

Evaluasi kebutuhan tulangan *pile cap* terhadap variasi karakteristik tanah lempung: studi kasus proyek Nilam *Central Plant*

Dea Aprilia Indrawati^{1,*}, Melinda Dwi Rahmawati¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Pile cap
soil elastic modulus
stiffness variation
flexural reinforcement
load redistribution

Corresponding Author:

Dea Aprilia Indrawati
22511032@students.uii.ac.id

Abstract

The design of pile caps as transition elements between the upper structure load and the pile foundation system is highly dependent on the mechanical characteristics of the supporting soil. Pile caps play a critical role in pile foundation systems, functioning as structural elements that transfer loads from superstructure columns to a group of piles beneath. Soil variability, both vertically and laterally, poses a significant challenge in foundation design, particularly in pile group systems where load distribution relies on the collective behavior of the pile cap. In soft clay conditions, differences in subsoil stiffness often lead to eccentric load transfer due to uneven pile reactions, generating additional bending moments and increasing the structural reinforcement demand. This study aims to evaluate the influence of soil elastic modulus (E) variation on the flexural reinforcement requirements of pile caps, using eccentricity as a derived analytical parameter. The elastic modulus values ranged from 1.75 MPa to 45 MPa, based on the classification of in-situ soft clay conditions. A static analytical approach was employed to calculate load eccentricity, resulting bending moments, required steel area, and corresponding reinforcement weight. The results show that a decrease in E significantly amplifies eccentricity and bending moments, leading to up to a fourfold increase in reinforcement requirements under extremely soft soil conditions. At the lowest E value, the required reinforcement reached 1714.68 mm² with a weight of 258.80 kg, while at the highest E value, it dropped to only 146.97 mm² and 28.76 kg. These findings underscore the necessity of explicitly incorporating soil stiffness into pile cap design to ensure structural efficiency and to avoid overdesign.

Copyright © 2025 Universitas Islam Indonesia

All rights reserved

Pendahuluan

Dalam sistem pondasi tiang, elemen *pile cap* memiliki peran strategis sebagai media transisi beban dari kolom struktur atas ke kelompok tiang pondasi di bawahnya. Desain *pile cap* tidak hanya harus mampu mentransfer beban aksial secara efisien, tetapi juga perlu mempertimbangkan kemungkinan timbulnya momen lentur, gaya geser, dan

eksentrisitas akibat ketidakseimbangan reaksi tanah di bawah fondasi. Ketidaksesuaian antara asumsi ideal dalam desain dan kondisi tanah aktual sering kali menimbulkan perbedaan signifikan dalam kebutuhan tulangan *pile cap*, baik dari segi kapasitas maupun tonase material, yang berdampak pada aspek kekuatan, efisiensi, dan biaya konstruksi Dey dan Karthik (2019).

Kondisi ini menjadi lebih kompleks ketika pondasi berada di atas tanah lempung lunak, seperti yang umum ditemukan di proyek industri migas di Kalimantan Timur. Tanah lempung dikenal memiliki karakteristik kekakuan rendah, permeabilitas kecil, dan cenderung mengalami konsolidasi jangka panjang, sehingga memengaruhi performa pondasi secara keseluruhan Hardiyatmo (2010). Modulus elastisitas tanah (E) menjadi parameter geoteknik kunci yang mencerminkan tingkat kekakuan tanah dan digunakan secara luas dalam perhitungan deformasi serta distribusi gaya dalam sistem fondasi Bowles (1997). Penurunan nilai E pada salah satu sisi *pile* akan menyebabkan ketidakseimbangan reaksi dukung, memicu eksentrisitas beban terhadap pusat *pile cap*, dan menghasilkan momen tambahan yang signifikan Pham dkk. (2025).

Penelitian numerik yang dilakukan oleh Halim dkk. (2020) menunjukkan bahwa distribusi gaya lateral dan vertikal dalam kelompok tiang sangat dipengaruhi oleh variasi modulus elastisitas tanah, bahkan dalam kondisi geometri *pile* yang simetris. Sementara itu, Delalibera dan Sousa (2021) membuktikan bahwa interaksi antara *pile cap* dan tanah yang tidak seragam dapat menghasilkan redistribusi beban yang kompleks, di mana *pile* yang berdiri di atas tanah lebih kaku menanggung beban lebih besar, sehingga memperbesar potensi eksentrisitas. Lebih lanjut, studi oleh He dan Kaynia (2024) menyarankan pentingnya penggunaan koefisien pegas lateral (Winkler spring) yang diperoleh dari kalibrasi nilai E aktual lapangan dalam permodelan struktur pondasi. Di sisi lain, Bloodworth dkk. (2012) menegaskan bahwa variasi distribusi gaya akibat ketidakteraturan tanah bawah dapat memengaruhi respons lentur *pile cap*, yang berdampak langsung terhadap kebutuhan tulangan minimum.

Dalam praktik desain saat ini, perhitungan kebutuhan tulangan *pile cap* masih sering diasumsikan berdasarkan distribusi reaksi yang ideal dan simetris. Padahal kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa

ketidakhomogenan parameter tanah, khususnya modulus elastisitas, dapat menimbulkan perubahan besar dalam pola distribusi gaya dalam struktur fondasi Kavitha dkk. (2016). Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan evaluatif yang mempertimbangkan variasi kekakuan tanah secara eksplisit untuk mendapatkan kebutuhan tulangan yang lebih efisien dan realistis.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi nilai modulus elastisitas tanah lempung terhadap kebutuhan tulangan lentur pada *pile cap*, melalui pendekatan simulasi numerik berbasis prinsip interaksi tanah–struktur. Nilai E tanah divariasikan dari 1,75 MPa hingga 45 MPa untuk merepresentasikan kondisi tanah lempung dari sangat lunak hingga padat, sebagaimana diklasifikasikan oleh Obrzud dan Truty (2018). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi kuantitatif dalam memahami hubungan antara parameter geoteknik dan kebutuhan material struktural, sekaligus mendukung desain pondasi yang adaptif, efisien, dan berbasis kondisi aktual lapangan.

Tinjauan Pustaka

Pile cap

Pile cap merupakan elemen struktural beton bertulang yang dirancang untuk mengikat kepala beberapa tiang pancang dan mentransfer beban dari struktur atas secara merata ke pondasi dalam. *Pile cap* bekerja sebagai satu kesatuan dalam menahan beban vertikal maupun lateral dari struktur atas. Menurut Hardiyatmo (2010), *pile cap* bertindak sebagai pengikat kepala tiang dan sekaligus menyebarkan beban dari kolom ke seluruh tiang pancang yang ada. Elemen ini bekerja sebagai pelat transfer yang harus mampu menahan gaya aksial, gaya geser, dan momen lentur akibat distribusi beban yang tidak seragam. Ketika beban tidak terbagi rata karena karakteristik tanah yang bervariasi, *pile cap* akan menerima gaya tambahan, terutama momen eksentris, yang dapat memperbesar kebutuhan tulangan. Oleh

karena itu, desain *pile cap* tidak hanya mempertimbangkan geometri dan kapasitas beban, tetapi juga karakteristik mekanik tanah di bawahnya.

Desain Tulangan Pile cap

Desain tulangan dalam *pile cap* bertujuan untuk mengatasi gaya lentur dan geser yang timbul akibat beban vertikal maupun distribusi yang tidak merata dari kolom ke pondasi. Desain tulangan *pile cap* mengacu pada standar desain beton bertulang seperti SNI 2847:2019 atau ACI 318, yang mensyaratkan penulangan minimum untuk menahan momen lentur dan gaya geser yang timbul akibat beban yang diteruskan ke pondasi. Terzaghi dkk. (1996) menyatakan bahwa interaksi antara deformasi tanah dan struktur pondasi menghasilkan tegangan tambahan yang harus ditahan oleh tulangan lentur. Dalam kondisi tanah lunak, momen dan geser pada *pile cap* dapat meningkat secara signifikan sehingga membutuhkan tonase tulangan lebih besar. Oleh karena itu, perencanaan penulangan harus mempertimbangkan variasi parameter tanah sebagai bagian dari strategi desain adaptif.

Karakteristik tanah Lempung

Tanah lempung secara umum dicirikan oleh struktur butiran halus, permeabilitas rendah, serta kecenderungan terhadap konsolidasi jangka panjang dan perubahan volume akibat kadar air. Menurut Hardiyatmo (2010), lempung memiliki nilai indeks plastisitas dan koefisien konsolidasi yang tinggi, yang berdampak pada penurunan (*settlement*) secara signifikan bahkan pada pembebanan yang relatif kecil.

Terzaghi dkk. (1996) menyebutkan bahwa salah satu tantangan utama pada tanah lempung adalah sensitivitasnya terhadap gangguan dan beban tambahan, sehingga diperlukan pendekatan konservatif dalam desain pondasi, termasuk *pile cap*.

Modulus Elastisitas Tanah

Modulus elastisitas tanah (E) adalah parameter mekanik utama yang mencerminkan tingkat kekakuan suatu jenis tanah dalam merespons pembebanan eksternal. Nilai ini digunakan dalam model elastik linier untuk memperkirakan besarnya deformasi dan distribusi tegangan pada elemen-elemen bawah tanah, terutama pada pondasi dangkal maupun pondasi dalam. Menurut Bowles (1997), modulus elastisitas tanah berpengaruh langsung terhadap besarnya penurunan (*settlement*), perilaku interaksi tanah-struktur, serta penyebaran reaksi tanah yang bekerja pada elemen fondasi.

Bowles juga mengemukakan bahwa nilai E dapat dikorelasikan secara empiris dengan nilai hasil uji lapangan seperti SPT-N (*Standard Penetration Test*), di mana tanah lempung umumnya memiliki rentang nilai E antara 0.5 hingga 70 MPa tergantung pada tingkat konsolidasi dan kadar air. Oleh karena itu, dalam perencanaan struktur pondasi seperti *pile cap*, penentuan nilai E yang representatif dari lokasi lapangan menjadi sangat penting karena memengaruhi besarnya reaksi dukung tanah terhadap tiang.

Dalam penelitian ini, variasi nilai modulus elastisitas tanah (E) digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi pengaruh kekakuan tanah terhadap kebutuhan tulangan pada struktur *pile cap*. Variasi nilai E tersebut disusun berdasarkan klasifikasi karakteristik tanah lempung yang mengacu pada referensi Obrzud dan Truty (2018). Klasifikasi ini mempertimbangkan kondisi konsolidasi tanah dan digunakan sebagai dasar dalam menentukan rentang nilai E yang digunakan dalam simulasi. Penyusunan variasi nilai E bertujuan untuk merepresentasikan kondisi aktual tanah lempung di lapangan, khususnya pada wilayah dengan karakteristik tanah lunak hingga padat. Klasifikasi karakteristik tanah lempung dapat dilihat pada Tabel berikut :

Tabel 1. Klasifikasi Karakteristik Tanah Lempung

Soil Type	Soil Consistency											
	Very Soft		Soft		Medium		Stiff		Very Stiff		Hard	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Silt												
<i>Slight Plasticity</i>	2,5	4	5	8	10	15	15	20	20	40	40	80
<i>Low plasticity</i>	1,5	3	3	6	6	10	10	15	15	30	30	60
Clays												
<i>low to medium plast.</i>	0,5	3	2	5	5	8	8	12	12	20	20	70
<i>High plasticity</i>	0,35	2	1,5	4	4	7	7	12	12	20	20	32
Silt organic					0,5	5						
Clay organic					0,5	4						

Sumber: *The Hardening Soil Model-A Practical Guidebook*

Ketika nilai modulus elastisitas berbeda antar lokasi tiang atau antar zona bawah *pile cap*, hal ini akan memengaruhi distribusi reaksi tanah, yaitu pembagian gaya vertikal yang diterima masing-masing *pile*. Apabila kekakuan tanah tidak merata, maka *pile* yang berada pada tanah dengan *E* lebih besar akan menerima gaya yang lebih besar pula. Ketidakseimbangan distribusi ini akan memicu terjadinya eksentrisitas beban terhadap pusat massa pondasi, yang kemudian menimbulkan momen tambahan yang signifikan pada *pile cap*.

Distribusi reaksi tanah secara tidak merata dapat dimodelkan secara sederhana menggunakan pendekatan elastis linier, dengan nilai *E* sebagai variabel penentu perbandingan reaksi. Pada model dua *pile*, reaksi masing-masing *pile* (*P*₁ dan *P*₂) akan bergantung pada nilai *E* di bawahnya. Ketika terjadi perbedaan reaksi, maka dihitung eksentrisitas sebagai berikut:

$$P_1 = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \cdot P_{total} \tag{1}$$

$$P_2 = P_{total} - P_1 \tag{2}$$

Dengan:

*P*₁, *P*₂ = reaksi vertikal pada *pile* kiri dan kanan (kN)

*E*₁, *E*₂ = modulus elastisitas tanah di bawah masing-masing *pile* (MPa)

*P*_{total} = total beban struktur atas yang diteruskan ke pondasi (kN)

$$e = \frac{|P_1 - P_2|}{P_{total}} \cdot d \tag{3}$$

Di mana:

*P*₁ & *P*₂ = reaksi vertikal pada masing-masing *pile* (kN)

*P*_{total} = total beban struktur atas (kN)

d = jarak antar *pile* (m)

e = eksentrisitas (m)

Semakin besar perbedaan nilai *E* antar lokasi *pile*, semakin besar eksentrisitas dan momen yang timbul, dan semakin besar pula kebutuhan luas dan tonase tulangan lentur. Dengan demikian, nilai *E* tidak hanya berpengaruh terhadap deformasi tanah, tetapi juga sangat signifikan dalam mempengaruhi gaya dalam struktural dan efisiensi desain fondasi bawah.

Interaksi Tanah-Struktur (Soil-Structure Interaction)

Konsep *Soil-Structure Interaction* (SSI) menjelaskan hubungan timbal balik antara deformasi tanah dan respons struktur di atasnya. Tidak seperti pendekatan klasik yang mengasumsikan struktur berada pada media elastik homogen dan tidak berubah, pendekatan SSI mengakui bahwa kekakuan tanah mempengaruhi distribusi gaya pada

struktur. Pham dkk. (2025) mengembangkan model matematis yang menggambarkan bahwa jika nilai E tanah tidak merata, maka reaksi dukungan pondasi menjadi tidak simetris, menghasilkan momen tambahan. Momen tersebut dihitung menggunakan prinsip dasar:

$$M = P_{total} \cdot e \quad (4)$$

di mana:

M = momen lentur akibat eksentrisitas

(kNm)

P = beban vertikal total (kN)

E = eksentrisitas beban terhadap sumbu netral (m)

Rumus ini merupakan ekspresi klasik dari statika struktur, digunakan untuk menggambarkan efek beban eksentrik terhadap elemen lentur seperti *pile cap*.

Kebutuhan Tulangan dan Efisiensi Desain *Pile cap*

Kebutuhan tulangan pada *pile cap* ditentukan oleh gaya dalam yang bekerja akibat beban dan distribusinya. Ketika terjadi peningkatan momen karena ketidakseimbangan reaksi tanah, luas penampang tulangan lentur yang dibutuhkan juga akan meningkat. Berdasarkan prinsip desain kapasitas lentur beton bertulang menurut SNI 2847:2019, luas tulangan lentur minimum dapat dihitung dari hubungan:

$$A_s = \frac{M_u}{\phi \cdot f_y \cdot z} \quad (5)$$

Dengan:

A_s = luas tulangan lentur (mm²)

M_u = momen ultimit (Nmm)

ϕ = faktor reduksi kekuatan

f_y = tegangan leleh baja tulangan (MPa)

z = lengan momen dalam (mm)

Meskipun rumus ini akan difokuskan pada bagian metodologi, prinsip ini menunjukkan secara jelas bahwa momen lentur yang meningkat akibat variasi E tanah secara langsung akan berdampak pada peningkatan kebutuhan tulangan. Nurokhman dkk. (2023) menekankan pentingnya evaluasi efisiensi kebutuhan tulangan dalam desain pondasi kombinasi agar perencanaan tidak *overdesign* maupun *underdesign*.

Batasan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kebutuhan tulangan pada *pile cap* akibat pengaruh variasi karakteristik tanah lempung, dengan pendekatan yang disesuaikan berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Agar analisis dapat dilakukan secara terfokus dan terukur, maka penelitian ini memiliki sejumlah batasan sebagai berikut:

1. Jenis tanah yang ditinjau adalah tanah lempung lunak, yang diasumsikan modulus elastisitas (E) dalam rentang yang lazim dijumpai pada kondisi tanah lempung di wilayah Kalimantan Timur, khususnya area proyek Nilam Central Plant.
2. Dimensi *pile cap* dianggap tetap, yaitu sesuai dengan rancangan awal proyek, sehingga optimasi hanya difokuskan pada aspek kebutuhan tulangan sebagai respon terhadap perubahan karakteristik tanah.
3. Model *pile cap* diasumsikan sebagai pelat lentur yang menerima beban eksentris akibat distribusi reaksi vertikal yang tidak merata dari dua tiang pondasi.
4. Jumlah dan konfigurasi *spun pile* ditetapkan sesuai rancangan awal, yaitu terdiri dari dua tiang pancang berdiameter 500 mm dengan panjang 18 meter, diposisikan secara simetris di bawah *pile cap*.

5. Beban struktur atas dianggap tetap dan bersifat aksial vertikal, sesuai dengan spesifikasi rencana beban dari kolom pada fasilitas yang ditopang.
6. Nilai E divariasikan berdasarkan klasifikasi konsistensi tanah lempung mengacu pada literatur Obrzud dan Truty (2018), dengan rentang nilai antara 1,75 MPa hingga 45 MPa untuk mewakili kondisi aktual tanah lempung dari sangat lunak hingga padat.
7. Perhitungan momen lentur akibat eksentrisitas dilakukan secara manual berdasarkan pendekatan statis, tanpa mempertimbangkan pengaruh lateral load, momen torsi, maupun gaya geser horizontal.
8. Perhitungan kebutuhan tulangan lentur hanya dilakukan untuk satu arah utama *pile cap* (arah panjang), dan menggunakan baja tulangan mutu $f_y = 400$ MPa.
9. Analisis dilakukan secara numerik dan manual menggunakan perhitungan gaya dalam (momen lentur dan gaya geser) dengan pendekatan statis sederhana. Validasi menggunakan perangkat lunak analisis elemen tidak dilakukan dalam penelitian ini.

Metodologi Penelitian

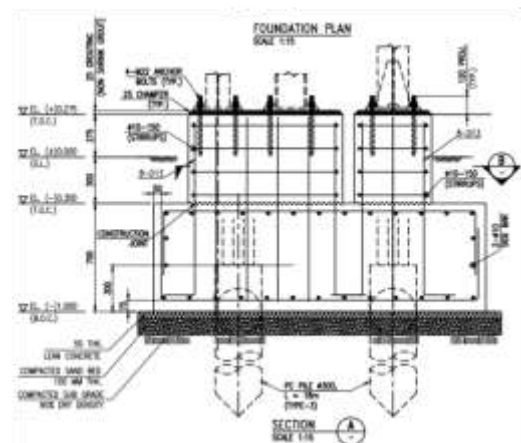
Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-simulasional dengan metode analisis numerik sederhana dan perhitungan manual berdasarkan prinsip interaksi tanah-struktur (*Soil-Structure Interaction / SSI*). Pendekatan ini dipilih untuk mengevaluasi bagaimana variasi parameter tanah, khususnya modulus elastisitas (E), memengaruhi distribusi reaksi tanah, momen lentur yang terjadi, dan pada akhirnya kebutuhan tonase tulangan *pile cap*.

Data dan Asumsi Dasar

Penelitian ini didasarkan pada studi kasus proyek konstruksi fasilitas industri migas di kawasan Nilam Central Plant. Pondasi yang dianalisis berupa struktur *pile cap* yang mengikat dua buah *spun pile* sebagai elemen pondasi dalam, dan menerima beban dari struktur atas melalui dua pedestal. Informasi teknis terkait dimensi struktur dan konfigurasi pondasi diperoleh dari dokumen *Approved for Construction (AFC Drawing)* yang digunakan pada proyek aktual.

Dokumen gambar rencana yang digunakan memuat informasi geometri *pile cap*, jumlah dan posisi pedestal, serta spesifikasi *spun pile*. Data tersebut menjadi acuan dalam membangun model analisis dan melakukan simulasi variasi karakteristik tanah untuk mengevaluasi kebutuhan tulangan. Gambar rencana *pile cap* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 1. Desain Rencana *Pile Cap* berikut :



Gambar 1. Desain Rencana *Pile Cap*

Untuk keperluan perhitungan dan simulasi numerik, data-data berikut digunakan sebagai dasar tetap dalam penelitian:

Tabel 2. Data Dimensi dan Parameter Struktur
Pile cap

No	Jenis Data	Nilai/Spesifikasi
1.	Dimensi <i>pile cap</i>	2,15m x 1,35m x 0,70m
2.	Jumlah pedestal	2 buah
3.	Jumlah <i>spun pile</i>	2 buah
4.	Mutu beton ($f'c$)	25 Mpa
5.	Mutu baja tulangan (f_y)	400 Mpa
5.	Faktor reduksi (ϕ)	0,9
6.	Total beban struktur atas	450 kN

Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Variasi parameter ini digunakan untuk merepresentasikan kemungkinan kondisi tanah lempung di lapangan yang di asumsikan dari rata-rata nilai minimum dan maksimum modulus elastisitas pada tanah lempung menurut Obrzud & Truty (2018).

Tabel 3. Variasi Nilai Modulus Elastisitas Tanah (E)

No	Modulus Elastisitas, E_s (MPa)
1	1,75
2	3,5
3	6,5
4	10
5	16
6	45

2. Variabel Tetap

Variabel tetap merujuk pada data aktual proyek, seperti:

- 1) Dimensi *Pile cap*: 2,15 m x 1,35 m x 0,70 m
- 2) Jumlah *Spun pile*: 2 buah
- 3) Beban Struktur Atas: 450 kN

3. Variabel Terikat

- 1) Momen lentur akibat beban eksentris
- 2) Luas tulangan lentur dan geser
- 3) Jumlah batang dan tonase total tulangan *pile cap*

Tahapan Penelitian

Langkah-langkah sistematis yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengkaji teori-teori terkait *pile cap*, interaksi tanah-struktur, parameter geoteknik tanah lempung, serta metode perhitungan gaya dalam dan kebutuhan tulangan berdasarkan standar.
2. Pengumpulan dan Penetapan Data
Data digunakan dalam bentuk;
 - 1) Asumsi parameter tanah yang divariasikan berdasarkan literatur dan kondisi tipikal tanah lempung.
 - 2) Data geometri *pile cap* dan beban struktur atas dari desain aktual proyek.
3. Simulasi Redistribusi Reaksi tanah
 - 1) Menggunakan model pembagian beban berdasarkan rasio kekakuan (E) tiap titik tumpuan (*pile* kiri dan kanan).
 - 2) Jika E tidak sama, maka reaksi beban pada tiap tiang akan berbeda sehingga memicu eksentrisitas beban terhadap pusat *pile cap*.
4. Perhitungan Momen Lentur
Momen Lentur dihitung dengan menganalisis eksentrisitas beban pada setiap titik.
5. Perhitungan Kebutuhan Tulangan
Perhitungan luas tulangan lentur dilakukan menggunakan rumus yang ditetapkan dalam SNI 2847:2019, kemudian berat tulangan dihitung dari panjang, diameter, dan berat jenis batang baja.
6. Perhitungan Total Tonase Tulangan
Setelah luas tulangan dihitung berdasarkan momen lentur, dilakukan konversi ke jumlah dan jenis batang tulangan. Selanjutnya, dilakukan estimasi berat tulangan menggunakan metode *Bar Bending Schedule* (BBS) untuk memperoleh tonase aktual.

Kriteria Evaluasi

1. Kebutuhan tulangan dianggap optimal jika tetap memenuhi kekuatan desain

(menurut SNI), namun dengan tonase minimum.

2. Evaluasi dilakukan dengan mempertimbangkan kemungkinan desain efisien tanpa melampaui batas kapasitas beban tanah

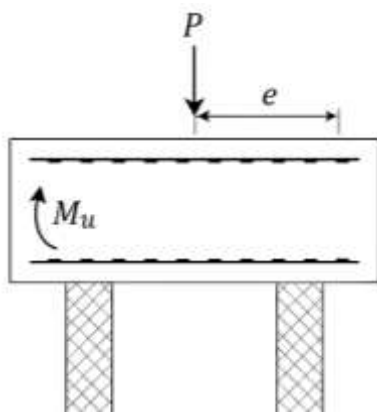
Hasil dan Pembahasan

Distribusi Reaksi Tanah dan Eksentrisitas Beban

Data:

1. Beban struktur atas total = 450 kN
2. Jumlah *spun pile* = 2 buah
3. Jarak antar *pile* = 1 m
4. Variasi modulus elastisitas tanah (E) = 1.75, 3.5, 6.5, 10, 16, 45 MPa
5. Asumsi distribusi reaksi sesuai E , berdasar pendekatan interaksi tanah-struktur
6. Pada perhitungan reaksi *pile*, nilai E_2 diambil dari rata rata nilai variasi modulus elastisitas tanah sebesar 14 MPa.

Ilustrasi skema gaya eksentrisitas dan momen lentur pada pada *pile cap* akibat perbedaan kekakuan tanah dapat dilihat pada Gambar 2. Gaya Eksentrisitas dan Momen Lentur pada *Pile Cap* berikut:



Gambar 2. Gaya Eksentrisitas dan Momen Lentur pada *Pile Cap*

Hasil perhitungan distribusi reaksi dan eksentrisitas dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4. Distribusi Reaksi *Pile* dan Nilai Eksentrisitas

No	E (MPa)	Reaksi Kiri (kN)	Reaksi Kanan (kN)	e (m)
1	1,75	50	400	0,78
2	3,5	90	360	0,60
3	6,5	142,68	307,32	0,37
4	10	187,50	262,5	0,17
5	16	240	210	0,07
6	45	343,22	106,78	0,53

Nilai modulus elastisitas tanah berbanding terbalik dengan redistribusi gaya *pile*. Tanah dengan kekakuan tinggi (E besar) cenderung menahan beban lebih besar, menciptakan eksentrisitas, yang menjadi sumber momen tambahan pada *pile cap*.

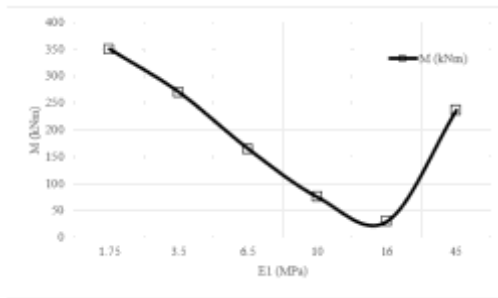
Momen Lentur Akibat Eksentrisitas

Momen lentur maksimum akibat eksentrisitas dapat dihitung dari total beban vertikal yang diterima fondasi dengan besarnya nilai eksentrisitas beban yang diterima. Hasil perhitungan Momen lentur maksimum dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 5. Momen Lentur Akibat Eksentrisitas Beban

No	E (MPa)	e (kN)	Momen Maks (kNm)
1	1,75	0,78	350
2	3,5	0,60	270
3	6,5	0,37	164,63
4	10	0,17	75
5	16	0,07	30
6	45	0,53	236,44

Kenaikan nilai E menyebabkan momen lentur bertambah secara linear. Hal ini menunjukkan bahwa tanah dengan kekakuan tinggi mendorong redistribusi beban yang signifikan, memicu kebutuhan momen lentur yang lebih besar di *pile cap*. Nilai momen lentur maksimum yang diperoleh pada setiap variasi E ditunjukkan dalam Gambar 2. Grafik Hubungann Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Momen Lentur Maksimum (M) berikut:



Gambar 2. Grafik Hubungan Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Momen Lentur Maksimum (M)

Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Momen Lentur Maksimum (M) menunjukkan pola penurunan momen lentur seiring bertambahnya nilai *E*. Pada *E* = 1,75 MPa, momen maksimum tercatat sebesar 350 kNm. Seiring peningkatan kekakuan tanah menjadi 16 MPa, momen turun drastis hingga hanya 30 kNm. Namun, sebagaimana terjadi pada eksentrisitas, nilai momen kembali meningkat menjadi 236,44 kNm pada *E* = 45 MPa karena ketidakseimbangan relatif antara nilai *E* pada dua titik *pile*. Hasil ini menegaskan bahwa perbedaan relatif nilai *E* lebih menentukan terjadinya momen dibandingkan besar absolut nilai *E* itu sendiri.

Kebutuhan Luas dan Tonase Tulangan

Kebutuhan Luas dan Tonase Tulangan dihitung menggunakan rumus tulangan lentur dari SNI 2847:2019. Data yang digunakan dalam perhitungan ini meliputi:

- ϕ = 0,9 x *f_y*
- Satu batang D16 = 201 mm²
- Berat satu batang D16 = 1,58 kg/m
- Panjang Tulangan = 2,15 m

Hasil perhitungan momen lentur maksimum dapat dilihat pada Tabel berikut:

Tabel 6. Kebutuhan Luas dan Tonase Tulangan Lentur

No	Momen (kNm)	As (mmm ²)	Total Tulangan (buah)
1	350	1714,68	9
2	270	1322,75	7
3	164,63	806,56	5
4	75	367,43	2
5	30	146,97	1
6	236,44	1158,34	6

Estimasi berat tulangan dihitung berdasarkan jumlah dan panjang tulangan menggunakan pendekatan BBS, untuk mencerminkan kebutuhan aktual lapangan.

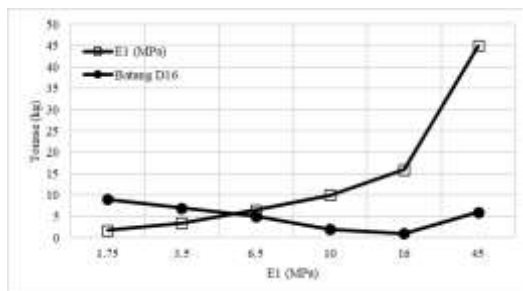
Hasil perhitungan kebutuhan luas dan tonase tulangan lentur pada *pile cap* berdasarkan variasi modulus elastisitas tanah (*E*) dirangkum dalam Tabel 7. Perhitungan ini menggunakan pendekatan manual yang disesuaikan dengan standar *Bar Bending Schedule* (BBS), di mana luas penampang tulangan (*As*) dikonversi menjadi tonase baja tulangan per diameter batang yang digunakan. Nilai tonase yang ditampilkan mencerminkan berat total baja yang dibutuhkan untuk masing-masing kondisi kekakuan tanah, dengan asumsi pemakaian baja tulangan penuh tanpa pembulatan ke jumlah batang.

Tabel 7. Rekapitulasi Kebutuhan Tonase Tulangan Berdasarkan Hasil Perhitungan *Bar Bending Schedule*

No	As (mmm ²)	Weight (kg)	
		10 mm	16 mm
1	1714,68	7,81	258,80
2	1322,75	7,81	201,29
3	806,56	7,81	143,78
4	367,43	7,81	57,51
5	146,97	7,81	28,76
6	1158,34	7,81	172,54

Dari hasil tersebut, terlihat bahwa pada kondisi tanah dengan modulus elastisitas yang rendah (misalnya 1,75 MPa), kebutuhan tulangan paling tinggi mencapai 258,80 kg. Sebaliknya, pada kondisi tanah yang lebih kaku (*E* lebih tinggi), kebutuhan tonase menurun drastis hingga kurang dari

30 kg. Temuan ini mengonfirmasi bahwa kekakuan tanah memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi material struktural dalam perencanaan *pile cap*. Hasil perhitungan hubungan antara nilai E dan kebutuhan tonase baja ditunjukkan pada Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Tonase Baja Tulangan Lentur berikut:



Gambar 4. Grafik Hubungan Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Tonase Baja Tulangan Lentur

Gambar 3. Grafik Hubungan Antara Modulus Elastisitas Tanah (E) dan Tonase Baja Tulangan Lentur yang dibutuhkan memperlihatkan bahwa kebutuhan tulangan mencapai nilai tertinggi sebesar 258,80 kg pada kondisi tanah sangat lunak ($E = 1,75$ MPa). Pada kondisi tanah yang lebih kaku ($E = 45$ MPa), kebutuhan tersebut menurun hingga 28,76 kg, atau hanya sekitar 11% dari nilai semula. Kecenderungan penurunan kebutuhan tulangan ini sejalan dengan menurunnya eksentrisitas dan momen lentur pada *pile cap*. Hal ini menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas tanah berpengaruh langsung terhadap kebutuhan material struktural. Oleh karena itu, parameter E harus dipertimbangkan secara eksplisit agar desain tulangan tidak bersifat *overdesign* yang mengakibatkan pemborosan material dan biaya.

Kesimpulan

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa variasi modulus elastisitas tanah (E) secara nyata memengaruhi perilaku struktur *pile cap*, khususnya dalam hal distribusi reaksi vertikal pada kelompok tiang serta besarnya momen lentur akibat eksentrisitas beban.

Pada kondisi ideal di mana nilai E antar tiang dianggap seragam, distribusi beban berlangsung merata dan eksentrisitas berada pada nilai minimum. Namun, seiring dengan menurunnya kekakuan tanah di salah satu sisi tiang, terjadi ketidakseimbangan reaksi yang menghasilkan perpindahan garis kerja gaya vertikal terhadap pusat *pile cap*, memunculkan momen tambahan yang signifikan.

Simulasi dilakukan dengan memvariasikan nilai E dari 1,75 MPa hingga 45 MPa untuk mencerminkan kondisi tanah lempung dari sangat lunak hingga padat. Hasil perhitungan menunjukkan tren penurunan momen lentur seiring meningkatnya kekakuan tanah. Pada $E = 1,75$ MPa, eksentrisitas tercatat sebesar 0,78 meter dengan momen maksimum mencapai 351 kNm, yang berimplikasi pada kebutuhan luas tulangan sebesar 1714,68 mm² dan tonase hingga 258,80 kg. Sebaliknya, pada nilai E tertinggi yaitu 45 MPa, eksentrisitas menurun menjadi 0,12 meter dan momen turun drastis hingga 54 kNm, dengan kebutuhan luas tulangan sebesar 146,97 mm² dan tonase hanya 28,76 kg.

Analisis ini menunjukkan bahwa besarnya modulus elastisitas tanah tidak hanya berpengaruh terhadap deformasi vertikal, tetapi juga terhadap redistribusi gaya internal dalam sistem *pile cap*. Dengan pendekatan berbasis eksentrisitas beban, perencanaan penulangan dapat disesuaikan secara lebih efisien terhadap karakteristik tanah aktual.

Secara umum, hasil penelitian ini mendukung temuan-temuan sebelumnya dalam literatur bahwa interaksi tanah-struktur harus diperhitungkan secara eksplisit dalam desain pondasi bawah, terutama dalam sistem pondasi tiang kelompok yang dibangun di atas tanah lempung lunak. Penerapan pendekatan yang adaptif terhadap nilai E memberikan potensi efisiensi material tanpa mengurangi aspek keamanan struktural.

Daftar Pustaka

- Anonim. (2019). SNI 2847:2019 PERSYARATAN BETON STRUKTURAL UNTUK BANGUNAN GEDUNG DAN PENJELASAN.
- Bloodworth, A. G., Cao, J., & Xu, M. (2012). Numerical Modeling of Shear Behavior of Reinforced Concrete Pile Caps. *Journal of Structural Engineering*, 138(6), 708–717. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000499](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000499)
- Bowles, J. E. (1997). FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN (5 ed., Vol. 5). Irwin/McGraw-Hill.
- Delalibera, R. G., & Sousa, G. F. (2021). Numerical analyses of two-pile caps considering lateral friction between the piles and soil. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 14(6). <https://doi.org/10.1590/S1983-41952021000600004>
- Dey, S., & Karthik, M. M. (2019). Modelling four-pile cap behaviour using three-dimensional compatibility strut-and-tie method. *Engineering Structures*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109499>
- Halim, D., Yuwono, A., & Wijaya, D. H. (2020). Modelisasi Numerik Analisis Gaya Lateral pada Pile Cap di Tanah Kohesif. Dalam *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil* (Vol. 3, Nomor 4). Bulan terbit Tahun.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). MEKANIKA TANAH II (Vol. 3).
- He, R., & Kaynia, A. M. (2024). Winkler spring coefficients for laterally loaded piles. *Computers and Geotechnics*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106264>
- Kavitha, P. E., Beena, K. S., & Narayanan, K. P. (2016). A review on soil–structure interaction analysis of laterally loaded piles. Dalam *Innovative Infrastructure Solutions* (Vol. 1, Nomor 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/s41062-016-0015-x>
- Nurokhman, N., Ryan Iskandar, M., Farid Hanafi, N., & Irfan Marasabessy, M. (2023). Pengaruh Daya Dukung Tanah Dalam Penentuan Pondasi Bored Pile dan Pile Cap pada Gedung Bertingkat. 1. <https://jurnal.ucy.ac.id/index.php/CivETech/issue/archive>
- Obrzud, R. F., & Truty, A. (2018). THE HARDENING SOIL MODEL-A PRACTICAL GUIDEBOOK. <http://www.zsoil.com>,
- Pham, T. A., Akan, R., & Tabaroei, A. (2025). A simplified soil–structure interaction model for load–settlement analysis of piles. *Canadian Geotechnical Journal*, 62. <https://doi.org/10.1139/cgj-2024-0173>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). SOIL MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE (Vol. 3).