

Analisis Perkuatan Ruang Paro (Half-Space) Oleh Tiang Pancang Pendek Dengan Metode Elemen Hingga

Agung Sumarno

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Bandung, Peneliti, Pusat Penelitian Biomaterial, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Jl. Raya Bogor KM.46 Cibinong, Email : agun010@lipi.go.id

Amrinsyah Nasution

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Bandung, Email : amrinsyah@si.itb.ac.id

Abstrak

Kondisi jalan yang ada di Indonesia pada umumnya dan Kalimantan Timur pada khususnya masih sangat buruk terutama di daerah-daerah terpencil, hal ini menyebabkan pertumbuhan ekonomi di daerah-daerah terpencil sangat lamban. Salah satu kerusakan jalan yang terjadi adalah amblas. Amblas disebabkan karena daya dukung tanah tidak cukup dalam menahan beban lalu lintas yang ada, oleh karena itu diperlukan perkuatan terhadap daya dukung tanah, salah satu perkuatan dengan menggunakan tiang pancang pendek. Pada penelitian ini dilakukan analisis perkuatan ruang paro oleh tiang pancang pendek dengan metode elemen hingga, dimana medium ruang paro merupakan representasi dari area disekitar tiang pancang pendek. Analisis dilakukan dengan bantuan komputer dengan membuat perangkat lunak. Verifikasi dilakukan dengan solusi Boussinesq untuk deformasi dan tegangan yang terjadi pada medium ruang paro akibat beban aksial dan solusi Amrinsyah untuk deformasi dan tegangan yang terjadi pada medium ruang paro akibat beban aksial dengan adanya perkuatan tiang pancang pendek. Perkuatan ruang paro oleh tiang pancang pendek memberikan pengaruh terhadap deformasi yang terjadi. Deformasi yang terjadi pada ruang paru yang diberi perkuatan tiang pendek akan lebih kecil bila dibandingkan dengan deformasi pada ruang paru yang tidak diberi perkuatan tiang pendek. Dengan menggunakan metode elemen hingga dapat dikembangkan untuk penyelesaian masalah nonlinier yang mana dengan solusi Boussinesq dan solusi Amrinsyah hanya dapat menyelesaikan masalah linier.

Kata-kata kunci: *Tiang pancang pendek, ruang paro, metode elemen hingga, deformasi, perkuatan.*

Abstract

Road conditions in Indonesia, particularly on rural areas in east kalimantan is uncontrolled. Hence, this condition slowing down the economical growth. Road deformation is caused by soil bearing capacity which could not hold the traffic load on it. Stiffening is needed towards soil bearing capacity by using short pile. This research analyzed half space stiffening by using short pile with finite element method. Half space is representation of area around the short pile. Half space striffening analization was done by making a software. We verified the software using two methods. Boussinesq Solution verified the deformation and stress in half space medium due to axial load and Amrinsyah solution verified deformation and stress in half space medium due to axial load with the stiffening by short piles . Stiffening using short pile give effect to deformation on half space. Deformation the half space with stiffening by short pile is smaller than the deformation of the half space without short pile. finite element method can be developed to solve not only linier as well as nonlinier problems, whilst Boussinesq and Amrinsyah Solution just outdo the linear problem.

Keywords: *short pile, half-space, finite element method, deformation, stiffening.*

1. Pendahuluan

Salah satu kerusakan jalan yang sering terjadi adalah amblas, bentuk kerusakan yang terjadi ini berupa amblas/turunnya permukaan lapisan perkerasan pada lokasi-

lokasi tertentu dengan atau tanpa retak, kedalaman kerusakan ini umumnya lebih dari 2 cm dan akan menampung/meresapkan air (Shahin, 1994). Amblas disebabkan karena daya dukung tanah tidak cukup dalam menahan beban lalu lintas yang ada, biasanya terjadi pada daerah-daerah yang struktur tanahnya tidak stabil dan daerah dimana jalan-jalan yang baru dibuka,

kerusakan karena struktur tanah cukup dominan. Oleh karena itu diperlukan perkuatan terhadap daya dukung tanah, salah satu perkuatan dengan menggunakan tiang pancang pendek.

Tiang pancang merupakan elemen aksial yang menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah penunjang pada kedalaman tertentu. Sebagaimana halnya elemen struktur bangunan sipil lainnya, tiang pancang harus kuat menahan/mendukung beban yang ditanggungnya. Kekuatan tiang pancang yang dimaksud adalah kekuatan dari material tiang pancang itu sendiri dan kekuatan secara keseluruhan dengan interaksinya terhadap tanah sehingga mampu mendukung beban yang diberikan. Secara konvensi pula telah ditetapkan bahwa dukungan pondasi tiang adalah kombinasi dari dukungan ujungnya dan dukungan di sepanjang sisinya (Hakam, 2008). Secara umum dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q_u = Q_p + Q_s \tag{1}$$

dimana :

Q_u : kapasitas daya dukung beban pondasi

Q_p : kapasitas daya dukung ujung (didasar)

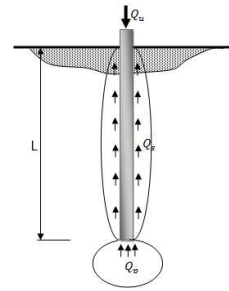
Q_s : kapasitas daya dukung sisi (gesekan)

Berdasarkan konsep tersebut panjang tiang pancang ditentukan oleh kedalaman tanah keras untuk memberikan kapasitas daya dukung ujung tiang pancang, semakin dalam tanah keras maka semakin panjang tiang pancang. Berbeda halnya dengan tiang pancang pendek, dimana tiang pancang pendek tidak tertanam hingga tanah keras sehingga tidak ada daya dukung ujung yang diberikan oleh tanah keras. Atas dasar inilah perlu dilakukan analisis perkuatan ruang paro oleh tiang pancang pendek, dimana medium ruang paro merupakan representasi dari area disekitar tiang pancang pendek.

Analisis yang digunakan adalah dengan metode elemen hingga, merupakan solusi untuk memperoleh penyelesaian bagi sistem dengan geometri, beban dan material yang kompleks.

Penyelesaian analisis matematik sistem benda pejal ruang paro (*half-space*) yang menerima beban luar yang bekerja normal pada permukaan telah diberikan oleh Boussinesq, dan penyelesaian analisis matematik sistem benda pejal ruang paro (*half-space*) dengan perkuatan tiang pancang pendek yang menerima beban luar yang bekerja normal pada permukaan telah diberikan oleh Amrinsyah (1984), sehingga analisis metode elemen hingga dalam makalah ini akan diverifikasi terhadap solusi Boussinesq dan juga solusi Amrinsyah.

Dari penelitian ini dikaji pengaruh perkuatan ruang paro (*half-space*) oleh tiang pancang pendek, untuk variasi jenis tanah, panjang tiang, dan beban.

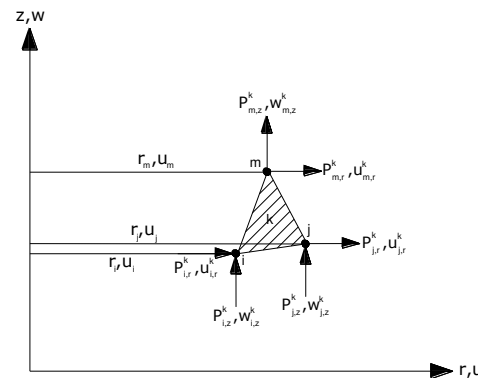


Gambar 1. Konsep daya dukung pondasi tiang

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Elemen hingga axis symmetrik

Pada penelitian ini digunakan elemen segitiga axisymmetrik dimana terdapat tiga node pada tiap elemen (i, j, dan m) dan pada masing-masing node terdapat dua derajat kebebasan (seperti pada Gambar 2) dibawah ini



Gambar 2. Penampang elemen segitiga axisymmetrik

dimana :

u = perpindahan radial

w = perpindahan arah z

Matriks kekakuan elemen [k]

Matriks kekakuan elemen dari elemen segitiga axisymmetrik adalah

$$[k] = \int_{Volume} [D]^T [E][D] dV \tag{2}$$

$$[k] = 2\pi \iint [D]^T [E][D] r dr dz \tag{3}$$

Dimana matriks $[k]$ adalah fungsi dari r dan z yang memiliki orde 6×6 .

Pada penelitian ini dalam penentuan besaran matriks $[k]$ dilakukan dengan pendekatan nilai rata-rata dari centroidal point (\bar{r}, \bar{z}) pada tiap elemen dimana

$$r = \bar{r} = \frac{r_i + r_j + r_m}{3}, z = \bar{z} = \frac{z_i + z_j + z_m}{3} \tag{4}$$

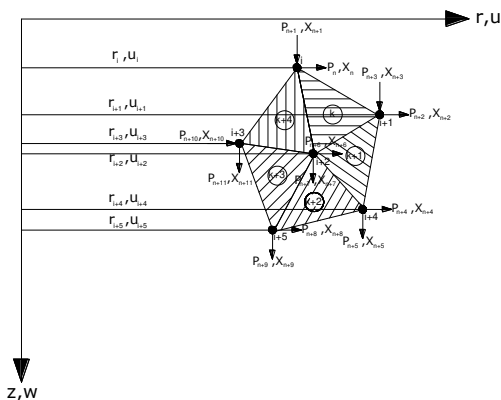
Sehingga persamaan (3) dapat ditulis menjadi

$$[k] = 2\pi r A [D]^T [E][D] \quad (5)$$

Matriks kekakuan struktur [K]_s,

Matrik kekakuan elemen $[k]_m = 2\pi \int \int [D]^T [E][D] r dr dz$
 Hasil perkalian unsur ketiga matrik merupakan unsur matrik $[k]_m$. Indeks dalam lingkaran $\textcircled{1}$ $\textcircled{2}$ $\textcircled{3}$ $\textcircled{4}$ $\textcircled{5}$ $\textcircled{6}$ menyatakan besaran arah positif gaya dan perpindahan kedua ujung elemen dalam sistem koordinat struktur/global.

Matrik kekakuan elemen $[k]_m$ menjadi bagian dari penyusunan unsur matrik kekakuan struktur $[K]_s$. Meninjau penyusunan unsur matrik kekakuan struktur di titik kumpul (i+2), prosedur menggabungkan indeks unsur kekakuan elemen $[k]_m$ dengan sebutan derajat kebebasan struktur haruslah ditetapkan dari posisi indeks derajat kebebasan elemen. Elemen k, (k+1), (k+2), (k+3), (k+4) dengan indeks derajat kebebasan dititik (i+2) adalah sama dengan indeks derajat kebebasan struktur (P_{n+6}, X_{n+6}) , (P_{n+7}, X_{n+7}) .



Gambar 3. Vektor [P,X]_s derajat kebebasan struktur

Kekakuan matrik $[K]_s$ keseluruhannya :

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} & \dots & K_{1j} & \dots & K_{1-12} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} & \dots & K_{2j} & \dots & K_{2-12} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} & \dots & K_{3j} & \dots & K_{3-12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{j1} & K_{j2} & K_{j3} & K_{j4} & \dots & K_{jj} & \dots & K_{j-12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & K_{N4} & \dots & K_{jN} & \dots & K_{N-N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ \vdots \\ X_j \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ \vdots \\ P_j \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\{P\}_S = [K]_S \{X\}_S \quad (7)$$

N = jumlah derajat kebebasan struktur (DOF).

Menyusun persamaan (2.2)

$$\begin{Bmatrix} P_f \\ P_s \end{Bmatrix}_S = \begin{bmatrix} K_{ff} & K_{fs} \\ K_{sf} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_f \\ X_s = 0 \end{Bmatrix}_S \quad (8)$$

Indeks f menyatakan jumlah derajat kebebasan struktur, dan indeks s jumlah derajat kebebasan perletakan.

Solusi persamaan linear $\{P\}_S = [K]_S \{X\}_S$ menghasilkan penyelesaian

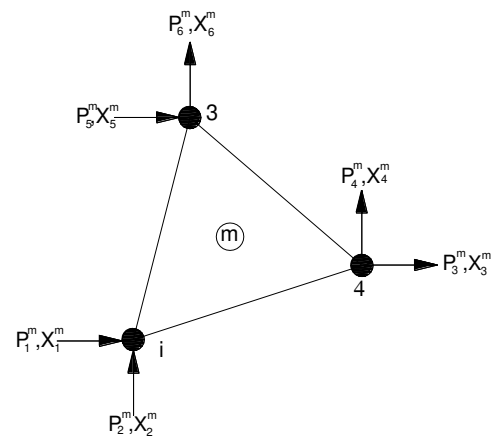
$$\{X_f\}_S = [K_{ff}]_S^{-1} * \{P_f\}_S \quad (9)$$

yaitu deformasi titik-titik nodal yang terkait dengan DOF struktur.

Mengisikan $\{X_f\}_S$ ke $\{P_s\}_S = [K_{sf}]_S \{X_f\}_S$,

$$\{P_s\}_S = [K_{sf}]_S * [K_{ff}]_S^{-1} * \{P_f\}_S \quad (10)$$

diperoleh reaksi peletakan dari sistem struktur.



Gambar 4. Gaya nodal elemen

Besarnya gaya titik-titik nodal setiap elemen

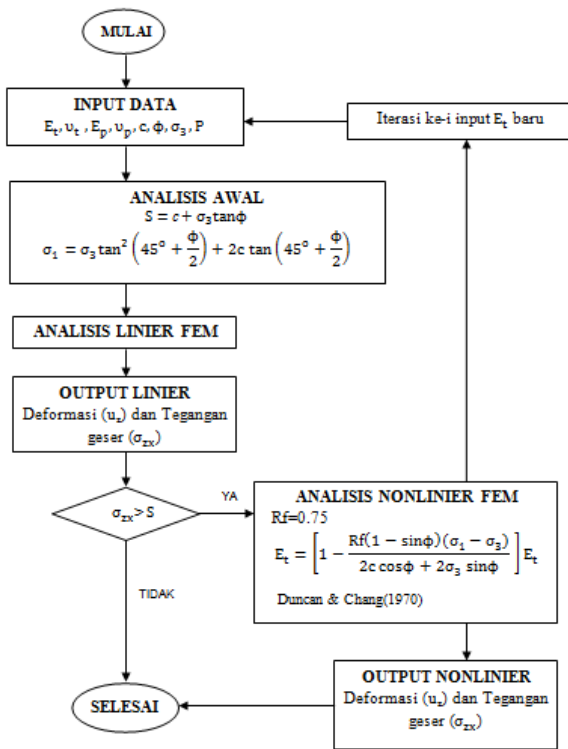
$$\{P\}_m = [k]_m * \{X\}_m \quad (11)$$

$$\text{dan tegangan } \{\sigma\}_m = [E]_m * [D]_m * \{X\}_m \quad (12)$$

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini digunakan perangkat lunak MATLAB[®]. MATLAB[®] adalah bahasa pemrograman tingkat tinggi yang sering digunakan untuk melakukan perhitungan rumit dalam banyak penelitian penting. Kelebihan utama MATLAB[®] adalah kemudahannya dalam perhitungan matriks dan tersedianya *toolbox built-in* yang mempermudah dalam melakukan pemrograman. MATLAB[®] dapat melakukan perhitungan lebih cepat dari pada spreadsheet ataupun bahasa pemrograman tradisional lain, seperti c/c++ dan Java[™].

Selanjutnya dilakukan penyusunan program axisymmetric pada perangkat lunak MATLAB[®] yang terdiri dari program utama axisymmetric dan subprogram-subprogram yang meliputi subprogram indeks, subprogram matriks kekakuan elemen, subprogram matriks kekakuan struktur, subprogram kondisi batas, subprogram *restraint*, subprogram gaya dan subprogram tegangan. Berikut ini adalah alur pemrograman axisymmetric pada penelitian ini.



Gambar 5. Diagram alir pemrograman

4. Analisa dan Pembahasan

Konfigurasi model ruang paro (half-space)

Model ruang paro (half-space) mengambil dari model Solusi Amrinsyah bagi perkuatan ruang paro oleh tiang pancang pendek seperti pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2, dan pada penelitian ini ditetapkan $Q = 1000 \text{ kN/m}$, $a = 0.1 \text{ m}$, dan $d/a = 2$ maka $d = 0.2 \text{ m}$.

Properti elemen

a. Material tanah

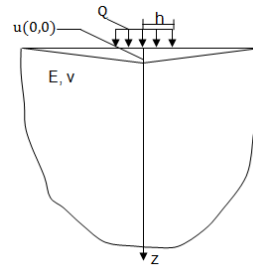
Modulus elastisitas material tanah yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada hasil penelitian Obrzud dan Truty (2012) yang disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2 serta angka poisson mengacu pada penelitian Amrinsyah (1984) yaitu $\nu = 0$ dan $\nu = 0.25$

Tabel 1. Nilai tipikal modulus elastisitas tanah untuk material granular (MPa) (Obrzud & Truty, 2012)

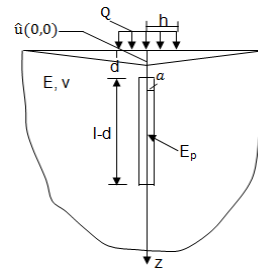
USCS	Description	Loose	Medium	Dense
GW, SW	Gravel/Sand well-graded	30-80	80-160	160-320
SP	Sand, uniform	10-30	30-50	50-80
GM, SM	Sand/Gravel silty	7-12	12-30	20-30

Tabel 2. Nilai tipikal modulus elastisitas tanah untuk material kohesif (MPa) (Obrzud & Truty, 2012)

USCS	Description	Very soft to soft	Medium	Stiff to very stiff	Hard
ML	Silts with slight plasticity	2.5-8	10-15	15-40	40-80
ML, CL	Silts with low plasticity	1.5-6	6-10	10-30	30-60
CL	Clays with low-medium plasticity	0.5-5	5-8	8-30	30-70
CH	Clays with high plasticity	0.35-4	4-7	7-20	20-32
OL	Organic silts	-	0.5-5	-	-
OH	Organic Clays	-	0.5-4	-	-



Gambar 6. Ruang paro (half-space) tanpa tiang



Gambar 7. Ruang paro (half-space) dengan perkuatan tiang

b. Pile - Tiang

Modulus elastisitas pile pada penelitian ini $E_p = 20.000 \text{ MPa}$, dengan angka poisson $\nu = 0.25$

Dengan ditetapkan $a = 0.1 \text{ m}$, dan $d = 0.2 \text{ m}$, maka variasi panjang tiang berdasarkan penelitian Amrinsyah (1984) disajikan pada Tabel 3

Tabel 3. Variasi panjang tiang

	$(l-d)/a = 20$	$(l-d)/a = 10$	$(l-d)/a = 5$
Panjang tiang	2 m	1 m	0.5 m

c. Beban

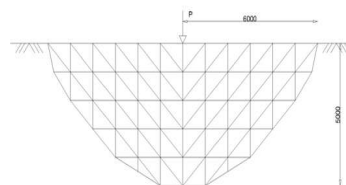
Dengan ditetapkan $Q = 1000 \text{ kN/m}$ dan $P = 2h$, Q , maka variasi beban berdasarkan penelitian Amrinsyah (1984) disajikan pada Tabel 4

Tabel 4. Variasi beban P

	$h/a = 0.5$	$h/a = 1$	$h/a = 2$
Beban P	100 kN	200 kN	400 kN

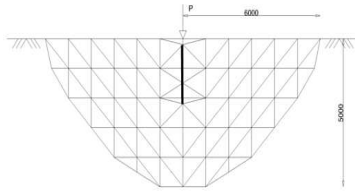
Konfigurasi model axisymmetrik

Konfigurasi model axisymmetrik tanpa tiang pada Gambar 8 :

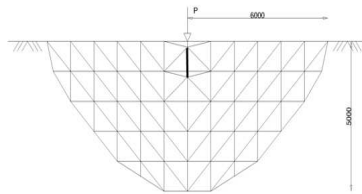


Gambar 8 Model 1 axisymmetrik tanpa tiang

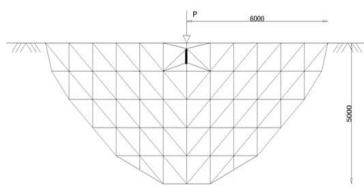
Konfigurasi model axisymmetrik dengan tiang yang mengacu pada penelitian Amrinsyah (1984) pada Gambar 9 - Gambar 11 :



Gambar 9. Model 2 axisymmetrik dengan tiang panjang 2 m, d = 0.2 m



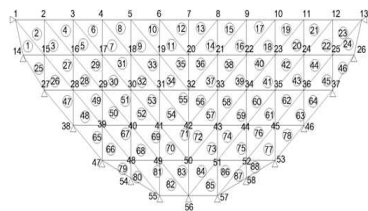
Gambar 10. Model 3 axisymmetrik dengan tiang panjang 1 m, d = 0.2 m



Gambar 11. Model 4 axisymmetrik dengan tiang panjang 0.5 m, d = 0.2 m

Parameter elemen axisymmetrik

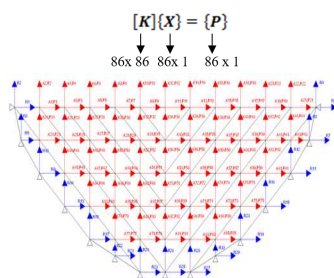
- a. Penomoran titik-titik kumpul dan penomoran elemen



Gambar 12. Penomoran titik kumpul dan penomoran

- b. DOF struktur dan reaksi perletakan

Struktur diatas terdiri dari 86 DOF



Gambar 13. DOF struktur dan reaksi perletakan model 1

VERIFIKASI PROGRAM

Verifikasi program dilakukan terhadap solusi Boussinesq untuk kasus axisymmetrik tanpa tiang pendek dan terhadap solusi Amrinsyah untuk kasus axisymmetrik dengan perkuatan tiang pendek.

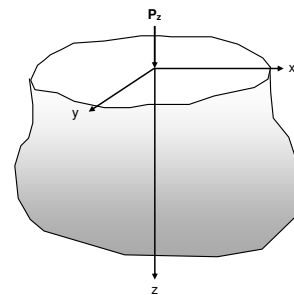
Pada verifikasi ini diambil satu contoh kasus tanah *dense sand/gravel well-graded* dengan modulus elastisitas $E = 200 \text{ MPa}$ (Obrzud & Truty, 2012), poisson ratio $\nu = 0.25$, dan gaya aksial sebesar $P = 400 \text{ kN}$, panjang pile 2 m.

Verifikasi terhadap solusi Boussinesq

$$w = \frac{P_z}{4\pi\mu} \left[\frac{z^2}{R^3} - \frac{2(1-\nu)}{R} \right] \tag{13}$$

dengan

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \tag{14}$$



Gambar 14. Model solusi Boussinesq

dimana :

$$P_z = 400 \text{ kN}, \quad z = 0, \quad R = 0; \quad E = 200000 \text{ kN/m}^2$$

$$\nu = 0.25$$

$$\mu = \frac{200000}{2(1+0.25)} = 80 \times 10^3$$

Karena $z = 0$ dan $R = 0$, maka

$$w = \frac{P_z(1-\nu)}{2\pi\mu} * \frac{1}{x} \tag{15}$$

$$w = \frac{400(1-0.25)}{2(3.14)(80 \times 10^3)} * \frac{1}{x}$$

$$w = \left(-0.597 \times 10^{-3} * \frac{1}{x} \right) \text{ m}$$

Solusi yang diberikan oleh Finney, Weir, dan Giordano (2010) dalam buku "Thomas' Calculus" untuk $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ dari fungsi $f(x) = \frac{1}{x}$ adalah sebagai berikut

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{x} = \infty \quad (16)$$

dan

$$\lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^-} \frac{1}{x} = -\infty \quad (17)$$

Sehingga nilai $f(x) = \frac{1}{x}$ pada $x = 0$ tidak dapat didefinisikan. Namun demikian pendekatan untuk mendapatkan nilai pada $x = 0$ dari dari fungsi $f(x) = \frac{1}{x}$ dapat dilakukan dengan cara mencari gradient dan persamaan garis yang menyinggung kurva. $f(x) = \frac{1}{x}$

Solusi ini juga diberikan oleh Finney, Weir, dan Giordano (2010) dalam buku "Thomas' Calculus".

dimana

gradient garis yang menyinggung kurva $f(x) = \frac{1}{x}$ pada $x_0 = a$ adalah

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{(a+h)} - \frac{1}{a}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{h} \frac{a - (a+h)}{a(a+h)}}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-h}{ha(a+h)} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{-1}{a(a+h)} = -\frac{1}{a^2} \quad (4.5)$$

sehingga

$$m = -\frac{1}{a^2}$$

maka persamaan garis yang menyinggung kurva $f(x) = \frac{1}{x}$ adalah

$$y = y_0 + m(x - x_0) \quad (18)$$

$$y = y_0 - \frac{1}{a^2}(x - x_0) \text{ pada } (x_0 = a) \quad (5.6b)$$

pada kasus ini nilai w adalah

$$w = \left(-0.597 \times 10^{-3} \times \frac{1}{x}\right) \text{ m}$$

apabila nilai $x_0 = 1$, $y_0 = -0.597 \times 10^{-3}$ dan $m = 0.597 \times 10^{-3} \times \frac{1}{a^2}$ disubsitusikan pada persamaan (18)

maka

$$y = (-0.597 \times 10^{-3}) + (0.597 \times 10^{-3}) \times \frac{1}{1^2} (0 - 1) = 0.0012 \text{ m}$$

Dari hasil analisis dengan menggunakan program yang dibuat pada MATLAB® tanah *dense sand/gravel well-graded* dengan modulus elastisitas $E = 200 \text{ MPa}$ (Obrzud & Truty, 2012), poisson rasio $\nu = 0.25$, dan gaya aksial sebesar $P = 400 \text{ kN}$, tanpa pile memberikan nilai deformasi sebesar 0.001 m .

Hasil tersebut menunjukkan bahwa analisis dengan metode elemen hingga memberikan hasil yang mendekati hasil dari solusi Boussinesq bagi ruang paruh dengan beban terpusat tanpa perkuatan tiang pendek.

Verifikasi terhadap solusi Amrinsyah

Dari hasil analisis dengan menggunakan program yang dibuat pada MATLAB® tanah *dense sand/gravel well-graded* dengan modulus elastisitas $E = 200 \text{ MPa}$ (Obrzud & Truty, 2012), poisson rasio $\nu = 0.25$, dan

gaya aksial sebesar $P = 400 \text{ kN}$, yang diberi perkuatan tiang pendek dengan panjang tiang 2 m memberikan nilai deformasi sebesar 0.000779 m .

Sehingga perbandingan antara $\frac{u(0,0)}{\hat{u}(0,0)}$ memberikan hasil

$$\frac{u(0,0)}{\hat{u}(0,0)} = \frac{0.000779}{0.001} = 0.779$$

Mengacu pada hasil solusi Amrinsyah dimana

$$E = 200 \text{ MPa} \rightarrow \frac{E_p}{E} = \frac{20000}{200} = 100$$

$$(1-d) = 2\text{m} \rightarrow (1-d)/a = 20 \cdot 0$$

$$P = 400 \text{ kN} \rightarrow h/a = 2$$

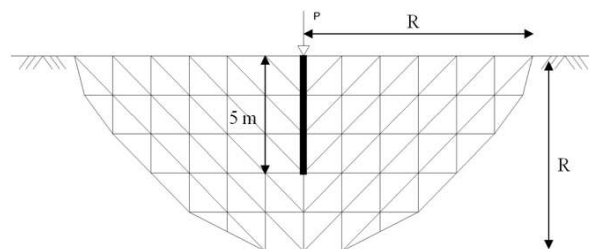
Hasil solusi Amrinsyah menunjukkan bahwa $\frac{u(0,0)}{\hat{u}(0,0)} = 0.795$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa analisis dengan metode elemen hingga memberikan hasil yang mendekati hasil dari solusi Amrinsyah bagi ruang paruh dengan beban terpusat yang diberi perkuatan tiang pendek.

Perbandingan dampak dari radius elemen axisymmetrik

Pada bagian ini akan dilakukan analisis untuk mengetahui dampak dari radius elemen axisymmetrik sehingga diperoleh radius yang disarankan untuk analisis dengan menggunakan FEM.

Permodelan untuk kasus ini menggunakan Matlab seperti pada gambar dibawah ini, pile panjang 5 m dan diameter 30 cm serta radius model R dengan variasi perbandingan antara panjang tiang dengan radius $1:1.25, 1:1.5, 1:1.75, 1:2, \text{ dan } 1:2.25$. Dengan properti data material pile yang digunakan $E = 2 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $\nu = 0.49$ dengan gaya $P = 400 \text{ kN}$.

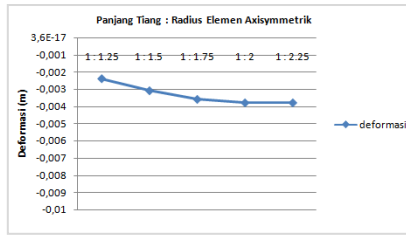


Gambar 15. Permodelan FEM dengan Matlab untuk variasi R

Berikut ini adalah hasil running dengan program Matlab

Tabel 5. Pengaruh radius model elemen axisymmetrik terhadap deformasi

Panjang Tiang : Radius	Deformasi (m)
1 : 1.25	-0.0024
1 : 1.50	-0.0031
1 : 1.75	-0.0036
1 : 2.00	-0.0037
1 : 2.25	-0.0038

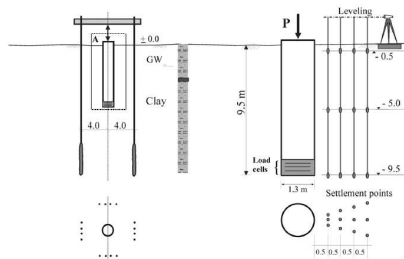


Gambar 16. Grafik deformasi akibat berbagai variasi perbandingan panjang tiang dengan radius elemen axisymmetrik

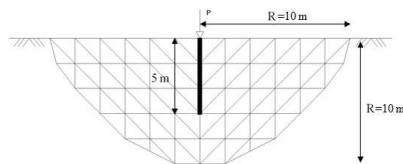
Dari grafik diatas terlihat bahwa perbandingan radius yang kecil menghasilkan deformasi yang kecil, hal ini disebabkan karena model elemen yang cukup kaku. Namun, hasil deformasi semakin sama pada model dengan perbandingan 1: 1.75, 1 : 2 dan 1 :2.25. sehingga untuk melakukan perhitungan dengan FEM menggunakan perbandingan panjang tiang dengan radius 1 : 2

Perbandingan FEM Matlab untuk variasi diameter tiang dan solusi Boussinesq

Permodelan untuk kasus ini menggunakan Matlab seperti pada gambar dibawah ini, pile panjang 5 m dan diameter 30 cm serta perbandingan antara panjang tiang dengan radius 1:2. Dengan properti data material pile yang digunakan adalah tanah *clay* , dengan $v=0,49$ dan gaya $P = 400$ kN.



Gambar 17. Model pile load test Sommer & Hambach (1974)

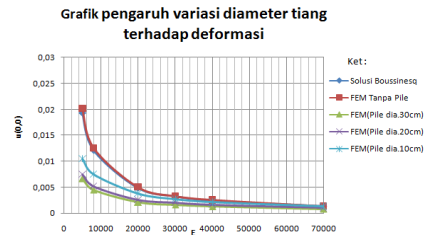


Gambar 18. Permodelan FEM dengan Matlab untuk R = 10 m

Berikut ini adalah hasil running dengan program Matlab

Tabel 6. Pengaruh variasi diameter tiang terhadap deformasi

E (kN/m ²)	P (kN)	v	μ	w	diameter 30 cm	diameter 20 cm	diameter 10 cm	diameter 0 cm
5000	400	0.49	1677.852	0.01936051	0.0067	0.0075	0.0105	0.0201
8000	400	0.49	2684.564	0.012100318	0.0045	0.0052	0.0075	0.0125
20000	400	0.49	6711.409	0.004840127	0.0021	0.0026	0.0038	0.005
30000	400	0.49	10067.11	0.003226752	0.0016	0.002	0.0027	0.0033
40000	400	0.49	13422.82	0.002420064	0.0013	0.0016	0.0021	0.0025
70000	400	0.49	23489.93	0.001382894	0.00084995	0.001	0.0013	0.0014



Gambar 19. Grafik pengaruh variasi diameter tiang terhadap deformasi

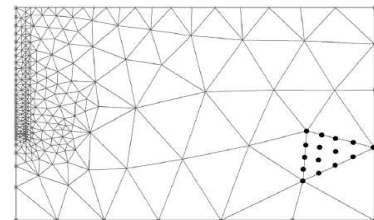
Dari grafik diatas terlihat bahwa deformasi yang terjadi pada variasi diameter tiang akan menunjukkan nilai yang semakin kecil apabila semakin besar diameter tiang, dan kurva akan berhimpit dengan hasil yang diberikan oleh solusi Boussinesq apabila tanpa pile

Perbandingan hasil FEM Matlab dengan pile load test, model numerik BEM, FEM Plaxis 2D, dan FEM Plaxis 3D untuk overconsolidated clay

Pile load test

Hasil pile load test mengacu pada penelitian yang dilakukan Sommer & Hambach (1974) untuk overconsolidated clay dengan pile panjang 9,5 m dan diameter 1,3 m seperti pada Gambar 17 dan Gambar 18.

FEM plaxis 2D



Gambar 20. Permodelan FEM dengan Plaxis 2D V8 (Plaxis 3D Foundation validation manual version 1.5)

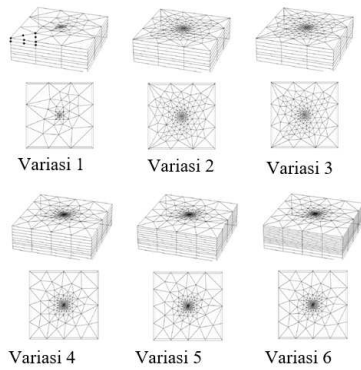
Permodelan untuk kasus diatas menggunakan Plaxis 2D V8 seperti pada gambar dibawah ini, pile panjang 9,5 m dan diameter 1,3 m kedalaman model 16 m. Dengan properti data material pile yang digunakan $E = 3 \times 10^7$ kN/m², $v=0,2$

FEM plaxis 3D

Permodelan untuk kasus diatas menggunakan Plaxis 3D seperti pada gambar dibawah ini, pile panjang 9,5 m dan diameter 1,3 m kedalaman model 16 m dan area 50 m x 50 m. Dengan properti data material pile yang digunakan $E = 3 \times 10^7$ kN/m², $v=0,2$

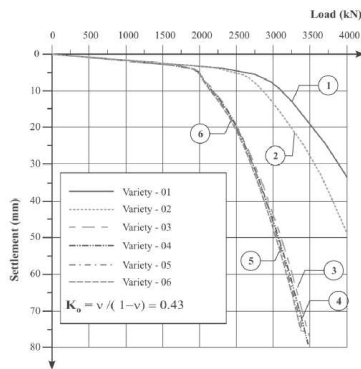
Tabel 4.7 Jumlah mesh tiap variasi model pada plaxis 3D

Model name	No. of elements / nodes in top work plane	Total no. of elements / nodes for the whole 3D mesh	No. of layers in pile
Variety -01	106 / 237	742 / 2238	4
Variety -02	292 / 609	2044 / 5865	4
Variety -03	350 / 741	2450 / 7060	4
Variety -04	350 / 741	3150 / 8862	5
Variety -05	350 / 741	3850 / 10664	7
Variety -06	350 / 741	5250 / 14268	10



Gambar 21. Permodelan FEM dengan plaxis 3D (Plaxis 3D Foundation validation manual version 1.5)

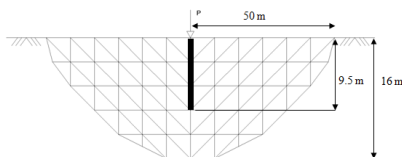
Hasil analisis FEM Plaxis 3D diperlihatkan seperti pada grafik di bawah ini.



Gambar 22. Grafik perbandingan berbagai variasi mesh pada plaxis 3D (Plaxis 3D Foundation validation manual version 1.5)

FEM matlab

Permodelan untuk kasus diatas menggunakan Matlab seperti pada gambar dibawah ini, pile panjang 9,5 m dan diameter 1,3 m kedalaman model 16 m. Dengan properti data material pile yang digunakan $E = 3 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$, $\nu=0,2$.

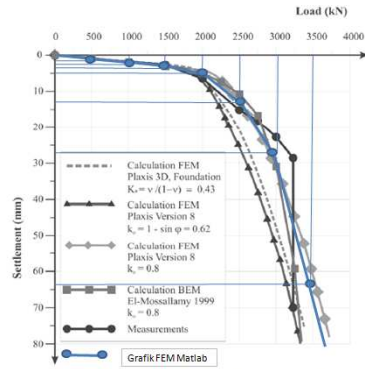


Gambar 23. Permodelan FEM dengan matlab

Tabel 4.8. Hasil running program dengan Matlab

LOAD	deformasi(m)
500	-0.0012
1000	-0.0024
1500	-0.0035
2000	-0.0047
2500	-0.0115
3000	-0.0273
3500	-0.064
4000	-0.148

Apabila kesemua hasil diplot dalam grafik akan memberikan grafik perbandingan seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 24. Perbandingan hasil antara berbagai permodelan numerik dan hasil pengukuran untuk overconsolidated clay

5. Kesimpulan

1. Perkuatan ruang paro (*half-space*) oleh tiang pancang pendek memberikan pengaruh terhadap deformasi yang terjadi. Deformasi yang terjadi pada ruang paruh (*half-space*) yang diberi perkuatan tiang pendek akan lebih kecil bila dibandingkan dengan deformasi pada ruang paruh (*half-space*) yang tidak diberi perkuatan tiang pendek.
2. Pada variasi berbagai jenis tanah berdasarkan modulus elastisitas perkuatan ruang paruh (*half-space*) dengan tiang pancang pendek paling berpengaruh pada jenis tanah yang memiliki modulus elastisitas paling kecil $E = 350 \text{ kN/m}^2$ dan $\nu = 0$ yaitu jenis tanah *clays with high plasticity* dengan kategori *very soft to soft*. Reduksi deformasi yang terjadi sebesar 50, 96 % dengan panjang tiang 2 m. dan semakin besar nilai modulus elastisitas tanah semakin kecil reduksi deformasi yang diberikan oleh pile.
3. Panjang tiang sangat mempengaruhi reduksi deformasi yang terjadi. Semakin panjang tiang semakin besar reduksi deformasi yang terjadi, seperti yang ditunjukkan pada hasil analisis jenis tanah *clays with high plasticity* dengan $E = 350 \text{ kN/m}^2$ dan $\nu = 0$, panjang tiang 2 m memberikan reduksi deformasi sebesar 50, 96 %, sedangkan pada panjang pile 1 m reduksi sebesar 37,15 % dan pada panjang pile 0,5 m reduksi sebesar 28,51 %. Hal ini dikarenakan kekakuan tiang memberikan sumbangan terhadap kekakuan dari elemen axissymmetik pada perhitungan metode elemen hingga.
4. Semakin besar gaya yang diberikan semakin besar pula deformasi yang terjadi, namun reduksi deformasi yang terjadi perbedaannya tidak signifikan, seperti yang ditunjukkan pada hasil analisis jenis tanah *clays with high plasticity* dengan $E = 350 \text{ kN/m}^2$ dan $\nu = 0$ serta panjang pile 2 m. Dengan memberikan gaya 100 kN reduksi deformasi yang terjadi sebesar 50, 96 % sama halnya dengan gaya 200 kN reduksi deformasi yang terjadi sebesar 50, 96 % sedangkan dengan

- memberikan gaya 400 kN reduksi deformasi yang terjadi sebesar 50,95 %.
5. Perbedaan nilai angka poisson tidak memberikan perbedaan yang signifikan pada persentase nilai reduksi deformasi yang terjadi, seperti yang ditunjukkan pada hasil analisis jenis tanah *clays with high plasticity* dengan $E = 350 \text{ kN/m}^2$ serta panjang pile 2 m dengan gaya 100 kN. Pada angka poisson sebesar $\nu = 0$ reduksi deformasi yg terjadi sebesar 50,96 % sedangkan pada angka poisson sebesar $\nu = 0$ reduksi deformasi yg terjadi sebesar 49,93 %.
 6. Dengan menggunakan metode elemen hingga dapat dikembangkan untuk penyelesaian masalah nonlinier yang mana dengan solusi Boussinesq dan solusi Amrinsyah hanya dapat menyelesaikan masalah linier.

Daftar Pustaka

- Finney, Weir, Giordano. Thomas' Calculus, 12th Edition, Addison Wesley Longman Publishing, 2010. California.
- Hakam, Abdul., (2008) : *Rekayasa Pondasi*, Bintang Grafika, Padang.
- Nasution, Amrinsyah., (1984) : *Stiffening effect of driven shallow piles in a semi-infinite solid*, Ph.D Thesis University of Minnesota, St.Paul-Minneapolis.
- Obrzud R. & Truty (2012), The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook Soil.PC 100701 report, revised 31.01.2012.
- Shahin, M. Y. (1994). Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots. Chapman & Hall. New York.
- Sommer, H. and Hambach, P. (1974). Großpfahlversuche im Ton für die Gründung der Talbrücke Alzey. Der Bauingenieur, Vol. 49, pp. 310-317

