

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Teori Dasar Rambat Gelombang**

Gelombang dapat didefinisikan sebagai gangguan sifat fisis suatu medium yang merambat melalui medium tersebut menurut waktu dan tempat, tetapi mediumnya sendiri tidak ikut bergerak bersama gelombang. Jika ditinjau dari arah rambat gelombang dan arah getar partikel-partikel medium, maka gelombang dapat dibedakan sebagai berikut :

1. Gelombang transversal, jika arah rambat gelombang tegak lurus arah getar partikel-partikel medium. Gelombang transversal hanya dapat terjadi dalam zat padat.
2. Gelombang longitudinal, jika arah rambat gelombang sejajar arah getar partikel-partikel medium. Gelombang ini dapat merambat dalam semua wujud zat (padat, gas dan cair).
3. Gelombang torsional, jika medium (medannya) berputar.

Gelombang dapat merambat dalam medium zat padat, cair dan gas maupun vakum. Ditinjau dari mekanisme dan cepat rambatnya,

Gelombang dapat dibedakan menjadi :

- a. Gelombang mekanis, yaitu gelombang yang membutuhkan medium.
- b. Gelombang elastis, yaitu gelombang-gelombang yang mempunyai cepat rambat bergantung pada besaran-besaran elastisitas.
- c. Gelombang permukaan, yaitu gelombang yang mempunyai cepat rambat bergantung pada besaran-besaran permukaan cairan.
- d. Gelombang elektromagnetik, yaitu gelombang-gelombang yang mempunyai cepat rambat bergantung pada besaran-besaran listrik dan magnet.

Jika suatu batang atau tiang diberi gangguan di salah satu ujungnya, misalnya dipukul dengan palu, maka gangguan tersebut akan merambat sepanjang batang atau tiang dan dapat dirasakan pada ujung lainnya. Dapat dikatakan bahwa suatu gelombang longitudinal elastis merambat

sepanjang batang atau tiang tersebut. Oleh karena itu, gelombang yang disebabkan oleh tumbukan (impact) yang dipukulkan secara vertical pada permukaan pondasi merupakan gelombang longitudinal elastis. Gelombang ini disebut juga P-wave atau Primary Wave.

## 2.2 Perambatan Gelombang Pada Tiang

1. Asumsi batang silindris, dipukul dengan palukecil, kemudian terjadi compression move, merambat hingga ke ujung tiang dan dipantulkan kembali
2. Jika kecepatan gelombang dalam material dinyatakan sebagai  $c$  dan panjang tiang  $L$ , maka pantulan akan terjadi pada waktu  $2L/c$ ; nilai  $c$  ini  $z_t$  bervariasi tergantung material tiang yang didefinisikan sebagai:

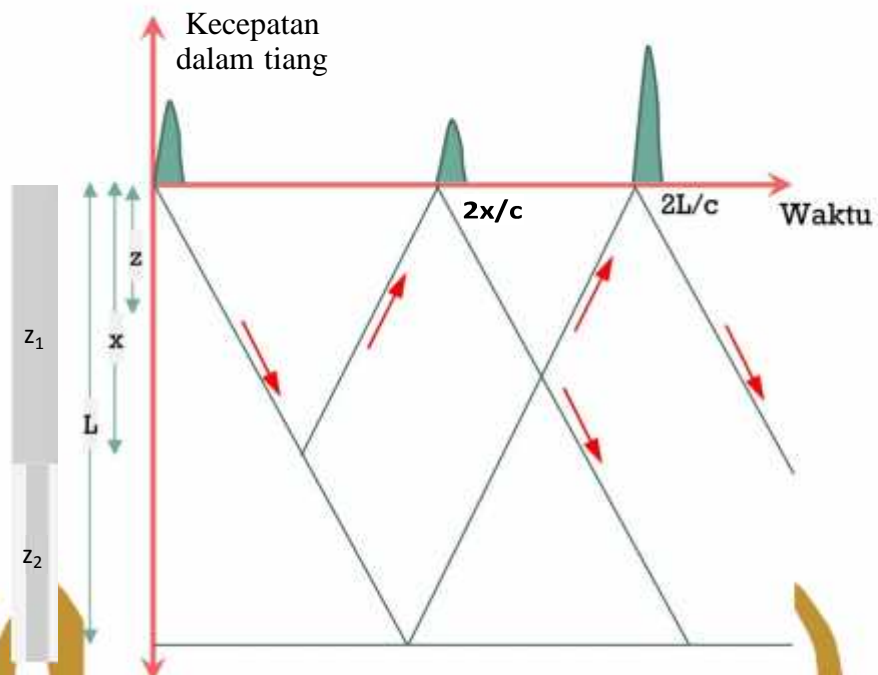
$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

(Aksan 2021)

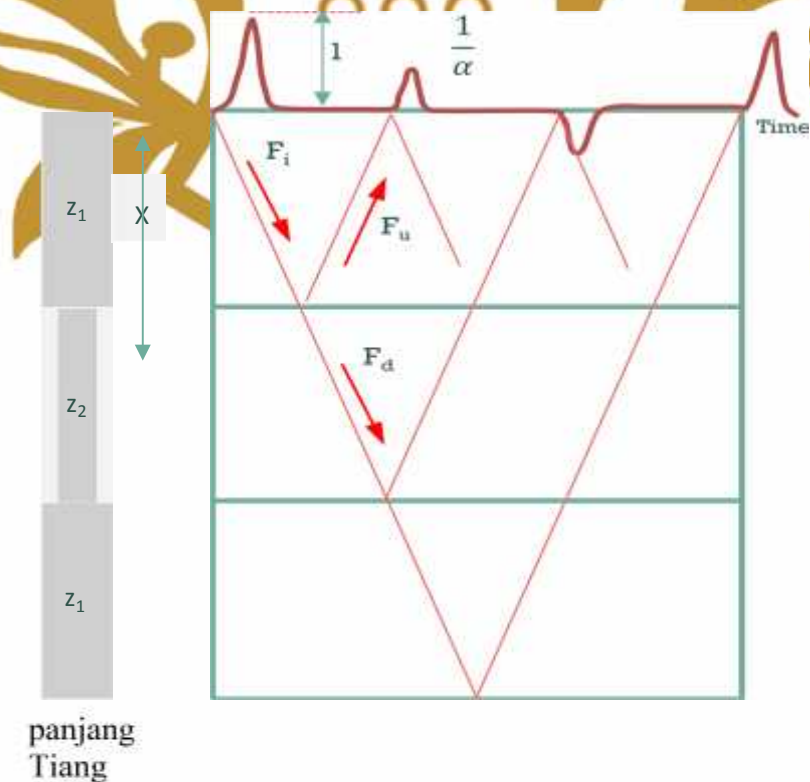
3. Pantulan yang terjadi disebabkan oleh variasi nilai impedansi,  $Z$  yang dapat dihitung dengan persamaan :

$$Z = \frac{E \cdot A}{c}$$

(Aksan 2021)



Gambar 2.1 Kecepatan Gelombang Pada Batang Silindris Dengan Pukulan Palu Kecil.



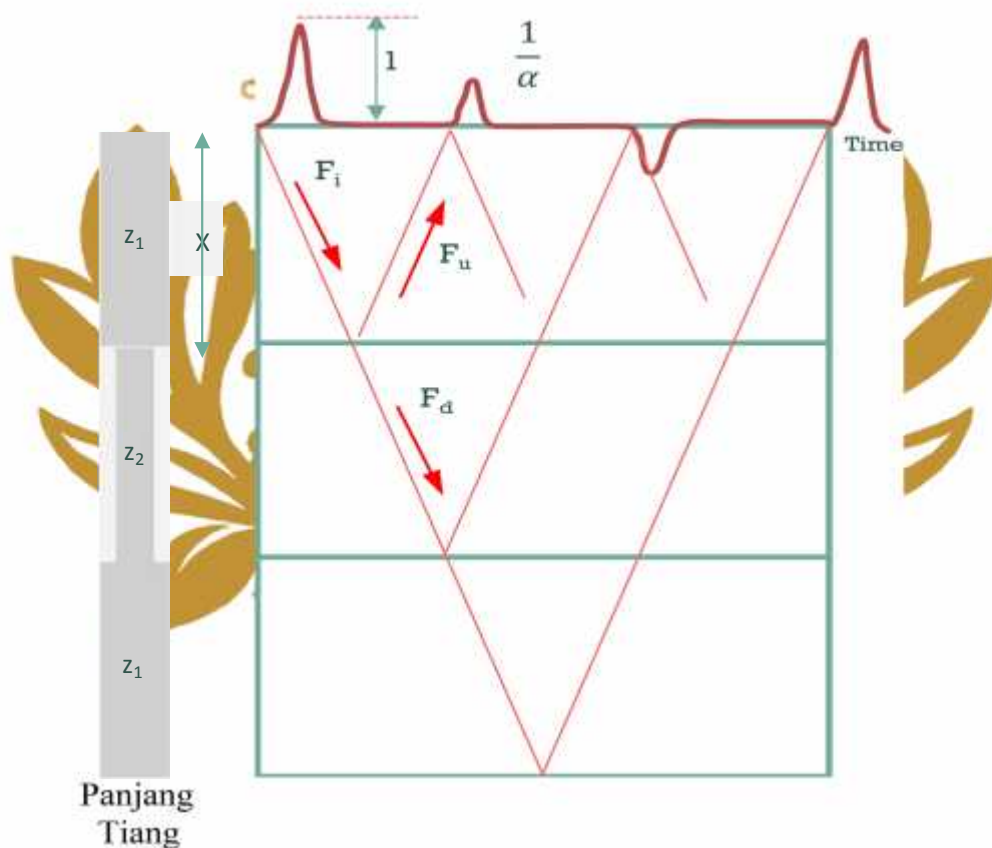
Gambar 2.2 Asumsi Gelombang Yang Bergerak Ke Bawah. Asumsi bahwa terjadi gelombang input yang bergerak ke bawah,  $F_i$  akan

terbagi menjadi gelombang ke atas  $F_u$  dan gelombang ke bawah,  $F_d$ , atau dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$A_d = F_i + F_r$$

Kontinuitas akan terjadi jika kecepatan gelombang yang terjadi ditambahkan dengan nilai yang sama pada kedua bagian tiang yang mengalami perubahan impedansi, yaitu:

$$V_d = V_i + V_u \quad (\text{Aksan 2021})$$



Gamabar 2.3 Persamaan Mekanika Gelombang

Berdasarkan persamaan mekanika gelombang dimana gaya  $F$  akan mengalami kesetimbangan terhadap kecepatan  $v$  dan impedansi  $Z$ , maka terjadi hubungan antar gaya dan kecepatan dalam gelombang:

$$F_d = Z_2 \cdot V_d \quad (\text{Aksan 2021})$$

$$F_p = (-Z_1) V_p \quad (\text{Aksan 2021})$$

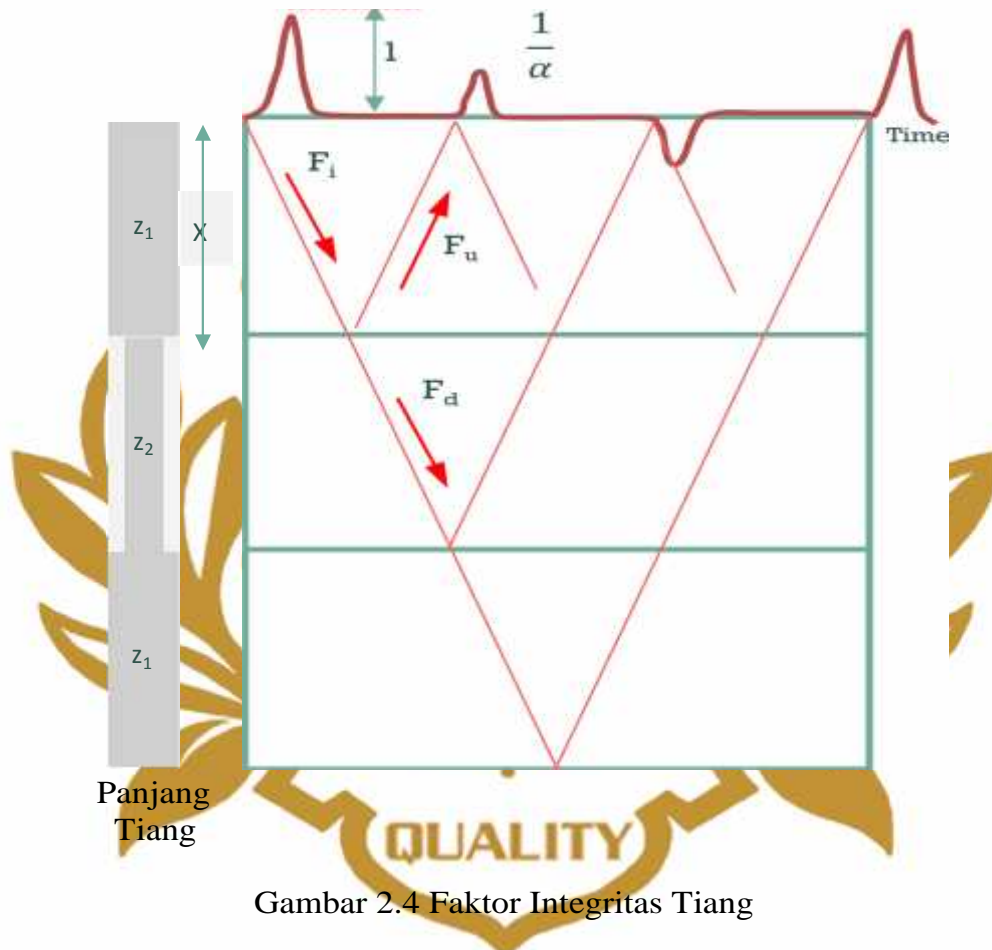


$$F_i = Z_1 \cdot V_i$$

Itemudian diperoleh:

$$\frac{F_d}{Z_2} = \frac{F_i}{Z_1} = \frac{F_u}{Z_1}$$

( Aksan 2021 )



Gambar 2.4 Faktor Integritas Tiang

Sekarang, faktor integritas dinyatakan sebagai:

$$\beta = \frac{Z_2}{Z_1}$$

( Aksan 2021 )

Persamaan dituliskan menjadi:

$$F_d = \beta \cdot (F_i - F_u)$$

( Aksan 2021 )

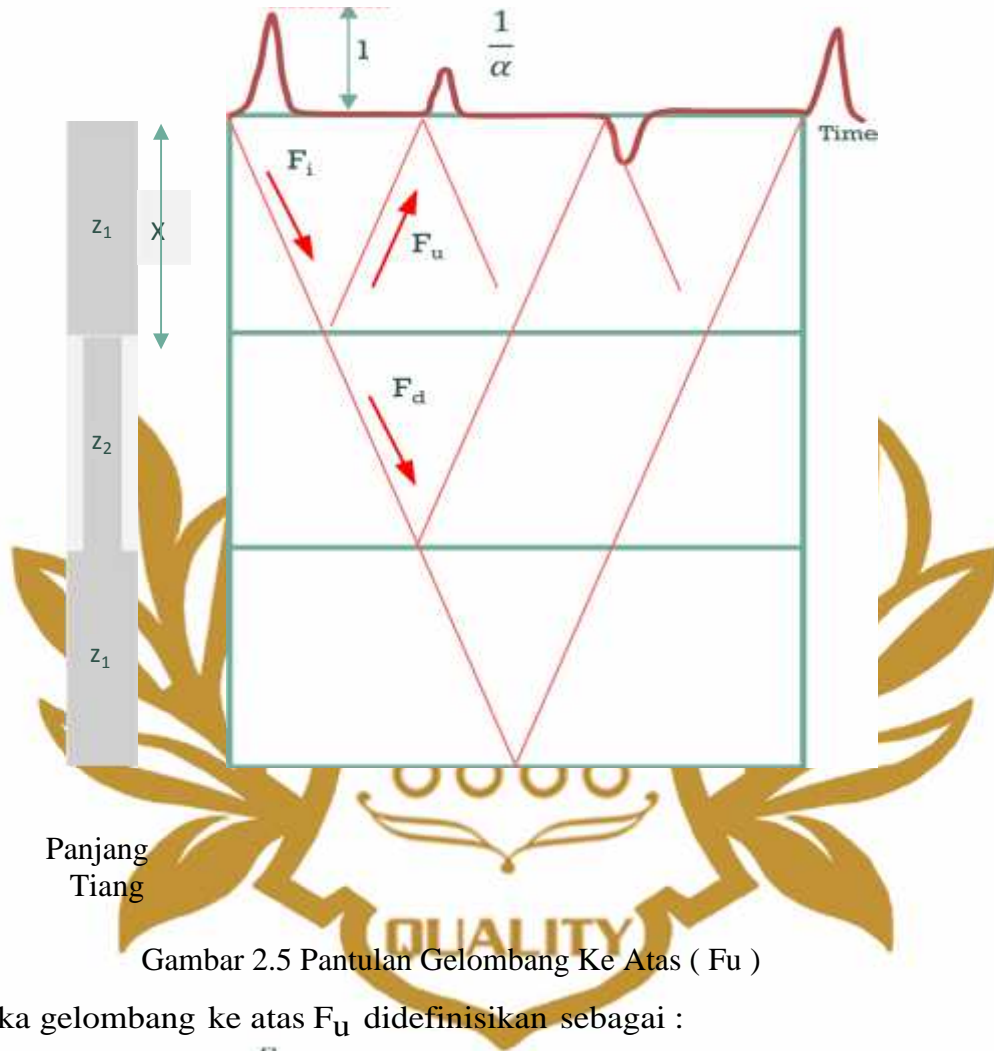
Substitusikan, akan diperoleh:

$$F_i + F_u = \beta \cdot (F_i - F_u)$$

( Aksan 2021 )

$$\frac{1 - \beta}{8}$$

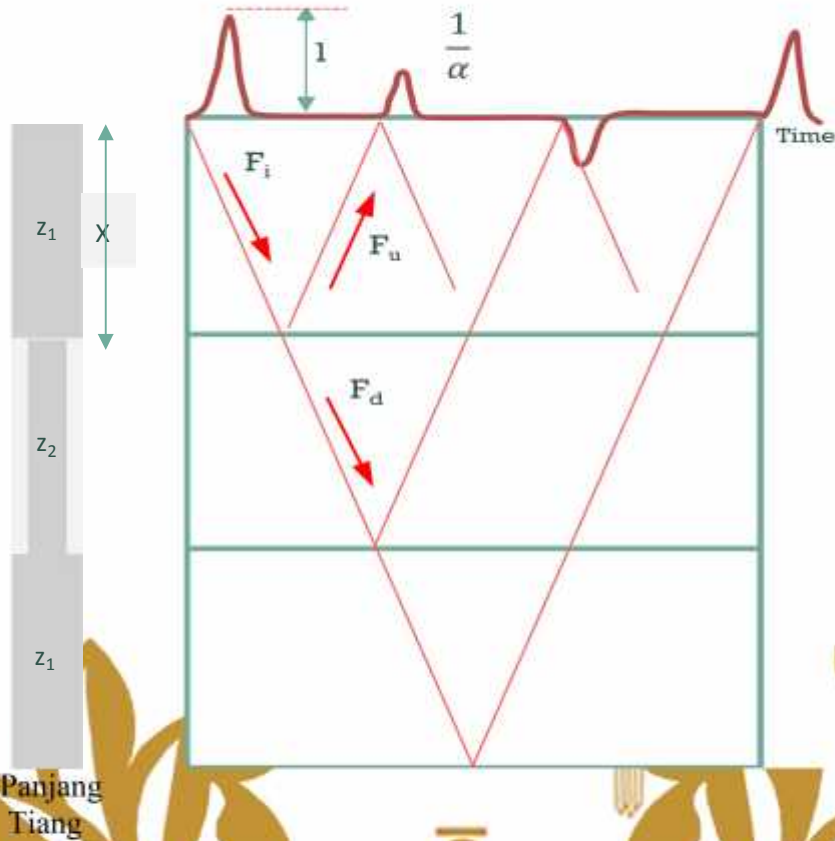
$$F_r = F_i \frac{1 - Q}{1 + Q} \quad (\text{Aksan 2021})$$



Gambar 2.5 Pantulan Gelombang Ke Atas (  $F_u$  )

Jika gelombang ke atas  $F_u$  didefinisikan sebagai :

$$\frac{F_u}{F_i} \quad (\text{Aksan 2021})$$



Gambar 2.6 Kecepatan Gelombang Gaya F Pada Permukaan Tiang

Pada kepala tiang, gelombang ke atas akan menghasilkan selisih antara gaya dan kecepatan, sebesar:

$$2 \cdot F_u = F_{top} - Z_1 \cdot v_{top} \quad (\text{aksan 2021})$$

Untuk uji PIT,  $F_t$  p selalu nol sesudah gelombang *impact* awal; sehingga gelombang ini dapat juga dinyatakan sebagai kecepatan, (sebagai akibat dari aumsi proporsionalitas saat pukulan terjadi) sehingga:

### 2.3 Pile Integrity Test (P.I.T)

Pondasi tiang dapat mengalami kerusakan/ cacat dalam proses pelaksanaannya, untuk itu pengujian keutuhan tiang perlu dilakukan. Pile Integrity Tester (PIT) merupakan peralatan yang terdiri dari mini computer, sensor accelerometer, dan palu kecil. Tujuan dari pengujian PIT adalah untuk memverifikasi integritas dari tiang, profil tiang, ujung tiang, dan kedalaman tiang. Pengujian keutuhan tiang menggunakan alat PIT dilakukan dengan menganalisa gelombang yang ditransfer sepanjang tiang akibat gaya yang diberikan oleh palu

Genggam pada kepala tiang tanpa menyebabkan deformasi sehingga dapat dikatakan dalam keadaan elastis. Gelombang ditransfer sepanjang beton dengan rentang kecepatan gelombang 3300 – 4500 m/s. Apabila terjadi pantulan saat perjalanan gelombang, maka dapat disimpulkan adanya perubahan impedansi pada tiang.

Perubahan impedansi (BTA) adalah perbandingan antara area bagian tiang yang terekam terhadap desain area tiang dalam ditunjukkan dalam persentase. Perubahan BTA pada tiang menunjukkan adanya refleksi pada kurva kecepatan pada lokasi dimana terjadinya perubahan impedansi.

## **2.4 Perangkat Alat Pile Integrity Test (P.I.T)**

### **2.4.1 Akselerometer**

Akselerometer adalah suatu alat transducer untuk mengukur percepatan gaya. Percepatan gaya ini bisa statis, seperti gaya konstan dari gravitasi, atau bisa juga dinamis yaitu yang disebabkan oleh gerakan atau getaran dari akselerometer tersebut. Fungsi dari akselerometer ini adalah untuk menganalisis gerakan atau gaya eksternal pada suatu struktur. Gaya ini biasanya dikaitkan dengan percepatan atau akselerasi dari struktur yang diuji. Akselerometer biasanya terbuat dari bahan piezoelectric atau piezoresistive. Gaya yang disebabkan oleh getaran atau perubahan gerakan (akselerasi) menyebabkan massa menekan material piezoelectric (berisi struktur kristal mikroskopik) tersebut, yang menghasilkan muatan listrik yang proporsional dengan gaya yang dikenakan. Oleh karena muatan yang dihasilkan proporsional terhadap gaya, dan massa adalah konstan, maka muatan tersebut juga proporsional terhadap akselerasi.

### **2.4.2 Hammer**

Hammer yang dimaksud adalah palu tangan kecil yang digunakan untuk memberikan impact pada permukaan atas tiang sehingga menghasilkan suatu gelombang pendek dengan tingkat tegangan yang rendah. Hammer ini ada dua tipe, yaitu non-instrumented hammer yang digunakan dalam metode Pulse Echo Method (PEM) dimana hammer tidak dihubungkan ke processing unit. Dan instrumented hammer yang digunakan dalam metode Transient Response



Method (TRM) dimana hammer dihubungkan ke processing unit dengan dilengkapi kabel untuk membaca data impuls gaya ( $F/Z$ ). Instrumented hammer ini disebut juga acceleration hammer, karena berfungsi sama seperti accelerometer untuk merekam data-data akselerasi. Selama terjadi tumbukan atau impact, hammer dan tiang akan saling berhubungan, dan gaya yang ditimbulkan oleh impact tersebut akan berbanding lurus atau proporsional dengan percepatan. Konstanta proporsionalitas ini disebut impedansi ( $Z$ ) pada permukaan atas tiang. Untuk mempermudah, maka  $F/Z$  dapat disebut gaya (force) saja. Gaya ( $F/Z$ ) dan kecepatan ( $V$ ) tersebut diharapkan kurang lebih sama selama impact terjadi pada tiang. Namun, data-data gaya ( $F/Z$ ) tersebut tidak lagi memberikan pengaruh setelah hammer tidak bersentuhan pada permukaan atas tiang.

#### **2.4.3 pile integrity test ( PIT )**

P.I.T adalah suatu alat dan system analisa yang digunakan dalam pengujian integritas tiang dengan menggunakan metode tegangan rendah pada permukaan tiang (low-strain surface-impact method). Alat ini mudah dioperasikan dan dibawa oleh satu orang untuk menguji sejumlah tiang dengan efisien. P.I.T Collector ini telah dikembangkan selama kurang lebih satu dekade oleh Pile Dynamics, Inc. Alat ini merekam dan memproses sinyal gelombang yang masuk baik dari akselerometer maupun dari instrumented hammer. Prosesnya adalah tumbukan/gaya yang kecil (impact) diberikan pada permukaan atas tiang, biasanya digunakan palu tangan (hand-held hammer) yang khusus, lalu terbentuk gelombang akibat impact tersebut yang menyebar ke bawah disepanjang tiang. Refleksi atau pantulan gelombang yang terjadi dipengaruhi oleh bentuk dan kualitas material yang digunakan, dimana hal ini diamati berdasarkan saat gelombang tersebut telah kembali ke permukaan. Getaran pada permukaan tiang akibat impact atau tumbukan hammer akan terekam P.I.T Collector, hingga semua refleksi atau pantulan gelombang dapat kembali ke permukaan tiang. Hasil rekaman oleh P.I.T *Collector* tersebut akan tersimpan dalam PCMCIA *flash card* dan dapat langsung dilihat pada layar.

## 2.5 Analisis Dan Interpretasi Hasil Uji Pit

Dasar teori analisis uji PIT ini adalah amplitudo rambatan gelombang tekan sepanjang tiang dimana akan :

- a. Berkurang terhadap kedalaman bila sifat tanah, keseragaman bahan dan ukuran penampang tiang tetap dan gelombang datang (incident wave) tersebut hanya akan dipantulkan kembali ke kepala tiang saat gelombang mencapai dasar tiang. Dalam hal ini kecepatan berkurangnya amplitude bersifat konstan dan disebabkan oleh dua hal: redaman (damping) tanah dan perlemahan gelombang ketika merambat melalui material tiang yang merupakan fungsi diameter tiang.
- b. Berkurang secara tiba-tiba ketika dijumpai ketidakseragaman pada material tiang, perubahan penampang dan perubahan sifat kekerasan tanah. Berkurangnya amplitude disebabkan pantulan gelombang tekan ke arah kepala tiang. Dengan memantau pantulan gelombang ke kepala tiang dapat diperkirakan ada/tidak adanya kerusakan dan/atau perubahan penampang tiang. Setiap pantulan gelombang disebabkan oleh perubahan impedansi tiang. Semakin besar impedansi tiang semakin besar pula gelombang pantul yang terpantau di kepala tiang. Parameter impedansi ini merupakan kumpulan dari karakteristik tiang dan tanah.

Berdasarkan keterbatasan-keterbatasan di atas sangat penting untuk diketahui dalam melakukan dan menginterpretasikan uji PIT. Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah memperoleh grafik uji PIT yang konsisten. Artinya, dalam beberapa pemukulan selalu didapatkan hasil yang mirip satu dengan lainnya. Secara garis besar, bentuk sinyal yang diperoleh dari uji PIT dapat dikategorikan sebagai berikut:

1. Tidak ada pantulan gelombang :  
Bila tidak dijumpai pantulan biasanya bukan karena alat kurang peka, melainkan karena redaman tanah yang terlalu besar dan/atau karena tiang yang terlalu panjang.
2. Hanya ada satu pantulan :

Ini terjadi karena dijumpai perubahan yang besar, dapat terjadi karena pantulan dari ujung tiang, perubahan penampang tiang atau perubahan lapisan tanah.

3. Ada beberapa pantulan yang berulang dalam interval yang sama :

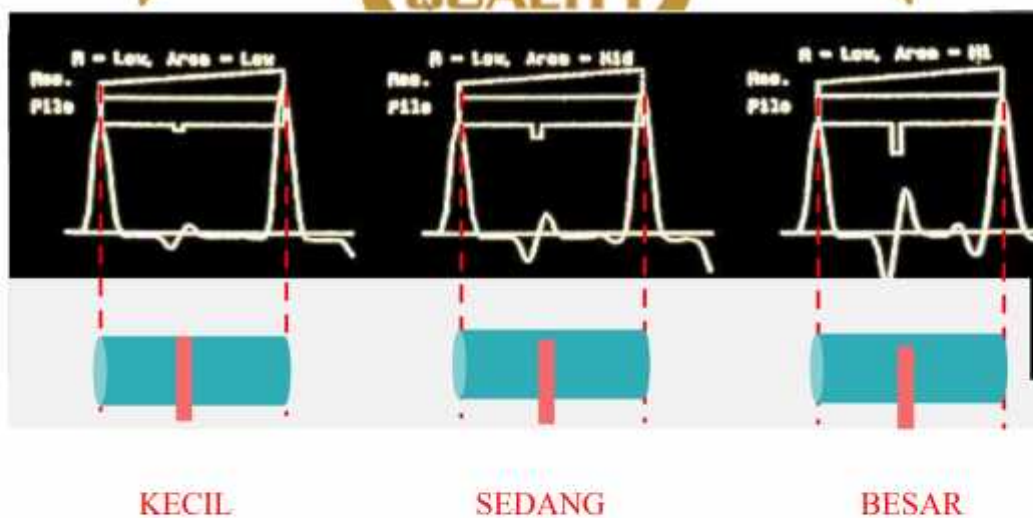
Ini biasanya mengindikasikan adanya keretakan horizontal pada tiang yang diuji.

4. Ada beberapa pantulan yang kurang teratur :

Dalam hal ini diperlukan analisa yang lebih teliti. Biasanya dapat dilakukan pemodelan komputer untuk memperhitungkan faktor redaman tanah, untuk kemudian dilakukan proses pencocokan sinyal (signal matching) antara hasil yang diperoleh dari pemodelan komputer dengan sinyal dari hasil uji. Output dari pemodelan ini adalah diperolehnya perkiraan diameter tiang terhadap kedalaman.

Dalam menginterpretasikan hasil uji PIT ini sebaiknya selalu dilengkapi dengan data uji tanah setempat, metoda konstruksi dan data pelaksanaan tiang serta data-data lain yang berhubungan, misalnya kedalaman tiang, data pembesian, data pemancangan, data sambungan tiang dan lain-lain yang relevan. Juga akan lebih baik bila tiang yang diuji dalam satu proyek cukup representatif jumlahnya agar dapat dideteksi adanya penyimpangan sinyal yang diperoleh. Beberapa contoh sederhana di bawah ini menunjukkan perlunya informasi pelengkap di atas.

### 2.5.1 Contoh Kerusakan Pada Tiang

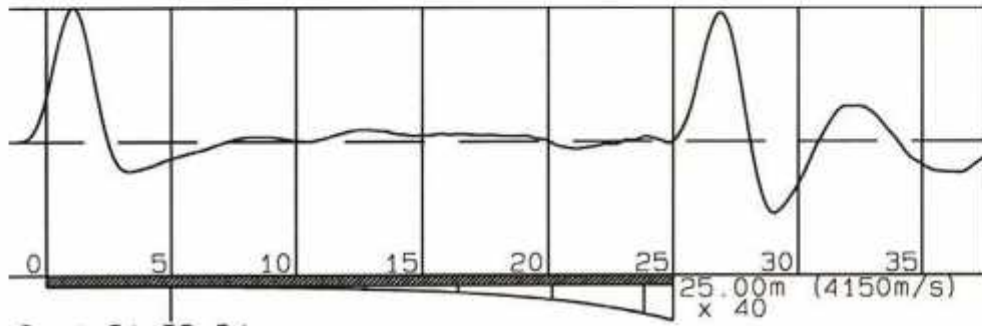


Gambar 2.7 Contoh Karakteristik Kerusakan Tiang Pondasi Dalam Tanah



## 2.5.2 Contoh Data Tiang Dengan Keadaan Baik

Contoh data tiang dengan baik dapat di lihat pada gambar dibawah:



Gambar 2.8 Contoh Tiang Pondasi Yang Baik Di Mana Terjadi Pantulan Gelombang Yang Sempurna

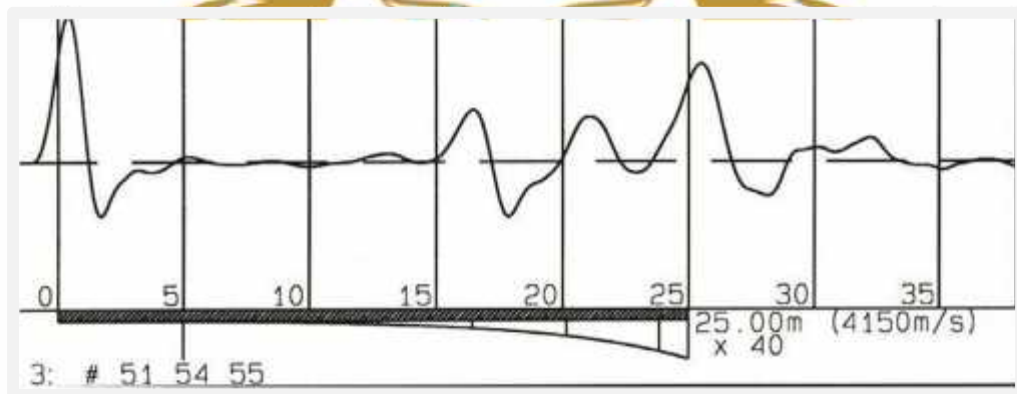
1. Tiang dalam kondisi bagus, pantulan ujung terlihat jelas tanpa adanya pantulan lain di sepanjang badan tiang dengan asumsi panjang dan kecepatan gelombang yang masih berada dalam kisaran batas. Data ini dapat menunjukkan tiang dapat diterima variasi luas penampang maupun kualitas materialnya.
2. Tidak ada indikasi kerusakan mayor, data tidak memperlihatkan adanya pantulan di sepanjang asumsi panjang tiang, namun karena tidak adanya pantulan ujung tiang, tidak dapat diketahui ujung tiang dengan asumsi kecepatan gelombang benar
3. Tidak ada indikasi kerusakan utama hingga kedalaman x, hal ini disebabkan oleh adanya batasan dari uji PIT sehingga gelombang hanya dapat merambat hingga kedalaman tertentu. Kategori ini biasanya muncul pada tiang friksi yang panjang atau adanya pembesaran pada tiang atau adanya tahanan tanah yang sangat tinggi.
4. Tiang dalam kondisi bagus, pantulan ujung terlihat jelas tanpa adanya pantulan lain di sepanjang badan tiang dengan asumsi panjang dan kecepatan gelombang yang masih berada dalam kisaran batas. Data ini dapat menunjukkan tiang dapat diterima variasi luas penampang maupun kualitas materialnya.



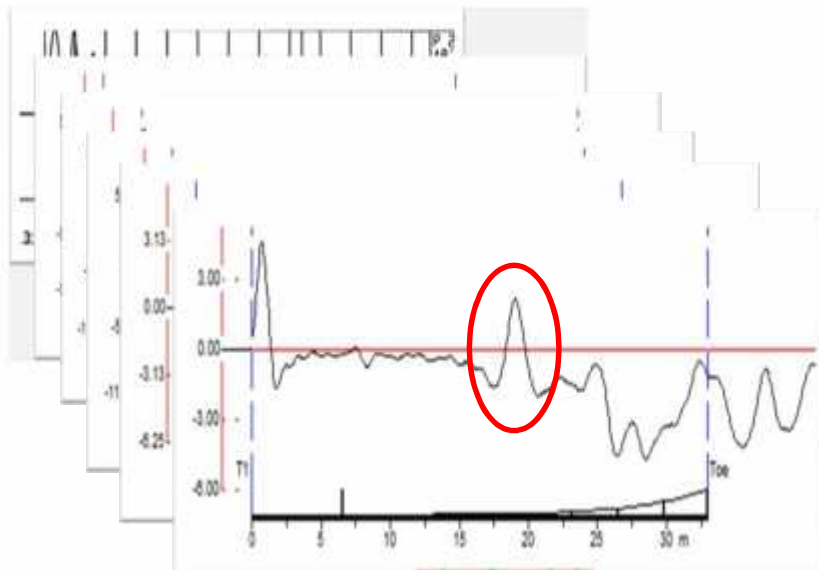
5. Tiang dalam kondisi bagus, pantulan ujung terlihat jelas tanpa adanya pantulan lain di sepanjang badan tiang dengan asumsi panjang dan kecepatan gelombang yang masih berada dalam kisaran batas. Data ini dapat menunjukkan tiang dapat diterima variasi luas penampang maupun kualitas materialnya.
6. Tidak ada indikasi kerusakan mayor, data tidak memperlihatkan adanya pantulan di sepanjang asumsi panjang tiang, namun karena tidak adanya pantulan ujung tiang, tidak dapat diketahui ujung tiang dengan asumsi kecepatan gelombang benar
7. Tidak ada indikasi kerusakan utama hingga kedalaman x, hal ini disebabkan oleh adanya batasan dari uji PIT sehingga gelombang hanya dapat merambat hingga kedalaman tertentu. Kategori ini biasanya muncul pada tiang friksi yang panjang atau adanya pembesaran pada tiang atau adanya tahanan tanah yang sangat tinggi.

### 2.5.3 Contoh Data Tiang Yang Buruk

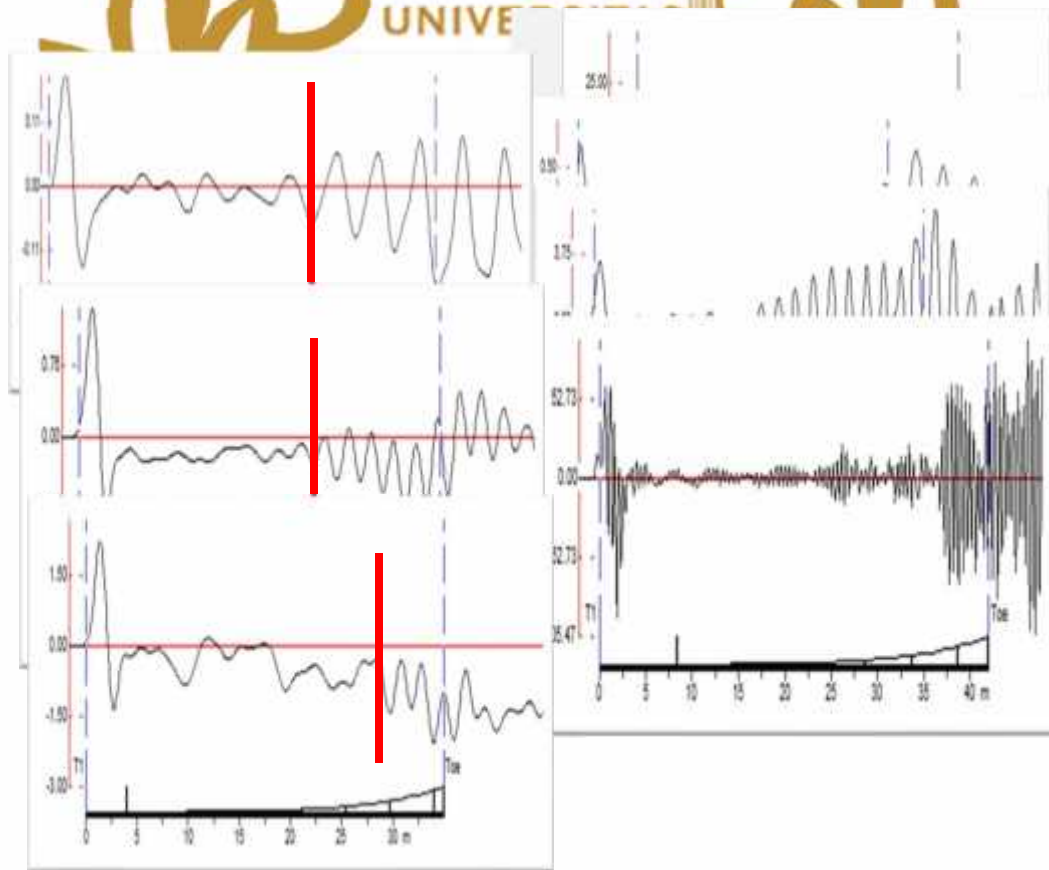
Berikut adalah contoh data tiang yang buruk bisa dilihat pada gambar yang dibawah:



Gambar 2.9 Contoh Data Tiang Yang Buruk Dimana Terjadi Rambatan Atau Pantulan Gelombang Yang Berulang-ulang Pada Tiang Pondasi Dalam Tanah



Gambar 2.10 Adanya Perubahan Impedansi Pada Kedalaman 18 M



Gambar 2.11 Contoh Data Yang Sudah Di Analisa Dimana Terjadi Pantulan Gelombang Yang Tidak Sempurna

1. indikasi adanya kerusakan minor pada sekitar kedalaman  $x$ , PD $x$  indikasi adanya kerusakan mayor pada kedalaman  $x$
2. data tidak dapat dianalisa pada kedalaman dibawah  $x$ , hal ini mungkin disebabkan adanya vibrasi yang terlalu besar saat pengujian
3. data sama sekali tidak dapat dianalisa, mungkin disebabkan oleh kepala tiang yang masih bercampur lumpur, retak atau adanya sambungan sehingga sinyal tidak dapat terkirim dengan baik dan menghalangi pantulan ujung tiang.

## **2.6 Metode Pelaksanaan Pile integrity test ( PIT )**

### **2.6.1 Berikut Ini Yang Sangat Menentukan Kualitas Data Dari PIT:**

1. Pengujian dilakukan di kepala tiang yang rata dan berupa beton bersih
2. Alat dalam kondisi prima, mampu merekam dengan baik gelombang yang ditimbulkan oleh impact pada permukaan kepala tiang yang diuji.
3. PIT memiliki keterbatasan kedalaman yakni hingga 30-40 kali diameter tiang
4. Pengujian harus dilakukan beberapa kali sampai hasil grafik relatif konsisten
5. Testing Engineer harus mengerti dasar teori tentang PIT.
6. Semua prosedur pengetesan PIT harus memenuhi standard yang telah ditentukan oleh ASTM D-5882 terbaru.

### **2.6.2 Persiapan Kepala Tiang Untuk Pengujian PIT :**

1. Gerinda harus di dalazw tulangan.
2. Minimal “3” lokasi gerinda.
3. Gerinda harus pada beton keras dan hasilnya harus
4. rata dan halus.
5. Saat pemukulan palu, tulangan jangan disentuh.
6. Permukaan beton harus kering.



Gambar 2.12 Contoh Kepala Tiang Yang Tidak Bisa Di Uji



Gambar 2.13 Contoh Kepala Tiang Yang Bagus Atau Bisa Di Uji





Tabel 1 Ketentuan Titik Uji Pile Integrity Test

No	Jumlah		Keterangan
	Bentang Jembatan	Jumlah Titik	
1	Pendek (6-20 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1-2 Titik</li> <li>• 10% dari jumlah tiang</li> <li>• Setiap lokasi abutment dan pilar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berdasarkan kecurigaan pada pelaksanaan pekerjaan pondasi</li> <li>• Menyesuaikan dengan kebutuhan</li> <li>• Menyesuaikan jika dilakukan uji HSDP dan Sonic Logging</li> </ul>
2	Sedang (20-100 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2-3 Titik</li> <li>• 10% dari jumlah tiang</li> <li>• Setiap lokasi abutment dan pilar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berdasarkan kecurigaan pada pelaksanaan pekerjaan pondasi</li> <li>• Menyesuaikan dengan kebutuhan</li> <li>• Menyesuaikan jika dilakukan uji HSDP dan Sonic Logging</li> </ul>
3	Panjang (>100 m)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3-4 Titik</li> <li>• 10% dari jumlah tiang</li> <li>• Setiap lokasi abutment dan pilar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berdasarkan kecurigaan pada pelaksanaan pekerjaan pondasi</li> <li>• Menyesuaikan dengan kebutuhan</li> <li>• Menyesuaikan jika dilakukan uji HSDP dan Sonic Logging</li> </ul>