

# ANALISIS REGANGAN BAJA TULANGAN PADA STRUKTUR *PILE CAP* EMPAT TIANG METODE *STRUT AND TIE MODEL*

Sukarman<sup>1</sup>, Djoko Sulisty<sup>1</sup>, Inggar Septhia Irawati<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta  
Email: sukarman@mail.ugm.ac.id

## ABSTRACT

*Pile cap* is one of the many types of structures that are entirely *Disturbed-region*. The structure undergoes a non-linear strain because it was meeting point of the pile and column with centralized forces. In addition, geometry changes occur at the meeting between the column, *pile cap*, and *pile*, so the Bernoulli concept is no longer suitable for this condition. *Pile cap* testing consists of two groups of specimens and each group consists of three specimens. The first group was designed using the STM method (SNI 2847: 2013 Appendix A) and the second group was designed using conventional methods (SNI 2847: 2013 Article 15). Loading is the application of a centralized static load that is channeled through a centric column until the *pile cap* structure has collapsed. The results show that: (1) The flexural reinforcement which experiences the first yield condition both on the *pile cap* testing of the STM method and in the conventional method was the X direction flexural reinforcement (outsidest flexural reinforcement). (2) The average strain of the yield conditions and load on the *pile cap* STM method were 2242  $\mu\epsilon$  and 528.97 kN, whereas the conventional method were 2436  $\mu\epsilon$  and 437.03 kN. (3) Increasing the load capacity of the yield conditions ( $P_y$ ) of the *pile cap* STM method and conventional method on the plan load ( $P_n$ ) were 32.2% and 9.3%.

**Keywords:** *pile cap*, four piles, *Strut and Tie Model* (STM)

## ABSTRAK

*Pile cap* merupakan salah satu dari jenis struktur yang sepenuhnya merupakan daerah terganggu (*Disturbed-region*). Struktur tersebut mengalami regangan non-linear karena merupakan titik pertemuan *pile* dan kolom dengan gaya-gaya terpusat. Selain itu, terjadi perubahan geometri pada pertemuan antara kolom, *pile cap*, dan *pile*, sehingga konsep Bernoulli tidak cocok lagi pada kondisi tersebut. Pengujian *pile cap* terdiri dari dua kelompok benda uji dan masing-masing kelompok terdiri dari tiga buah benda uji. Kelompok pertama dirancang menggunakan metode STM (SNI 2847:2013 Lampiran A) dan kelompok kedua dirancang menggunakan metode konvensional (SNI 2847:2013 Pasal 15). Pembebanan berupa penerapan beban statik terpusat yang disalurkan melalui kolom sentris sampai struktur *pile cap* mengalami keruntuhan. Hasil menunjukkan bahwa: (1) Tulangan lentur yang mengalami kondisi leleh terlebih dahulu baik pada pengujian benda uji *pile cap* metode STM maupun pada metode konvensional adalah tulangan lentur arah X (tulangan lentur terluar). (2) Rata-rata regangan kondisi leleh dan beban pada benda uji *pile cap* metode STM adalah 2242  $\mu\epsilon$  dan 528,97 kN, sedangkan pada metode konvensional adalah 2436  $\mu\epsilon$  dan 437,03 kN. (3) Peningkatan kapasitas beban kondisi leleh ( $P_y$ ) pada benda uji *pile cap* metode STM dan metode konvensional terhadap beban rencana ( $P_n$ ) adalah 32,2 % dan 9,3 %.

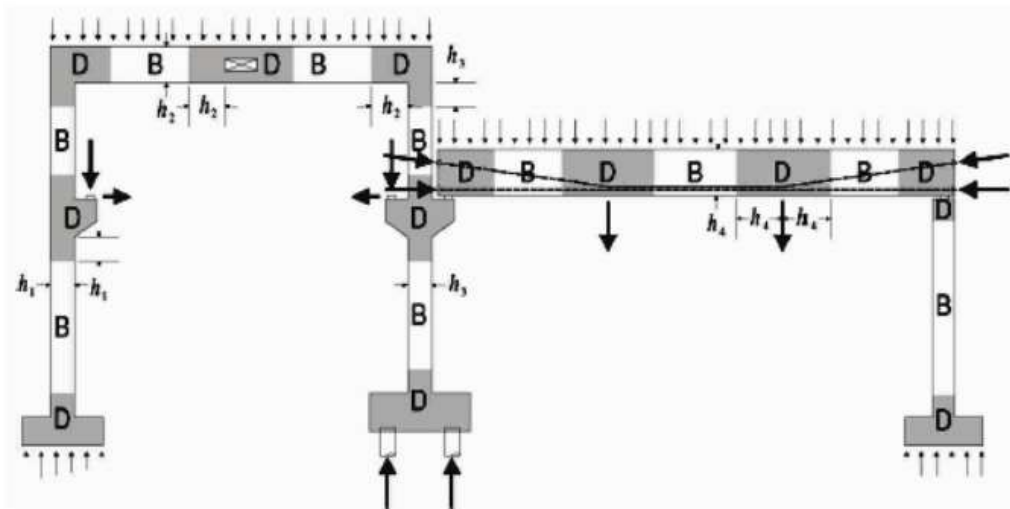
**Kata kunci:** *pile cap*, empat tiang, *Strut-and-Tie Model* (STM)

## PENDAHULUAN

*Pile cap* merupakan salah satu elemen yang sangat penting dari suatu struktur. Hal tersebut dikarenakan *pile cap* memiliki peranan besar dalam pendistribusian atau penyaluran beban struktur dari kolom ke tiang pancang untuk selanjutnya diteruskan menuju tanah. Sehingga dalam perencanaan, diperlukan suatu kepastian tentang keamanan struktur terhadap kemungkinan kegagalan pada struktur tersebut.

Selama ini, perancangan struktur beton telah banyak diselidiki berdasarkan analisis batas (*limit analysis*). Metode tersebut belum meluas karena muncul berbagai pertimbangan terkait perilaku struktur beton yang sangat beragam. Pendekatan melalui *limit analysis* menurut Hardjasaputra (2002) dapat dinyatakan dalam dua kategori, pertama berdasarkan "*lower-bound*" (statik) dan kedua berdasarkan "*upper-bound*" (kinematik). Pendekatan metode statik dapat langsung diterapkan dalam perancangan dan *detailing* karena kekuatan beton dan baja tulangan yang dibutuhkan dapat diperoleh dari sistem keseimbangan

gaya-gaya dalam dari struktur yang dibebani sampai beban batas (*ultimate load*). Sedangkan pendekatan metode kinematik umumnya digunakan pada rancangan yang sudah ada (*existing design*) karena keseimbangan dari model yang dipakai hanya berlaku sesuai dengan keadaan tertentu. Sampai saat ini model yang dianggap konsisten dan rasional dalam perencanaan struktur beton adalah pendekatan melalui "*strut and tie model*" (*STM*). *STM* merupakan suatu metode perancangan yang mendasarkan pada asumsi bahwa aliran gaya-gaya dalam struktur beton dan terutama pada daerah yang mengalami distorsi dapat didekati sebagai suatu sistem rangka batang yang terdiri dari *strut* (batang tekan atau penunjang) dan *tie* (batang tarik atau pengikat). Sehingga *strut and tie* merupakan resultante dari medan tegangan (*stress field*). Pada *strut* yang bekerja adalah beton sedangkan pada *tie* yang bekerja adalah tulangan yang terpasang.



Gambar 1. Pembagian Daerah B dan Daerah D  
(Sumber: Tjen dan Kuchma, 2002)

Hardjasaputra dan Tumilar (2002), *STM* berawal dari *Truss analogy model* yang sebenarnya pertama kali diperkenalkan oleh Ritter pada tahun 1899 dan Morsch pada tahun 1902. Dengan memperhatikan pola

retak yang terjadi akibat suatu beban ( $F$ ), Morsch menggunakan model rangka batang (*Truss*) untuk menjelaskan aliran gaya (*load path*) untuk transfer beban ( $F$ ) ke tumpuan

yang terjadi pada struktur beton bertulang dalam keadaan retak.

Schlaich et al. (1982-1993) membagi suatu struktur pada *strut and tie model* menjadi dua daerah, yaitu daerah B (Bernoulli) yang pada umumnya didasarkan pada distribusi tegangan linear menurut hipotesa Bernoulli. Sedangkan daerah D (*Discontinuity, Disturbance*) merupakan daerah atau tempat terjadinya distribusi tegangan non-linear yang diakibatkan oleh diskontinuitas geometri, statika, dan atau kombinasi dari keduanya.

Martin dan Sanders (2007) menyebutkan bahwa *STM* adalah suatu pendekatan yang digunakan untuk merancang daerah diskontinuitas (*D-region*) pada struktur beton bertulang dan prategang. *STM* menyederhanakan tegangan yang kompleks pada suatu *D-region* ke dalam konfigurasi *truss* sederhana sebagai jalur tegangan uniaksial. Setiap jalur tegangan uniaksial dianggap sebagai elemen *STM*.

Souza et al. (2009) mengajukan model *pile cap* yang didasarkan pendekatan *strut and tie model*. Model berupa *pile cap* yang dibebani 1 kolom yang ditopang 4 tiang, selanjutnya dikalibrasi dengan hasil pengujian dari 6 pengujian dengan total 129 objek, yaitu dari Blevot dan Fremy (1967), Clarke (1973), Suzuki et al. (1988), Suzuki et al. (1999), Suzuki et al. (2000), dan Suzuki et al. (2002). Model tersebut berhasil

memperkirakan 87% tipe kegagalan (geser atau lentur) dari 129 *pile cap* dengan tepat.

Shah et al., 2011 melakukan penelitian dengan merancang beberapa struktur meliputi: 4 *pile cap*, 6 korbil, 3 balok tinggi, serta *dapped beam* menggunakan *STM* yang kemudian diuji di laboratorium menggunakan beban monotonik. Kapasitas beban hasil pengujian dibandingkan dengan beban rencana. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas geser hasil eksperimen sedikit lebih besar jika dibandingkan dengan prediksi menggunakan *STM* dengan nilai rerata 1,17, yang berarti bahwa kapasitas geser eksperimen 17% lebih besar bila dibandingkan dengan kapasitas geser teoritis yang dirancang menggunakan *STM*. *Pile cap* merupakan struktur yang mengalami regangan non-linear karena pada titik pertemuan dengan *pile* dan kolom terdapat gaya-gaya terpusat. Selain itu, terjadi perubahan geometri pada pertemuan antara kolom, *pile cap*, dan *pile*, sehingga konsep Bernoulli tidak cocok lagi pada kondisi tersebut. Oleh karena itu pada penelitian ini, metode *STM* akan diaplikasikan dalam proses perancangan *pile cap*. Selain itu metode konvensional juga akan digunakan sebagai pembanding. Kedua metode tersebut akan menghasilkan luas tulangan dan susunan tulangan yang berbeda yang kemudian akan dibandingkan perilakunya melalui pengujian eksperimental di laboratorium.

## METODE

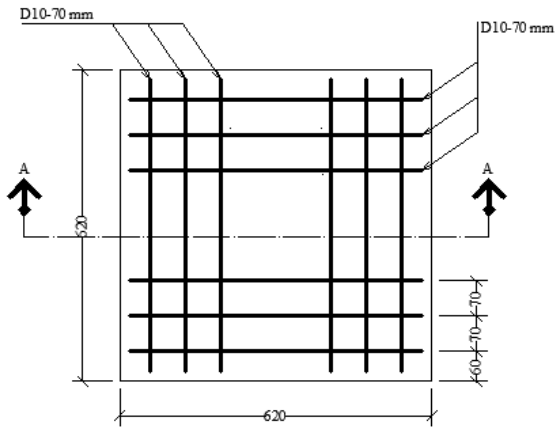
Metode yang digunakan dalam penelitian ini merupakan metode eksperimen. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Struktur, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Benda uji *pile cap* dalam penelitian ini terdiri dari 6 buah yaitu 3 buah sebagai *pile cap* metode *STM* (terdiri dari PC-SS-4P-1, PC-SS-4P-2, dan PC-SS-4P-2) dan 3 buah sebagai *pile cap* metode konvensional (terdiri dari PC-KS-4P-1, PC-KS-4P-2, dan PC-KS-4P-3). Ukuran prototipe *pile cap* metode konvensional dan

metode *STM* adalah 1550 mm x 1550 mm x 450 mm. *Pile cap* tersebut dirancang dengan beban rencana sebesar 2500 kN, selanjutnya dimensi tersebut diskala model 1:2,5 menggunakan Teori Buckingham (Suhendro, 2000). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk detail benda uji tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 s.d 8, sementara untuk *flowchart* dalam perancangan benda uji *pile cap* metode *STM* dan konvensional dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.

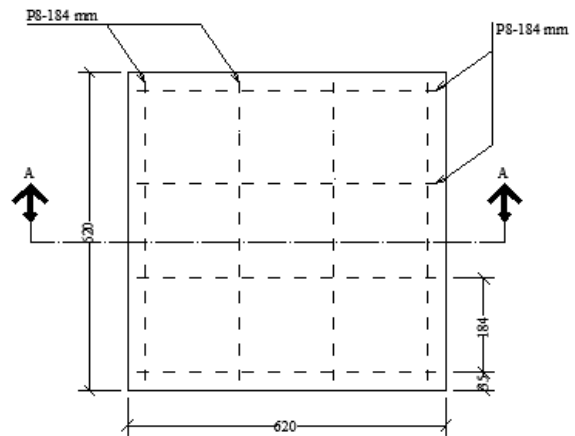
Tabel 1. Spesifikasi Benda Uji *Pile Cap*

Benda Uji		PC-KS	PC-SS
Dimensi (l x b x h) mm		620x620x180	620x620x180
Tulangan Lentur	Arah x	4 D10-183	6 D10-70
	Arah y	4 D10-183	6 D10-70
Tulangan Susut	Arah x	4 P8-185	4 P8-185
	Arah y	4 P8-185	4 P8-185
Jumlah sampel		3	3

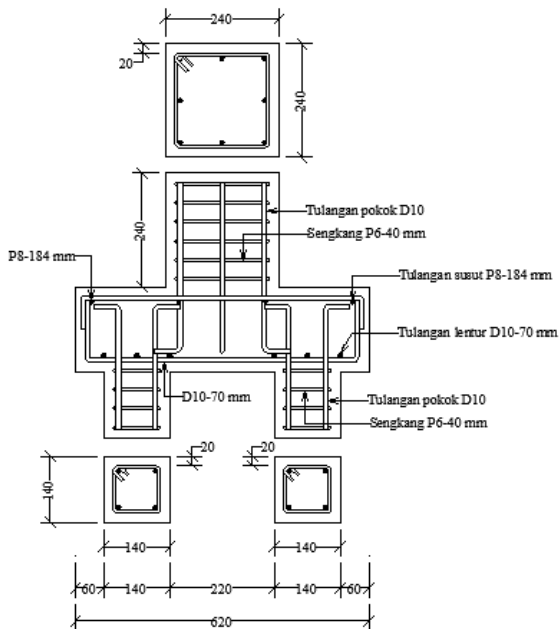
Keterangan:  
PC: *pile cap*; KS: konvensional sentris; SS: *STM* sentris



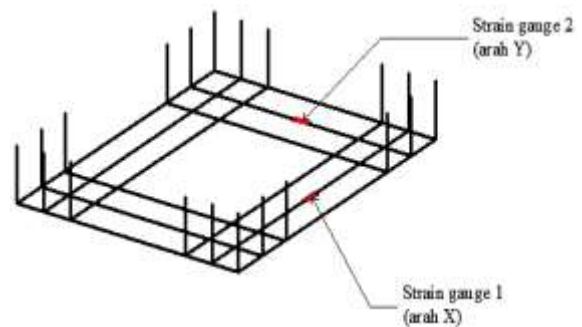
Gambar 2. Tulangan Lentur *Pile Cap* Metode *STM*



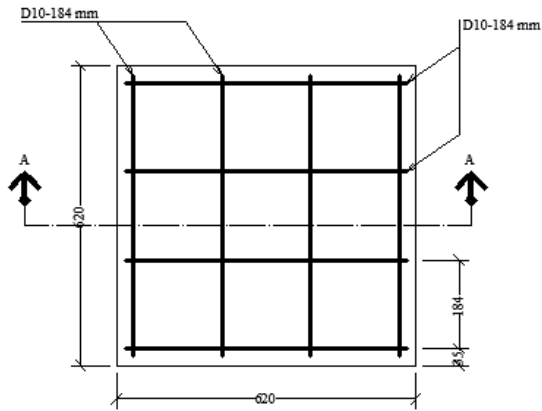
Gambar 3. Tulangan Susut *Pile Cap* Metode *STM*



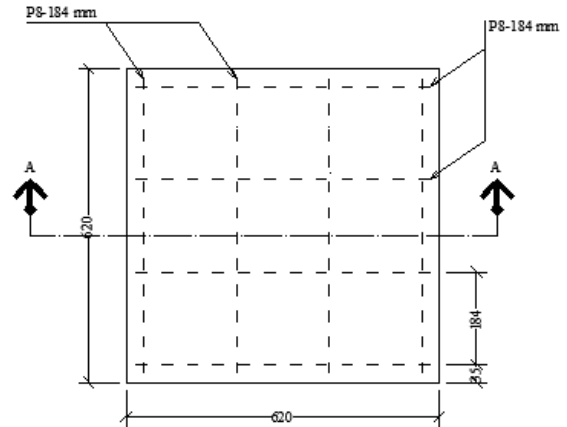
Gambar 4. Potongan *Pile Cap* Metode *STM*



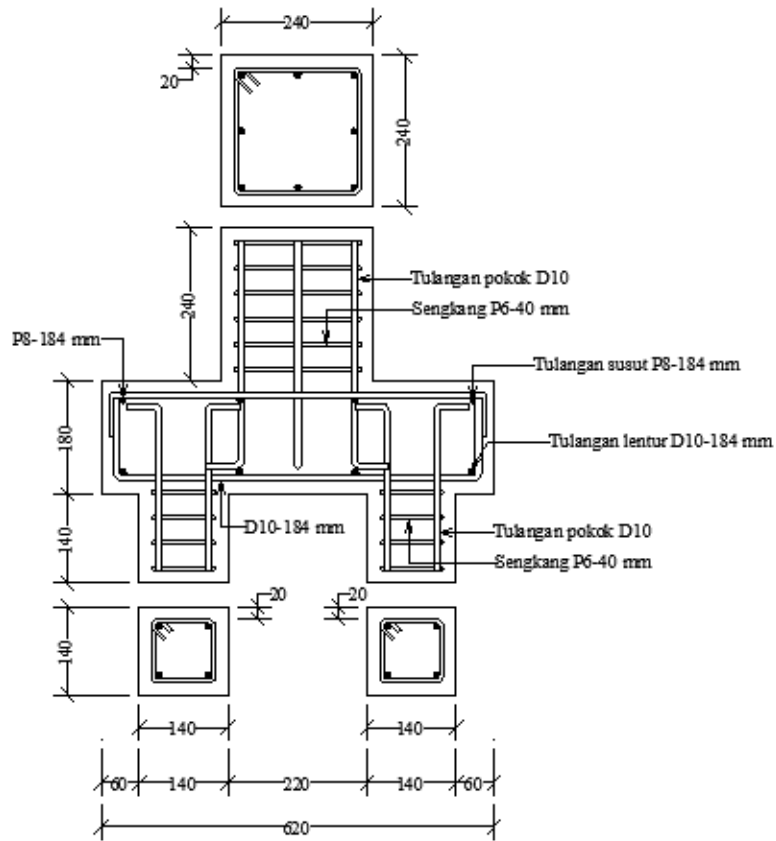
Gambar 5. Potongan *Strain Gauge* Baja Pada *Pile Cap* Metode *STM*



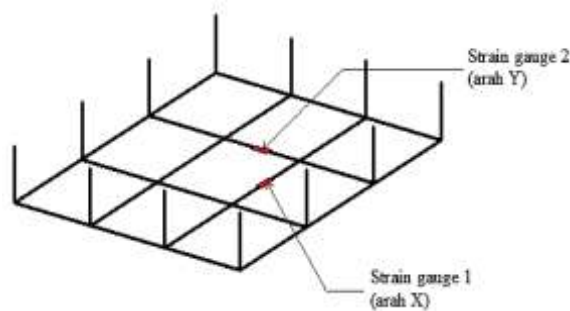
Gambar 6. Tulangan Lentur *Pile Cap* Metode Konvensional



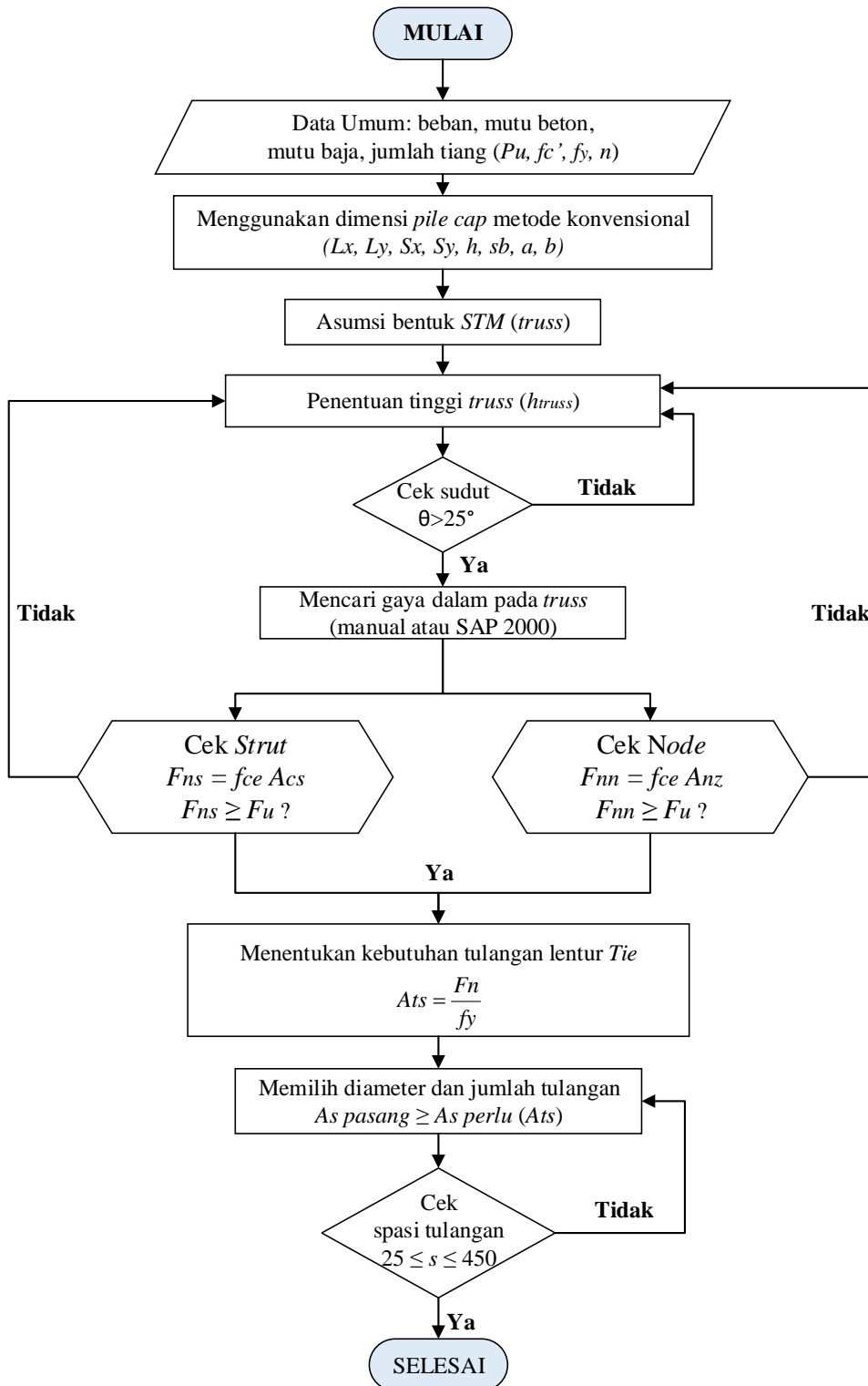
Gambar 7. Tulangan Susut *Pile Cap* Metode Konvensional



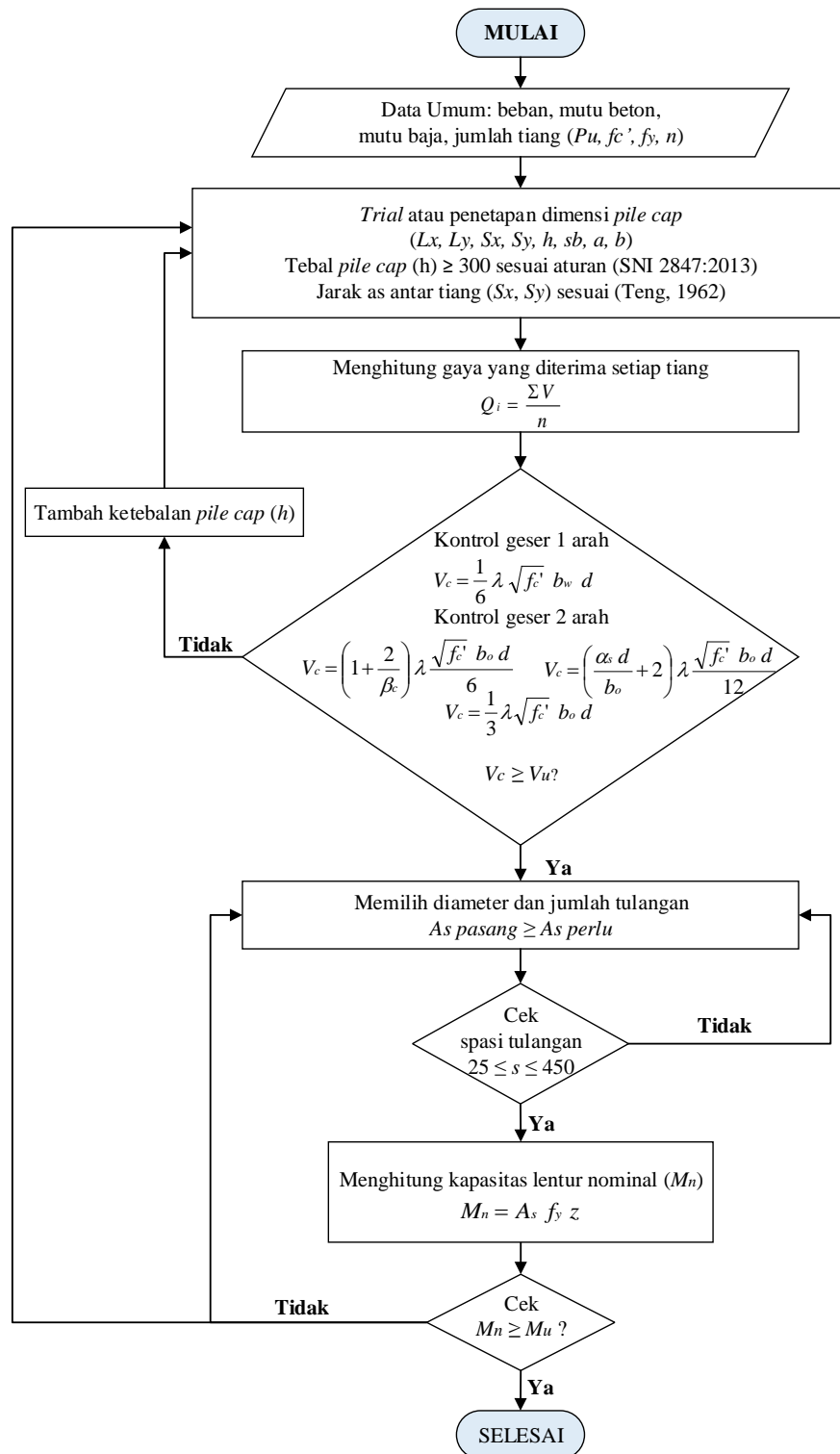
Gambar 8. Potongan *Pile Cap* Metode Konvensional



Gambar 9. Potongan *Strain Gauge* Baja Pada *Pile Cap* Metode Konvensional



Gambar 10. Flowchart Perancangan Pile Cap Metode STM



Gambar 11. Flowchart Perancangan Pile Cap Metode Konvensional

Beberapa tahapan penelitian ini antara lain meliputi: (1) pengujian mutu material, (2) pembuatan benda uji, (3) perawatan beton, (4) pengujian struktur pile cap. Pengujian mutu material atau pengujian pendahuluan meliputi uji kuat tarik baja tulangan dan uji silinder beton (kuat tekan beton). Mutu

beton yang dipakai dalam penelitian ini adalah K325 atau 27,5 MPa dengan nilai slump 100±20 mm serta ukuran agregat kasar terbesar 20 mm yang langsung dipesan dari *Batching Plant*. Pembuatan benda uji meliputi pembuatan bekisting, perakitan tulangan, pemasangan strain

*gauge*, serta pengecoran benda uji. Perawatan beton (*curing*) dilakukan agar benda uji terjamin kelembapannya. Selanjutnya pengujian struktur *pile cap* dilakukan dengan menerapkan beban statik

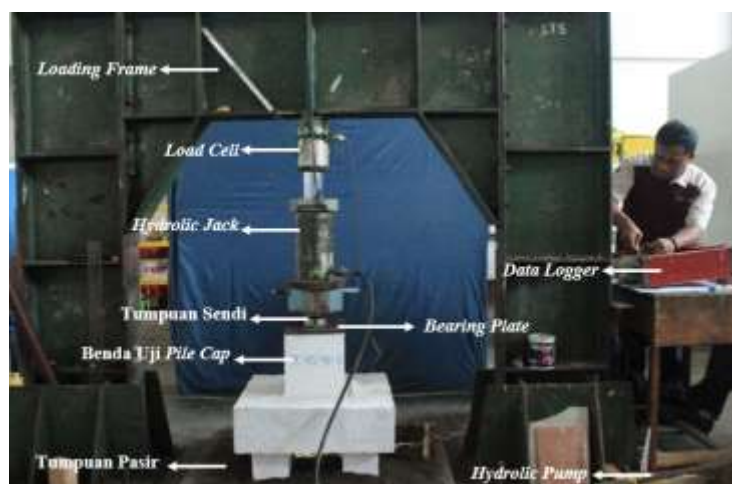
terpusat yang disalurkan melalui kolom sentris sampai struktur *pile cap* mengalami keruntuhan. Untuk detail benda uji *pile cap* yang sudah siap untuk diuji dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hasil Pembuatan Benda Uji *Pile Cap*

Tahapan pengujian *pile cap* dilakukan setelah berumur 28 hari. Sebelum dilakukan pengujian, pengecekan *strain gauge* harus dilakukan agar saat pengujian data regangan baja yang ditinjau dapat terbaca. Selanjutnya dilakukan *setting up* benda uji

dimana semua peralatan untuk pengujian dipasang seperti *bearing plat*, tumpuan (sendi), *hydraulic jack*, *load cell*, serta *data logger*. *Setting up* pengujian tersebut dapat dilihat seperti pada Gambar 13.



Gambar 13. *Setting-up* Pengujian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pendahuluan untuk kuat tarik baja tulangan dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Pengujian dilakukan untuk

mengetahui karakteristik dari baja tulangan yaitu tegangan leleh, tegangan ultimit, serta regangan yang terjadi. Baja tulangan yang digunakan pada benda uji *pile cap* adalah D10 (BJTD) yang berfungsi sebagai



tulangan lentur. Pengujian kuat tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui kualitas baja tulangan dengan cara meninjau nilai tegangan dan regangan baja

saat mencapai kondisi leleh dan ultimit. Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian kuat tarik baja tulangan D10 mm

Kode	Tegangan Leleh ( $f_y$ ) (MPa)	Tegangan Ultimit ( $f_u$ ) (MPa)	Regangan Maksimal ( $\epsilon_u$ )
D10-1	388,26	573,19	0,334
D10-2	461,91	632,43	0,278
D10-3	430,69	644,44	0,248

Berdasarkan Tabel 2 dapat disimpulkan bahwa tulangan D10 mm memiliki tegangan leleh rata-rata sebesar 426,96 MPa dengan regangan leleh sebesar 2135  $\mu\epsilon$ , tegangan ultimit rata-rata sebesar 616,69 MPa, serta regangan maksimal rata-rata sebesar 287000  $\mu\epsilon$ .

Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan di Laboratorium Struktur, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada. Pengujian tersebut dilakukan untuk

mengetahui nilai kuat tekan beton yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji. Sebelum dilakukan pengujian, terlebih dahulu dilakukan perawatan benda uji dengan cara perendaman di dalam kolam air mulai dari benda uji berumur 2 hari dan dikeluarkan sehari sebelum dilakukan pengujian. Pengujian terhadap 4 buah silinder beton dilakukan setelah benda uji tersebut berumur 28 hari. Adapun hasil pengujian kuat tekan silinder beton dapat dilihat pada Tabel 3.

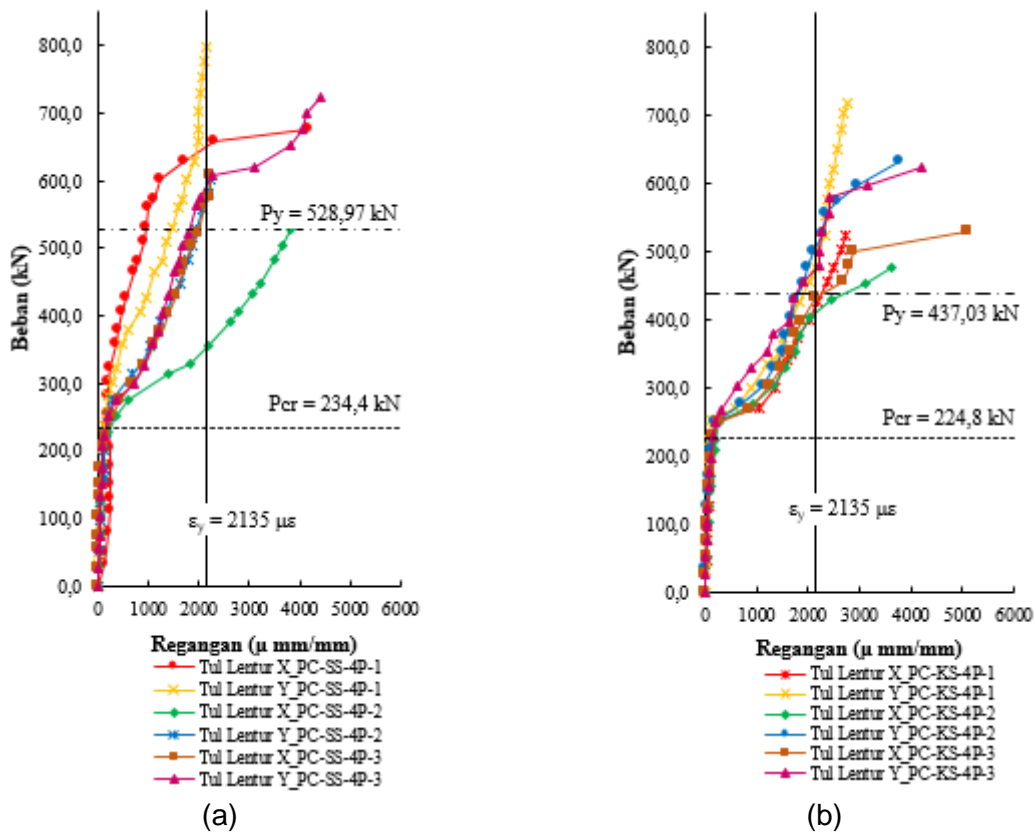
Tabel 3. Hasil pengujian kuat tekan silinder beton

Benda Uji	Beban (kN)	Kuat Tekan (MPa)
1	480	27,59
2	525	29,88
3	530	30,17
4	460	25,97

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan silinder beton pada umur 28 hari, nilai kuat tekan rata-rata hasil pengujian pada umur 28 hari yakni sebesar 28,40 MPa. Nilai kuat tekan tersebut 3,27 % lebih tinggi jika dibandingkan dengan yang direncanakan yakni sebesar 27,5 MPa.

Pada pengujian benda uji *pile cap* metode *STM* dan metode konvensional diperoleh hasil pembacaan regangan pada *strain gauge* 1 dan *strain gauge* 2. *Strain gauge* 1

digunakan untuk membaca hasil regangan baja tulangan lentur arah sumbu X. Selanjutnya *strain gauge* 2 digunakan untuk tulangan lentur arah sumbu Y (lihat Gambar 4 dan 8). Secara umum hasil pembacaan *strain gauge* pada baja tulangan menunjukkan bahwa semua tulangan lentur arah sumbu X dan Y baik pada *pile cap* metode *STM* dan metode konvensional sudah mengalami kondisi leleh. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Grafik Hubungan Regangan Tulangan Lentur Arah X dan Y Terhadap Beban Pada Benda Uji *Pile Cap* (a) Metode STM dan (b) Metode Konvensional

Pertambahan regangan pada tulangan lentur arah sumbu X untuk *pile cap* metode STM meningkat secara signifikan setelah mencapai rata-rata beban 249,9 kN, sedangkan pada *pile cap* metode konvensional regangan meningkat secara signifikan setelah mencapai rata-rata beban 224,8 kN. Sedangkan pertambahan regangan pada tulangan lentur arah sumbu Y untuk *pile cap* metode STM meningkat secara signifikan setelah mencapai rata-rata beban 260,4 kN, sedangkan pada *pile cap* metode konvensional regangan meningkat secara signifikan setelah mencapai rata-rata beban 250,2 kN.

Secara umum penambahan regangan secara signifikan terjadi pada saat retak awal (*first crack*). Hal tersebut terjadi dikarenakan saat beton mengalami retak maka distribusi tegangan sepenuhnya dilimpahkan pada baja tulangan. Sehingga regangan pada baja tulangan akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan yang diterima oleh baja tulangan tersebut.

Hasil pembacaan regangan tulangan lentur pada benda uji *pile cap* metode STM yang telah mencapai batas regangan leleh ( $2135 \mu\epsilon$ ) untuk benda uji PC-SS-4P-1, PC-SS-4P-2, dan PC-SS-4P-3 masing-masing sebesar  $2299 \mu\epsilon$ ,  $2202 \mu\epsilon$ , dan  $2225 \mu\epsilon$  dengan beban masing-masing sebesar 656,8 kN, 354,4 kN, dan 575,7 kN, sedangkan pada benda uji *pile cap* metode konvensional untuk benda uji PC-KS-4P-1, PC-KS-4P-2, dan PC-KS-4P-3 masing-masing sebesar  $2178 \mu\epsilon$ ,  $2456 \mu\epsilon$ , dan  $2676 \mu\epsilon$  dengan beban masing-masing sebesar 427,3 kN, 428,4 kN, dan 455,4 kN.

Keseluruhan tulangan lentur arah sumbu X baik pada benda uji *pile cap* metode STM maupun konvensional mengalami kondisi leleh lebih awal dibandingkan tulangan lentur arah sumbu Y. Hal tersebut dikarenakan tulangan lentur yang dipasang pada arah sumbu X merupakan tulangan lentur terluar. Sehingga tegangan yang terjadi pada tulangan lentur arah sumbu X

jauh lebih besar dari pada tulangan lentur arah sumbu Y. Selanjutnya kapasitas beban kondisi leleh baja tulangan lentur untuk benda uji *pile cap*

metode STM dan konvensional dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kapasitas beban kondisi leleh baja tulangan lentur benda *pile cap* metode STM dan metode konvensional

Metode	Benda Uji	$P_y$ (kN)	$P_y$ rata-rata (kN)
STM	PC-SS-4P-1	656,8	528,97
	PC-SS-4P-2	354,4	
	PC-SS-4P-3	575,7	
Konvensional	PC-KS-4P-1	427,3	437,03
	PC-KS-4P-2	428,4	
	PC-KS-4P-3	455,4	

Berdasarkan data di atas dapat dilihat bahwa dengan beban desain yang sama tetapi metode *strut and tie model* memiliki kapasitas beban yang lebih besar jika dibandingkan dengan dengan metode konvensional. Hal tersebut dibuktikan

dengan peningkatan kapasitas beban kondisi leleh terhadap beban rencana pada benda uji *pile cap* metode STM adalah sebesar 32,2%, sedangkan pada metode konvensional adalah sebesar 9,3%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rasio beban kondisi leleh ( $P_y$ ) terhadap beban rencana ( $P_n$ )

Metode	$P_n$ (kN)	$P_y$ (kN)	Rasio $P_y$ terhadap $P_n$
STM	400	528,97	1,322
Konvensional	400	437,03	1,093

## SIMPULAN

Berdasarkan data hasil pengujian benda uji *pile cap* yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan antara lain: (1) Tulangan lentur yang mengalami kondisi leleh terlebih dahulu baik pada pengujian benda uji *pile cap* metode STM maupun pada metode konvensional adalah tulangan lentur arah X (tulangan lentur terluar). (2) Rata-rata regangan kondisi leleh dan beban pada benda uji *pile cap* metode STM adalah 2242  $\mu\epsilon$  dan 528,97 kN, sedangkan pada

metode konvensional adalah 2436  $\mu\epsilon$  dan 437,03 kN. (3) Peningkatan kapasitas beban kondisi leleh ( $P_y$ ) pada benda uji *pile cap* metode STM dan metode konvensional terhadap beban rencana ( $P_n$ ) adalah 32,2% dan 9,3%. Hal tersebut mengindikasikan bahwa *pile cap* yang dirancang menggunakan metode *strut and tie model* (STM) lebih kuat jika dibandingkan dengan metode konvensional.

## DAFTAR RUJUKAN

- Adebar, P., Kuchma, D., and Collins, M.P., 1990. *Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps: An Experimental Study*. ACI Structural Journal. Vol. 87, No. 1, January-February, pp. 81-91.
- Badan Standar Nasional Indonesia, 2013. *SNI 2847:2013 tentang Beton*. Jakarta: Badan Standar Nasional Indonesia.
- Blevot, J., L., and Fremy, R., 1967. *Semelles sur Pieux*. Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics. Vol. 20, No. 230, pp. 223-295.
- Clarke, J., L., 1973. *Behavior and Design of Pile Caps with Four Piles*. Technical Report No. 42.489, Cement and Concrete Association, Wexham Springs.
- Hardjasapurta dan Tumilar, 2002. *Model Penunjang dan Pengikat (Strut-and-Tie Model)* Pada Perancangan

- Struktur Beton. Jakarta: CV. Hidup Baru.
- Hardjasapurta, H., 2016. *Perancangan Beton Struktural Berdasarkan Model Strat dan Pengikat (Strut-and-Tie Model) SNI 2847:2013*. Jakarta: Ref Graphika.
- Martin, B., T., and Sanders, D., H., 2007. *Verification and Implementation of Strut-and-Tie Model in LRFD Bridge Design Specification*. NCHRP Project 20-07, Task 12, November 2007, pp. 276.
- Morsch, E., 1902. *Concrete-Steel Construction*. New York: E. P. Goodrich, translation McGraw-Hill.
- Pratama, G. N. I. P., & Sumarjo, H. (2018). Aksesibilitas Tata Letak Elevator Penumpang Gedung Kantor Pusat Layanan Terpadu (KPLT) Fakultas Teknik UNY. *INformasi dan Ekspose hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 14(1), 26-35.
- Ritter, W., 1899. "Die Bauweise Hennebique, Schweizerische Bauzeitung". Vol. 33, No. 7, February 1899, pp. 59-61.
- Schlaich, J., Schäfer, K., and Jenewin, M., 1991. *Design and Detailing of Structural Concrete*. Journal of the Pre-stressed Concrete Insitute. Vol. 69, No. 6, Maret 1991, pp. 113-125.
- Schlaich, J., Schäfer, K., and Jenewin, M., 1984, 1989, 1993. *Konstruieren in Stahlbeton*. Beton Kalender. Berlin-Munich: Wilhem Ernst & Son.
- Schlaich, J., Schäfer, K., and Jenewin, M., 1987. *Toward a Consistent Desaign of Structural Concrete*. Journal of the Pre-stressed Concrete Insitute. Vol. 32, No. 3, pp. 74-150.
- Shah, A., Haq, E., and Khan, S., 2011. *Analysis dan Design of Disturbed Region in Concrete Structures*. Procedia Engineering. Vol. 14, pp. 3317-3324.
- Souza, R., Kuchma, D., Park, J.W., and Bittencourt. T., 2009. *Adaptable Strut-and-Tie Model for Design and Verification of Four-Pile Caps*. ACI Structural Journal. Vol. 106, No. 2, March-April, pp. 142-150.
- Suhendro, B. 2000. *Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Suzuki, K., and Otsuki, K., and Tsubata, T., 1999. *Experimental Study on Four-Pile Caps with Taper*. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 21, pp. 327-334.
- Suzuki, K., and Otsuki, K., and Tsubata, T., 1998. *Influence of Bar Arrangement on Ultimate Strength of Four-Pile Caps*. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 20, pp. 195-202.
- Suzuki, K., and Otsuki, K., and Tsuhiya, T., 2000. *Influence of Edge Distance on Failure Mechanism of Pile Caps*. Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 21, pp. 327-334.
- Tjen N, Tjhin, and Daniel A, Kuchma, 2002. *Computer-Based Beams Tools for Design by Strut-and-Tie Method: Advances Challenges*. ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 5, September-October 2002, pp. 586-594.