

**ANALISIS PERKUATAN KOLOM LINGKARAN PADA BANGUNAN SOFT-STORY
MENGUNAKAN STEEL JACKETING DENGAN PENDEKATAN 2D**

**ANALYSIS OF CIRCULAR COLUMN STRENGTHENING
IN A SOFT-STORY BUILDING USING STEEL JACKETING WITH 2D APPROACH**

Muhammad Thariq Resmaindra^{*1,2}, Bondan Dhifan Mazaya³, Anindya Sulaksana Apsari⁴

^{1,3,4} Mahasiswa, Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

² Peneliti, Tenaga Pengajar, Jurusan Teknik Sipil dan Infrastruktur, Politeknik Astra

Korespondensi: mthariq.resmaindra@gmail.com

ABSTRAK

Keruntuhan akibat *soft-story* merupakan salah satu yang sering dijumpai di Indonesia. Mekanisme keruntuhan akibat *soft-story* sangatlah berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan parah hingga kolaps pada struktur bangunan. *Steel jacketing* merupakan salah satu upaya perkuatan kolom yang dinilai efektif dalam meningkatkan kekuatan serta kekakuan pada elemen yang diperkuat sehingga keruntuhan *soft story* pada bangunan dapat dicegah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi perilaku struktur gedung eksisting sebelum dilakukan perkuatan pada kolom dengan menggunakan analisis limit dan analisis *pushover* serta untuk mengetahui efek perkuatan kolom dengan *steel jacketing* terhadap perilaku dan kinerja struktur. Pada penelitian ini, struktur eksisting disimulasikan mengalami kesalahan desain yang dimodelkan sebagai portal 2D dengan fungsi bangunan sekolah 4 lantai. Dari hasil analisis limit yang dilakukan, model struktur eksisting berpotensi mengalami mekanisme keruntuhan lokal, diikuti dengan potensi keruntuhan *soft story* lantai 1. Dari hasil analisis *pushover*, model struktur eksisting mengalami *soft story* dan tidak menunjukkan *performance point* sesuai yang disyaratkan FEMA 440. Setelah dilakukan perkuatan kolom dengan *steel jacketing*, model struktur menunjukkan mekanisme keruntuhan lebih baik, yaitu *beam sway mechanism* dan performa elemen yang didapatkan setelah dilakukan perkuatan ada pada rentang *Immediate Occupancy* (IO).

Kata Kunci: *Pushover, Retrofitting, Soft Story, Steel Jacketing, 2D*

ABSTRACT

Collapse due to soft-story is often encountered in Indonesia. The collapse mechanism caused by soft stories is very dangerous, causing severe damage even collapse to the building structure. Steel jacketing is one of the means to strengthen the column which is considered effective in increasing the strength and stiffness of the reinforced elements hence soft story collapse in buildings can be prevented. The aim of this research is to evaluate the behavior of the existing building structure before strengthening the columns using limit analysis and pushover analysis and to determine the effect of strengthening columns with steel jacketing on the behavior and the performance of the structure. In this research, the existing structure is simulated to experience design errors and is modeled as a 2D portal with the function of a 4-story school building. From the results of the limit analysis, the existing structural model has the potential to experience a local collapse mechanism, followed by

the potential for soft story collapse on the 1st floor. From the results of the pushover analysis, the existing structural model experiences the soft story mechanism and does not show performance points as required by FEMA 440. After carrying out this strengthening the column with steel jacketing, the structural model shows a better failure mechanism and the element performance obtained after strengthening is in the Immediate Occupancy (IO) range.

Keywords: Pushover, Retrofitting, Soft Story, Steel Jacketing, 2D

PENDAHULUAN

Keruntuhan akibat *soft-story* merupakan salah satu yang sering dijumpai di Indonesia. *Soft-story* dapat terjadi akibat adanya kekakuan lateral pada suatu tingkat yang rendah atau tidak memadai. Umumnya, hal ini dapat ditemukan pada lantai dasar sebuah bangunan dengan tinggi lantai yang cukup tinggi dibandingkan dengan lantai lainnya. Mekanisme keruntuhan akibat *soft-story* sangatlah berbahaya karena dapat menyebabkan kerusakan parah hingga kolaps pada struktur bangunan. Untuk mencegah hal tersebut, perlu adanya upaya perkuatan atau *retrofitting* pada struktur dengan *soft-story*. Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk mencegah hal tersebut adalah dengan penggunaan perkuatan *steel jacketing*. Metode perkuatan tersebut merupakan salah satu upaya perkuatan kolom yang dinilai efektif dalam meningkatkan kekuatan serta kekakuan pada elemen yang diperkuat. Dalam penelitian ini, dilakukan asesmen kinerja struktur bangunan secara sederhana menggunakan pendekatan 2D dengan metode analisis *limit* dan *pushover*. Kemudian, dilakukan peninjauan efek *retrofitting* struktur terhadap perilaku dan kinerja struktur setelah penambahan *steel jacketing* kolom dengan analisis *pushover*.

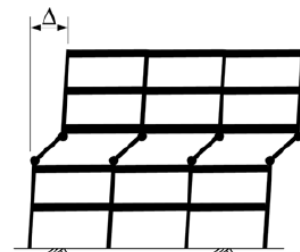
TINJAUAN PUSTAKA

Tingkat Lunak (Soft Story)

Tingkat lunak atau yang biasa disebut sebagai *soft-story* merupakan salah satu jenis dari ketidakberaturan stuktur. Menurut SNI 1726-2019, ketidakberaturan ini didefinisikan ketika kekakuan lateral pada suatu tingkat < 70% dari kekakuan tingkat di atasnya atau < 80% rata-rata kekakuan lateral tiga tingkat di atasnya. Contoh dari ketidakberaturan tingkat lunak ini dapat ditemukan pada struktur di lantai dasar dengan ketinggian lantai yang jauh melebihi tinggi tingkat lainnya atau memiliki konsep “*Open Floor*” yaitu ketika tingkat

tersebut tidak memiliki partisi atau dinding sehingga kekakuan lateralnya menjadi lemah dibandingkan tingkat lainnya.

Menurut Gautham et.al. (2022), pada struktur akan cenderung bekerja identik seperti pendulum terbalik akibat adanya perbedaan kekakuan lantai dengan konsentrasi massa pada lantai atasnya. Konsentrasi gaya dan deformasi pada kolom lantai dasar dapat menginisiasi terjadinya sendi plastis pada elemen kolom tersebut. Selain itu, adanya efek P-Delta dari berat struktur tingkat di atasnya akan menyebabkan kegagalan kolaps pada kolom tersebut akibat tercapainya mekanisme keruntuhan struktur yang tidak diinginkan yaitu *story mechanism* seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Mekanisme Keruntuhan *Story-Mechanism*

(sumber: Figure 3-1 NIST GCR 8-917-1)

Analisis Limit

Analisis limit merupakan salah satu metode analisis struktural yang digunakan untuk menentukan perkiraan beban keruntuhan model struktur tertentu tanpa menggunakan analisis iteratif atau inkremental (Chen, 2007). Analisis limit dilakukan berdasarkan hukum kekekalan energi yang dinyatakan dalam rumus

$$W_F(P) = \sum M_{oi}\theta_i \quad (1)$$

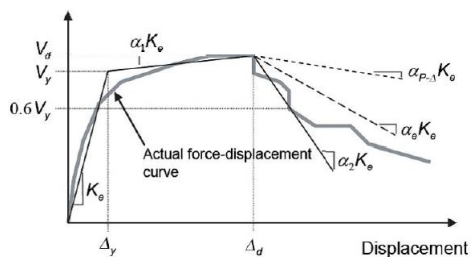
dengan $W_F(P)$ adalah kerja luar maya (KLM) dan $\sum M_{oi}\theta_i$ adalah kerja dalam maya (KDM), yang merupakan penjumlahan antara perkalian momen limit pada sendi plastis ke- i (M_{oi}) dengan sudut rotasi yang terjadi pada sendi plastis ke- i . Asumsi yang digunakan pada analisis ini adalah kapasitas

elemen dibatasi oleh tahanan lenturnya, sendi pada elemen diasumsikan terbentuk pada garis sumbu joint dan pengaruh dari gaya aksial diabaikan.

Analisis Statik Nonlinier (*Pushover Analysis*)

Analisis *pushover* merupakan salah satu metode yang dapat digunakan dalam mengetahui kinerja seismik bangunan pada kondisi inelastis. Pada analisis ini, model struktur akan diberikan beban lateral yang meningkat secara bertahap (*incrementing loads*) yang dapat merepresentasikan gaya inersia terjadi pada struktur saat gempa bumi terjadi. Beban lateral tersebut diaplikasikan hingga perpindahan yang terjadi mencapai “*target displacement*” yang mana hal tersebut merepresentasikan perpindahan yang terjadi pada struktur akibat gerakan tanah dasar (saat gempa bumi). Ketika pembebanan telah mencapai *target displacement* maka *demand parameter* dari komponen struktur akan dibandingkan dengan *acceptance criteria* untuk berbagai level kinerja tertentu (NIST GCR 10-917-5, 2010).

Analisis *pushover* ini pada akhirnya akan menghasilkan kurva *pushover* yang menunjukkan hasil plot gaya geser dasar dan perpindahan dari titik kontrol dari struktur sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 2**. Selanjutnya, dari kurva tersebut ditentukan titik performa dari struktur menggunakan berbagai metode antara lain *capacity spectrum method* (ATC-40), *displacement coefficient method* (FEMA 356), dll.

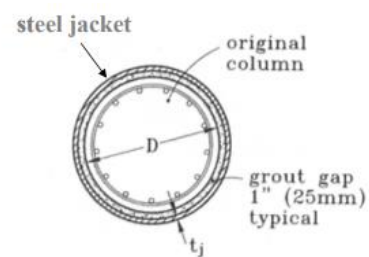


Gambar 2. Kurva *Pushover*
sumber: Figure 5-1 NIST GCR 10-917-5(2010)

Steel Jacketing

Steel jacketing merupakan salah satu jenis perkuatan pada struktur. Penggunaan *steel jacket* dapat mengeliminasi terjadinya kerusakan *spalling* pada selimut beton dengan cara mengekang seluruh bagian penampang beton. *Steel jacket* dirancang untuk memberikan kekangan pasif dengan cara menggunakan selubung dengan jari-jari yang lebih besar dari kolom. Kemudian, celah antara kolom

dan *steel jacket* diisi dengan *grout*. Penggunaan *jacketing* ini dapat secara efektif meningkatkan kekuatan geser, kapasitas deformasi serta dapat meningkatkan kekakuan dan daktilitas struktur global namun biayanya cukup mahal dan memerlukan banyak pekerja (Raza et. al., 2019). Meskipun demikian, penggunaan *steel jacketing* lebih unggul dibandingkan CFRP ketika diperlukan pembatasan *lateral drift* dan memperkecil kerusakan secara signifikan (Nahavandi, 2015). *Steel jacketing* juga efektif dalam meningkatkan tahanan *impact load* (Hanifehzadeh et. al., 2021)



Gambar 3. Steel Jacketing pada kolom lingkaran
sumber: Lee, W. K. et al. (2007)

Berdasarkan penelitian oleh Li et al. (2005), ketebalan *steel jacket* dapat ditentukan berdasarkan tiga persamaan yang sering diadopsi sesuai peraturan antara lain, ATC-32 (1996), AASHTO (1992), serta Caltrans (1986). Persamaan ini pada dasarnya digunakan untuk perkuatan kolom jembatan lingkaran. Namun demikian, dalam penelitian ini akan dicoba digunakan sebagai dasar acuan dasar untuk penentuan tebal pelat baja yang perlu dipakai. Berikut merupakan persamaan berdasarkan peraturan yang telah disebutkan sebelumnya:

- ATC-32 (1996)
$$t_j = \frac{D}{4} \left[\frac{0,16 f_c'}{f_{je}} \left(0,15 + 1,25 \frac{P}{f_c' A_g} \right) + 0,13 (\rho_l - 0,01) \right] \quad (2)$$

- AASHTO (1992)
$$t_j = 0,03 D \frac{f_c'}{f_{yj}} \quad (3)$$

- Caltrans (1986)
$$t_j = 0,03 D \frac{f_c'}{f_{yj}} \left[0,15 + 1,25 \frac{P}{f_c' A_g} \right] \quad (4)$$

Keterangan:

t_j = tebal pelat yang dibutuhkan; D = diameter kolom; f_c' = mutu beton; $f_{je} = 1,1 f_{yj}$ dimana f_{yj} = mutu pelat baja yang digunakan; P = beban aksial kolom; ρ_l = rasio tulangan longitudinal; serta A_g = luas gross penampang kolom.

METODE

Dalam pengerjaan penelitian ini, digunakan langkah-langkah sebagaimana tercantum pada diagram alir sebagai berikut:



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

Batasan Masalah

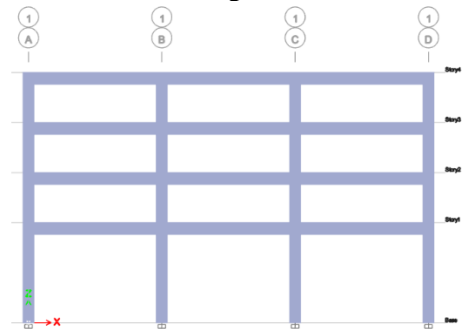
Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Hubungan komposit perkuatan kolom dianggap sempurna.
- Lokasi bangunan berada di Bandung dengan kelas situs tanah Sedang (SD).
- Bangunan memiliki fungsi sebagai gedung sekolah 4 lantai.
- Perilaku struktur bangunan sekolah dievaluasi sebagai portal dua dimensi (2D).
- Analisis yang dilakukan menggunakan analisis limit serta analisis *pushover*
- *Software* yang digunakan adalah ETABS 2018, Microsoft Excel, dan XTRACT.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Struktur Eksisting
Desain dan Pemodelan Struktur

Pada penelitian ini, disimulasikan sebuah struktur bangunan sekolah yang mengalami *soft story* karena kesalahan desain. Struktur bangunan yang dimodelkan merupakan struktur 2D 3 bentang dari gedung sekolah 4 lantai dengan *soft-story* pada lantai pertama dengan tinggi 6 meter dan tinggi tingkat lain adalah 3 meter serta panjang bentang 8 meter yang berlokasi di Kota Bandung.



Gambar 5. Struktur bangunan eksisting

Proses desain dari struktur tahan gempa mengacu pada peraturan SNI 1726:2019 dengan data struktur adalah sebagai berikut:

- Fungsi bangunan : Sekolah
- Lokasi : Kota Bandung
- Kelas situs : Tanah Sedang (SD)
- Sistem struktur : SRPMK
- Kategori risiko bangunan : IV
- Faktor keutamaan (I_e) : 1,5
- Koefisien modifikasi respons (R): 8
- Faktor kuat lebih sistem (Ω_0) : 3

- Faktor pembesaran defleksi (C_d) : 5,5

Data karakteristik material yang digunakan adalah:

- **Beton**
Mutu beton (f_c') : 30 MPa
- **Baja tulangan BjTS 420B**
Tegangan leleh (F_y) : 420 MPa
Tegangan ultimit (F_u) : 525 MPa

Pembebanan yang bekerja pada struktur adalah beban *self-load* struktur (*Dead Load*), beban mati tambahan (*SIDL*), beban hidup (*Live Load*), beban hidup atap, dan beban gempa. Pembebanan yang dilakukan berdasarkan SNI 1727:2020 seperti yang disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Beban pada Struktur Eksisting

| Komponen Beban | Lokasi | Besar beban |
|---|--------------------|--|
| Beban Mati | Seluruh lantai | (terhitung otomatis oleh program ETABS)* |
| Beban mati tambahan (MEP, plumbing, keramik, dll) | Atap | 1 kN/m ² |
| | Lantai lainnya | 2 kN/m ² |
| Beban hidup (ruang kelas) | Lantai selain atap | 3,83 kN/m ² |

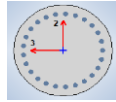
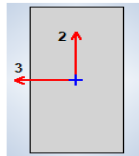
Keterangan:
 - Besar beban diberikan sebagai beban garis/titik sesuai *tributary area* portal yang dianalisis berada di tengah bangunan dimana jarak antar portal
 - Beban mati termasuk beban pelat serta balok tambahan

Pembebanan gempa dilakukan berdasarkan peraturan SNI 1726:2019 menggunakan respons spektrum Kota Bandung kondisi Tanah Sedang (SD) dengan parameter:

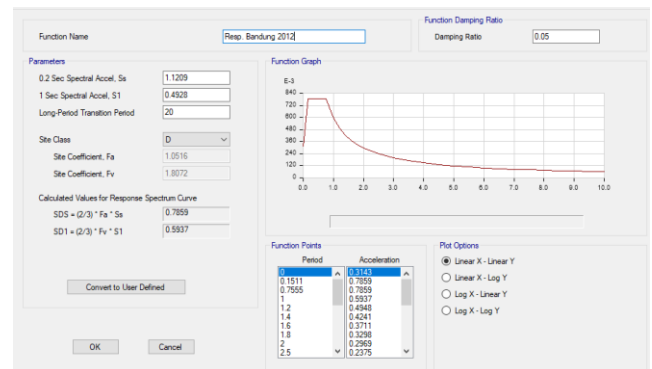
- S_{DS} : 0,79 g
- S_{D1} : 0,59 g
- S_s : 1,1209 g
- S_1 : 0,4928 g
- T_L : 20 detik

Adapun dimensi dan penulangan elemen struktur eksisting adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Dimensi dan penulangan elemen struktural

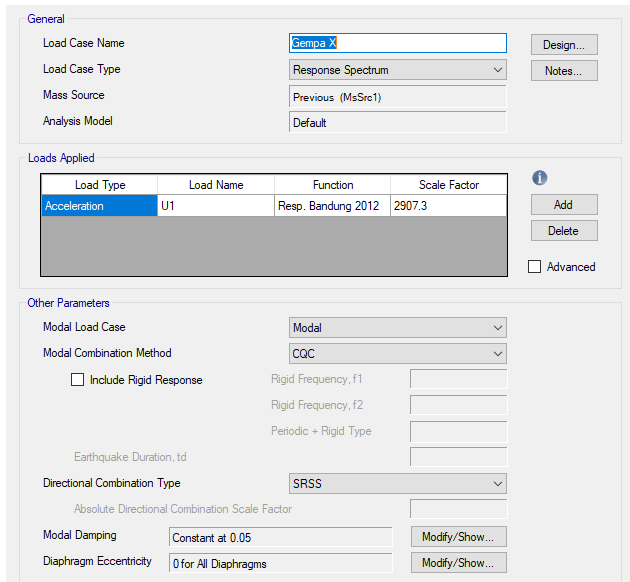
| Elemen Struktur | Penampang | Dimensi | Penulangan |
|-----------------|--|-------------------------|--|
| Kolom |  | D = 700 mm | 25D32 Spiral: D13-80 |
| Balok |  | B x H = 350 mm x 700 mm | Tumpuan Atas : 5D25 Bawah : 4D25 Lapangan Atas : 5D25 Bawah : 4D25 Sengkang : D13-100 mm |

Dalam hal ini, struktur dianalisis dengan modal respons spektrum untuk mengevaluasi dimensi serta penulangan dari struktur. Fungsi respon spektrum dimasukkan pada program seperti yang tertera pada **Gambar 6**.



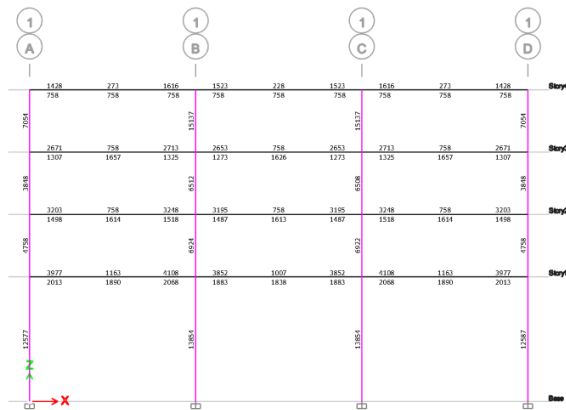
Gambar 6. Response spectrum function yang digunakan

Selanjutnya, didefinisikan *load case* gempa dengan skala gempa pada **Gambar 7** berikut ini.



Gambar 7. Load case dan faktor skala gempa

Kemudian, analisis respon spektrum dapat dijalankan dan menghasilkan hasil seperti pada Gambar 8 yang menunjukkan bahwa dimensi dan tulangan elemen struktur memadai.



Gambar 8. Hasil analisis respon spektrum

Selanjutnya, dilakukan pengecekan terhadap ketidakberaturan dilakukan sesuai dengan SNI 1726:2019 Tabel 14. Dari hasil perhitungan pada Tabel 3, terjadi ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (Tipe 1a) dan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan (Tipe 1b) pada struktur eksisting.

Tabel 3. Pengecekan ketidakberaturan vertikal Tipe 1

| Story | Output Case | Stiff X kN/m | 1a. Stiffness Irregularity (soft story) | | Cek | | 1b. Stiffness Irregularity (extreme soft story) | | Cek |
|-------|-------------|-----------------|---|-------------------|------------|------------|---|-----------|------------|
| | | | A < 70%B | A < 80% (B+C+D)/3 | 1a. | A < 60%B | A < 70% (B+C+D)/3 | 1b. | |
| LT 4 | | 31938.773 | | | | | | | |
| LT 3 | EX | 40480.378 | 22,357.14 | 8,517.01 | aman | aman | 19,163.26 | 7,452.38 | aman |
| LT 2 | | 40418.398 | 28,336.26 | 19,311.77 | aman | aman | 24,288.23 | 16,897.80 | aman |
| LT 1 | | 23825.347 | 28,292.88 | 30,090.01 | tidak aman | tidak aman | 24,251.04 | 26,328.76 | tidak aman |

Analisis Limit

Mekanisme keruntuhan struktur eksisting secara sederhana dapat diprediksi dengan menggunakan metode analisis limit. Pada analisis ini, pengaruh dari gaya aksial diabaikan. Kapasitas momen pada kolom dan balok didapat dari analisis penampang dengan kapasitas lentur 1144 kNm untuk kolom eksisting dan 620.8207 kNm untuk balok eksisting. Karena pembebanan pada struktur tiap tingkatnya berbeda, maka diasumsikan persebaran gaya lateral pada Gambar 9 mengikuti faktor distribusi vertikal SNI 1726-2019 dengan rumus:

$$F_i = C_{vx} = \frac{w_i h_x^k}{\sum w_i h_x^k} \quad (5)$$

Keterangan:

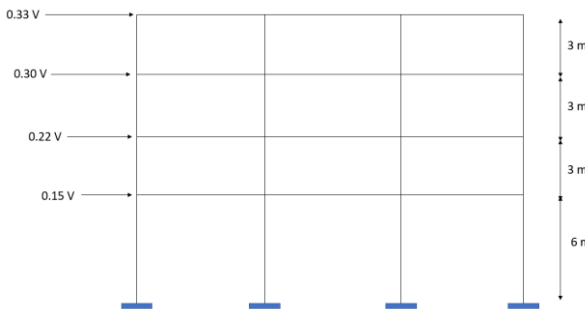
w_i = berat lantai ke-i; h_x = tinggi lantai dari dasar;

Besar beban per-lantai dihitung berdasarkan tributary area dengan pemilihan portal yang dianalisis berada di tengah bangunan, dengan jarak antar portal adalah 8 meter. Nilai k yang digunakan pada perhitungan adalah 1. Perhitungan persebaran gaya vertikal di tiap lantainya tercantum pada Tabel 4. Pada analisis limit yang dilakukan, diasumsikan beberapa mekanisme keruntuhan yang mungkin terjadi pada struktur seperti pada Gambar 10, Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13. Berdasarkan prinsip keseimbangan energi, didapat gaya geser yang menyebabkan keruntuhan struktur untuk setiap mekanisme keruntuhan pada Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9. Mekanisme keruntuhan yang mungkin terjadi pada struktur eksisting adalah mekanisme yang menghasilkan gaya geser yang paling rendah. Dari hasil perhitungan, struktur eksisting diperkirakan mengalami keruntuhan mekanisme lokal dengan 14 sendi yang terjadi di sepanjang lantai 1 dan 2 dengan nilai gaya geser sebesar 1506.07 kN, diikuti dengan mekanisme soft story dengan nilai gaya geser sebesar 1525 kN. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa struktur eksisting cenderung berpotensi mengalami kegagalan lokal dan diikuti potensi terjadi soft story. Hasil dari perhitungan analisis limit

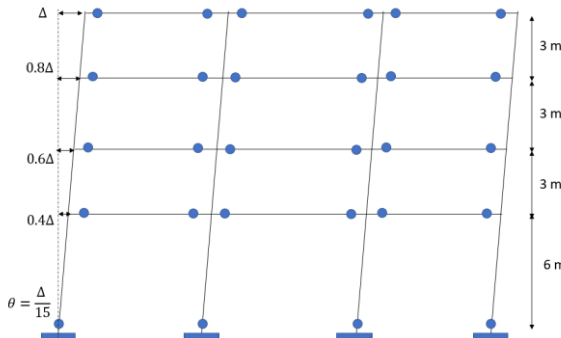
ini perlu ditinjau lebih lanjut dengan analisis *pushover* untuk menghasilkan perkiraan mekanisme keruntuhan yang lebih akurat.

Tabel 4. Perhitungan Distribusi Lateral

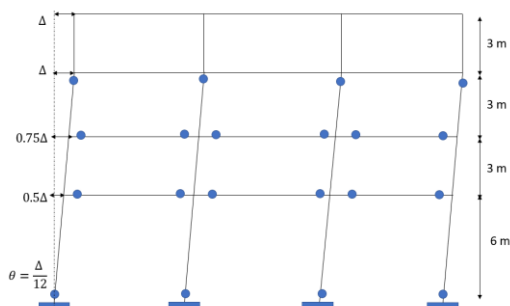
| Lt. - i | DL (kN) | SIDL (kN) | LL | wi =DL+0.25LL (kN) | hx (m) | wi hx (kNm) | Cvx | |
|---------------|---------|-----------|--------|--------------------|--------|-------------|---------|---|
| 4 | 654.72 | 64 | 64 | 734.72 | 15 | 11020.8 | 0.33 | |
| 3 | 654.72 | 128 | 245.12 | 844 | 12 | 10128 | 0.3 | |
| 4 | 654.72 | 128 | 245.12 | 844 | 9 | 7596 | 0.22 | |
| 1 | 654.72 | 128 | 245.12 | 844 | 6 | 5064 | 0.15 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| Total: | | | | | | | 33808.8 | 1 |



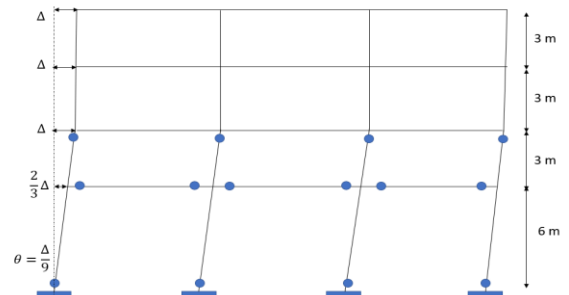
Gambar 9. Distribusi Gaya Lateral pada Analisis Limit



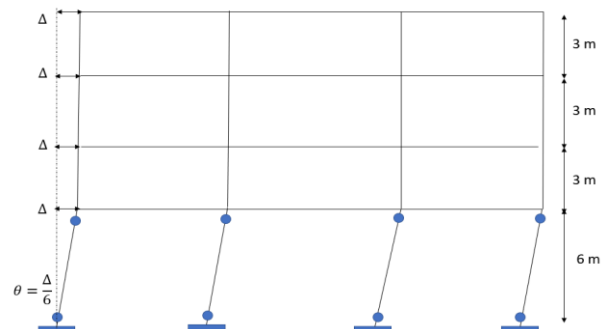
Gambar 10. Mekanisme Kegagalan “*Beam Sway*”



Gambar 11. Mekanisme Kegagalan Lokal dengan 20 Sendi Plastis



Gambar 12. Mekanisme Kegagalan Lokal dengan 14 Sendi Plastis



Gambar 13. Mekanisme Kegagalan “*Soft Story*”

Tabel 5. Perhitungan Gaya Geser pada Mekanisme Kegagalan “*Beam Sway*”

| Lt. - i | Tinggi Antar Lantai (m) | Tinggi dari dasar (m) | F-I (kN) | δ -i | KLM= F-i x δ -i | KDM= M-j x θ -j |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 4 | 3 | 15 | 0.33V | 1 Δ | 0.33 Δ V | 248.329 Δ |
| 3 | 3 | 12 | 0.3V | 0.8 Δ | 0.24 Δ V | 248.329 Δ |
| 4 | 3 | 9 | 0.22V | 0.6 Δ | 0.132 Δ V | 248.329 Δ |
| 1 | 6 | 6 | 0.15V | 0.4 Δ | 0.06 Δ V | 248.329 Δ |
| 0 | 0 | 0 | 0V | 0 Δ | 0 Δ V | 305.067 Δ |
| Total | 15 | 0 | 1V | 0.762ΔV | 1298.38Δ | V = 1703.91 kN |

Tabel 6. Perhitungan Gaya Geser pada Mekanisme Kegagalan Lokal dengan 20 Sendi Plastis

| Lt. - i | Tinggi Antar Lantai (m) | Tinggi dari dasar (m) | F-i | δ -i | KLM= F-i x δ -i | KDM= M-j x θ -j |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| 4 | 3 | 15 | 0.33V | 1 Δ | 0.33 Δ V | 0 Δ |
| 3 | 3 | 12 | 0.3V | 1 Δ | 0.3 Δ V | 381.334 Δ |
| 4 | 3 | 9 | 0.22V | 0.75 Δ | 0.165 Δ V | 310.411 Δ |
| 1 | 6 | 6 | 0.15V | 0.5 Δ | 0.075 Δ V | 310.411 Δ |
| 0 | 0 | 0 | 0V | 0 Δ | 0 Δ V | 381.334 Δ |
| Total | 15 | 0 | 1V | 0.87ΔV | 1383.488Δ | V = 1590.22 kN |

Tabel 7. Perhitungan Gaya Geser pada Mekanisme Kegagalan Lokal dengan 14 Sendi Plastis

| Lt. - i | Tinggi Antar Lantai (m) | Tinggi dari dasar (m) | F-i | δ -i | KLM= F-i x δ -i | KDM= M-j x θ -j |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|----------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 4 | 3 | 15 | 0.33V | 1 Δ | 0.33 Δ V | 0 Δ |
| 3 | 3 | 12 | 0.3V | 1 Δ | 0.3 Δ V | 0 Δ |
| 4 | 3 | 9 | 0.22V | 1 Δ | 0.22 Δ V | 508.445 Δ |
| 1 | 6 | 6 | 0.15V | 0.667 Δ | 0.1 Δ V | 413.881 Δ |
| 0 | 0 | 0 | 0V | 0 Δ | 0 Δ V | 508.445 Δ |
| Total | 15 | | 1V | | 0.95ΔV | 1430.77Δ |
| V = 1506.07 kN | | | | | | |

Tabel 8. Perhitungan Gaya Geser pada Mekanisme Kegagalan *Soft Story*

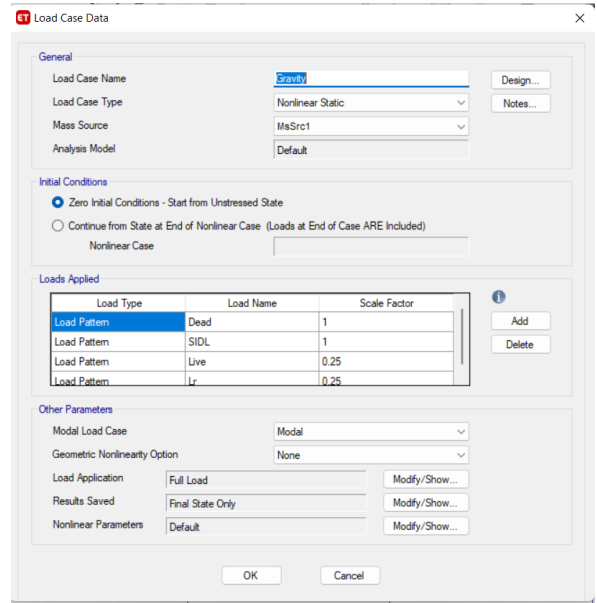
| Lt. - i | Tinggi Antar Lantai (m) | Tinggi dari dasar (m) | F-i | δ -i | KLM= F-i x δ -i | KDM= M-j x θ -j |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-----------|-------------|------------------------------|------------------------------------|
| 4 | 3 | 15 | 0.33V | 1 Δ | 0.33 Δ V | 0 Δ |
| 3 | 3 | 12 | 0.3V | 1 Δ | 0.3 Δ V | 0 Δ |
| 4 | 3 | 9 | 0.22V | 1 Δ | 0.22 Δ V | 0 Δ |
| 1 | 6 | 6 | 0.15V | 1 Δ | 0.15 Δ V | 762.667 Δ |
| 0 | 0 | 0 | 0V | 0 Δ | 0 Δ V | 762.667 Δ |
| Total | 15 | | 1V | | 1ΔV | 1525.334Δ |
| V = 1525.33 kN | | | | | | |

Tabel 9. Rekapitulasi Perhitungan Gaya Geser

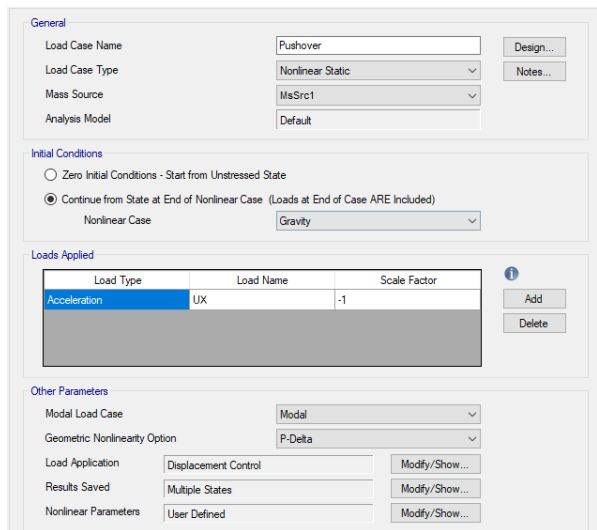
| Mekanisme Keruntuhan | Gaya Geser |
|-------------------------------|------------|
| <i>Beam Sway</i> | 1703.91 kN |
| Lokal dengan 20 Sendi Plastis | 1590.22 kN |
| Lokal dengan 14 Sendi Plastis | 1506.07 kN |
| <i>Soft Story</i> | 1525.33 kN |

Analisis Pushover

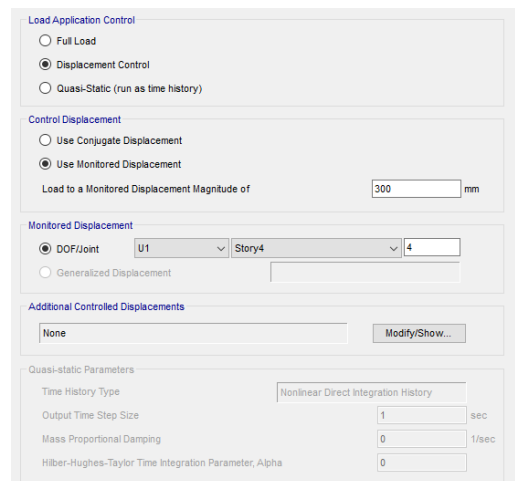
Walaupun setelah dilakukan analisis respon spektrum **Gambar 8** elemen struktur masih memadai, analisis *pushover* perlu dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat kinerja serta mekanisme keruntuhan dari bangunan eksisting. Analisis *pushover* dilakukan dengan membuat *load case* untuk *pushover* seperti pada **Gambar 15** dan **Gambar 16**.



Gambar 14. Load case gravitasi nonlinear



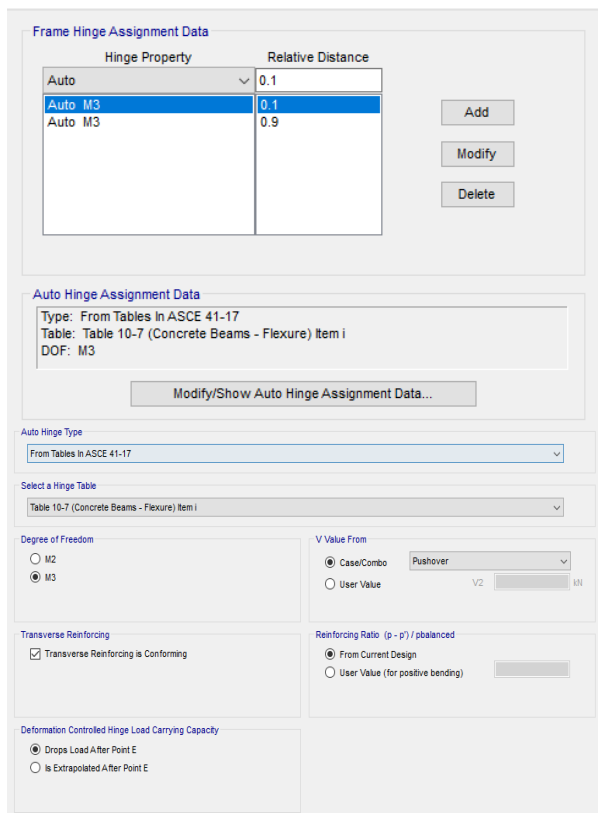
Gambar 15. Load case pushover



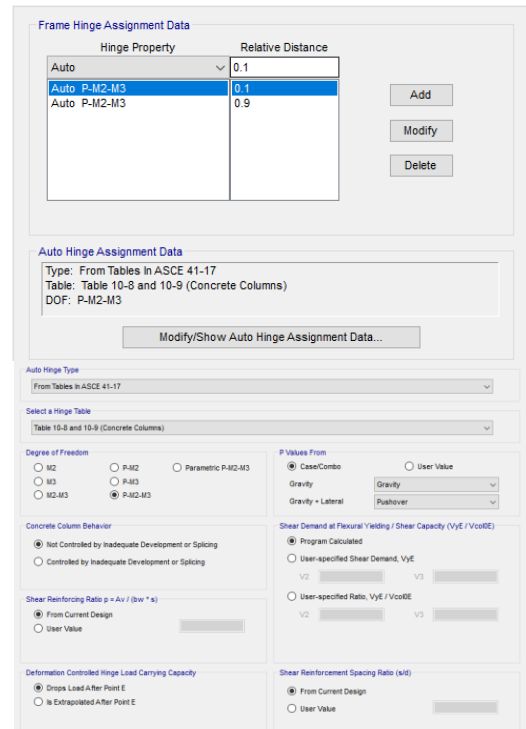
Gambar 16. Pengaturan *displacement control*

Dalam mendefinisikan *load case* untuk analisis *pushover*, tipe analisis adalah nonlinear dan efek P-Delta perlu diperhitungkan. Selain itu, untuk mengontrol *displacement*, diperlukan *joint* sebagai titik kontrol. Kemudian, pembebanan gravitasi dimasukkan untuk menangkap kenonlinearan elemen struktural (**Gambar 14**).

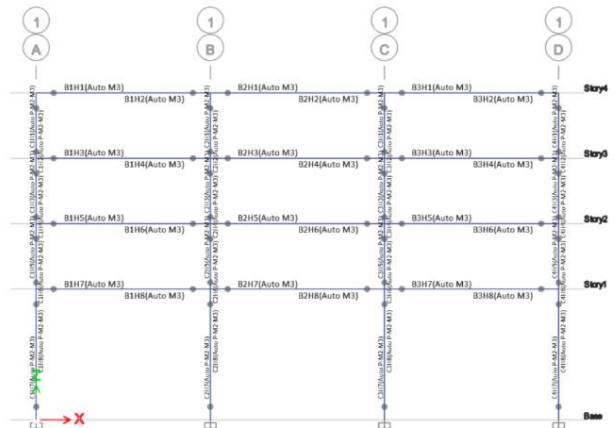
Kolom dan balok kemudian diberikan sendi plasis pada ujung-ujungnya secara otomatis (*AutoHinge*) dari program sesuai dengan ASCE 41-17 dengan pendefinisian sendi plastis seperti pada **Gambar 17**, **Gambar 18**, dan **Gambar 19**. Pada pengaturan sendi plastis, balok hanya memiliki *degree of freedom* momen (M3) sedangkan kolom memiliki *degree of freedom* akibat beban *axial* dan momen *biaxial* (Interaksi P-M2-M3). Selanjutnya, analisis dapat dijalankan sehingga menghasilkan deformasi struktur dan pembentukan sendi plastis yang tergambar pada **Gambar 20**.



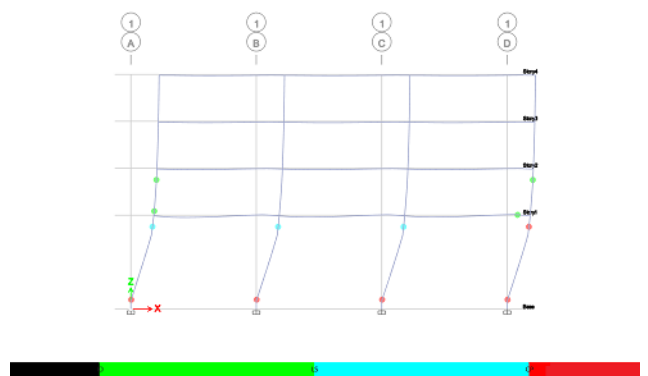
Gambar 17. Pengaturan sendi plastis balok



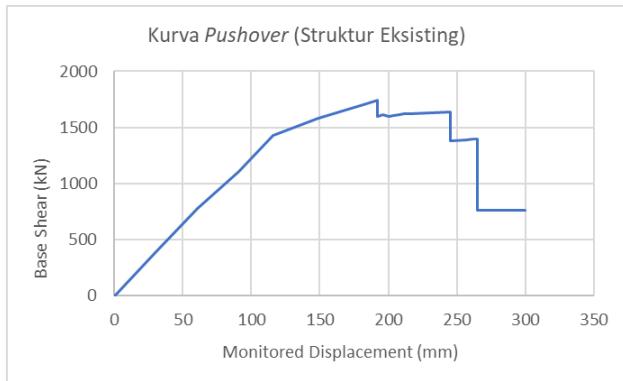
Gambar 18. Pengaturan sendi plastis kolom



Gambar 19. Sendi plastis pada struktur



Gambar 20. Deformasi & pembentukan sendi plastis pada struktur eksisting

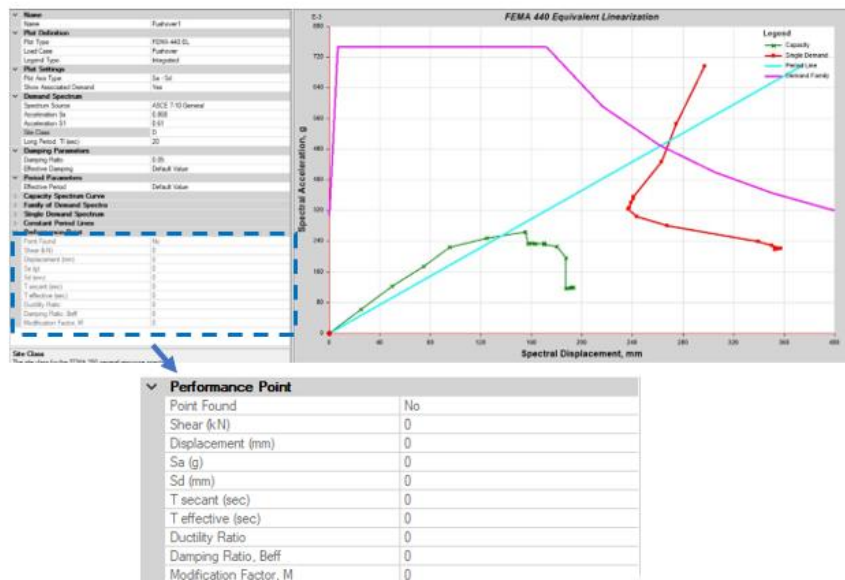


Gambar 21. Kurva *pushover* struktur eksisting

Berdasarkan **Gambar 20**, didapat bahwa mekanisme kegagalan yang terjadi dari hasil analisis *pushover* adalah *soft story* mechanism pada lantai 1. Hal ini sesuai dengan perkiraan yang telah dilakukan pada analisis limit bahwa struktur eksisting cenderung berpotensi memiliki mekanisme keruntuhan lokal dan *soft story*. Jika ditinjau dari gambar yang sama, dapat diketahui

bahwa performa elemen melewati kondisi *Collapse Prevention* (CP) sesuai *acceptance criteria* ASCE 41-17, ditunjukkan dengan sendi plastis berwarna merah pada kolom. Namun, sesuai dengan *Basic Performance Objective for Existing Building* (BPOE) ASCE 41-17 Table 2-1, untuk kategori resiko bangunan IV performa struktur yang sesuai adalah *Life Safety* (LS) sehingga performa yang didapatkan belum sesuai dengan peraturan tersebut.

Hasil dari *base shear vs displacement* didapatkan pada **Gambar 21**. Terlihat bahwa pada step 8, *base shear* mencapai maksimum sebesar 1740 kN saat displacement 192,3 mm. Kemudian, beberapa sendi plastis melebihi kapasitas maksimum sehingga *base shear* mengalami penurunan. Berdasarkan FEMA 440 EL, *performance point* pada struktur eksisting untuk gempa BSE-2E tidak ditemukan (**Gambar 22**) sehingga tidak memenuhi tingkat kinerja yang disyaratkan. Untuk itu, perlu dilakukan *retrofitting* pada struktur.



Gambar 22. Titik performa struktur eksisting

Evaluasi Struktur Setelah *Retrofitting*

Setelah dilakukan analisis *pushover* pada struktur sebelum *retrofitting* dapat dilihat dari Gambar 5.9 bahwa sendi plastis yang terjadi pada keempat elemen kolom lantai dasar menunjukkan *acceptance criteria* yang dicapai adalah *Collapse Prevention* (CP). Dengan demikian, akan dilakukan perkuatan pada keempat kolom tersebut dengan konfigurasi kolom dengan penambahan *steel jacketing* seperti

pada **Gambar 23**.

Perkuatan *steel jacketing* yang dilakukan adalah dengan menambahkan pelat baja pada sekeliling penampang kolom pada sepanjang elemen. Propertis material dari pelat baja yang digunakan adalah sebagai berikut:

Baja BJ-37

- Tegangan leleh (F_y) : 240 MPa
- Tegangan ultimit (F_u) : 370 MPa

Desain ketebalan dari pelat baja yang digunakan akan mengacu pada pers. (2), (3) dan (4) sehingga menghasilkan ketebalan pelat seperti tercantum pada **Tabel 10**.

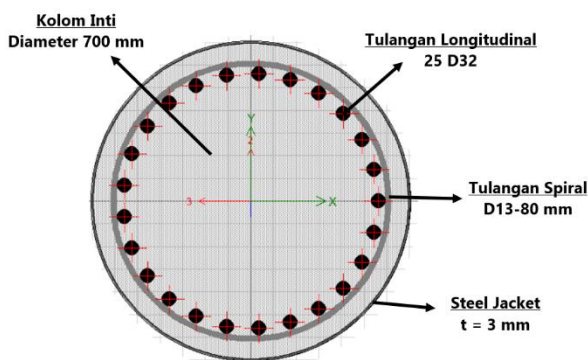
Tabel 10 Ketebalan *steel jacket*

| Persamaan | Tebal <i>jacketing</i> (mm) |
|-----------------|-----------------------------|
| ATC-32 (1996) | 3,08 |
| AASHTO (1992) | 2,63 |
| Caltrans (1986) | 1,75 |

Sesuai hasil diatas, ketebalan pelat baja diambil sebesar $t = 3 \text{ mm}$ agar dapat memenuhi persamaan di atas. Selanjutnya, penambahan *grouting* diabaikan dalam analisis selanjutnya sehingga didapat penampang kolom setelah diperkuat menjadi seperti **Gambar 24**.



Gambar 23. Konfigurasi kolom yang diperkuat *steel jacketing*

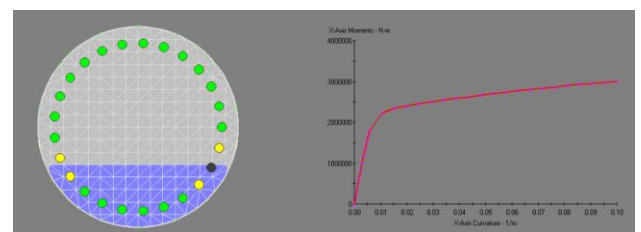


Gambar 24. Penampang kolom dengan *steel jacket*

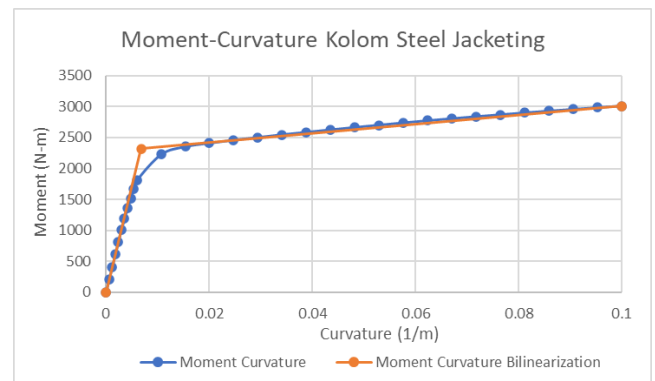
Setelah dilakukan desain untuk perkuatan kolom tersebut maka akan dilakukan kembali analisis *pushover* untuk mengetahui kinerja struktur setelah

dilakukan *retrofitting*. Langkah-langkah yang dilakukan untuk menganalisis struktur sama seperti pada analisis *pushover* sebelumnya, namun dalam melakukan proses *assign* sendi plastis pada kolom dengan *steel jacketing* akan dilakukan secara manual karena ETABS tidak mampu menghasilkan kurvatur komposit beton-baja.

Dalam mendefinisikan sendi plastis secara manual, diperlukan *input data* momen-kurvatur dari elemen penampang yang ditinjau. Dalam hal ini, analisis momen-kurvatur dari penampang dilakukan dengan bantuan program XTRACT seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 25**. Hasil tersebut kemudian di-bilinearisasi seperti pada **Gambar 26**.

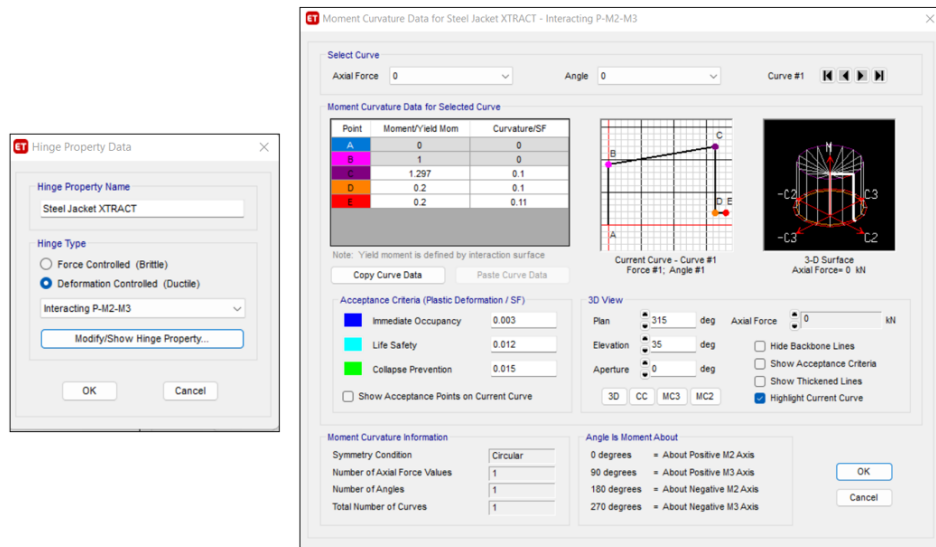


Gambar 25. Analisis penampang kolom dengan *steel jacketing* sesuai XTRACT

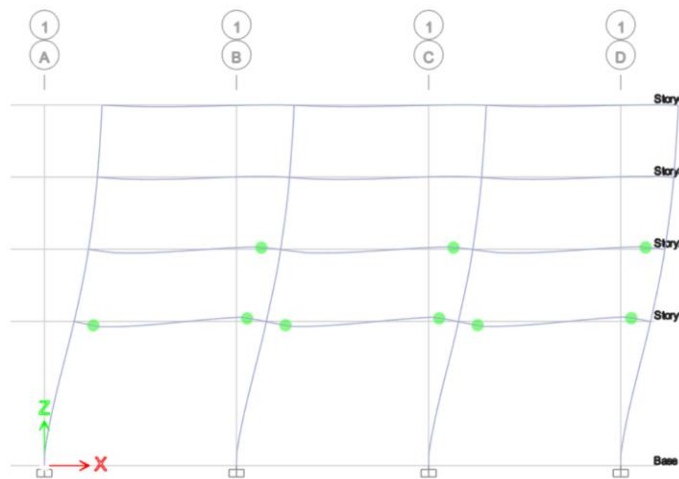


Gambar 26. Hubungan momen kurvatur bilinearisasi

Ketika hasil hubungan tersebut telah didapat, langkah berikutnya adalah dengan memasukkan propertis sendi plastis diantara lain *degree of freedom* untuk kolom yaitu (Interaksi P-M2-M3) serta input data momen kurvatur penampang yang disajikan seperti pada **Gambar 27**. Pengaturan sendi plastis elemen lain yang tidak diperkuat dilakukan dengan cara yang sama seperti sebelumnya. Dengan demikian, didapatkan hasil analisis *pushover* pada struktur berupa deformasi struktur dan pembentukan sendi plastis sebagaimana disajikan pada **Gambar 28**.



Gambar 27. Input manual data propertis untuk sendi plastis pada kolom dengan *steel jacketing*

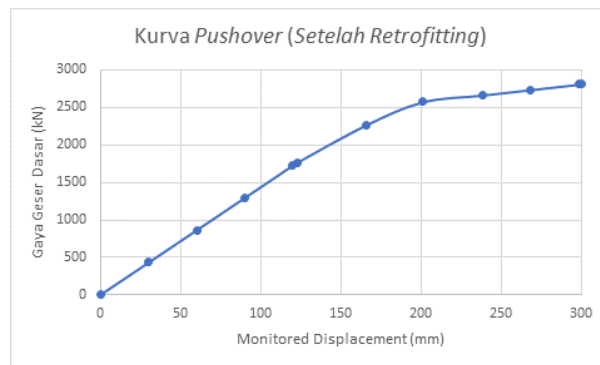


Gambar 28. Deformasi struktur dan pembentukan sendi plastis setelah *retrofitting*

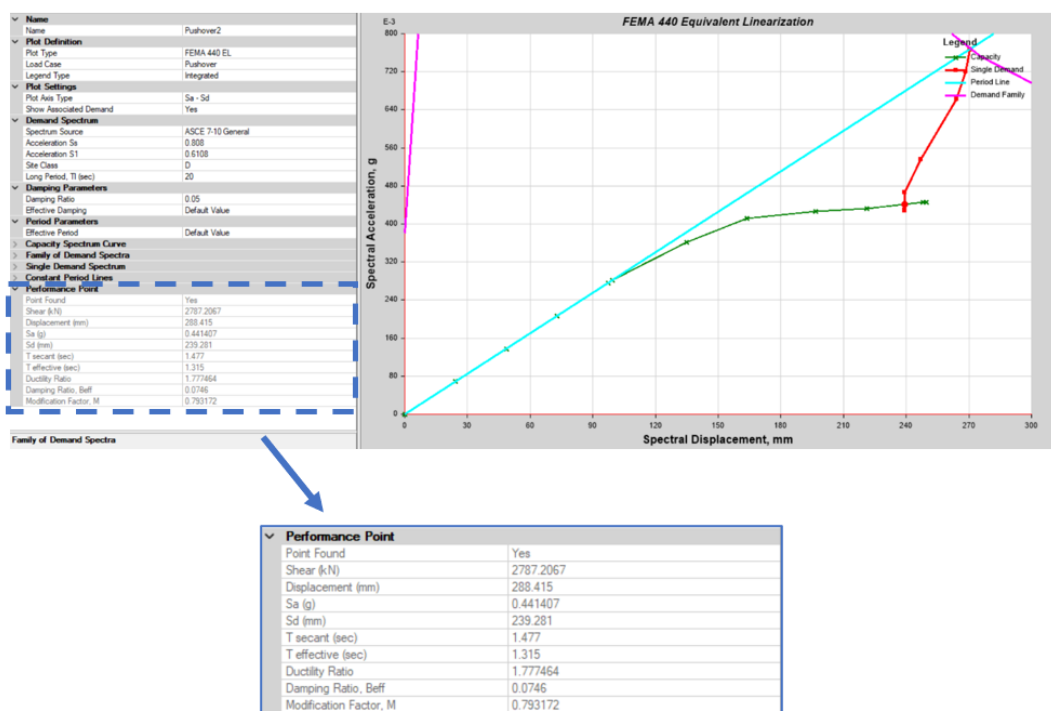
Dapat dilihat pada Gambar 28 mengenai pembentukan sendi plastis yang terjadi setelah struktur mengalami perkuatan telah sesuai dengan mekanisme kegagalan yang diinginkan yaitu *beam-sway mechanism* dimana sendi plastis hanya terjadi pada balok. Selain itu, didapatkan bahwa performa elemen struktur sesuai sendi plastis pada balok terdapat pada level *Immediate Occupancy* (IO) yang artinya telah memenuhi batas performa objektif struktur eksisting yang telah ditentukan pada ASCE 41-17 untuk tingkat gempa BSE-2E yang ditinjau dalam penelitian ini.

Di samping itu, hasil dari analisis ini juga didapatkan kurva deformasi vs gaya geser dasar atau kurva

pushover yang ada pada Gambar 29. Selanjutnya, penentuan titik performa struktur yang mencakup *target displacement* ditentukan berdasarkan format pada program ETABS sesuai FEMA 440 *Equivalent Linearization* didapat hasil seperti tertera di Gambar 30. Dari hasil analisis, dapat disimpulkan untuk struktur setelah dilakukan perkuatan, titik performa struktur untuk BSE-2E berada ketika struktur mengalami deformasi sebesar 288,415 mm dengan gaya geser dasar 2787,21 kN serta rasio daktilitas 1,777. Dengan demikian, penambahan perkuatan dari kolom pada struktur *soft-story* ini menunjukkan hasil analisis yang lebih baik.



Gambar 29. Kurva Pushover (Setelah Retrofitting)



Gambar 30. Titik performa struktur setelah retrofitting berdasarkan FEMA 440 EL

PENUTUP

Kesimpulan

1. Hasil evaluasi gedung eksisting berdasarkan pushover dan analisis limit menunjukkan bahwa model struktur cenderung memiliki kegagalan lokal dan *soft-story*. Dari analisis pushover struktur eksisting, sendi plastis pada lantai 1 berwarna merah pada kedua ujung kolom yang menunjukkan performa elemen berada pada rentang *Collapse Prevention* (CP). Hal tersebut

menandakan bahwa elemen kolom struktur eksisting memiliki kekuatan dan daktilitas yang rendah sehingga dapat menyebabkan kolaps pada lantai 1 ketika gempa terjadi. Di samping itu, performa elemen struktur yang didapat yaitu *Collapse Prevention* (CP) tidak sesuai dengan ASCE 41-17 Table 2-1 dan *Performance point* berdasarkan FEMA 440-EL tidak ditemukan sehingga tingkat kinerja yang disyaratkan pada struktur ini tidak memenuhi. Berdasarkan hasil analisis diatas, diperlukan adanya perkuatan

pada elemen kolom struktur dengan *steel jacketing*.

2. Dari hasil analisis *pushover* struktur setelah *retrofitting* dengan *steel jacketing*, didapat mekanisme keruntuhan adalah *beam-sway mechanism*. Performa elemen yang didapatkan setelah dilakukan perkuatan ada pada rentang *Immediate Occupancy* (IO) dan terjadi hanya pada sendi plastis di ujung-ujung balok sehingga telah memenuhi persyaratan ASCE 41-17 Table 2-1. Sementara itu, *performance point* berdasarkan FEMA 440-EL juga ditemukan pada displacement 288,4 mm dengan gaya geser dasar 2787,21 kN serta rasio daktilitas 1,777. Dengan demikian, dapat dilihat bahwa perkuatan *steel jacketing* pada keempat kolom lantai dasar dapat meningkatkan kinerja dari struktur maupun elemen itu sendiri.

Saran

Perlu dilakukan studi eksperimental yang lebih banyak lagi terkait aplikasi *steel jacketing* untuk memahami perilaku kolom gedung setelah *retrofitting*.

DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers: ASCE 41-17. 2017. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. Reston, Virginia: The American Society of Civil Engineers.
- Chen, Wai-Fah; Da-Jian Han (2007). *Plasticity for structural engineers*. J. Ross publishing classics. pp. 409–490
- Deierlein, G., Reinhorn, A., & Willford, M. (2010). *NIST GCR 10-917-5 Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design: A Guide for Practicing Engineers*. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4, 1-32.
- Departemen Pekerjaan Umum: SNI 1726:2019. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- Departemen Pekerjaan Umum: SNI 1727:2020. (2020). *Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan gedung dan struktur lain*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- Gautham, A., & Sahoo, D. R. (2022). *Seismic Collapse Performance of Soft-Story RC Frames with SRC Columns Designed Using the Energy-Based Method*. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 36(6), 1-16.
- Hanifehzadeh et. al. (2021). *Structural Response of Steel Jacket-UHPC Retrofitted Reinforced Concrete Columns under Blast Loading*. *Materials*, 14(6), 1521. MDPI Journals.
- Lee, W. K., & Billington, S. (2007). *Simulation and performance-based earthquake engineering assessment of self-centering post-tensioned concrete bridge systems*. Palo Alto, California: Stanford University.
- Li, Y.-F., Hwang, J.-S., Chen, S.-H., & Hsieh, Y.-M. (2005). *Study of Reinforced Concrete Bridge Columns Retrofitted by Steel Jackets*. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 28(2), 319-328.
- Moehle, J., Hooper, J., & Lubke, C. (2008). *NIST GCR 8-917-1 Seismic Design of Reinforced Concrete Special Moment Frames: A Guide for Practicing Engineers*. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1, 1-27.
- Nahavandi, H. (2015) *Pushover Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Buildings*. *Portland State University*.
- Raza, S., Khan, M.K.I., Menegon, S.J., Tsang, H.-H., Wilson, J.L. (2019). *Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review*. *Sustainability* 11, 3208.