

ANALISIS *PUSHOVER* PADA STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT TIPE PODIUM

Sudarman

H. Manalip, Reky S. Windah, Servie O. Dapas

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi

email: sudarman_c@yahoo.com

ABSTRAK

Di Indonesia, tantangan yang dihadapi dalam konstruksi gedung bertingkat adalah adanya risiko akibat gempa bumi. Salah satu metode untuk analisis beban gempa adalah analisis *pushover*. Analisis *pushover* merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa.

Penelitian dilakukan untuk mengetahui berapa besar gaya maksimum yang ditahan oleh struktur, level kinerja, dan pola keruntuhan struktur gedung bertingkat tipe podium, akibat beban gempa. Pemodelan struktur yang dibuat berupa bangunan non podium, podium I, podium II, podium III, dan podium IV. Struktur bangunan dari beton bertulang, berlantai 12, tinggi tiap lantai 4 meter, dan jarak antara bentang 6 meter. Standar analisis mengacu pada tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk gedung SNI 1726:2012, ATC 40 dan FEMA 356. Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan software SAP2000.

Penelitian ini menghasilkan, gaya geser dasar maksimum yang menentukan dari kelima tipe gedung yang terbesar, yaitu gedung non podium 2165 ton dengan perpindahan maksimum 0,97m, dan yang terkecil adalah gedung podium III yaitu 1614 ton, dengan perpindahan maksimum 0,63 m. Level kinerja berdasarkan ATC 40 masuk dalam kategori *Immediate Occupancy*, berdasarkan FEMA 356 masuk kategori level B, dan berdasarkan SNI 1726:2012 memenuhi batasan simpangan antar lantai. Pola keruntuhan gedung sesuai dengan prinsip kolom kuat balok lemah.

Kata kunci: Analisis *pushover*, podium, level kinerja, keruntuhan, SAP2000.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Di Indonesia, tantangan yang dihadapi dalam konstruksi gedung bertingkat adalah adanya ancaman risiko bencana alam berupa gempa bumi. Hal ini karena Indonesia berada di daerah pertemuan empat lempeng tektonik utama yaitu lempeng Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, dan Filipina, yang sering disebut juga *Ring of Fire*, karena sering terjadi gempa bumi di hampir seluruh daerah di Indonesia akibat adanya pergerakan lempeng tersebut.

Selain masalah mengenai gempa bumi hal lain yang perlu diperhatikan dalam perencanaan struktur bangunan bertingkat yakni mengenai bentuk. Seiring dengan perkembangan dalam desain Arsitektur yang lebih menonjolkan estetika, banyak bangunan dengan bentuk tidak simetris. Salah satu bentuk bangunan yang tidak simetris yaitu, bangunan tipe podium.

Terlepas dari berbagai kompleksnya permasalahan gempa yang terjadi dan bentuk bangunan yang tidak simetris, maka tugas utama

dari para ahli maupun praktisi khususnya yang bergerak dibidang ketekniksipil untuk menciptakan suatu tatanan baru mengenai perancangan bangunan tahan gempa yang lebih baik lagi. Hal tersebut tentunya tidak hanya bertujuan untuk menciptakan struktur bangunan yang lebih kuat dan tahan gempa, tetapi juga bertujuan untuk memberikan keamanan dan kenyamanan bagi setiap orang yang ada dan tinggal di dalam bangunan tersebut. Salah satu metode analisis untuk gedung bertingkat terhadap pengaruh gempa adalah dengan analisis *pushover*.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka penulis tertarik untuk membahas tentang “Analisis *Pushover* Pada Struktur Gedung Bertingkat Tipe Podium”.

Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam skripsi ini yaitu meliputi:

1. Peraturan yang digunakan untuk menganalisis beban gempa adalah SNI 1726:2012

2. Perhitungan dengan menggunakan bantuan software *SAP 2000 versi 16.0.0*
3. Metode yang digunakan analisis *pushover*
4. Struktur bangunan dari beton bertulang
5. Analisis struktur ditinjau dalam bentuk frame tiga dimensi
6. Bangunan diasumsikan untuk bangunan perkantoran di kota Bobong
7. Variansi pemodelan tipe podium, hanya pada arah vertikal
8. Pondasi struktur terjepit kaku pada tanah
9. Tidak mendesain pondasi
10. Dimensi elemen–elemen struktur sama untuk setiap bangunan yang ditinjau, yaitu untuk kolom digunakan dimensi 60/60, balok digunakan dimensi 40/60, dan pelat 12 cm.

Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis beban gempa pada struktur gedung bertingkat tipe podium
2. Untuk mengetahui berapa besar gaya maksimum yang dapat ditahan oleh struktur bangunan tipe podium seperti pada pemodelan akibat gempa
3. Untuk mengetahui target perpindahan dan level kinerja sesuai yang disyaratkan ATC 40 dan FEMA 356
4. Bagaimana pola keruntuhan pada struktur gedung bertingkat tipe podium.

Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain adalah:

1. Mengetahui bagaimana menganalisis struktur gedung bertingkat dengan menggunakan metode analisis *pushover*
2. Memberikan pengetahuan dalam menerapkan analisis *pushover* dengan bantuan *Software SAP 2000 versi 16.0.0* dalam analisis dan desain struktur gedung bertingkat tipe podium
3. Menambah pengetahuan sehingga menjadi alternatif dalam perencanaan struktur gedung bertingkat tahan gempa.

LANDASAN TEORI

Tinjauan Umum Struktur Gedung Bertingkat

Gedung bertingkat adalah bangunan dengan lantai lebih dari satu lantai secara vertikal. Gedung bertingkat dibangun karena keterbatasan lahan pada daerah perkotaan yang mahal. Gedung bertingkat dikelompokkan menjadi:

1. Gedung bertingkat rendah (*low rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian ≤ 15 m atau dengan jumlah lantai 2 - 4 lantai
2. Gedung bertingkat menengah (*middle rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian $15 \leq 40$ m atau dengan jumlah lantai 5 - 10 lantai
3. Gedung bertingkat tinggi (*high rise building*) yaitu gedung dengan ketinggian $40 \leq 150$ m atau dengan jumlah lantai 10 - 40 lantai
4. Gedung pencakar langit (*sky scrapper*) dengan ketinggian lebih dari 40 lantai.

Tinjauan Mengenai Gempa Bumi

Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecahnya/slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi.

Seismometer merupakan pendeteksi gempa bumi, dan alat untuk mengukur dan mencatat besar gempa adalah seismograf. Ukuran gempa dapat dinyatakan dalam Skala *Ritcher* (SR). Selain Skala *Ritcher* besaran yang dipakai untuk mengukur suatu gempa yaitu dengan Skala *Intensitas Modifikasi Mercalli* (MMI). Jika dibandingkan antara skala *Richter* dengan skala *Modified* diperoleh hubungan:

Tabel 1. Hubungan antara *Magnitude* dan *Intensitas* gempa

Magnitude (<i>Richter</i>)	Intensitas (MMI)	Pengaruh Terhadap Tiplak
< 2	I - II	Pada umumnya tidak terasa
3	III	Terasa di dalam rumah, tidak ada kerusakan
4	IV - V	Terasa oleh orang banyak, barang-barang bergerak, tidak ada kerusakan struktural
5	VI - VII	Terjadi beberapa kerusakan struktural, seperti retak-retak pada dinding
6	VII - VIII	Kerusakan menengah, seperti hancurnya dinding
7	IX - X	Kerusakan besar, seperti runtuhnya bangunan
≥ 8.0	XI - XII	Rusak total atau hampir hancur total

Sumber: Mohamad Ihsan FT UI 2008

Peraturan gempa terbaru di Indonesia adalah Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726:2012. SNI 1726:2012 dikeluarkan oleh Badan Standar Nasional, yang merupakan revisi dan mengganti dari peraturan gempa sebelumnya yaitu SNI 03 - 1726 - 2002.

Penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa ditingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Apabila pusat massa tidak terletak segaris dalam arah vertikal, diijinkan untuk menghitung defleksi di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa tingkat di atasnya.

Defleksi pada massa di tingkat $x(\delta_x)(mm)$ harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (1)$$

dengan:

C_d = faktor amplikasi defleksi dalam Tabel 2.13

δ_{xe} = defleksi pada lokasi yang disyaratkan pada pasal ini yang ditentukan dengan analisis elastis

I_e = faktor keutaman gempa

Batasan simpangan antara lantai tingkat, yaitu tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat izin (Δ_a) seperti pada Tabel 2 dibawah.

Tabel 2. Simpangan antar lantai ijin, $\Delta_a^{a,b}$

Struktur	Kategori resiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat	0,025 $h_{m,c}$	0,020 h_m	0,015 h_m
Struktur dinding geser kantilever batu bata ^d	0,010 h_m	0,010 h_m	0,010 h_m
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_m	0,007 h_m	0,007 h_m
Semua struktur lainnya	0,020 h_m	0,015 h_m	0,010 h_m

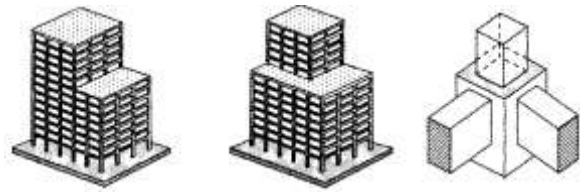
Sumber: SNI 1726:2012

Struktur Bangunan Tidak Beraturan Tipe Podium

Struktur bangunan tipe podium (*setback*), adalah bangunan apabila bagian atas bangunan yang bersangkutan menjorok kedalam. Bangunan tipe podium baik dalam satu arah maupun dua arah merupakan termasuk dalam bangunan ireguler, karena pusat massa tidak berimpit secara vertikal. Massa dan kekakuan baik kearah horizontal maupun kearah vertikal tidak terdistribusi secara merata. Problem yang akan terjadi pada daerah peralihan kekakuan dari kekakuan yang besar pada bagian bawah ke kekakuan yang relatif lebih kecil pada bagian atas. Seberapa besar problem yang ditimbulkan akan bergantung pada banyak hal, yang diantaranya adalah rasio luasan atas terhadap bawah, ratio tinggi bagian *setback* terhadap bagian bawah, arah *setback* (1 atau 2 arah), letak *setback* (simetris atau tidak) dan sebagainya.

Untuk bangunan tipe podium atau *setback* telah diisyaratkan dalam SNI 1726:2012. Bangunan tipe podium dalam SNI didefinisikan sebagai ketidakberaturan geometri vertikal. Ketidakberaturan geometri vertikal didefinisikan ada jika dimensi horisontal sistem penahan gaya

gempa disemua tingkat lebih dari 130 persen dimensi horisontal sistem penahan gaya gempa tingkat didekatnya.



Gambar 1. Bangunan podium
Sumber: Widodo 2013

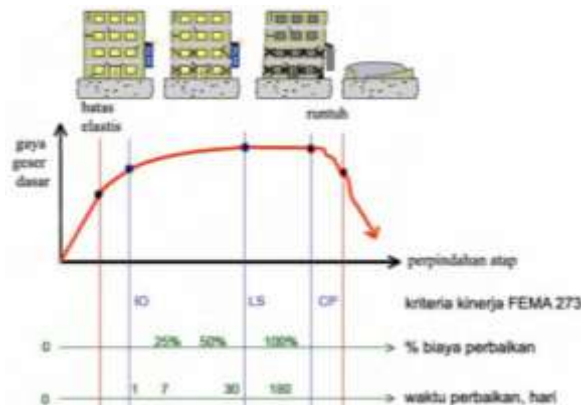
Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang.

Performance levels berdasarkan FEMA 273/356 berturut-turut dari respons yang paling kecil, terdiri atas:

- **Fully Operational (FO)**, adalah kondisi yang mana bangunan tetap dapat beroperasi langsung setelah gempa terjadi (*operational state*). Hal ini terjadi karena elemen struktur utama tidak mengalami kerusakan sama sekali dan elemen non-struktur hanya mengalami kerusakan sangat kecil sehingga tidak menjadi masalah (*damage state*).
- **Immediatety Occupancy (IO)** adalah suatu kondisi yang mana struktur secara umum masih aman untuk kegiatan operasional segera setelah gempa terjadi (*damage state*). Ada kerusakan yang sifatnya minor, namun perbaikannya tidak mengganggu pemakai bangunan. Oleh karena itu bangunan pada level ini juga hampir langsung dapat dipakai setelah kejadian gempa.
- **Life Safety (LS)** adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan sedang (*damage skale*), sehingga diperlukan perbaikan, namun bangunan masih stabil dan mampu melindungi pemakai dengan baik. Bangunan dapat ditempati kembali setelah selesai perbaikan (*operational state*).
- **Collapse Prevention (CP)** adalah suatu kondisi yang mana struktur bangunan mengalami kerusakan parah (*severe*), tetapi masih tetap berdiri, tidak roboh atau runtuh.

Elemen non-skuktur sudah runtuh. Pada *performance level* ini bangunan sudah tidak dapat dipakai (*operational state*).



Gambar 2. Ilustrasi keruntuhan bangunan
Sumber: Dewobroto 2005

Gambar 2 di atas menjelaskan secara kualitatif level kinerja FEMA 273 yang digambarkan bersama dengan suatu kurva hubungan gaya–perpindahan yang menunjukkan perilaku struktur secara menyeluruh terhadap pembebanan lateral. Kurva tersebut dihasilkan dari analisa statik non–linier yang dikenal sebagai analisa *pushover*, sehingga disebut juga sebagai kurva *pushover*. Sedangkan titik kinerja (*performance point*) merupakan besarnya perpindahan titik pada atap pada saat mengalami gempa rencana.

Tingkat kinerja berdasarkan ATC 40 adalah:

- SP-1 *Immediate Occupancy*
- SP-2 *Damage Control*
- SP-3 *Life Safety*
- SP-4 *Limited Safety*
- SP-5 *Structural Stability*
- SP-6 *Not Considerd*

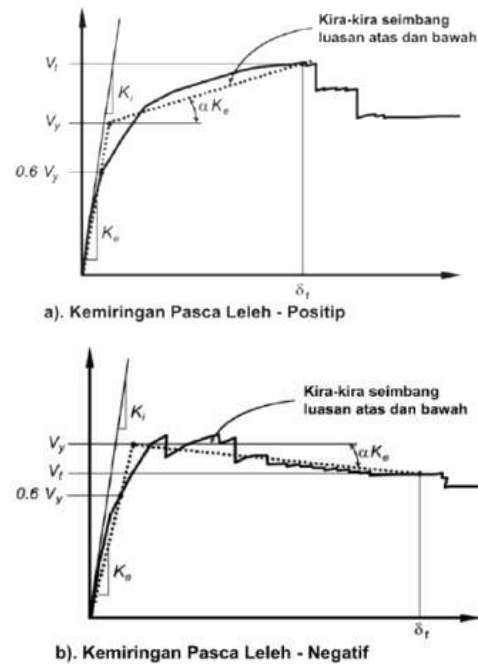
Analisa Statik Nonlinear *Pushover*

Analisis statik beban dorong (*pushover*) adalah suatu analisis nonlinier statik dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban statik yang menangkap pada pusat massa masing–masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur–angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama didalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai target peralihan yang diharapkan atau sampai mencapai kondisi plastik.

Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian–bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya. Cukup banyak studi menunjukkan bahwa analisa statik *pushover* dapat memberikan hasil mencukupi ketika dibandingkan dengan hasil analisa dinamik *nonlinier* untuk bangunan regular dan tidak tinggi.

Metode koefisien perpindahan FEMA 356

Metode Koefisien Perpindahan (*Method Displacement Coefficient*) FEMA 356 merupakan metoda utama yang terdapat dalam FEMA 273/356 untuk prosedur statik nonlinier yang dikeluarkan oleh *Federal Emergency Management Agency (FEMA)* tahun 2000. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut target perpindahan, δ_T .



Gambar 3. Perilaku pasca leleh struktur
Sumber: Dewobroto 2005

Proses dimulai dengan menetapkan waktu getar efektif, T_e , yang memperhitungkan kondisi inelastis. Waktu getar alami efektif mencerminkan kekakuan linier dari sistem SDOF ekuivalen. Jika diplotkan pada spektrum respons elastis akan menunjukkan percepatan gerakan tanah pada saat gempa yaitu akselerasi puncak,

S_a , versus waktu getar, T . Redaman yang digunakan selalu 5% yang mewakili level yang diharapkan terjadi pada struktur yang mempunyai respons pada daerah elastis. Puncak perpindahan spektra elastis, S_d , berhubungan langsung dengan akselerasi spektra, S_a , dengan hubungan sebagai berikut:

$$S_d = \frac{T_e^2}{4\pi^2} S_a \quad (2)$$

Selanjutnya target perpindahan pada titik kontrol δ_T , ditentukan dari rumus berikut:

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_A \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (3)$$

dimana:

T_e = waktu getar alami efektif yang memperhitungkan kondisi inelastis
 C_0 = koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama berdasarkan Tabel 3 – 2 dari FEMA 356.

C_1 = faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik linier.

$C_1 = 1.0$ untuk $T_e \geq T_s$

$$C_1 = \frac{\left[1 + (R-1) \cdot \frac{T_s}{T_e} \right]}{R} \quad \text{untuk } T_e < T_s \quad (4)$$

T_s = waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan.

R = rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung.

$$R = \frac{S_a}{V_y / W} C_m \quad (5)$$

S_a = akselerasi respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau.

V_y = gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear.

W = total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi.

C_m = faktor massa efektif yang diambil dari Tabel 3-1 FEMA 356.

C_2 = koefisien untuk memperhitungkan efek pinching dari hubungan beban deformasi

akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan Tabel 3-3 FEMA 356.

C_3 = koefisien untuk memperhitungkan pembebasan lateral akibat adanya efek P delta. Koefisien diperoleh secara empiris dari studi statistik analisa riwayat waktu non-linier dari SDOF dan diambil berdasarkan pertimbangan *engineering judgement*, dimana perilaku hubungan gaya geser dasar–lendutan pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (kurva meningkat) maka $C_3 = 1$, sedangkan jika perilaku pasca lelehnya negatif (kurva menurun) maka:

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad (6)$$

α = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinear

g = percepatan gravitasi 9.81 m/det².

Metode Spektrum Kapasitas ATC 40

Dalam metoda spektrum kapasitas proses dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Proses tersebut sama dengan metode koefisien perpindahan, kecuali bahwa hasilnya diplotkan dalam format *Acceleration Displacement Response Spectrum* (ADRS). Berikut ini adalah teori yang digunakan dalam ATC 40.

Kurva kapasitas, hasil analisis *pushover* diubah menjadi spektrum kapasitas dalam format ADRS melalui persamaan:

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (7)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{atap}}{PF_1 \phi_{atap,1}} \quad (8)$$

$$PF = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]}{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (9)$$

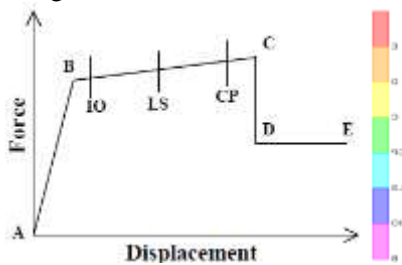
$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_i) / g \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N w_i / g \right] \left[\sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad (10)$$

dimana:

- PF_1 = faktor partisipasi ragam untuk ragam 1
- α_1 = koefisien massa ragam untuk ragam ke-1
- w_i/g = massa lantai i
- ϕ_{i1} = perpindahan pada lantai i ragam ke-1
- N = jumlah lantai
- V = gaya geser dasar
- W = berat struktur (DL dan LL tereduksi)
- Δ_{atap} = perpindahan atap
- S_a = spektrum percepatan
- S_d = spektrum perpindahan

Properti Sendi Plastis

Struktur gedung apabila menerima beban gempa pada tingkatan atau kondisi tertentu, akan terjadi sendi plastis (*hinge*) pada balok pada gedung tersebut. Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur balok dan kolom menahan gaya dalam. Perencanaan suatu bangunan harus sesuai dengan konsep desain kolom kuat balok lemah. Apabila terjadi suatu keruntuhan struktur, maka yang runtuh adalah baloknya dahulu. Apabila kolomnya runtuh dahulu, maka struktur langsung hancur. Adapun keterangan mengenai karakteristik sendi plastik adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Properti sendi plastis
Sumber: Manual SAP 2000

Tabel 3. Tingkat kerusakan Struktur

Keterangan	Simbol	Penjelasan
B	●	Menunjukkan batas linear yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur
IO	●	Terjadi kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat belum terjadi gempa
LS	●	Terjadi kerusakan mulai dari kecil hingga tingkat sedang. Kekakuan struktur berkurang tetapi masih mempunyai ambang yang cukup besar terhadap keruntuhan
CP	●	Terjadi kerusakan yang parah pada struktur sehingga kekuatan dan kekakuannya berkurang banyak
C	●	Batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung
D	●	Terjadinya degradasi kekuatan struktur yang besar, sehingga kondisi struktur tidak stabil dan hampir <i>collapse</i>
E	●	Struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan hancur

Sumber : P.A. Budi FT Unsemar 2011

METODOLOGI PENELITIAN

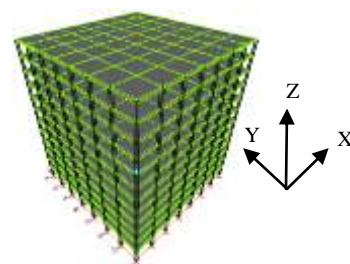
Secara umum dalam metode penelitian dalam skripsi ini dibagi dalam tiga tahap yaitu input, analisis dan output. Yang termasuk dalam tahap input antara lain penentuan geometri struktur, vareabel desain, penentuan jenis beban dan pemodelan struktur.

Sedangkan tahap analisis yaitu analisis struktur tiga dimensi dengan memasukan respons spektra, dan parameter-parameter analisis *pushover* pada program SAP2000 v 16.0.0 untuk mengetahui respons struktur dan tingkat kinerja struktur. Tahap yang terakhir yaitu tahap output yang membahas tentang hasil analisis *pushover* dengan berdasarkan metode FEMA 356 dan ATC 40, yang dikeluarkan dalam bentuk grafik dan gambar pada tiap tipe struktur gedung.

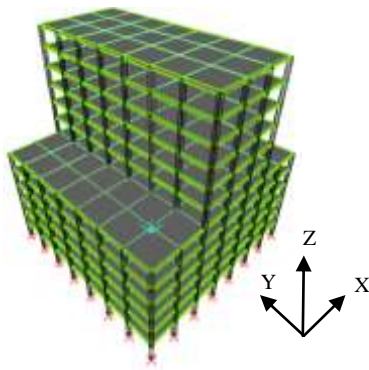
- Material
 - Kuat tekan beton (f_c') = 30 Mpa
 - Tulangan geser diameter ≤ 12 mm menggunakan baja tulangan polos BJTP 24 dengan tegangan leleh, $f_y = 240$ MPa dan , $f_u = 312$ MPa
 - Tulangan utama diameter ≥ 12 mm menggunakan baja tulangan ulir BJTD 40 dengan tegangan leleh, $f_y = 400$ MPa dan $f_u = 520$ MPa
- Elemen struktur
 - Jenis struktur = beton bertulang
 - Pondasi = terjepit, kaku di tanah
 - Penampang Balok = 40 x 60 cm
 - Penampang kolom = 60 x 60 cm
 - Pelat lantai = 12 cm
- Geometrik struktur

Jumlah tipe struktur yang akan dimodelkan ada 5 tipe pemodelan, yaitu tipe Non Podium, Podium I, Podium II, Podium III, dan Podium IV. Secara umum geometri bangunan sebagai berikut:

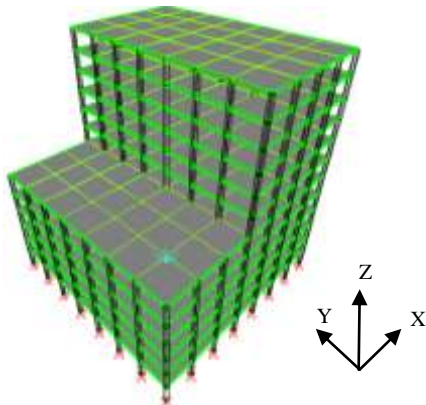
 - Jumlah lantai = 12 lantai
 - Ketinggian antar lantai = 4 m
 - Ketinggian lantai bawah = 4 m
 - Jumlah spasing = 7 spasing
 - Jarak antara spasing = 6 meter



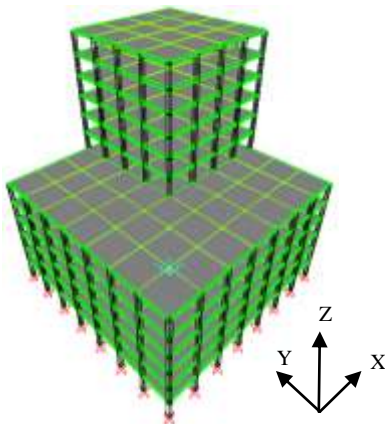
Gambar 5. Non Podium



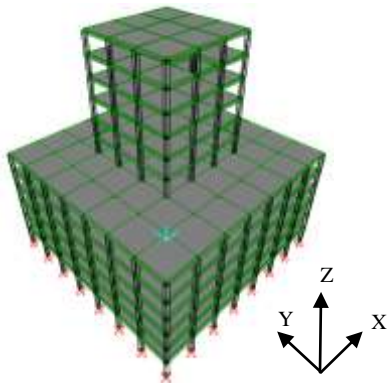
Gambar 6. Podium I



Gambar 7. Podium II

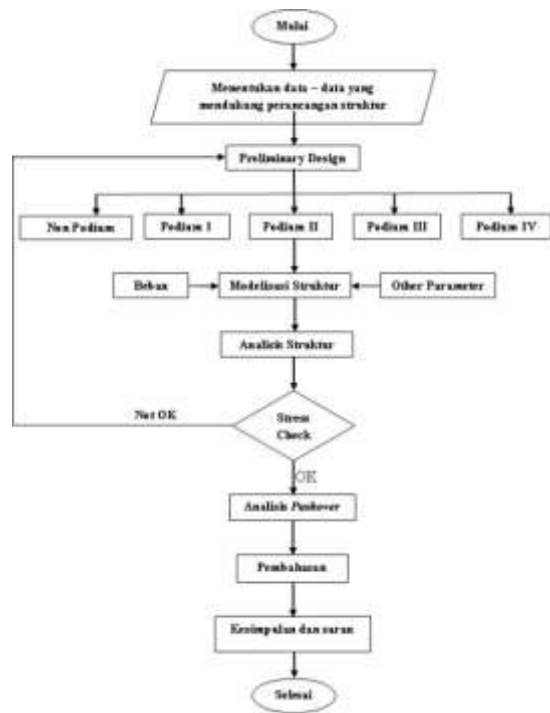


Gambar 8. Podium III



Gambar 9. Podium IV

Bagan Alir Penelitian



Gambar 10. Bagan alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva Kapasitas



Gambar 11. Kurva Kapasitas akibat Push X



Gambar 12. Kurva Kapasitas akibat Push Y

Dari gambar 11 dan 12 didapat hasil perpindahan dan gaya geser dasar maksimum, seperti disajikan dalam Tabel 4 berikut:

Tabel 4. Perpindahan dan gaya geser dasar maksimum

Gedung	ARAH	Perpindahan Maksimum (Meter)	Gaya Geser Dasar Maksimum (Ton)
Non Podium	X	0,935565	2165,34213
	Y	0,972596	2264,27595
Podium I	X	0,187426	1306,66763
	Y	1	2728,00429
Podium II	X	0,631478	2156,64946
	Y	0,372109	1727,63621
Podium III	X	0,36879	1707,94106
	Y	0,362741	1614,18693
Podium IV	X	0,631161	2115,14812
	Y	0,651269	2153,35715

Perpindahan maksimum sebelum terjadi keruntuhan yang terbesar dari lima pemodelan gedung untuk arah X adalah gedung non podium sebesar 0,93 meter, dan yang terkecil adalah gedung podium I sebesar 0,187 m. Sedangkan untuk arah Y adalah gedung podium I sebesar 1 meter, dan yang terkecil adalah gedung podium III sebesar 0,36 m.

Gaya geser dasar maksimum sebelum terjadi keruntuhan yang terbesar dari lima pemodelan gedung untuk arah X adalah gedung non podium sebesar 2165 ton, dan yang terkecil adalah gedung podium I sebesar 1306 ton. Sedangkan untuk arah Y adalah gedung podium I sebesar 2728 ton, dan yang terkecil adalah gedung podium III sebesar 1614 ton.

Kinerja Batas SNI 2012

Pada SNI 1726 – 2012 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, memberikan batasan simpangan antara lantai tingkat (Δ), yaitu tidak boleh melebihi simpangan antar lantai tingkat izin (Δ_a) seperti pada Tabel 2.15. dimana h_{sx} adalah tinggi tingkat dihitung dari dasar bangunan, yaitu 48 m

$$\Delta < 0,020 h_{sx}$$

$$\Delta < 0,020 \times 48 \text{ m}$$

$$\Delta < 0,96 \text{ m}$$

Jadi batasan simpangan antara lantai tingkat tidak boleh melampaui 0,96 m.

Hasil analisis berdasarkan kurva kapasitas dan kinerja batas dengan SNI 1726:2012, dapat disimpulkan seperti pada Tabel 5.

Target Perpindahan FEMA 356

Target perpindahan dengan metode koefisien perpindahan sesuai FEMA 356, dengan menggunakan program SAP2000, untuk setiap model ditampilkan dalam Tabel 6.

Tabel 5. Evaluasi Perpindahan Maksimum

Gedung	ARAH	Perpindahan Maksimum (Meter)	
		Kurva Kapasitas	SNI 2012
Non Podium	Y	0,972596	0,96
Podium I	Y	1	0,96
Podium II	X	0,631478	0,96
Podium III	X	0,36879	0,96
Podium IV	X	0,631161	0,96

Tabel 6. Target perpindahan FEMA 356

Gedung	ARAH	FEMA 356	
		V (Ton)	D (meter)
Non Podium	X	1152,3888	0,218
	Y	1152,3888	0,218
Podium I	X	1306,6676	0,198
	Y	1353,5113	0,191
Podium II	X	1323,9051	0,192
	Y	1334,9904	0,188
Podium III	X	1306,5864	0,175
	Y	1306,5893	0,175
Podium IV	X	1360,7673	0,197
	Y	1360,8478	0,197

Hasil evaluasi kinerja sesuai FEMA 356, memberikan target perpindahan menentukan yang sama kedua arahnya untuk gedung non podium yaitu 0,218 m, untuk gedung podium I yang menentukan yaitu arah X sebesar 0,198 m, untuk gedung podium II yang menentukan yaitu arah X sebesar 0,192 m, untuk gedung podium III sama untuk kedua arahnya yaitu sebesar 0,175 m, dan untuk gedung podium IV sama untuk kedua arahnya yaitu sebesar 0,197 m.

Spektrum Kapasitas ATC 40

Target perpindahan dengan metode spektrum kapasitas sesuai ATC 40, dengan menggunakan program SAP2000, untuk setiap model ditampilkan dalam Tabel 7 berikut:

Tabel 7. Target Perpindahan ATC 40

Gedung	ARAH	Performance Point					
		V (Ton)	D (meter)	Sa (g)	Sd (m)	T _{eff} (det)	β_{eff} (%)
Non Podium	X	1032,82	0,170	0,204	0,142	1,670	0,224
	Y	1032,82	0,170	0,204	0,142	1,670	0,224
Podium I	X	1149,49	0,131	0,307	0,098	1,132	0,214
	Y	1167,67	0,128	0,308	0,098	1,129	0,214
Podium II	X	1170,20	0,135	0,285	0,105	1,218	0,216
	Y	1144,61	0,121	0,286	0,105	1,216	0,214
Podium III	X	1122,48	0,113	0,348	0,087	1,005	0,211
	Y	1122,48	0,113	0,348	0,087	1,005	0,211
Podium IV	X	1172,63	0,130	0,387	0,081	0,916	0,204
	Y	1173,22	0,130	0,387	0,081	0,916	0,203

Hasil evaluasi kinerja sesuai ATC, memberikan target perpindahan menentukan yang sama kedua arahnya untuk gedung non podium yaitu 0,170 m, untuk gedung podium I yang menentukan yaitu arah X sebesar 0,131 m, untuk gedung podium II yang menentukan yaitu arah X sebesar 0,135 m, untuk gedung podium III

III sama untuk kedua arahnya yaitu sebesar 0,113 m, dan untuk gedung podium IV sama untuk kedua arahnya yaitu sebesar 0,130 m.

Dari kedua target perpindahan di atas, maka dapat disimpulkan evaluasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8. Evaluasi Kinerja Struktur

Gedung	ARAH	ATC 40		FEMA 356	
		V (Ton)	D (meter)	V (Ton)	D (meter)
Non Podium	X	1032,82	0,170	1152,3888	0,218
	Y	1032,82	0,170	1152,3888	0,218
Podium I	X	1149,49	0,131	1306,6676	0,198
	Y	1167,67	0,128	1353,5113	0,191
Podium II	X	1170,20	0,135	1323,9051	0,192
	Y	1144,61	0,121	1334,9904	0,188
Podium III	X	1122,48	0,113	1306,5864	0,175
	Y	1122,48	0,113	1306,5893	0,175
Podium IV	X	1172,63	0,130	1360,7673	0,197
	Y	1173,22	0,130	1360,8478	0,197

Level Kinerja

Dari target perpindahan titik kontrol pada Tabel 6 dan Tabel 7, maka dapat diketahui level kinerja masing-masing model struktur berdasarkan FEMA 356, baik dari gedung non podium, podium I, podium II, podium III, dan podium IV yang akan ditampilkan pada pada Tabel 9. berikut:

Tabel 9. Level Kinerja tiap pemodelan

GEDUNG	KATEGORI	ARAH X	ARAH Y
Non Podium	Step i	20	20
	Perpindahan titik kontrol Δ (m)	0,218	0,218
	Gaya geser dasar (Vi) (Ton)	1152,3888	1152,3888
	Level kinerja	B	B
Podium I	Step i	17	16
	Perpindahan titik kontrol Δ (m)	0,198	0,191
	Gaya geser dasar (Vi) (Ton)	1306,6676	1353,5113
	Level kinerja	B	B
Podium II	Step i	17	18
	Perpindahan titik kontrol Δ (m)	0,192	0,188
	Gaya geser dasar (Vi) (Ton)	1323,9051	1334,9904
	Level kinerja	B	B
Podium III	Step i	16	16
	Perpindahan titik kontrol Δ (m)	0,175	0,175
	Gaya geser dasar (Vi) (Ton)	1306,5864	1306,5893
	Level kinerja	B	B
Podium IV	Step i	19	18
	Perpindahan titik kontrol Δ (m)	0,197	0,197
	Gaya geser dasar (Vi) (Ton)	1360,7673	1360,8478
	Level kinerja	B	B

Sedangkan level kinerja berdasarkan tabel 11 – 12 pada ATC 40:

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} \tag{11}$$

$$Maximum\ Inelastic\ drift = \frac{D_t - D_1}{H_{total}} \tag{12}$$

a. Gedung Non Podium,

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} = \frac{0,170}{48} = 0,00354m$$

$$Maximum\ In-elastic\ drift =$$

$$\frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{0,170 - 0,02}{48} = 0,003125$$

Sehingga level kinerja bangunan adalah **Immediate Occupancy**

b. Gedung Podium I,

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} = \frac{0,131}{48} = 0,00273m$$

$$Maximum\ In-elastic\ drift =$$

$$\frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{0,131 - 0,01}{48} = 0,002521$$

Sehingga level kinerja bangunan adalah **Immediate Occupancy**

c. Gedung Podium II,

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} = \frac{0,135}{48} = 0,00281m$$

$$Maximum\ In-elastic\ drift =$$

$$\frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{0,135 - 0,03164}{48} = 0,002153$$

Sehingga level kinerja bangunan adalah **Immediate Occupancy**

d. Gedung Podium III,

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} = \frac{0,113}{48} = 0,00235m$$

$$Maximum\ In-elastic\ drift =$$

$$\frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{0,113 - 0,03117}{48} = 0,00170$$

Sehingga level kinerja bangunan adalah **Immediate Occupancy**

e. Gedung Podium IV,

$$Maximum\ drift = \frac{Dt}{H} = \frac{0,130}{48} = 0,00271m$$

$$Maximum\ In-elastic\ drift =$$

$$\frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{0,130 - 0,030345}{48} = 0,002076$$

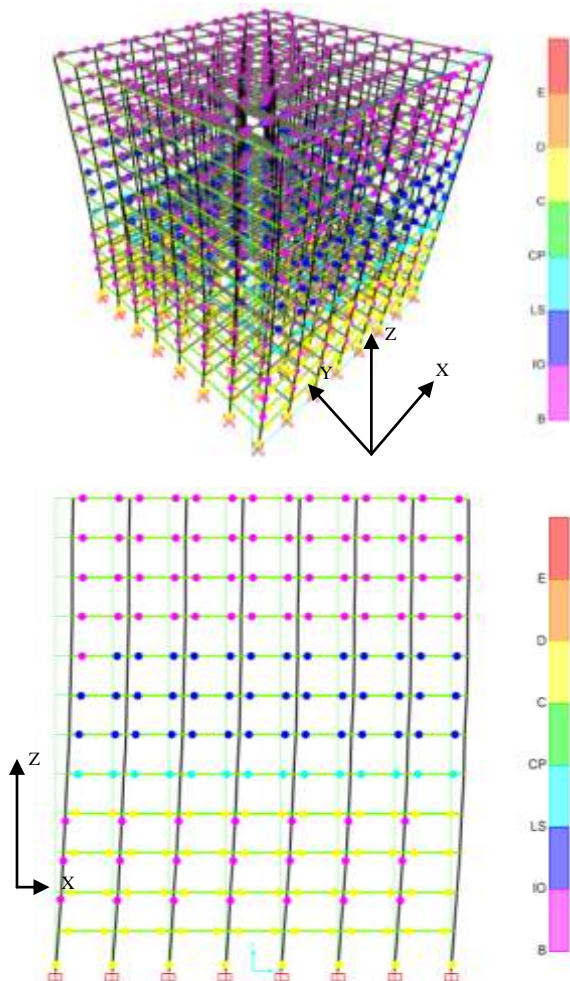
Sehingga level kinerja bangunan adalah **Immediate Occupancy**

Mekanisme Sendi Plastis

Pada mekanisme sendi plastis ini akan disajikan gambar skema distribusi sendi plastis, yang diambil pada portal utama yang menjadi parameter apabila terjadi keruntuhan total dan gambar dalam tiga dimensi. Gambar yang akan ditampilkan yaitu pada kondisi maksimum yang menentukan.

- Gedung Non Podium

Gambar 12 menunjukkan distribusi sendi plastis pada kondisi maksimum yaitu pada step ke 76. Portal yang diambil adalah portal 1, yang merupakan portal eksternal dimana menjadi parameter utama dan merupakan lokasi titik kontrol pada *case Push X*. Pada step ke 76 ini besar perpindahan adalah 0,935 m dan gaya geser dasar 2165 ton. Terlihat terjadi distribusi sendi plastis yang menentukan yaitu level C yang berwarna kuning yang menunjukkan batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung.

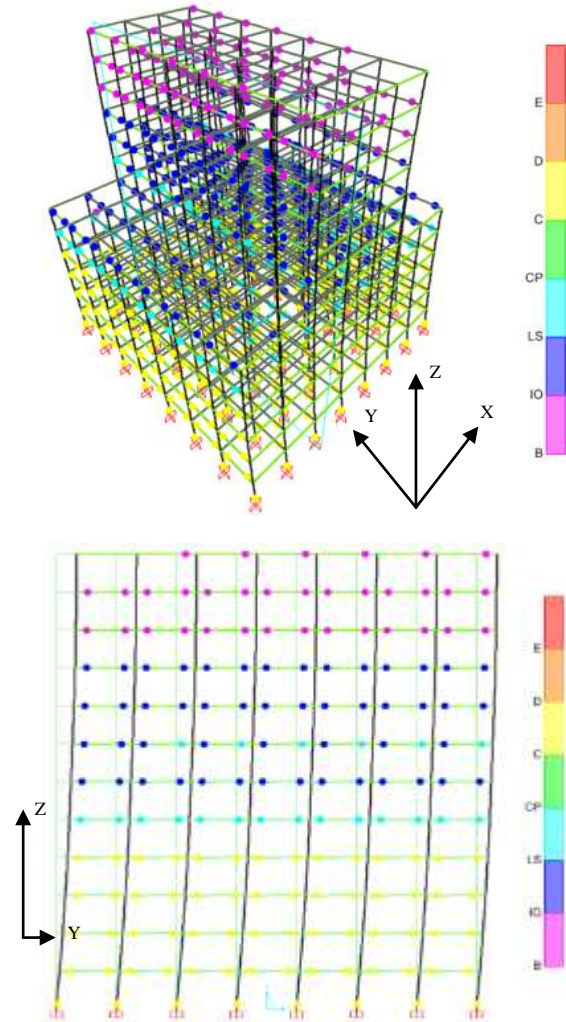


Gambar 12. Distribusi sendi plastis pada portal I, step 76 akibat Push X

- Gedung Podium I

Gambar 13 menunjukkan distribusi sendi plastis pada kondisi maksimum yaitu pada step ke 81. Portal yang diambil adalah portal C, yang merupakan portal eksternal pada podium dimana menjadi parameter utama dan merupakan lokasi titik kontrol pada *case Push Y*. Pada step ke 81

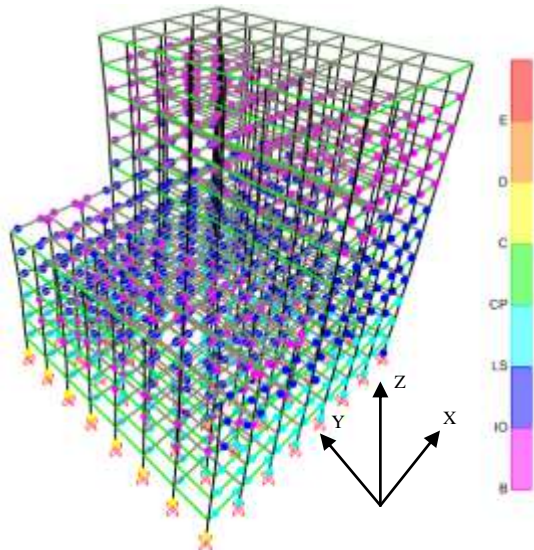
ini besar perpindahan adalah 1 m dan gaya geser dasar 2728 ton. Terjadi distribusi sendi plastis yang menentukan yaitu level C yang berwarna kuning yang menunjukkan batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung.



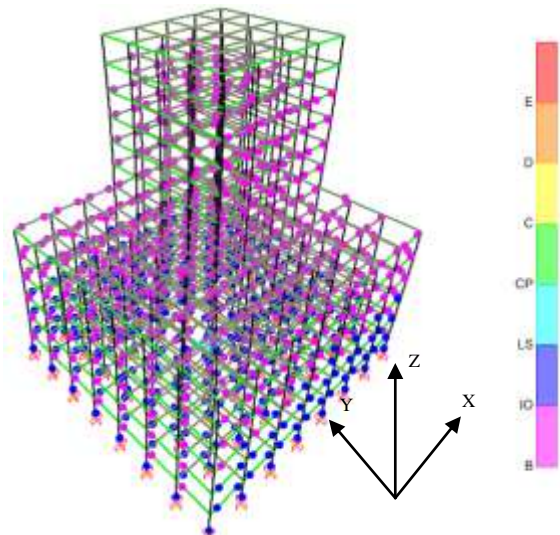
Gambar 13. Distribusi sendi plastis pada portal C, step 81 akibat Push Y

- Gedung Podium II

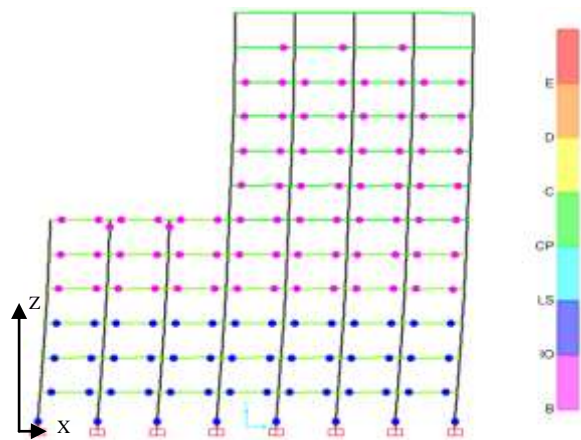
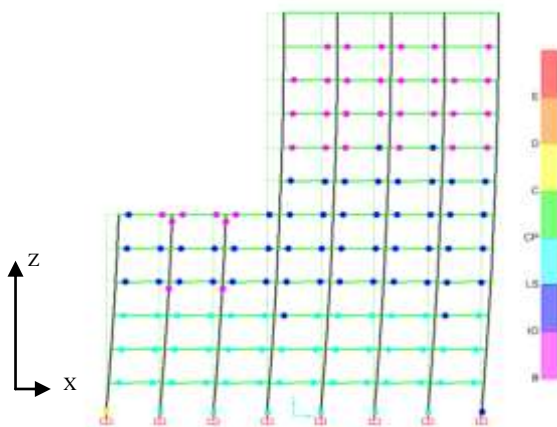
Gambar 14 menunjukkan distribusi sendi plastis pada kondisi maksimum menentukan yaitu pada step ke 53. Portal yang diambil adalah portal 1, yang merupakan portal eksternal dimana menjadi parameter utama dan merupakan lokasi titik kontrol pada *case Push X*. Pada step ke 53 ini besar perpindahan adalah 0,6314 m dan gaya geser dasar 2156 Kg. Terlihat terjadi distribusi sendi plastis yang menentukan yaitu level C yang berwarna kuning yang menunjukkan batas maksimum gaya geser yang masih mampu ditahan gedung. Sendi plastis level C sudah terbentuk pada kolom lantai dasar.



Gambar 14. Distribusi sendi plastis pada portal 1, step 53 akibat Push X



Gambar 15. Distribusi sendi plastis pada portal 4, step 31 akibat Push X

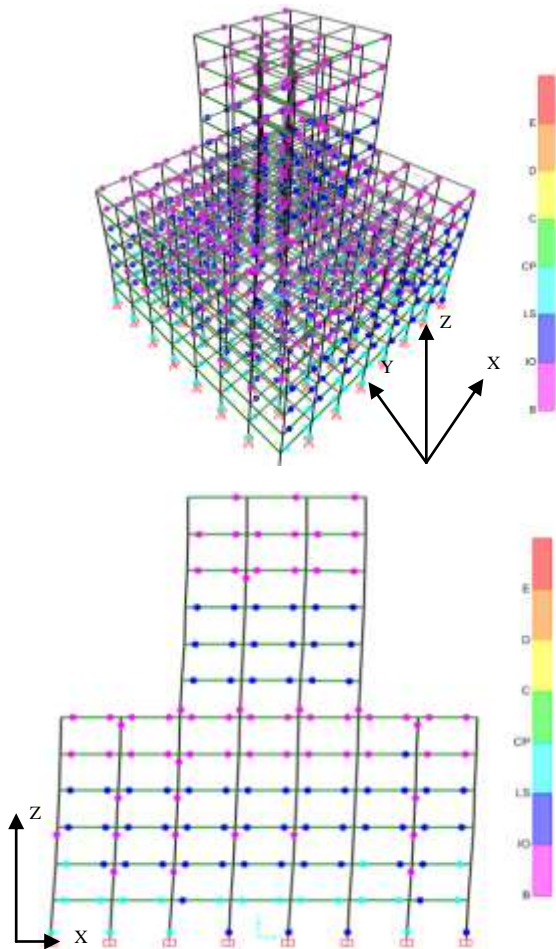


- Gedung Podium III

Gambar 15 menunjukkan distribusi sendi plastis pada kondisi maksimum yaitu pada step ke 31. Portal yang diambil adalah portal 4, yang merupakan portal eksternal pada podium dimana menjadi parameter utama dan merupakan lokasi titik kontrol pada *case Push X*. Pada step ke 31 ini besar perpindahan adalah 0,368 m dan gaya geser dasar 1306 ton. Terlihat terjadi distribusi sendi plastis yang menentukan yaitu level IO yang berwarna biru yang menunjukkan terjadi kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat belum terjadi gempa. Sendi plastis level IO tersebar pada balok, dan juga sudah terbentuk pada kolom.

- Gedung Podium IV

Pada gambar 16 dibawah, menunjukkan distribusi sendi plastis pada kondisi maksimum yaitu pada step ke 54. Portal yang diambil adalah portal 3, yang merupakan portal eksternal pada podium dimana menjadi parameter utama dan merupakan lokasi titik kontrol pada *case Push X*. Pada step ke 54 ini besar perpindahan adalah 0,631161 m dan gaya geser dasar 2115,14812 Ton. Terlihat terjadi distribusi sendi plastis yang menentukan yaitu level LS yang berwarna telur asin yang menunjukkan terjadi kerusakan mulai dari kecil hingga tingkat sedang.



Gambar 16. Distribusi sendi plastis pada portal 3, step 54 akibat Push X

PENUTUP

Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan dari pemodelan struktur tipe non podium, podium I, podium II, podium III, dan podium IV, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Gaya geser dasar maksimum yang ditentukan dari kelima tipe gedung yang terbesar, yaitu gedung non podium 2165 ton dengan perpindahan maksimum 0,97 m, dan yang terkecil adalah gedung podium III yaitu 1614 ton, dengan perpindahan maksimum 0,63 m.
2. Secara keseluruhan target perpindahan berdasarkan FEMA 356 mendapatkan hasil yang terbesar untuk semua tipe gedung dibanding dengan ATC 40 yang mendapatkan hasil terkecil.
3. Level kinerja berdasarkan FEMA 356 masuk kategori B, yaitu menunjukkan batas linear yang kemudian akan diikuti dengan terjadinya pelelehan pada struktur
4. Level kinerja berdasarkan ATC 40 yaitu *Immediate Occupancy* untuk semua tipe gedung, yang artinya suatu kondisi yang mana struktur secara umum masih aman untuk kegiatan operasional segera setelah gempa terjadi (*damage state*)
5. Distribusi sendi plastis sesuai yang diharapkan, yaitu sesuai dengan sistem kolom kuat balok lemah, karena terjadi keruntuhan pada balok dulu, kemudian diikuti pada kolom.

Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan membandingkan hasil analisis *pushover* dengan metode analisis riwayat waktu, untuk mengetahui keakuratan hasil analisis terhadap perilaku struktur akibat gempa.
2. Memperhatikan parameter-parameter yang akan digunakan dalam proses analisis *pushover* dengan bantuan program SAP2000, agar hasil analisis akurat dan sesuai dengan kondisi yang terjadi akibat gempa.
3. Perlu dicoba dengan variasi pemodelan yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Volume 1*, Applied Technology Council, California.
- ASCE, 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Federal Emergency Management Agency 356*. Washinton, DC.
- Badan Standarisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedungdan non Gedung (SNI 1726-2012)*. Bandung.
- CSI, 2013. *Analysis Reference Manual for SAP2000, ETABS, SAFE, CsiBridge*. Berkeley. California USA.

- Dewobroto, W., 2006. *Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000*. Jurusan Teknik Sipil - Universitas Pelita Harapan. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 3, No. 1. Hal 8-10.
- Dewobroto, W., 2012. *Menyongsong Era Bangunan Tinggi dan Bentang Panjang*. Universitas Pelita Harapan
- Ihsan, Mohammad, 2008. *Analisis Ketahanan Gempa*, Skripsi Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- Pawirodikromo, W. 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- P. Anindityo Budi, 2011. *Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton dengan Analisis Pushover Prosedur A Menggunakan Program ETABS v 9.50*. Skripsi Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Pranata, Y.A. 2006. *Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan gempa dengan Pushover Analysis (sesuai ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440)*. Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 3, No. 1, Januari 2006.
- Pranata, Y.A., Wijaya, P.K., 2008. *Kajian Daktilitas Struktur Gedung Beton Bertulang dengan Analisis Riwayat Waktu dan Analisis Beban Dorong*. Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 8, No. 3, Juni 2008 : 250 – 263.
- Indarto, H. Hanggoro, T.C.A, Putra, K.C.A. 2013. *Aplikasi SNI Gempa 1726:2012 for dummies*. Semarang: Bambang dewasa's files.