

Pengaruh Ketebalan *Pile Cap* Abutmen Jembatan terhadap Distribusi Beban pada Tiang Fondasi

Y Djoko Setiyarto ^{[1]*}, Julia Olivia Joris ^[2]

^{[1]*} Program Studi Teknik Sipil, Universitas Komputer Indonesia, Bandung, 40132, Indonesia

^[2] Satuan Kerja Perencanaan dan Pengawasan Jalan Nasional, Balai Pelaksana Jalan Nasional Provinsi Maluku, Ambon, 97128, Indonesia

Email: y.djoko.setiyarto@email.unikom.ac.id*

*) Corresponding Author

Received: 06 October 2024; Revised: 13 May 2025; Accepted: 21 August 2025

How to cite this article:

Setiyarto, Y.D. and Joris, J.O. (2026). Pengaruh Ketebalan *Pile Cap* Abutmen Jembatan terhadap Distribusi Beban pada Tiang Fondasi. Jurnal Teknik Sipil, 22(1), 25–43. <https://doi.org/10.28932/jts.v22i1.10115>

ABSTRAK

Dalam penentuan beban yang diterima oleh tiap tiang fondasi, *pile cap* terkadang diasumsikan berperilaku sangat kaku sehingga dapat mendistribusikan beban aksial secara seragam. Pada kenyataannya, asumsi kaku tersebut belum tentu benar sehingga perlu diperiksa terlebih dahulu apakah *pile cap* berperilaku lentur atau kaku berdasarkan ketebalan *pile cap* yang didesain. Kajian berikut bertujuan untuk mengetahui pengaruh ketebalan *pile cap* terhadap distribusi beban pada tiang fondasi. Hasil kajian berbasis metode elemen hingga ini memodelkan *pile cap* pada abutmen jembatan sebagai elemen *shell* dan memodelkan tiang fondasi sebagai pegas. *Pile cap* berukuran 5 m x 11,5 m dengan tebal bervariasi sebesar 0,9 m, 1,2 m, 1,5 m, 1,8 m, 2,1 m, dan 2,4 m dipelajari perilakunya dalam mendistribusikan beban ke tiang fondasi yang berjumlah 24 titik. Dengan menggunakan *software* SAP2000, hasil kajian ini menunjukkan bahwa *pile cap* yang tipis akan berperilaku lentur dan menghasilkan distribusi beban yang tidak seragam pada tiang fondasi. Sebaliknya, semakin tebal *pile cap* maka distribusi beban pada tiang fondasi menjadi seragam. Dalam kajian ini, tebal *pile cap* sebesar 1,8 m sudah dapat mendistribusikan beban pada tiang fondasi secara seragam. Meskipun demikian, penggunaan *pile cap* tipis dengan tebal 0,9 m yang dinyatakan berperilaku lentur masih dapat dipertimbangkan selama masih memenuhi persyaratan SNI 2847:2019, serta telah ditinjau ulang kapasitas tiap tiang dalam memikul beban yang tidak seragam tersebut.

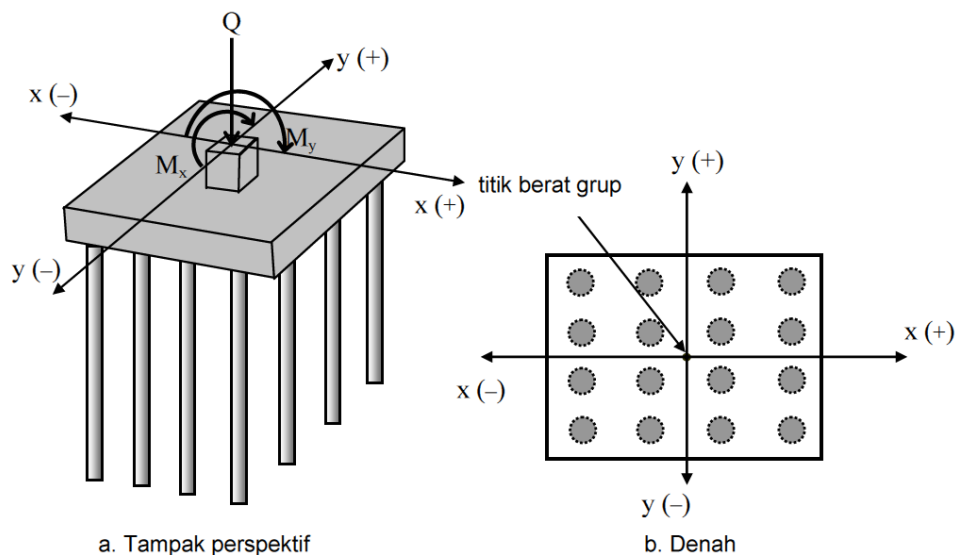
Kata kunci: Distribusi Beban, Perilaku, *Pile Cap*, Tebal, Tiang Fondasi

ABSTRACT. *The Effect of Bridge Abutment Pile Cap Thickness on Load Distribution in Foundation Piles.* In determining the load received by each foundation pile, the pile cap is sometimes assumed to behave as a rigid element so that it can distribute the axial load uniformly. In reality, this rigid assumption is not always valid and must first be verified whether the pile cap behaves flexibly or rigidly based on the designed thickness. The following study aims to determine the effect of pile cap thickness on load distribution on foundation piles. The results of this study are based on the finite element method, which models the pile cap on the bridge abutment as a shell element and models the foundation pile as a spring. Pile caps measuring 5 m x 11.5 m with varying thicknesses of 0.9 m, 1.2 m, 1.5 m, 1.8 m, 2.1 m, and 2.4 m were studied for their behavior in distributing the load to the 24 foundation piles. Using SAP2000 software, the results of this study show that pile caps with smaller thicknesses behave more flexibly and produce non-uniform load distribution on the foundation piles. On the other hand, the thicker the pile cap, the more uniform the load distribution on the foundation pile. In this study, a pile cap thickness of 1.8 m can already distribute the load on the foundation piles uniformly. However, the use of a thin pile cap thickness of 0.9 m, which is considered to behave flexibly, can still be used as long as it meets the requirements of SNI 2847:2019, and the capacity of each pile to carry the non-uniform load has been reviewed.

Keywords: Load Distribution, Behavior, *Pile Cap*, Thickness, Foundation Pile

1. PENDAHULUAN

Pile cap atau kepala tiang berfungsi untuk mengikat seluruh tiang fondasi menjadi satu grup tiang yang secara berkelompok menopang beban dari struktur atas. *Pile cap* pada jembatan merupakan bagian struktur bawah (abutmen atau pilar) yang menghubungkan dinding struktur bangunan bawah dengan fondasi tiang. Gaya-gaya yang bekerja dari struktur bangunan atas akan diteruskan ke dinding struktur bangunan bawah (abutmen atau pilar), selanjutnya gaya-gaya tersebut disalurkan ke tiang fondasi melalui *pile cap*. Dalam perencanaan fondasi, beban yang diterima oleh masing-masing tiang dalam satu grup tiang dapat bernilai sama ataupun berbeda tergantung dari kekakuan kepala tiang, jaraknya dari titik kerja beban dan jenis beban yang bekerja (Das & Sivakugan, 2019). Ilustrasi distribusi beban dari *pile cap* ke tiang fondasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Beban Terpusat dan Momen yang Bekerja pada *Pile Cap*
Sumber : (Bina Marga 06/SE/Db, 2021)

Formulasi yang sering digunakan untuk mendistribusikan gaya dari struktur atas (beban luar) ke tiap titik tiang fondasi dapat dilihat pada Persamaan 1 (Bina Marga 06/SE/Db, 2021). Jenis beban yang bekerja terdiri atas Q (aksial gravitasi), M_x (momen yang mengitari sumbu x) dan M_y (momen yang mengitari sumbu y). Faktor jarak dalam Persamaan 1 dinyatakan dengan x_i (koordinat x tiang ke- i terhadap titik berat grup) dan y_i (koordinat y tiang ke- i terhadap titik berat grup). Suku pertama dari Persamaan 1 tersebut, yaitu Q/N menggunakan asumsi bahwa kepala tiang mempunyai kekakuan yang sangat besar (*rigid body*), sehingga seluruh beban luar Q dapat dibagi rata dengan jumlah seluruh tiang N .

$$Q_i = \frac{Q}{N} + \frac{M_x y_i}{\sum_{i=1}^N (y_i)^2} + \frac{M_y x_i}{\sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (1)$$

Dibandingkan *pile cap* yang memiliki ketebalan tipis, maka *pile cap* dengan ketebalan besar akan mempunyai kekakuan yang besar pula, sehingga *pile cap* tersebut dapat diasumsikan sebagai *rigid body*. Namun *pile cap* yang tebal akan mengakibatkan volume beton menjadi besar dan menurut Spesifikasi Umum 2018 (Bina Marga 16.1/SE/Db, 2020) tergolong sebagai *mass concrete* yang pelaksanaan konstruksinya memerlukan teknologi dan perlakuan khusus. Kadang-kadang, akibat pertimbangan lokasi jembatan yang terpencil serta kemudahan pelaksanaan konstruksi, maka ketebalan *pile cap* cenderung dipilih yang tidak tebal dengan syarat masih memenuhi ketentuan dalam perencanaan beton bertulang (SNI 2847, 2019).

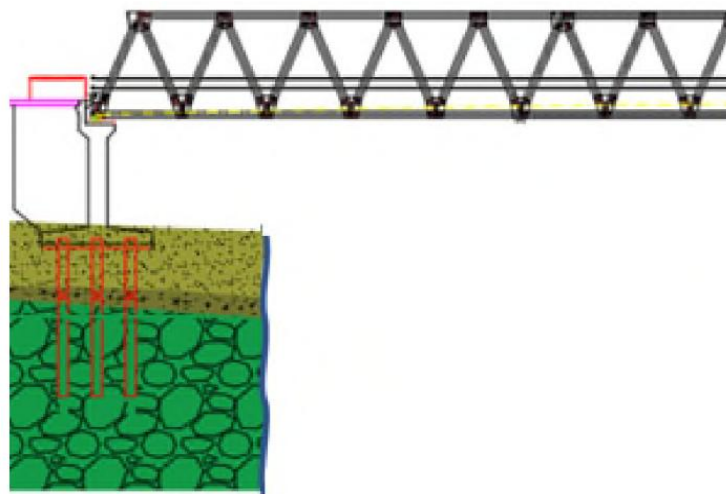
Penelitian-penelitian sebelumnya yang membahas tentang tebal *pile cap* masih cukup sedikit. Ketebalan *pile cap* yang dirancang hanya berdasarkan persyaratan struktural kemungkinan tidak memenuhi asumsi kekakuan *pile cap*, terutama untuk *pile cap* yang mengikat tiang fondasi yang banyak (Zhang et al., 2024). Studi ini menyarankan agar *pile cap* yang mengikat lebih dari 4 tiang, atau lebar *pile cap* lebih dari 5 m, kekakuan pelatnya harus diverifikasi menggunakan model elemen hingga. Diketahui bahwa reaksi tiang sangat bervariasi tergantung pada ketebalan *pile cap*, dengan *pile cap* yang lebih fleksibel menunjukkan distribusi yang tidak seragam. Tiang-tiang yang terdekat dengan titik aplikasi beban menerima beban tekan yang lebih tinggi dibandingkan tiang-tiang yang lebih jauh (Sharma, 2018). Dalam penelitian numerik 3D (El Hammouli et al., 2021) diketahui bahwa *pile cap* yang tipis berfungsi sebagai pelat lentur yang mendistribusikan beban pada tiang pancang secara tidak merata, sehingga berpotensi tidak sesuai dengan konsep desain fondasi tiang. Di sisi lain, *pile cap* yang tebal berfungsi sebagai pelat kaku, yang akan mendistribusikan beban pada fondasi tiang secara merata, serta menahan momen lentur dan geser tekan. Namun *pile cap* yang tebal, dapat memberikan beban tambahan pada tiang fondasi karena berat sendirinya (Islam et al., 2018). Penelitian yang dilakukan Hammouli (2019) membandingkan beberapa ketebalan *pile cap* yang diperlukan untuk memperoleh kekakuan *pile cap* dengan persyaratan desain seperti keruntuhan geser, kegagalan lentur dan kegagalan *punching shear*. Hasilnya, ketebalan yang diusulkan untuk memperoleh kekakuan, yaitu sekitar 1 m, dan ketebalan *pile cap* dapat ditentukan berdasarkan gaya *punching shear* yang terjadi. Pada struktur *pile cap* terjadi konsentrasi tegangan yang besar karena pada titik pertemuan *pile cap* dengan kolom terdapat gaya-gaya terpusat (Sedayu et al., 2019; Sukarman et al., 2019).

Kajian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh ketebalan *pile cap* terhadap distribusi beban pada tiang fondasi, sehingga diharapkan dapat menjadi pertimbangan bagi para perencana jembatan dalam menetapkan tebal *pile cap* yang paling efektif dan efisien. *Pile cap*

yang kurang tebal dicurigai akan berperilaku lentur sehingga distribusi beban menjadi tidak seragam. Asumsi penentuan beban yang diterima oleh tiap tiang fondasi dengan cara membagi rata beban luar Q dengan jumlah seluruh titik tiang fondasi N , perlu dilakukan tinjauan ulang.

2. METODOLOGI

Kajian ini menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* SAP 2000. Desain *pile cap* mengambil studi kasus pada abutmen (bangunan bawah) dari Jembatan X (Jembatan Rangka Baja) di Pulau Seram Provinsi Maluku. Gambar 2 memperlihatkan kondisi abutmen yang berdiri di atas jenis tanah pasir gravel. *Pile cap* pada abutmen tersebut berfungsi mengikat 24 titik tiang fondasi. Fondasi yang digunakan adalah tiang pancang pipa baja berdiameter 60 cm dengan panjang 10 m. Dimensi *pile cap* pada studi kasus adalah panjang 11,5 m, lebar 5 m dengan tebal 0,9 m. Karena ketebalan *pile cap* diduga masih kurang tebal, maka menjadi variasi yang dibahas dalam kajian ini. *Pile cap* menggunakan material beton normal dengan mutu $f_c' = 30$ MPa dan baja tulangan dengan mutu BJTS420. Konfigurasi 24 titik tiang pancang terdiri atas susunan 3 baris tiang dengan penomoran masing-masing tiang seperti pada Gambar 3.



Gambar 2. Abutmen Jembatan X
Sumber : (BPJN Provinsi Maluku, 2021)

2.1 Variasi Tebal Pile Cap

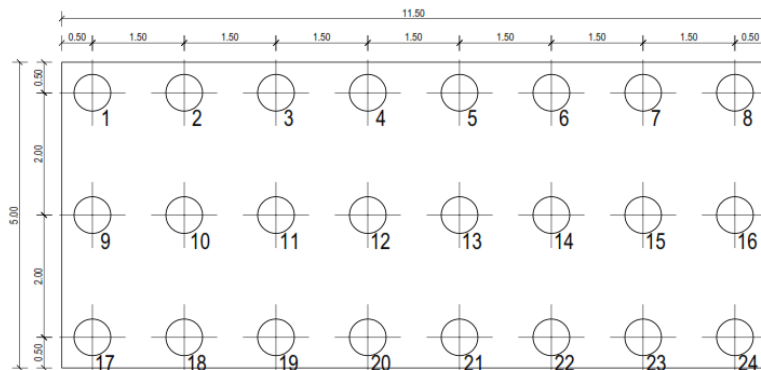
Dalam SNI 2847:2019 maupun ACI 318-19 tidak menyebutkan ketentuan eksplisit mengenai tebal *pile cap*, namun menyatakan ketebalan minimum *pile cap* harus sedemikian rupa sehingga tinggi efektif tulangan bawah tidak kurang dari 300 mm (12 inch). Selanjutnya ketebalan *pile cap* tersebut harus dicek terhadap geser satu arah dan geser dua arah (*punching shear*) untuk

mengetahui keamanannya (Asaad, 2024). Umumnya sebelum dilakukan pengecekan kapasitas geser, tebal *pile cap* dapat ditentukan secara praktis sebesar 1,5 – 2 kali diameter tiang fondasi.

Berdasarkan petunjuk tersebut, maka tebal *pile cap* sebesar 0,9 m telah memenuhi ketentuan tebal minimum yang disyaratkan. Selanjutnya, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap distribusi beban pada tiang fondasi, maka dalam kajian ini menggunakan variasi tebal *pile cap* seperti pada Tabel 1. Semakin tebal *pile cap* akan menyebabkan volume beton membesar dan dipandang tidak ekonomis, serta beberapa daerah mengalami kesulitan dalam pelaksanaannya. Sehingga variasi tebal *pile cap* dalam kajian ini cukup dibatasi hingga 2,40 m.

Tabel 1. Variasi Tebal Pile Cap

Tebal <i>Pile Cap</i> (m)	Volume Beton (m ³)
0,90	51,8
1,20	69,0
1,50	86,3
1,80	103,5
2,10	120,8
2,40	138,0



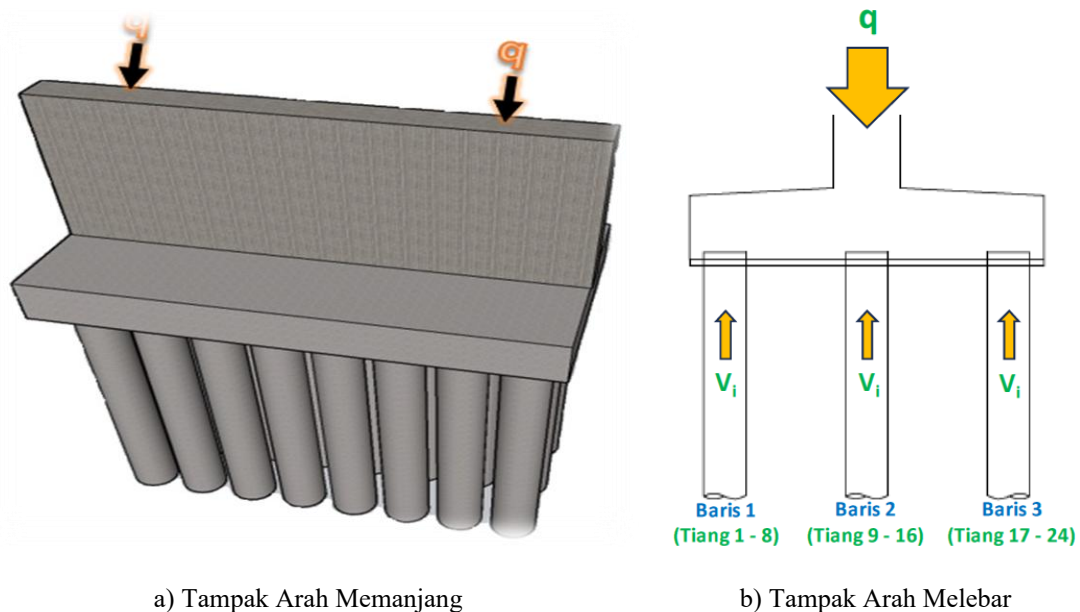
Gambar 3. Dimensi *Pile Cap* dan Konfigurasi Tiang Fondasi
Sumber : (BPJN Provinsi Maluku, 2021)

2.2. Deskripsi Beban

Beban q yang diinput berasal dari struktur atas dan dimodelkan terjadi pada tumpuan rangka baja seperti pada Gambar 4a. Beban q tersebut nanti akan diketahui distribusinya terhadap masing-masing tiang fondasi setelah dilakukan proses *running* pada SAP2000. Beban q yang digunakan dalam kajian ini merupakan beban gravitasi yang terdiri atas berat sendiri (MS), beban aspal dan utilitas (MA), beban lalu lintas (TD), dan beban pejalan kaki (TP) sesuai standar pembebanan jembatan (SNI 1725:2016). Sedangkan beban lateral seperti akibat angin dan gempa yang kadang menjadi dominan (Setiyarto, 2017), tidak diaktifkan dengan maksud untuk memudahkan analisis pengaruh distribusi beban aksial ke tiang fondasi secara vertikal.

2.3. Pengelompokan Tiang Fondasi

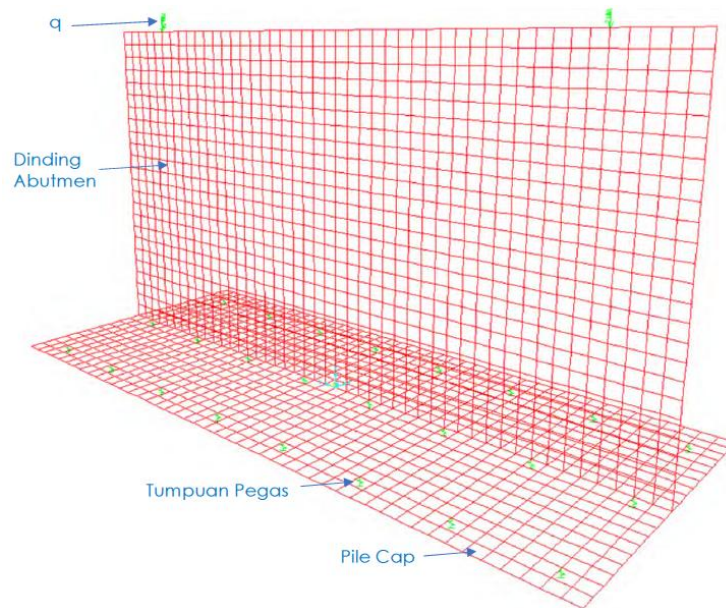
Pengelompokan tiang fondasi dilakukan untuk memudahkan analisis. Pengelompokan tiang fondasi dilakukan sesuai baris yang ditentukan pada Gambar 4b, yaitu baris 1 yang terdiri dari tiang fondasi No. 1 hingga 8, baris 2 yang terdiri dari tiang fondasi No. 9 hingga 16, dan baris 3 yang terdiri dari tiang fondasi No. 17 hingga 24. Hipotesa kajian ini adalah tiang-tiang fondasi pada baris 2 di Gambar 4b akan menerima beban q yang lebih besar, akibat tebal *pile cap* yang tipis tidak dapat mendistribusikan beban secara seragam.



Gambar 4. Model Abutmen dan *Pile Cap*

2.4. Pemodelan Pada SAP2000

Pile cap beserta dinding abutmen dimodelkan sebagai elemen *shell-thick*, dengan ketebalan *pile cap* sebagai variabel seperti Tabel 1. Tiang fondasi dimodelkan sebagai pegas (Computer & Structures, 2016) yang dilakukan dengan menginputkan nilai kekakuan pegas dalam arah translasi 3 (U_z). Nilai kekakuan pegas diperoleh berdasarkan parameter tanah dan material tiang fondasi. Sedangkan beban q yang diinputkan adalah sesuai dengan Gambar 4. Hasil pemodelan pada SAP2000 dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemodelan Spesimen pada SAP2000

2.5. Keseragaman Distribusi Beban Pada Tiang Fondasi

Distribusi beban pada tiang fondasi dapat dilihat melalui *output* reaksi peletakan yang dihasilkan dari pemodelan SAP2000. Metode yang digunakan untuk mengetahui keseragaman distribusi beban pada tiang fondasi adalah dengan menggunakan analisis Koefisien Variasi (Hima Bindu et al., 2020) yang dinyatakan dengan Persamaan 2 sebagai berikut :

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\% \quad (2)$$

Di mana σ merupakan standar deviasi dari *output* reaksi peletakan, dan μ adalah nilai rata-rata dari *output* reaksi peletakan. Nilai CV semakin mendekati nol maka dikatakan distribusi beban seragam, demikian pula sebaliknya, bila nilai CV semakin membesar maka dapat dikatakan distribusi beban pada tiang fondasi tidak seragam. Dalam kajian ini, distribusi beban pada tiang fondasi dinyatakan seragam bila $CV < 3\%$.

2.6. Perilaku *Pile Cap* Abutmen Jembatan

Perilaku *pile cap* abutmen jembatan yang ditinjau adalah kekakuan lentur pelat *pile cap* dalam arah lalu lintas (arah melebar *pile cap*) seperti Gambar 4b, karena *pile cap* dalam arah tegak lurus lalu lintas (arah memanjang *pile cap*) cenderung memiliki kekakuan yang lebih tinggi akibat adanya dimensi dinding abutmen. Metode untuk menilai kekakuan lentur pelat *pile cap* abutmen tersebut dipelajari melalui deformasi dan konsentrasi tegangan yang terjadi pada *pile cap* tersebut

(Hammouli, 2019). Semakin kecil deformasi dan semakin merata distribusi tegangan, maka perilaku *pile cap* akan semakin kaku.

Evaluasi deformasi dilakukan pada model tanpa tumpuan pegas untuk memperoleh indikator komparatif kekakuan relatif *pile cap* antarvariasi ketebalan, bukan untuk merepresentasikan deformasi aktual sistem fondasi secara penuh. Output dari SAP2000 yang ditinjau untuk melihat terjadinya deformasi pada titik tersebut adalah peralihan arah vertikal (U_z). Demikian pula, keseragaman distribusi tegangan dapat dilihat secara visual melalui perbedaan warna pada output tegangan maksimum (S_{MAX}) yang dihasilkan oleh SAP2000 (Computer & Structures, 2016).

2.7. Nilai Efektivitas dan Efisiensi Tebal *Pile Cap*

Efektivitas tebal *pile cap* tercapai jika *pile cap* memiliki tebal yang cukup untuk menghindari kegagalan geser satu arah maupun dua arah (*punching shear*). Metode untuk memperoleh nilai efektivitas tebal *pile cap* dalam kajian ini adalah dengan cara membagi kapasitas minimal geser *pile cap* dengan reaksi peletakan maksimal di tiang fondasi, seperti terlihat pada Persamaan 3. Semakin besar nilai efektivitas maka tebal *pile cap* semakin efektif untuk mencegah terjadinya kegagalan geser.

Efisiensi tebal *pile cap* tercapai jika *pile cap* memiliki tebal yang ekonomis untuk menghindari terjadinya kegagalan geser, sehingga berhubungan dengan volume beton yang dihasilkan dari tebal *pile cap*. Metode untuk memperoleh nilai efisiensi tebal *pile cap* dalam kajian ini adalah dengan cara membagi kapasitas *punching shear* dengan berat *pile cap*, seperti terlihat pada Persamaan 4. Semakin besar nilai efisiensi maka tebal *pile cap* semakin ekonomis.

$$\text{Efektivitas} = \frac{\phi \cdot V_{c \text{ one_way}}}{V_{u_{\max}}} \quad (3)$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{\phi \cdot V_{c \text{ two_way}}}{\text{Berat}} \quad (4)$$

Keterangan:

$V_{c \text{ one_way}}$: kapasitas geser satu arah dari *pile cap*

$V_{c \text{ two_way}}$: kapasitas geser dua arah dari *pile cap*

$V_{u_{\max}}$: reaksi peletakan maksimal di tiang fondasi berdasarkan *output* SAP2000

ϕ : faktor reduksi geser = 0.75

Berat : berat beton dari *pile cap*

Metode untuk menentukan kapasitas geser *pile cap* adalah sesuai dengan persyaratan beton (SNI 2847:2019) seperti yang tercantum dalam Persamaan 5 dan 6. Kapasitas geser 1 arah dari *pile cap* sesuai dengan SNI 2847:2019 Pasal 22.5.5.1 dan kapasitas geser dua arah dari *pile cap* sesuai dengan Pasal 22.6.5.2.

$$V_{c \text{ one_way}} = 0,17 \lambda \sqrt{f_c'} b_w d \quad (5)$$

$$V_{c \text{ two_way}} = 0,083 \left[2 + \frac{a_s d}{b_0} \right] \lambda \sqrt{f_c'} \quad (6)$$

Keterangan:

$V_{c \text{ one_way}}$: kapasitas geser satu arah dari *pile cap*

$V_{c \text{ two_way}}$: kapasitas geser dua arah (*punching shear*) dari *pile cap*

λ : faktor modifikasi sesuai Tabel 19.2.4.2 bernilai = 1 (SNI 2847:2019)

f_c' : mutu beton yang digunakan *pile cap* yaitu 30 MPa

b_w : lebar *pile cap*, dalam kajian ini sesuai dengan Gambar 3

d : tebal *pile cap*, dalam kajian ini sesuai dengan Tabel 1

b_0 : keliling kritis di sekitar tiang fondasi

a_s : sesuai Pasal 22.6.5.3 bernilai = 20 (SNI 2847:2019)

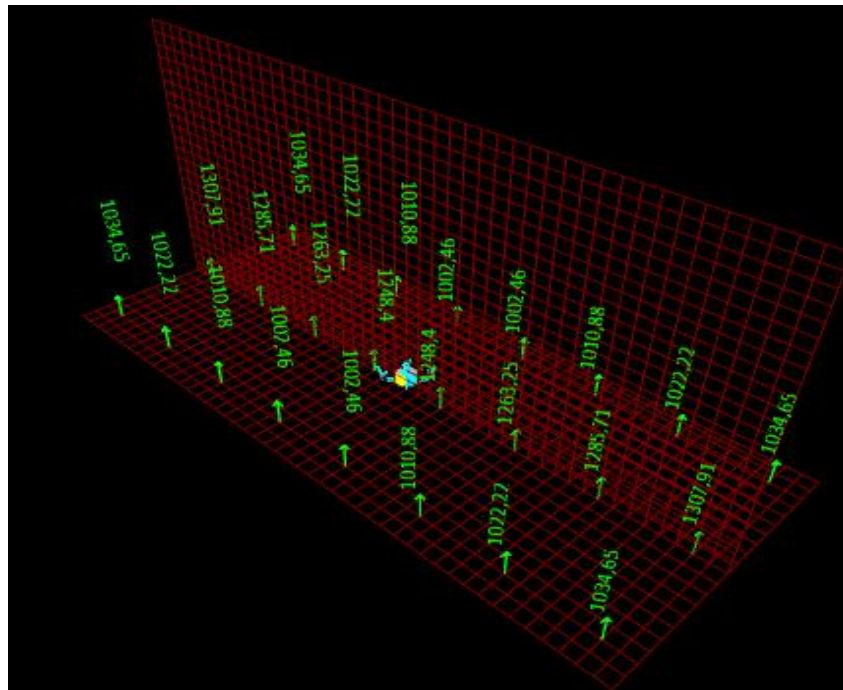
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengaruh Tebal Pile Cap Terhadap Distribusi Beban pada Tiang Fondasi

Distribusi beban pada masing-masing tiang fondasi dilihat melalui reaksi vertikal dari pegas yang dihasilkan oleh *running* SAP2000. Reaksi vertikal tersebut dihasilkan dari kombinasi pembebanan yang hanya melibatkan beban gravitasi seperti berat sendiri dan beban lalu lintas. Pada Gambar 6 terlihat tiang-tiang pada baris 2 (tiang No. 9-16), yang merupakan tiang yang berdekatan dengan beban aksial q (tepat berada di bawah dinding abutmen), menerima beban dengan jumlah yang lebih besar dibandingkan beban yang diterima tiang di baris 1 dan baris 3 (tiang No. 1-8 dan tiang No. 17-24). Rata-rata beban yang diterima pada tiang baris tengah adalah sebesar 1,3 kali beban yang diterima pada baris tepi.

Secara lengkap, hasil pengaruh tebal *pile cap* terhadap distribusi beban pada tiang fondasi dirangkum pada Tabel 2. Pada tabel tersebut tercantum reaksi peletakan seluruh tiang untuk seluruh variasi tebal *pile cap* sesuai Tabel 1. Keseragaman distribusi beban pada tiang fondasi ditentukan dengan menggunakan koefisien variasi CV yang nilainya dihitung berdasarkan Persamaan 2. Pada Tabel 2 terlihat bahwa *pile cap* dengan tebal $T = 2,4$ m memberikan nilai CV yang paling kecil yaitu 1,5, yang berarti distribusi bebannya relatif seragam. Dalam hal ini, *pile*

cap dengan tebal 0,9 m dapat dikategorikan sebagai pelat tipis karena mendistribusikan beban secara tidak merata ke semua tiang fondasi, hal tersebut terlihat memiliki nilai CV yang paling besar.



Gambar 6. Distribusi Beban pada Tiang Fondasi Akibat Pengaruh Tebal *Pile Cap* = 0,9 m

Pada Tabel 2 terinformasikan pula reaksi peletakan maksimum pada tiang fondasi nomor 9 dan nomor 16, yang berada pada kelompok baris 2. Reaksi peletakan tersebut merupakan gaya geser maksimum yang akan menentukan efektivitas tebal *pile cap* sesuai Persamaan 3.

3.2. Perilaku Lentur pada *Pile Cap* yang Memiliki Ketebalan Relatif Tipis

Pemilihan tebal *pile cap* yang tipis menyebabkan distribusi beban pada tiang fondasi menjadi tidak seragam, dan diilustrasikan pada Tabel 2. Distribusi beban yang besar terletak pada baris 2 (bagian tengah) dari kelompok tiang fondasi, yang lokasinya bertepatan langsung satu garis vertikal dengan posisi dinding abutmen. Distribusi beban pada tiang fondasi yang tidak seragam tersebut, disebabkan oleh *pile cap* yang berperilaku lentur, sehingga menimbulkan konsentrasi tegangan pada zona tengah *pile cap*. Selanjutnya, bagaimana tebal *pile cap* dapat mempengaruhi perilaku lenturnya berdasarkan ketebalan yang bertambah setiap 0,3 m seperti pada Tabel 1, dapat dipelajari pada Gambar 7 s/d Gambar 12. Pada gambar-gambar tersebut, disajikan gambar bagian a yang memperlihatkan deformasi arah vertikal (U_z). Tercantum pula nilai U_z untuk titik 172, yaitu salah satu titik tepi bagian tengah dari pelat *pile cap*. Pada gambar

bagian b disajikan pula distribusi tegangan S_{MAX} yang keseragaman tegangannya dapat dilihat melalui kesamaan warnanya.

Pada Gambar 7a hingga Gambar 12a, terlihat perubahan kekakuan *pile cap* melalui nilai deformasi vertikal U_z , yang semakin mengecil dan mendekati nol, bila *pile cap* semakin tebal. Demikian pula, pada Gambar 7b hingga Gambar 12b, terlihat perubahan kekakuan *pile cap* melalui distribusi tegangan yang warnanya semakin sama atau seragam apabila *pile cap* semakin tebal. Konsentrasi tegangan dapat diperhatikan pada lokasi pertemuan konektivitas antara dinding abutmen dengan pelat *pile cap*. Perubahan perilaku *pile cap* akibat pengaruh ketebalannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Pengaruh Tebal *Pile Cap* terhadap Distribusi Beban pada Tiang Fondasi

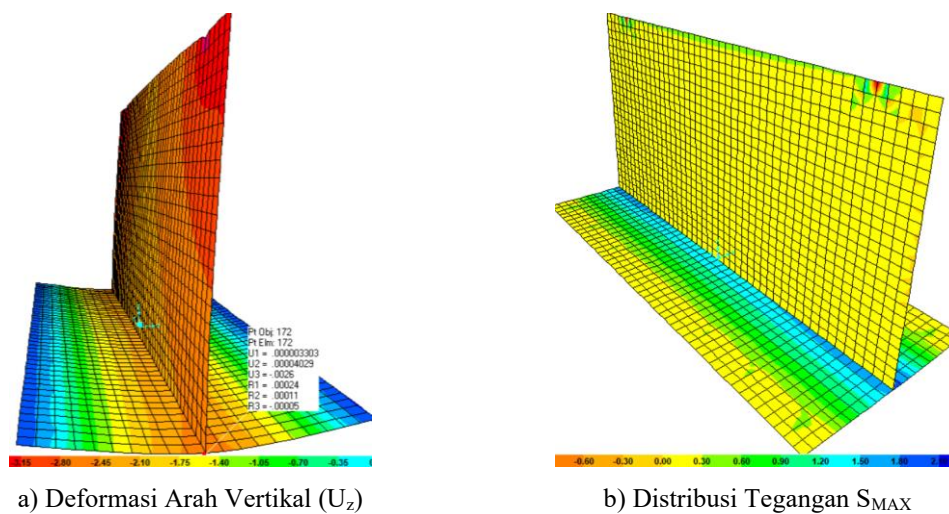
No. Tiang	Kelompok Baris	Reaksi Peletakan Sesuai Tebal (T) <i>Pile Cap</i>					
		T = 0,9 m (kN)	T = 1,2 m (kN)	T = 1,5 m (kN)	T = 1,8 m (kN)	T = 2,1 m (kN)	T = 2,4 m (kN)
1		1034,65	1104,44	1144,04	1173,07	1197,72	1220,39
2		1022,22	1088,74	1128,14	1158,16	1184,29	1208,59
3		1010,88	1074,62	1113,81	1144,66	1172,03	1197,69
4		1002,46	1065,32	1104,75	1136,26	1164,46	1190,97
5	1	1002,46	1065,32	1104,75	1136,26	1164,46	1190,97
6		1010,88	1074,62	1113,81	1144,66	1172,03	1197,69
7		1022,22	1088,74	1128,14	1158,16	1184,29	1208,59
8		1034,65	1104,44	1144,04	1173,07	1197,72	1220,39
9		1307,92	1240,25	1225,09	1227,88	1238,15	1252,10
10		1285,71	1219,29	1205,67	1210,18	1222,26	1238,01
11		1263,25	1198,60	1186,68	1192,95	1206,78	1224,21
12	2	1248,40	1185,21	1174,59	1182,08	1197,08	1215,59
13		1248,40	1185,21	1174,59	1182,08	1197,08	1215,59
14		1263,25	1198,60	1186,68	1192,95	1206,78	1224,21
15		1285,71	1219,29	1205,67	1210,18	1222,26	1238,01
16		1307,92	1240,25	1225,09	1227,88	1238,15	1252,10
17		1034,65	1104,44	1144,04	1173,07	1197,72	1220,39
18		1022,22	1088,74	1128,14	1158,16	1184,29	1208,59
19		1010,88	1074,62	1113,81	1144,66	1172,03	1197,69
20	3	1002,46	1065,32	1104,75	1136,26	1164,46	1190,97
21		1002,46	1065,32	1104,75	1136,26	1164,46	1190,97
22		1010,88	1074,62	1113,81	1144,66	1172,03	1197,69
23		1022,22	1088,74	1128,14	1158,16	1184,29	1208,59
24		1034,65	1104,44	1144,04	1173,07	1197,72	1220,39
Standar Deviasi (σ)		125,72	63,85	39,97	28,74	22,44	18,34
Rata – Rata (μ)		1103,81	1125,80	1147,79	1169,78	1191,77	1213,77
Koefisien Variasi (CV)		11,39	5,67	3,48	2,46	1,9	1,5

3.3. Penilaian Efektivitas dan Efisiensi Tebal *Pile Cap* Yang Tipis

Tebal *pile cap* yang tipis memang akan menyebabkan pelat *pile cap* berperilaku lentur sehingga distribusi beban menjadi tidak seragam. Namun selama memenuhi persyaratan dalam SNI 2847:2019 atau ACI 318-19, maka pemilihan tebal *pile cap* dengan menggunakan tebal yang relatif tipis masih dapat dipertanggungjawabkan. Mengingat pula pada daerah terpencil, pemilihan *pile cap* untuk abutmen jembatan dengan ketebalan yang relatif tebal akan berdampak terhadap *workability* di lapangan.

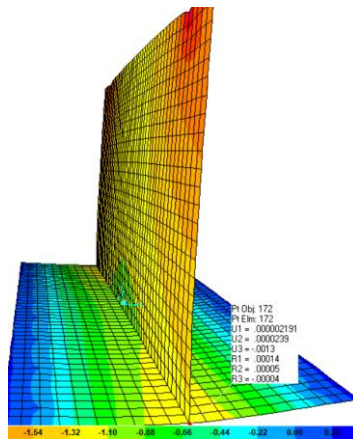
Tabel 3. Perubahan Perilaku *Pile Cap* Akibat Pengaruh Ketebalannya

Tebal Pile Cap (m)	Deformasi (m)	Distribusi Tegangan	Perilaku
0,90	0,0026	Tak Seragam	Lentur
1,20	0,0013	Tak Seragam	Lentur
1,50	0,0008	Tak Seragam	Lentur
1,80	0,0006	Seragam	Kaku
2,10	0,0001	Seragam	Kaku
2,40	0,00008	Seragam	Kaku

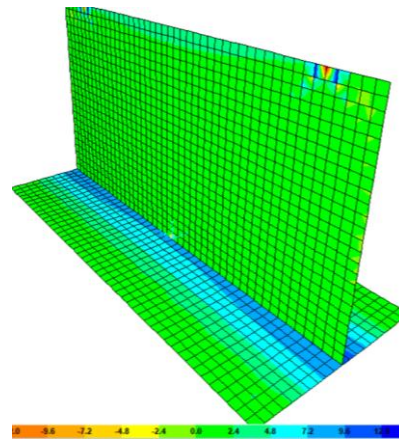


Gambar 7. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 0,9 m

Dalam kajian ini, efektivitas dan efisiensi variasi tebal *pile cap* pada Tabel 1 akan ditentukan dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4, yang dalam persamaan tersebut perlu ditentukan terlebih dahulu kapasitas geser satu arah dan kapasitas geser 2 arah (*punching shear*) sesuai SNI 2847:2019. Secara ringkas, penentuan efektivitas dan efisiensi tebal *pile cap* tersebut disajikan dalam Tabel 4.

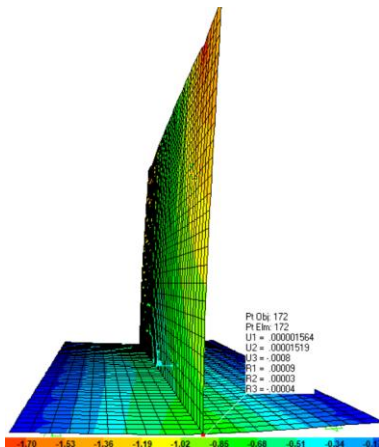


a) Deformasi Arah Vertikal (U_z)

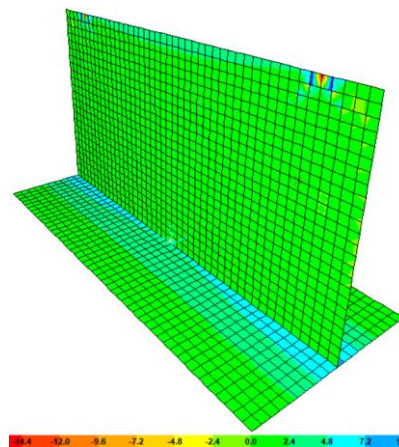


b) Distribusi Tegangan S_{MAX}

Gambar 8. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 1,2 m

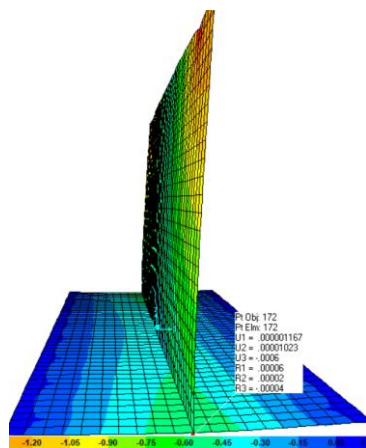


a) Deformasi Arah Vertikal (U_z)

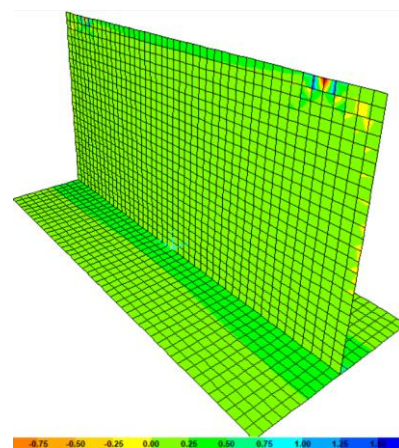


b) Distribusi Tegangan S_{MAX}

Gambar 9. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 1,5 m

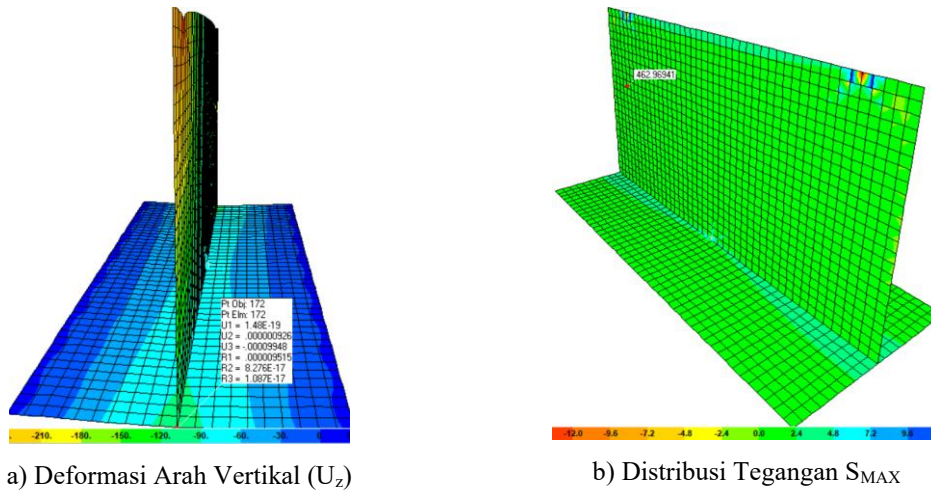


a) Deformasi Arah Vertikal (U_z)

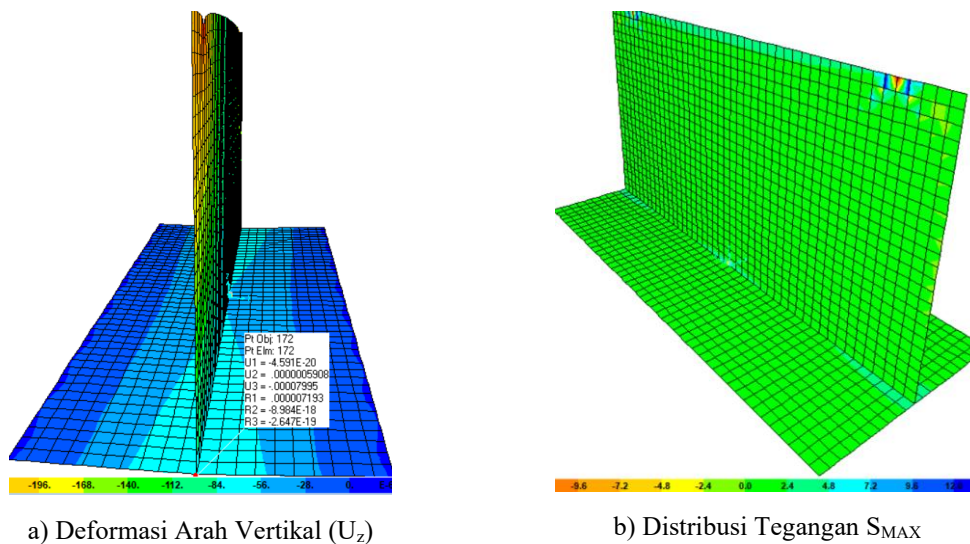


b) Distribusi Tegangan S_{MAX}

Gambar 10. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 1,8 m



Gambar 11. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 2,1 m



Gambar 12. Deformasi dan Distribusi Tegangan pada *Pile Cap* dengan Tebal = 2,4 m

Tabel 4. Hubungan Perubahan Ketebalan *Pile Cap* dengan Efektivitas dan Efisien

Tebal <i>Pile Cap</i> (m)	Kapasitas <i>Punching Shear</i> (kN)	Kapasitas Geser 1 Arah (kN)	Berat <i>Pile Cap</i> (kN)	Output SAP2000			Efek-tifitas	Efi-siensi
				Reaksi <i>Vu</i> (kN)	Distribusi Beban ke Fondasi	Koef. Var. CV (%)		
0,90	3239,09	1885,53	1242	1307,91	Tak Seragam	11,39	1,44	2,61
1,20	4091,49	2514,05	1656	1240,25	Tak Seragam	5,67	2,03	2,47
1,50	4943,88	3142,56	2070	1225,09	Tak Seragam	3,48	2,57	2,39
1,80	5796,27	3771,07	2484	1227,88	Seragam	2,46	3,07	2,33
2,10	6648,67	4399,58	2898	1238,15	Seragam	1,88	3,55	2,29
2,40	7501,06	5028,09	3312	1252,10	Seragam	1,51	4,02	2,26

Tebal *pile cap* sebesar 0,9 m meskipun menghasilkan distribusi beban yang sangat tidak seragam (CV > 10%) ternyata memiliki efisiensi yang paling tinggi, yang berarti penggunaan

tebal *pile cap* tersebut paling efisien dari sisi rasio kapasitas terhadap berat. Demikian pula dalam hal efektivitas, tebal *pile cap* sebesar 0,9 m memberikan nilai yang paling rendah, namun masih memenuhi persyaratan SNI 2847:19 karena nilai maksimum reaksi peletakannya ($V_u \max$) masih lebih rendah daripada kapasitas gesernya.

3.4. Pembahasan Hasil Simulasi Numerik Terkait Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa ketebalan *pile cap* yang tipis yaitu kurang dari 1 m, menyebabkan *pile cap* berperilaku lebih lentur (El Hammouli et al., 2021; Hammouli, 2019; Islam et al., 2018). Hasil yang sama diperoleh juga dalam kajian ini, yaitu *pile cap* dengan ketebalan tipis 0,9 m menunjukkan perilaku lentur dan distribusi beban yang tidak seragam. Meskipun berperilaku lentur, tebal *pile cap* sebesar 0,9 m masih efektif dan efisien untuk ditetapkan sebagai tebal *pile cap*.

Penelitian yang dilakukan Hammouli (2019) mengusulkan bahwa ketebalan *pile cap* di sekitar 1 m dapat dipilih untuk memperoleh kekakuan. Ternyata hasil metode elemen hingga untuk model *pile cap* dalam kajian ini, menunjukkan tebal *pile cap* sebesar 1,8 m adalah tebal minimum yang sudah memenuhi kriteria distribusi seragam, sedangkan 2,4 m memberikan tingkat keseragaman terbaik.

Pada struktur *pile cap* terjadi konsentrasi tegangan yang besar pertemuan pelat *pile cap* dengan dinding abutmen. Fenomena ini serupa dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya (Sedayu et al., 2019; Sukarman et al., 2019). Kajian ini juga memperlihatkan distribusi beban yang besar lokasinya berada pada satu garis vertikal yang sama dengan posisi dinding abutmen, serupa dengan penelitian yang dilakukan Sharma (2018).

3.5. Tinjauan Studi Kasus Pile Cap Kurang Tebal

Dalam kasus perencanaan Jembatan X di Pulau Seram ini, telah dilakukan pemilihan tebal *pile cap* yang relatif tipis yaitu 0,9 m, dengan pertimbangan kondisi lokasi konstruksi yang terpencil dan kemudahan pelaksanaan. Berdasarkan hasil *output* SAP2000 sebelumnya, *pile cap* yang memiliki tebal tipis akan berperilaku lentur sehingga distribusi beban ke tiang fondasi tidak sesuai dengan asumsi Persamaan 1. Oleh karena itu, dilakukan tinjauan ulang kapasitas daya dukung tiang fondasi terhadap beban yang diterima oleh masing-masing tiang fondasi.

Kapasitas daya dukung tiang fondasi telah diperoleh dalam analisis terpisah yaitu sebesar 1400 kN per tiang. Angka tersebut diperoleh berdasarkan parameter tanah hasil penyelidikan geoteknik serta memiliki faktor keamanan sebesar 3. Awalnya dengan mengasumsikan *pile cap* berperilaku *rigid* maka akan diperoleh besarnya beban yang terdistribusi ke tiang-tiang fondasi secara seragam adalah 1103,81 kN, sehingga beban yang bekerja pada tiap tiang masih lebih kecil

(dianggap aman) dibandingkan kapasitas daya dukung tiang. Setelah dilakukan analisis dengan SAP2000 ternyata terdapat tiang fondasi yang menerima beban lebih besar daripada 1103,81 kN (yaitu sebesar 1307,91 kN), sebagai dampak *pile cap* berperilaku lentur. Namun karena nilainya masih di bawah 1400 kN (daya dukung 1 tiang), maka konstruksi jembatan masih dapat dikatakan dalam kondisi aman. Ilustrasi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Distribusi Beban dan Daya Dukung (kN) pada Tiang Fondasi untuk *Pile Cap* Tebal 0,9 m

No. Tiang Fondasi	Output SAP2000 (Lentur)			Asumsi Kaku	Daya Dukung	Keterangan
	Baris 1	Baris 2	Baris 3			
1	1034,65					Seluruh beban pada tiang baris 1 masih lebih kecil daripada 1103,81 dan masih lebih kecil daripada daya dukung tiang 1400, dapat dikatakan masih aman.
2	1022,22					
3	1010,88					
4	1002,46			1103,81	1400	
5	1002,46					
6	1010,88					
7	1022,22					
8	1034,65					
9		1307,91				Seluruh beban pada tiang baris 2 lebih besar daripada 1103,81 (dampak perilaku lentur), namun masih lebih kecil daripada daya dukung tiang, sehingga masih aman.
10		1285,71				
11		1263,25				
12		1248,40		1103,81	1400	
13		1248,40				
14		1263,25				
15		1285,71				
16		1307,91				
17			1034,65			Seluruh beban pada tiang baris 3 masih lebih kecil daripada 1103,81 dan masih lebih kecil daripada daya dukung tiang 1400, dapat dikatakan masih aman.
18			1022,22			
19			1010,88			
20			1002,46	1103,81	1400	
21			1002,46			
22			1010,88			
23			1022,22			
24			1034,65			

Meskipun masih dikatakan aman, sempat dilakukan pembahasan untuk meningkatkan kekakuan *pile cap* yang ketebalan dianggap masih kurang tersebut. Solusi yang dilakukan adalah dengan menambahkan balok baja WF yang mengikat seluruh kepala tiang pancang. Balok baja WF tersebut selain berfungsi menambah kapasitas lateral tiang fondasi juga berfungsi menambah kekakuan *pile cap*. Analisis pengaruh penambahan balok WF tersebut dilakukan dalam tinjauan tersendiri. Kondisi fisik pelaksanaan konstruksi *pile cap* dengan balok baja WF di lapangan dapat dilihat pada Gambar 11. Jembatan X dinyatakan aman dan layak fungsi setelah lulus dalam uji pembebanan seperti Gambar 12. Dalam pengujian tersebut, jembatan dibebani langsung sebesar 70% dari beban hidup, atau setara dengan 18 truk bermuatan penuh. Hasil uji pembebanan memperlihatkan fondasi kuat dan aman karena sama sekali tidak dijumpai adanya pergerakan

vertikal dari abutmen. Temuan uji beban lapangan mendukung bahwa sistem fondasi secara keseluruhan tetap berkinerja aman, meskipun tidak secara langsung memverifikasi distribusi beban antar tiang yang diperoleh dari model numerik.



Gambar 13. Konstruksi Baja WF pada *Pile Cap*
Sumber : (BPJN Provinsi Maluku, 2021)



Gambar 14. Uji Pembebanan Jembatan X di Pulau Seram Provinsi Maluku
Sumber : (BPJN Provinsi Maluku, 2021)

4. SIMPULAN

Berdasarkan analisis metode elemen hingga dengan menggunakan *software* SAP2000 dapat diperoleh beberapa simpulan dari kajian ini, antara lain:

- Tebal *pile cap* yang relatif tipis menyebabkan distribusi beban pada tiang fondasi menjadi tidak seragam karena *pile cap* berperilaku lentur. Sebaliknya, *pile cap* yang cukup tebal akan mendistribusikan beban secara seragam karena *pile cap* berperilaku kaku.
- Model *pile cap* berukuran 5 m x 11,5 m dengan tebal sebesar 1,8 m sudah dapat dikatakan kaku sehingga dapat mendistribusikan beban ke 24 titik tiang fondasi secara seragam.
- Penggunaan tebal *pile cap* sebesar 0,9 m yang dinyatakan berperilaku lentur, masih dapat dipertimbangkan untuk kondisi pembebanan gravitasi yang dikaji dalam penelitian ini, selama kapasitas tiap tiang dan kapasitas geser *pile cap* telah diverifikasi masih memenuhi persyaratan SNI 2847:2019, serta telah ditinjau ulang kapasitas tiap tiang dalam memikul beban yang tidak seragam tersebut.
- Pada struktur *pile cap* yang berperilaku lentur terjadi konsentrasi tegangan yang besar pada pertemuan pelat *pile cap* dengan dinding abutmen, sedangkan *pile cap* yang berperilaku kaku akan menghasilkan distribusi tegangan yang relatif seragam.
- Semakin tebal *pile cap* akan dapat mendistribusikan beban ke tiang fondasi secara efektif, namun dapat menurunkan nilai efisiensi.
- Pada kasus *pile cap* yang mengikat 3 baris tiang fondasi, maka baris tengah akan menerima beban yang lebih besar daripada baris tepi. Perencana wajib mempertimbangkan pula pengaruh ketidakteraturan beban pada tiang fondasi apabila memilih ketebalan *pile cap* relatif tipis.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Universitas Komputer Indonesia, karena kajian ini didanai oleh Direktorat Penelitian, Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat Universitas Komputer Indonesia dengan Surat Perjanjian No. 043/SP/DP3M/UNIKOM/XII/2024. Artikel ini merupakan bagian dari luaran seperti yang dinyatakan dalam surat perjanjian tersebut. Penulis mengucapkan terima kasih pula kepada rekan-rekan dari Balai Pelaksana Jalan Nasional Provinsi Maluku yang telah memberikan data, wawasan dan keahlian yang sangat membantu kajian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Asaad, Z. (2024). *Designing Pile Caps According to ACI318-19*.
Bina Marga 06/SE/Db. (2021). *Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan (02 M BM 2021)*.
Bina Marga 16.1/SE/Db. (2020). *Spesifikasi Umum 2018 untuk Pekerjaan Konstruksi Jalan dan Jembatan (Revisi 2)*.
Computer & Structures, I. (2016). *CSI Analysis Reference Manual SAP2000 Version 19*.
Computer & Structures, Inc. www.csiamerica.com
Das, B. M., & Sivakugan, N. (2019). *Principles of Foundation Engineering* (Ninth Edition).
Cengage.

- El Hammouli, S., Hanna, A., Lin, L., & Khalifa, M. (2021). Role of Cap Thickness in Pile-Cap Foundation. *International Journal of Civil Infrastructure*.
<https://doi.org/10.11159/ijci.2021.013>
- Hammouli, S. El. (2019). *Performance of Pile Cap Foundation with Respect to Cap Rigidity*. Concordia University.
- Hima Bindu, K., Dey, N., & Raghavendra Rao, C. (2020). *Coefficient of Variation and Machine Learning Applications*.
- Islam, S., M Golam Rabbany, A. B., & Hasan-Uz-Zaman, M. (2018). Pile Cap Performances in Different Consequences. *Architecture Research*, 8(2), 51–61.
<https://doi.org/10.5923/j.arch.20180802.02>
- Sedayu, M. A., Sulisty, D., & Aminullah, D. A. (2019). Eksperimen Pada Struktur Pile Cap Tiga Tiang Dengan Metode Strut And Tie Model. *INERSIA*, 15, 31–43.
<https://doi.org/doi:10.21831/inersia.v15i2.28619>
- Setiyarto, Y. D. (2017). Standar Pembebanan Pada Jembatan Menurut SNI 1725 2016. *Prosiding SAINTIKS 2017*.
- Sharma, M. (2018). Effect of Pile Layout and Pile Cap Thickness on Load Distribution in Piles. *Recent Advances in Structural Engineering, Volume 1. Lecture Notes in Civil Engineering, Vol 11*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-13-0362-3_3
- SNI 1725:2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*.
- Sukarman, Sulisty, D., & Septhia Irawati, I. (2019). Analisis Regangan Baja Tulangan Pada Struktur Pile Cap Empat Tiang Metode Strut and Tie Model. *INERSIA*, XV.
<https://doi.org/10.21831/inersia.v15i2.28624>
- Zhang, Q., Zhao, J., Xie, J., Ge, Y., & Wang, C. (2024). Research On Rigid Cap Thickness Of Pile Foundation For Overhead Transmission Line Cap. *International Conference on Civil Architecture and Structural Engineering (ICCASE 2024)*, 152–164.
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-449-5_15