

## **PERILAKU STRUKTUR *PILE CAP* 3 TIANG DENGAN BEBAN EKSENTRIS YANG DIRANCANG MENGGUNAKAN *STRUT AND TIE MODEL* DENGAN METODE NUMERIK**

### ***STRUCTURAL BEHAVIOR OF PILE CAP 3 PILE WITH EKSENTRIC LOAD DESIGNED USING STRUT AND TIE MODEL WITH NUMERICAL METHOD***

**Panji Ginaya Taufik<sup>1</sup>, Djoko Sulisty<sup>2</sup>, Akhmad Aminullah<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Program Studi S2 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM Yogyakarta 55281  
email: panji.ginaya.t@mail.ugm.ac.id

#### **Abstract**

*Pile cap is a structure to distribute load from the upper structure to the sub structure. Often the planning of the pile cap is approached as a two way slab or beam with pile as restrain, by consider the bending and shear separately. As is the case with conventional methods that consider 1-way shear, 2-way shear, and bending separately. The strut and tie model can be used as an alternative method in designing a pile cap, by approaching the stress trajectory with the truss model. In this study, a pile cap will be designed using the conventional method and the strut and tie model, the pile cap with 3 pile cap and an eccentric load. Then the results are tested numerically using Abaqus to determine the difference in behavior. The main reinforcement results from the strut and tie model method are more evenly stressed than the conventional method, also the vertical load needed to achieve the main reinforcement yield stress strut and tie model (1100 kN) is greater than the conventional method (900 kN).*

**Keyword:** *Strut and tie model; Pile cap; Eccentric load; Abaqus.*

#### **Abstrak**

*Pile cap merupakan struktur yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas ke struktur bawah. Seringkali perencanaan pile cap didekati sebagai two way slab atau beam dengan pile sebagai tumpuannya, dengan meninjau lentur dan geser secara terpisah. Seperti halnya pada metode konvensional yang meninjau geser 1 arah, geser 2 arah, dan lentur secara terpisah. Strut and tie model dapat digunakan sebagai metode alternatif dalam perancangan pile cap, dengan mendekati trayektori tegangan dengan model rangka batang. Pada penelitian ini akan dirancang pile cap menggunakan metode konvensional dan strut and tie model, pile cap yang ditinjau merupakan pile cap 3 tiang dengan beban eksentrik. Kemudian hasilnya diuji secara numerik menggunakan Abaqus untuk mengetahui perbedaannya. Tulangan utama hasil metode strut and tie model mengalami tegangan lebih merata dari pada hasil metode konvensional, juga beban vertikal yang dibutuhkan untuk mencapai tegangan leleh tulangan utama metode strut and tie model (1100 kN) lebih besar dari pada metode konvensional (900 kN).*

**Kata kunci:** *Strut and tie model; Pile cap; Beban eksentris; Abaqus.*

## **PENDAHULUAN**

*Pile cap* merupakan struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari kolom ke tiang, seterusnya akan disalurkan ke tanah melalui kekuatan gesek/lekat dan ujung tiang. Struktur ini merupakan bagian yang vital, namun belum ada peraturan yang menjelaskan kekuatan dan prilakunya secara tuntas. Seringkali perencanaan *pile cap* didekati sebagai *two way slab* atau *beam*

dengan *pile* sebagai tumpuannya, dengan meninjau lentur dan geser secara terpisah.

Perancangan metode konvensional didasarkan pada retak yang ditimbulkan oleh beban geser 1 arah, geser 2 arah, dan lentur pada penampang *pile cap*. Tulangan dirancang sedemikian rupa sehingga dapat mengatasi retak akibat lentur. Luas penampang dirancang agar menghasilkan kapasitas geser yang lebih besar atau sama dengan bebannya.

*Strut and tie model* dapat digunakan sebagai metode alternatif dalam perancangan *pile cap*, dengan mendekati trayektori tegangan dengan model rangka batang. Metode ini didasarkan pada teori plastis, sehingga struktur dimodelkan telah melampaui batas elastisnya dan terbentuk sistem rangka yang terdiri *strut* sebagai batang tekan dan *tie* sebagai batang tarik (Hardjasaputra, 2016). Tulangan dirancang untuk menghasilkan kapasitas aksial lebih besar atau sama dengan bebannya.

Struktur dapat dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu *B-region* dan *D-region*. *B-region* merupakan bagian yang memiliki distribusi tegangan linear dan bisa diterapkan teori lentur klasik. Sedangkan *D-region* bagian yang mengalami konsentrasi tegangan sehingga distribusi regangan menjadi nonlinear. *D-region* terdapat pada bagian yang ditempati beban terpusat dan bagian yang mengalami perubahan geometri, seperti bagain yang berlubang dan perubahan penampang mendadak (Hardjosaputra, 2002).

*Pile cap* mengalami konsentrasi tegangan karena kolom dan tiang menimbulkan beban terpusat pada *pile cap*. Selain itu, terjadi perubahan penampang mendadak pada bidang pertemuan kolom, *pile cap*, dan tiang, sehingga konsep Bernoulli tidak cocok, maka struktur harus didasarkan pada teori plastis. Pada penelitian ini dirancang *pile cap* yang menerima beban eksentrik yang menerapkan metode konvensional dan metode *strut and tie model* dalam perancangan beton dan tulangnya, kemudian hasilnya diuji secara numerik dengan Abaqus.

Rumusan masalahnya adalah mengetahui perbedaan perilaku *pile cap* yang dirancang menggunakan metode *strut and tie model* dibandingkan dengan metode konvensional. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui efektifitas tulaंगा dilihat dari aspek penyebaran tegangan, besarnya tegangan yang terjadi ketika beban rencana, dan besarnya beban maksimal.

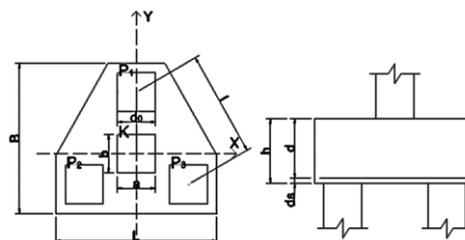
## METODE PENELITIAN

### Penentuan Dimensi Pile Cap

Perencanaan *pile cap* diawali dengan penentuan dimensi, dimensi yang ditentukan adalah lebar tiang ( $d_0$ ), panjang penampang kolom ( $b$ ), lebar penampang kolom ( $a$ ), jarak

antar tiang ( $l$ ), jarak tiang ke muka luar ( $q$ ), tebal *pile cap* ( $h$ ), selimut beton ( $d_s$ ), tebal efektif ( $d$ ), lebar ( $L$ ), dan panjang ( $B$ ). Penggunaan simbol untuk dimensi *pile cap* ditunjukkan pada

Gambar 1. Setelah dimensi ditetapkan, kapasitas lentur, geser, tarik, dan desak diperiksa ketahanannya.



Gambar 1. Simbol dimensi *pile cap*

Lebar tiang ( $d_0$ ), panjang penampang kolom ( $b$ ), dan lebar penampang kolom ( $a$ ) ditetapkan berdasarkan dimensi struktur eksisting, nilai-nilainya adalah sebagai berikut.

- Lebar tiang (tiang sama sisi),  
 $d_0 = 400,00$  mm
- Panjang penampang kolom,  
 $b = 600,00$  mm
- Lebar penampang kolom,  
 $a = 600,00$  mm

Penentuan jarak antar tiang ditentukan berdasarkan Fellenius (2006) dan Teng (1962). Menurut Fellenius (2006) jarak antar tiang minimum bisa ditentukan berdasarkan kedalaman penetrasi tiang. Sedangkan menurut Teng (1962) jarak antar tiang minimum bisa ditentukan berdasarkan jenis tiang dan jenis tanah. Pada akhirnya ditentukan jarak tiang 1040 mm. Penentuan jarak antar tiang adalah sebagai berikut.

Jarak antar tiang minimum,  $l$  (Fellenius, 2006).

- Kedalaman penetrasi tiang,  
 $H = 9000,00$  mm
- Jarak minimum sumbu tiang,  
 $l = 2,5d_0 + 0,02H = 1180,00$  mm

Jarak antar tiang minimum,  $l$  (Teng, 1962).

- Tanah dukung ujung pada lapisan keras,  
750 mm atau: 800,00 mm sd 1000,00 mm.
- Tiang dukung ujung pada batuan keras, 600 mm atau: 800,00 mm.
- Tiang dukung gesek, 1050 mm atau 1200,00 mm sd 2000,00 mm.

Jarak antar tiang yang digunakan,  $l = 1040,00$  mm.

Tabel 1. Koordinat kolom dan tiang

Kode	x (mm)	y (mm)
K	0,00	0,00
P1	0,00	600,44
P2	-520,00	-300,22
P3	520,00	-300,22

Jarak antar tiang telah ditentukan, lalu posisi kolom ditetapkan di koordinat pusat (0,0). Maka koordinat tiang-tiang bisa diketahui, koordinat tiang ditunjukkan pada Tabel 1. Sementara properti material beton dan baja yang digunakan terdapat pada Tabel 2. Kemudian jarak tiang ke muka luar (q), tebal *pile cap* (h), selimut beton ( $d_s$ ), tebal efektif (d), lebar (L), dan panjang (B) ditentukan sebagai berikut.

- Jarak tiang ke muka (Hardiyatmo, 2010),  $q = 150,00$  mm
- Tebal *pile cap* (SNI, 2013) ( $\geq 300$  mm),  $h = 450,00$
- Selimut beton (SNI, 2013) ( $\geq 50$  mm),  $d_s = 50,00$  mm
- Tebal efektif *pile cap* sumbu x,  $d_x = h - (d_s + \phi_x/2) = 393,50$  mm
- Tebal efektif *pile cap* sumbu y,  $d_y = h - (d_s + \phi_x + \phi_y/2) = 380,50$  mm
- Lebar *pile cap*,  $L = d_0 + l + 2q = 1740,00$  mm
- Panjang *pile cap*,  $B = d_0 + \sqrt{(l^2 - (l/2)^2) + 2q} = 1600,67$  mm
- Faktor modifikasi beton,  $\lambda = 1,00$  mm

Tabel 2. Properti material

Properti material	Nilai
Berat beton ( $w_c$ )	24,00 kN/m <sup>3</sup>
Berat baja ( $w_s$ )	78,50 kN/m <sup>3</sup>
Kuat tekan beton (K)	325,00
Kuat tekan beton ( $f_c'$ )	27,50 MPa
Tegangan leleh baja ( $f_y$ )	400,00 MPa
MOE beton ( $E_c$ )	24645,87 MPa
MOE baja ( $E_s$ )	200000,00 MPa

### Perencanaan Tulangan *Pile Cap* Metode *Strut and Tie Model*

#### Konsep perhitungan

Berdasarkan SNI 2847:2013, desain *strut*, *tie*, dan *nodal* harus berdasarkan Persamaan 1,

kapasitas tereduksi harus lebih besar dari pada bebannya.

$$\Phi F_n \geq F_u \quad (1)$$

Keterangan:

$F_u$  : gaya terfaktor yang bekerja dalam *strut*, *tie*, atau *nodal*

$F_n$  : kekuatan nominal *strut*, *tie*, atau *nodal*

$\Phi$  : faktor reduksi (0,75 untuk *strut*, *tie*, atau *nodal*)

Kekuatan tekan *strut* tanpa tulangan longitudinal ( $F_{ns}$ ) harus diambil sebagai nilai yang lebih kecil dari Persamaan 2.

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} \quad (2)$$

Keterangan:

$A_{cs}$  : luas penampang pada satu ujung *strut*

$f_{ce}$  : nilai terkecil dari kekuatan tekan efektif beton pada *strut* dan kekuatan tekan efektif beton pada daerah nodal

Kekuatan nominal pengikat,  $F_{nt}$  ditentukan berdasarkan Persamaan 3.

$$F_{nt} = A_{ts} f_y + A_{tp} (f_{se} + \Delta f_p) \quad (3)$$

Keterangan:

$A_{ts}$  : luas tulangan nonprategang

$f_y$  : tegangan leleh tulangan nonprategang

$A_{tp}$  : luas tulangan prategang

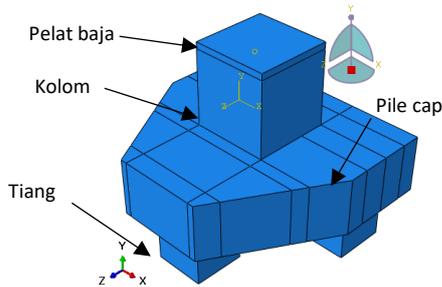
$f_{se}$  : tegangan efektif tulangan prategang

$\Delta f_p$  : tulangan prategang dengan lekatan nilainya 420 MPa dan tulangan prategang tanpa lekatan nilainya 70 MPa

#### Penentuan *Strut and Tie Model*

Penentuan bentuk *strut and tie model* umumnya didasarkan pada trayektori tegangan yang menggunakan teori elastik dengan struktur tanpa retak (Hardjasaputra, 2016). Namun untuk mendapatkan trayektori tegangan yang jelas tidaklah mudah. Sehingga pada penelitian ini, penentuan *strut and tie model* tidak langsung menggunakan trayektori tegangan. Namun menggunakan optimalisasi geometri dengan bantuan Abaqus, dengan penempatan beban disimpangkan ke arah sumbu Z Abaqus sebesar  $e = M/V$  dari pusat kolom. Selain berupa *pile cap*, model juga dilengkapi dengan pelat baja, agar beban yang disalurkan tidak menghasilkan konsentrasi tegangan yang besar

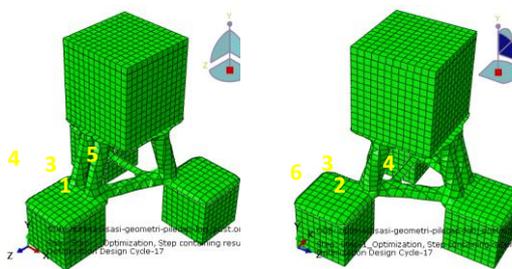
pada kolom beton. Bagian-bagian yang dimodelkan pada Abaqus ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Model *pile cap*

Dengan menggunakan Abaqus, didapatkan bentuk optimasi geometri *pile cap (strut and tie model)* yang ditunjukkan pada

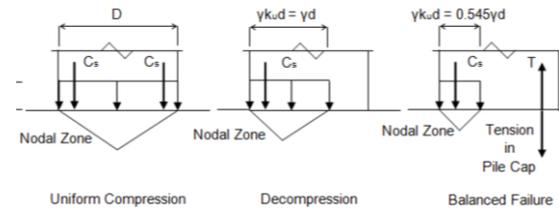
Gambar 3. Bentuk rangka batang tersebut mempertimbangkan energi tegangan, bentuk, dan volume agar seefektif mungkin. Bentuk yang didapat memiliki dimensi elemen yang berbeda, elemen 4 lebih besar dari elemen 5 dan 6. Sementara elemen 3 lebih kecil dari elemen 1 dan 2. Hal tersebut terjadi karena terdapat eksentrisitas beban vertikal sebesar  $e$  ke arah sumbu Z Abaqus. Sehingga elemen 4 menjadi lebih besar (gaya normal lebih besar) dari elemen 5 dan 6 juga elemen 3 menjadi lebih kecil (gaya normal lebih kecil) dari elemen 1 dan 2. Hal tersebut juga dapat dibuktikan dengan analisis struktur SAP2000.



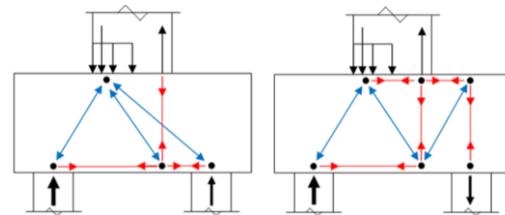
Gambar 3. Model rangka hasil optimasi geometri *pile cap*

Gambar 4 menunjukkan bahwa penambahan beban kolom dan momen akan menyebabkan tegangan yang lebih besar pada *pile cap*. Momen meningkatkan tegangan dengan merubah geometri model rangka (Buswell, 2013). Pada penelitian ini, momen yang terbentuk akibat simpangan beban sebesar  $e$  menyebabkan *decompression* pada kolom

(Gambar 4), terbentuk desak pada kolom tanpa adanya tarik. Karena momen yang terjadi tidak cukup besar untuk menghasilkan *balance failure* pada kolom. Sehingga geometri model rangka seperti pada Gambar 5 pun tidak terbentuk. (Nori & Tharval, 2007).



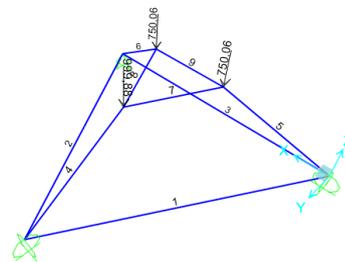
Gambar 4. Profil tegangan kolom.  
(Sumber: Buswell, 2013)



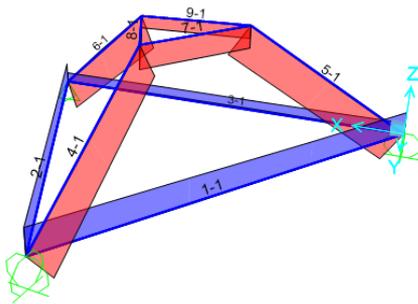
Gambar 5. Geometri model rangka *pile cap* dengan beban momen  
(Sumber: Buswell, 2013)

#### Analisis Gaya Dalam

Bentuk *strut and tie model* telah diperoleh dari optimalisasi geometri pada Abaqus, kemudian dari model tersebut dibentuk rangka batang menggunakan SAP2000. Besarnya beban total yang diterapkan pada rangka batang adalah 2500 kN. Kemudian dengan perbandingan, beban total dibagi pada 3 *joint* yang besarnya tergantung lokasi *joint*. *Joint* yang dekat beban vertikal eksentris besarnya 999,877 kN dan *joint* lain besarnya 750,062 kN, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Penerapan beban pada *joint*



Gambar 7. Normal force diagram

Tabel 3. Gaya normal

Elemen	Tipe	$F_u$ (kN)
1	Tie	856,47
2	Tie	856,47
3	Tie	425,06
4	Strut	1790,66
5	Strut	1323,79
6	Strut	1323,79
7	Strut	825,65
8	Strut	825,65
9	Strut	490,82

Berdasarkan analisis struktur dengan menggunakan SAP2000, didapatkan hasil *normal force diagram* pada

Gambar 7 dan nilainya ditunjukkan pada Tabel 3. Besarnya gaya normal elemen 4 lebih besar dari pada elemen 5 dan 6, sementara gaya normal elemen 3 lebih kecil dari pada elemen 1 dan 2. Hal tersebut terjadi karena adanya eksentrisitas beban vertikal pada kolom yang diekivalenkan dengan beban *joint*.

**Perencanaan Penulangan**

Gaya normal pada model rangka batang telah didapatkan menggunakan SAP2000 pada Tabel 3. Kemudian gaya-gaya tersebut digunakan untuk merancang *strut* dan *tie*. Berdasarkan perhitungan, *strut* berupa beton dan *tie* berupa baja telah mampu mengakomodasi gaya pada Tabel 3. Sementara kebutuhan *tie* (baja tulangan) pada elemen 1, 2, dan 3 ditunjukkan pada Tabel 4. Jumlah tulangan baja tiap elemen disesuaikan dengan besarnya gaya normal. *Tie* elemen 3 memiliki gaya normal lebih kecil dari pada elemen 1 dan 2. Sehingga elemen 3 dibutuhkan 6D16, sementara elemen 1 dan 2 dibutuhkan 11D16.

Tabel 4. Tulangan metode *strut and tie model*

Elemen	n	D (mm)
1	11	16
2	11	16
3	6	16

**Perencanaan Tulangan Pile Cap Metode Konvensional**

Berbeda dengan metode *strut and tie model*, pada metode konvensional jumlah tulangan dihitung berdasarkan momen lentur yang terjadi. Momen lentur dibagi menjadi momen lentur sumbu X dan Y. Eksentrisitas beban berada pada arah sumbu Y SAP2000, maka tulangan yang diperlukan lebih banyak dari pada sumbu X seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Sumbu Y diperlukan 11D16 dan sumbu X diperlukan 6D16.

Tabel 5. Tulangan metode konvensional

Sumbu	n	D (mm)
X	6	16
Y	11	16

Sementara gaya geser digunakan untuk menentukan tinggi *pile cap* yang diperlukan, gaya geser diperiksa terhadap kapasitas geser 1 arah dan 2 arah.

Jumlah tulangan yang dihasilkan metode *strut and tie model* lebih banyak dari pada metode konvensional, hal tersebut sesuai dengan kesimpulan Nori (2007). Nori (2007) menyatakan bahwa metode *strut and tie model* menghasilkan lebih banyak tulangan dari pada teori balok (konvensional).

**Pemodelan Benda Uji**

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian utama yang meninjau *pile cap* yang diuji secara numerik dan eksperimental. Peralatana uji eksperimental hanya mampu mengakomodasi beban < 600 kN, padahal beban rencana 2500 kN. Maka dilakukan pemodelan pada benda uji untuk uji eksperimental. Supaya tulangan dan dimensi *pile cap* konsisten, benda uji numerik pun dimodelkan.

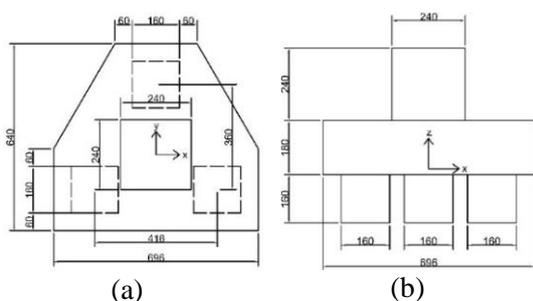
*Pile cap* prototipe dimodelkan menggunakan Teori *Buckingham*, agar ukuran model dapat ekuivalen dengan prototipenya. Konsep dari Teori *Buckingham* adalah setiap persamaan yang dimensinya homogin yang melibatkan

besaran-besaran fisik tertentu dapat direduksi menjadi suatu persamaan ekuivalen yang melibatkan satu set lengkap produk-produk tak berdimensi (Suhendro, 2000).

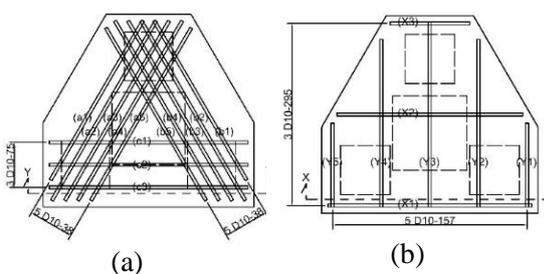
Tabel 6. Pemodelan tulangan utama

	Parameter	Prototip	Model
KON	Tulangan sumbu X	6D16	3D10
	Tulangan sumbu Y	11D16	5D10
STM	Tulangan elemen 1	11D16	5D10
	Tulangan elemen 2	11D16	5D10
	Tulangan elemen 3	6D16	3D10

Teori *Buckingham* untuk berbagai parameter yang ditinjau menghasilkan persamaan-persamaan untuk menghitung model ekuivalen. Dengan menetapkan  $S_1 = 2,5$  dan  $S_{Ec} = 1$ , didapatkan ukuran berbagai parameter yang ditinjau. Parameter yang dimodelkan berupa gaya vertikal (beban rencana), dimensi-dimensi *pile cap*, dan properti penampang. Pada Tabel 6 ditunjukkan hasil pemodelan tulangan utama metode konvensional dan tulangan metode *strut and tie model*.



Gambar 8. Tampak model: (a) bawah; (b) depan

Gambar 9. Tulangan model: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional

Kemudian gambar detail dibuat agar mempermudah pembuatan model. Gambar-gambar yang dibuat terdiri dari gambar tampak

dan detail tulangan, gambar-gambar tersebut ditunjukkan

Gambar 8 dan Gambar 9.

### Perencanaan Tulangan Susut, Kolom, dan Tiang

Tulangan susut dan suhu diperlukan untuk menghindari terjadinya retak-retak akibat terjadinya susut pada beton, sehingga kualitas beton dapat tetap terjaga. Tulangan susut dipasang pada bagian atas dan samping *pile cap*. Sementara pada kolom dan tiang dipasang tulangan longitudinal dan tulangan transversal (sengkang). Diameter tulangan yang digunakan pada *pile cap*, kolom, dan tiang ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Diameter tulangan susut, kolom, tiang

Tipe	D atau $\emptyset$ (mm)
Susut dan suhu ( <i>pile cap</i> )	8,00
Longitudinal (kolom dan tiang)	10,00
Transversal (kolom dan tiang)	6,00

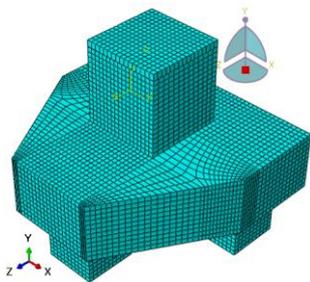
### Pengujian Secara Numerik

Dimensi dan properti material yang telah dimodelkan secara skalatis diterapkan pada Abaqus. Model tersebut tersusun dari elemen beton berupa *solid shape* dan tulangan berupa *wire shape*. Tahapan pemodelan dengan Abaqus adalah sebagai berikut.

- Membuat bagian-bagian model seperti *pile cap*, tulangan, kolom, tiang, dan pelat kolom menggunakan *module – part*. *Base feature* yang digunakan untuk tulangan adalah *wire*, sedangkan beton dan pelat baja digunakan *solid*.
- Menerapkan properti material beton dan baja melalui *module – property – create material*, *material behavior* yang digunakan untuk beton adalah *density*, *elastic*, dan *concrete damaged plasticity*. Sementara *material behavior* yang digunakan untuk baja adalah *density*, *elastic*, dan *plastic*. Kemudian pilih *create section* lalu *assign section* untuk membuat dan menerapkan penampang, sehingga setiap bagian yang telah dibuat memiliki properti material.
- Berdasarkan gambar detail, semua bagian disusun sehingga membentuk *pile cap* yang terdiri dari 3 tiang, kolom, dan bagian

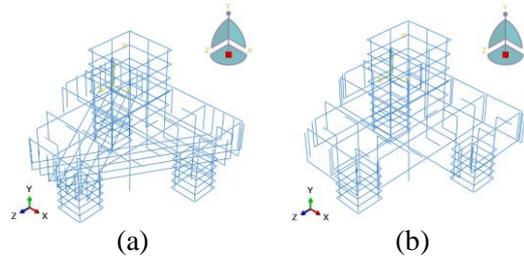
pelengkap lain. Selain itu, tulangan disusun sesuai fungsinya (tulangan utama, sengkang, dll), seperti ditunjukkan pada

- Gambar 11 sampai
- Gambar 14, untuk tulangan metode *strut and tie model* pada Gambar a sedangkan tulangan metode konvensional pada Gambar b. Gambar-gambar tersebut menunjukkan susunan tulangan sesuai sudut pandang yang digunakan.
- Membuat *step* dengan memilih *module – step – create step*, kemudian ditentukan *procedure type* berupa *static general*. Setelah itu *incrementation*-nya dipilih *automatic* dengan jumlah maksimum 100.
- Membuat interaksi antar baja tulangan dan beton dengan memilih *module – interaction – create constrain* kemudian pilih *embdedded region*. Sementara antara beton dengan plat agar terjadi interaksi dipilih *tie*.
- Menerapkan beban dengan memilih *module – load – create load*, beban yang diterapkan adalah beban yang telah diskala yaitu 400.000 N, beban tersebut disimpangkan sebesar 24 mm ke arah sumbu Z Abaqus. Kemudian untuk membuat tumpuan, dipilih *module – load – create boundary condition*.
- Membuat *mesh* dengan memilih *module – mesh*, ukuran *mesh* yang digunakan adalah 15 mm, *mesh* dibuat pada beton dan tulangan baja. Hasil *mesh* terhadap *pile cap* ditunjukkan pada Gambar 10.

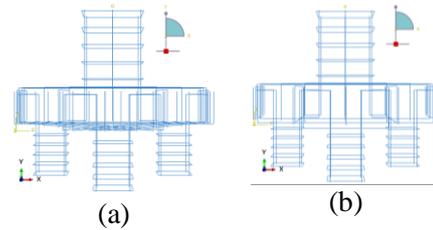


Gambar 10. Mesh pada *pile cap*

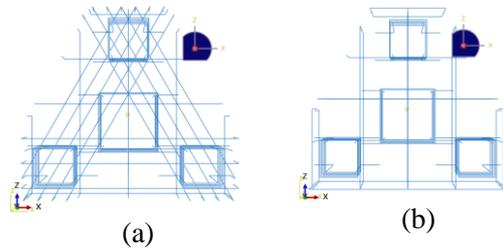
- Melakukan analisis dengan terlebih dahulu memilih *module – create job*, kemudian pilih submit untuk memulai melakukan analisis.



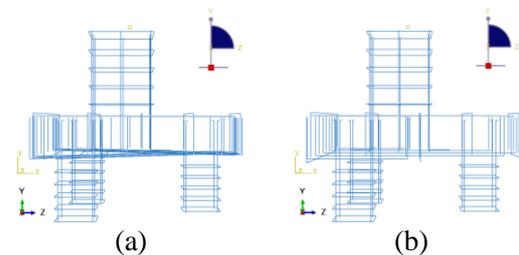
Gambar 11. Pemodelan tulangan dengan Abaqus (*iso view*): (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



Gambar 12. Pemodelan tulangan dengan Abaqus (*front view*): (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



Gambar 13. Pemodelan tulangan dengan Abaqus (*bottom view*): (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



Gambar 14. Pemodelan tulangan dengan Abaqus (*left view*): (a) *strut and tie model*; (b) konvensional

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tulangan utama yang direncanakan menggunakan metode *strut and tie model* dan metode konvensional menghasilkan pola

pemasangan tulangan utama yang berbeda. Pada metode konvensional, tulangan utama disebar merata selebar penampang *pile cap*. Sedangkan pada metode *strut and tie model*, tulangan utama diletakan sejajar dengan batang tarik pada model rangka batang. Perbedaan tersebut menghasilkan perilaku yang berbeda pada struktur, khususnya pada tegangan tulangan utama. Berdasarkan analisis numerik menggunakan Abaqus, dapat dihasilkan beberapa kesimpulan terkait distribusi tegangan dan beban maksimum, terjadi perbedaan yang signifikan diantara metode-metode yang ditinjau.

Setelah *pile cap* dimodelkan dan didapatkan hasil analisisnya, tegangan pada tulangan utama dapat diketahui. Tulangan utama metode *strut and tie model* dan metode konvensional menghasilkan distribusi tegangan yang berbeda. Pada metode *strut and tie model* tegangan terdistribusi merata pada semua tulangan utama. Sedangkan pada metode konvensional tegangan tidak terdistribusi merata pada semua tulangan utama. Perbedaan lain juga dapat dilihat dari bentuk grafik hubungan tegangan dengan panjang tulangan. Selain tegangannya, beban yang dapat melelehkan tulangan utama pun berbeda.

Perbedaan-perbedaan antara metode *strut and tie model* dengan metode konvensional tersebut dijelaskan sebagai berikut.

### Distribusi tegangan

Berdasarkan hasil analisis numerik didapatkan distribusi tegangan yang berbeda antara metode *strut and tie model* dengan metode konvensional. Pada metode *strut and tie model* tegangan relatif merata pada semua tulangan utama (

Gambar 15), ketika beban rencana 400 kN semua tulangan utama mengalami tegangan maksimum di tengah tulangan sekitar 46 MPa (merah) dan tegangan berangsur-angsur mengecil (menjadi kuning, hijau, lalu biru) ke arah ujung tulangan menjadi 0 MPa. Jika ditinjau grafik hubungan tegangan (S) dengan jarak pada tulangan (d), semua tulangan utama (a,b, dan c) menghasilkan grafik yang nilai maksimumnya di tengah dan berangsur-angsur mengecil ke ujung, seperti ditunjukkan

Gambar 16 dan

Gambar 17.

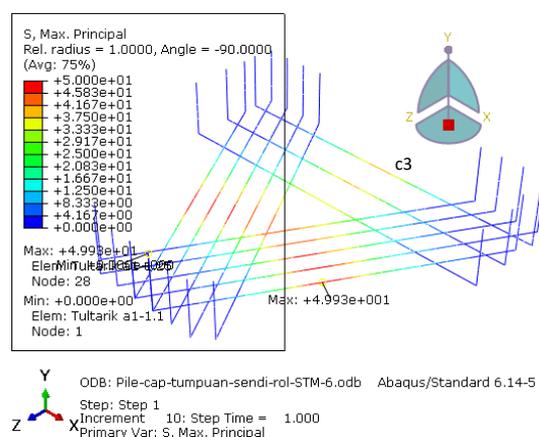
Dengan merubah *View* pada

Gambar 3 menjadi *view* sumbu XZ pada Gambar 18, didapat gambar yang menunjukkan batang bawah pada model rangka batang. Batang-batang tersebut menghubungkan tiap pangkal kolom sambil menahan gaya tarik ketika dibebani gaya vertikal pada kolom. Pada metode *strut and tie model* tulangan utama dipasang sejajar dengan batang-batang tarik tersebut, seperti diilustrasikan

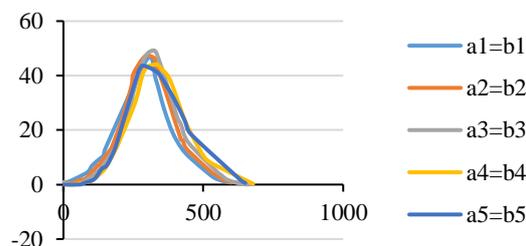
Gambar 18. Ketika dibebani gaya vertikal pada kolom, tulangan-tulangan tersebut mengalami tegangan tarik, komulatif dari tegangan tarik tersebut semakin ke tengah semakin besar. Sehingga menghasilkan tegangan (S) yang berangsur-angsur bertambah ke tengah tulangan, seperti ditunjukkan

Gambar 16 dan

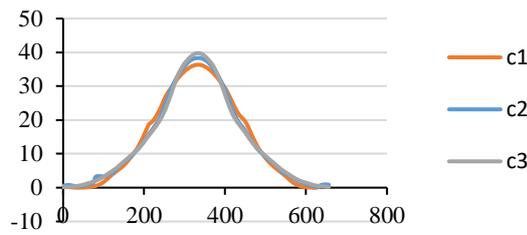
Gambar 17.



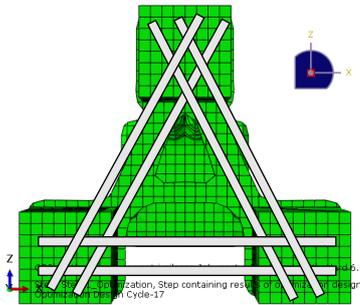
Gambar 15. Kontur tegangan pada tulangan utama metode *strut and tie model* ( $P = 400$  kN)



Gambar 16. Hubungan tegangan dengan jarak pada tulangan a dan b ( $P = 400$  kN)

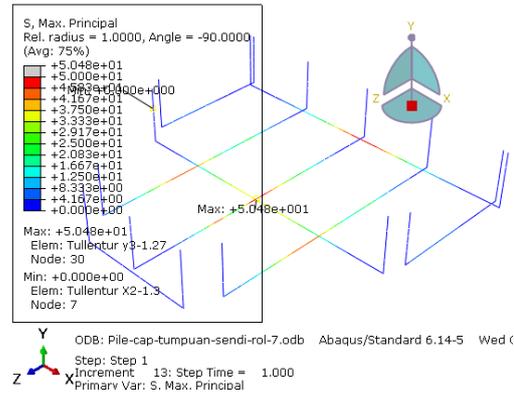


Gambar 17. Hubungan tegangan dengan jarak pada tulangan c ( $P = 400 \text{ kN}$ )



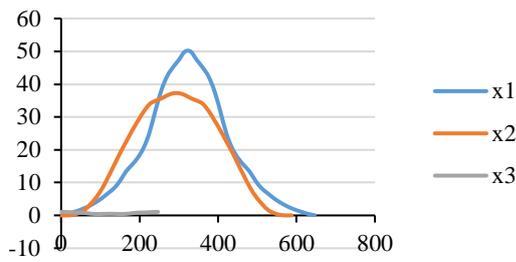
Gambar 18. Tulangan a, b, dan c pada model rangka

Berbeda dengan metode *strut and tie model*, pada metode konvensional tegangan tidak terdistribusi secara merata pada semua tulangan utama. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 19, ketika beban rencana 400 kN sebagian tulangan utama mengalami tegangan maksimum sekitar 50 MPa (merah) dan sebagian lainnya mengalami tegangan maksimum  $< 10 \text{ MPa}$  (biru muda). Jika ditinjau grafik hubungan tegangan ( $S$ ) dengan jarak pada tulangan ( $d$ ), tulangan  $x$  dan  $y$  memiliki bentuk yang berbeda. Tulangan  $x1$  dan  $x2$  memiliki bentuk simetris dengan tegangan maksimum berada di tengah bentang, sementara tulangan  $x1$  memiliki bentuk bergelombang dengan tegangan sangat kecil, seperti ditunjukkan pada Gambar 20. Sedangkan tulangan  $y$  berbentuk tidak teratur dengan tegangan maksimum tidak berada di tengah, seperti ditunjukkan pada Gambar 21.

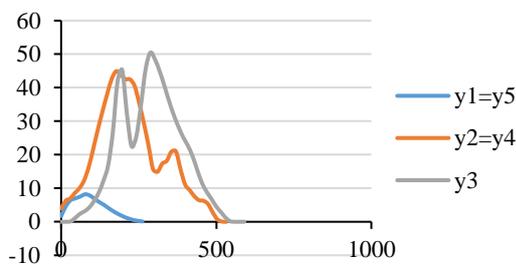


Gambar 19. Kontur tegangan pada tulangan utama metode konvensional ( $P = 400 \text{ kN}$ )

Serupa dengan Gambar 18, pada Gambar 22 mengilustrasikan posisi pemasangan tulangan utama terhadap batang bawah pada model rangka batang. Berdasarkan Gambar 22, dapat disimpulkan bahwa distribusi tegangan pada grafik hubungan tegangan ( $S$ ) dengan jarak disebabkan oleh orientasi tulangan. Pada tulangan  $x1$  dan  $x2$ , distribusi tegangan pada Gambar 20 berbentuk simetris dengan tegangan maksimum berada di tengah dan berangsur-angsur mengecil ke ujung tulangan. Hal tersebut disebabkan oleh ujung-ujung tulangan-tulangan terletak pada batang tarik (miring) yang sama besar (Gambar 22), maka tulangan-tulangan tersebut ditarik gaya yang sama besar. Sehingga bentuknya simetris dengan tegangan maksimum di tengah. Sementara tegangan pada tulangan  $x3$  nilainya sangat kecil, karena tulangan utama tersebut berada di luar batang tarik, sehingga distribusi tegangan pada grafik sangat kecil. Sementara pada tulangan  $y$ , distribusi tegangan pada grafik hubungan tegangan ( $S$ ) dengan jarak ( $d$ ) berbentuk tidak teratur karena ujung-ujung tulangan terletak pada batang tarik yang gayanya berbeda, sehingga grafik distribusi tegangan berbentuk tidak simetris (Gambar 21).

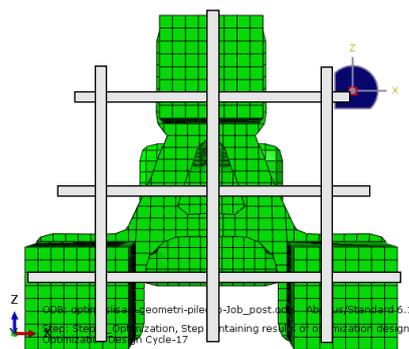


Gambar 20. Hubungan tegangan dengan jarak pada tulangan x (P = 400 kN)



Gambar 21. Hubungan tegangan dengan jarak pada tulangan y (P = 400 kN)

Berdasarkan analisis ini dapat disimpulkan bahwa tulangan utama hasil metode *strut and tie model* lebih efektif dari pada hasil metode konvensional. Karena semua tulangan utama metode *strut and tie model* mengalami tegangan merata dari pada metode konvensional. Hal tersebut disebabkan oleh orientasi tulangan terhadap model rangka batang. Hardjasaputra (2016) yang menyatakan bahwa tulangan utama *strut and tie model* didasari asumsi aliran gaya-gaya dalam struktur beton. Tulangan utama metode *strut and tie model* searah dengan gaya tarik pada struktur beton, sehingga dapat dipahami tegangan yang terjadi pada tulangannya merata.



Gambar 22. Tulangan x dan y pada model rangka

### Tegangan maksimum

Pada model Abaqus metode *strut and tie model*, beban rencana 400 kN hanya menghasilkan tegangan maksimum dengan kisaran 36 MPa sampai 49 MPa seperti ditunjukkan pada Tabel 8. Tegangan pada tulangan a dan b nilainya sama, yaitu pada tulangan 1, 2, 3, 4, dan 5 berturut-turut sebesar 46 MPa; 46,02 MPa; 49,20 MPa; 44,13 MPa; dan 43,48 MPa. Sementara pada tulangan c nilainya relatif lebih kecil, yaitu pada tulangan 1, 2, dan 3 berturut-turut sebesar 36,61 MPa; 38,29 MPa; dan 39,71 MPa. Padahal berdasarkan perencanaan, beban rencana 400 kN dapat mengakibatkan tulangan utama leleh ( $f_y = 400$  MPa). Sementara pada metode konvensional, dengan beban rencana 400 kN menghasilkan tegangan maksimum yang rentangnya lebih besar dengan kisaran 1 MPa sampai 50 MPa, seperti ditunjukkan pada Tabel 9. Tegangan pada tulangan x1, x2, dan x3 berturut-turut sebesar 49,93 MPa; 37,22 MPa; dan 1,07 MPa. Sementara tegangan pada tulangan y1, y2, y3, y4, dan y5 berturut-turut sebesar 8,21 MPa; 44,94 MPa; 50,48 MPa; 44,94 MPa; dan 8,21 MPa. Nilai-nilai yang dihasilkan masih jauh dari tegangan leleh ( $f_y = 400$  MPa).

Tabel 8. Tegangan maksimum metode *strut and tie model* (P = 400 kN)

Jenis tulangan	S <sub>max</sub> (MPa)				
	1	2	3	4	5
a	46,19	47,02	49,20	44,13	43,48
b	46,19	47,02	49,20	44,13	43,48
c	36,31	38,29	39,71		

Tabel 9. Tegangan maksimum metode konvensional (P = 400 kN)

Jenis tulangan	S <sub>max</sub> (MPa)				
	1	2	3	4	5
x	49,93	37,22	1,07		
y	8,21	44,94	50,48	44,94	8,21

### Tegangan maksimum pada variasi beban

Seperti dijelaskan di muka, beban rencana 400 kN tidak bisa membuat tulangan utama leleh pada metode *strut and tie model* maupun metode konvensional. Sehingga beban pada

model Abaqus ditingkatkan dengan kelipatan 100 kN sampai tegangan mencapai leleh, beban yang diterapkan adalah 300 kN sampai 1100 kN. Hasil analisis tersebut kemudian di rangkum pada Tabel 10 dan Gambar 23. Berdasarkan tabel dan gambar tersebut beban yang mampu membuat tulangan utama leleh adalah 1100 kN untuk metode *strut and tie model*, sementara pada metode konvensional pada beban 900 kN. Sehingga baik perencanaan metode *strut and tie model* maupun metode konvensional menghasilkan tulangan yang lebih banyak dari pada yang diperlukan. Pada beban kecil, yaitu ketika beban 300 kN sampai 500 kN tegangan pada 2 metode tersebut tidak jauh berbeda. Baru pada beban 600 kN terjadi perbedaan yang signifikan, pada metode *strut and tie model* sebesar 128,80 MPa (32,2%  $f_y$ ), sedangkan pada metode konvensional sebesar 241,90 MPa (60,48%  $f_y$ ).

Pada metode *strut and tie model*, penambahan beban menghasilkan penambahan tegangan lebih *steady*, pada beban 1100 kN tulangan utamanya baru leleh. Sedangkan pada metode konvensional, penambahan beban menghasilkan penambahan tegangan tidak *steady*, pada beban 900 kN tulangan utama sudah leleh, lonjakan penambahan tegangan secara signifikan mulai terjadi ketika beban 600 kN, seperti ditunjukkan Tabel 10 dan Gambar 23.

Jika meninjau kontur tegangan pada Gambar 24 sampai

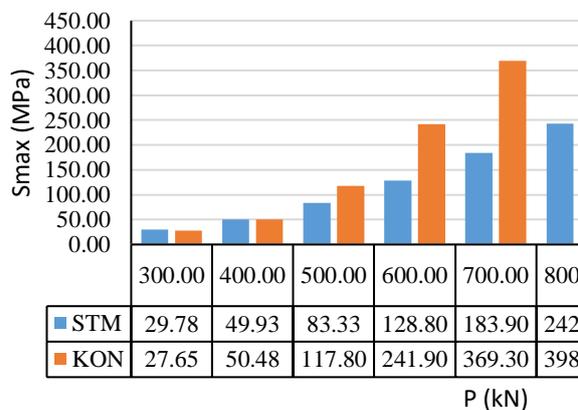
Gambar 32, pada metode *strut and tie model* tegangan relatif merata pada semua tulangan utama. Sedangkan pada metode konvensional tegangan terbesar hanya terjadi pada tulangan

y3 untuk semua nilai beban, sementara beberapa tulangan utama lain terjadi tegangan yang jauh lebih kecil dari pada tulangan y3, sehingga pada tegangan pada metode konvensional tidak merata. Hal tersebut yang menyebabkan metode *strut and tie model* membutuhkan beban yang lebih besar untuk melelehkan tulangan utama dari pada metode konvensional.

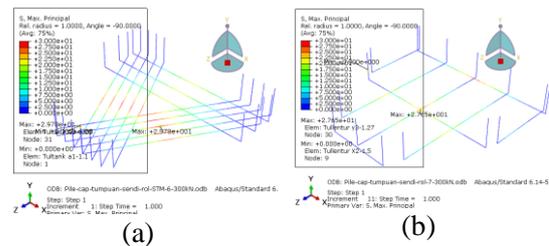
Sementara lonjakan tegangan pada metode konvensional disebabkan terlalu dominannya tulangan y3 menahan tegangan. Ketika beban kecil, tulangan y3 mampu menahannya agar tidak terjadi lonjakan tegangan. Namun ketika beban membesar, tulangan y3 tidak mampu menahannya, sehingga terjadi lonjakan tegangan. Batas lonjakan tegangan tersebut terjadi pada beban 600 kN.

Tabel 10. Tegangan maksimum tulangan utama pada variasi beban

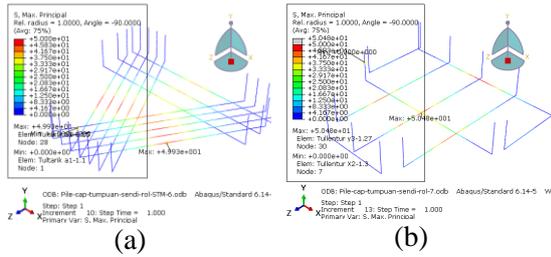
P (kN)	STM		KON	
	$S_{max}$ (MPa)	$S_{max}$ (%)	$S_{max}$ (MPa)	$S_{max}$ (%)
300,00	29,78	7,45	27,65	6,91
400,00	49,93	12,48	50,48	12,62
500,00	83,33	20,83	117,80	29,45
600,00	128,80	32,20	241,90	60,48
700,00	183,90	45,98	369,30	92,33
800,00	242,70	60,68	398,60	99,65
900,00	310,00	77,50	400,00	100,00
1000,00	393,50	98,38		
1100,00	400,00	100,00		



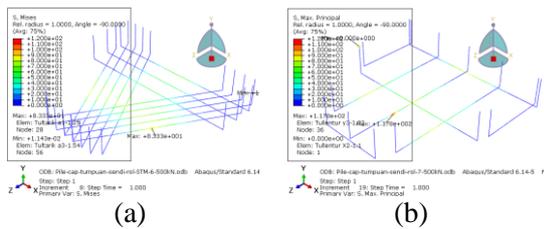
Gambar 23. Tegangan maksimum tulangan utama pada variasi beban



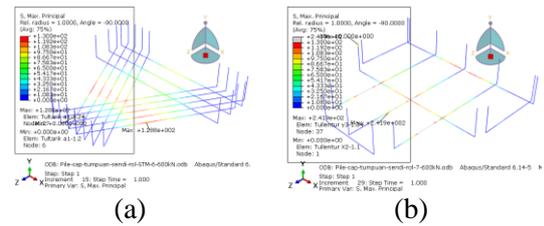
Gambar 24. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 300 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



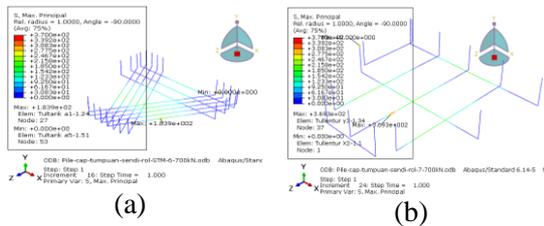
Gambar 25. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 400 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



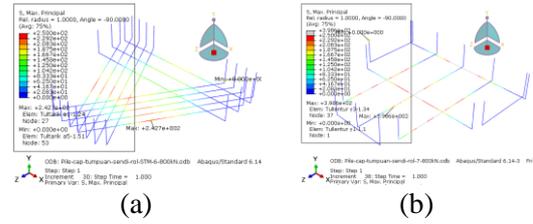
Gambar 26. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 500 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



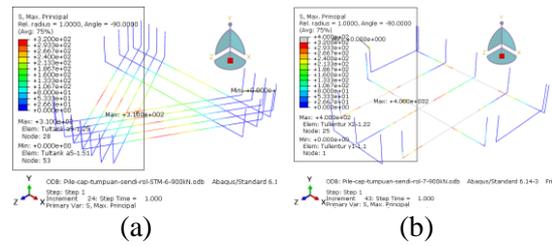
Gambar 27. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 600 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



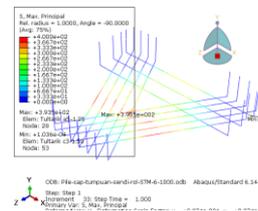
Gambar 28. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 700 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



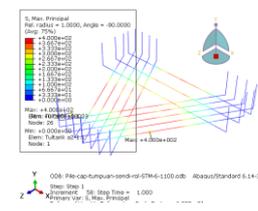
Gambar 29. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 800 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



Gambar 30. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 900 kN: (a) *strut and tie model*; (b) konvensional



Gambar 31. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 1000 kN *strut and tie model*



Gambar 32. Kontur tegangan pada tulangan utama P = 1100 kN *strut and tie model*

Berdasarkan analisis ini dapat disimpulkan bahwa selain kedua metode tersebut menghasilkan tulangan yang lebih banyak dari pada yang dibutuhkan, tulangan utama hasil metode *strut and tie model* dibutuhkan beban lebih besar untuk melelehkan tulangan utama dibandingkan metode konvensional. Hal tersebut disebabkan oleh tegangan metode *strut and tie model* jauh lebih merata dibandingkan metode konvensional. Hal tersebut sesuai

dengan Hardjasaputra (2016), yang menyatakan bahwa tulangan utama *strut and tie model* didasari asumsi aliran gaya-gaya dalam struktur beton. Tulangan metode *strut and tie model* searah dengan aliran gaya tekan sehingga tegangannya merata. Akibatnya dibutuhkan beban lebih besar untuk melelehkan tulangan *strut and tie model*.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Berdasarkan pengujian secara numerik terhadap metode *strut and tie model* dan metode konvensional dapat disimpulkan sebagai berikut.

- Tulangan utama hasil metode *strut and tie model* lebih efektif dari pada hasil metode konvensional. Karena semua tulangan utama metode *strut and tie model* mengalami tegangan merata dari pada metode konvensional. Hal tersebut disebabkan oleh orientasi tulangan terhadap model rangka batang.
- Pada beban rencana 400 KN, tegangan maksimum yang terjadi pada tulangan utama metode *strut and tie model* adalah sebesar 46 MPa; 46,02 MPa; 49,20 MPa; 44,13 MPa; dan 43,48 MPa. Sementara pada metode konvensional adalah 36,61 MPa; 38,29 MPa; dan 39,71 MPa. Tegangan yang terjadi masih jauh dari tegangan leleh ( $f_y = 400$  MPa).
- Di samping kedua metode menghasilkan tulangan yang lebih banyak dari pada yang dibutuhkan, tulangan utama hasil metode *strut and tie model* membutuhkan beban lebih besar (1100 kN) untuk melelehkan tulangan utama dibandingkan metode konvensional (900 kN). Hal tersebut disebabkan oleh tegangan metode *strut and tie model* jauh lebih merata dibandingkan metode konvensional.

### Saran

Berdasarkan hasil pengujian terhadap metode *strut and tie model* dan metode konvensional, saran yang diberikan penulis adalah sebagai berikut.

- Penggunaan metode *strut and tie model* pada perencanaan tulangan utama *pile cap* lebih direkomendasikan.
- Perlu penelitian lebih lanjut mengenai kebutuhan tulangan pada metode-metode yang ditinjau, sehingga tidak terjadi tulangan berlebih.
- Perlu dilakukan penelitian terhadap *pile cap* dengan berbagai jumlah tiang dan beban momen pada sumbu X dan sumbu Y, dengan menggunakan penelitian ini sebagai pustaka.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Buswell, W., & Dao, V. (2013). *Pile Cap Design Using Strut-and-Tie Modelling. The 26th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia*. Gold Coast: Researchgate.
- Fellenius, B. (2006). *Basics of Foundation Design*. Calgary: www.Fellenius.net.
- Hardiyatmo, H. C. 2010. *Analisis & Perancangan Fondasi Bagian II*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardjasaputra, H. (2016). *Perancangan Beton Struktural Berdasarkan Model Strat dan Pengikat (Strut-and-Tie Model) SNI 2847-2013*. Jakarta: Jurusan Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan.
- Hardjasaputra, H., & Tumilar, S. (2002). *Model Penunjang dan Pengikat (Strut and Tie Model) pada Perancangan Struktur Beton*. Jakarta: Universitas Pelita Harapan Press.
- Nori, & Tharval, M. (2007). Design of pile caps – Strut and tie model method. *The Indian Concrete Journal*, 13-19.
- Suhendro, B. (2000). *Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Teng, W. (1992). *Foundation Design*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.