

BAB II

STUDI LITERATUR

2.1 PENDAHULUAN

Untuk memberikan pengetahuan dasar mengenai pengujian *low strain integrity testing* dinding penahan tanah, yang tentunya diperlukan sebagai acuan teori yang dapat mendukung penulis dalam melakukan analisa, maka pada bab ini penulis mencoba untuk menyampaikan penjelasan teori – teori yang berkaitan penulisan skripsi tersebut. Termasuk cara mengukur perambatan gelombang, studi kasus sebelumnya, material beton, serta penjelasan mengenai program yang digunakan yakni PLAXIS v8.

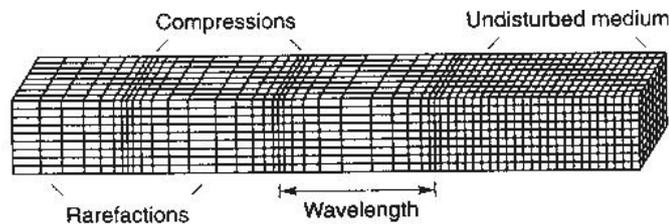
2.2 PERAMBATAN GELOMBANG

2.2.1 Teori Dasar

Gelombang adalah getaran yang merambat melalui suatu medium dengan nilai amplitudo dan frekuensi yang tetap. Berdasarkan arah rambat dan getarnya, gelombang terbagi menjadi dua jenis, yaitu:

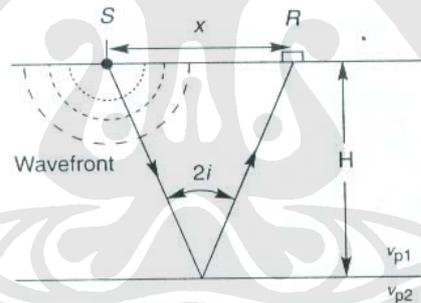
1. *Gelombang transversal*, gelombang yang arah getarnya tegak lurus terhadap arah rambatnya. Pada gelombang transversal yang merambat adalah bentuk bukit/bentuk lembah. Gelombang transversal hanya dapat terjadi dalam zat padat.
2. *Gelombang longitudinal* adalah gelombang yang arah getarnya berhimpit atau searah dengan arah rambatnya. Yang merambat pada gelombang ini adalah rapatan dan regangan. Gelombang ini dapat merambat dalam semua wujud zat (padat, gas, cair).

Sementara gelombang yang disebabkan oleh tumbukan yang dipukulkan secara vertikal pada penampang permukaan dinding penahan tanah pada umumnya ialah *P-wave (Primary Wave)*, yang tak lain merupakan gelombang longitudinal (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 *P-Wave (Primary Wave)*

Penentuan dimensi ataupun kedalaman kondisi eksisting dari sebuah dinding penahan tanah dapat dilakukan dengan menggunakan metode *low strain integrity testing*. Dalam konsepnya, pengujian maupun interpretasi dari metode ini tergolong sederhana, dimana pada dasarnya, pengujian ini identik dengan pengujian pemantulan gelombang.



Gambar 2.2 Jalur Rambat untuk Incident dan Reflected *P-Wave* pada Bidang Horizontal

Sebagaimana terlihat pada Gambar 2.2, dimana pengujian ini diawali dengan menghasilkan sebuah impuls dari sumber S, dan mengukur waktu dari perambatan gelombang hingga menuju R. Impuls tadi menghasilkan gelombang yang menyebar menuju ke segala arah, namun terdapat beberapa energi gelombang yang mengikuti jalur rambat langsung dari S ke R dan akan tiba di R pada:

$$t_d = \frac{\text{jarak lintas}}{\text{kecepatan gelombang}} = \frac{x}{v_p}$$

Dengan menghitung nilai dari x dan t_d , maka kecepatan P -wave dapat ditentukan dengan mudah. Namun, untuk beberapa energi gelombang lain yang melalui jalur rambat dengan membentuk sudut:

$$t = \tan^{-1} \frac{x}{2H}$$

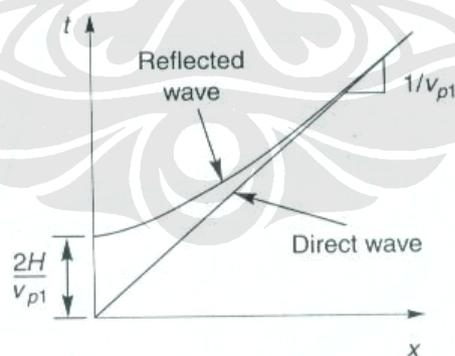
dimana beberapa energi gelombang tersebut dipantulkan sehingga tiba di R pada:

$$t_r = \frac{\text{jarak lintas}}{\text{kecepatan gelombang}} = \frac{2\sqrt{H^2 + (x/2)^2}}{v_p} = \frac{\sqrt{4H^2 + x^2}}{v_p}$$

Dengan menghitung t_r dan mengetahui x dan v_p dari perhitungan rambat langsung, kedalaman lapisan dapat dihitung, yaitu sebagai berikut:

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{t_r^2 v_p^2 - x^2}$$

Sementara pada gambar 2.3 ditunjukkan bahwa waktu tiba untuk gelombang langsung (*direct wave*) maupun gelombang yang dipantulkan (*reflected wave*) berhubungan. Apabila jarak lintasnya semakin jauh, maka selisih waktu tiba dari kedua gelombang tersebut semakin kecil.



Gambar 2.3 Hubungan Waktu Lintas antara Direct dan Reflected Wave

Sebagaimana pada pondasi tiang, untuk dinding penahan tanah besarnya waktu rambat gelombang tergantung juga pada karakteristik redaman dan penyebaran, dimana dilihat dari kondisi pada ujung (*toe*) dinding penahan tanah.

Sehingga kondisi pada ujung dinding penahan tanah dapat ditentukan menjadi dua jenis, yaitu sebagai berikut:

1. pada ujung dinding penahan tanah dalam keadaan bebas atau dalam keadaan *void*,
2. pada ujung dinding penahan tanah terdapat tanah keras (*bed rock*).

Untuk kondisi yang pertama, yakni ujung dinding penahan tanah dalam keadaan ujung bebas, *reflected wave* dan *incident wave* berada pada satu fase. Sementara untuk kondisi yang kedua, dimana pada ujung (*toe*) dinding penahan tanah terdapat pada tanah keras, terdapat perbedaan fase antara *incident wave* dan *reflected wave* sebesar 180° (π). Oleh karena itu, kondisi dari ujung dinding penahan tanah dapat dievaluasi dari perbedaan fase gelombang tersebut. Variasi pada fase dan besarnya gelombang terhadap waktu ditentukan oleh perubahan waktu terhadap frekuensi yang menggunakan transformasi gerakan harmonis.

Teori perambatan gelombang elastis mengindikasikan bahwa dinding penahan tanah dalam seharusnya menghasilkan jarak frekuensi yang konsisten pada puncak – puncak resonansi yang merupakan fungsi dari panjang dinding dan kecepatan rambat gelombang. Puncak – puncak resonansi dapat dengan mudah diidentifikasi, dan dengan menentukan perubahan frekuensi Δf pada puncaknya, panjang dari *transducer* ke sumber pemantulan L dapat ditentukan dengan rumus:

$$L = \frac{v_c}{2\Delta f}$$

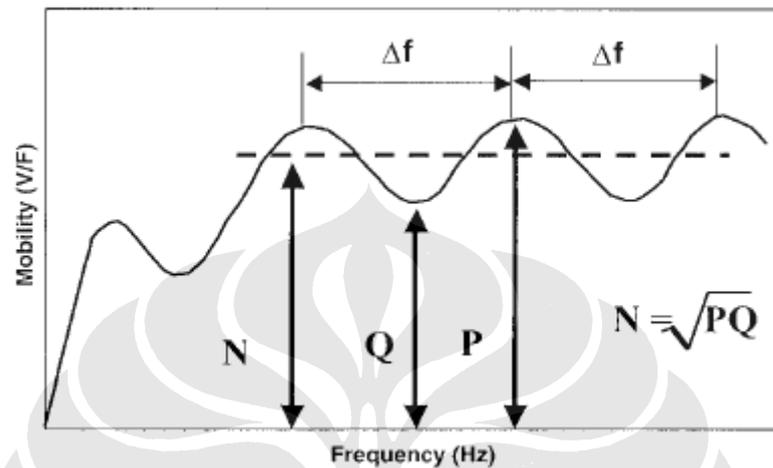
dimana v_c merupakan kecepatan gelombang rapatan pada beton. Pergerakan rata – rata N_c dapat dihitung dengan menentukan rata – rata geometris dari puncak resonansi pada kurva pergerakan (*mobility*) atau menggunakan rumus:

$$N_c = \sqrt{PQ}$$

dimana P dan Q merupakan pergerakan maksimum dan minimum, secara berurutan, pada puncak resonansi. Pergerakan teoritis N_T didefinisikan sebagai kebalikan dari *impedance* pada tiang (dalam kasus kali ini yakni dinding penahan tanah itu sendiri) (Davis and Robertson 1975; Stain 1982), diberikan rumus:

$$N_T = \frac{1}{\rho_c v_c A}$$

dimana ρ_c merupakan densitas beton dan A merupakan luas penampang dinding penahan tanah. Jika N_c lebih besar dibandingkan dengan N_T , maka kemungkinan ada perubahan bentuk pada tiang dikarenakan terjadi pengecilan pada dinding (*necking*) atau terjadi penurunan kualitas beton (ρ_c atau v_c rendah).



Gambar 2.4 Pergerakan Perambatan Gelombang Satu Dimensi

Resolusi sinyal impuls dapat didefinisikan pada hubungan perbandingan antara P dan Q . Resolusi sinyal yang tinggi (> 1) memudahkan untuk membedakan dan menafsirkan panjang tiang dan lokasi kelainan yang terjadi. Ketika rasio $P/Q \leq 1$, maka frekuensi resonansi tidak dapat diidentifikasi.

Gaya dinamik akibat tumbukan dari *hammer* pada permukaan atas dinding akan menimbulkan regangan pada dinding. Pergerakan relatif (*relative displacement*) yang terjadi antara dinding dan tanah disekitarnya menimbulkan gelombang perlawanan atau reaksi tanah. Semakin besar kekuatan tanah, semakin kuat gelombang perlawanan yang timbul. Gelombang aksi maupun reaksi akibat perlawanan tanah akan direkam. Dari hasil rekaman, karakteristik gelombang – gelombang ini dapat dianalisa.

Uji integritas mudah untuk diimplementasikan, namun seringkali diperoleh kesulitan dalam proses interpretasi dari data yang didapat. Kesulitan tersebut dipengaruhi oleh kondisi strukturnya, seperti aksesibilitas dinding dengan beberapa parameternya yaitu panjang dinding, kondisi *bearing* dan modulus serta hasil kerusakan dari kelainan geometrinya, seperti mengalami *necking*, *void*, atau *crack*. Dengan demikian, dilihat dari hasil uji, akan jarang menyerupai sebuah

kurva yang ideal. Kesulitan akan bertambah apabila aksesibilitas dari dinding tersebut dibatasi oleh adanya struktur lainnya.

Permodelan komputasi memberikan hasil yang cepat dan efisien. Akan tetapi, ketika diaplikasikan ke penelitian, permodelan akan menentukan asumsi nilai parameter dan akan sering mengidealisasikan kondisi sebuah percobaan untuk mendapatkan hasil uji.

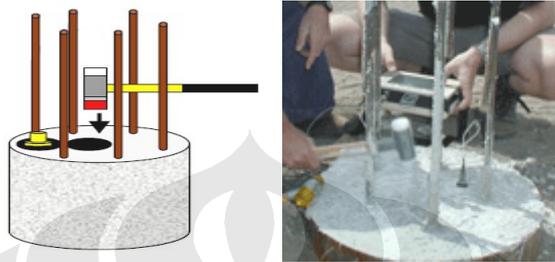
2.2.2 Cara Mengukur

Perihal integritas dari suatu dinding penahan tanah merupakan masalah yang kompleks, mengingat keberadaan bagian dinding yang tertanam dalam tanah tidak dapat dilihat secara visual. Untuk dinding yang materialnya terbuat dari beton pracetak, masalah integritas relatif lebih mudah dalam pengontrolannya. Dan masalah integritasnya tak lain yakni kemungkinan terjadinya retak akibat pengangkatan yang salah ataupun pemancangan yang berlebihan atau tidak sentris. Sementara untuk dinding yang materialnya dibuat di lokasi (*cast in-situ*), masalah integritas yang sering ditemui antara lain panjang dinding yang lebih pendek dari yang diisyaratkan, terjadi *necking* pada dinding, serta keropos akibat pengangkatan pipa tremie yang terlalu cepat.

Cara yang saat ini banyak digunakan untuk menguji integritas tiang (dinding penahan tanah) adalah dengan menggunakan alat *Pile Integrity Test* (ASTM D5882-96). Metode ini merupakan cara pemantulan gelombang yang merambat dari permukaan atas tiang (dinding) yang kemudian dilanjutkan dengan menganalisa frekuensi pada gelombang sehingga dapat mengidentifikasi perubahan geometri dari tiang (dinding) tersebut. Metode inilah yang akan penulis gunakan sebagai acuan dalam penulisan skripsi ini untuk menganalisa penerapan *low strain integrity testing* pada dinding penahan tanah.

Dalam pengujian ini, pada permukaan atas dinding diberikan gelombang yang memiliki frekuensi rendah dengan cara memukulkan sebuah *hammer* yang tidak memerlukan pukulan yang besar. Gelombang yang merambat pada dinding tersebut, akan mengalami pemantulan akibat terdapatnya perubahan geometri dari dinding yang disebabkan oleh kerusakan, kelainan pada struktur, dan lain – lain. Jika gelombang yang merambat pada kerusakan geometri dari struktur dinding

penahan tanah tersebut, memiliki ukuran yang lebih besar atau sama dengan panjang gelombangnya, gelombang tersebut cukup untuk mencatat kemungkinan yang terjadi hingga ke dasar (*toe*) dinding. Oleh karena itu, pemantulan gelombang yang tercatat tersebut adalah akibat dari kerusakan atau kelainan yang terjadi pada struktur tersebut.



Gambar 2.5 Proses Uji Integritas Tiang menggunakan Pile Integrity Test (PIT)

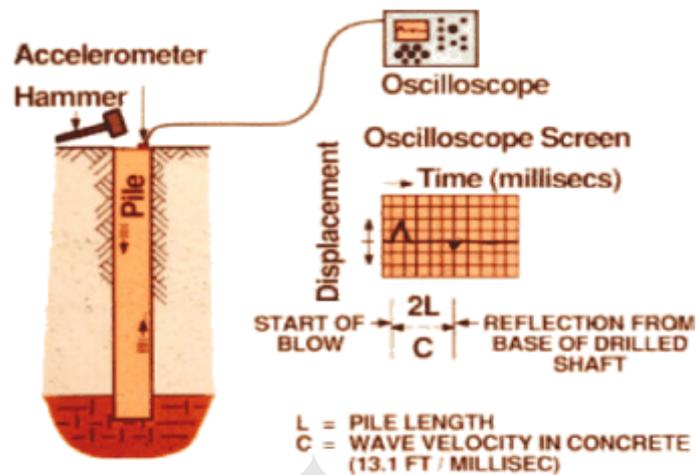
Seperangkat alat uji *Pile Integrity Test* (ASTM D5882-96) terdiri dari:

1. *Impulse hammer*,

merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan gelombang pada permukaan atas pondasi atau dinding penahan tanah dengan cara dipukulkan secara perlahan.

2. *Accelerometer* dan *transducer*,

yang digunakan untuk merekam rambatan gelombang yang dihasilkan dari pemukulan hammer pada permukaan atas pondasi atau dinding penahan tanah. Bila rambatan gelombang mencapai lokasi *defect* (penampangnya mengecil) atau mencapai ujung tiang atau dinding, maka akan terjadi pemantulan gelombang. Pemantulan gelombang akibat perubahan penampang akan menentukan tingkat kerusakan dari tiang atau dinding, yang dinyatakan dengan BTA (%).



Gambar 2.6 Pile Integrity Test (PIT)



Gambar 2.7 Transducer dan Accelerometer

Pile Integrity Test (PIT) tidak memerlukan pekerjaan pendahuluan apapun pada tiang (dinding) yang akan dites, sehingga dapat langsung dikerjakan pada setiap tiang pondasi (dinding penahan tanah) yang sudah tertanam didalam tanah, dengan menempelkan *accelerometer* pada permukaan atas kepala tiang (dinding). *Accelerometer* merekam gelombang akibat *impact* atas palu kecil yang dipukulkan pada permukaan kepala tiang (dinding) tersebut. Pada uji PIT tidak diperlukan pukulan yang besar, tapi cukup menggunakan palu tangan, sehingga PIT disebut pula “*low strain testing*”.

2.2.3 Studi Kasus Sebelumnya

Low Strain Integrity Testing merupakan suatu metode evaluasi nondestruktif yang sebelumnya lebih sering digunakan untuk memeriksa panjang, kontinuitas, serta integritas dari suatu pondasi tiang yang baru dibangun. Namun, mengingat sifat nondestruktif dari metode ini, pada akhirnya metode ini juga

diterapkan untuk mengevaluasi kondisi dari pondasi tiang suatu struktur bangunan eksisting. Dan untuk penulisan skripsi ini, penulis bermaksud untuk menerapkan *low strain integrity testing* ini pada dinding penahan tanah.

Sebagai acuan penulisan dan pengerjaan skripsi ini, penulis akan menggunakan beberapa studi kasus sebelumnya sebagai referensi. Studi kasus sebelumnya yang akan penulis gunakan diantaranya:

- ❖ Sebuah *section* pengujian pondasi tiang bor dibangun di National Geotechnical Experimentation Site (NGES) di Northwestern University untuk mengevaluasi kemampuan dari bermacam metode tes nondestruktif atau *Non Destructive Evaluation (NDE)* dalam mengevaluasi integritas dari pondasi tiang bor dalam kondisi kepala tiang tidak tertutup struktur pile cap. Pengujian ini dilakukan oleh Richard J. Finno dan Sarah L. Gassman dengan menggunakan respon impuls untuk menentukan panjang dan keutuhan dari pondasi dalam. Variasi geometri dari pondasi dalam yang diuji oleh Richard J. Finno dan Sarah L. Gassman dapat dilihat pada Gambar 2.8.

Pada akhirnya, pengujian ini akan menyajikan hasil penelitian dalam bentuk interpretasi hasil yang diperoleh dari mengasumsikan cepat rambat gelombang pada material beton, hasil dari simulasi numerik tes respon impuls, dan membandingkan simulasi dengan hasil pengamatan. Berbagai grafik resolusi akan disajikan untuk kondisi tanah yang seragam dan berlapis, yang mana akan menjelaskan kemampuan untuk diaplikasikannya metode respon impuls dalam hubungannya dengan rasio nilai panjang tiang dengan diameter tiang, rasio nilai cepat rambat gelombang pada tanah dengan cepat rambat gelombang pada beton, dan rasio densitas tanah dengan densitas beton.

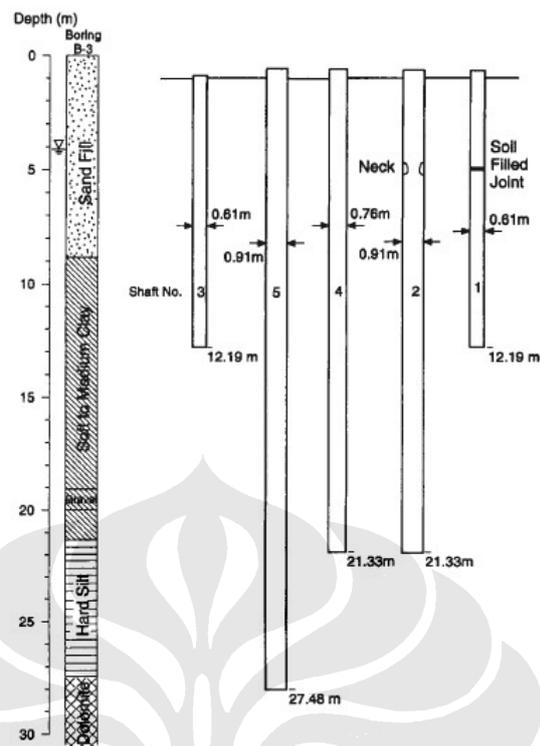
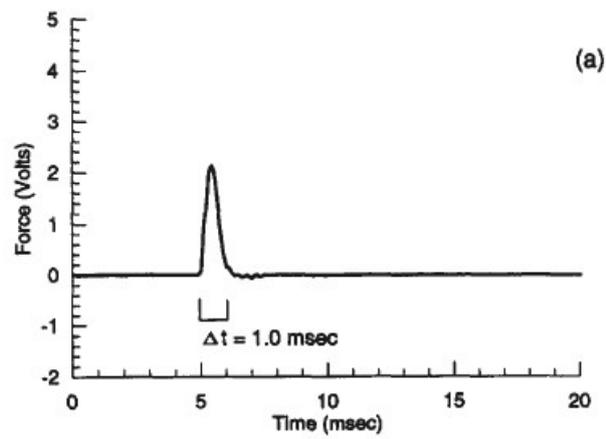


FIG. 3. Cross Section of NGES Drilled Shaft Test Section

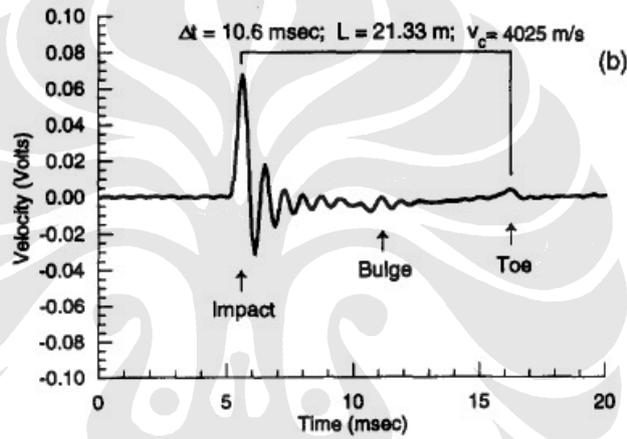
Gambar 2.8 Cross-section tiang uji NGES

Pengujian dilakukan dengan menempatkan *geophone* berjarak 76 mm dari tepi tiang dan melakukan pemukulan dengan menggunakan *hammer* tepat di bagian tengah tiang. Setiap lokasi penempatan *geophone* dan pemukulan *hammer* telah dihaluskan sebelumnya dengan menggunakan gerinda.

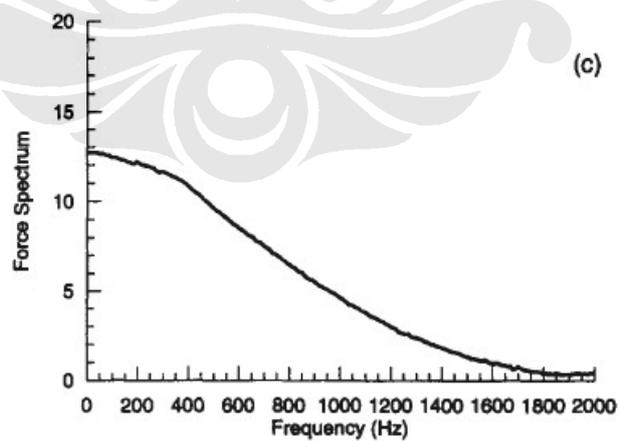
Data dan hasil kalkulasi respon dari tes yang dilakukan untuk tiang no.4 disajikan pada Gambar 2.9, 2.10, 2.11, dan 2.12. Tiang no.4 memiliki panjang 21.33 m dan diameter 0.76 m, sehingga rasio panjang terhadap diameternya (L/D) sebesar 28. Pada Gambar 2.9 dapat terlihat bahwa waktu kontak dari pemukulan *hammer* pada tiang kira – kira sebesar 1 ms. Nilai energi signifikan yang diberikan suatu impact terbatas pada frekuensi yang kira – kira lebih kecil dari invers waktu kontak, yang pada tes ini nilainya di bawah 1,000 Hz.



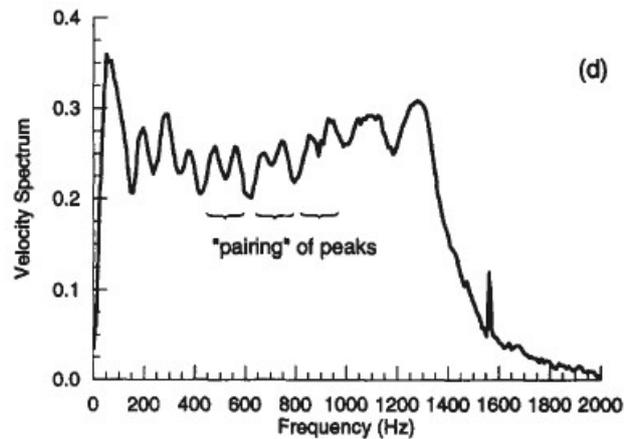
Gambar 2.9 Grafik Respon Waktu terhadap Beban dari Tiang no.4



Gambar 2.10 Grafik Respon Waktu terhadap Kecepatan dari Tiang no.4



Gambar 2.11 Grafik Respon Frekuensi terhadap Beban dari Tiang no.4

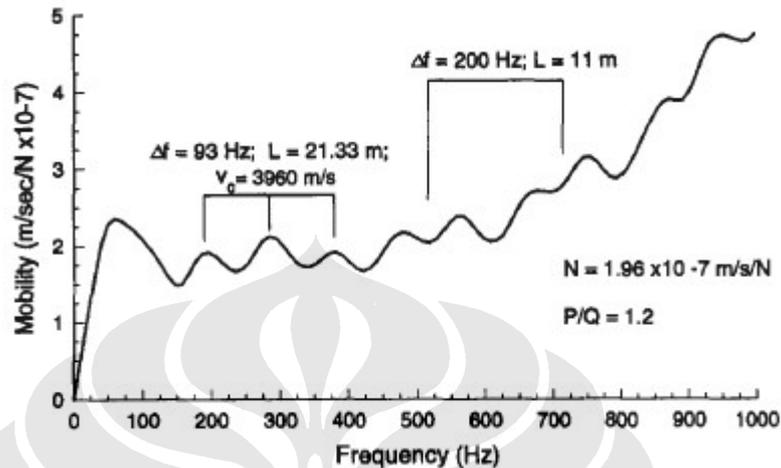


Gambar 2.12 Grafik Respon Frekuensi terhadap Kecepatan dari Tiang no.4

Grafik cepat rambat gelombang terhadap waktu pada gambar 2.10 menunjukkan pemantulan gelombang dari ujung tiang pada $t = 16.2$ ms, yang bersesuaian dengan nilai $\Delta t = 10.6$ ms. Hasil dari analisis sonic echo ini menunjukkan bahwa nilai cepat rambat gelombang pada beton sebesar 4,025 m/s. Pemantulan gelombang kedua muncul pada $t = 11.1$ ms menunjukkan adanya perubahan yang tak terduga pada *impedance*, yang kemungkinan besar sebuah tonjolan (*bulge*) pada kedalaman 11 m pada tiang, yang merupakan lokasi dari ujung casing temporer.

Fast Fourier Transform (FFT) dari data beban dan cepat rambat gelombang disajikan pada Gambar 2.11 dan 2.12 secara berturut – turut. Spektrum beban menunjukkan bahwa *impact* akibat pemukulan *hammer* mengintrodusir frekuensi yang signifikan kira – kira di bawah 1,200 Hz; dimana, analisa mobilitas akan difokuskan pada range ini karena nilai mobilitas yang salah akan dihasilkan pada saat nilai beban yang bukan sebenarnya digunakan untuk menghitung mobilitas. Spektrum kecepatan pada Gambar 2.12 menunjukkan tiga puncak resonansi yang jelas di bawah 400 Hz, diikuti puncak – puncak yang dipaksakan menjadi sepasang di antara 400 dan 1,000 Hz, dan akhirnya menjadi sebuah puncak yang lebih besar setelah 1,000 Hz. Tiga puncak sebelumnya merupakan resonansi dari pemantulan gelombang di ujung tiang, dengan perubahan rata – rata pada frekuensi 93 Hz, dimana sesuai dengan cepat rambat gelombang 3,960 m/s. Penentuan pasangan dari puncak – puncak sesuai

dengan pemantulan yang terlihat pada grafik cepat rambat gelombang terhadap waktu pada 11.1 ms dan dijelaskan dengan baik dengan memeriksa plot mobilitas pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Plot Mobilitas dari Tiang no.4

Pada Gambar 2.13, respon sekunder yang ditunjukkan oleh pasangan puncak – puncak, memiliki perubahan frekuensi sebesar 200 Hz, yang dihitung dari bagian tengah dari dua puncak yang membentuk dua resonansi sekunder yang ditemukan di antara 400 dan 600 Hz dan antara 600 dan 800 Hz. Frekuensi resonansi ini menunjukkan sebuah anomali yang tidak direncanakan pada kedalaman sekitar 11 m, dimana bersesuaian dengan kedalaman ujung *liner*. Respon sekunder tidak ditemukan pada range frekuensi di bawah 400 Hz karena anomali yang tak direncanakan ini terletak di kedalaman 11 m, kira – kira separuh dari jarak hingga ke ujung tiang yang berada di kedalaman 21.33 m, dan dengan demikian resonansi yang berasal dari ujung tiang dan anomali tadi bertepatan pada frekuensi yang lebih rendah.

Mobilitas rata – rata dari ketiga puncak yang pertama, sebagaimana ditentukan oleh rata – rata geometris dari mobilitas minimum dan maksimum untuk setiap puncak, adalah 1.96×10^{-7} m/s per N. Mobilitas ini sedikit lebih rendah dari range teoritis yakni 2.0 hingga 2.6×10^{-7} m/s per N untuk tiang berdiameter 0.76 m yang terbuat dari beton berkualitas

baik, sebagaimana dijelaskan oleh range cepat rambat gelombang antara 3,500 hingga 4,500 m/s. Nilai ini dapat berarti hasil dari meningkatnya nilai luas penampang dari tonjolan (*bulge*), beton dengan kualitas yang lebih baik dari yang diharapkan, atau kombinasi keduanya. Nilai resolusi (P/Q) dari signal mobilitas yang diperoleh yakni sebesar 1.2.

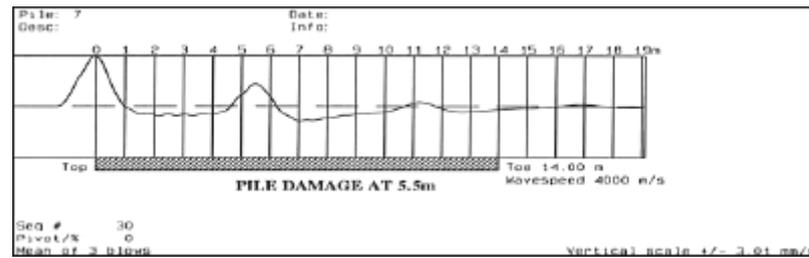
- ❖ Sebuah perusahaan yang bergerak di bidang Geoteknik yang bernama Fugro Engineering Service mengadakan uji integritas tiang di salah satu proyek gedung tinggi di Inggris.



Gambar 2.14 Uji Integritas Tiang di salah satu proyek di Inggris

Pengujian dilakukan dengan memukulkan sebuah *hammer* ke kepala tiang sebagai impuls sehingga mengakibatkan terjadinya perambatan gelombang dari kepala tiang menuju ke dasar tiang. Kemudian, sebuah *transducer* akan mencatat getaran gelombang yang akan terjadi pada tiang tersebut.

Gelombang yang merambat dari kepala tiang menuju ke dasar tiang dan kembali lagi ke kepala tiang akan tercatat oleh *transducer*, sehingga dari hasilnya tersebut akan terlihat perbedaan bentuk grafik yang terjadi. Dalam kasus ini, *transducer* melihatkan hasil dimana pada kedalaman 5,5 m telah terjadi kelainan atau kerusakan pada tiang.



Gambar 2.15 Grafik Output dari Transducer

2.3 DINDING PENAHAN TANAH

Pada dasarnya, fungsi dari suatu struktur penahan tanah adalah untuk mencegah suatu material mengalami keruntuhan akibat kemiringan alaminya. Material tersebut dapat berupa tanah, bebatuan, batubara, dan air. Hingga saat ini, terdapat beberapa jenis dinding penahan tanah yang sudah umum digunakan dalam struktur penahan tanah pada suatu galian tanah dalam atau lereng. Dasar pemilihan jenis struktur dinding penahan tanah yang akan digunakan dalam suatu proyek sedikit banyak dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya seperti kondisi lapangan, workability dari konstruksi struktur penahan tanah tersebut, dan efisiensi biaya (cost). Berikut penjelasan singkat mengenai beberapa jenis struktur dinding penahan tanah.

❖ Diaphragm Wall

Diaphragm wall atau dinding diafragma merupakan dinding beton bertulang yang dibuat dalam tanah (*cast-in-situ*). Selain menahan tanah, dinding diafragma juga dapat mencegah masuknya air ke dalam area di bagian muka dinding karena dinding ini kedap air. Namun penggunaan dinding diafragma akan membutuhkan massa beton dan tulangan baja dalam jumlah besar yang tentunya akan banyak mempengaruhi biaya (cost). Sementara sisi positif lainnya yang diperoleh mungkin hanyalah tidak adanya getaran dan kebisingan yang ditimbulkan pada proses pemasangannya, sebagaimana yang dialami pada proses konstruksi (pemancangan) sheet pile.

❖ Sheet Piles

Sheet piles, atau biasa disebut dinding turap, merupakan dinding vertikal relatif tipis yang selain berfungsi untuk menahan tanah juga berfungsi untuk menahan masuknya air ke dalam lubang galian. Dikarenakan prosedur pemasangannya yang mudah dan biaya pelaksanaannya yang relatif murah, turap banyak digunakan pada pekerjaan – pekerjaan seperti penahan tebing galian sementara, bangunan – bangunan di pelabuhan, dinding penahan tanah, bendungan elak, dan lain – lain.

Namun, dinding turap tidak cocok untuk menahan tanah timbunan yang sangat tinggi karena akan memerlukan luas penampang dinding turap yang besar. Selain itu, dinding turap juga tidak cocok untuk digunakan pada tanah yang mengandung banyak batuan, karena tentunya akan menyulitkan proses pemancangan.

❖ Soldier Piles

Soldier piles merupakan struktur penahan galian tanah dalam untuk lokasi yang kedalaman muka air tanahnya lebih rendah dari dasar galian. Struktur penahan tanah ini tersusun dari barisan pile beton bertulang yang disusun membentuk dinding dengan terdapat gap antara pile yang satu dan yang lainnya. Sementara tanah yang berada di belakang gap antar pile tersebut tidak mengalami keruntuhan akibat efek *arching*.

❖ Contiguous Piles

Contiguous piles merupakan struktur penahan galian tanah dalam yang tersusun dari barisan pile *bentonite-cement* sebagai primary pile yang dicor terlebih dulu, dan pile beton bertulang sebagai secondary pile yang dicor dengan meng-overlap primary pile, yang saling menyambung hingga membentuk dinding.

❖ Secant Piles

Secant piles merupakan struktur penahan galian tanah dalam yang tersusun dari barisan pile beton tak-bertulang sebagai primary pile yang dicor terlebih dahulu, dan pile beton bertulang sebagai secondary pile yang dicor dengan meng-overlap primary pile, yang disusun saling menyambung membentuk dinding.

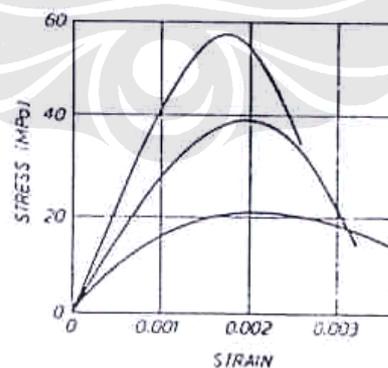
2.4 BETON

Beton merupakan material bangunan yang terdiri dari dua bagian utama. Bagian pertama merupakan bahan matriks yang berfungsi sebagai pengikat antar material (*adhesive*), yang tak lain adalah pasta semen (campuran air dan semen) dan terkadang ditambah bahan kimia tambahan (*admixtures*). Namun selain sebagai pengikat, bahan matriks juga memberikan sumbangan kekuatan, karena apabila bahan ini tidak hadir pada beton maka beton tersebut tidak akan memiliki kekuatan sama sekali. Bagian yang kedua adalah bahan inklusi yang menyumbangkan sebagian besar kekuatan beton itu sendiri. Agregat terdiri dari material organik yang biasanya berupa mineral alami seperti batu/kerikil dan pasir.

Dalam penyusunan skripsi ini, hal yang perlu dijelaskan mengenai material beton ialah yang berkaitan dengan perambatan gelombang yang terjadi pada material ini yaitu sebagai berikut:

2.4.1 Hubungan Tegangan Regangan

Dari suatu percobaan kuat tekan terhadap benda uji, kita dapat menggambar kurva yang menyatakan nilai tegangan yang bersesuaian dengan nilai regangan dari sampel beton tersebut.



Gambar 2.16 Kurva tegangan–regangan beton silinder dengan beban uniaksial

Pada gambar di atas dapat dilihat kurva tegangan–regangan tipikal yang dihasilkan dari uji tekan silinder beton. Beton yang berkekuatan lebih rendah

mempunyai daktilitas yang lebih tinggi dari beton yang berkekuatan tinggi, dan tegangan maksimum dicapai pada regangan tekan diantara 0,002 dan 0,0025. Regangan batas (*ultimate*) pada saat hancurnya beton berkisar antara 0,003 sampai 0,008, namun harga regangan maksimum yang digunakan dalam prakteknya adalah 0,003.

2.4.2 Rasio Poisson (ν)

Tekanan uniaksial pada silinder beton, selain menimbulkan regangan aksial (memendek) juga menimbulkan regangan lateral (mengembang). Perbandingan regangan lateral terhadap regangan aksial ini dinyatakan dalam rasio Poisson,

$$\nu = \frac{\text{regangan lateral}}{\text{regangan aksial}}$$

2.4.3 Modulus Elastisitas (E)

Seringkali, modulus elastisitas beton didefinisikan sebagai kemiringan garis singgung (garis tangensial) pada segmen pertama garis parabola pada grafik tegangan – regangan beton (modulus tangen atau *tangent modulus*). Sedangkan yang lebih umum diambil sebagai modulus elastisitas beton adalah kemiringan garis yang melalui titik $0,5 f_c'$ yang disebut modulus sekan (*modulus secant*). Modulus elastisitas beton bervariasi karena sifat beton yang merupakan material heterogen. Modulus elastisitas dari beton juga bergantung pada umur dari beton, properti dari agregat dan semen, tingkat pembebanan, serta tipe dan ukuran dari spesimen.

2.5 PROGRAM PLAXIS v8

Perkembangan teknologi telah memunculkan berbagai struktur yang rumit sehingga pada analisa struktur yang demikian kompleks, metode eksak akan sulit digunakan. Perhitungan dengan menggunakan metode eksak tidak mungkin digunakan pada struktur dengan kompleksitas yang sedemikian rumit, karena penyelesaian eksak hanya dapat diperoleh untuk kasus yang paling sederhana.

Sebagai alternatif yang lebih baik, maka orang mulai mengembangkan berbagai metode numerik yang merupakan suatu metode pendekatan terhadap solusi eksak seteliti mungkin. Metode numerik adalah suatu rekayasa matematika yang mentransformasikan ekspresimekanika kontinyu (bentuk kalkulus dan persamaan diferensial) menjadi mekanika diskrit (bentuk matriks). Salah satu metode numerik yang dikembangkan dalam analisa numerik adalah Metode Elemen Hingga.

Metode elemen hingga telah banyak digunakan dalam permasalahan geoteknik karena kemampuannya untuk menyelesaikan beberapa hal berikut :

- Keheterogenitasan struktur tanah
- Kenon–linieran dan tingkah laku tanah
- Interaksi tanah–struktur
- Metode konstruksi

Langkah – langkah untuk menggunakan metode elemen hingga adalah sebagai berikut :

1. diskritisasi elemen
2. perumusan semua properti yang dimiliki semua elemen
3. modelisasi struktur
4. analisa model dengan penetapan kondisi batas dan tentukan peralihan nodal
5. nilai yang diinginkan diperoleh

Program elemen hingga yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini adalah program PLAXIS.

PLAXIS v8 adalah program elemen hingga yang telah dikembangkan secara spesifik untuk analisa deformasi dan penurunan bidang geoteknik. Untuk setiap kasus yang akan dianalisa dibuat model geometri terlebih dulu. Model geometri adalah model dua dimensi dari masalah tiga dimensi yang nyata di lapangan.

Dalam analisisnya, metode elemen hingga menggunakan teknik diskritisasi pada struktur. Proses diskritisasi dilakukan dengan membagi suatu struktur kontinu menjadi sekumpulan potongan kecil yang dinamakan elemen hingga. Derajat ketelitian dalam diskritisasi mempengaruhi tingkat ketelitian solusi. Elemen struktur diganti dengan sekumpulan elemen dengan bentuk relatif sederhana. Kemudian dipilih sekumpulan titik – titik yang dinamakan nodal geometri pada struktur yang berguna mendefinisikan geometri elemen. Setiap elemen didefinisikan secara analitik dengan cara unik sebagai fungsi peralihan dari variabel peralihan nodal geometri yang merupakan milik elemen – elemen tersebut. Prinsip peralihan ini digunakan untuk menurunkan persamaan keseimbangan untuk elemen dan peralihan nodal.

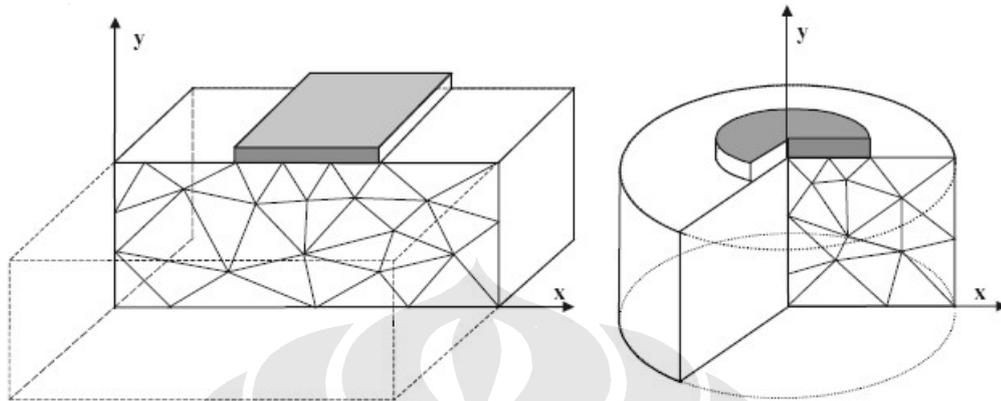
Analisa keseimbangan dalam sistim diskrit secara umum dapat ditulis dalam bentuk matriks : $\{F\} = [K] \{U\}$

Dimana K adalah matriks kekakuan, U adalah variabel yang tidak diketahui yaitu peralihan nodal, dan F adalah variabel yang diketahui yaitu vektor pembebanan nodal. K sebagai matriks yang mengkarakterisasikan sistem pada permodelan masalah geoteknik dapat berupa parameter Modulus Young (E), kohesi (c), sudut geser (ϕ), angka poisson (ν), dan parameter – parameter lainnya disesuaikan dengan model yang dilakukan.

Kemudian untuk menyederhanakan definisi analitik elemen yang bentuk dan ukuran beragam, dikemukakan elemen referensi. Penggunaan sistem elemen referensi dapat mengganti fungsi yang rumit dengan fungsi yang lebih sederhana. Satu elemen referensi yang sama dapat mentransformasikan semua elemen riil tipe yang sama dengan transformasi yang berbeda.

Parameter model yang dapat digunakan adalah plane strain dan axisimetri. Plane strain digunakan untuk geometri dengan potongan melintang tanah yang seragam dan kondisi skema pembebanan yang disamakan untuk arah tegak lurus terhadap potongan melintang (sumbu z). Displacement dan tegangan arah sumbu z diasumsikan bernilai nol. Model axisimetri digunakan untuk struktur sirkular dengan potongan seragam yang radial dimana deformasi dan tegangan

diasumsikan sama di semua arah radial. Perlu diingat bahwa pada permodelan axisimetri sumbu x merepresentasikan radius dan sumbu y disamakan dengan sumbu simetri aksial permodelan.



Gambar 2.17 Contoh Permodelan Plane–Strain dan Axisimetri

Tanah dimodelkan sebagai elemen triangular 2 dimensi dengan memiliki hanya dua derajat kebebasan per nodal. Setiap elemen tanah didefinisikan oleh 15 buah nodal geometri. Dipilih 15 nodal untuk setiap elemen agar memperoleh perhitungan yang lebih akurat meskipun akan menjadi lebih rumit. Error yang terjadi karena perbatasan struktur yang merupakan garis lengkung dapat dikurangi dengan mengurangi ukuran elemen – elemen.

Tiga komponen utama model geometri pada PLAXIS yaitu :

✓ Titik

Titik menunjukkan awal dan akhir garis. Titik juga digunakan untuk menempatkan ankur, gaya, dan lainnya.

✓ Garis

Garis digunakan untuk menyatakan ikatan geometri, model dan diskontinuitas pada geometri seperti dinding, pelat, dan lainnya. Garis bisa mempunyai beberapa fungsi dan material yang berbeda.

✓ Cluster

Cluster adalah luasan area tertutup yang dibatasi penuh oleh garis. Dalam satu cluster hanya terdapat satu material sehingga homogeny. Cluster dapat diaplikasikan sebagai lapisan tanah.

Proses simulasi pada program PLAXIS terdiri dari tiga tahap yaitu input data, perhitungan, dan output. Masing – masing dari tahapan tersebut akan dijelaskan sebagai berikut.

2.5.1 Input Data PLAXIS v8

Program Input membuat dan memodifikasi geometri model sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi asli kasus. Permodelan umumnya antara lain :

- Model : terdiri dari model plane strain dan axisimetri
- Elemen : terdiri dari elemen 6 nodal dan 15 nodal
- Properti material

Selain itu juga terdapat beberapa input lainnya yang akan penulis gunakan dalam penggunaan PLAXIS v8, terutama terkait dengan perhitungan dinamis, yakni:

1. *Getaran sumber–tunggal*

Permasalahan getaran sumber–tunggal umumnya dimodelkan dengan menggunakan model axisimetri, tidak seperti analisis deformasi statis yang umumnya menggunakan model plane–strain. Penyebabnya antara lain karena gelombang pada axisimetri akan menyebar dalam pola yang serupa dengan penyebaran gelombang pada sistem tiga dimensi. Dalam sistem ini, penyebaran energi akan menyebabkan atenuasi gelombang terhadap jarak. Efek ini dapat dikaitkan sebagai redaman geometri, yang secara definisi telah diikutsertakan dalam model axisimetri. Dalam permasalahan getaran sumber–tunggal, redaman geometri umumnya memberikan kontribusi paling penting terhadap redaman dari sistem. Oleh karena itu, untuk permasalahan getaran sumber–tunggal, perlu menggunakan model axisimetri.

2. *Percepatan gravitasi*

Secara langsung, percepatan gravitasi bumi, g , diatur sebesar $9,8 \text{ m/s}^2$. Nilai ini digunakan untuk menghitung kepadatan material, ρ (kg/m^2), dan berat isi, γ ($\rho = \gamma / g$).

3. *Satuan*

Dalam analisis dinamik, satuan waktu umumnya diatur ke detik. Interval waktu dalam analisis dinamik selalu merupakan waktu dinamis dan PLAXIS selalu menggunakan detik sebagai satuan dari waktu dinamis tersebut.

4. *Batas Penyerap Standar*

Batas penyerap digunakan untuk menyerap peningkatan tegangan pada batas model yang disebabkan oleh beban dinamis, yang jika tidak diserap maka akan dipantulkan ke dalam massa tanah. Untuk getaran sumber-tunggal, PLAXIS mempunyai pengaturan pra-pilih untuk menerapkan batas penyerap secara teratur. Untuk model plane-strain, batas penyerap standar hanya diterapkan pada sisi kanan dan kiri serta dasar dari batas model.

5. *Beban eksternal dan perpindahan tertentu*

Dalam PLAXIS v8, input dari beban dinamis serupa dengan beban statis. Disini, pilihan beban eksternal standar (beban terpusat dan beban merata serta perpindahan tertentu) dapat digunakan. Dalam program input, pengguna harus menentukan sistem beban yang akan digunakan sebagai beban dinamis. Sistem beban yang diatur sebagai beban dinamis, tidak dapat digunakan sebagai beban statis. Sistem beban yang tidak diatur sebagai beban dinamis, dianggap sebagai beban statis.

6. *Parameter Model*

Analisis dinamik secara prinsip tidak memerlukan parameter model tambahan. Walaupun demikian, parameter alternatif dan/atau parameter tambahan dapat digunakan untuk menentukan kecepatan gelombang dan untuk mengikutsertakan redaman material.

a. *Cepat rambat gelombang V_p dan V_s*

Parameter material ditentukan dalam lembar-tab *Parameter* dari jendela *Sifat material*. Saat memasukkan parameter elastic E dan ν , cepat rambat gelombang V_p dan V_s yang bersangkutan secara otomatis dihitung, dengan syarat berat isi yang benar telah ditentukan. Namun demikian, untuk model *Mohr-Coulomb* dan model linier elastis dapat memasukkan cepat rambat gelombang V_p dan V_s sebagai alternatif untuk parameter E dan ν . Nilai tersebut akan dihitung oleh PLAXIS.

b. *Alpha dan Beta Rayleigh*

Redaman material dalam tanah umumnya diakibatkan oleh sifat viskositas, friksi dan terjadinya plastisitas. Walaupun demikian, model – model tanah dalam PLAXIS saat ini tidak mengikutsertakan viskositas, tetapi efek redaman diasumsikan proporsional terhadap massa dan kekakuan dari sistem (redaman Rayleigh), yaitu:

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K$$

dimana C menyatakan redaman, M adalah massa, K adalah kekakuan dan α (alpha) serta β (beta) adalah koefisien – koefisien Rayleigh.

Pengaturan standar dalam PLAXIS mengasumsikan tidak terjadi redaman Rayleigh (alpha dan beta Rayleigh bernilai nol). Namun, redaman dapat dimasukkan dalam kumpulan data material untuk tanah dan antarmuka. Dalam lembar-tab *Umum* dari jendela material, klik tombol *Tingkat lanjut*. Kemudian dalam jendela *Sifat – sifat umum tingkat lanjut* nilai alpha dan/atau beta Rayleigh dapat diatur. Dengan cara yang serupa, redaman Rayleigh juga dapat diterapkan pada kumpulan data material dari pelat. Dalam permasalahan getaran sumber–tunggal yang menggunakan model axisimetri, redaman

Rayleigh tidak perlu diikutsertakan karena sebagian besar redaman disebabkan oleh redaman geometri.

c. *Penentuan koefisien redaman Rayleigh*

Merupakan suatu fakta yang telah diketahui dengan baik bahwa redaman dalam struktur tanah sangat mempengaruhi nilai dan bentuk dari respon tanah. Meskipun telah banyak dilakukan riset dalam bidang ini, namun hanya sedikit pengembangan yang telah dicapai dalam prosedur yang diterima secara umum untuk menentukan parameter redaman. Namun, untuk kepentingan rekayasa, beberapa usaha telah dilakukan untuk mengikutsertakan redaman material dan redaman geometri. Sebuah parameter teknis yang umum digunakan adalah rasio redaman, ξ .

Dalam metode elemen hingga, redaman Rayleigh memiliki salah satu prosedur untuk menangani redaman yang menyatukan efek redaman di dalam matriks massa dan kekakuan dalam sistem. Alpha Rayleigh adalah parameter yang menentukan pengaruh dari massa terhadap redaman dari sistem. Semakin tinggi nilai alpha, semakin banyak frekuensi rendah yang teredam. Beta Rayleigh adalah parameter yang menentukan pengaruh dari kekakuan terhadap redaman dari sistem. Semakin tinggi nilai beta, semakin banyak frekuensi tinggi yang teredam.

Koefisien redaman Rayleigh α dan β dapat ditentukan dari setidaknya dua buah rasio redaman, ξ , yang berhubungan dengan dua buah frekuensi getar, ω_i . Hubungan antara α , β , ξ , dan ω_i dapat dinyatakan sebagai:

$$\alpha + \beta \cdot \omega_i^2 = 2 \cdot \omega_i \cdot \xi_i$$

Hubungan ini mengandung arti bahwa jika diketahui dua buah rasio redaman pada frekuensi – frekuensi tertentu, maka persamaan simultan dapat dibentuk dimana nilai α dan β dapat dihitung.

2.5.2 Perhitungan PLAXIS v8

Setelah dibuat permodelan, maka perlu dilakukan pemilihan tipe perhitungan yang sesuai. PLAXIS mempunyai beberapa tipe perhitungan elemen hingga. Dalam program perhitungan, penulis mendefinisikan beban dinamis dengan mengaktifkan perpindahan dan beban sebagai fungsi dari waktu dengan mengatur faktor – faktor pengali yang bersangkutan.

Perhitungan dinamis dapat didefinisikan dengan memilih *Analisis dinamik* dalam kotak jenis perhitungan pada lembar-tab *Umum*. Dengan PLAXIS dimungkinkan untuk melakukan analisis dinamik setelah beberapa perhitungan plastis sebelumnya. Walaupun demikian terdapat beberapa keterbatasan sebagai berikut:

1. Jaring elemen yang diperbaharui tidak dapat digunakan dalam analisis dinamik.
2. Jenis pembebanan berupa tahapan konstruksi untuk perhitungan dinamis tidak dapat digunakan.

2.5.3 Output Program PLAXIS v8

Perhitungan dilakukan hingga keseimbangan tercapai. Untuk output, penulis akan menampilkan berbagai output yang nantinya akan menjadi sumber untuk mengadakan analisa terhadap kasus dalam penyusunan skripsi ini. Output utama yang biasa diperoleh adalah :

1. Melihat gerakan aktual dari geometri terhadap waktu.
2. Menampilkan kecepatan total, percepatan total, komponen horizontal dan komponen vertikal.
3. Menampilkan kurva kecepatan atau percepatan maupun perpindahan sebagai fungsi terhadap waktu.
4. Memungkinkan untuk melakukan transformasi dari kurva terhadap waktu (*time domain*) menjadi sebuah spektrum frekuensi (*frequency domain*) dengan menggunakan FFT atau *Fast Fourier Transform*.