

ANALISIS *PUSHOVER* PERILAKU SEISMIK STRUKTUR BANGUNAN BERTINGKAT : STUDI KASUS BANGUNAN RUKO

Syanne Pangemanan¹, dan Helen G. Mantiri¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Manado

E-mail: upe_sp2000@yahoo.com

E-mail: Helen_mantiri@yahoo.co.id

Abstrak. Wilayah Indonesia memiliki kerawanan bencana alam yang frekuensinya tinggi, diantaranya bencana gempa bumi. Trend terbaru perencanaan maupun evaluasi bangunan terhadap gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja yang dikenal dengan *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE). Konsep ini dapat digunakan untuk mendesain gedung baru maupun mengevaluasi bangunan yang sudah ada. Analisa dan evaluasi kinerja dapat dilakukan dengan analisa *pushover* (*build-in* pada program ETABS) berdasarkan SNI 03-1726-2002, ATC-40 (*capacity spectrum method*), FEMA 356 dan FEMA 440 (*displacement coefficient method*). Bangunan Ruko merupakan bangunan eksisting yang akan dievaluasi berdasarkan konsep PBEE. Analisis perhitungan dilakukan dengan memberikan pola beban lateral statik pada struktur dan meningkatkan faktor pengali secara bertahap sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik acuan tercapai. Target perpindahan hasil evaluasi dengan menggunakan spektrum kapasitas (ATC-40), Metode koefisien perpindahan (FEMA 356), metode koefisien perpindahan yang diperbaiki (FEMA 440) dan kinerja batas ultimit SNI 03 – 1726 – 2002, adalah untuk arah X sebesar 0,164 m sedangkan untuk arah Y sebesar 0,147 m, maka level kinerja struktur berada pada batas antara *Life Safety (LS) – Collapse Prevention (CP)* yang menunjukkan bahwa telah terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan, dimana komponen non-struktural masih ada tetapi tidak berfungsi tetapi dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan.

Kata Kunci : Analisa *pushover*, bangunan eksisting, *seismic performance*

I. PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia berkedudukan di khatulistiwa yang terletak pada posisi benturan antara lempengan kerak bumi samudera dan kerak bumi benua yang memiliki kerawanan bencana alam, diantaranya bencana gempa bumi. Gempa bumi telah mengakibatkan korban jiwa dan hancurnya infrastruktur. Berkaitan dengan keselamatan maka diterbitkan peraturan yang ketat dalam perencanaan, pembangunan maupun pengoperasian suatu bangunan gedung. Masalah muncul adalah pada bangunan yang telah berdiri, apakah dalam perencanaan bangunan tersebut telah mengikuti peraturan yang ada atau tidak, sehingga evaluasi kinerja struktur bangunan perlu adanya pemeriksaan kembali.

Menurut Wiryanto Dewobroto (2005), keamanan dan keselamatan bangunan tidak hanya bergantung pada tingkat kekuatan, tetapi juga pada tingkat deformasi dan energi struktur pada kinerja struktur. Trend terbaru perencanaan maupun evaluasi bangunan

terhadap gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja yang dikenal dengan *Performance Based Earthquake Engineering* (PBEE). Konsep perencanaan berbasis kinerja merupakan kombinasi dari aspek tahanan dan aspek layan. Konsep ini dapat digunakan untuk mendesain bangunan baru (*performance based seismic design*) maupun mengevaluasi bangunan yang sudah ada (*performance based seismic evaluation*).

Bangunan rumah dan toko atau ruko tiga lantai yang terletak di jalan Wolter Monginsidi Bahu ini didesain sesuai dengan peraturan beton SK SNI T-15-1991-03 dan peraturan gempa PPKGURG-1987. Dalam perkembangannya, analisis statik nonlinier yang lebih dikenal dengan istilah *pushover analysis* merupakan pilihan menarik dalam mengevaluasi bangunan eksisting dengan konsep PBEE sehingga dapat diketahui kinerja seismik bangunan. Prosedur *pushover analysis* sesuai dengan konsep PBEE telah ada pada dokumen ATC-40 (*capacity spectrum method*) serta FEMA 356 dan FEMA 440 (*displacement coefficient method*). Bangunan ruko tiga

lantai ini merupakan bangunan beraturan sehingga metode spektrum kapasitas ATC-40 adalah metode yang paling tepat digunakan untuk mengevaluasi kinerja seismik strukturnya.

Tulisan ini bertujuan untuk menghasilkan kurva kapasitas struktur (*pushover curve*) dan titik kinerja (*performance point*) struktur yang ditinjau dengan menggunakan *code* ATC-40. Kemudian mengevaluasi kinerja struktur bangunan eksisting berdasarkan ATC-40, FEMA 356, FEMA 440 dan SNI 1726-2002.

II. TINJAUAN LITERATUR

Pada dasarnya dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, bangunan didesain untuk hancur sesuai dengan level kerusakan yang telah ditentukan. Dengan kata lain bangunan diizinkan untuk hancur tapi tidak menimbulkan korban jiwa sehingga ketika terjadi gempa, manusia dapat melakukan tindakan evakuasi.

Adapun tujuan bangunan tahan gempa adalah untuk membatasi kerusakan bangunan atau gedung akibat beban gempa sedang sesuai dengan ketentuan sehingga masih bisa diperbaiki secara ekonomis dan juga untuk menghindari jatuhnya korban jiwa akibat runtuhnya gedung karena adanya beban gempa yang kuat.

Pada struktur bangunan tahan gempa, perpindahan (*displacement*) merupakan hal yang paling mendasar untuk suatu struktur tahan gempa. Umumnya kerusakan struktur diakibatkan oleh besarnya perpindahan yang terjadi. Oleh karena itu, struktur seharusnya bersifat daktail untuk mengakomodasi besarnya perpindahan yang terjadi. Hal berikut yang ikut menyangkan kekuatan untuk menahan beban gempa yang terjadi adalah kekuatan struktur. Dengan semakin kaku sebuah struktur maka semakin besar gaya yang dihasilkan untuk melawan gaya gempa yang terjadi sehingga dapat disimpulkan bahwa kekuatan suatu struktur tahan gempa terletak pada daktilitas dan kekakuannya.

A. Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Perencanaan bangunan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada (bangunan eksisting), 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. Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar keselamatan, kesiapan pakai dan kerugian harta benda yang akan terjadi. Perencana selanjutnya dapat mengatur ulang resiko kerusakan yang dapat

diterima sesuai dengan resiko biaya yang dikeluarkan (Wiryanto, 2005).

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas, sehingga pemilik, penyewa, asuransi, pemerintah atau penyandang dana mempunyai kesempatan untuk menetapkan kondisi apa yang dipilih, selanjutnya ketetapan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedoman. Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut.

Kinerja Struktur Bangunan Gedung:

1. Kinerja batas layan

Kinerja batas layan struktur gedung dibatasi oleh simpangan antar tingkat akibat pengaruh gempa rencana, yaitu untuk membatasi terjadinya pelelehan baja dan peretakan beton yang berlebihan, juga untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidaknyamanan penghuni. Simpangan antar tingkat ini dihitung dari simpangan struktur gedung akibat pengaruh gempa nominal yang telah dibagi faktor skala. Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan, simpangan antar tingkat tidak boleh melampaui $0,03/R$ kali tinggi lantai yang bersangkutan atau 30 mm (ambil nilai terkecil).

2. Kinerja batas ultimit

Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar tingkat maksimum struktur gedung akibat pengaruh gempa rencana dalam kondisi struktur di ambang keruntuhan, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa dan untuk mencegah benturan antar gedung atau antar bagian struktur gedung yang dipisah dengan sela pemisah (dilatasi). Simpangan antar tingkat dihitung dari simpangan struktur gedung akibat pembebanan gempa nominal, dikalikan dengan suatu faktor pengali $\xi = 0,7R$ (untuk struktur beraturan) dengan R adalah faktor reduksi gempa struktur.

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit, simpangan antar tingkat dalam kondisi ultimit ini tidak boleh melebihi 0,02 kali tinggi tingkat yang bersangkutan. Kriteria simpangan ultimit tersebut selanjutnya digunakan sebagai target perpindahan versi SNI 03-1726-2002, sedangkan evaluasi kriteria penerimaan yang mengacu pada ATC-40 sudah *built-in* pada program komputer ETABS v9.0 dan untuk FEMA 356 dan FEMA 440 dihitung berdasarkan hasil perhitungan yang diperoleh.

B. Analisis Statik Nonlinier (*Pushover*)

Analisa statik nonlinier adalah suatu cara analisis statik dua atau tiga dimensi linier dan nonlinier, dimana pengaruh gempa rencana terhadap struktur gedung dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan, yang menyebabkan terjadinya

pelelahan (sendi plastis) pertama di dalam struktur gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk elastoplastis yang besar sampai mencapai kondisi di ambang keruntuhan. Analisa ini memerlukan program komputer untuk dapat merealisasikannya pada bangunan nyata. Beberapa program komputer komersial yang tersedia adalah SAP2000, ETABS, GTStrudl, Adina.

Tabel 1. Level kinerja struktur

Tingkat kinerja	Uraian	Keterangan
SP-1	Immediate occupancy (Penggunaan sedang)	Bila terjadi gempa, hanya sedikit kerusakan struktural yang terjadi. Karakteristik dan kapasitas sistem penahan gaya vertikal dan lateral pada struktur masih sama dengan kondisi dimana gempa belum terjadi, sehingga bangunan aman dan dapat langsung dipakai.
SP-2	Damage control (Kontrol kerusakan)	Dalam kategori ini, pemodelan bangunan gedung dengan beban gempa rencana dengan nilai beban gempa yg peluang dilampauinya dalam rentang masa layan gedung 50 tahun adalah 10%
SP-3	Life safety (Aman untuk dihuni)	Bila terjadi gempa, muncul kerusakan yg cukup signifikan pada struktur, akan tetapi struktur masih dapat menahan gempa. Komponen-komponen struktur utama tidak runtuh. Bangunan dpt dipakai kembali jika sudah dilakukan perbaikan, walaupun kerusakan yang terjadi kadangkala membutuhkan biaya yang tidak sedikit.
SP-4	Limited safety (Keamanan terbatas)	Kondisi bangunan tidak sebaik level life safety dan tidak seburuk level structural stability, termasuk ketika level life safety tidak efektif atau ketika hanya beberapa kerusakan struktur kritis yang dapat dikurangi.
SP-5	Structural Stability (Stabilitas Struktural)	Level ini merupakan batas dimana struktur sudah mengalami kerusakan yang parah. Terjadi kerusakan pada struktur dan nonstruktur. Struktur tidak lagi mampu menahan gaya lateral karena penurunan.
SP-6	Not Considered (Tidak Diperhitungkan)	Pada kategori ini, struktur sudah dalam kondisi runtuh, sehingga hanya dapat dilakukan evaluasi seismik dan tidak dapat dipakai lagi.

Sumber : Applied Technology Council (ATC) 40, 1996

Tujuan analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya. Beberapa studi

menunjukkan bahwa analisa statik *pushover* dapat memberikan hasil mencukupi ketika dibandingkan dengan hasil analisa dinamik nonlinier untuk bangunan reguler dan tidak tinggi.

Beberapa cara menentukan target perpindahan, dua yang cukup terkenal adalah *displacement coefficient method* atau metode koefisien perpindahan (FEMA 273/274 dan FEMA 356/440) dan *capacity spectrum method* atau metode spektrum kapasitas (ATC 40). Selain itu ada persyaratan perpindahan dari SNI 03-1726-2002 yang dapat dijadikan sebagai kriteria kinerja.

1. Metode Spektrum Kapasitas

Merupakan metode utama *Applied Technology Council* (ATC) 40. Sasaran kinerja pada dokumen ATC 40 memasukkan beberapa pertimbangan kondisi kerusakan (*damage states*) untuk beberapa level gerakan tanah. Dapat digunakan sebagai acuan, baik dalam melakukan desain atau perencanaan struktur maupun untuk mengevaluasi struktur yang sudah ada. Kinerja bangunan pada ATC-40 dibagi menjadi 6 kategori level kinerja struktur seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 2. Batasan rasio *drift* atap sesuai ATC 40

Parameter	Performance level			
	IO	Damage control	LS	Structural stability
Maksimum total <i>drift</i>	0,01	0,01 – 0,02	0,02	0,33 Vi/Pi
Maksimum inelastik <i>drift</i>	0,005 – 5	0,005 – 0,015	No limit	No limit

Sumber : Applied Technology Council (ATC) 40, 1996

Metode *capacity spectrum* adalah metode yang paling banyak digunakan untuk membandingkan kapasitas (*capacity*) dan kebutuhan (*demand*). Metode ini lebih tepat digunakan dengan bantuan program yang sudah *built-in* pada program ETABS (Anwar, 2007).

2. Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Merupakan metoda utama untuk prosedur statik nonlinier. Penyelesaian perhitungan dilakukan dengan memodifikasi respons elastik linear sistem struktur SDOF ekuivalen dengan faktor modifikasi C_0, C_1, C_2 dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut sebagai target perpindahan (δ_T).

Rumusan target perpindahan yang digunakan pada metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356) seperti pada Persamaan 1.

$$\delta_T = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (1)$$

dimana:

T_e = waktu getar alami efektif

C_0 = koefisien faktor bentuk, sesuai Tabel 3-2 dari FEMA 356.

C_1 = faktor modifikasi; 1,0 untuk $T_e \geq T_s$

$$\text{dan } \frac{[1,0+(R-1)\frac{T_s}{T_e}]}{R} \text{ untuk } T_e < T_s$$

T_s = waktu getar karakteristik

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m$$

S_a = akselerasi respons spektrum

V_y = gaya geser dasar pada saat leleh

W = total beban

C_m = faktor massa efektif (Tabel 3-1 FEMA 356)

C_2 = koefisien utk memperhitungkan efek *pinching* (Tabel 3-3 FEMA 356)

C_3 = koefisien utk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta. $C_3 = 1$; perilaku pasca lelehnya positif (kurva meningkat)

$$\text{dan } C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \text{ ; perilaku pasca lelehnya negatif}$$

α = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif

g = percepatan gravitasi = 9,81 m/det².

3. Metode Koefisien Perpindahan yang diperbaiki (FEMA 440)

Untuk mengantisipasi timbulnya keraguan karena hasil metode koefisien perpindahan (FEMA 356) dan metode spektrum kapasitas (ATC 40) belum tentu sama dilakukan evaluasi melalui ATC 55 *project* dan menghasilkan FEMA 440: *improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*, yang mana kedua metode tersebut dimodifikasi.

Persamaan target perpindahannya tetap sama, yaitu sesuai Persamaan 1.

Terjadi modifikasi dan perbaikan dalam menghitung faktor C_1 dan C_2 seperti pada Persamaan 2 dan Persamaan 3.

$$C_1 = 1 + R - 1/aT_e^2 \quad (2)$$

dimana:

a = konstanta. Nilai konstanta a adalah sama dengan 130, 90 dan 60 untuk site kategori B, C dan D.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (3)$$

III. METODE PENELITIAN

Struktur bangunan ruko bahu (bangunan eksisting) dimodelkan dan dianalisis dengan bantuan *software* ETABS v.9.7.0 sebagai struktur rangka beton bertulang 3 dimensi seperti pada Gambar 1. Bangunan eksisting dimodelkan dalam bentuk 3 dimensi agar perilaku struktur akibat aksi pembebanan yang terjadi dapat didekati dan kemudian dilakukan analisis perilaku dan kinerja struktur bangunan eksisting.

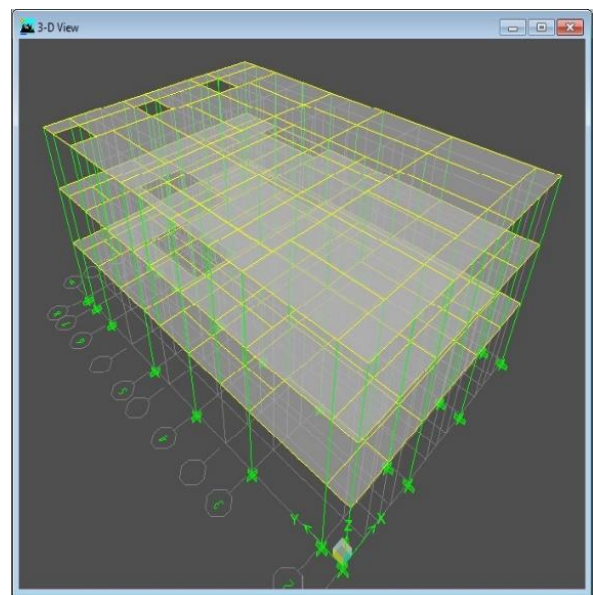
Kinerja bangunan eksisting dianalisis dengan prosedur analisis dinamik berdasarkan SNI 03-1726-2002, analisis statik nonlinier (*pushover*) dengan

metode ATC-40, metode koefisien perpindahan (FEMA 356) dan metode koefisien perpindahan yang diperbaiki (FEMA 440).

IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Dinamik Respons Spektrum

Bangunan ekisting yang telah dimodelkan dan dianalisis pengaruh gempa pada struktur yang belum memperhitungkan kondisi nonlinier dengan analisis dinamik respons spektrum sesuai dengan SNI 03-1726-2002, dimana bangunan ruko terletak dalam wilayah gempa 5 dengan tanah sedang seperti pada Gambar 2. Selanjutnya untuk struktur harus dikalikan dengan faktor reduksi I dan R dengan I adalah faktor keutamaan struktur yang bernilai 1,0 dan R adalah reduksi gempa dengan nilai 8,5. Hasil analisis menunjukkan nilai *modal load participation ratios* seperti terlihat pada Tabel 3.



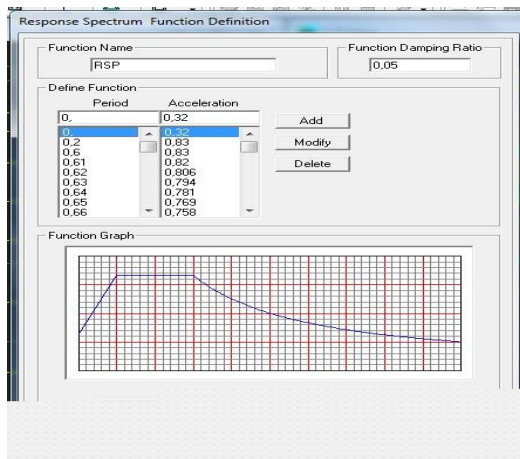
Gambar 1. Pemodelan struktur bangunan ruko bahu

Tabel 3. Nilai *modal load participation ratios*

Type	Accel	Static	Dynamic
Accel	UX	99,22	92,57
Accel	UY	99,28	93,49
Accel	UZ	0,00	0,00
Accel	RX	99,84	98,51
Accel	RY	99,88	98,80
Accel	RZ	107,29	92,81

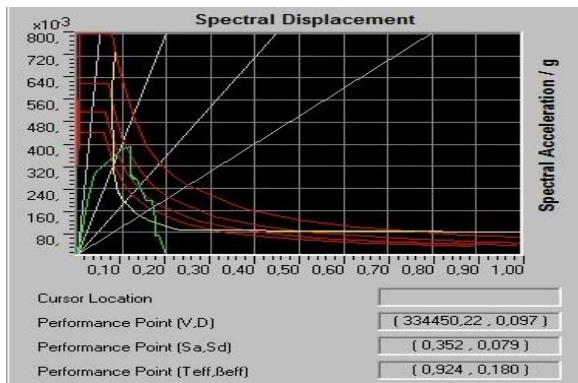
Tabel 3 menunjukkan bahwa partisipasi massa pada arah X dan arah Y (93,5%) telah memenuhi persyaratan 90%, partisipasi massa sesuai dengan SNI 1726.

Selanjutnya analisis statik nonlinier dapat dilakukan dengan memasukkan letak sendi-endi plastis yang diperkirakan akan terjadi, yaitu pada setiap ujung-ujung balok utama dan pada ujung-ujung kolom untuk setiap lantai dan dengan bantuan program ETABS.

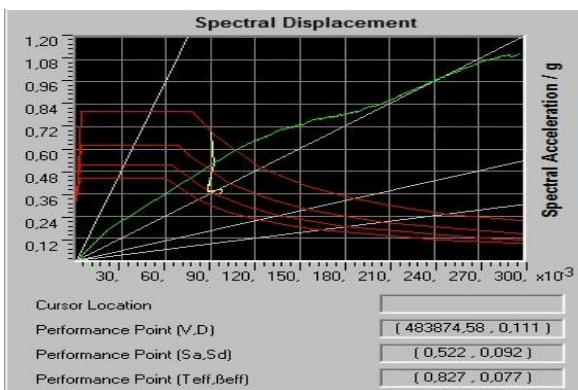


Gambar 2. Pemodelan kurva respons spektrum rencanadalam ETABS

Kurva hasil analisis statik nonlinier seperti pada Gambar 3 untuk arah X dan Gambar 4 untuk arah Y selanjutnya digunakan untuk evaluasi kinerja struktur.



Gambar 3. Kurva hasil analisis statik nonlinier arah X



Gambar 4. Kurva hasil analisis statik nonlinier arah Y

B. Metode Capacity Spectrum (ATC-40)

Hasil evaluasi kinerja berdasarkan metode ATC-40 adalah sebagai berikut:

a) Arah X

$$\begin{aligned}
 V &= 334450,22 \text{ kg} \\
 D_t &= 0,097 \text{ m} \\
 T_{\text{eff}} &= 0,924 \text{ detik} \\
 B_{\text{eff}} &= 0,180\%
 \end{aligned}$$

b) Arah Y

$$\begin{aligned}
 V &= 483874,58 \text{ kg} \\
 D_t &= 0,111 \text{ m} \\
 T_{\text{eff}} &= 0,827 \text{ detik} \\
 B_{\text{eff}} &= 0,077\%
 \end{aligned}$$

C. Metode Koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Sesuai dengan persamaan 1 maka target perpindahan dengan FEMA 356 untuk arah X dan Y adalah sebagai berikut:

a) Arah X

$$\begin{aligned}
 T_e &= T_{\text{eff}} (\text{ATC-40}) = 0,924 \text{ detik} \\
 C_0 &= \text{FEMA Tabel 3-2 untuk bangunan 3 lantai} \\
 &= 1,3 \\
 T_s &= \text{waktu getar karakteristik dari kurva respons} \\
 &\text{spektrum wilayah 5 dengan tanah sedang} = 0,6 \\
 C_1 &= 1,0 \text{ (untuk } T_e > T_s) \\
 C_2 &= 1,1 ; \text{ anggap sebagai rangka Type 1 dan} \\
 &\text{kinerja yang dipilih adalah LS} \\
 C_3 &= 1,00 \text{ kekakuan pasca leleh adl positif} \\
 S_a &= \text{peta wilayah gempa 5 dengan tanah sedang} \\
 &0,5/T = 0,5/0,924 = 0,541
 \end{aligned}$$

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g = 0,164 \text{ m}$$

b) Arah Y

$$\begin{aligned}
 T_e &= T_{\text{eff}} (\text{ATC-40}) = 0,827 \text{ detik} \\
 C_0 &= \text{FEMA Tabel 3-2 untuk bangunan 3 lantai} \\
 &= 1,3 \\
 T_s &= \text{waktu getar karakteristik dari kurva} \\
 &\text{respons spektrum wilayah 5 dengan tanah} \\
 &\text{sedang} = 0,6 \\
 C_1 &= 1,0 \text{ (untuk } T_e > T_s) \\
 C_2 &= 1,1 ; \text{ anggap sebagai rangka Type 1 dan} \\
 &\text{kinerja yang dipilih adalah LS} \\
 C_3 &= 1,00 \text{ kekakuan pasca leleh adl positif} \\
 S_a &= \text{peta wilayah gempa 5 dengan tanah sedang} \\
 &0,5/T = 0,5/0,827 = 0,605
 \end{aligned}$$

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g = 0,147 \text{ m}$$

D. Metode Koefisien Perpindahan yang Diperbaiki (FEMA 440)

Rumusan target perpindahan yang digunakan adalah sama dengan FEMA 356, akan tetapi mengalami modifikasi dan perbaikan dalam menghitung faktor C_1 dan C_2 . Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut:

a) Arah X

$$\begin{aligned}
 T_e &= T_{\text{eff}} (\text{ATC-40}) = 0,924 \text{ detik} \\
 C_0 &= \text{FEMA Tabel 3-2 untuk bangunan 3 lantai} = \\
 &1,3 \\
 C_1 &= 1,064 \text{ (untuk } T_e < 1) \\
 C_2 &= 1,031 \text{ (untuk } T_e > 0,7) \\
 C_3 &= 1,00 \text{ kekakuan pasca leleh adl positif} \\
 S_a &= \text{peta wilayah gempa 5 dengan tanah sedang} \\
 &0,5/T = 0,5/0,924 = 0,541
 \end{aligned}$$

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g = 0,164 \text{ m}$$

- b) Arah Y
 $T_e = T_{\text{eff}} \text{ (ATC-40)} = 0,827 \text{ detik}$
 $C_0 = \text{FEMA Tabel 3-2 untuk bangunan 3 lantai} = 1,3$
 $C_1 = 1,064 \text{ (untuk } T_e < 1)$
 $C_2 = 1,031 \text{ (untuk } T_e > 0,7)$
 $C_3 = 1,00 \text{ kekakuan pasca leleh adl positif}$
 $S_a = \text{peta wilayah gempa 5 dengan tanah sedang}$
 $0,5/T = 0,5/0,827 = 0,605$

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g = 0,147m$$

E. Kinerja Batas Ultimit menurut SNI 03 – 1726 – 2002

Berdasarkan beban gempa nominal yang diperoleh dari analisa struktur dengan cara respons spektrum maka simpangan yang terjadi seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Simpangan akibat beban gempa nominal dari analisa struktur

Level	Elevasi (m)	Simpangan nominal		Simpangan ultimit	
		X	Y	ξ_{RX}	ξ_{RY}
Atap	11	0,013	0,014	0,075	0,081

V. EVALUASI KINERJA BANGUNAN EKSISTING

Target perpindahan dari berbagai kriteria dapat dirangkum seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 . Hasil perhitungan target perpindahan

Kriteria	Target perpindahan (m)	
	X	Y
Spektrum Kapasitas (ATC – 40)	0,097 (44%)	0,111 (51%)
FEMA 356	0,164 (75%)	0,147 (67%)
FEMA 440	0,164 (75%)	0,147 (67%)
Kinerja Batas Ultimit (SNI 1726)	0,075 (34%)	0,081 (37%)

Berdasarkan target perpindahan hasil evaluasi dengan menggunakan spektrum kapasitas (ATC-40), metode koefisien perpindahan (FEMA 356), metode koefisien perpindahan yang diperbaiki (FEMA 440) dan kinerja batas ultimit SNI 03-1726-2002, seperti pada tabel diatas didapatkan untuk arah X terbesar adalah 0,164 m sedangkan untuk arah Y terbesar adalah 0,147 m, selanjutnya komponen struktur dievaluasi pada kondisi dimana target perpindahan tercapai.

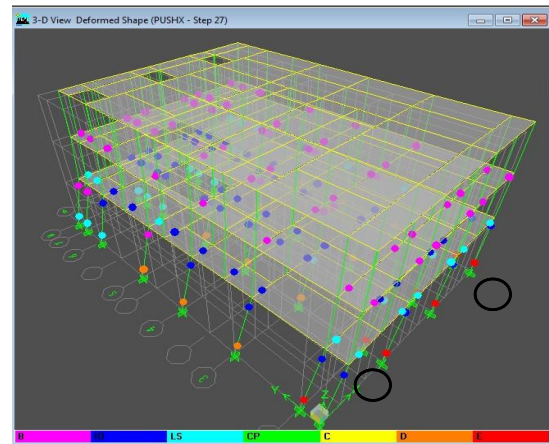
Untuk target perpindahan pada arah X yang sebesar $\delta_t = 0,164 \text{ m}$ dibandingkan dengan data *pushover* yang diperoleh dari ETABS sesuai Tabel 5 didapat hasil bahwa pada *step 27* nilai perpindahan telah melewati target perpindahan dan kinerja struktur berada pada batas antara *Life Safety (LS) – Collapse Prevention (CP)* dan mengacu pada NEHRP dan FEMA 273 maka untuk kategori level kinerja berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang *life safety*, evaluasi menunjukkan telah terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan struktur cukup terhadap

Tabel 6. Data distribusi sendi plastis analisis *pushover* arah X

Step	Displacement	Base force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0,0000	0,0000	803	1	0	0	0	0	0	0	804
1	0,0277	174751,4219	766	38	0	0	0	0	0	0	804
2	0,0433	255810,2656	731	73	0	0	0	0	0	0	804
3	0,0498	275353,9375	657	65	43	39	0	0	0	0	804
4	0,1193	362419,6563	631	69	56	46	0	2	0	0	804
5	0,1411	376415,3750	631	69	56	36	0	0	12	0	804
6	0,1411	270421,1250	631	69	56	35	0	1	12	0	804
7	0,1451	282640,3750	631	69	56	35	0	0	13	0	804
8	0,1451	277284,4375	631	69	56	34	0	1	13	0	804
9	0,146	279754,5000	631	69	56	34	0	0	14	0	804
...											
21	0,1604	271692,6563	630	61	61	32	0	0	18	2	804
22	0,1604	266889,7813	630	61	61	32	0	0	16	4	804
23	0,1614	268827,4375	630	61	61	32	0	0	14	6	804
24	0,1614	260086,4531	630	61	61	32	0	0	12	8	804
25	0,1628	263781,6350	630	61	61	32	0	0	12	8	804
26	0,1628	259730,2656	630	61	61	32	0	0	12	8	804
27	0,1652	264386,9688	629	61	58	36	0	0	10	10	804
28	0,1696	268794,4563	629	61	58	36	0	0	10	10	804
29	0,1696	265122,5938	629	61	58	36	0	0	9	11	804
30	0,1703	265899,1875	629	61	58	36	0	0	9	11	804
...											
65	0,5077	45,0860	627	55	42	16	0	0	0	64	804
66	0,6077	45,4371	627	55	42	16	0	0	0	64	804
67	0,7077	45,7882	627	55	42	16	0	0	0	64	804
68	0,8077	46,1393	627	55	42	16	0	0	0	64	804
69	0,9077	46,4904	627	55	42	16	0	0	0	64	804
70	1,0000	46,8146	804	0	0	0	0	0	0	0	804

keruntuhan, komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi dan dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan. Dari nilai target perpindahan pada arah X perlu adanya penanganan lebih lanjut atau perbaikan dahulu sebelum struktur digunakan kembali setelah terkena gempa dan Gambar 5 adalah lokasi sendi plastis tertentu (seperti pada balok dan kolom yang ditandai), menunjukkan telah terjadi kondisi kinerja > E yang berarti komponen struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser dan hancur.

Khusus lokasi dengan kondisi kinerja seperti inilah yang perlu menjadi perhatian lebih untuk dilakukan usaha perkuatan dalam menahan beban lateral dari gempa.



Gambar 5. Kinerja struktur eksisting arah X pada step 27

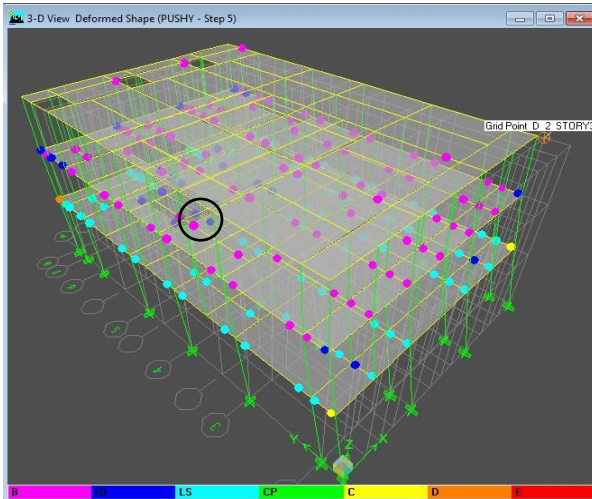
Tabel 7. Data distribusi sendi plastis analisis *pushover* arah Y

Step	Displacement	Base force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
0	0,0000	0,0000	802	2	0	0	0	0	0	0	804
1	0,0261	154786,4688	631	87	55	31	0	0	0	0	804
2	0,1274	548633,2500	624	89	23	66	0	2	0	0	804
3	0,1477	604286,8125	624	89	22	67	0	0	2	0	804
4	0,1477	600087,8125	623	86	24	67	0	2	2	0	804
5	0,1532	615170,0000	623	85	25	67	0	0	4	0	804
6	0,1532	611321,0000	622	69	27	80	0	2	4	0	804
7	0,1673	650013,4375	622	69	27	80	0	0	6	0	804
8	0,1673	646660,6875	622	67	29	78	0	2	6	0	804
9	0,1695	653082,3125	622	67	29	78	0	0	8	0	804
...											
100	0,2493	774258,3751	611	17	54	36	0	0	64	22	804
101	0,2493	773863,4875	610	18	41	49	0	0	62	24	804
102	0,2552	789688,5625	610	18	41	49	0	0	62	24	804
103	0,2552	788942,8125	610	18	39	51	0	0	61	25	804
104	0,2592	799455,2500	610	18	39	51	0	0	61	25	804
105	0,2592	798831,0625	609	19	30	60	0	0	59	27	804
106	0,2634	810085,3750	609	19	30	60	0	0	59	27	804
107	0,2634	809384,6250	609	19	23	67	0	0	57	29	804
108	0,2674	820189,1250	609	19	23	67	0	0	57	29	804
109	0,2674	819294,9375	609	19	22	68	0	0	55	31	804
...											
203	0,3561	999288,5000	564	64	0	45	0	4	48	79	804
204	0,3561	992151,1875	563	61	4	32	0	0	65	79	804
205	0,3561	975685,8750	563	61	4	30	0	2	65	79	804
206	0,3592	983764,0625	563	61	4	28	0	1	68	79	804
207	0,3592	981598,0000	563	61	4	28	0	0	69	79	804
208	0,3592	981090,6250	561	63	4	27	0	1	69	79	804
209	0,3633	991626,2500	560	64	4	27	0	0	70	79	804
210	0,3633	990267,9375	560	64	4	27	0	0	69	80	804
211	0,3643	993103,3750	560	64	4	23	0	0	72	81	804
212	0,3644	989218,3125	558	66	4	20	0	3	72	81	804
213	0,3680	998704,5625	804	0	0	0	0	0	0	0	804

Target perpindahan pada arah Y sebesar $\delta_t = 0,147$ m berdasarkan data *pushover* yang diperoleh dari ETABS pada Tabel 6 menunjukkan bahwa pada *step* 5 nilai perpindahan telah melewati target perpindahan dan kinerja struktur berada pada batas antara *Life*

Safety (LS)-Collapse Prevention (CP) dan mengacu pada NEHRP dan FEMA 273 maka untuk kategori level kinerja *life safety*, menunjukkan telah terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan struktur berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang

cukup terhadap keruntuhan, komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi dan dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan. Berdasarkan nilai target perpindahan pada arah Y struktur perlu diperkuat lagi untuk digunakan setelah terkena gempa. Lokasi sendi plastis seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6 (pada balok yang ditandai), dimana terjadi kondisi kinerja D-E yang berarti komponen struktur sudah tidak mampu menahan gaya geser, lokasi dengan kondisi ini perlu perhatian lebih untuk diperkuat dalam menahan beban lateral dari gempa.



Gambar 6. Kinerja struktur eksisting arah Y pada step 5

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis dan evaluasi sebagaimana pada bab 4 dapat diambil disimpulkan sebagai berikut:

1. Kurva *pushover* arah X berhenti pada titik puncak dan perlahan-lahan mengalami penurunan elastik hingga pada titik tertentu mengalami “fail” yang mendadak. Kurva *pushover* arah Y, setelah titik puncak masih mampu menunjukkan perilaku penurunan kekuatan yang bertahap dan diikuti dengan deformasi yang besar. Kedua arah tinjauan (arah X dan arah Y) telah memenuhi kriteria perencanaan biasa, tetapi ternyata perilaku pasca leleh diantara keduanya berbeda. Hal tersebut tidak bisa dideteksi tanpa melakukan analisa *pushover*.
2. Hasil evaluasi struktur berdasarkan nilai target perpindahan struktur bangunan ruko diperoleh level kinerja struktur berada pada batas antara *Life Safety* (LS)-*Collapse Prevention* (CP), hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan struktur berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan, komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi, namun dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan. Level kinerja struktur arah X dan Y menunjukkan struktur bangunan ruko perlu adanya perbaikan atau perkuatan pada elemen – elemen strukturnya sebelum digunakan kembali.

3. Konsep desain *strong colum weak beam* telah dipenuhi, hal ini ditunjukkan dengan terbentuknya sendi plastis yang diawali dari elemen balok, dimana saat mencapai *performance point* mayoritas elemen balok terbentuk sendi *plastis* kemudian sebagian elemen kolom mencapai kondisi batas *inelastis*.
4. Disarankan dalam proses desain struktur bangunan baru ataupun pemeriksaan struktur bangunan yang telah berdiri harus memperhatikan kondisi pasca elastik untuk memperoleh tingkat kinerja struktur sesungguhnya, terutama dalam menahan beban gempa. Sejak awal pemilik bangunan, insinyur perencana maupun pemakai bangunan bertingkat agar menggunakan perencanaan berbasis kinerja sehingga dapat mengetahui perilaku dari struktur bangunan dan dapat memberikan informasi sejauh mana suatu gempa akan mempengaruhi struktur, selain itu perlu adanya kebijakan pemerintah kota setempat untuk khususnya dinas-dinas yang terkait untuk memberikan perhatian khusus pada bangunan-bangunan yang telah berdiri diatas 25 tahun untuk melaksanakan pemeriksaan kinerja struktur, sehingga masyarakat pemilik dan pengguna bangunan merasa nyaman akan struktur bangunan yang ada di Manado dan sekitarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Applied Tecnology Council (ATC 40), 1999, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Redwood City, California, USA: DC.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*, SNI 03 – 1726 – 2002.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Penghitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, SNI 03 – 2847 – 2002.
- Computer and Structures, Inc., 2010, *ETABS Extended 3D Analysis of Building System – Nonlinear version 9.7.2 Copyright 1984 – 2010*, A Product of Computers and Structures, Inc., 1995: University Ave., Berkeley, CA.
- Federal Emergency Management Agency, 2000, *Prestandart and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building FEMA – 356*, Washington, DC.
- Federal Emergency Management Agency, 2004, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures ATC – 55 Project FEMA – 440*, Washington, DC.
- Dewobroto, Wiryanto., 2005, “Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisis Pushover”, *Prosiding Civil Engineering National Conference : Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism*, 27 hal, Semarang: Universitas Katolik Soegijapranata.

Kholilur, Rosyid., 2009, *Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Diagnostic Center RSUD DR. Sudono Madiun dengan Pushover Analysis*, Jurnal AGRITEK Fakultas Teknik Universitas Merdeka Madiun, Vol. 10, No. 1, hal. 39 – 50.

(sesuai ATC-40, FEMA 356 dan FEMA 440)”, *Jurnal Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha*, Vol. 3, No. 1, hal 41 – 52.

Pranata, Yosafat Aji., 2006, “Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analysis