

Analisis Kapasitas dan Kekuatan Pile Cap Menggunakan Metode Strut and Tie pada Bangunan Proyek Kampus Dua Polman Bandung - Majalengka

Zebe Kumara Imani ^{a,1,*}

^a Universitas Nusa Putra, Sukabumi

¹ zebe.kumara_ts21@nusaputra.ac.id *

* zebe.kumara_ts21@nusaputra.ac.id

Diterima; diperbaiki; disetujui

ABSTRACT

Pile cap merupakan elemen kunci dalam sistem pondasi tiang pancang karena berfungsi menyalurkan beban dari kolom ke kepala tiang secara merata melalui mekanisme aksi tekan dan tarik internal. Pada daerah diskontinuitas (D-region), pendekatan elastis konvensional sering gagal menggambarkan kondisi tegangan aktual. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan metode Strut and Tie (STM) untuk menganalisis kapasitas struktural pile cap dengan susunan 3×3 pancang pada proyek pembangunan Kampus Dua Polman Bandung, Majalengka. Data teknis yang digunakan meliputi dimensi pile cap $2200 \times 2200 \times 500$ mm, mutu beton $f_c' = 25$ MPa, mutu baja $f_y = 400$ MPa, beban kolom 300 kN, dan kedalaman efektif 420 mm. Analisis dilakukan melalui penentuan gaya tekan pada strut, gaya tarik pada tie, kebutuhan tulangan tarik, serta pemeriksaan kapasitas punching shear.

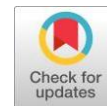
Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh compressive strut bekerja dalam kapasitas aman beton dan tidak melewati batas tegangan yang diizinkan. Tulangan tie yang dibutuhkan juga memenuhi persyaratan kapasitas tarik baja, sehingga mekanisme distribusi gaya internal dapat berlangsung stabil. Pemeriksaan punching shear menunjukkan bahwa tegangan geser yang terjadi lebih kecil dibandingkan kapasitas kritis beton, sehingga pile cap aman dari potensi keruntuhan punching tanpa memerlukan tulangan geser khusus.

Secara keseluruhan, metode Strut and Tie terbukti memberikan pendekatan yang lebih representatif dalam menggambarkan perilaku pile cap pada D-region, serta dapat dijadikan acuan dalam perencanaan pile cap untuk pondasi tiang pancang.

ABSTRACT

The pile cap is a crucial component in deep foundation systems, functioning as a reinforced concrete element that transfers column loads uniformly to the pile heads. In structural discontinuity regions (D-regions), conventional elastic methods often fail to accurately capture real stress behavior. Therefore, this study employs the Strut and Tie Method (STM) to analyze the structural capacity of a 3×3 pile cap used in the construction of Polman Bandung Campus Two in Majalengka. The technical parameters include a pile cap size of $2200 \times 2200 \times 500$ mm, concrete strength of $f_c' = 25$ MPa, steel yield strength of $f_y = 400$ MPa, a column load of 300 kN, and an effective depth of 420 mm. The analysis focuses on determining compressive strut forces, tensile tie forces, required reinforcement, and punching shear capacity.

Results indicate that all compressive struts remain within the allowable concrete stress limits, ensuring stable internal force transfer. The required tie reinforcement also satisfies steel tensile capacity criteria, demonstrating adequate resistance against tension forces generated by pile reactions. Punching shear evaluation shows that applied shear stresses are lower than the critical concrete shear capacity, confirming that the pile cap is safe without additional shear reinforcement.



KATA KUNCI

Pile Cap
Pondasi Tiang Pancang
Tulangan Tarik
Gaya Strut
Gaya Tie
Beton Bertulang
Punching Shear

KATA KUNCI

Pile Cap
Pile Foundation
Tensile Reinforcement
Punching Shear
Compressive Strut
Tension Tie
Reinforced Concrete

Overall, the Strut and Tie Method provides a more realistic analytical framework to represent the behavior of pile caps in D-regions, offering valuable guidance for designing reinforced concrete pile caps in deep foundation systems.



This is an open-access article under the [CC-BY-SA](#) license

1. Pendahuluan

Sebagai pondasi suatu bangunan, elemen konstruksi bertingkat ini memiliki peran utama dalam menyalurkan keseluruhan beban yang dihasilkan oleh struktur atas bangunan ke tanah dasar. Salah satu elemen penting pada sistem pondasi tiang adalah pile cap, yang merupakan elemen beton bertulang yang fungsinya adalah untuk mengikat kepala-kepala tiang pancang agar semuanya dapat bekerja secara serempak dalam menahan beban aksial/lateral. Pile cap ini sangat menentukan pada stabilitas dan keamanan keseluruhan.

Sistem pondasi yang digunakan pada proyek pembangunan Kampus Dua Polman Bandung di Majalengka adalah bedug termasuk pile cap sebagai elemen pengikat tiang pancang. Ketika dirancang dengan cara konvensional, perhitungan kapasitas pile cap dengan pendekatan elastis atau empiris memiliki keterbatasan dalam pengamatan terhadap perilaku tegangan dan retak yang terjadi pada daerah D – region. Untuk itu, diperlukan pendekatan analitis yang dapat mendekati distribusi gaya internal yang sesungguhnya.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, diperlukan suatu pendekatan analitis yang mampu menggambarkan perilaku internal pile cap secara lebih realistis. Salah satu metode yang direkomendasikan dalam analisis elemen struktur beton bertulang pada daerah D-region adalah Strut and Tie Model (STM). Pendekatan ini memodelkan pile cap sebagai sistem rangka sederhana yang terdiri dari elemen tekan (strut), elemen tarik (tie), dan zona nodal yang merepresentasikan distribusi gaya internal yang kompleks. Dengan STM, pola mekanisme transfer beban dari kolom ke tiang pancang dapat diprediksi dengan lebih akurat, termasuk identifikasi titik-titik kritis seperti zona tekan, tarik, maupun risiko terjadinya punching shear.

Penerapan STM menjadi semakin penting pada pile cap berukuran relatif kecil namun menahan beban yang signifikan, seperti pada pile cap proyek Kampus Dua Polman Bandung di Majalengka. Analisis yang tepat akan menentukan kebutuhan tulangan, kapasitas struktur, serta estimasi keamanan terhadap mode kegagalan utama. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kapasitas dan kekuatan pile cap menggunakan metode Strut and Tie, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai kinerja struktural pile cap pada kondisi aktual di lapangan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bersifat kuantitatif deskriptif, di mana analisis dilakukan berdasarkan data numerik yang diperoleh dari gambar kerja dan parameter material.

Pendekatan yang digunakan adalah metode Strut and Tie, karena metode ini mampu memodelkan distribusi gaya tekan dan tarik secara realistis pada elemen beton seperti pile cap yang memiliki geometri tidak sederhana.

Metode Strut and Tie merupakan pendekatan analisis yang direkomendasikan oleh ACI 318 dan SNI 2847 untuk memodelkan aliran gaya tekan (strut) dan tarik (tie) pada elemen beton di daerah diskontinuitas. Metode ini memungkinkan perencana untuk memprediksi kapasitas dan pola kegagalan struktur dengan lebih realistis, khususnya pada elemen-elemen kompleks seperti pile cap.

Dengan demikian, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kapasitas dan kekuatan pile cap pada proyek pembangunan Kampus Dua Polman Bandung – Majalengka menggunakan metode Strut

and Tie, guna memperoleh pemahaman yang lebih mendalam terhadap kinerja struktur serta memberikan rekomendasi desain yang aman dan efisien.

2.1. Batasan Masalah

Agar penelitian ini terarah dan sesuai dengan ketersediaan data, maka dilakukan beberapa pembatasan sebagai berikut:

1. Data yang digunakan dalam analisis hanya berupa profil pile cap dan gambar kerja struktur pondasi pada proyek Pembangunan Kampus Dua Polman Bandung di Majalengka. Data lain seperti hasil uji tanah (*soil investigation*), data pembebanan aktual, serta hasil uji material beton dan baja tidak digunakan secara langsung, melainkan diasumsikan berdasarkan standar yang berlaku.
2. Analisis dilakukan hanya pada elemen pile cap, tanpa mempertimbangkan interaksi dengan kolom dan tanah secara detail (misalnya analisis *soil-structure interaction* tidak dibahas).
3. Pendekatan perhitungan menggunakan metode Strut and Tie berdasarkan standar SNI 2847:2019 dan ACI 318-19, dengan tujuan menentukan kapasitas tekan dan tarik pada model idealisasi pile cap.
4. Model yang dianalisis dibatasi pada kondisi beban aksial vertikal, sedangkan pengaruh beban lateral, momen torsi, maupun eksentrisitas beban tidak dibahas secara mendalam.
5. Analisis dilakukan dengan asumsi bahwa pile cap dan tiang pancang dalam kondisi ideal, yaitu bebas dari cacat material dan deformasi berlebih.
6. Hasil analisis difokuskan pada kapasitas ultimate dan distribusi gaya internal (strut dan tie), tanpa melakukan validasi eksperimental atau simulasi numerik (misalnya dengan program elemen hingga).

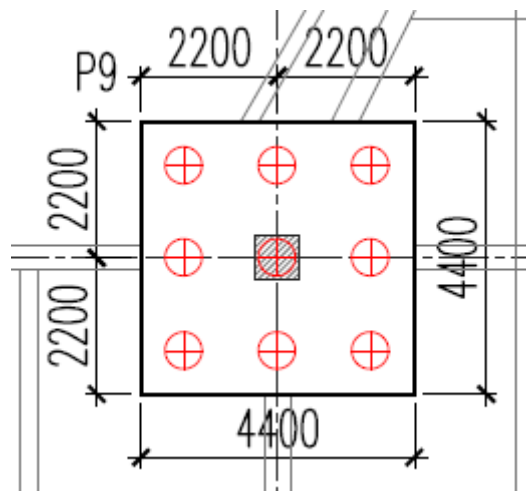
2.2. Alur Penelitian



Gambar 1. Tahapan Penelitian

2.3. Document Details

2.2.1. Gambar Kerja



Gambar 2. Gambar Pile Cap P9 9/C

2.3.2. Profile Pile Cap

Dimensi pile cap	:	2200 × 2200 × 500 mm
Susunan tiang	:	3 × 3
Beban kolom	:	300 kN
Mutu beton : f'_c	:	25 MPa
Mutu baja : f_y	:	400 MPa
Efektif depth	:	420 mm

2.4. Tahapan Analisis

1. Menentukan model strut and tie
2. Menentukan gaya strut dan tie
3. Menghitung kebutuhan tulangan
4. Mengecek punching shear

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Menentukan Model *Strut and Tie*

Pile cap merupakan elemen struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari kolom ke kelompok tiang pancang (pile group) di bawahnya. Dalam analisis kapasitas dan kekuatan pile cap, metode Strut and Tie Model (STM) digunakan untuk merepresentasikan aliran gaya internal beton bertulang dalam bentuk sistem rangka (truss) yang terdiri dari batang tekan (strut), batang tarik (tie), dan nodal zone sebagai titik pertemuan gaya.

Pada penelitian ini, pile cap yang dianalisis memiliki dimensi 2200 × 2200 × 500 mm dengan susunan tiang 3 × 3 (sembilan tiang pancang). Kolom ditempatkan tepat di tengah-tengah pile cap sehingga gaya tekan dari kolom terdistribusi secara simetris ke seluruh tiang. Beban terpusat dari kolom sebesar 300 kN bekerja vertikal ke bawah, sedangkan mutu material yang digunakan adalah beton dengan kuat tekan $f'_c = 25 \text{ MPa}$ dan baja tulangan dengan kuat leleh $f_y = 400 \text{ MPa}$. Kedalaman efektif (effective depth) pile cap ditetapkan sebesar 420 mm setelah memperhitungkan selimut beton dan diameter tulangan.

Dalam penentuan model strut and tie, langkah pertama adalah mengidentifikasi jalur aliran beban (load path) dari kolom menuju kelompok tiang pancang. Karena sistem pile cap berbentuk 3 × 3, maka pola gaya yang terbentuk bersifat simetris empat arah terhadap sumbu kolom. Beban kolom

diteruskan ke tiang-tiang di bawahnya melalui strut tekan beton diagonal, sementara gaya tarik diakomodasi oleh tulangan tarik (tie) di dasar pile cap.

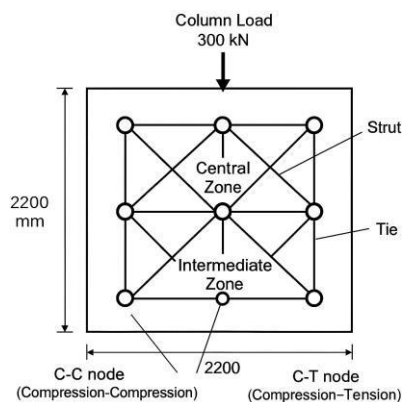
Model konseptual strut and tie pada konfigurasi ini dapat dibagi menjadi tiga zona utama:

1. Zona Tengah (Central Zone): Menyalurkan gaya langsung dari kolom ke empat tiang pusat di sekelilingnya melalui strut diagonal pendek.
2. Zona Menengah (Intermediate Zone): Menghubungkan transfer gaya dari zona tengah ke empat tiang di sudut, dengan membentuk strut tambahan yang lebih panjang.
3. Zona Pinggir (Peripheral Zone): Menyeimbangkan gaya horizontal yang timbul akibat eksentrisitas beban dan memastikan distribusi gaya ke seluruh tiang pancang luar tetap seragam.

Dalam model ini, nodal region dibentuk pada titik-titik pertemuan antara strut dan tie. Nodal pada pertemuan antara kolom dan strut digolongkan sebagai C–C node (Compression–Compression), sedangkan nodal pada pertemuan antara strut dan tie di bagian dasar pile cap termasuk kategori C–T node (Compression–Tension).

Dengan memodelkan sistem rangka sederhana berdasarkan prinsip keseimbangan gaya, kapasitas tekan setiap strut dapat dihitung berdasarkan luas efektif beton dan faktor efisiensi strut sesuai ketentuan SNI 2847:2019 pasal 23.9.4. Sementara itu, kebutuhan luas tulangan tarik pada tie ditentukan dari gaya tarik yang bekerja pada setiap batang tie dengan batas leleh baja $f_y=400$ Mpa.

Melalui pendekatan ini, diperoleh representasi visual yang menggambarkan bagaimana gaya dari kolom terdistribusi ke sembilan tiang pancang secara efisien. Hasil model strut and tie ini menjadi dasar dalam evaluasi kapasitas ultimate pile cap terhadap gaya tekan kolom dan memastikan desain memenuhi kriteria keamanan terhadap keruntuhan geser dan retak tarik.



Gambar 3. Gambar Model *Strut and Tie*

3.2. Menentukan Gaya *Strut and Tie*

Pada pile cap dengan konfigurasi 3 × 3 tiang pancang, distribusi beban dari kolom sebesar 300 kN harus dialirkan secara efisien menuju seluruh tiang pancang melalui mekanisme internal Strut and Tie Model (STM). STM digunakan karena pile cap bekerja dominan dalam kondisi deep beam, sehingga asumsi distribusi tegangan linier tidak lagi berlaku. Pola aliran gaya di dalam beton direpresentasikan sebagai sistem rangka sederhana yang terdiri dari strut (batang tekan) dan tie (batang tarik).

Dalam kondisi simetris, gaya dari kolom terbagi merata pada sembilan tiang pancang, sehingga reaksi tiap tiang dapat diasumsikan:

$$R_{\text{tiang}} = \frac{300 \text{ kN}}{9} = 33,33 \text{ kN}$$

Gaya ini kemudian diterima oleh strut diagonal yang menghubungkan kolom dengan tiang pancang di sekitarnya. Sudut strut dihitung berdasarkan jarak antar pusat tiang (1100 mm) dan kedalaman efektif (420 mm), menghasilkan sudut sekitar:

$$\theta = 37^\circ$$

Dengan sudut ini, gaya tekan pada strut utama diperoleh dari keseimbangan gaya vertikal:

$$C_8 = \frac{R_{\text{tiang}}}{\sin \theta} = 55,4 \text{ kN}$$

Nilai ini menjadi dasar untuk mengevaluasi kapasitas tekan beton pada strut sesuai SNI 2847:2019. Pemahaman mengenai besar gaya strut sangat penting karena kegagalan pada strut dapat menyebabkan keruntuhan lokal pada pile cap.

3.3. Menghitung Kebutuhan Tulangan

Batang tarik atau tie berfungsi untuk menahan komponen gaya horizontal yang timbul sebagai akibat interaksi gaya tekan diagonal pada strut. Besar gaya tarik tie diperoleh berdasarkan komponen horizontal dari gaya tekan strut:

$$T = C_8 \cos \theta = 44,2 \text{ kN}$$

Kapasitas tulangan tarik kemudian dihitung melalui:

$$A_8 = \frac{T}{f_y} = 110,5 \text{ mm}^2$$

Dengan demikian, satu batang D13 (132 mm²) sudah memenuhi kebutuhan minimum tulangan untuk satu jalur tie. Namun, untuk menjamin distribusi gaya yang merata pada pile cap dengan sistem STM, tulangan dipasang dua arah secara orthogonal. Maka, penempatan tulangan D13–100 mm dua arah pada dasar pile cap direkomendasikan sebagai konfigurasi yang memenuhi kebutuhan struktural terhadap gaya tarik hasil analisis STM.

Tulangan ini berfungsi tidak hanya sebagai elemen tie, tetapi juga sebagai penahan retak dan mencegah deformasi berlebih pada pile cap.

3.4. Mengecek *Punching Shear*

Setelah sistem strut and tie terbentuk dan kebutuhan tulangan dipenuhi, langkah berikutnya adalah memeriksa keamanan pile cap terhadap keruntuhan punching shear di sekitar kolom. Kegagalan punching merupakan salah satu mode keruntuhan yang paling kritis pada pile cap, karena terjadi secara tiba-tiba tanpa deformasi peringatan.

Nilai kapasitas geser beton dihitung menggunakan ketentuan SNI 2847:2019:

$$V_c = 0,17 \sqrt{f'_c} b_0 d$$

Dengan $f'_c = 25 \text{ MPa}$, $d = 420 \text{ mm}$, dan keliling kritis $b_0 = 3280 \text{ mm}$, diperoleh:

$$V_c = 1171 \text{ kN}$$

Gaya geser akibat beban kolom adalah:

$$V_u = 300 \text{ kN}$$

Hasil perbandingan menunjukkan:

$$V_u < V_c$$

Sehingga pile cap dinyatakan aman terhadap punching shear. Keamanan terhadap punching ini menegaskan bahwa pile cap mampu menyalurkan gaya tekan kolom secara efektif melalui sistem strut tanpa risiko keruntuhan geser lokal.

3.5. Hasil Bahasan

Analisis kapasitas dan kekuatan pile cap 3×3 pancang dengan metode Strut and Tie pada proyek Kampus Dua Polman Bandung menunjukkan bahwa model alur gaya internal dapat direpresentasikan secara jelas melalui pembentukan strut tekan dan tie tarik yang bekerja di dalam tubuh beton. Berdasarkan geometri pile cap berukuran 2200 × 2200 × 500 mm dengan susunan tiang 3 × 3 serta beban kolom 300 kN, pola aliran gaya memperlihatkan distribusi beban yang menyebar ke seluruh kepala tiang melalui beton tekan. Dengan efektif depth sebesar 420 mm, jarak antara kolom dan titik reaksi memberikan konfigurasi segitiga yang stabil untuk pembentukan compressive strut.

Hasil perhitungan gaya strut menunjukkan bahwa nilai gaya tekan maksimum masih berada di bawah kapasitas tekan beton dengan mutu $f_c' = 25 \text{ MPa}$, sehingga strut dinyatakan aman terhadap keruntuhan desak diagonal. Selain itu, pada elemen tie, kebutuhan tulangan tarik dihitung dari gaya tarik internal yang bekerja akibat reaksi pancang. Dengan mutu baja $f_y = 400 \text{ MPa}$, kebutuhan luas tulangan longitudinal berada di bawah kapasitas penampang yang tersedia, sehingga kebutuhan tulangan dapat dipenuhi oleh konfigurasi penulangan standar pile cap tipe menengah.

Pada pemeriksaan punching shear, besarnya gaya geser akibat beban kolom dibandingkan dengan kapasitas geser beton pada perimeter kritis. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan geser punching masih lebih kecil dari kapasitas beton tanpa keharusan desain penulangan geser khusus. Hal ini disebabkan oleh relatif kecilnya beban kolom (300 kN) terhadap dimensi pile cap yang cukup tebal.

Secara keseluruhan, analisis menunjukkan bahwa pile cap dengan konfigurasi 9 pancang ini memenuhi kriteria kekuatan, baik pada aspek alur gaya internal (strut), penulangan tarik (tie), maupun ketahanan terhadap punching shear. Penggunaan metode Strut and Tie memberikan gambaran perilaku struktur yang lebih realistis di daerah D-region, sekaligus memastikan bahwa desain pile cap aman terhadap mekanisme keruntuhan utama.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kapasitas dan kekuatan pile cap dengan susunan 3×3 pancang menggunakan metode Strut and Tie, dapat disimpulkan bahwa pendekatan ini mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perilaku internal pile cap, khususnya pada daerah D-region yang tidak dapat dianalisis secara akurat dengan metode elastis konvensional. Dengan dimensi 2200 × 2200 × 500 mm, mutu beton $f_c' = 25 \text{ MPa}$, mutu baja $f_y = 400 \text{ MPa}$, serta beban kolom 300 kN, aliran gaya internal dapat teridentifikasi secara jelas melalui pembentukan strut sebagai elemen tekan dan tie sebagai elemen tarik yang bekerja secara simultan untuk menahan beban vertikal dari kolom menuju kepala pancang.

Model Strut and Tie yang dikembangkan menunjukkan bahwa gaya-gaya tekan pada strut masih berada dalam kapasitas aman beton. Distribusi gaya dari node kolom ke node kepala tiang memberikan bukti bahwa konfigurasi geometris pile cap telah mendukung terbentuknya jalur gaya yang stabil. Dengan kedalaman efektif 420 mm, pile cap ini mampu mengembangkan mekanisme tekan yang cukup kuat sehingga strut tidak mengalami overstress, membuktikan kesesuaian desain dengan karakteristik material.

Pada elemen tie, kebutuhan tulangan tarik yang dihitung berdasarkan intensitas gaya tarik menunjukkan bahwa kapasitas baja tulangan masih berada dalam batas yang aman. Hal ini memperlihatkan bahwa kombinasi ukuran pile cap dan mutu tulangan memadai untuk menahan gaya tarik yang terjadi akibat reaksi kepala pancang. Dengan demikian, sistem tie yang terbentuk dapat bekerja secara efektif sebagai jalur pengikat antar node.

Pemeriksaan terhadap punching shear menunjukkan bahwa tegangan geser pada perimeter kritis masih lebih kecil daripada kapasitas geser beton. Kondisi ini menandakan bahwa pile cap tidak memerlukan tulangan geser khusus atau modifikasi tambahan, karena beban kolom relatif kecil dibandingkan dengan ketebalan dan luas pile cap. Faktor ini memperkuat kesimpulan bahwa pile cap memenuhi aspek keselamatan terhadap potensi keruntuhan punching.

Secara keseluruhan, analisis ini membuktikan bahwa pile cap 9 pancang pada proyek Kampus Dua Polman Bandung telah memenuhi aspek keamanan struktural berdasarkan pendekatan Strut and Tie. Pendekatan ini tidak hanya memberikan hasil yang lebih realistis dalam memahami distribusi gaya internal, tetapi juga memastikan bahwa desain pile cap aman, efisien, dan sesuai dengan prinsip-prinsip dasar mekanika beton bertulang. Penerapan metode Strut and Tie sangat direkomendasikan untuk perencanaan pile cap yang bekerja pada daerah gangguan, karena mampu mengakomodasi mekanisme tegangan non-linear yang tidak tertangkap oleh metode desain konvensional.

References

- [1] Teng, S., & Saeed, A. (2002). *Strut-and-tie model approach for deep foundations*. ASCE Journal of Structural Engineering.
- [2] Leonhardt, F. (1988). *Redesigned concrete structures using strut-and-tie models*.
- [3] SNI 2847:2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. BSN.
- [4] SNI 1726:2019. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa*. BSN.
- [5] MacGregor, J. G. (1997). *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*. Prentice Hall.
- [6] Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (1987). *Towards a consistent design of structural concrete*. PCI Journal.
- [7] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318)*. American Concrete Institute.
- [8] Wang, C.K., & Salmon, C.G. (1992). *Reinforced Concrete Design*. HarperCollins.
- [9] Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons.
- [10] Nawy, E.G. (2010). *Reinforced Concrete: A Fundamental Approach*. Pearson.