

KINERJA STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN PELAT BAJA DAN PROFIL SIKU PADA KOLOM DARI GEDUNG PERKANTORAN 5 TINGKAT

I Ketut Sudarsana, I Gede Adi Susila dan Luh Putu Eka Anggreni

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana

e-mail: ksudarsana@unud.ac.id

Abstrak: Perkuatan kolom dengan penambahan tulangan eksternal berupa pelat baja atau profil siku diperlukan untuk meningkat kapasitas nominal dari kolom dan juga daktilitasnya. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja struktur beton bertulang dengan perkuatan kolom dengan kombinasi pelat baja penuh dan profil siku pada bagian *end span* dan perkuatan profil siku pada bagian *mid span*. Enam buah model struktur gedung lima tingkat dengan denah beraturan dianalisis yaitu Model ME adalah model struktur eksisting tanpa perkuatan, M1, M2, M3, M4 dan M5 adalah model struktur eksisting (ME) yang diperkuat pada seluruh kolom di lantai 1, lantai 1 dan 2, lantai 1 sampai dengan 3, lantai 1 sampai 4, dan lantai 1 sampai 5 diperkuat. Denah struktur dibuat tipikal pada semua tingkat, terdiri dari 3 bentang arah X dan Y dengan panjang bentang sebesar 7,5 m dan tinggi tiap lantainya sebesar 4 m. Fungsi bangunan berupa perkantoran yang berada di wilayah dengan kelas situs D dengan kondisi tanah sedang. Pemodelan dan analisis pushover semua model struktur dilakukan dengan bantuan program SAP2000 ver.20 untuk mengetahui level kinerja struktur. Evaluasi kinerja struktur berdasarkan FEMA 440 *Displacement modification*. Hasil yang diperoleh adalah simpangan yang terjadi pada seluruh model akibat beban gempa telah memenuhi persyaratan simpangan ijin. Gaya geser dasar, kekakuan, dan daktilitas semua model struktur dibandingkan dengan model ME diperoleh perkuatan pada kolom dapat meningkatkan gaya geser pada model M1, M2, M3, M4 dan M5 masing-masing sebesar 4%, 7%, 8%, 13%, dan 14% untuk sumbu X dan sebesar 8%, 7%, 13%, 13%, dan 15% untuk sumbu Y. Perpindahan yang ditargetkan berdasarkan FEMA 440 paling besar terjadi pada model M1, diikuti oleh ME, M4, M5, M2, dan M3. Level kinerja struktur arah X dan arah Y untuk seluruh model berdasarkan target perpindahan FEMA 440 memiliki level kinerja *beyond to E (failure)*. Selain itu, kekakuan struktur meningkat sebesar 11% sampai dengan 27% untuk seluruh model. Daktilitas terbesar dihasilkan oleh M4 pada arah X yaitu sebesar 7,41, sedangkan pada arah Y daktilitas terbesar terjadi pada M5 sebesar 7,66.

Kata kunci: kinerja, kolom, pelat baja, perkuatan, *steel jacketing*, struktur beton bertulang.

STRUCTURAL PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE FRAMES STRENGTHENED WITH STEEL PLATE AND ANGLE PROFILE OF A FIVE STOREY OFFICE BUILDING.

Abstract: Strengthening of columns with the addition of an external reinforcement in the form of a steel plate or steel angle profile is needed to increase the nominal capacity and ductility of the columns. This research was carried out to investigate the performance of reinforced concrete structures with strengthened column with a combination of full steel plate and steel angle at the end span and the steel angle profile at the mid span. Six models of a five-level building structure with regular plan were analyzed, namely ME Model is a model of an existing structure without strengthening, M1, M2, M3, M4 and M5 are the existing structure model (ME) which are all columns of the 1st floor, 1st and 2nd floors, floors 1 to 3, floors 1 to 4, and floors 1 to 5 are strengthened, respectively. The structural plans were typical at all levels, consisting of 3 spans in X and Y directions with a span length of 7.5 m and the floor to floor height of 4 m. The function of the building is an office building located at class D sites with medium soil conditions. Modeling and pushover analysis of all structural models was carried out with the help of the SAP2000 program ver.20 to find out the performance level of the structure. Structural performance evaluation based on FEMA 440 Displacement modification. The analysis results show that all models have met the required allowable lateral deformation due to earthquake loads. The base shear force, stiffness, and ductility of all structural models compared to that of the ME model obtained by strengthening the columns can increase the shear forces in the models M1, M2, M3, M4 and M5 by 4%, 7%, 8%, 13%, . and 14% for the X axis and 8%, 7%, 13%, 13%, and 15% for the Y axis, respectively. The largest targeted displacement based on FEMA 440 is the M1 model, and followed by ME, M4, M5, M2, and M3. The performance level in X and Y direction for the entire models is beyond to E (failure). In addition, the structural rigidity increases by 11% to 27% for all models. The highest ductility is given by M4 in the direction of X, which is equal to 7.41, while in the direction of Y the highest ductility occurs at M5 of 7.66.

Keywords: performance, column, steel plate, reinforcement, *steel jacketing*, reinforced concrete structure.

PENDAHULUAN

Perubahan fungsi bangunan yang sudah ada, perubahan peraturan perencanaan, penurunan kualitas material dan terjadinya bencana alam (gempa) dapat mengakibatkan terjadinya ketidaksesuaian antara kapasitas dan beban yang bekerja. Hal ini dapat mengakibatkan kerusakan maupun kegagalan struktur sehingga berpengaruh terhadap kinerja struktur bangunan. Defisiensi kekuatan atau kapasitas struktur dapat dihindari dengan menambahkan perkuatan baik itu pada bangunannya maupun pada elemen struktur. Kolom adalah elemen yang sangat penting dalam suatu bangunan karena runtuhnya suatu kolom dapat menyebabkan keruntuhan pada lantai yang ditumpu oleh kolom bersangkutan maupun keruntuhan struktur secara keseluruhan. Pada penelitian ini dipilih perkuatan *steel jacketing* pada kolom dengan menggunakan kombinasi baja siku dan pelat dengan sambungan las dan baut diperhitungkan sebagai perkuatan untuk meningkatkan kapasitas kolom. *Steel jacketing* dipilih karena mampu meningkatkan kapasitas kolom tanpa memberikan perubahan dimensi dan berat struktur yang signifikan, selain itu proses pelaksanaannya lebih mudah karena tidak memerlukan bekesting.

Saraswathi (2016) membuktikan bahwa hasil pengujian kolom beton bertulang dengan perkuatan pelat baja siku dapat meningkatkan kapasitas kolom dalam memikul beban aksial sebesar 40%. Penelitian yang dilakukan oleh Belal et al. (2014), dengan metode perkuatan *steel jacketing* dapat meningkatkan kapasitas aksial kolom beton bertulang minimal sebesar 20%. Penelitian serupa dilakukan oleh Sudarsana (2016), dimana perkuatan eksternal elemen struktur (balok dan kolom) dengan pelat baja mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan struktur. Sudarsana et al. (2017), melakukan analisis dimana dengan menggunakan rasio perkuatan pelat baja sebesar 4,7% dapat meningkatkan kapasitas dan daktilitas kolom secara signifikan tanpa memperhatikan susunan pelat baja.

Penelitian terkait perkuatan kolom dengan menggunakan pelat baja telah banyak dilakukan, tetapi belum diketahui seberapa besar perkuatan tersebut mempengaruhi perilaku dan kinerja struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini membahas kinerja struktur beton bertulang dengan perkuatan pelat baja pada kolom.

TINJAUAN PUSTAKA

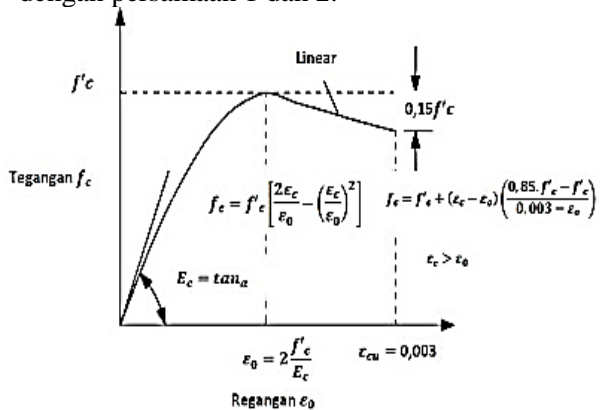
Kurva Tegangan Regangan Beton

Perilaku beton bertulang dapat digambarkan melalui kurva tegangan dan regangan. Dengan adanya pengekangan pada beton dapat

meningkatkan kapasitas kolom untuk memikul kombinasi beban aksial dan lentur. Perkuatan pelat baja penuh pada bagian *end span* memberikan efek pengekangan pada kolom beton. Pada penelitian ini, dalam menggambarkan kurva tegangan regangan beton digunakan model Hognestad (1951) untuk beton tanpa pengaruh pengekangan dan model Sakino (1994) untuk beton dengan pengekangan pelat baja penuh.

a. Tanpa pengaruh pengekangan

Model Hognestad (1951) digunakan untuk menentukan kurva tegangan regangan beton normal dimana model ini telah dapat diterima secara umum karena memberikan hasil yang cukup akurat. Model ini memiliki 2 bagian kurva yaitu daerah OA dimana peningkatan beban akan menambah regangan dan daerah AB dimana regangan tetap meningkat meskipun beban diturunkan yang ditampilkan pada Gambar 1. Nilai tegangan dengan menggunakan model Sakino (1994) dihitung dengan persamaan 1 dan 2.



Gambar 1. Kurva tegangan regangan model Hognestad (1951)
Sumber: Park & Paulay (1975)

Untuk daerah OA (bagian meningkat):

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \tag{1}$$

Untuk daerah AB (bagian menurun):

$$f_c = f'_c (1 - 100(\varepsilon_c - \varepsilon_0)) \tag{2}$$

b. Dengan pengaruh pengekangan pelat baja

Sakino (1994) menghasilkan rumusan untuk menghitung tegangan regangan beton dengan perkuatan pelat baja sebagai berikut.

$$f_c = K \cdot f'_c \frac{a \cdot x + (b-1)x^2}{1 + (a-2)x + bx^2} \tag{3}$$

Dimana: $x = \frac{\varepsilon c}{\varepsilon c_0}$ \tag{4}

$$K = \frac{f'_{cc}}{f'_c} = 1 + 11,5 \frac{f_y}{f'_c} \left(\frac{t}{B - 2t} \right) \tag{5}$$

$$\rho_t = \left(\frac{B}{B-2t} \right)^2 - 1 \tag{6}$$

$$a = \frac{E_c}{E_{sec}} = \frac{E_c \cdot \epsilon_{co}}{K \cdot f'_c} \tag{7}$$

$$\frac{\epsilon_{co}}{\epsilon_o} = \begin{cases} 1 + 4,7(K-1), & K \leq 1,5 \\ 3,35 + 20(K-15), & K > 1,5 \end{cases} \tag{8}$$

$$b = 1,5 - 0,017 f'_c + 2,4 \sqrt{\frac{(K-1)f'_c}{23}} \tag{9}$$

$$\epsilon_o = 0,94 (f'_c)^{1/4} \cdot 10^{-3} \tag{10}$$

$$E_c = (0,69 + 0,332 \sqrt{f'_c}) \times 10^4 \tag{11}$$

Pendefinisian Sendi Plastis

Sebelum dilakukan analisis *pushover*, terlebih dahulu dilakukan pendefinisian sendi plastis yang memberikan gambaran bagian-bagian dari elemen struktur yang lemah. Pendefinisian sendi plastis pada balok adalah *default concrete beam* P dan M3, sedangkan untuk kolom menggunakan *default concrete column* tipe P-M2-M3. Sendi plastis didefinisikan pada ujung-ujung balok dan kolom. Pada kolom dengan perkuatan, sendi plastis didefinisikan pada ujung-ujung kolom yang diperkuat menggunakan pelat baja penuh. Kolom dengan perkuatan merupakan kolom komposit, akan tetapi pada *software* tidak terdapat pendefinisian sendi plastis untuk kolom komposit. Oleh karena itu untuk meninjau kinerja struktur, kolom komposit dimodelkan sebagai kolom beton dengan *f'c* beton dengan pengekangan pelat baja penuh model Sakino (1994). Kolom beton pengganti tersebut dimodifikasi *set modifiernya* agar memiliki penampang yang sama dengan kolom komposit melalui yang berupa luas penampang, momen inersia, berat, *torsional constant*.

Kinerja Struktur

Level kinerja struktur diperoleh melalui analisis *pushover*, dimana analisis ini menghasilkan grafik hubungan gaya geser dasar dan perpindahan. Perpindahan target digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur yang didasarkan pada perpindahan dan gaya. Pada penelitian ini, kinerja struktur ditentukan dengan menggunakan metode *Displacement Modification* FEMA 440 yang merupakan modifikasi dari FEMA 356 (American Society of Civil Engineers, 2000). *Performance levels* berdasarkan FEMA 356 dari respons yang terkecil adalah sebagai berikut.

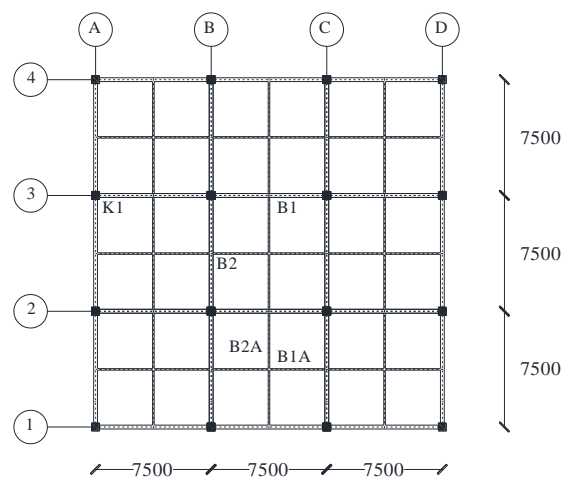
- a. *Full Operational* (FO), ditandai dengan tidak terjadinya kerusakan pada struktur baik kerusakan struktural maupun nonstruktural.
- b. *Immediatety Occupancy* (IO), terjadi kerusakan minor, namun tidak mengganggu pemakai bangunan.

- c. *Life Safety* (LS), struktur mengalami kerusakan sedang tetapi bangunan masih stabil dan mampu melindungi pemakainya
- d. *Collapse Prevention* (CP), struktur mengalami kerusakan parah baik struktural maupun nonstruktural tetapi tidak roboh atau runtuh.

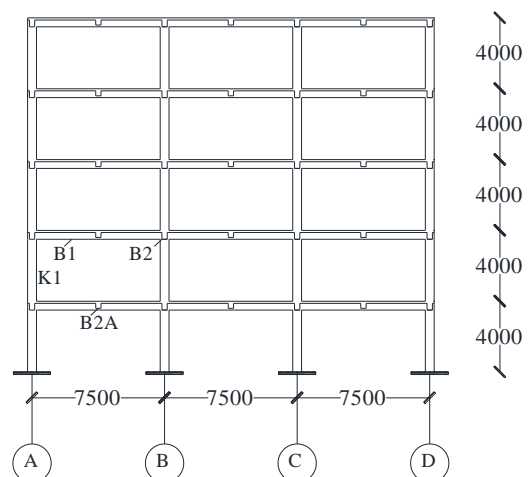
METODE PENELITIAN

Data Struktur

Struktur yang ditinjau adalah gedung struktur beton bertulang yang dirancang dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dengan fungsi sebagai kantor yang berada di wilayah dengan kelas situs D pada lokasi tanah sedang. Gedung tersebut terdiri dari lima buah lantai yang terdiri dari 3 bentang balok pada arah X dan 3 bentang balok pada arah Y dengan panjang bentang balok masing-masing 7,5m dengan denah tipikal serta tinggi lantai 4 m. Denah tipikal dan portal untuk kelima lantai dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Denah struktur tipikal Lt 1-5



Gambar 3. Struktur portal gedung

Berdasarkan Gambar 2 dan 3, denah yang ditinjau tidak terdapat tangga ataupun lift. Posisi tangga maupun lift diasumsikan tidak ada pada bagian denah ini. Pada penelitian ini dibuat 6 buah model struktur yang terdiri dari:

- a) Model eksisting (ME) adalah model struktur eksisting yang menggunakan kolom-kolom beton di seluruh tingkatnya.
- b) Model 1 (M1) adalah model struktur yang seluruh kolom pada lantai dasarnya diperkuat dengan pelat baja dan baja siku, sedangkan lantai 2-5 tetap menggunakan kolom beton.
- c) Model 2 (M2) adalah model struktur yang seluruh kolom pada lantai 1 dan 2 diperkuat dengan pelat baja dan baja siku.
- d) Model 3 (M3) adalah model struktur yang seluruh kolom pada lantai 1,2 dan 3 diperkuat dengan pelat baja dan baja siku.
- e) Model 4 (M4) adalah model struktur yang seluruh kolom pada lantai 1,2,3 dan 4 diperkuat dengan pelat baja dan baja siku.
- f) Model 5 (M5) adalah model struktur yang seluruh kolom pada tingkat 1-5 diperkuat dengan pelat baja dan baja siku.

Perkuatan ditambahkan pada seluruh kolom pada masing-masing tingkat untuk mendapatkan pengaruh perkuatan terhadap kinerja struktur.

Data Material

- a) Beton
 - Kuat tekan beton (f^c) : 20 MPa
 - Modulus elastisitas beton (E_c) : 21019 MPa
 - Berat jenis beton bertulang : 2400 kg/m³
- b) Baja tulangan
 - Berat jenis baja : 7850 kg/m³
 - Modulus elastisitas baja : 200000 MPa
 - Fy tulangan longitudinal (f_y) : 410 MPa
 - Fy tulangan transversal (f_y) : 290 MPa
- c) Perkuatan pelat baja
 - Berat jenis baja : 7850 kg/m³
 - Modulus elastisitas baja : 200000 MPa
 - Tebal pelat baja perkuatan : 8 mm
 - Kuat leleh (f_y) : 410 MPa

Data Pembebanan

Beban yang bekerja pada struktur adalah heban mati, beban mati tambahan, beban hidup sesuai dengan SNI 1727:2013 (Badan Standardisasi Nasional, 2013), dan beban gempa sesuai dengan SNI 1726:2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012). Beban gempa yang digunakan adalah respons spektrum dan beban hidup yang bekerja pada pelat lantai dengan fungsi gedung sebagai kantor adalah sebesar 2.4 kN/m². Sedangkan kombinasi beban

yang digunakan sesuai dengan SNI 1726:2012 (Badan Standardisasi Nasional, 2012), yaitu:

- 1. 1.4D
- 2. 1,2D + 1,6L
- 3. 1,2D + 1,0E + L
- 4. 0,9D + 1,0E

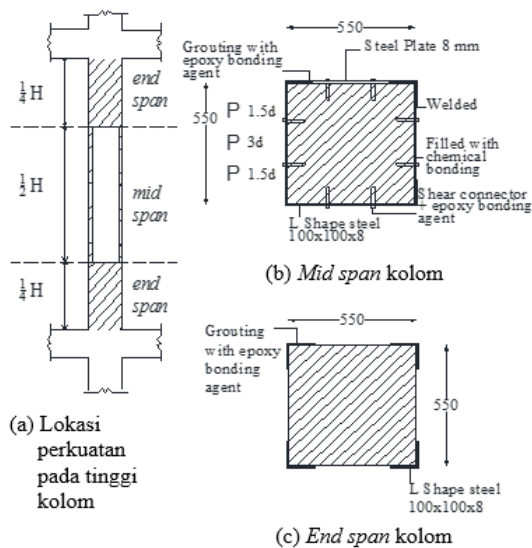
Penampang Kolom Dengan Perkuatan

Pada penelitian ini, perkuatan ditambahkan pada seluruh kolom masing-masing lantai. Baja siku diteruskan sepanjang kolom, sedangkan pada bagian tumpuan (*end span*) sepanjang 1/4 tinggi kolom ditambahkan perkuatan pelat baja. Antara kolom eksisting dan perkuatan baja dihubungkan dengan menggunakan baut dan pengelasan pada sambungan antar pelat baja. Untuk mempermudah pemilihan baja siku, tidak digunakan profil dari tabel profil baja tetapi berdasarkan dari keperluan pemasangan baut dan dikondisikan agar tidak mengenai tulangan. Oleh karena itu, lebar minimum dari profil dihitung berdasarkan penjumlahan tebal selimut, dimensi tulangan, dimensi baut dan jarak tepi minimum baut. Jadi, digunakan baja siku dengan dimensi 100x100x8 mm dan pelat baja setebal 8 mm sebagai perkuatan. Kolom dengan perkuatan pelat baja ini dimodelkan sebagai *frame*. Untuk mendefinisikan *section* kolom dengan perkuatan digunakan *section designer*. Penampang kolom dengan perkuatan pelat baja dan pelat baja siku ditampilkan pada Gambar 4.

Perkuatan pelat baja penuh ditambahkan pada daerah tumpuan karena gaya-gaya (geser dan momen) akibat beban gempa yang bekerja pada bagian *end span* lebih besar dan bekerja bolak balik. Dengan adanya pengeangan oleh pelat baja mampu meningkatkan kapasitas kolom sehingga dapat terhindar dari keruntuhan.

Tabel 1 Dimensi dan penulangan elemen struktur

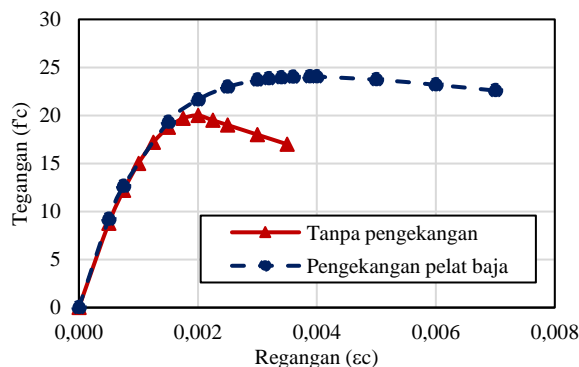
Elemen Struktur	ID	B (mm)	H (mm)	End Span		Mid Span	
				Top	Bottom	Top	Bottom
BI lantai	B1	400	600	6D22	3D22	3D22	4D22
BI atap	B2	350	500	5D16	3D16	3D16	5D16
BA lantai	B3	250	350	5D13	3D13	3D13	3D13
BA atap	B4	200	300	4D13	2D13	2D13	2D13
Kolom	K1	550	550	20D22			



Gambar 4. Penampang kolom dengan perkuatan

HASIL DAN PEMBAHASAN Kurva Tegangan Regangan Beton

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, maka perbandingan kurva tegangan regangan antara beton tanpa pengekanan dengan beton akibat pengekanan dengan pelat baja penuh dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan kurva tegangan regangan beton tanpa dan dengan pengaruh pengekanan

Kurva tegangan regangan pada Gambar 2 menunjukkan bahwa tegangan puncak ($f'c$) beton dengan memperhitungkan pengekanan pelat baja penuh lebih tinggi dan regangan yang dihasilkan lebih panjang dibandingkan dengan beton tanpa pengaruh pengekanan. Kuat tekan beton dengan model model Hognestad (1951) digunakan sebagai material untuk kolom, balok, dan pelat, sedangkan $f'c$ model Sakino (1994) digunakan sebagai material kolom beton yang merupakan pengganti kolom dengan perkuatan pelat baja penuh. Tegangan puncak untuk model Hognestad diperoleh sebesar 20 MPa, sedangkan dengan model Sakino diperoleh 24.031 MPa.

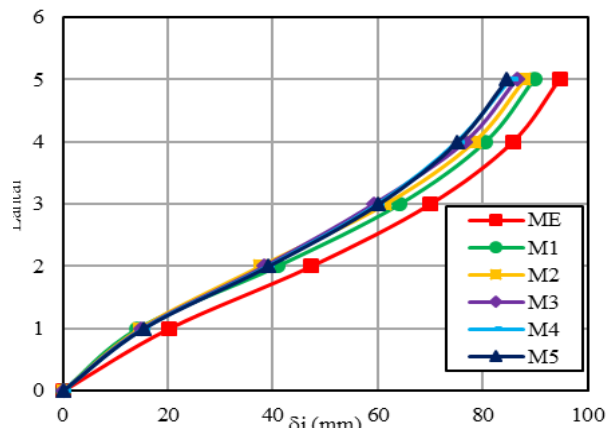
Dimensi Dan Detail Tulangan Elemen Struktur

Dimensi dan detail penulangan untuk balok dan kolom baik arah X maupun arah Y adalah sama untuk seluruh lantai. Dimensi dan detail penulangan elemen struktur disajikan dalam

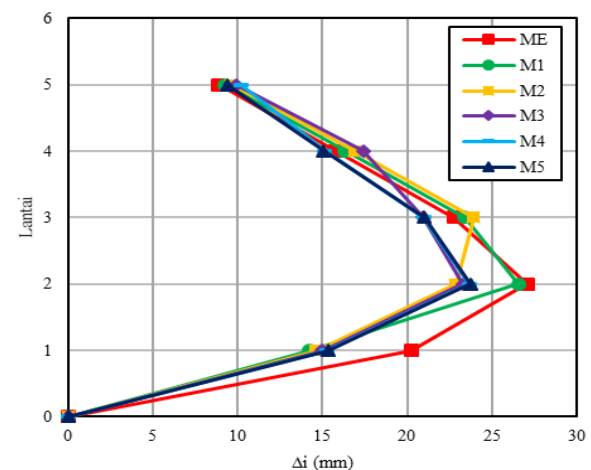
Tabel 1.

Simpangan Struktur dan Simpangan Antar Lantai

Simpangan yang ditinjau adalah simpangan struktur akibat beban gempa. Struktur memiliki bentuk yang simetris, simpangan yang dihasilkan pada arah X dan Y mempunyai nilai yang menyerupai sehingga hanya ditampilkan simpangan untuk arah X. Simpangan struktur dan simpangan antar tingkat untuk seluruh model disajikan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Simpangan struktur arah X akibat beban gempa arah X



Gambar 7. Simpangan antar tingkat arah X akibat beban gempa arah X

Simpangan struktur model eksisting dengan model yang diperkuat memiliki perbedaan yang cukup besar. Dengan ditambahkannya perkuatan pada seluruh kolom lantai satu, simpangan struktur

berkurang cukup besar. Sedangkan simpangan struktur antara M1, M2, M3, M4, dan M5 tidak terjadi perbedaan yang signifikan. Model M4 dan M5 memiliki simpangan struktur yang nilainya menyerupai, sedangkan diantara model yang diperkuat simpangan struktur terbesar terjadi pada M1.

Simpangan yang dihasilkan oleh keenam model struktur telah memenuhi persyaratan simpangan ijin yang tertera dalam SNI 1726:2012 yaitu 0.02 h_{sx} (80mm) (Badan Standardisasi Nasional, 2012). Simpangan antar lantai terbesar pada model eksisting terdapat pada lantai 2 yaitu sebesar 27,06 mm, sedangkan simpangan yang terjadi pada lantai dasar adalah 20,24 mm. Dengan ditambahkannya perkuatan pada seluruh kolom pada lantai dasar (M1) menyebabkan simpangan pada lantai dasar berkurang sebesar 30% dibandingkan dengan ME, sedangkan pada lantai 3,4,5 simpangan mengalami sedikit peningkatan. Pada model M2, dimana seluruh kolom lantai 1 dan 2 diperkuat menyebabkan simpangan lantai berkurang sebesar 27% dan 15% masing-masing pada lantai 1 dan 2. Simpangan pada lantai 3 berkurang sebesar 8% pada M3, sedangkan pada lantai 1 dan 2 nilai simpangannya menyerupai M1 dan M2. Dengan itambahkannya perkuatan pada lantai 1-4 dan 1-5 tidak mengurangi simpangan yang terjadi pada lantai 4 dan 5 secara signifikan.

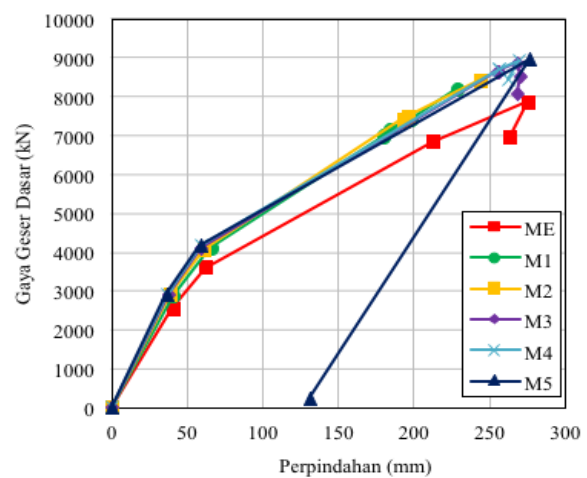
Kinerja Struktur

Kolom yang diperkuat dengan pelat baja penuh merupakan kolom komposit. Pemodelan sendi plastis pada kolom komposit dilakukan dengan menggantikan terlebih dahulu kolom komposit dengan kolom beton dengan f'c beton terkekang menurut model Sakino (1994). Kemudian kolom beton pengganti tersebut dimodelkan sendi plastis. Section properties dari kolom beton pengganti dibandingkan dengan section properties dari kolom komposit yang digantikannya. Selanjutnya dari perbandingan tersebut didapatkan rasio yang merupakan property modifiers. Hal ini dilakukan untuk dapat memodelkan perilaku sendi plastis kolom komposit yang belum ada pada software.

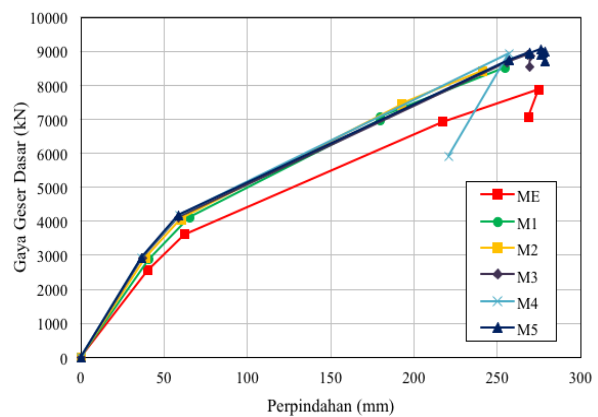
Analisis pushover menghasilkan kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan atap (kurva pushover) untuk masing-masing model akibat gaya dorong arah X (Push X) dan gaya dorong arah Y (Push Y) yang masing-masing disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Pada Gambar 8 dan 9 menggambarkan perbandingan kurva pushover arah X dan Y. Model M5 mampu menerima gaya dorong yang terbesar baik itu akibat Push X maupun Push Y yaitu sebesar

8979 kN dan 9059 kN. Perpindahan atap yang dihasilkan pada arah X dan Y sebesar 276 mm. Kurva yang dihasilkan oleh model eksisting dan model yang diperkuat memiliki perbedaan yang cukup besar, sedangkan antara M1, M2, M3, M4 dan M5 kurva *pushover* terlihat berhimpit namun memiliki kapasitas gaya dorong yang berbeda-beda. Hal tersebut berkaitan dengan pendefinisian sendi plastis kolom komposit yang pada tugas akhir ini kolom komposit dimodelkan sebagai kolom beton. Seiring dengan ditambahkannya perkuatan di setiap lantai, gaya dorong yang mampu diterima semakin besar dan simpangan maksimum yang dihasilkan juga semakin besar.



Gambar 8. Perbandingan kurva pushover arah X akibat beban gempa arah X



Gambar 9. Perbandingan kurva pushover arah X akibat beban gempa arah X

Target Perpindahan

Target perpindahan (δ_t) adalah estimasi dari perpindahan maksimum yang mungkin terjadi pada titik kontrol pada atap akibat beban gempa yang diberikan. Metode yang digunakan dalam menentukan target perpindahan dalam penelitian ini adalah FEMA 440 (American Society of Civil Engineers, 2000). Hasil target perpindahan baik

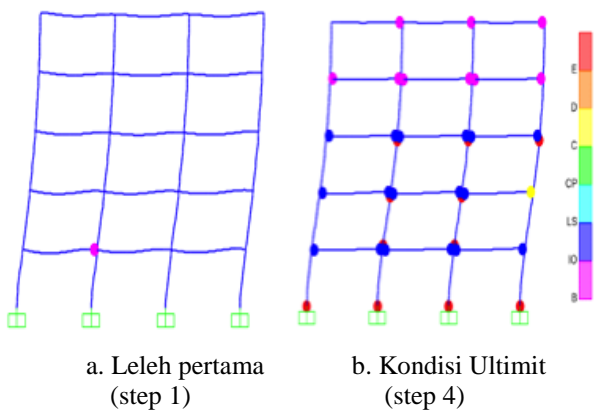
pada arah X dan arah Y memiliki nilai yang hampir sama, sehingga hanya ditampilkan target perpindahan pada arah X. Parameter pada metode ini telah tersedia pada SAP2000 ver.20 dan telah dihitung setelah melakukan analisis statis nonlinier pushover, disajikan pada Tabel 2. Perpindahan target terbesar terjadi pada M1 baik untuk arah x, begitu pula dengan gaya geser dasar yang mampu dipikul oleh struktur. Model M3 dan M2 memiliki perpindahan yang menyerupai tetapi nilai gaya gesernya berbeda, sedangkan model M4 dan M5 memiliki nilai gaya geser dan target perpindahan yang sama sehingga kekakuan strukturnya sama. Model M2 menghasilkan perpindahan dan gaya geser dasar yang terkecil, kemudian diikuti M3, M4 dan M5.

Tabel 2. Target perpindahan menurut FEMA 440 DM

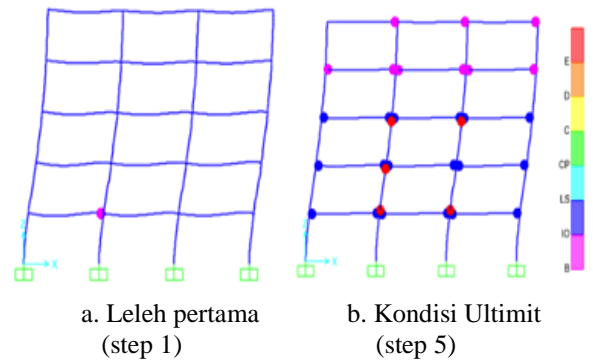
Model Struktur	δ_t (mm)	Vt (kN)
ME	208.40	6754
M1	207.95	7622
M2	203.40	7673
M3	204.43	7495
M4	206.20	7578
M5	206.34	7578

Mekanisme Sendi Plastis

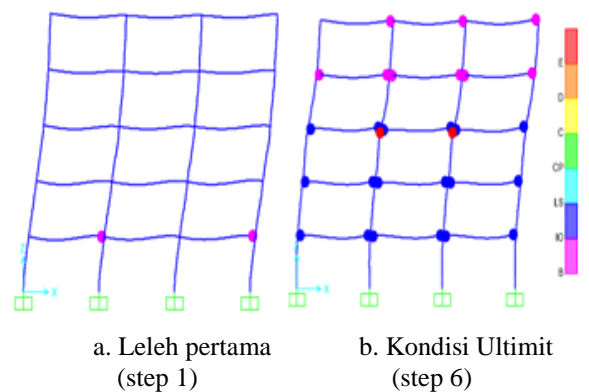
Mekanisme terjadinya sendi plastis pada elemen struktur menentukan pola keruntuhan struktur dan target perpindahan menentukan level kinerja struktur. disajikan pula skema keelehan yang terjadi pada struktur dimulai dari terbentuknya sendi plastis pertama dan sendi plastis yang terbentuk pada saat mencapai kondisi ultimit. Tahapan terjadinya sendi-sendi plastis dari hasil analisis pushover untuk masing-masing model baik arah X maupun Y ditampilkan pada Gambar 10 sampai Gambar 15.



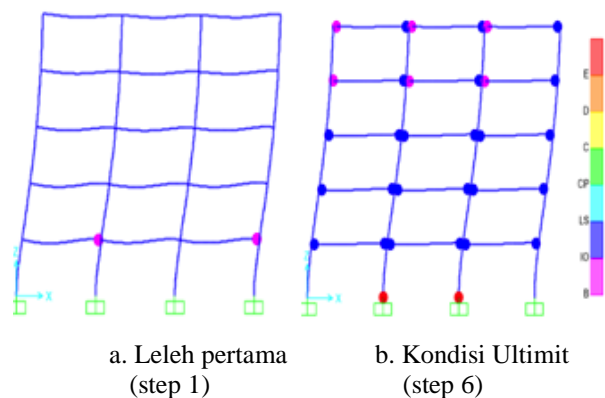
Gambar 10. Tahapan keelehan model ME akibat Push X



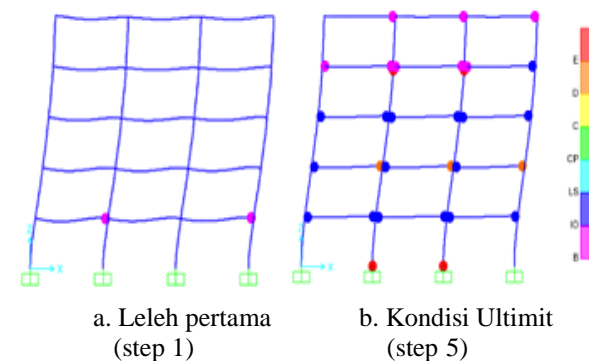
Gambar 11. Tahapan keelehan model M1 akibat Push X



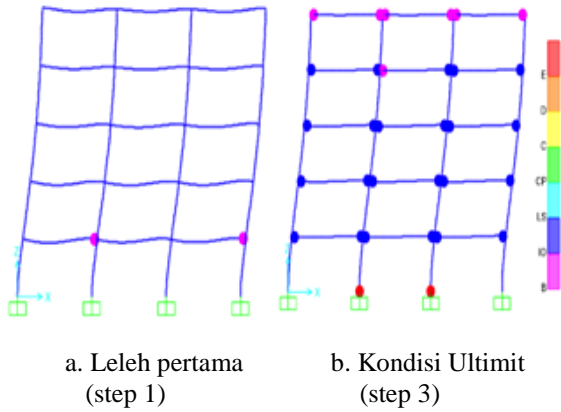
Gambar 12. Tahapan keelehan model M2 akibat Push X



Gambar 13. Tahapan keelehan model M3 akibat Push X



Gambar 14. Tahapan keelehan model M4 akibat Push X



Gambar 15. Tahapan kelelahan model M5 akibat Push X

Pada model eksisting saat kondisi ultimit hampir seluruh bagian bawah kolom mengalami *collapse*. Pada M1 dan M2 tidak terjadi *collapse* pada lantai dasar, tetapi pada model M3, M4, M5 terbentuk 4 sendi plastis pada bagian bawah kolom lantai dasar. Perkuatan yang diberikan sama untuk seluruh kolom baik kolom eksterior maupun kolom interior. Akan tetapi, berdasarkan analisis yang telah dilakukan perkuatan tersebut belum cukup untuk kolom interior, hal tersebut ditunjukkan dari terbentuknya 4 sendi plastis dengan level kinerja E, sedangkan pada kolom lainnya tidak terbentuk sendi plastis.

Evaluasi Kinerja Struktur

Dari perpindahan target, selanjutnya dapat ditentukan level kinerja struktur. Level kinerja struktur arah X dan arah Y untuk seluruh model disajikan dalam

. Berdasarkan target perpindahan FEMA 440 (American Society of Civil Engineers, 2000), seluruh model memiliki level kinerja *beyond to E (failure)* yang artinya struktur mengalami keruntuhan akibat tidak mampu menerima beban yang diberikan.

Berdasarkan , seluruh model baik model eksisting dan model dengan perkuatan pada kolom berada dalam level kinerja *beyond E*. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan perkuatan pada penelitian ini belum mampu membuat struktur berada dalam level kinerja yang aman, akan tetapi dengan adanya perkuatan jumlah sendi plastis titik E berkurang.

Tabel 3. Evaluasi kinerja struktur menurut FEMA 440

Model Struktur	δ_t (mm)	V_t (kN)	Jml Sendi Plastis	Level Kinerja
Arah X				
ME	208,22	6769	24	Failure
M1	211,19	7895	13	Failure
M2	204,09	7673	12	Failure
M3	204,41	7494	12	Failure
M4	206,21	7579	4	Failure
M5	206,33	7580	4	Failure
Arah Y				
ME	208,41	6754	24	Failure
M1	207,95	7622	22	Failure
M2	203,45	7673	12	Failure
M3	204,43	7494	12	Failure
M4	206,23	7578	4	Failure
M5	206,34	7578	4	Failure

Gaya Geser Dasar

Gaya geser dasar yang ditinjau yaitu gaya geser dasar pada saat struktur mengalami kondisi ultimit (V_u) akibat beban pada analisis statik nonlinear *pushover*. Gaya geser dasar masing-masing model dengan perkuatan dibandingkan dengan model eksisting untuk arah X dan Y. Perbandingan gaya geser dasar ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan gaya geser dasar seluruh model

Model Struktur	Arah X		Arah Y	
	Gaya Geser Dasar (kN)	Persentase (%)	Gaya Geser Dasar (kN)	Persentase (%)
ME	7891	100%	7888	100%
M1	8217	104%	8515	108%
M2	8434	107%	8411	107%
M3	8542	108%	8901	113%
M4	8946	113%	8940	113%
M5	8986	114%	9059	115%

Gaya geser dasar ultimit yang dihasilkan dari analisis *pushover* terbesar dihasilkan oleh M4 yang mana mengalami peningkatan sebesar 14% pada arah X dan 15% pada arah Y jika dibandingkan dengan model eksisting. Dengan penambahan perkuatan pada lantai 1 hanya meningkatkan kapasitas struktur dalam memikul beban dorong sebesar 4% arah X dan 8% arah Y. Model M2 dan M4 memiliki gaya geser dasar yang sama pada arah X dan Y. Peningkatan gaya geser secara signifikan terjadi ketika struktur eksisting ditambahkan perkuatan pada kolom di seluruh lantainya.

Kekakuan Struktur

Kekakuan struktur menggambarkan besarnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan satu satuan

perpindahan. Kekakuan struktur yang ditinjau adalah kekakuan pada kondisi elastis struktur yang diperoleh dari perbandingan gaya geser dasar (V_y) dan perpindahan struktur (δy) pada kondisi leleh. Kekakuan struktur untuk seluruh model disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kekakuan struktur seluruh model

Model Struktur	Arah X			
	δy (mm)	V_y (kN)	Kekakuan Struktur (kN/mm)	Persentase (%)
ME	40,07	2562	63,95	100%
M1	40,46	2876	71,08	111%
M2	38,64	2912	75,34	118%
M3	37,21	2924	78,58	123%
M4	36,32	2926	80,56	126%
M5	36,02	2924	81,17	127%
Arah Y				
ME	40,07	2562	63,95	100%
M1	40,47	2877	71,08	111%
M2	38,65	2912	75,34	118%
M3	37,21	2924	78,58	123%
M4	36,32	2926	80,56	126%
M5	36,02	2924	81,17	127%

Berdasarkan Tabel 4, menunjukkan bahwa dengan penambahan kekuatan pada kolom meningkatkan kekakuan struktur minimal sebesar 11%. Kekakuan struktur pada seluruh model memiliki nilai kekakuan yang sama untuk arah X dan Y. Kekakuan terbesar dihasilkan pada model M5 sebesar 81.17 kN/mm, yang mana pada model ini kolom seluruh lantai diperkuat. Kekakuan pada model M4 dan M5 mengalami peningkatan yang signifikan jika dibandingkan dengan model eksisting, yaitu sebesar 26% dan 27%. Model M1 memiliki kekakuan terkecil diantara model yang diperkuat lainnya.

Daktilitas Perpindahan Struktur

Daktilitas struktur menggambarkan kemampuan struktur dalam berdeformasi secara inelastis pasca terjadinya leleh pada elemen struktur. Nilai daktilitas struktur diperoleh dengan membandingkan simpangan maksimum struktur sebelum keruntuhan (δu) dengan simpangan struktur saat terjadinya leleh pertama (δy). Daktilitas perpindahan struktur ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Daktilitas perpindahan struktur

Model Struktur	Arah X		
	δy (mm)	δu (mm)	Daktilitas Struktur
ME	40,07	274,91	6,86
M1	40,46	228,91	5,66
M2	38,64	243,40	6,30
M3	37,21	270,17	7,26

M4	36,32	269,19	7,41
M5	36,02	256,35	7,12
Arah Y			
ME	40,07	274,97	6,86
M1	40,47	254,23	6,28
M2	38,65	241,22	6,24
M3	37,21	269,83	7,25
M4	36,32	256,69	7,07
M5	36,02	275,93	7,66

Berdasarkan Tabel 5, daktilitas terbesar dihasilkan oleh M4 pada arah X yaitu sebesar 7,41, sedangkan pada arah Y daktilitas terbesar terjadi pada M5 sebesar 7.66.

SIMPULAN

Studi mengenai kinerja struktur beton bertulang dengan kekuatan pelat baja penuh pada bagian end span dan kekuatan baja siku pada bagian mid span telah dilakukan dengan membuat enam model struktur gedung lima lantai. Model terdiri dari model eksisting (ME) dan model eksisting yang kolomnya ditambah kekuatan setiap lantainya (M1, M2, M3, M4, dan M5). Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan pada keenam model, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Perkuatan pada kolom dapat meningkatkan gaya geser pada model M1, M2, M3, M4 dan M5 masing-masing sebesar 4%, 7%, 8%, 13%, dan 14% untuk sumbu X serta sebesar 8%, 7%, 13%, 13%, dan 15% untuk sumbu Y.
2. Perpindahan yang ditargetkan berdasarkan FEMA 440 paling besar terjadi pada model M1, diikuti oleh ME, M4, M5, M2, dan M3.
3. Level kinerja struktur arah X dan arah Y untuk seluruh model berdasarkan target perpindahan FEMA 440 memiliki level kinerja *beyond to E (failure)*.
4. Penambahan kekuatan pada kolom meningkatkan kekakuan struktur sebesar 11-27%. Kekakuan terbesar dihasilkan pada model M5 sebesar 81.17 kN/mm, diikuti oleh M4, M3, M2, M1, dan ME.
5. Daktilitas terbesar dihasilkan oleh M4 pada arah X yaitu sebesar 7,41, sedangkan pada arah Y daktilitas terbesar terjadi pada M5 sebesar 7.66.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Civil Engineers. 2000. *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (FEMA 356)*. Washington D.C.

Badan Standardisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung (SNI 1726:2012)*. Jakarta.

- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *Beban Minimum untuk Perancangan Bangunan Gedung dan Struktur Lain (SNI 1727:2013)*. Jakarta.
- Belal, M.F., Mohamed, H.M., Morad, S.A. 2014. Behavior of Reinforced Concrete Columns strengthened by Steel Jacket. *Journal of Housing and Building National Research Center (HBRC Journal)*
- Hognestad, E. 1951. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members. *Bulletin Series No. 399*. University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill. p.128.
- Park, R., & Paulay, T., 1975. Reinforced Concrete Structures. New York, USA: John Wiley & Sons. Inc.
- Sakino, K. and Sun, Y. 1994. Stress-Strain Curve of Concrete Confined by Rectilinear Reinforcement. *Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of AIJ*, No. 468, pp.94-103.
- Saraswathi, M., Saranya, S. 2016. Strengthening of RC Square Column using Steel Angles. *International Journal of Emerging Technology in Computer Science & Electronics (IJETCSE)*, Volume 20, ISSN: 0976-1353, pp. 226 to 231
- Sudarsana, I.K. 2016. Retrofitting of low rise reinforced concrete building using external bolted steel plates case study: SPS building, Jimbaran, Bali-Indonesia. *Elsevier Procedia Engineering*, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817304897>
- Sudarsana, I.K., Deskarta, P., Sentosa, K. 2017. Capacity and Ductility Analysis of Externally Strengthened R/C Columns using Steel Plates. *Proceeding of the 15th International Conference on QIR (Quality in Research)*, Bali, Indonesia, Juli 2017.