan gerakan partikel ke bawah (V positif).

Dengan demikian hubungan proposional dari persamaan (4-7) dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$\text{Gelombang ke atas : } F_d = + Z \cdot V_d \quad (4-8)$$

$$\text{Gelombang ke bawah: } F_u = - Z \cdot V_u$$

Besarnya gaya (F) dan kecepatan (V) pada setiap saat (t) lokasi tertentu di sepanjang tiang adalah superposisi dari gaya dan kecepatan gelombang ke atas dan gelombang ke bawah:

$$F(t) = F_d(t) + F_u(t) \quad (4-9a)$$

$$V(t) = V_d(t) + V_u(t) \quad (4-9b)$$

Dengan menggabungkan persamaan tersebut akan diperoleh bentuk persamaan untuk $F_d(t)$ dan $F_u(t)$ dapat juga ditulis

$$\begin{aligned} F_d(t) &= F(t) - F_u(t) \\ &= F(t) - [V(t) - V_d(t)] \\ &= F(t) + Z [V(t) - V_d(t)] \end{aligned}$$

$$2F_d(t) = F(t) + Z \cdot V(t)$$

$$F_d(t) = \frac{1}{2} [F(t) + Z \cdot V(t)] \quad (4-10a)$$

dengan cara yang sama diperoleh:

$$F_u(t) = \frac{1}{2} [F(t) - Z \cdot V(t)] \quad (4-10b)$$

Jadi apabila $F(t)$ dan $V(t)$ dapat diukur maka gelombang ke bawah dan gelombang ke atas dapat dihitung.

4.2.3. Gelombang reaksi akibat tahanan tanah

Apabila pada kedalaman x terdapat tahanan tanah (lengketan) sebesar R_x , maka ketika gelombang tumbukan merambat sejauh x dari ujung atas, tanah akan memberikan reaksi total sebesar R_x seperti ditunjukkan pada gambar 4.3. Karena keseimbangan gaya dan kontinuitas tiang pada titik x harus dipenuhi, maka gaya reaksi total sebesar R_x menimbulkan gelombang tekan sebesar $R_x/2$ yang merambat ke atas dan gelombang tarik yang sama besarnya yaitu $R_x/2$, merambat ke bawah.

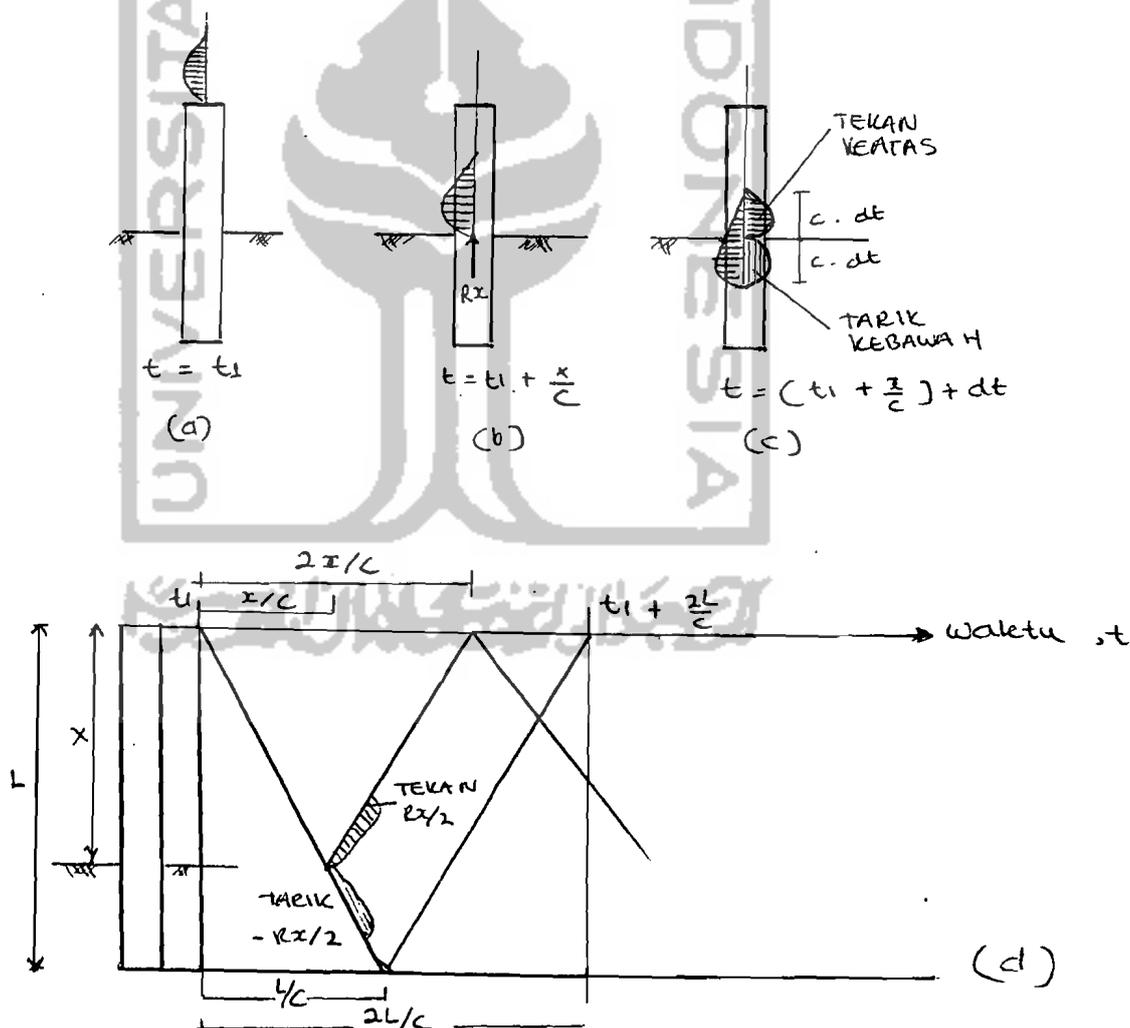
Gelombang tekan sebesar $R_x/2$ akan tiba di ujung atas tiang pada saat $2x/C$ sejak tiang ditumbuk seperti pada gambar 4.3. Kecepatan partikel akibat gelombang tekan ini besarnya adalah $-R_x/(2Z)$ karena arahnya ke atas. Jadi gaya (F) di ujung atas tiang pada saat $2x/C$ sejak tumbukan terjadi akan bertambah besar sebesar $R_x/2$, sedangkan kecepatan (v) di ujung atas tiang pada saat yang sama akan berkurang sebesar $R_x/(2Z)$. Apabila tumbukan terjadi pada saat t_1 , maka pada waktu ini persamaan 4-9a dan 4-9b gaya (F) dan kecepatan (V) di ujung atas tiang pada saat $t = t_1 + 2x/C$ dapat ditulis dalam bentuk:

$$F(t_1 + 2x/C) = F_0(t_1 + 2x/C) + R_x/2 \quad (4-11)$$

$$V(t_1 + 2x/C) = V_0(t_1 + 2x/C) + [-R_x/(2Z)] \quad (4-12)$$

Apabila kedua kurva $F(t)$ dan $V(t)$ digambar bersama dengan skala yang disesuaikan yaitu kurva $V(t)$ dikalikan faktor proposional (Z), maka pada $t = t_1 + 2x/C$, kedua kurva

di atas akan terpisah dengan jarak $= R_x$ sebesar gaya reaksi yang diberikan oleh tanah. Gelombang reaksi tahanan tanah pada setiap saat besarnya adalah $R_x/2$ dan kecepatannya adalah $-R_x/(2Z)$, maka persamaan (4-11) dan (4-12) berlaku juga untuk setiap titik antara ujung atas tiang dengan lokasi bekerjanya tahanan R_x . Dengan demikian pengukuran tidak perlu dilakukan di ujung atas tiang, sebaliknya dapat berjarak dua kali diameter atau sejauh keliling tiang dari ujung atas, untuk menghindari daerah konsentrasi tegangan.



Gambar 4.3. Gelombang reaksi tahanan tanah

4.2.4. Tahanan total pondasi tiang

Pada ujung bawah tiang juga bekerja tahanan ujung sebesar R_b , sehingga ketika gelombang mencapai ujung bawah tiang R_b akan menimbulkan gelombang tekan yang merambat ke atas dan tiba di ujung atas tiang pada saat $t = t_1 + 2L/c$. R_b akan tiba bersama-sama dengan gelombang tumbukan yang telah dipantulkan di ujung bawah tiang sebagai gelombang tarik, $[F_d(t_1)]$ dan gelombang tarik $-R_x/2$ yang telah dipantulkan di ujung bawah sebagai gelombang tekan $R_x/2$ setelah tiba pada saat $t = t_1 + 2L/c$ dianggap masih bekerja pada $t = t_1 + 2L/c$, maka pada saat $2L/c$ sesudah tumbukan, gelombang ke atas yang tiba di ujung atas tiang yang terukur adalah:

$$F_u(t_1 + 2L/c) = R_b + [-F_d(t_1)] + R_x/2 + R_x/2 \quad (4-13)$$

Pada persamaan di atas, diketahui jumlah tahanan tanah yang bekerja pada tiang adalah:

$$RT = R_b + R_x/2 + R_x/2 \quad (4-14)$$

Jika persamaan (4-13) digabungkan dengan persamaan (4-14) akan diperoleh:

$$\begin{aligned} F_u(t_1 + 2L/c) &= RT - F_d(t_1) \\ RT &= F_d(t_1) + F_u(t_1 + 2L/c) \end{aligned} \quad (4-15)$$

Apabila kita masukkan besaran-besaran yang dapat diukur $F(t)$ dan $V(t)$ seperti pada persamaan (4-10a) dan (4-10b), maka persamaan (4-15) dapat ditulis dalam bentuk:

$$RT = \frac{1}{2} [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + \frac{1}{2} [F(t_2) - Z \cdot V(t_2)] \quad (4-16)$$

dengan: $t_2 = t_1 + 2L/C$

$F(t_1)$ dan $F(t_2)$ dapat dihitung apabila regangan dapat diukur dan $V(t_1)$ dan $V(t_2)$ juga dapat dihitung kalau percepatan dapat diukur, sehingga tahanan total RT selama tiang dipancang/ditumbuk dapat dihitung.

Pile Driving Analyzer sebagai alat pengukur regangan dan percepatan mengkonversikan setiap hasil pengukuran dan memplotnya di layar komputer dalam bentuk pasangan kurva F dan V. Berdasarkan kurva hasil pengukuran tersebut, PDA menghitung daya dukung aksial pondasi tiang yang diuji dengan menggunakan Case Method.

4.2.5. Case Method

Case Method menggunakan salah satu rumus dan dipakai oleh PDA yaitu rumus RSP:

$$RSP = (1-J)[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)]/2 + (1+J)[F(t_2) - Z \cdot V(t_2)]/2 \dots \quad (4-17)$$

Dengan nilai J yang direkomendasikan untuk berbagai jenis tanah adalah sebagai berikut:

Tabel 4.2. Nilai Redaman J

Jenis Tanah	Nilai J
Pasir	0,05 - 0,20
Pasir berlanau Lanau berpasir	0,15 - 0,30
Lanau	0,20 - 0,45
Lanau berlempung Lempung berlanau	0,40 - 0,70
Lempung	0,60 - 1,10

Besarnya nilai J yang dipilih akan mempengaruhi besarnya perkiraan daya dukung tiang, oleh karena itu dalam perkembangan selanjutnya direkomendasikan juga 'automatic methods' RAU dan RA2, yang tidak dipengaruhi oleh faktor redaman yang dihitung pada saat V_b (kecepatan ujung bawah tiang) mencapai 0 (tidak bergerak), sehingga daya dukung total pada saat itu seluruhnya statis.

Tiang yang diuji beberapa waktu setelah pemancangan, lengketan tanahnya telah bekerja dengan baik. Lengketan tanah yang cukup besar akan menyebabkan terjadinya 'unloading' selama pengujian, yaitu kecepatan partikel di bagian atas tiang arahnya ke atas akibat gelombang reaksi tanah. Untuk kondisi seperti ini perlu dilakukan koreksi terhadap bagian yang mengalami unloading. Case Method mengusulkan RSU Method untuk memperkirakan daya dukung tiang yang diuji.

$$RSU = (RT + UN) - J \left[F(t) + Z \cdot V(t) \right] - (RT - UN) \quad (4-18)$$

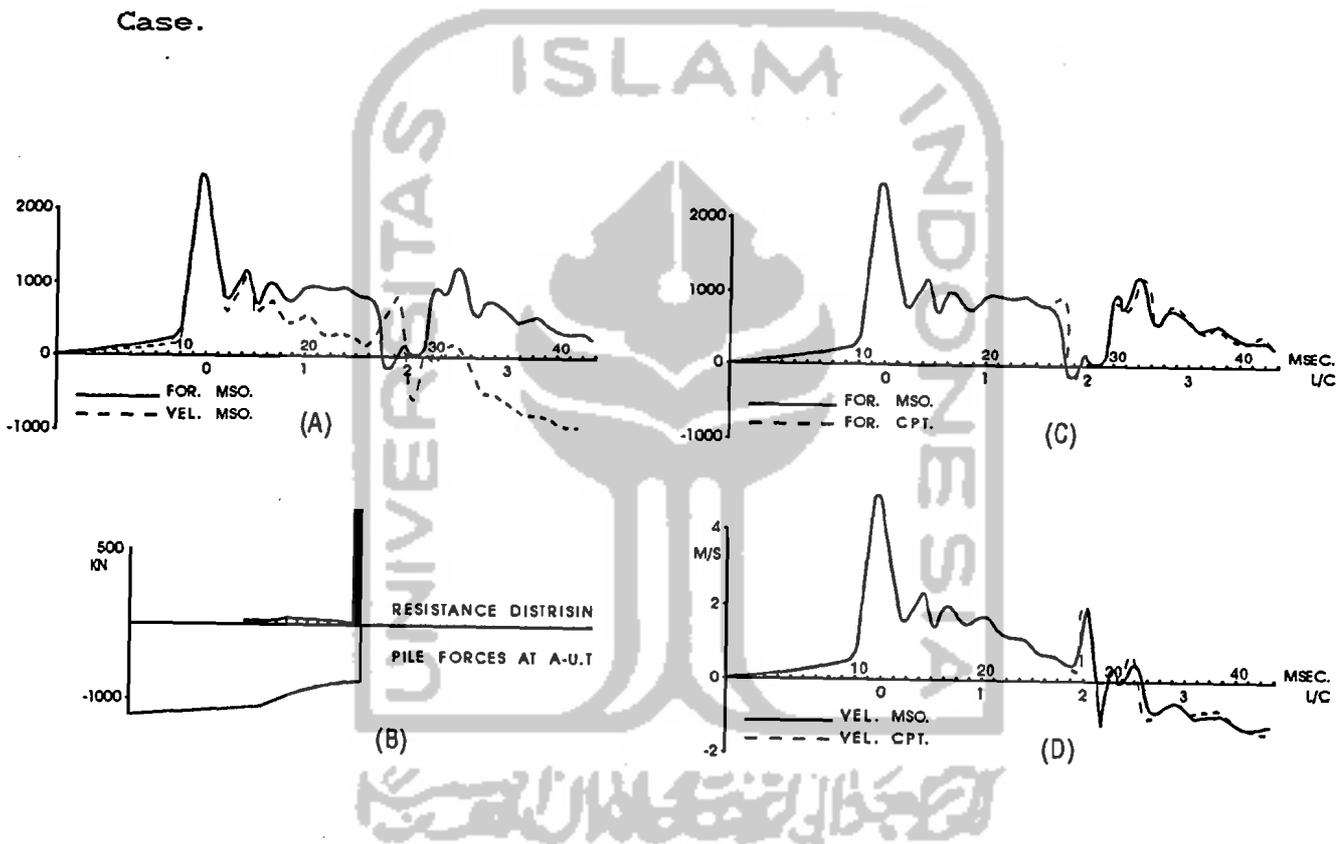
Dimana UN adalah faktor koreksi yang dihitung berdasarkan besarnya lengketan pada segemen tiang yang mengalami unloading.

4.2.6. Metoda CAPWAP

Case Pile Wave Analysis Program atau CAPWAP merupakan metoda analisis yang mengkombinasikan data pengukuran di lapangan dengan tata cara persamaan gelombang untuk menaksir kapasitas daya dukung statis tiang dan distribusi tahanan. Metoda ini juga dimaksudkan untuk memeriksa perkiraan metoda

Case yang dibuatnya.

Analisis CAPWAP menggunakan model matematika dari tiang dan tanah seperti yang digunakan pada program persamaan gelombang. Analisis CAPWAP menghasilkan sebuah penggambaran yang lengkap dari tiang pondasi dan tanah. Sehingga dapat memberikan data yang lebih lengkap dibandingkan metode Case.



Gambar 4.4. Hasil Analisis CAPWAP

Keterangan Gambar 4.4 :

(A) Pengukuran sejarah gaya dan kecepatan di kepala pondasi tiang.

(B) Distribusi tahanan statis pondasi tiang.

(C) Pengukuran dan perhitungan gaya di kepala tiang.

(D) Pengukuran dan perhitungan kecepatan di kepala tiang.

4.3. Pelaksanaan

Pengujian dinamis ini didasarkan pada interpretasi gelombang satu dimensi yang menjalar dalam tiang pondasi akibat tumbukan yang diterima oleh tiang pada tiang pancang. Untuk tiang bor (pondasi tiang yang dicor di tempat) diperoleh dari tumbukan Drop Hammer seberat kira-kira 4,5 ton yang dijatuhkan dari ketinggian bervariasi (sekitar 120-200 cm) sesuai dengan energi yang dibutuhkan untuk menguji daya dukung tiang seperti pada gambar 4.6.

Peralatan yang digunakan untuk uji dinamis seperti yang terlihat pada gambar 4.7 adalah sebagai berikut:

1. Strain transducer

Alat yang berfungsi untuk menerima regangan pada tiang ketika tiang dipancang/ditumbuk. Dalam setiap uji dinamis dipakai dua buah Strain transducer guna menghindari kerusakan yang mungkin terjadi pada salah satu alat. Pemasangan Strain transducer sejarak $1,5x$ diameter tiang untuk menghindari lentur pada tiang seperti ditunjukkan pada gambar 4.4 dan gambar 4.5. Dengan menggunakan hukum Hooke dapat diperoleh gaya yang bekerja pada tiang.

2. Accelerometer

Berfungsi untuk menerima percepatan gelombang yang merambat dalam tiang dengan mengintegrasikan percepatan terhadap waktu diperoleh kecepatan gelombang. Dipakai dua buah Accelerometer dan dipasang sama dengan transducer.

3. Alat Pile Driving Analysis

Alat analisis yang menerima regangan dan percepatan

untuk menguatkan, menyaring dan mengkalibrasi serta kemudian mengubahnya menjadi gaya dan kecepatan yang diproses dengan menggunakan Case Method.

4. Tape Recorder

Berfungsi menyimpan rekaman sehingga memungkinkan untuk mengevaluasi ulang kapasitas tiang dikemudian hari jika diperlukan.

5. Oscilloscope

berfungsi untuk memantau kualitas data perambatan gelombang dan kemungkinan terjadinya kerusakan pada tiang.

6. Alat pencetak Plotter

Berfungsi untuk memplotkan gaya dan kecepatan hasil pengukuran untuk memberikan laporan grafik perambatan gaya dan kecepatan gelombang yang baik sehingga dapat dievaluasikan oleh operator.

7. Komputer

Berfungsi untuk menganalisis data pemancangan tiang dari PDA untuk diproses sehingga diperoleh daya dukung tiang yang diuji.

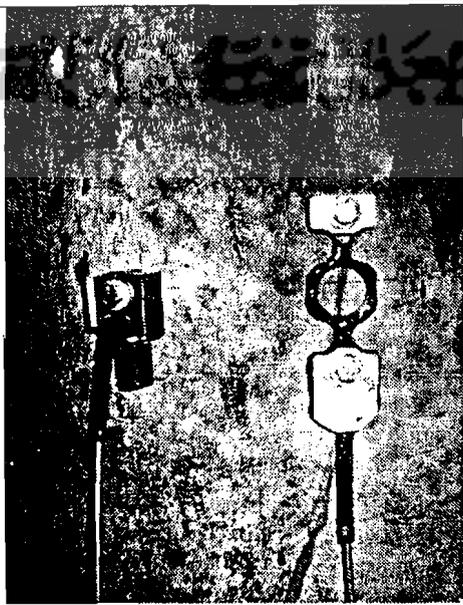
Sistem pengujian adalah sebagai berikut:

1. Dilakukan pelebaran lubang pada tiang bor untuk memasang Strain transducer dan Accelerometer.
2. Tiang bor ditumbuk dengan Drop Hammer sebanyak 2 sampai 5 kali.
3. Hasil rekaman PDA dianalisis lebih lanjut dengan CAPWAP, karena penampang tiang tidak seragam, sedangkan PDA menganggap penampang tiang seragam. Analisis CAPWAP juga perlu untuk memperoleh konfirmasi perkiraan daya dukung

tiang, distribusi kekuatan lapisan tanah dan simulasi pembebanan statis.

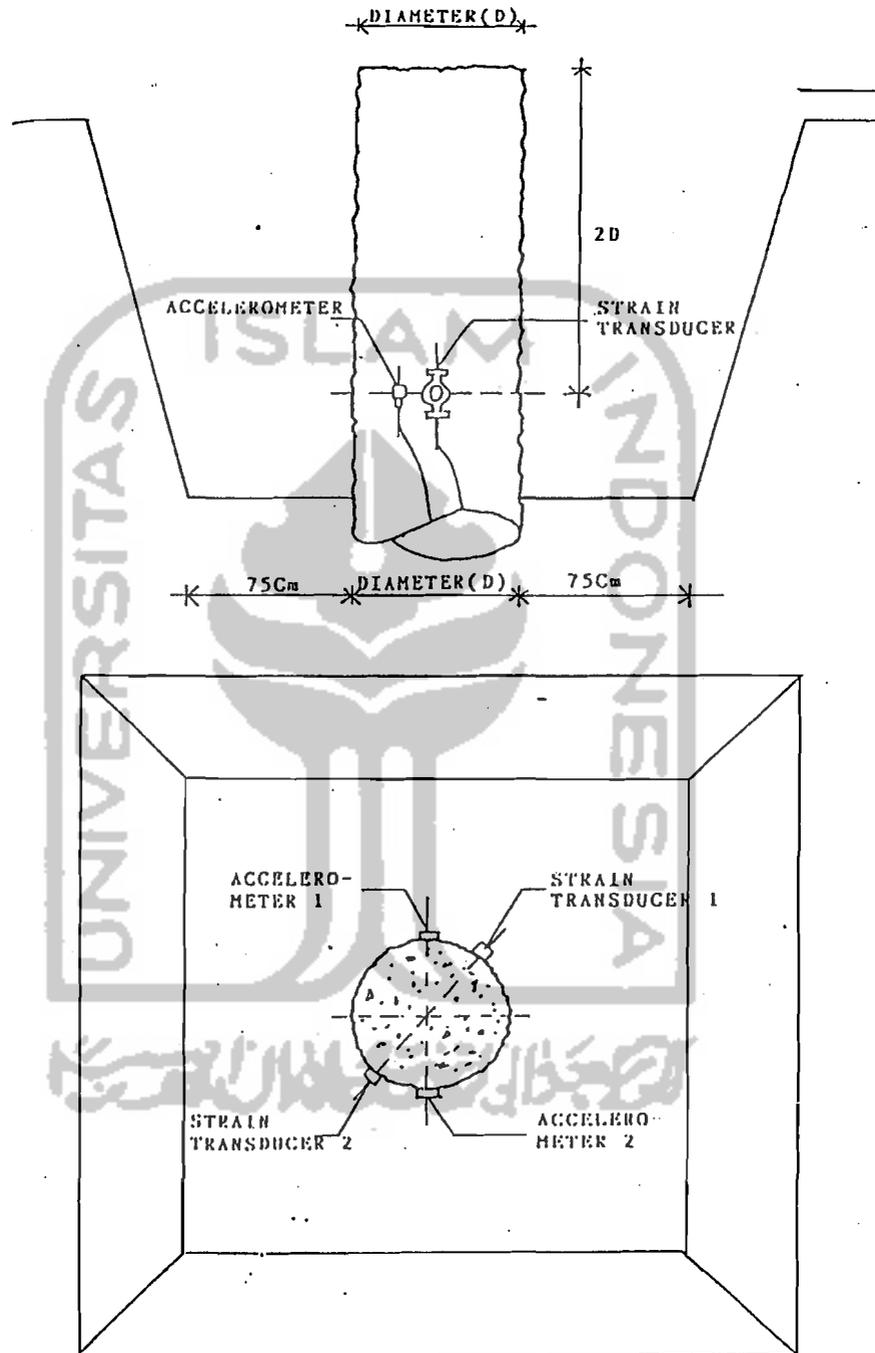
4. Analisis mengenai benturan tiang berdasarkan hasil rekaman PDA dilakukan dengan menganalisis karakteristik kurva F (gaya) dan V (kecepatan). Apabila terjadi retak-retak pada tiang kurva F akan turun dan kurva V akan naik pada saat yang sama.

Dengan kecepatan membaca 1000 "samples" perdetik (10.000 hertz), PDA dapat membaca regangan dan percepatan sebanyak 2500 samples perdetik (4 instrumen dibaca sekaligus). Kecepatan perambatan gelombang di pondasi tiang berkisar antara 5000 m/detik. Jadi waktu yang dibutuhkan oleh gelombang tumbukan untuk merambat ke ujung bawah tiang sepanjang 100 meter dan kembali lagi adalah 0,04 detik. Selama perambatan tersebut, PDA dapat membaca regangan dan percepatan yang terjadi sebanyak 100 samples apabila diperlukan untuk menghasilkan kurva yang baik.

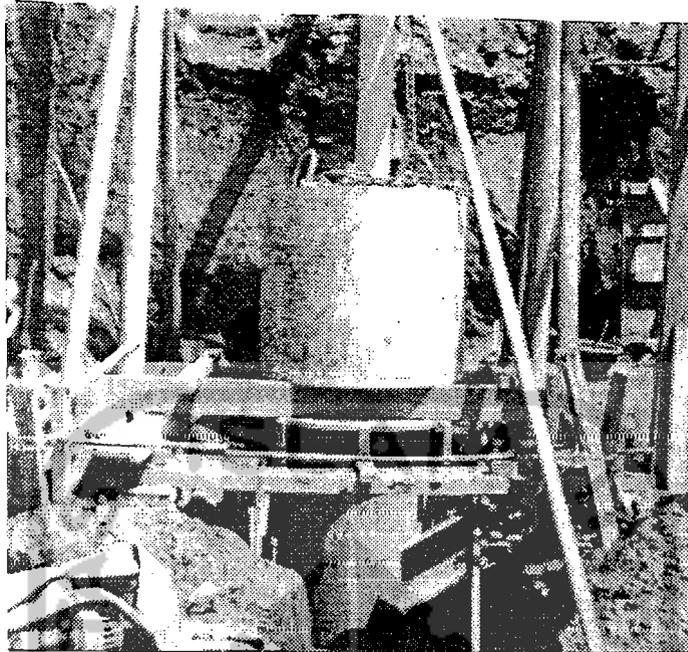


Gambar 4.5. Strain Transducer dan Accelerometer





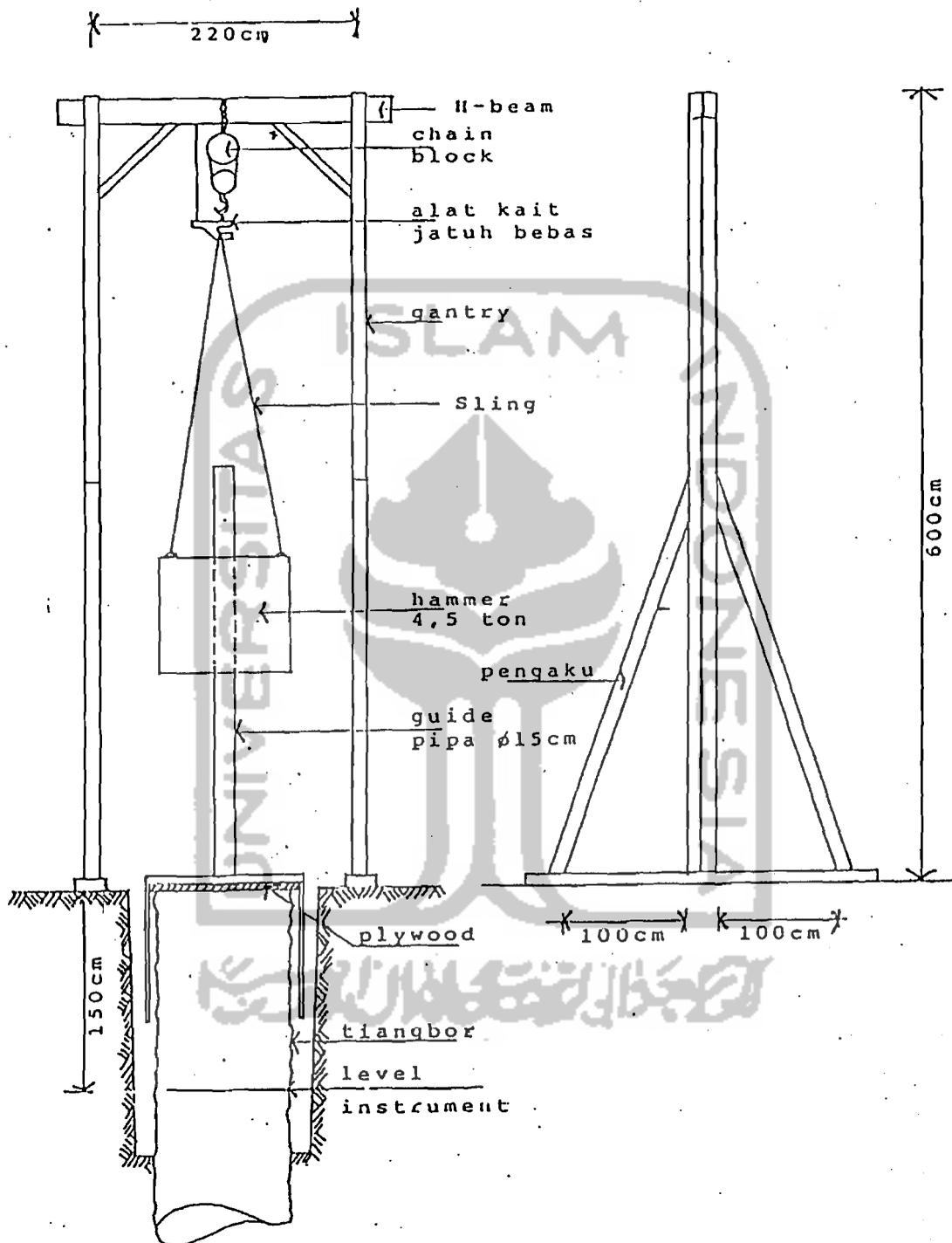
Gambar 4.6. Pemasangan Strain Transducer dan Accelerometer pada tiang pondasi.



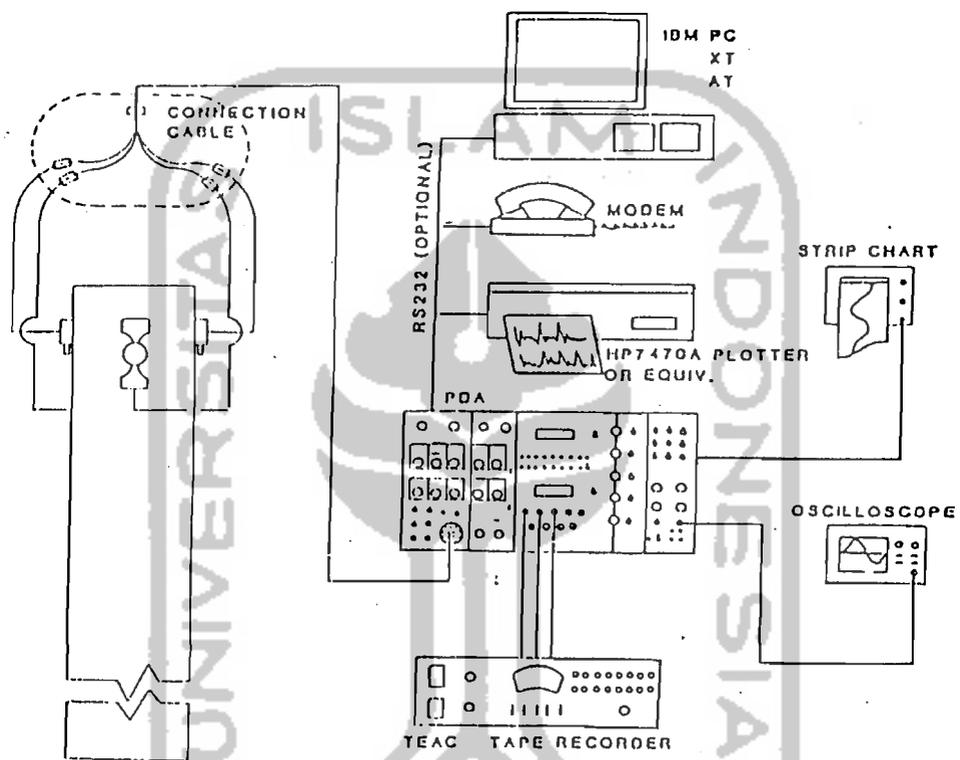
Gambar 4.7. Drop Hammer 4,5 Ton



Gambar 4.8. Peralatan Uji Analisis Tiang, PDA (Kiri), Tape Recorder (Kanan atas) dan Oscilloscope (Kanan bawah).



Gambar 4.9. Pelaksanaan Pengujian Beban Dinamis Menggunakan Drop Hammer



Gambar 4.10. Skema Peralatan PDA di Lapangan