

JURNAL REKAYASA TEKNIK SIPIL

REKATS



UNESA

Universitas Negeri Surabaya



JURNAL ILMIAH TEKNIK SIPIL	VOLUME:	NOMER:	HALAMAN:	SURABAYA	ISSN:
	02	02	132 - 140	2017	2252 - 5009

JURUSAN TEKNIK SIPIL-FAKULTAS TEKNIK-UNIVERSITAS NEGERI SURABAYA

TIM EJOURNAL

Ketua Penyunting:

Prof.Dr.Ir.Kusnan, S.E,M.M,M.T

Penyunting:

1. Prof.Dr.E.Titiek Winanti, M.S.
2. Prof.Dr.Ir.Kusnan, S.E,M.M,M.T
3. Dr.Nurmi Frida DBP, MPd
4. Dr.Suparji, M.Pd
5. Hendra Wahyu Cahyaka, ST., MT.
6. Dr.Naniek Esti Darsani, M.Pd
7. Dr.Erina,S.T,M.T.
8. Drs.Suparno,M.T
9. Drs.Bambang Sabariman,S.T,M.T
10. Dr.Dadang Supryatno, MT

Mitra bestari:

1. Prof.Dr.Husaini Usman,M.T (UNJ)
2. Prof.Dr.Ir.Indra Surya, M.Sc,Ph.D (ITS)
3. Dr. Achmad Dardiri (UM)
4. Prof. Dr. Mulyadi(UNM)
5. Dr. Abdul Muis Mapalotteng (UNM)
6. Dr. Akmad Jaedun (UNY)
7. Prof.Dr.Bambang Budi (UM)
8. Dr.Nurhasanyah (UP Padang)
9. Dr.Ir.Doedoeng, MT (ITS)
10. Ir.Achmad Wicaksono, M.Eng, PhD (Universitas Brawijaya)
11. Dr.Bambang Wijanarko, MSi (ITS)
12. Ari Wibowo, ST., MT., PhD. (Universitas Brawijaya)

Penyunting Pelaksana:

1. Drs.Ir.Karyoto,M.S
2. Krisna Dwi Handayani,S.T,M.T
3. Arie Wardhono, ST., M.MT., MT. Ph.D
4. Agus Wiyono,S.Pd,M.T
5. Eko Heru Santoso, A.Md

Redaksi:

Jurusan Teknik Sipil (A4) FT UNESA Ketintang - Surabaya

Website: tekniksipilunesa.org

Email: REKATS

DAFTAR ISI

Halaman

TIM EJOURNAL.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
• Vol 2 Nomer 2/rekat/17 (2017)	
PEMANFAATAN BATU APUNG DALAM PEMBUATAN BETON RINGAN DENGAN PENAMBAHAN LUMPUR SIDOARJO (LUSI) SEBAGAI SUBTITUSI AGREGAT HALUS TERHADAP KUAT TEKAN DAN POROSITAS	
<i>Abdul Ra'uf Alfansuri, Arie Wardhono,</i>	01 – 11
ANALISA SISA MATERIAL DAN PENANGANANNYA PADA PROYEK APARTEMEN ROYAL CITYLOFT SURABAYA	
<i>M. Alfin Ahfiyatna, Didiek Purwadi,</i>	12 – 23
PENGARUH PENYIRAMAN TERHADAP KUAT TEKAN DAN PERMEABILITAS PAVING STONE GEOPOLYMER BERBAHAN DASAR ABU TERBANG	
<i>Raditya Eko Kurniawan, Arie Wardhono,</i>	24 – 35
STUDI POLA OPERASI WADUK WONOREJO UNTUK PLTA	
<i>Pandra Christanty Suharto, Kusnan,</i>	36 – 41
ANALISIS NILAI PRODUKTIVITAS PEKERJAAN PEMASANGAN DINDING PRECAST PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG BERTINGKAT	
<i>Fani Febri Dewi Utami, Mas Suryanto HS,</i>	42 – 54
PRODUKTIVITAS KELOMPOK KERJA PEMASANGAN BEKISTING DAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHINYA PADA PROYEK GEDUNG BERTINGKAT DI WILAYAH SURABAYA	
<i>Rizky Astri Widyawati, Sutikno,</i>	55 – 76
ANALISIS PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN RANGKA BAJA MODEL K-TRUSS	
<i>Ndaru Kusumo, Karyoto,</i>	77 – 86
MODEL HUBUNGAN ANTARA KERUSAKAN PERKERASAN LENTUR DAN KOMPOSISI LALU LINTAS PADA JALAN PROVINSI DI KABUPATEN MOJOKERTO (Studi Kasus: Jl. Raya Mlirip, Jl. Magersari-Ngares Kidul, Jl. Raya Gempolkerep)	
<i>Rizki Inkasari, Purwo Mahardi,</i>	87 – 97

PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH ASBES SEBAGAI BAHAN TAMBAH CAMPURAN BETON TERHADAP KUAT TEKAN DAN MODULUS ELATISITAS BETON	
<i>Liga Triswasono, Sutikno,</i>	98 – 103
PENGOPTIMALAN PEMASANGAN JARAK ANTAR BAUT TERHADAP TERJADINYA <i>CURLING</i> PADA SAMBUNGAN PELAT	
<i>Hendry Yudha Pranata, Arie Wardhono,</i>	104 – 111
ANALISA PERBANDINGAN METODE SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN MENENGAH (SRPMM) DAN SISTEM GANDA PADA PERENCANAAN ULANG HOTEL ICON GRESIK TERHADAP LUASAN TULANGAN BALOK DAN KOLOM	
<i>Yasher Arafat, Sutikno,</i>	112 – 117
PENGARUH PEMANFAATAN LIMBAH GAS ASETILEN SEBAGAI BAHAN CAMPURAN PEMBUATAN BATU BATA DITINJAU DARI KUALITAS SESUAI SNI 15-2094-2000	
<i>Mohamad Nisfi Fazar Romadhon, Arie Wardhono,</i>	118 – 124
PENGOPTIMALISASIAN PEMASANGAN BAUT PADA TEPI SAMBUNGAN PELAT TARIK	
<i>Nurul Burhanudin, Arie Wardhono,</i>	125 – 131
PENGARUH VARIASI BENTANG PANJANG BALOK STRUKTUR BETON TERHADAP KINERJA STRUKTUR DENGAN ANALISIS <i>PUSHOVER</i> BERDASARKAN ATC-40 DAN SNI 1726:2012	
<i>Mohamad Sahal Rifa'i Chairul Aziz, Arie Wardhono,</i>	132 – 140

PENGARUH VARIASI BENTANG PANJANG BALOK STRUKTUR BETON TERHADAP KINERJA STRUKTUR DENGAN ANALISIS *PUSHOVER* BERDASARKAN ATC-40 DAN SNI 1726:2012

Mohamad Sahal Rifa'i Chairul Aziz

Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

m.sahalc.aziz@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Analisis *pushover* merupakan analisis nonlinier dengan pemodelan struktur berbasis komputer, dengan memberi beban statik ke arah lateral secara bertahap sampai memenuhi target perpindahannya atau mengalami kondisi runtuh pada elemen strukturnya. Analisis *pushover* menghasilkan kurva kapasitas (*capacity curve*), yaitu hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dengan perpindahan lantai teratas bangunan arah lateral (*displacement*).

Penelitian ini dilakukan pada 4 struktur beton dengan variasi bentang panjang balok untuk mengetahui gaya geser dasar akibat gempa efektif, mengetahui kinerja akibat perpindahan atap berdasarkan ATC-40 dan SNI 1726:2012, dan mengetahui formasi bentang panjang balok yang paling efektif setelah dianalisis dengan analisis *pushover*. Analisis struktur dalam bentuk 2 dimensi (2D) dan dilakukan dengan bantuan *Structural Analysis Program* (SAP2000).

Hasil analisis *pushover* didapatkan gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif, target perpindahan atap (δ_t), dan perpindahan yang diperbesar (δ_x). Struktur 1 $V = 96.553,012$ kg, $\delta_t = 394,854$ mm, $\delta_x = 500,397$ mm, Struktur 2 $V = 97.802,751$ kg, $\delta_t = 389,634$ mm, $\delta_x = 512,893$ mm, Struktur 3 $V = 98.032,048$ kg, $\delta_t = 386,859$ mm, $\delta_x = 492,145$ mm, dan Struktur 4 $V = 100.406,34$ kg, $\delta_t = 375,000$ mm, $\delta_x = 488,188$ mm. Level kinerja berdasarkan ATC-40 semua struktur masuk dalam kategori *Damage Control*, dan berdasarkan SNI 1726:2012 semua struktur memenuhi batas ultimit perpindahan. Struktur paling efektif setelah dianalisis *pushover* adalah Struktur 4 dengan formasi bentang panjang balok 6m-2m-2m-6m.

Kata Kunci: *Pushover*, nonlinier, gaya geser dasar.

Abstract

Pushover analysis is a nonlinear analysis with structural modelling computer based, by involves applying horizontal loads incrementally until the target of its displacement or facing collapse on its structural elements are reached. Pushover analysis produces capacity curve which is the plot of base shear against the lateral deflection of the roof of the structure.

The subject of this study are 4 concrete structures with long span beam variation for the purpose of revealing base shear force caused by effective earthquake, knowing the performance of roof displacement based on ATC -40 and SNI 1726:2012, and also revealing the most effective length of beam formation after being analyzed by pushover analysis. The structures analysis are designed to be 2 dimension (2D) and being done by using Structural Analysis Program (SAP200).

*The result shows that the base shear is caused by an effective earthquake (V), roof displacement target (δ_t), and also enlarged displacement (δ_x). Structure 1 $V = 96.553,012$ kg, $\delta_t = 394,854$ mm, $\delta_x = 500,397$ mm, Structure 2 $V = 97.802,751$ kg, $\delta_t = 389,634$ mm, $\delta_x = 512,893$ mm, Structure 3 $V = 98.032,048$ kg, $\delta_t = 386,859$ mm, $\delta_x = 492,145$ mm, dan Structure 4 $V = 100.406,34$ kg, $\delta_t = 375,000$ mm, $\delta_x = 488,188$ mm. The level of performance based on ATC -40 is all structure belongs to *Damage Control* category, and based on SNI 1726:2012 all structure fulfill the limit of displacement ultimate. The most effective structure after being analyzed by pushover is Structure 4 within long span beam formation 6m-2m-2m-6m.*

Keywords: *Pushover, nonlinier, base shear force.*

PENDAHULUAN

Pada bangunan-bangunan bertingkat tinggi, beban gempa lebih dominan dibanding dengan beban gravitasi yang bekerja padanya (Wisnumurti dkk, 2008:11). Dengan demikian, maka perencanaan bangunan gedung bertingkat tinggi harus direncanakan tahan terhadap gempa. Pendekatan untuk menganalisis ketahanan bangunan gedung diantaranya dapat dilakukan dengan analisis *pushover*.

Struktur bangunan gedung mempunyai variasi bentuk tergantung dari fungsi, kondisi lapangan, kebutuhan, maupun selera. Salah satu variasi diantaranya adalah bentang panjang balok. Menurut Wardhono (2007:1), variasi bentang balok menyebabkan distribusi momen pada lantai terkadang bervariasi sesuai dengan bentang yang ada. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan dengan membandingkan kinerja ketahanan terhadap gempa empat model struktur bangunan gedung yang mempunyai bentang panjang balok bervariasi

dengan analisis *pushover*. Analisis dilakukan dengan bantuan *Structure Analysis Program* (SAP2000) dengan model Struktur 2 dimensi (2D).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif struktur, mengetahui kinerja akibat perpindahan atap struktur, dan mengetahui formasi bentang panjang balok struktur yang paling efektif setelah dianalisis dengan analisis *pushover*.

Analisis *pushover* merupakan bagian dari perencanaan ketahanan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*). Analisis *pushover* adalah analisis nonlinier dengan pemodelan struktur berbasis komputer dengan memberi beban statik ke arah lateral secara bertahap sampai memenuhi target perpindahannya (*displacement*) atau mengalami kondisi runtuh pada elemen strukturnya (ATC-40, 1996). Analisis *pushover* menghasilkan kurva kapasitas (*capacity curve*), yaitu hubungan antara gaya geser dasar (*base shear*) dengan perpindahan lantai teratas bangunan arah lateral (*displacement*). Kurva kapasitas dapat digunakan untuk menentukan kinerja suatu bangunan dengan berbagai metoda, diantaranya adalah metoda spektrum kapasitas (ATC-40) dan metoda dari SNI 1726:2012.

Perencanaan bangunan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) mulai populer sejak diterbitkan dokumen Vision 2000 dan NEHRP yang didefinisikan sebagai strategi perencanaan, pelaksanaan dan perawatan/perkuatan sedemikian agar suatu bangunan mampu berkinerja pada kondisi gempa yang ditetapkan, yang diukur besarnya kerusakan dan dampak perbaikan yang diperlukan (Dewobroto, 2006:7).

Level kinerja (*performance level*) struktur bangunan berdasarkan FEMA 356/273 adalah sebagai berikut:

1. *Operational*, struktur tidak mengalami kerusakan. Semua sistem yang penting dapat beroperasi dengan normal. Terdapat kerusakan yang sangat kecil pada elemen nonstruktural. Dengan kata lain, bangunan dapat langsung digunakan meskipun tidak dilakukan perbaikan.
2. *Immediate Occupancy* (IO), tidak ada kerusakan struktur, tetapi terdapat kerusakan kecil pada elemen nonstruktural.
3. *Life Safety* (LS), merupakan keadaan dimana struktur mengalami kerusakan. Bahaya keruntuhan nonstruktural masih dapat dikendalikan sehingga korban jiwa dapat dihindari.
4. *Collapse Prevention*, keadaan dimana bangunan masih dapat berdiri tetapi sudah hampir runtuh.

Sedangkan level kinerja struktur bangunan berdasarkan ATC-40 adalah sebagai berikut:

1. *Immediate Occupancy* (IO), kondisi dimana bangunan tidak mengalami kerusakan yang tidak berarti akibat gempa.
2. *Damage Control* (DC), kondisi diantara *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. Bangunan mengalami kerusakan, tetapi masih aman bagi pengguna bangunan.
3. *Life Safety* (LS), kondisi bangunan mengalami kerusakan yang parah, tetapi korban jiwa dapat terhindarkan.
4. *Limited Safety*, merupakan kondisi diantara *Life Safety* dan *Structural Stability*.
5. *Structural Stability*, merupakan kondisi struktur bangunan gedung berada diambang batas runtuh sebagian maupun runtuh total.
6. *Not Considered*, bukan merupakan level kinerja, hanya digunakan untuk evaluasi gempa pada elemen nonstruktural.

Metoda Spektrum Kapasitas atau *Capacity Spectrum Method* (CSM) adalah metoda dari ATC-40. Kurva kapasitas yaitu kurva yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dengan perpindahan lantai teratas bangunan arah lateral diubah ke dalam format ADRS (*Acceleration Displacement Response Spectrum*) membentuk spektrum kapasitas. Kurva kapasitas hasil dari analisis *pushover* diubah menjadi spektrum kapasitas dengan rumus,

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \dots \dots \dots (1)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{roof,1}} \dots \dots \dots (2)$$

$$PF_1 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \times \phi_{i1}) / g}{\sum_{i=1}^n (w_i \times \phi_{i1}^2) / g} \right] \dots \dots \dots (3)$$

$$\alpha_1 = \frac{[\sum_{i=1}^n (w_i \times \phi_{i1}) / g]^2}{[\sum_{i=1}^n w_i / g][\sum_{i=1}^n (w_i \times \phi_{i1}^2) / g]} \dots \dots (4)$$

Keterangan:

PF_1 = faktor partisipasi modal untuk ragam ke 1

α_1 = koefisien massa modal untuk ragam ke 1

W_i/g = massa pada lantai i

ϕ_{i1} = *displacement* lantai i untuk ragam ke 1

V = gaya geser dasar

W = berat bangunan, termasuk beban hidup

Δ_{roof} = *displacement* atap

S_a = *spectral acceleration*

S_d = *spectral displacement*

Respon spektrum rencana juga dikonversi ke format ADRS. Hal itu menyebabkan kurva kapasitas dapat

diplotkan pada sumbu yang sama sebagai gaya gempa perlu. Pada format ADRS waktu getar ditunjukkan sebagai garis radial dari titik pusat sumbu. (Dewobroto, 2006:12). Respon spektrum dapat diubah ke dalam format ADRS melalui persamaan,

$$Sd_i = \frac{T_i^2}{4\pi^2} \times S a_i \times g \dots \dots \dots (5)$$

Keterangan:

T_i = periode getar fundamental bangunan
 Sd_i = spectral displacement
 $S a_i$ = spectral acceleration
 g = percepatan gravitasi

Kinerja bangunan salah satunya dapat diketahui melalui respon inelastik pada kondisi ultimit. Pada kondisi tersebut *spectrum demand* (respon spektrum rencana) tidak lagi berupa spektrum elastik tetapi sudah menjadi spektrum inelastik. Untuk menuju ke arah spektrum inelastik maka dipakai *reduced spectrum demand* untuk periode pendek SR_A dan untuk periode panjang SR_V . Nilai tersebut akan dipengaruhi oleh *global hysteretic energy* β_{eff} yang nilai-nilai selengkapannya adalah sebagai berikut (Pawirodikromo, 2012:463),

$$SR_A = \frac{3,21 - 0,68 \ln(\beta_{eff})}{2,12} \dots \dots \dots (6)$$

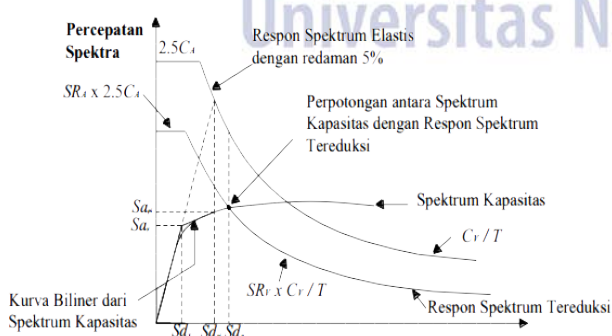
$$SR_V = \frac{2,31 - 0,41 \ln(\beta_{eff})}{1,65} \dots \dots \dots (7)$$

$$\beta_0 = \frac{63,7 \times (a_y \times d_{pi} - d_y \times a_{pi})}{a_{pi} \times d_{pi}} \dots \dots \dots (8)$$

$$\beta_{eff} = K \times \beta_0 + 5 \dots \dots \dots (9)$$

Keterangan:

a_y, d_y = koordinat batas elastis spektrum kapasitas
 a_{pi}, d_{pi} = koordinat batas inelastis spektrum kapasitas
 β_{eff} = rasio redaman efektif akibat perilaku inelastik struktur
 K = faktor modifikasi redaman



Gambar 1. Penentuan Titik Kinerja

(sumber : Jurnal Teknik Sipil, Vol.3, No. 1, Januari 2006)

Metoda spektrum kapasitas menghasilkan titik kinerja (*performance point*) yaitu perpotongan antara spektrum

kapasitas dengan respon spektrum yang telah direduksi. Menurut Wisnumurti dkk (2008:14), titik kinerja merupakan estimasi dimana kapasitas struktur mampu menahan beban (*demand*) yang diberikan.

Level kinerja struktur bangunan berdasarkan metoda spektrum kapasitas (ATC-40) dapat ditentukan melalui rasio target perpindahan atap yang diperoleh dari titik kinerja dengan batas rasio perpindahan yang terdapat dalam Tabel 1.

$$\text{Maximum Total Drift} = \frac{\delta t}{H} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{Maximum Inelastic Drift} = \frac{\delta t - \delta l}{H} \dots \dots (11)$$

Tabel 1. Batas Rasio Perpindahan Atap Bangunan

Interstory Drift Limit	Performance Level			
	IO	Damage Control	Life Safety	Struktural Stability
Maximum Total Drift	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33 V_i/P_i
Maximum Inelastic Drift	0,005	0,005-0,015	No Limit	No Limit

(sumber: ATC-40, Tabel 11-2)

Target perpindahan antar tingkat maksimum struktur bangunan gedung bertujuan untuk membatasi keruntuhan struktur bangunan gedung agar tidak terjadi korban jiwa dan mencegah benturan antar gedung.

Target perpindahan dalam SNI 1726:2012 dikontrol dengan rumus,

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I} \leq \Delta_x = 0,020 \times h_{sx} \dots \dots \dots (12)$$

Keterangan:

C_d = faktor amplifikasi defleksi
 δ_{xe} = perpindahan elastis
 I = faktor keutamaan gempa

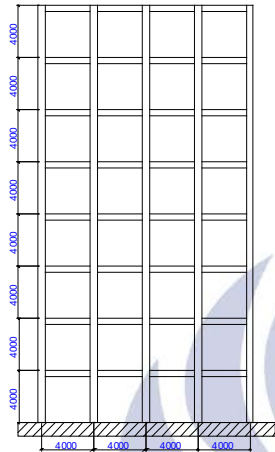
METODE

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

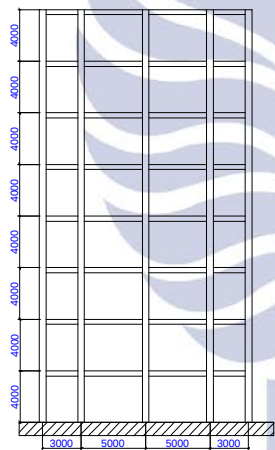
1. Data penelitian. Struktur bangunan yang digunakan dalam penelitian terdiri dari 8 lantai. Berikut adalah data struktur bangunan gedung yang digunakan dalam penelitian:

- Jenis struktur = beton bertulang
- Fungsi gedung = perkantoran
- Jumlah lantai = 8 lantai
- Tinggi bangunan = 32 meter
- Lebar bangunan = 16 meter
- Tinggi tiap lantai = 4 meter
- Mutu beton = 30 MPa (balok)
= 40 MPa (kolom)
- Mutu tulangan = 240 MPa (sengkang)
= 390 MPa (*longitudinal*)

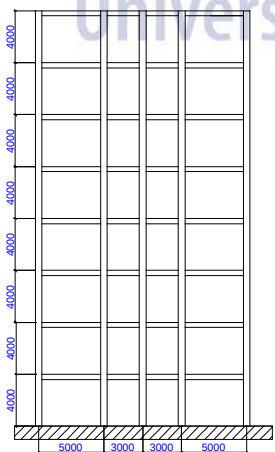
- i. Ukuran balok = 400 mm x 600 mm
- j. Ukuran kolom = 650 mm x 650 mm
- k. Tulangan Kolom = 16 D22 (*longitudinal*)
= Ø12-120 (sengkang)
- l. Tebal pelat = 13 cm
- m. Wilayah gempa = Kota Padang
- n. Kelas Situs = SD (tanah sedang)



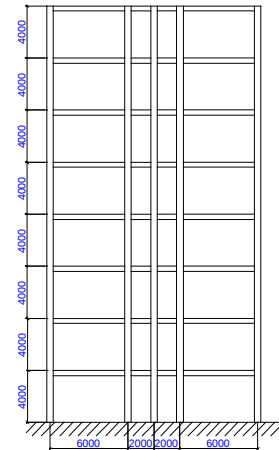
Gambar 2. Struktur 1 (S_1) = 4m-4m-4m-4m



Gambar 3. Struktur 2 (S_2) = 3m-5m-5m-3m



Gambar 4. Struktur 3 (S_3) = 5m-3m-3m-5m



Gambar 5. Struktur 4 (S_4) = 6m-2m-2m-6m

2. Memodelkan Struktur 2 dimensi dalam SAP2000 versi 14.0.0 dengan sumbu global X dan Z.
3. Memasukkan pembebanan, yaitu beban mati dan beban hidup.
4. Menghitung gaya lateral gempa statik ekuivalen rencana sesuai dengan peraturan SNI 1726:2012 dan memasukkan ke dalam SAP2000.
5. Membuat respon spektrum desain untuk wilayah kota Padang dengan kelas situs SD (tanah sedang) sesuai dengan peraturan SNI 1726:2012. Respon spektrum digunakan untuk menentukan titik kinerja berdasarkan metoda spektrum kapasitas.
6. Pembebanan nonlinier *pushover*, yaitu dari pembebanan gravitasi (beban hidup dan beban mati) nonlinier dan pembebanan lateral nonlinier dari gaya lateral gempa statik ekuivalen yang telah didistribusikan ke dalam struktur.
7. Menentukan titik kontrol dan target perpindahan untuk pembebanan nonlinier *pushover*.
8. Memodelkan penyebaran sendi plastis berdasarkan FEMA 356. Memodelkan penyebaran sendi plastis dikerjakan otomatis oleh SAP2000. Memodelkan penyebaran sendi plastis bertujuan untuk memperlihatkan perilaku yang terjadi pada pertemuan ujung balok dengan ujung kolom saat dianalisis dengan analisis *pushover*.
9. Hasil analisis *pushover* dengan SAP2000 berupa kurva kapasitas dan target perpindahan berdasarkan spektrum kapasitas (ATC-40). Kurva kapasitas dan titik kinerja berdasarkan spektrum kapasitas dikerjakan otomatis oleh SAP2000.
10. Menentukan titik kinerja berdasarkan spektrum kapasitas dengan cara memasukkan respon spektrum desain.
11. Melakukan pengecekan terhadap target perpindahan dengan batas rasio perpindahan atap bangunan yang

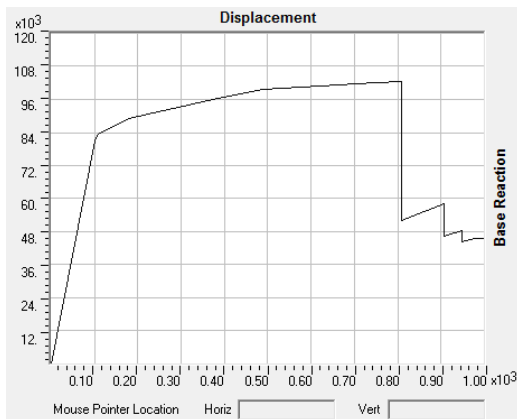
disyaratkan ATC-40 dan kinerja batas ultimit yang disyaratkan SNI 1726:2012.

12. Simpulan

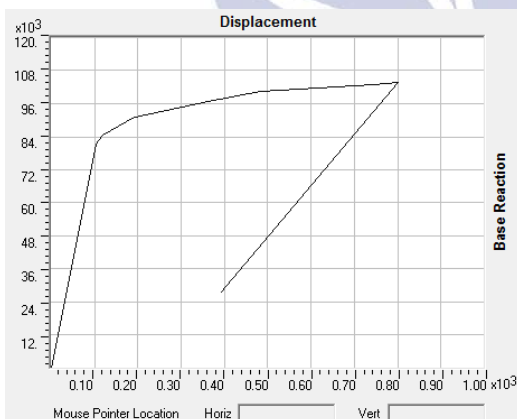
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva Kapasitas

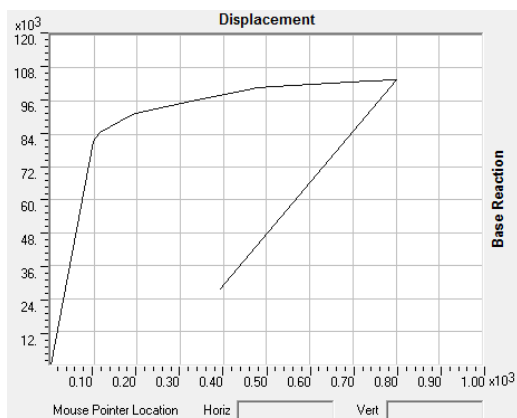
Hasil analisis *pushover* dengan SAP2000 didapatkan kurva kapasitas sebagai berikut:



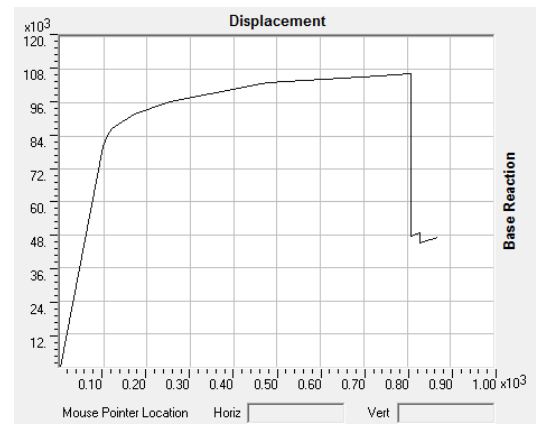
Gambar 6. Kurva Kapasitas Struktur 1



Gambar 7. Kurva Kapasitas Struktur 2



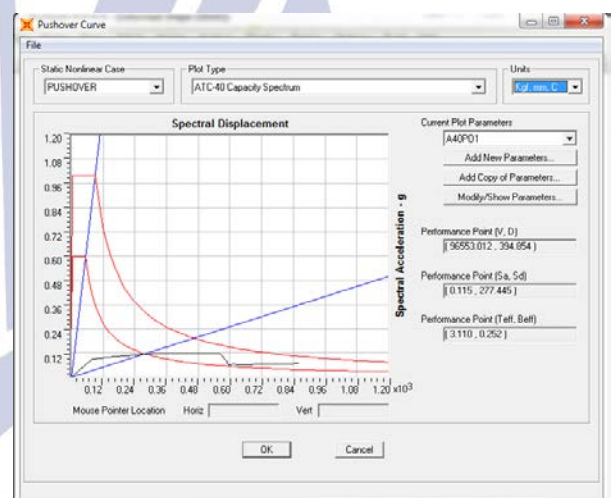
Gambar 8. Kurva Kapasitas Struktur 1



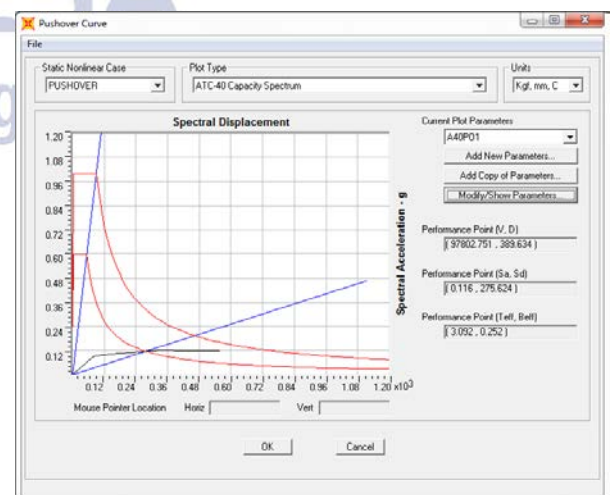
Gambar 9. Kurva Kapasitas Struktur 1

Titik Kinerja Metoda Spektrum Kapasitas

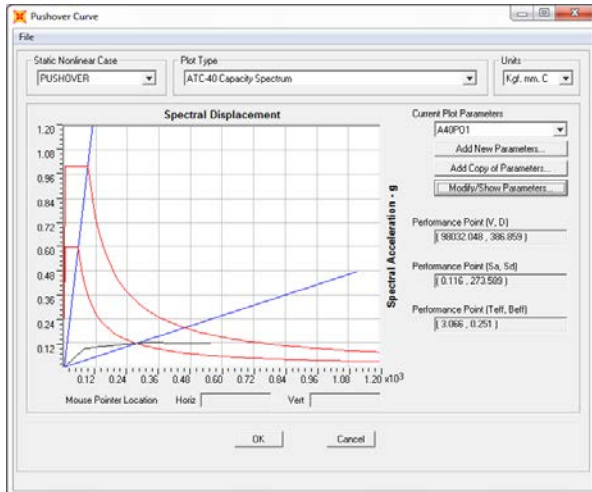
Titik kinerja didapatkan dari perpotongan spektrum kapasitas dengan respon spektrum tereduksi. Berikut adalah titik kinerja hasil analisis *pushover* dengan SAP2000:



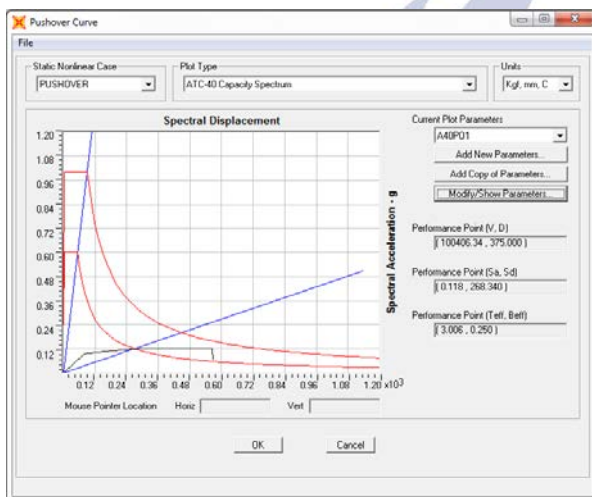
Gambar 10. Titik Kinerja Struktur 1



Gambar 11. Titik Kinerja Struktur 2



Gambar 12. Titik Kinerja Struktur 3



Gambar 13. Titik Kinerja Struktur 4

Titik kinerja menghasilkan kinerja struktur, yaitu kapasitas struktur dalam menerima beban gempa yang bekerja pada struktur bangunan. Kinerja masing-masing struktur bangunan terdapat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Kinerja Struktur Bangunan

Tipe Struktur	V Rencana (kg)	V Efektif (kg)	δt (mm)	Teff (detik)	Beff (%)
Struktur 1 4m-4m-4m-4m	72.778,85	96.553,012	394,854	3,110	25,2
Struktur 2 3m-5m-5m-3m	73.174,89	97.802,751	389,634	3,092	25,2
Struktur 3 5m-3m-3m-5m	73.174,89	98.032,048	386,859	3,066	25,1
Struktur 4 6m-2m-2m-6m	72.185,04	100.406,34	375,000	3,006	25,0

Target Perpindahan

1. Target Perpindahan Berdasarkan ATC-40

$$\text{Maximum Total Drift} = \frac{\delta t}{H}$$

$$\text{Maximum Inelastic Drift} = \frac{\delta t - \delta l}{H}$$

Tabel 3. Perpindahan Atas Berdasarkan ATC-40

Tipe Struktur	Maximum Total Drift	Level Kinerja	Maximum Inelastic Drift	Level Kinerja
Struktur 1 4m-4m-4m-4m	0,01234	Damage Control	0,00917	Damage Control
Struktur 2 3m-5m-5m-3m	0,01218	Damage Control	0,00894	Damage Control
Struktur 3 5m-3m-3m-5m	0,01209	Damage Control	0,00898	Damage Control
Struktur 4 6m-2m-2m-6m	0,01172	Damage Control	0,00863	Damage Control

Hasil analisis *pushover* dengan metoda spektrum kapasitas (ATC-40) menunjukkan bahwa semua level kinerja struktur bangunan berada pada level *Damage Control*, yaitu kondisi diantara *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. Bangunan mengalami kerusakan, tetapi masih aman bagi pengguna bangunan.

2. Target Perpindahan Berdasarkan SNI 1726:2012

Kinerja batas ultimit Δ_α ,

$$\Delta_\alpha = 0,020 \times h_{sx} = 0,020 \times 32000 = 640 \text{ mm}$$

Perpindahan kondisi elastis diperbesar,

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I} = \frac{5,5 \times \delta_{xe}}{1}$$

δ_{xe} adalah nilai perpindahan saat struktur mengalami gaya geser dasar akibat gempa rencana berdasarkan kurva *pushover*/kurva kapasitas.

Tabel 4. Perpindahan Atas Berdasarkan SNI 1726:2012

Tipe Struktur	δ_{xx} (mm)	δ_x (mm)	δt (mm)	δ_{max} (mm)	Δ_α (mm)
Struktur 1 4m-4m-4m-4m	90,981	500,397	394,854	808,458	640
Struktur 2 3m-5m-5m-3m	93,253	512,893	389,634	801,765	640
Struktur 3 5m-3m-3m-5m	89,481	492,145	386,859	801,332	640
Struktur 4 6m-2m-2m-6m	88,761	488,188	375,000	807,604	640

Hasil analisis *pushover* dengan metoda SNI 1726:2012 menunjukkan bahwa semua target perpindahan atas (*displacement*/ δ_x) masih berada di bawah batas ultimit (Δ_α), sehingga struktur bangunan memenuhi syarat yang ditetapkan dalam SNI 1726:2012.

Penyebaran Sendi Plastis

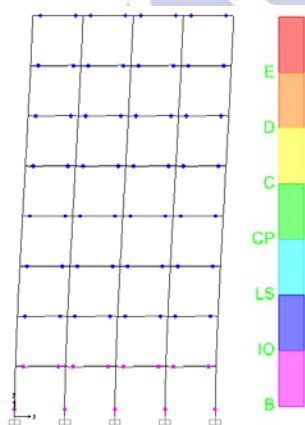
Kinerja Struktur 1 dengan nilai V efektif = 96.553,012 kg dan δt = 394,854 mm berdasarkan Tabel 5

berada di antara *step* 5 dengan *step* 6, sehingga penyajian penyebaran sendi plastis berada pada *step* 6.

Tabel 5. Tabel Kurva Kapasitas Struktur 1

Step	Displacement mm	BaseForce Kgf	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0.022	0.00	144	0	0	0	0	0	0	0	144
1	101.256	80995.69	121	23	0	0	0	0	0	0	144
2	107.226	82828.09	110	34	0	0	0	0	0	0	144
3	109.138	83210.76	101	43	0	0	0	0	0	0	144
4	177.400	88971.22	81	63	0	0	0	0	0	0	144
5	386.239	96286.36	79	37	28	0	0	0	0	0	144
6	488.898	99463.92	75	13	56	0	0	0	0	0	144
7	618.898	100696.16	75	4	65	0	0	0	0	0	144
8	748.898	101928.53	75	0	21	48	0	0	0	0	144
9	808.458	102493.16	75	0	13	50	0	0	6	0	144
10	808.471	51965.86	75	0	13	24	0	0	32	0	144
11	905.948	58143.71	72	3	13	23	0	0	33	0	144
12	905.961	46278.32	72	3	13	18	0	0	38	0	144
13	948.244	48390.24	70	5	13	16	0	0	40	0	144
14	948.257	44355.55	68	7	13	16	0	0	40	0	144
15	977.567	45386.01	66	9	13	16	0	0	40	0	144
16	1107.567	46080.92	66	4	18	16	0	0	40	0	144
17	1237.567	46775.89	66	4	18	16	0	0	40	0	144
18	1299.978	47109.63	66	4	13	21	0	0	40	0	144

Tabel 5 memperlihatkan bahwa terjadinya sendi plastis pertama terjadi pada *step* 1 di 23 titik pertemuan elemen struktur. Sedangkan Gambar 14 memperlihatkan bahwa penyebaran sendi plastis Struktur 1 pada *step* 6 hanya terjadi pada elemen balok.



Gambar 14. Penyebaran Sendi Plastis Struktur 1 Step 6

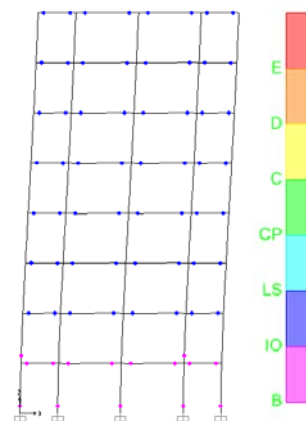
Struktur 2 dengan nilai V efektif = 97.802,751 kg dan δt = 389,634 mm berdasarkan tabel kurva kapasitas Struktur 2, kinerja Struktur 2 juga berada di antara *step* 5 dengan *step* 6.

Tabel 6. Tabel Kurva Kapasitas Struktur 2

Step	Displacement mm	BaseForce Kgf	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0.034	0.00	144	0	0	0	0	0	0	0	144
1	103.573	81269.76	120	24	0	0	0	0	0	0	144
2	118.053	84700.45	104	40	0	0	0	0	0	0	144
3	189.932	91050.68	81	63	0	0	0	0	0	0	144
4	194.278	91276.00	79	65	0	0	0	0	0	0	144
5	361.474	96962.35	77	55	12	0	0	0	0	0	144
6	484.098	100621.98	73	15	56	0	0	0	0	0	144
7	614.098	101861.02	73	6	65	0	0	0	0	0	144
8	744.098	103100.04	73	2	29	40	0	0	0	0	144
9	801.765	103651.88	73	2	13	53	0	0	3	0	144
10	389.966	27078.75	73	2	13	25	0	0	31	0	144

Sendi plastis pertama Struktur 2 terjadi pada *step* 1. Penyebaran sendi plastis Struktur 2 pada *step* 6 yang

terdapat pada Gambar 15 memperlihatkan bahwa ada sendi plastis pada ujung bawah dua kolom, tetapi masih dalam kategori B to IO.

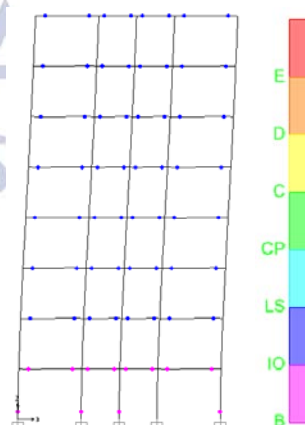


Gambar 15. Penyebaran Sendi Plastis Struktur 2 Step 6

Kinerja Struktur 3 dengan nilai V efektif = 98.032,048 kg dan δt = 386,859 mm berdasarkan Tabel 7 berada di antara *step* 5 dengan *step* 6, sehingga penyajian penyebaran sendi plastis berada pada *step* 6. Tabel 7 juga memperlihatkan bahwa terjadinya pelelehan pertama struktur terjadi pada *step* 1.

Tabel 7. Tabel Kurva Kapasitas Struktur 3

Step	Displacement mm	BaseForce Kgf	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0.019	0.00	144	0	0	0	0	0	0	0	144
1	99.447	81323.12	122	22	0	0	0	0	0	0	144
2	113.540	84595.08	101	43	0	0	0	0	0	0	144
3	184.259	90856.59	83	61	0	0	0	0	0	0	144
4	195.109	91445.46	80	64	0	0	0	0	0	0	144
5	325.109	96061.96	78	66	0	0	0	0	0	0	144
6	466.512	100573.29	76	12	56	0	0	0	0	0	144
7	475.400	100805.00	75	13	56	0	0	0	0	0	144
8	605.400	102047.93	75	2	67	0	0	0	0	0	144
9	735.400	103290.84	74	1	25	44	0	0	0	0	144
10	801.332	103921.00	74	1	13	54	0	0	2	0	144
11	389.981	27313.78	74	1	13	26	0	0	30	0	144



Gambar 16 Penyebaran Sendi Plastis Struktur 3 Step 6

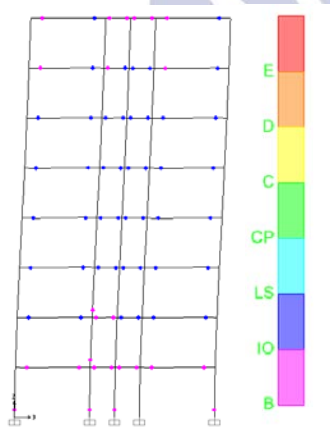
Seperti Struktur 1, penyebaran sendi plastis Struktur 3 pada *step* 6 memperlihatkan sendi plastis hanya terjadi pada elemen balok.

Kinerja Struktur 4 dengan nilai V efektif = 100.406,34 kg dan $\delta t = 375$ mm berdasarkan Tabel 8 berada di antara *step* 5 dengan *step* 6. Tabel 8 juga memperlihatkan bahwa terjadinya sendi plastis pertama terjadi pada *step* 1.

Tabel 8. Tabel Kurva Kapasitas Struktur 4

Step	Displacement mm	BaseForce Kgf	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0.027	0.00	144	0	0	0	0	0	0	0	144
1	98.701	80265.65	128	16	0	0	0	0	0	0	144
2	108.742	84215.33	114	30	0	0	0	0	0	0	144
3	118.868	86561.96	103	41	0	0	0	0	0	0	144
4	170.747	91865.82	84	60	0	0	0	0	0	0	144
5	252.890	96599.62	78	66	0	0	0	0	0	0	144
6	435.474	102291.58	74	25	45	0	0	0	0	0	144
7	477.162	103324.79	73	19	52	0	0	0	0	0	144
8	607.162	104612.17	73	4	67	0	0	0	0	0	144
9	737.162	105899.53	73	2	33	36	0	0	0	0	144
10	807.604	106597.18	72	3	17	49	0	0	3	0	144
11	807.617	47463.51	72	3	13	21	0	0	35	0	144
12	830.149	48715.45	72	3	13	19	0	0	37	0	144
13	830.162	45008.64	70	5	13	19	0	0	37	0	144
14	870.444	46997.97	70	5	13	19	0	0	37	0	144

Gambar 17 memperlihatkan penyebaran sendi plastis Struktur 4 pada *step* 6 terjadi di semua ujung balok. Sendi plastis juga terjadi di dua ujung bawah kolom tetapi masih dalam kondisi B to IO.



Gambar 17 Penyebaran Sendi Plastis Struktur 4 Step 6

Pembahasan

Struktur 1 (S_1) dengan bentang 4m-4m-4m-4m dianggap sebagai struktul awal yang digunakan sebagai struktur kontrol. Sedangkan Struktur 2 (S_2) = 3m-5m-5m-3m, Struktur 3 (S_3) = 5m-3m-3m-5m, dan Struktur 4 (S_4) = 6m-2m-2m-6m merupakan struktur awal (S_1) yang telah divariasikan bentang panjang baloknya.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Analisis *Pushover*

Tipe	V Rencana (kg)	V Efektif (kg)	δt (mm)	δ_x (mm)	δ_{max} (mm)	Level Kinerja
S_1	72.778,85	96.553,012	394,854	500,397	808,458	Damage Control
S_2	73.174,89	97.802,751	389,634	512,893	801,765	Damage Control
S_3	73.174,89	98.032,048	386,859	492,145	801,332	Damage Control
S_4	72.185,04	100.406,34	375,000	488,188	807,604	Damage Control

Tabel 9 memperlihatkan bahwa gaya geser dasar akibat gempa (V) rencana semua struktur lebih kecil dari pada gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif, hal ini menunjukkan bahwa semua struktur masih mampu menahan gaya gempa rencana yang bekerja pada struktur tersebut. V rencana tiap-tiap struktur mengalami perbedaan karena distribusi beban segitiga dan beban trapesium yang bekerja pada balok tiap-tiap struktur berbeda meskipun dari beban mati dan beban hidup yang sama.

Hasil analisis struktur dengan SAP2000 berdasarkan metoda spektrum kapasitas (ATC-40) diperoleh gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif dan target perpindahan (δt). V efektif $S_2 = 97.802,751$ kg, $S_3 = 98.032,048$ kg, dan $S_4 = 100.406,34$ kg memiliki nilai yang lebih besar dari struktur kontrol (S_1) = 96.553,012 kg. Untuk target perpindahan (δt) baik S_2 , S_3 , maupun S_4 memiliki nilai target perpindahan (δt) yang lebih kecil dari struktur kontrol meskipun sangat kecil perbedaannya.

Metoda spektrum kapasitas (ATC-40) juga dapat menentukan level kinerja struktur dengan rasio perpindahan atap. Dari rasio perpindahan atap ini, didapat level kinerja semua struktur adalah *Damage Control*, yaitu bangunan mengalami kerusakan, tetapi masih aman bagi pengguna bangunan.

Metoda perpindahan berdasarkan SNI 1726:2012 (metoda batas ultimit) S_1 dengan $\delta_x = 500,397$ mm, S_2 $\delta_x = 512,893$ mm, S_3 $\delta_x = 492,145$ mm, dan S_4 $\delta_x = 488,188$ mm harus memenuhi batas perpindahan yang disyaratkan SNI 1726:2012 pasal 7.12.1 yaitu $\Delta_\alpha = 0,020 \times h$ gedung (32000 mm) = 640 mm. Nilai perpindahan (δ_x) atap S_1 , S_2 , S_3 , maupun S_4 lebih kecil dari batas yang ditentukan, sehingga semua struktur memenuhi syarat yang ditentukan SNI 1726:2012. Tetapi perpindahan maksimal atau perpindahan saat struktur mengalami runtuh dengan nilai S_1 $\delta_{max} = 808,458$ mm, S_2 $\delta_{max} = 801,765$ mm, S_3 $\delta_{max} = 801,332$ mm, dan S_4 $\delta_{max} = 807,604$ mm melebihi batas perpindahan yang disyaratkan SNI 1726:2012.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil dari analisis *pushover* terhadap Struktur 1, Struktur 2, Struktur 3, dan Struktur 4 dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif masing-masing struktur yaitu Struktur 1 = 96.553,012 kg, Struktur 2 = 97.802,751 kg, Struktur 3 = 98.032,048 kg, dan Struktur 4 = 100.406,34 kg. Gaya geser dasar akibat gempa (V) efektif semua struktur lebih besar dari gaya geser dasar akibat gempa rencana yang dihitung sesuai dengan peraturan SNI 1726:2012,

sehingga struktur masih mampu menerima gaya geser dasar akibat gempa rencana.

2. Kinerja struktur setelah dianalisis dengan analisis *pushover* berdasarkan perpindahan atap adalah sebagai berikut:
 - a. Kinerja Struktur 1, Struktur 2, Struktur 3, dan Struktur 4 berdasarkan metoda spektrum kapasitas (ATC-40) berada di kategori *Damage Control* dan tidak melebihi level kinerja yang ditargetkan yaitu *Life Safety*.
 - b. Perpindahan atap Struktur 1, Struktur 2, Struktur 3, dan Struktur 4 berdasarkan SNI 1726:2012 memenuhi batas ultimit perpindahan yang disyaratkan SNI 1726:2012 pasal 7.12.1.
3. Struktur paling efektif dalam menerima gaya gempa dari ketiga struktur (struktur kontrol yang telah divariasi) adalah Struktur 4 (S_4) dengan formasi bentang balok 6m-2m-2m-6m, V efektif = 100.406,34 kg, $\delta_t = 375,000$ mm, dan $\delta_x = 488,188$ mm. S_4 mampu menerima gaya geser dasar akibat gempa paling besar dengan target perpindahan atap paling kecil.

Saran

1. Perlu adanya penelitian lanjutan untuk membandingkan penyebaran sendi plastis antara analisis *pushover* dengan analisis *time history*.
2. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan variasi bentang panjang balok yang lain.
3. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan pemodelan Struktur 3 dimensi untuk hasil yang lebih akurat.
4. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan metoda lain seperti metoda FEMA 440.

DAFTAR PUSTAKA

- Applied Technology Council*. 40. 1996. "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings".
- Badan Standarisasi Nasional. 2012. "SNI 1726:2002 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Gedung dan Non Gedung".
- Dewobroto, Wiryanto. 2006. "Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000". *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.3, No. 1.
- Dewobroto, Wiryanto. 2013. "Komputer Rekayasa Struktur dengan SAP2000". Jakarta : Dapur Buku.
- Federal Emergency Management Agency*. 2000. "FEMA 356 – Prestandart and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Building".

Pawirodikromo, Widodo. 2012. "Seismologi Teknik & Rekayasa Kegempaan". Yogyakarta : Pustaka Pelajar.

Suharjanto. 2013. "Rekayasa Gempa". Yogyakarta : Amara Books.

Wardhono, Arie. 2007. "Pengaruh Variasi Panjang Bentang Balok pada Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus terhadap Tingkat Layan/Kinerja Struktur". *Inersia* Vol. III No.2.

Wisnumurti, dkk. 2008. "Analisis *Pushover* pada Gedung Tidak Beraturan pada Gedung Baru FIA UNIBRAW". *Jurnal Rekayasa Sipil*, Vol. II, No. 1, Hal 11-22.