

## Evaluasi perilaku pilecap akibat perbedaan daya dukung tiang dalam satu tipe pondasi dengan *Compatible Stress Field Method* (studi kasus pondasi *square pile* Gedung X, Bangka Belitung)

Wahyu Nur Rohman<sup>1</sup>, Muhammad Irfan Marasabessy<sup>2,\*</sup>, Muhamad Fadlan Alhamid<sup>1</sup>,  
Muhammad Zakki Rizal Hidayat<sup>1</sup>, Nufrizal Faried Hanafi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PT. Pola Data Consultant, Sleman, Indonesia

<sup>2</sup>Progam Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

### Article Info

Available online

### Keywords:

Modified ENR  
Perilaku Pilecap  
Gaya Tulangan Pilecap  
Tegangan Beton Pilecap  
Penurunan Pilecap

### Corresponding Author:

M Irfan Marasabessy  
[irfanmarssy@uii.ac.id](mailto:irfanmarssy@uii.ac.id)

### Abstract

An anomaly in the load-bearing capacity was observed at one of the foundation points of Building X in Bangka Belitung. One pile did not reach the final set, while two other piles did. The term "final set" refers to the acceptance of a pile's load-bearing capacity, indicated by the amount of deformation resulting from the pile driving process and the hammer energy applied. The discrepancy in pile load capacities could affect the pile cap. Therefore, a study was conducted to analyze the behavior of the pile cap, focusing on concrete stress, reinforcement forces, and settlement. The research employed the Compatible Stress Field Method (CSFM) and used the licensed software Ideastatica for modeling. The square pile foundation was modeled with spring constants derived from the ratio of pile capacity to settlement. The load-bearing capacity of piles that reached the final set was calculated using the modified ENR method, while those failing to meet the final set were assessed using PDA tests. The superstructure load was modeled as a uniform load. Material properties were based on Eurocode equations, and reinforcement material data were obtained from previous studies. The maximum concrete stress was 3 MPa in Test Model A and 7.4 MPa in Model B. The maximum reinforcement force was 3.1 kN in Model A and 11.1 kN in Model B. Settlement in Model A was 0.1 mm and 3.2 mm in Model B. Both models remained within safe limits. The pile cap behavior under anomalous conditions significantly differed from the normal condition.

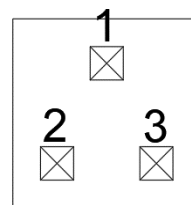
Copyright © 2025 Universitas Islam Indonesia  
All rights reserved

### Pendahuluan

Bangunan gedung secara garis besar terbagi menjadi 2 tipe struktur yaitu struktur atas dan bawah. Struktur atas terdiri dari pelat, balok dan kolom. Sedangkan struktur bawah terdiri dari tie beam dan pondasi. Kemudian pondasi terdiri dari 2 jenis yaitu pondasi dangkal dan dalam (Triastuti, 2022). Pemilihan tipe pondasi harus mempertimbangkan kondisi tanah dan struktur gedung di atasnya.

Salah satu gedung X di Bangka Belitung direncanakan menggunakan pondasi dalam. Jenis pondasi dalam adalah *square pile* 30x30 cm pada kedalaman 8 meter. Alat

yang digunakan pada pemancangan adalah *diesel hammer*. Salah satu titik pondasi pada gedung tersebut terdapat *anomaly*. *Anomaly* yang dimaksud terlihat pada Gambar 1.



Hasil kalendering

|            |                   |
|------------|-------------------|
| Tiang no 1 | Loss              |
| Tiang no 2 | 0.5 cm / 10 blows |
| Tiang no 3 | 0.6 cm / 10 blows |

Gambar 1 Hasil kalendering salah satu pondasi gedung X

Berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa, tiang dengan nomor 1 tidak mencapai *final sets*. Sedangkan tiang nomor 2 dan 3 telah tercapai. *Final sets* adalah istilah penerimaan daya dukung tiang yang ditandai dengan besarnya deformasi akibat pemancangan terhadap energi *hammer* yang diberikan. Sebagaimana tabel diatas, menunjukkan bahwa terjadinya *anomaly*, dimana terdapat perbedaan daya dukung tiang dalam satu tipe pondasi. Sedangkan pada saat perencanaan, semua tiang tersebut didesain mempunyai daya dukung yang seragam. Perbedaan daya dukung tiang tersebut dapat memberikan efek terhadap pilecap.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku pilecap terhadap kondisi normal dan akibat adanya *anomaly* daya dukung yang terjadi. Perilaku yang ditinjau adalah tegangan beton, gaya pada tulangan dan penurunan pada pilecap.

#### **Batasan penelitian**

Batasan penelitian ini sebagai berikut :

1. Metode yang digunakan adalah *Compatible Stress Field Method*.
2. *Software* bantu yang digunakan adalah *Ideastatica V.24*.
3. Perilaku yang ditinjau adalah tegangan beton, gaya pada tulangan dan penurunan pilecap.
4. Jumlah model uji yang digunakan adalah 2 buah yaitu pilecap dengan kondisi normal dan kondisi *anomaly* daya dukung.
5. Model tegangan regangan tulangan menggunakan B420C.
6. Model material beton mengacu pada EN1992-1-1
7. Hubungan tegangan dan regangan tulangan dimodelkan secara bilinear . Kemudian grafik zona area tekan diasumsikan sama dengan zona area tarik.
8. Daya dukung tiang hasil kalendering menggunakan metode *modified ENR*

9. Daya dukung tiang yang tidak memenuhi final sets dievaluasi dengan uji dinamis tiang (PDA test)
10. Koefisien *spring* horizontal diasumsikan sebesar 10 % dari koefisien *spring* vertikal.

#### **Landasan teori**

##### ***Compatible stress field method***

*Compatible Stress Field Method* (CSFM) adalah metode yang terdiri dari analisa zona tegangan berbasis *nonlinear finite element* yang disederhanakan dimana secara otomatis melakukan perhitungan kekuatan tekan efektif beton (Kaufmann dkk., 2020). Penyerhanaan tersebut berupa asumsi dalam perhitungan. Asumsi yang digunakan dalam CSFM sebagai berikut :

1. Retakan fiktif, berputar, tegangan bebas yang terbuka terjadi tanpa adanya slip.
2. Mempertimbangkan keseimbangan pada saat terjadinya retakan bersama dengan regangan rata-rata tulangan.
3. Model ini mempertimbangkan tegangan beton maksimum dan tulangan pada retakan dengan mengabaikan kekuatan tarik beton. Sehingga metode ini tidak cocok untuk elemen langsing yang tanpa tulangan melintang.

Kemudian keunggulan lain dari metode ini yaitu mempertimbangkan penguatan tegangan, kekakuan yang realistis pada suatu elemen, dan mencakup ketentuan kemampuan servis dan deformasi sebuah elemen. Selain itu data yang digunakan dalam perhitungan adalah data yang disediakan oleh standar yang ada misalnya *Eurocode*. Sehingga dalam analisisnya tidak perlu adanya sifat-sifat material tambahan. Hal ini berbeda dengan analisis *non linear finite element* yang biasanya membutuhkan banyak data sifat material. Oleh karena itu, metode ini cocok untuk rekayasa (Ideastatica, 2024; Kaufmann dkk., 2020).

##### ***Model material beton***

Model kurva tegangan dan regangan beton yang digunakan dalam CSFM Ideastatica ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2 diketahui terdapat beberapa parameter. Penjelasan dari parameter ditunjukkan pada Tabel 1.

Parameter nilai  $f_{cd}$  ditentukan melalui rumus 1 (EN 1992-1-1, 2004) :

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * f_{ck} / \gamma_c \quad (1)$$

Keterangan :

$\alpha_{cc}$  = koefisien akibat pengaruh waktu jangka panjang beton terhadap kuat tekan dan dampak akibat metode penerapan beban (EN 1992-1-1, 2004).

$\gamma_c$  = Faktor keamanan parsial material. Nilai faktor untuk beton dalam keadaan sementara adalah 1.5 (EN 1992-1-1, 2004).

Parameter nilai  $E_{cm}$  ditentukan melalui rumus 2 (EN 1992-1-1, 2004) :

$$E_{cm} = 22000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3} \quad (2)$$

Keterangan :

$E_{cm}$  = Secan modulus elastis (MPa). Nilai perlu dikali dengan faktor jenis material agregat digunakan. Faktor agregat kasar untuk basal adalah 1.2 (EN 1992-1-1, 2004)

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$$

Parameter nilai  $f_{ctm}$  ditentukan melalui rumus 3 (EN 1992-1-1, 2004) :

$$F_{ctm} = 0.3 * (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

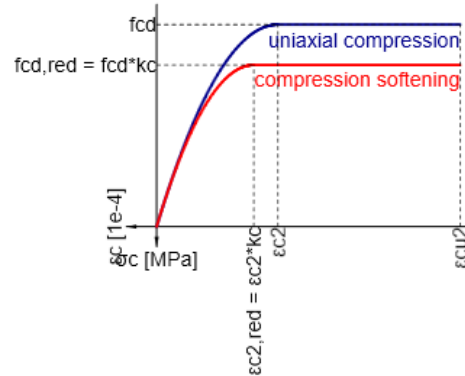
Parameter nilai  $f_{ctk,5\%}$ , ditentukan melalui rumus 4 (EN 1992-1-1, 2004) :

$$F_{ctk,5\%} = 0.7 * (f_{ctm}) \quad (4)$$

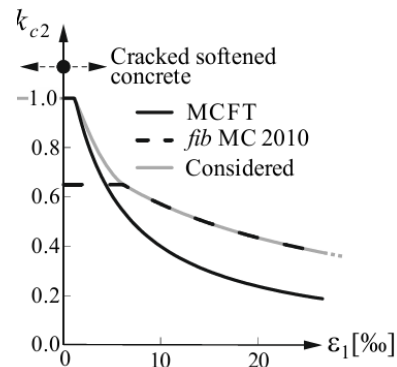
Kemudian untuk nilai  $k_c$  adalah perkalian dari  $k_{c2}$  dan  $\eta_{fc}$ . Nilai  $\eta_{fc}$  pada *software* secara *default* adalah 1. Sedangkan nilai  $k_{c2}$  ditunjukkan pada Gambar 3.

Kemudian untuk hubungan  $\epsilon_{c2}$  dan  $\epsilon_{cu2}$  terhadap kuat tekan beton ditunjukkan pada Gambar 4. Nilai regangan beton pada kuat tekan masimum adalah 0.002 (Kent & Park, 1969). Kemudian untuk nilai  $\epsilon_{cu2}$  yaitu sebesar 0.35 % untuk beton dengan nilai  $f_{ck}$

antara 12 sampai 50 MPa (EN 1992-1-1, 2004).



Gambar 2 Diagram tegangan dan regangan beton *software* Ideastatica



Gambar 3 Faktor reduksi kekuatan tekan beton (Kaufmann dkk., 2020)

Tabel 1 Parameter material beton CSFM

| Parameter        | Pengertian   |
|------------------|--|
| $F_{cd}$         | Kekuatan desain tekan beton (Cairo, 2020)  |
| $F_{ck}$         | Kekuatan karakteristik tekan beton sampel silinder beton pada umur 28 hari (EN 1992-1-1, 2004) |
| $E_{cm}$         | Secan modulus elastis beton (Cairo, 2020)  |
| $F_{ctm}$        | Kuat tarik rerata beton (Cairo, 2020)  |
| $F_{ctk, 5\%}$   | Kuat tarik rerata beton ketika terjadi kerusakan sebesar 5 % (Cairo, 2020)                     |
| $k_c$            | Faktor reduksi kekuatan beton (Kaufmann dkk., 2020)  |
| $\epsilon_{c2}$  | Regangan beton ketika tercapai kuat tekan maksimum (EN 1992-1-1, 2004)                         |
| $\epsilon_{cu2}$ | Regangan ultimit beton (EN 1992-1-1, 2004)   |

**Model material tulangan**

Properti dari tulangan B420C ditunjukkan pada Tabel 2 (Kipçak dkk., 2023). Berdasarkan parameter diatas maka kurva tegangan dan regangan tulangan ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 diketahui bahwa properti tulangan B420C memiliki tegangan luluh sebesar 420 MPa dan tegangan tarik ultimit sebesar 525 MPa. Sedangkan regangan yang terjadi ketika tegangan 420 MPa yaitu 0.0059. Kemudian regangan ketika tercapainya tegangan 525 MPa adalah 0.0779.

**Daya dukung tiang hasil kalendering**

Kalendering adalah adalah suatu pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan daya dukung pancang saat proses pemancangan (Sandi dkk., 2022) . Metode ini hanya bisa dilakukan jika alat pemancang adalah *drop hammer* atau *diesel hammer*. Kaidah penerimaan kalendering adalah 3 - 5 cm / 10 pukulan (Binamarga No. 05/SE/Db/2017, 2017). Hasil dari kalendering yaitu berupa grafik penurunan tiang yang terjadi. Kemudian metode yang digunakan untuk analisa daya dukung tiang berdasarkan data kalendering yaitu *modified ENR*.

Metode *modified ENR* merupakan metode yang diajukan oleh Michigan State Highway (Lawton dkk., 1986). Perhitungan dari *modified ENR* mengikuti persamaan 5 (Lukman, 2017) :

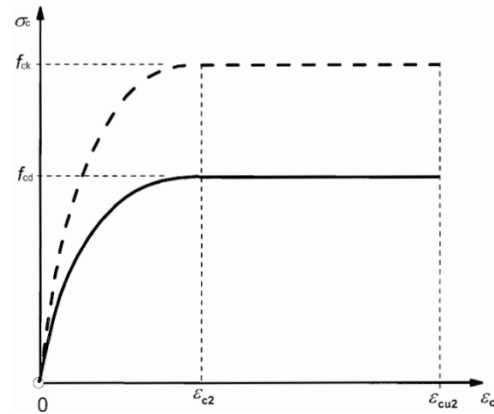
$$Qu = \frac{E * W_R * H}{S + C} * \frac{W_R + n^2 * W_p}{W_R + W_p} \quad (5)$$

Keterangan :

- E* = Efisiensi dari *hammer*
- W<sub>R</sub>* = Berat *hammer* (ton)
- H* = Tinggi jatuh *hammer* (m)
- n* = Koefisien restitusi
- S* = Nilai penurunan tiang dalam 1 pukulan (*m/blows*)
- C* = Koefisien = 0.00254 m
- W<sub>p</sub>* = Berat tiang (ton)

Nilai efisiensi *hammer* dengan tipe *diesel hammer* yaitu sebesar 0.85. Sedangkan nilai dari koefisien restitusi adalah 0.4

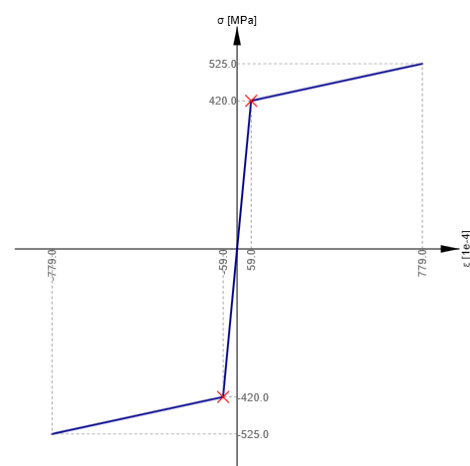
(Hardiyatmo, 2011). Hal ini karena tidak ada penutup pada tiang saat pemancangan.



Gambar 4. Diagram parabola-persegi panjang untuk beton ketika keadaan tekan (EN 1992-1-1, 2004)

Tabel 2 Properti tulangan B420C

| Parameter   | Nilai                 |
|---|-----------------------|
| <i>F<sub>y</sub></i>                                      | 420 MPa               |
| <i>F<sub>t</sub></i>                                      | 525 MPa               |
| Berat volume  | 7.85 t/m <sup>3</sup> |
| Modulus elastis   | 200 GPa               |
| Regangan plastis ketika tegangan tercapai sebesar 420 MPa | 0.0059                |
| Regangan plastis ketika tegangan tercapai sebesar 525 MPa | 0.0779                |



Gambar 5 Kurva tegangan dan regangan tulangan

**Pile driving analyzer test**

*Pile Driving Analyzer Test* (PDA) adalah salah satu uji dinamik yang digunakan untuk mengetahui daya dukung aksial pada suatu pondasi. Dasar dari pengujian PDA adalah rambatan gelombang pada persepsi 1 dimensi. Gelombang tersebut dihasilkan dengan cara menjatuhkan beban pada interval ketinggian tertentu (Haryadi & Prakoso, 2023). Beban *hammer* dalam uji dinamik berkisar antara 1 – 2 % dari kapasitas ultimit tiang. Nilai beban tersebut bergantung pada tipe tiang yang digunakan (Robinson dkk., 2002). Kemudian hasil dari uji PDA harus dilakukan analisa CAPWAP.

Analisa CAPWAP adalah proses penggabungan pada pengukuran *case method* yang dilakukan dengan analisis numerik bertipe persamaan gelombang (Haryadi & Prakoso, 2023). Hasil dari analisa CAPWAP digunakan untuk menarik kesimpulan tentang daya dukung aksial tiang pondasi.

**Konstanta spring**

Konstanta *spring* pada tanah disebut juga *modulus of subgrade reaction*. *Modulus of subgrade reaction* adalah hubungan konseptual antara tekanan tanah yang diberikan akibat beban diatas pondasi dan penurunan yang terjadi akibat pembebanan (Bowles, 1997). Perhitungan *modulus of subgrade reaction* pada rumus 6 :

$$k_s = \left(\frac{q}{\delta}\right) \tag{6}$$

Keterangan :

- $q$  = Tekanan yang terjadi (kN/m<sup>2</sup>)
- $\delta$  = Penurunan yang terjadi (m)

**Metodologi penelitian**

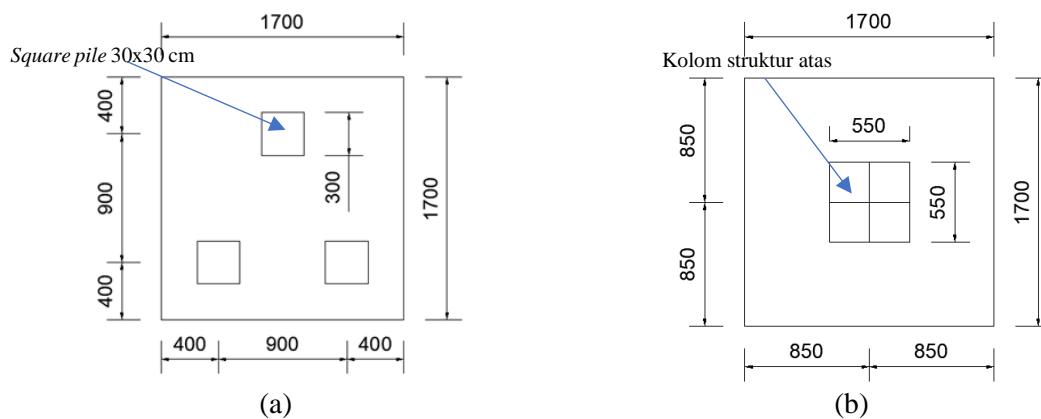
**Data pilecap**

Pilecap gedung x memiliki tebal sebesar 65 cm dengan mutu beton yaitu  $f'c$  28 MPa. Jenis agregat kasar yang digunakan adalah kerikil basal. Lalu untuk tulangan pilecap sisi bawah menggunakan D19-200 (arah x dan y). Kemudian tulangan sisi atas yaitu D16-200 (arah x dan y). Sedangkan untuk dimensi lebar pilecap ditunjukkan pada Gambar 6.

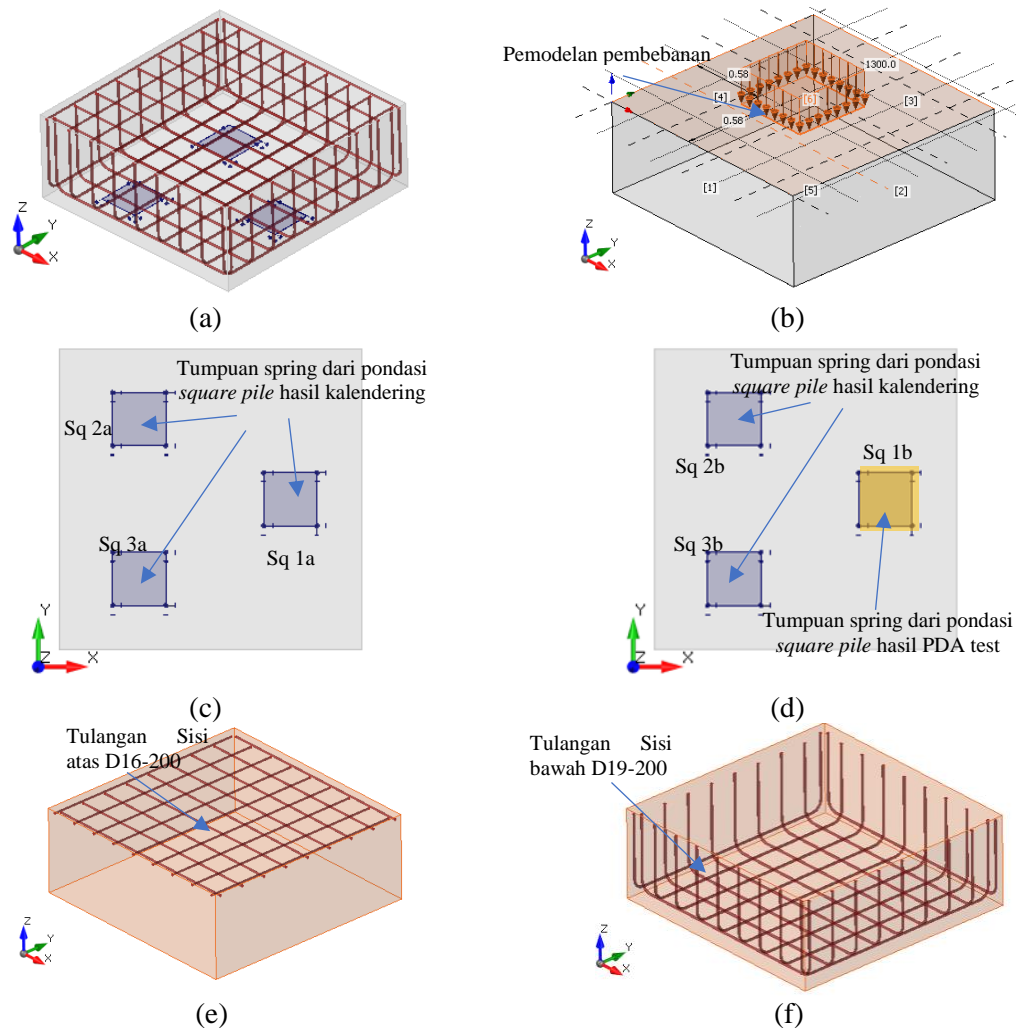
Kemudian untuk mutu material dari *square pile* adalah  $f'c$  42 MPa. Sedangkan dimensi kolom struktur atas yaitu 55x55 cm dengan mutu beton pada pedestal adalah  $f'c$  28 MPa.

**Pemodelan model uji**

Pemodelan dari pondasi *square pile* pada Ideastatica V.24 diwakili dengan konstanta *spring*. Kemudian untuk pemodelan beban dari struktur atas adalah menggunakan beban merata. Nilai beban yang terjadi sebesar 1300 kN (Lihat Gambar 7b). Lalu untuk kombinasi pembebanan yang digunakan adalah kombinasi 1 DL (beban mati sendiri) + 1 Adl (beban dari struktur atas). Untuk beban mati sendiri akan dihitung otomatis oleh *software*.



Gambar 6 Dimensi pilecap (a) Penempatan *square pile*, (b) Penempatan kolom



Gambar 7 Model uji (a) Pemodelan 3D, (b) Pemodelan beban kolom, (c) Model uji A, (d) Model uji B, (e) Pemodelan tulangan atas pilecap, dan (f) Pemodelan tulangan bawah pilecap

Klasifikasi pemodelan model uji dibagi menjadi 2 yaitu sebagai berikut :

1. Model uji A  
Model uji A adalah model uji dengan daya dukung tiang yang sama pada ke tiga tiang (kondisi normal). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 7c.
2. Model uji B  
Model uji B adalah model uji dengan daya dukung tiang yang sama pada kedua tiang. Sedangkan salah satu tiang memiliki daya dukung yang berbeda sesuai dengan Gambar 1 (kondisi anomaly). Hal ini ditunjukkan pada Gambar 7d.  
Kemudian pemodelan tulangan pilecap ditunjukkan pada Gambar 7e dan 7f.

### Data pondasi

Data pondasi sebagai berikut :

|                       |                       |
|-----------------------|-----------------------|
| Panjang tiang         | = 8 m                 |
| Berat tiang per meter | = 216 kg              |
| Berat hammer          | = 2.5 ton             |
| Tinggi jatuh hammer   | = 1 meter             |
| Luas melintang tiang  | = 0.09 m <sup>2</sup> |

Data-data diatas akan digunakan sebagai analisa daya dukung dari hasil kalendering. Sedangkan data CAPWAP ditunjukkan pada Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3 didapatkan nilai daya dukung ultimit tiang adalah 43.7 ton dengan penurunan yang terjadi ketika daya dukung ultimit tercapai adalah 6.18 mm.

Tabel 3 Rekapitulasi CAPWAP gedung X

| Soil segment  | Depth below gages (m) | Activated resistance, R (Ton) | Sum down of R (Ton) | Unit resistance depth (T/m) |
|---|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1   | 1.22                  | 0                             | 0                   | 0                           |
| 2   | 2.43                  | 1                             | 1                   | 0.83                        |
| 3   | 3.65                  | 2.2                           | 3.2                 | 1.8                         |
| 4   | 4.87                  | 3.6                           | 6.8                 | 2.95                        |
| 5   | 6.08                  | 6.4                           | 13.2                | 5.29                        |
| 6   | 7.3                   | 5.8                           | 19                  | 4.75                        |
| Toe   | 7.3                   | 24.7                          | 43.7                | -                           |
| Total RCAPWAP capacity = 43.7 ton ; Pile displacement measurement : 6.18 mm |                       |                               |                     |                             |

**Hasil dan pembahasan**

**Parameter input material beton**

Mutu material beton pada pilecap adalah  $f'c$  28 MPa. Maka perhitungan parameter material beton sebagai berikut :

$$f_{cd} = 1 * 28 / 1.5$$

$$f_{cd} = 18.667 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 22000 * \left(\frac{28+8}{10}\right)^{0.3} * 1.2$$

$$E_{cm} = 38769.9 \text{ MPa}$$

$$F_{ctm} = 0.3 * (28)^{\frac{2}{3}}$$

$$F_{ctm} = 2.766 \text{ MPa}$$

$$F_{ctk,5\%} = 0.7 * 2.766$$

$$F_{ctk,5\%} = 1.93638 \text{ MPa}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diketahui bahwa nilai secan modulus elastis didapatkan sebesar 38769.9 MPa. Kemudian nilai kuat tarik rerata beton sebesar 2.766 MPa. Lalu untuk kekuatan tarik beton ketika terjadi kerusakan sebesar 5 % yaitu 1.936 MPa. Sedangkan untuk parameter nilai  $k_c$  menggunakan perhitungan langsung dari software Ideastatica.

**Daya dukung aksial tiang**

Berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa nilai kalendering terbesar yaitu sebesar 0.6 cm / 10 pukulan. Hasil kalendering terbesar tersebut terletak pada tiang nomer 3.

Sehingga perhitungan daya dukung tiang dari hasil kalendering dengan metode *modified ENR* sebagai berikut :

$$Qu = \frac{0.85 * 2.5 * 1}{0.0006 + 0.00254} * \frac{0.4^2 * 1.73 + 2.5}{2.5 + 1.73}$$

$$Qu = 444.415 \text{ ton}$$

Berdasarkan perhitungan diatas didapatkan nilai daya dukung ultimit dari kalendering adalah 444.415 ton.

**Koefisien spring**

Perhitungan koefisien *spring* vertikal berdasarkan hasil kalendering sebagai berikut :

$$k_{sv} = \left(\frac{4441.5}{0.0006}\right) = 82299.1 \text{ mN/m}^2/\text{m}$$

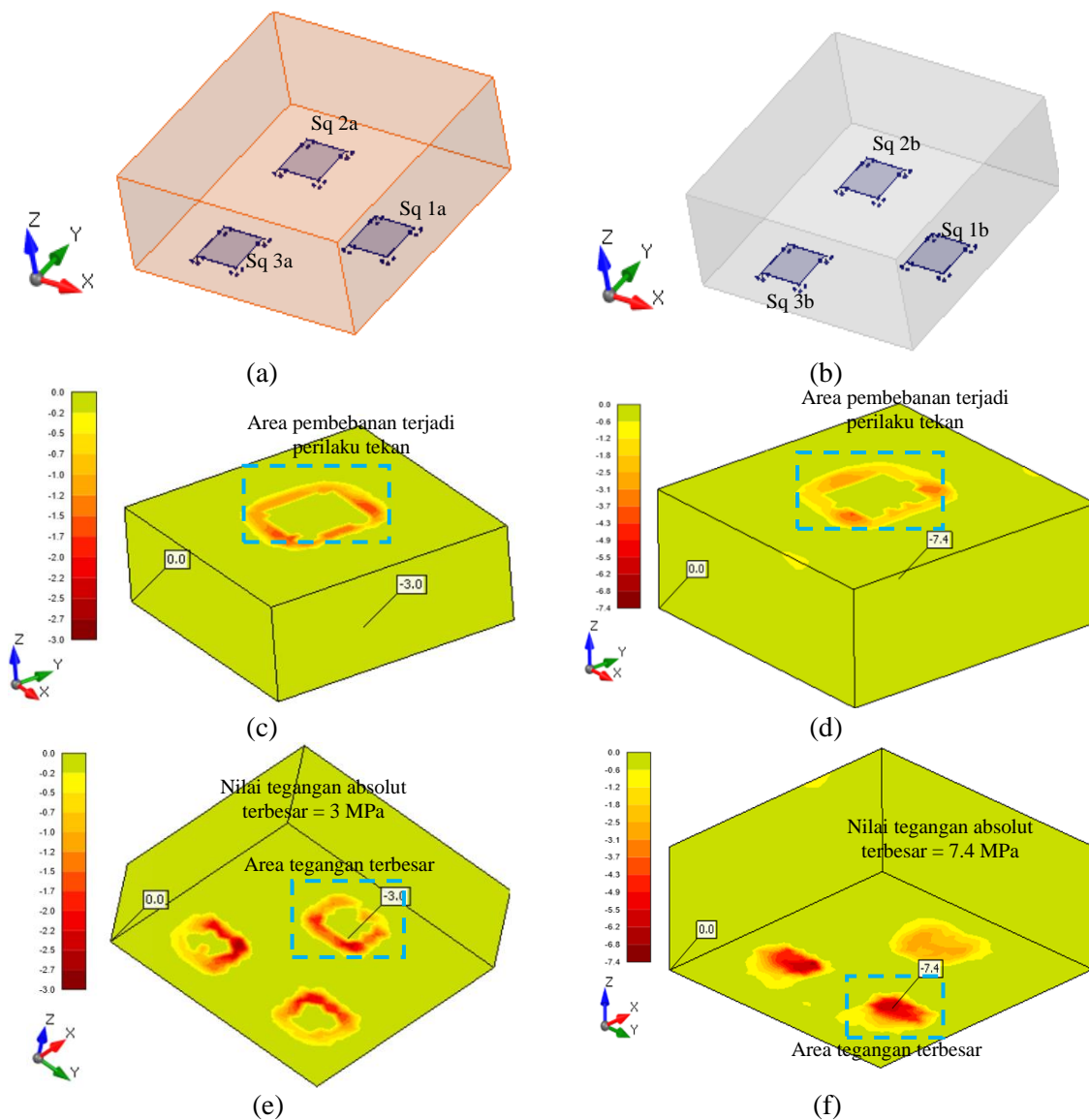
Nilai koefisien *spring* vertikal dari kalendering adalah 82299.1 mN/m<sup>2</sup>/m. Kemudian nilai koefisien *spring* horizontal sebesar 10 % dari  $k_{sv}$  yaitu 8229.91 mN/m<sup>2</sup>/m. Lalu untuk perhitungan koefisien *spring* vertikal berdasarkan hasil CAPWAP sebagai berikut :

$$k_{sv} = \left(\frac{437}{0.00618}\right) = 785.689 \text{ mN/m}^2/\text{m}$$

Nilai koefisien *spring* vertikal dari hasil CAPWAP adalah 785.689 mN/m<sup>2</sup>/m. Kemudian nilai koefisien *spring* horizontal sebesar 10 % dari  $k_{sv}$  yaitu 78.57 mN/m<sup>2</sup>/m.

**Perilaku pilecap**

Perilaku pilecap yang ditinjau yaitu tegangan beton, gaya pada tulangan dan penurunan pilecap. Perilaku pilecap berdasarkan tegangan beton yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Hasil tegangan beton (a) Tampilan awal model uji A, (b) Tampilan awal model uji B, (c) Tampak atas model uji A, (d) Tampak atas model uji B, (e) Tampak bawah model uji A, dan (f) Tampak bawah model uji B

Berdasarkan Gambar 8 diketahui bahwa terdapat perilaku yang berbeda dari model uji A dan B. Letak tegangan absolut terbesar dari model uji A adalah pada pondasi squarepile sq1a (Lihat Gambar 8e). Sedangkan pada model uji B, letak tegangan absolut terbesar berada di pondasi squarepile sq2b (Lihat Gambar 8f).

Kemudian terdapat perbedaan dari nilai tegangan absolut terbesar diantara kedua model uji. Model uji A mempunyai tegangan

absolut terbesar yaitu 3 MPa (Lihat Gambar 8e). Sedangkan model uji B yaitu sebesar 7.4 MPa (Lihat Gambar 8f).

Nilai tegangan yang terjadi untuk kedua model uji adalah kurang dari 28 MPa. Maka kedua model uji masih dalam kategori aman. Hal ini menunjukkan bahwa *anomaly* daya dukung tiang dalam satu tipe pondasi berpengaruh terhadap tegangan yang pada beton. Kemudian untuk hasil gaya yang

terjadi pada tulangan ditunjukkan pada Gambar 9.

Berdasarkan Gambar 9, diketahui bahwa terdapat perilaku yang berbeda dari model uji A dan B. Letak gaya tulangan terbesar dari model uji A adalah dekat pada pondasi squarepile sq2a (Lihat Gambar 9c). Sedangkan pada model uji B, gaya tulangan terbesar berada di dekat pondasi squarepile sq1b (Lihat Gambar 9d).

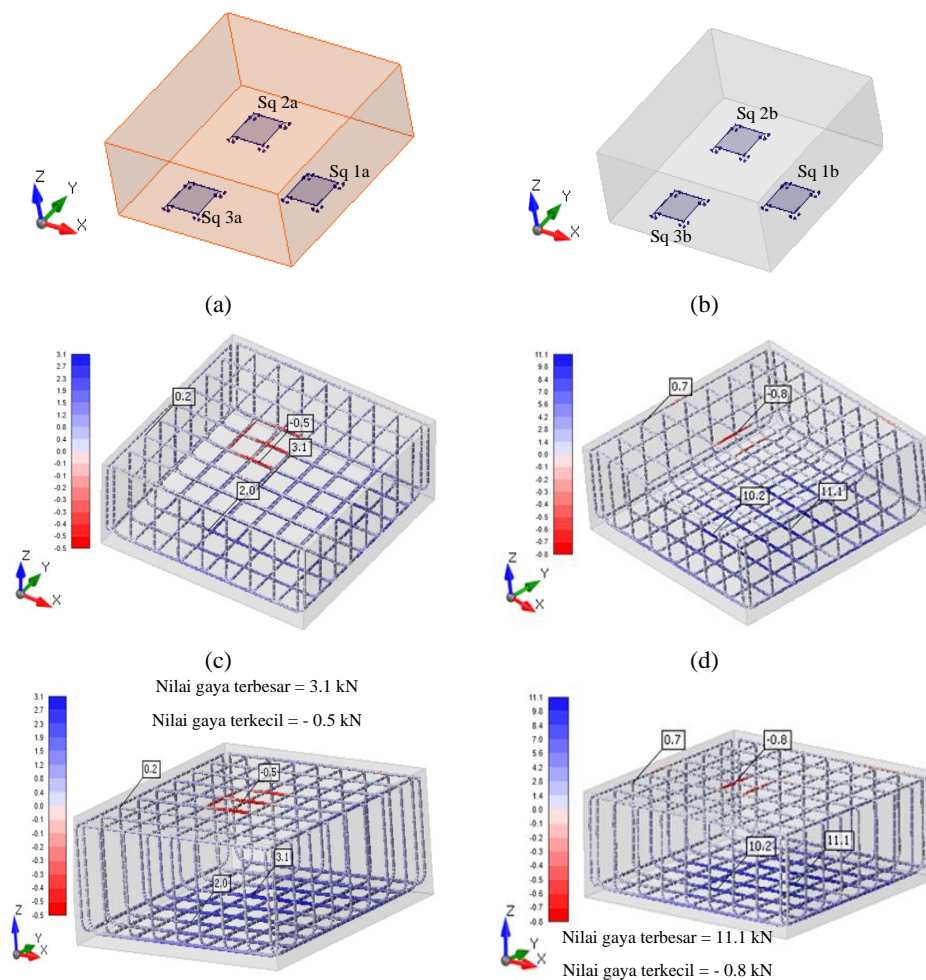
Kemudian terdapat perbedaan dari nilai gaya tulangan diantara kedua model uji. Model uji A mempunyai gaya terbesar yaitu 3.1 kN dan gaya terkecil sebesar -0.5 kN (Lihat Gambar 9e). Model uji B mempunyai gaya

terbesar yaitu 11.1 kN dan gaya terkecil sebesar -0.8 kN (Lihat Gambar 9f). Nilai ini perlu dibandingkan dengan kapasitas Tarik tulangan. Perhitungan kapasitas tarik tulangan sebagai berikut :

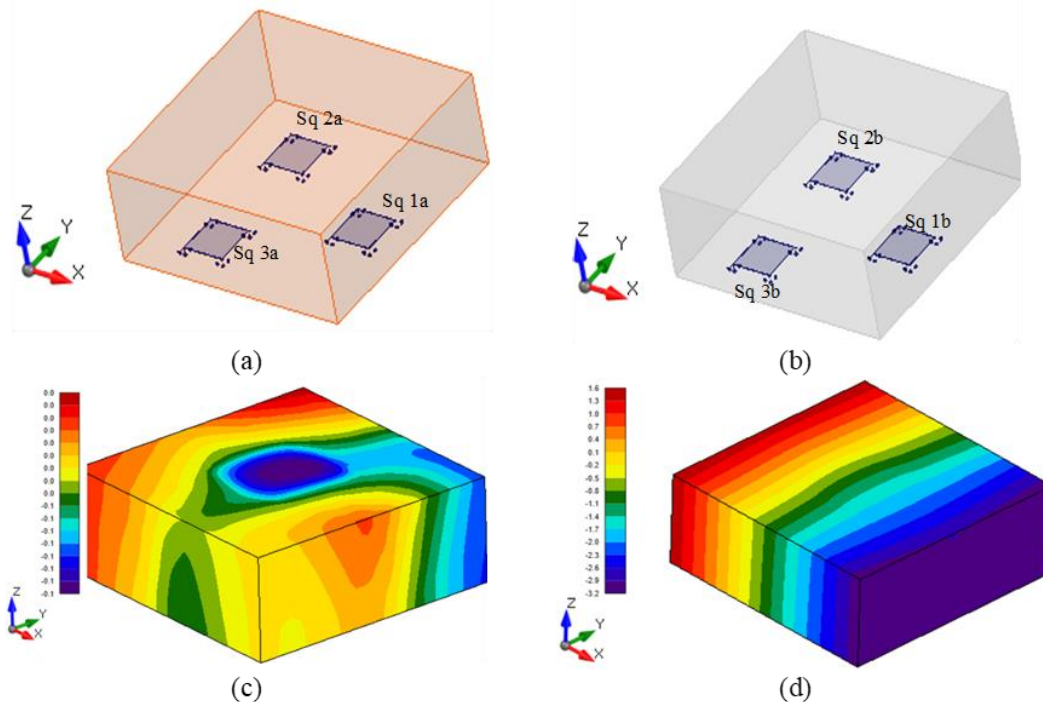
$$T_t = 3.14 * 420 * 19 * 19 * 0.25 * 0.9$$

$$T_t = 107.1 \text{ kN}$$

Berdasarkan perhitungan diatas diketahui bahwa nilai kuat tarik leleh sebesar 107.1 kN. Sedangkan nilai gaya yang terjadi pada tulangan untuk kedua model uji kurang dari nilai kuat tarik tulangan. Maka kedua model uji masih dalam kategori aman.



Gambar 9 Hasil gaya yang terjadi pada tulangan(a) Tampilan awal model uji A, (b) Tampilan awal model uji B, (c) Tampak atas model uji A, (d) Tampak atas model uji B, (e) Tampak samping model uji A, dan (f) Tampak samping model uji B



Gambar 10 Penurunan pilecap (a) Tampilan awal model uji A, (b) Tampilan awal model uji B, (c) Tampak atas model uji A, (d) Tampak atas model uji B,

Hal ini menunjukkan bahwa *anomaly* daya dukung dalam satu tipe pondasi berpengaruh terhadap tegangan yang terjadi pada beton. Kemudian hasil penurunan yang terjadi ditunjukkan pada Gambar 10.

Berdasarkan Gambar 10 diketahui bahwa terdapat perilaku yang berbeda dari model uji A dan B. Penurunan yang terjadi pada model uji A relatif seragam sebesar 0.1 mm (Lihat Gambar 10c).

Sedangkan pada model uji B, area sq2b dan sq 3b terdapat penurunan negatif (melawan arah gaya) dengan nilai maksimum adalah 1.6 mm (Lihat Gambar 10d). Kemudian area sq1b memiliki penurunan sebesar 3.2 mm (Lihat Gambar 10d). Batasan ijin penurunan ketika tercapai beban ultimit adalah 25 mm (Bowles, 1997). Maka dapat dikatakan untuk kedua model uji masih aman.

Perbandingan dari semua perilaku pilecap ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan Gambar 11, diketahui perbedaan tegangan model uji B sebesar 2.47 kali lebih besar dari model uji A (Lihat Gambar 11a). Kemudian

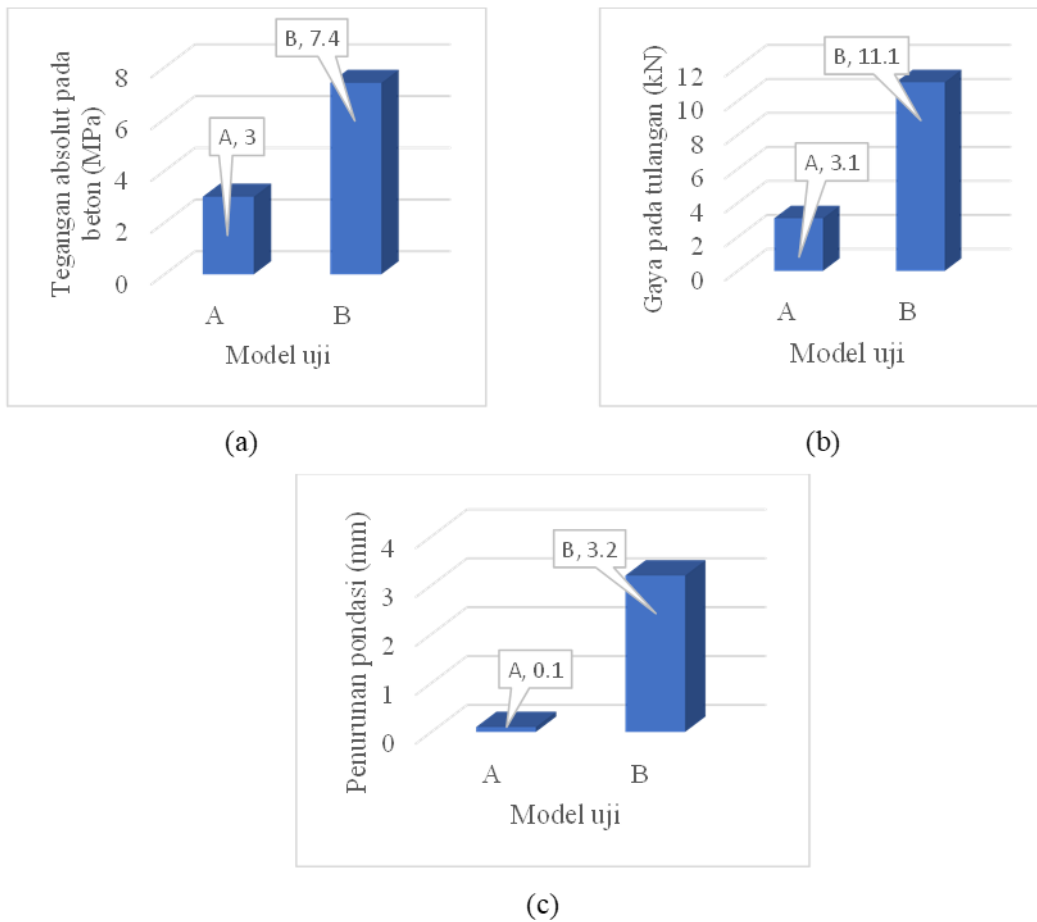
gaya pada tulangan model uji B 3.58 kali lebih besar dari model uji A (Lihat Gambar 11b). Sedangkan penurunan pada model uji B 32 kali lebih besar dari model uji A (Lihat Gambar 11c).

Berdasarkan hal diatas maka perilaku pilecap saat *anomaly* daya dukung tiang dalam satu tipe pondasi memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan keadaan normal.

### Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut :

1. Nilai secan modulus didapatkan sebesar 38769.9 MPa. Kuat tarik rerata beton yaitu sebesar 2.766 MPa. Sedangkan nilai kuat tarik beton ketika terjadi 5 % kerusakan adalah 1.936 MPa.
2. Daya dukung ultimit aksial tiang hasil kalendering dengan menggunakan metode *modified ENR* yaitu sebesar 444.415 ton.



Gambar 11 Perbandingan perilaku pilecap (a) Tegangan absolut terbesar pada beton, (b) Gaya yang terjadi pada tulangan, (c) Penurunan pilecap

- Letak tegangan absolut terbesar dari model uji A yaitu pada pondasi sq1a. Sedangkan model uji B terletak pada pondasi sq2b.
- Nilai tegangan absolut beton terbesar pada model uji A adalah 3 MPa. Sedangkan model uji B adalah 7.4 MPa
- Nilai gaya tulangan terbesar pada model uji A adalah 3.1 kN. Sedangkan model uji B adalah 11.1 kN.
- Penurunan pada model uji A sebesar 0.1 mm. Sedangkan pada model uji B sebesar 3.2 mm.
- Hasil dari kedua model uji masih dalam keadaan aman.
- Perilaku pilecap ketika *anomaly* daya dukung tiang dalam satu tipe pondasi memiliki perbedaan yang signifikan dibandingkan dengan keadaan normal.

#### Daftar pustaka

- Binamarga No. 05/SE/Db/2017. (2017). *Penyampaian Ketentuan Desain dan Revisi Jalan dan Jembatan, Serta Kerangka Acuan Kerja Pengawas Teknis untuk Dijadikan Acuan di Lingkungan DITJEN Binamarga*. Binamarga.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (V). The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Cairo, P. P. (2020). *Application of B.I.M. Methodology for Long Steel Deck Bridge*. Politecnico di Torino.
- EN 1992-1-1. (2004). *Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*. European Committee For Standardization.

- Hardiyatmo, H. C. (2011). *Analisis dan Perancangan Fondasi II (II)*. Gadjah Mada University Press.
- Haryadi, D., & Prakoso, W. A. (2023). Analisa Statistik Hasil Uji Kapasitas Metode Dinamis (PDA Test) pada Pondasi Tiang Pancang Sistem Panjang Tekan. *Wahana Teknik Sipil*, 28(1), 15–28.
- Ideastatica. (2024). *Structural Design of Concrete Discontinuities in IDEA StatiCa Detail*. <https://Ideastatica.Com/Support-Center/Theoretical-Background-for-Idea-Statica-Detail>.
- Kaufmann, W., Falcon, J. M., Weber, M., Galkovski, T., Tran, D. T., Kabelac, J., Konecny, M., Navratil, J., Cihal, M., & Komarkova, P. (2020). *Compatible Stress Field Design of Structural Concrete : Principles and Variation*. ETH Zurich and IDEA Statica s.r.o.
- Kent, D. C., & Park, R. (1969). Flexural Members With Confined Concrete. *Journal of the Structural Division (ASCE)*, 97(7).
- Kıpçak, F., Erdil, B., Tapan, M., & Karaşin, A. (2023). The Effect of Voids on Flexural Capacity of Reinforced Concrete Slabs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(4), 1048–1065. <https://doi.org/10.3311/PPci.21988>
- Lawton, E. C., Fragaszy, R. J., Higgins, J. D., Kilian, A. P., Peters, A. J., Fragaszy, R. J., Higgins, J. D., Kilian, P., & Peters, A. J. (1986). Review of Methods for Estimating Pile Capacity. *Transportation Research Record*, 32–40.
- Lukman, H. (2017). Rasio Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Hasil Kalendering. *Jurnal Teknik*, 18(1), 51–57.
- Robinson, B., Rausche, F., Likins, G., & Ealy, C. (2002). Dynamic Load Testing of Drilled Shafts at National Geotechnical Experimentation Sites. *Orlando*, 851–867.
- Sandi, D. M. N., Maldini, A. R., & Rachmayu, F. A. (2022). Rasio Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal Berdasarkan Data Kelendering dengan Data Test PDA. *Jurnal Riset Teknik Sipil Dan Sains*, 1(1), 28–34. <https://jurnal.poliwangi.ac.id/index.php/Jriteks>
- Triastuti, N. S. (2022). *Berbagai Macam Pondasi*. Mitra Ilmu.