

Perbaikan Daya Dukung Tanah Menggunakan Metode Cement Fly-Ash Gravel (CFG) Pile Alternatif Pengganti Metode Stone Column

Haryo Koco Buwono^{1*}, Tanjung Rahayu¹, Nadia Sabila Putri¹

Universitas Muhammadiyah Jakarta¹

Koresponden*, Email: haryo.koco@umj.ac.id

Abstrak. Ada banyak metode penanganan untuk pondasi dangkal pada tanah lunak, pondasi komposit tiang CFG adalah salah satu metode penanganan yang umum. Dalam makalah ini diperkenalkan penerapan CFG pile pada pembangunan jalan raya, disampaikan bahwa pondasi komposit CFG pile merupakan metode penanganan pondasi yang sederhana, cepat, ekonomis dan efektif. Sejumlah besar ilmu rekayasa, proyek pondasi komposit tiang pancang CFG memiliki karakteristik biaya rendah, bahan mudah ditarik dan teknologi handal. Ini banyak digunakan untuk penanganan semua jenis fondasi lunak seperti tanah kohesif, tanah berlumpur, dan tanah berpasir. Untuk penanganan masalah tersebut, perlu dilakukan perbaikan tanah saat pekerjaan subgrade. Dengan menganalisis perbandingan perbaikan tanah dengan CFG pile dan stone column dalam peningkatan daya dukung tanah untuk permodelan pembangunan jalan raya berdasarkan faktor keamanan daya dukung tanah sebesar 3. Sehingga didapat desain pile yang memiliki diameter 0,5 m dan tinggi pile 40 m serta jarak antar pile 2,5 m. Beban pile sebesar 10 ton yang merupakan MST mutu jalan kelas I, dari permodelan didapat daya dukung tanah setelah perbaikan dengan CFG pile sebesar 1514,989 kN dan stone column sebesar 1465,871 kN.

Kata Kunci : CFG pile, stone column, lempung lunak

Abstrack. *There are many treatment methods for shallow foundations in soft soil, CFG pile composite foundation is one of the common treatment methods. In this paper, the application of CFG pile in highway construction is introduced, it is presented that CFG pile composite foundation is a simple, fast, economical and effective foundation treatment method. A large number of engineering science, CFG pile composite foundation project has the characteristics of low cost, easy to withdraw materials and reliable technology. It is widely used for handling all kinds of soft foundations such as cohesive soil, silty soil, and sandy soil. To handle these problems, it is necessary to improve the soil during subgrade works. By analysing the comparison of soil improvement with CFG pile and stone column in increasing soil bearing capacity for modelling highway construction based on a soil bearing capacity safety factor of 3. So that a pile design is obtained that has a diameter of 0.5 m and a pile height of 40 m and a distance between piles of 2.5 m. Pile load of 10 tonnes which is the MST of class I road quality, from the modelling obtained soil bearing capacity after improvement with CFG pile of 1514.989 kN and stone column of 1465.871 kN.*

Keyword : CFG_pile, stone_column, soft_clay

1. Pendahuluan

Tingkat pertumbuhan penduduk Indonesia sebanding dengan meningkatnya ekonomi penduduk Indonesia. Pertumbuhan ini mengakibatkan sejumlah persoalan yang kompleks diberbagai bidang, terutama dalam bidang transportasi. Persoalan dalam bidang transportasi seperti kemacetan mengakibatkan kerugian yang tidak sedikit, untuk mengatasi itu pemerintah harus mengambil tindakan salah satunya dengan mengembangkan jalan raya yang merupakan sarana transportasi darat penghubung antar kabupaten, seperti Jakarta, Bogor, Depok, Tangerang, dan Bekasi (Jabodetabek). Mengembangkan jalan raya berarti membuka lahan baru dimana sebagian besar merupakan area persawahan. Untuk penanganan masalah tersebut, perlu dilakukan perbaikan tanah saat pekerjaan *subgrade*. Metode yang sering digunakan untuk perbaikan tanah yaitu metode *stone column*, dewasa ini perbaikan tanah kerap menggunakan metode *CFG pile*.

Area luas yang ditutupi dengan lapisan tebal atau dengan lapisan endapan tanah liat lunak tidak cocok untuk konstruksi pondasi. tanah liat yang lunak tidak cocok untuk konstruksi fondasi. Dengan meningkatnya ukuran daerah perkotaan dan zona industri, maka perlu mempertimbangkan kemungkinan untuk mewujudkan fondasi pada area-area ini. Teknik perbaikan tanah biasanya biasanya lebih disukai karena pertimbangan ekonomi. Dari beberapa teknik yang tersedia, *stone column* termasuk di antara yang paling disukai dan juga banyak digunakan. Teknik perbaikan tanah ini telah berhasil digunakan untuk meningkatkan daya dukung dan mengurangi penurunan konstruksi seperti tangki penyimpanan, tanggul tanah, pondasi rakit, dll. tanggul, fondasi rakit, dll. Keuntungan utamanya terletak pada meningkatkan sifat tanah di bawah struktur (rakit dan kedalaman) dan mengikuti pengurangan penurunan yang tidak teratur.

Terlepas dari penggunaan *stone column* secara luas dan perkembangannya dalam metode konstruksi, metode desain saat ini bersifat empiris, dan hanya informasi terbatas tentang perancangan *stone column* yang tersedia dalam kode teknis. Teknik *stone column* diadopsi di negara-negara Eropa pada awal tahun 1960-an. Banyak peneliti telah mengembangkan solusi teoretis untuk memperkirakan daya dukung dan penurunan fondasi yang diperkuat dengan *stone column*. Priebe (1995) mengusulkan metode untuk memperkirakan penurunan fondasi yang bertumpu pada *stone column*. dari fondasi yang bertumpu pada kisi-kisi *stone column* yang tak terhingga. Dasar dari metode ini adalah sel satuan Dasar dari metode ini adalah konsep sel satuan. Dalam konsep ini, Priebe Priebe mempertimbangkan area tanah yang mengelilingi kolom batu pada jarak tergantung pada jarak kolom. Karena semua kolom dibebani secara simultan, diasumsikan bahwa deformasi lateral pada tanah lateral pada tanah pada batas sel satuan sama dengan nol. Faktor perbaikan penurunan diturunkan sebagai fungsi dari rasio luas sel satuan dan seluruh sel satuan dan *stone column* dan sudut gesekan internal.

Maksud dari permodelan ini adalah memberikan alternatif perbaikan tanah menggunakan metode *CFG pile* untuk meningkatkan daya dukung tanah dan memperkecil penurunan membuat jalan raya tersebut tidak mengalami kerusakan saat dilewati transportasi yang membawa beban lebih.

Tujuan dari permodelan ini adalah untuk mengetahui perbandingan menggunakan metode *stone column* dan *CFG pile* dalam meningkatkan daya dukung tanah, penurunan tanah, waktu konsolidasi yang terjadi serta membandingkan hasil perhitungan daya dukung tanah secara analitis dengan *software PLAXIS*.

2. Metode Penelitian

Daya dukung tanah

Persamaan umum Terzaghi untuk menghitung kapasitas dukung pondasi dalam yang berbentuk lingkaran, dinyatakan oleh:

$$\begin{aligned} P_u' &= P_u + P_s \\ &= q_u A_p + \pi d f_s h \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana,

P_u' = kapasitas dukung ultimit total untuk pondasi dalam (kN)

P_u = kapasitas dukung ultimit total ujung pondasi dalam (kN)

P_s = perlawanan gesekan pada selimut pondasi dalam (kN)

f_s = faktor gesekan permukaan antara dinding dan tanah

Dalam buku Mekanika Tanah Jilid II (Hardiyatmo, 2002) persamaan umum untuk kapasitas dukung ultimit pada pondasi berbentuk lingkaran, dinyatakan oleh persamaan:

$$q_u = 1,3cN_c + p_0N_q + 0,3\gamma dN_\gamma \quad (2)$$

Dimana,

q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m²)

c = kohesi tanah (kN/m²)

p_0 = tekanan *overburden* (kN/m²)

h = kedalaman (m)

γ = berat volume tanah (kN/m³)

d = diameter pondasi (m)

N_c, N_q, N_γ = faktor kapasitas dukung

Daya dukung batas dibagi dengan faktor keamanan maka akan menghasilkan daya dukung yang aman.

$$q_s = \frac{q_{ult}}{SF} \quad (3)$$

Dimana,

$SF = 2 \text{ s/d } 3$

Penurunan tanah

Untuk tanah yang terkonsolidasi normal (*normal consolidated*), besarnya penurunan dihitung dengan persamaan:

$$S_c = \frac{C_c \cdot h}{1+e_0} \log \left(\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \right) \quad (4)$$

Dimana,

S_c = penurunan Akibat konsolidasi primer (m)

h = tebal lapisan lempung (m)

e_0 = angka pori awal (*Initial Void Ratio*)

C_c = *compression index*

Δp = besarnya tegangan dimuka tanah (t/m²)

p_0 = tegangan *overburden* efektif (t/m²)

Penurunan izin dalam SNI 8460:2017 menggunakan persamaan berikut:

$$S < 15 \text{ cm} + \frac{d}{600} \quad (5)$$

Dimana,

S = penurunan tanah (cm)

d = diameter pondasi (cm)

Waktu konsolidasi tanah

Untuk mengetahui kecepatan penurunan konsolidasi didapat dari penurunan matematis yang diperkenalkan oleh Terzaghi (1925) dengan asumsi-asumsi tetap berpegangan kepada teori konsolidasi satu dimensi. Persamaan faktor waktu penurunan konsolidasi sebagai berikut:

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{h^2} \quad (6)$$

Dimana,

T_v = faktor waktu

c_v = koefisien konsolidasi

t = waktu (tahun)

h = tebal lapisan tanah (m)

Perbaikan tanah lunak

Berdasarkan SNI 8460:2017 tujuan utama perbaikan tanah adalah untuk meningkatkan kepadatan, kuat geser tanah, dan/atau ketahanan likuifaksi, serta untuk mengurangi kompresibilitas, permeabilitas dan penurunan tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Kendala yang dihadapi ketika merencanakan suatu bangunan pada kondisi tanah lempung lunak adalah daya dukung (*bearing capacity*), penurunan (*settlement*) serta mempercepat waktu konsolidasi.

Pemasangan *stone column*

Selain meningkatkan daya dukung tanah, menurut Barksdale dan Banchus (Barksdale, R. D.; Banchus, 1983) ada beberapa keuntungan menggunakan *stone column* lain seperti:

1. Mengurangi total penurunan tanah.
2. Memperpendek waktu konsolidasi.
3. Mengurangi bahaya likuifaksi.

Kapasitas daya dukung *stone column*

Kapasitas dukung *stone column* tunggal dapat dihitung dengan rumus:

$$q_{ult} = \sigma_3 \times Kp \quad (7)$$

Dimana,

q_{ult} = kapasitas dukung *stone column* (kN/m²)

σ_3 = tegangan perlawanan pasif (kN/m²)

Kp = koefisien tekanan pasif tanah pada *stone column*

Perhitungan perlawanan pasif dari tanah di sekeliling *stone column* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\sigma_3 = \sigma_{ro} + c_u \left[1 + \ln \frac{E_c}{2c_u(1+v)} \right] \quad (8)$$

Dimana,

σ_3 = tegangan perlawanan pasif (kN/m²)

σ_{ro} = total tegangan horizontal lapangan awal = $K_0 \times \sigma_v$ (kN/m²)

K_0 = koefisien tegangan horizontal, tanah lempung lunak = 0,6 (Punmia, 1980)

$\sigma_v = \gamma' \times h$

c_u = kuat geser *undrained* atau kohesi (kN/m²)

E_c = modulus elastisitas tanah (kN/m²)

V = *poisson ratio*

γ' = berat volume tanah lunak yang ditinjau (kN/m³)

H = kedalaman tanah lunak yang ditinjau (m)

Berikut perhitungan koefisien tekanan pasif (Kp) tanah pada *stone column*:

$$Kp = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{1 + \sin \theta_s}{1 - \sin \theta_s} \quad (9)$$

Dimana,

θ_s = sudut geser dalam *stone column* (°)

Penurunan setelah pemasangan *stone column*

Dalam buku *Design and Construction of Column Stone* (Barksdale, R. D.; Bachus, 1983) untuk mengurangi masalah penurunan dalam perbaikan tanah lempung lunak dengan memasang *stone column* dapat dihitung dengan rumus:

$$S_t = \frac{C_c}{1 + e_0} \log_{10} \left(\frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma_s}{\bar{\sigma}_0} \right) \cdot H \quad (10)$$

Dimana,

S_t = penurunan tanah setelah diperbaiki *stone column* (m)

C_c = *Compression Index*

e_0 = angka pori awal

$\bar{\sigma}_0$ = rata-rata beban eksternal yang bekerja (kN/m²)

σ_s = tegangan pada *stone column* (kN/m²)

H = tinggi *stone column* (m)

Perhitungan tegangan yang terjadi pada *stone column* adalah sebagai berikut:

$$\sigma_s = \mu_s \sigma \quad (11)$$

Perhitungan rasio tegangan pada *stone column* adalah sebagai berikut:

$$\mu_s = \frac{1}{[1 + (n-1)a_s]} \quad (12)$$

Perhitungan *area replacement ratio* adalah perbandingan antara luas penampang *stone column* dengan luas tanah di sekelilingnya sebagai berikut:

$$a_s = 0,907 \left(\frac{d}{s} \right)^2 \quad (13)$$

Dimana,

σ_s = tegangan pada *stone column* (kN/m²)

μ_s = rasio tegangan pada *stone column*

σ = beban eksternal yang bekerja (kN)

n = konsentrasi tegangan = 3

a_s = *area replacement ratio* (m²)

s = jarak antar *stone column* (m)

Pemasangan *CFG pile*

Berdasarkan Artikel Penelitian *Bearing Capacity and Mechanical Behavior of CFG Pile Composite Foundation* yang ditulis Qiu-nan dan teman-temannya tahun 2008, pondasi komposit *CFG pile* memiliki

beberapa keunggulan yaitu meningkatkan daya dukung tanah, memperkecil penurunan dan pembangunannya memakan biaya yang relatif rendah. Maka, pondasi *komposit CFG pile* telah diaplikasikan untuk memperbaiki tanah lunak untuk pembangunan jalan raya, jalur kereta dan bangunan Gedung.

Kapasitas daya dukung CFG pile

Kapasitas dukung *CFG pile* dapat dihitung dengan rumus:

$$P_u' = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} l_i + q_p A \tag{14}$$

Dimana,

P_u' = kapasitas daya dukung vertikal tiang tunggal *CFG pile* (kN)

u_p = perimeter / keliling tiang (m)

n = lapisan tanah terbagi di sepanjang tumpukan

q_{si} = nilai poros resistensi dari lapisan i di tiang pancang tanah lateral (kN/m²) = $f_s = c_d = \alpha \cdot c_u$ dalam metode Tomlinson, 1977

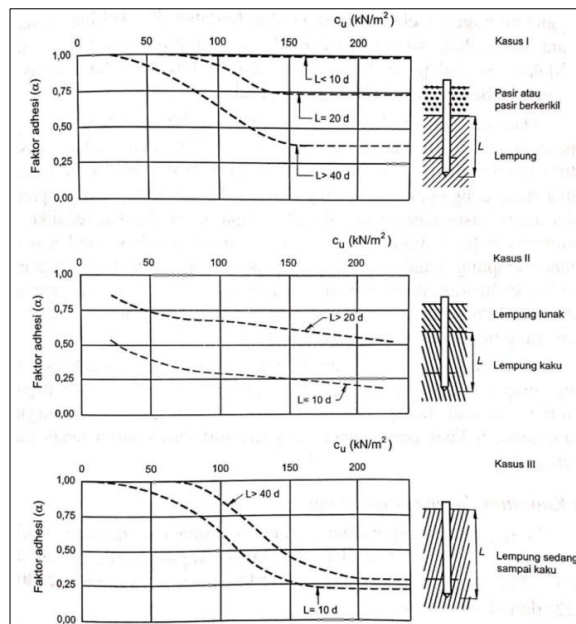
α = faktor adhesi kurva Tomlinson dari grafik McClelland, 1974 (Gambar 1.)

c_u = kuat geser *undrained* atau kohesi (kN/m²)

q_p = masing-masing nilai resistensi ujung tiang (kN/m²)

l_i = ketebalan dari lapisan tanah i (m)

A = luas penampang *CFG pile* (m²)



Gambar 1. Hubungan faktor adhesi dan kohesi untuk tiang pancang pada tanah lempung

Penurunan setelah pemasangan CFG pile

Dalam artikel *CFG Pile Composite Foundation: Its Engineering Applications and Research Advances* (Uge, 2020) berikut persamaan mencari penurunan:

$$S = \psi_{sp} \left[\sum_{i=1}^{n_1} \frac{P_0}{\xi E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) + \sum_{i=n_1+1}^{n_2} \frac{P_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \right] \tag{15}$$

Dimana,

S = penurunan tanah setelah diperbaiki *CFG pile* (m)

ψ_{sp} = koefisien perkiraan penurunan aktual berkisar antara 0,2 dan 1,0

n_1 = jumlah lapisan tanah disekitar tiang

n_2 = jumlah lapisan tanah di kedalaman perkiraan terjadinya penurunan aktual

P_0 = tekanan overburden ujung bawah tiang (kN/m²)

ξ = koefisien peningkatan modulus kompresibilitas tanah lapisan komposit

E_{si} = modulus kompresibilitas dari lapisan tanah i (kN/m²)

z_i = selisih kedalaman antara permukaan bawah tiang dan lapisan tanah i (m)

z_{i-1} = selisih kedalaman antara permukaan bawah tiang dan lapisan tanah $(i - 1)$

$\bar{\alpha}_i$ = rata-rata koefisien tegangan tambahan antara permukaan bawah tiang dan permukaan bawah lapisan tanah i

$\bar{\alpha}_{i-1}$ = rata-rata koefisien tegangan tambahan antara permukaan bawah tiang dan permukaan bawah lapisan tanah $(i - 1)$

Waktu konsolidasi setelah perbaikan

Untuk mencari derajat konsolidasi (U) dapat dihitung dengan rumus yang dinyatakan (Barksdale, R. D.; Bachus, 1983) sebagai berikut:

$$U = 1 - (1 - U_z)(1 - U_r) \quad (16)$$

Menghitung faktor waktu vertikal (T_z) dengan rumus sebagai berikut:

$$T_z = \frac{C_v \times t}{\left(\frac{h}{N}\right)^2} \quad (17)$$

Menghitung faktor waktu radial (T_r) dengan rumus sebagai berikut:

$$T_r = \frac{C_{vr} \times t}{(De)^2} \quad (18)$$

Dimana,

C_v = koefisien konsolidasi

t = waktu (tahun)

h = tebal lapisan tanah (m)

N = jumlah lapisan tanah

U_z = derajat konsolidasi vertikal (Gambar 2.)

U_r = derajat konsolidasi radial (Gambar 3.)

Untuk menghitung rasio diameter (n^*) dengan rumus sebagai berikut:

$$n^* = \frac{De}{D'} \quad (19)$$

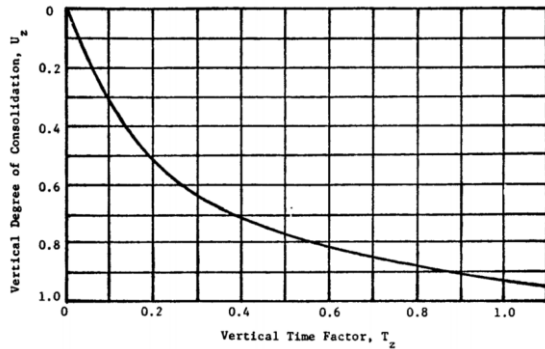
Dimana,

$De = 1,13 s$ (diameter setara 1 unit untuk formasi persegi)

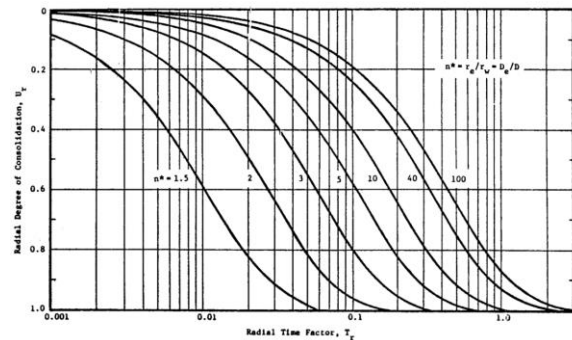
$D' = \frac{1}{5} d$ (diameter saat kering)

Program PLAXIS

Kondisi lapangan yang disimulasikan ke dalam program *PLAXIS* bertujuan untuk mengimplementasikan tahapan pelaksanaan di lapangan ke dalam tahapan pengerjaan pada program, dengan harapan pelaksanaan di lapangan memiliki hasil sedekat mungkin dengan hasil program ini, sehingga respon yang dihasilkan dari *PLAXIS* dapat diasumsikan sebagai cerminan dari kondisi yang sebenarnya terjadi di lapangan. Secara garis besar program ini terdiri dari empat sub program yaitu, *input* (masukan), *calculation* (perhitungan), *output* (hasil perhitungan) dan kurva.



Gambar 2. Hubungan antara T_z dan U_z



Gambar 3. Hubungan antara T_r dan U_r

3. Diskusi dan Hasil Penelitian

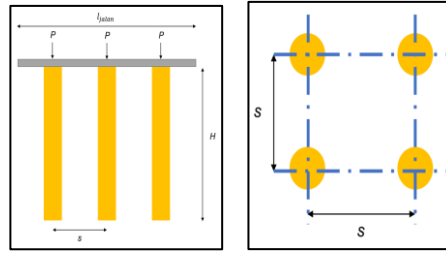
Langkah-langkah permodelan disusun secara sistematis sehingga mempermudah dalam penyelesaian analisis. Langkah-langkah tersebut sebagai berikut:

1. Data sekunder diperoleh dari data *borlog* proyek yang berada di area persawahan Karawang tahun 2019.
2. *Preliminary design* merupakan desain awal untuk dimensi dan jarak *pile* yang disajikan pada Gambar 4 dan Tabel 1.
3. Langkah selanjutnya menganalisis data *borlog*. Nilai N-SPT yang terdapat dalam data *borlog* dikorelasikan untuk mendapatkan parameter tanah yang dibutuhkan.
4. Setelah parameter tanah didapat, dilanjut dengan menganalisis daya dukung tanah, penurunan tanah, dan waktu konsolidasi untuk kondisi sebelum perbaikan tanah, setelah perbaikan tanah dengan metode *stone column* dan perbaikan tanah dengan metode *CFG pile* serta analisis daya dukung tanah menggunakan program *PLAXIS*.
5. Setelah dilakukan analisis data, dilanjutkan dengan pengecekan faktor keamanan. Faktor keamanan untuk daya dukung tanah senilai 3, serta faktor keamanan penurunan tanah dalam penurunan izin SNI 8460:2017 kurang dari 0,15 m.

Tabel 1. Permodelan desain

Notasi	Besaran	Satuan	Keterangan
P	10	Ton	Beban terpusat
	98,1	kN	
l_{jalan}	8	Meter	Lebar jalan
H	40	Meter	Tinggi <i>pile</i>
d	0,5	Meter	Diameter <i>pile</i>
A	0,196	m ²	Luas <i>pile</i>
s	2,5	Meter	Jarak antar <i>pile</i>
q	499,418	kN/ m ²	Beban merata

Sumber : hasil pengukuran lapangan



Gambar 4. Permodelan pile

Interpretasi jenis lapisan tanah

Lapisan tanah ini didapat dari korelasi data N-SPT borlog dengan teoritis yang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Interpretasi jenis lapisan tanah

Kedalaman (m)	N-SPT	Jenis Tanah
0-6	6-9	Lempung lunak
6-20	10-16	Lempung teguh
20-28	24-34	Lempung kaku
28-34	50-54	Lempung sangat kaku
34-36	33	Lempung kaku
36-40	50-60	Lempung sangat kaku

Parameter tanah

Parameter tanah ini didapat dari korelasi data N-SPT borlog dengan teoritis yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter tanah

Notasi	Satuan	Jenis Tanah					
		Lempung Lunak	Lempung Teguh	Lempung Kaku	Lempung Sangat Kaku	Lempung Kaku	Lempung Sangat Kaku
		0m - 6m	6m - 20m	20m - 28m	28m - 34m	34m - 36m	36m - 40m
G_s	-	2,66	2,63	2,65	2,70	2,67	2,66
w	%	35,14	35,96	43,63	28,55	35,34	33,61
γ_b	kN/m ³	18,12	17,93	16,77	18,63	15,80	18,40
γ_d	kN/m ³	13,40	13,19	11,67	14,49	11,67	13,78
γ_{sat}	kN/m ³	18,17	17,99	17,07	18,93	17,11	18,40
e	-	0,94	0,96	1,22	0,82	1,240	0,894
n	-	0,49	0,49	0,55	0,45	0,554	0,472
S	%	98,90	98,91	94,41	93,37	75,96	100,00
LL	%	70,13	96,73	122,22	122,27	155,00	159,49
PL	%	26,29	26,45	31,32	49,38	37,51	36,62
PI	%	43,84	70,28	90,90	72,89	117,49	122,87
c_u	kN/m ²	30	50	120	200	165	200
E_s	kN/m ²	7500	12500	30000	50000	41250	50000
v	-	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
φ	°	17	20	24	27	25	29
C_v	m ² /tahun	4,974	1,1635	0,9	0,9	0,9	0,9
k_x	m/hari	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
k_y	m/hari	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
C_c	-	0,421	0,607	0,786	0,786	1,015	1,046

Daya dukung tanah

Rekapitulasi perbandingan daya dukung tanah disajikan pada Tabel 4. Untuk daya dukung sebelum perbaikan tanah menggunakan persamaan (1), setelah perbaikan tanah menggunakan metode *stone column* menggunakan persamaan (7), setelah perbaikan tanah menggunakan metode *CFG pile* menggunakan persamaan (14), dan analisis menggunakan *software PLAXIS*.

Tabel 4. Rekapitulasi daya dukung tanah

Tinjauan	Kedalaman (m)	Daya dukung tanah (P_u)			
		Sebelum Perbaikan (kN)	<i>Stone Column</i> (kN)	<i>CFG Pile</i> (kN)	<i>Software PLAXIS</i> (kN)
1	4	260,801	253,239	348,524	352,633
2	8	372,871	397,859	491,061	495,196
3	12	376,084	409,428	516,346	518,474
4	16	379,298	420,997	541,630	543,035
5	20	382,511	432,566	566,914	566,930
6	24	602,811	864,451	950,193	954,389
7	28	605,664	874,722	974,756	981,878
8	32	830,817	1447,464	1467,048	1469,411
9	36	715,889	1234,059	1315,411	1317,157
10	40	837,417	1465,871	1514,989	1536,162

Penurunan tanah

Rekapitulasi perbandingan penurunan tanah disajikan pada Tabel 5. Untuk penurunan sebelum perbaikan tanah menggunakan persamaan (4), setelah perbaikan tanah menggunakan metode *stone column* menggunakan persamaan (10), dan setelah perbaikan tanah menggunakan metode *CFG pile* menggunakan persamaan (15).

Tabel 5. Rekapitulasi penurunan tanah

Penurunan tanah (S)		
Sebelum Perbaikan (m)	<i>Stone Column</i> (m)	<i>CFG Pile</i> (m)
6,347	1,084	0,117

Waktu konsolidasi

Rekapitulasi perbandingan waktu konsolidasi disajikan pada Tabel 6. Untuk waktu konsolidasi sebelum perbaikan tanah, setelah perbaikan tanah menggunakan metode *stone column* dan setelah perbaikan tanah menggunakan metode *CFG pile* menggunakan persamaan (6).

Tabel 6. Rekapitulasi waktu konsolidasi

Waktu konsolidasi (<i>t</i>)		
Sebelum Perbaikan (tahun)	<i>Stone Column</i> (tahun)	<i>CFG Pile</i> (tahun)
208,209	0,945	0,482

4. Kesimpulan dan Saran

Dari permodelan yang telah dilakukan didapat kesimpulan:

1. Daya dukung tanah meningkat saat perbaikan tanah dengan CFG pile sebesar 1514,989 kN dengan faktor keamanan 3,4 , namun dengan beban sebesar 98 kN per pile tidak perlu sampai 40 m. Pile dengan tinggi 36 m dengan daya dukung sebesar 1315,411 kN sudah memenuhi faktor keamanan sebesar 3 serta memenuhi mutu jalan kelas I. Adapun analisis daya dukung menggunakan software PLAXIS sebesar 1536,162 kN.
2. Dari analisis yang telah dilakukan didapat hasil penurunan tanah setelah perbaikan tanah menggunakan metode CFG pile sebesar 0,117 m memenuhi penurunan izin sebesar 0,1508 m, serta lebih kecil dari penurunan tanah setelah perbaikan tanah menggunakan metode stone column sebesar 1,084 m. Penurunan tanah setelah perbaikan tanah menggunakan metode CFG pile memenuhi penurunan izin, sehingga mengurangi resiko jalan bergelombang salah satu penyebab membahayakan pengemudi.
3. Waktu konsolidasi setelah perbaikan tanah dengan metode CFG pile sebesar 0,482 tahun lebih singkat daripada waktu konsolidasi setelah perbaikan tanah dengan metode stone column sebesar 0,945 tahun. Waktu konsolidasi setelah perbaikan tanah dengan metode CFG pile lebih singkat, sehingga mempercepat pembangunan jalan kelas I.

Kesimpulan secara keseluruhan, perbaikan tanah menggunakan metode CFG pile merupakan alternatif pengganti metode stone column dalam peningkatan daya dukung tanah. Definisi daya dukung itu sendiri ialah kemampuan tanah untuk menahan tekanan di atasnya, maka tanah tidak terlalu mengalami penurunan akibat tekanan di atasnya serta mempersingkat waktu konsolidasi.

Daftar Pustaka

- Afriani, L. (2014). Pengertian Tanah. Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta : Badan Standardisasi Nasional.
- Bahri, S. (2017). Studi perencanaan perbaikan tanah dengan stone column pada stock pile batu bara rencana pltu sorong (4x7 mw). Malang : Universitas Brawijaya.
- Barksdale, R. D.; Bachus, R. C. (1983). Design and Construction of Stone Columns Vol.1. Georgia : Georgia Institute of Technology Atlanta.
- Darwis, H. (2017). Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah Dasar-dasar Teknik Perbaikan Tanah. Yogyakarta : Pustaka AQ.
- Darwis, H. (2018). Dasar-Dasar Mekanika Tanah. Makassar : Pena Indis.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). Mekanika Tanah Jilid 2. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada.
- L.Hendarsin, S. (2000). Perencanaan Teknik Jalan Raya. Bandung : Politeknik Negeri.

- Lai, J., Liu, H., Qiu, J., Fan, H., Zhang, Q., Hu, Z., & Wang, J. (2016). *Stress Analysis of CFG Pile Composite Foundation in Consolidating Saturated Mine Tailings Dam*. China : Hindawi.
- Qiu-nan, C., Ming-hua, Z., Guo-hua, Z., & Zhu-hua, Z. (2008). *Bearing Capacity and Mechanical Behavior of CFG Pile Composite Foundation*. China : Hunan University.
- Sihombing, I. H. S. M. (2012). *Studi Parameter Perencanaan Stone Column untuk Perbaikan Bearing Capacity dan Settlement pada Tanah Lempung*. Bandung : Institute Teknologi Bandung.
- Srivastava, A., Johri, M., & Jain, N. (2013). *A Numerical Code on Design of Stone Columns Installed in Soft Soil*. India : Indian Institute of Technology.
- Uge, B. U. (2020). *CFG Pile Composite Foundation : Its Engineering Applications and Research Advances*. China : Hindawi.
- Zhang, D., Zhang, Y., Kim, C. W., Meng, Y., Garg, A., Garg, A., & Fang, K. (2018). Effectiveness of CFG pile-slab structure on soft soil for supporting high-speed railway embankment. China : Elsevier.