

EVALUASI KINERJA BANGUNAN GEDUNG DPU WILAYAH KABUPATEN WONOGIRI DENGAN ANALISIS PUSHOVER

Yunalia Muntafi¹

¹Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km.14,5 Besi, Sleman, Yogyakarta 55584 Telp 0274 898471 ext.3235
Email: yunalia@uii.ac.id

Abstrak

Gedung DPU empat lantai di wilayah Wonogiri didesain berdasarkan SNI T-15-1991-03. Analisis statik nonlinier (pushover analysis) dengan konsep Performance Based Earthquake Engineering (PBEE) merupakan pilihan yang tepat dan relatif mudah dalam mengevaluasi kinerja seismiknya. Penelitian bertujuan menghasilkan kurva kapasitas (pushover curve), titik kinerja (performance point) dan mengetahui tahap-tahap terbentuknya sendi plastis (skema kelelahan) sampai gedung tersebut runtuh. Metode penelitian menggunakan prosedur B analisis pushover metode capacity spectrum ATC 40. 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. Hasil analisis menunjukkan gaya lateral maksimum sebesar 594,0694 ton terjadi pada step-8 pushover analysis. Berdasarkan performance point, gaya geser dasar $V_b = 345,3610$ ton, displacement pada step ke-3 sebesar $0,0760m > 0,037m (D_b)$, kinerja struktur tidak melewati LS (life safety), maksimum total drift = 0,0021 dan maksimum inelastik drift = 0,00155. Hal ini menunjukkan bahwa gedung yang ditinjau termasuk dalam level kinerja Immediate Occupancy (IO), sehingga bila terjadi gempa, gedung hanya mengalami sedikit kerusakan struktur dan nonstruktur, sehingga bangunan aman dan dapat langsung dihuni kembali.

Kata kunci: analisis pushover; bangunan kantor; evaluasi kinerja seismik; seismic performance

Pendahuluan

Perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa sangat penting di Indonesia. Bangunan tahan gempa yang telah ada pada umumnya direncanakan dengan menggunakan prosedur yang tertulis dalam peraturan perencanaan bangunan (*building codes*). Selama ini, analisis terhadap gempa menggunakan metode *Force Based Design*. Perhitungan gaya gempa pada metode tersebut dilakukan dengan analisis linier (elastis), sehingga tidak menunjukkan kinerja bangunan terhadap gempa secara langsung.

Perancangan bangunan terhadap beban gempa setelah tahun 2000-an mulai menggunakan perancangan bangunan berbasis kinerja. Dalam hal ini, perancangan tidak hanya berdasarkan gaya-gaya yang bekerja tetapi juga memperhatikan besarnya deformasi yang terjadi untuk mengurangi kerusakan pada komponen non struktur. Di sisi lain, bangunan-bangunan lama yang telah dirancang dengan peraturan perencanaan sebelum tahun 2000-an, belum menggunakan sistem perencanaan berbasis kinerja. Pada umumnya, gaya gempa yang digunakan dalam desain bangunan relatif kecil dengan nilai reduksi beban gempa R yang relatif besar (maksimum 8,5). Seiring waktu, intensitas gempa dapat dikatakan semakin besar, bahkan hasil dari rencana peta *hazard* gempa Indonesia 2010 menunjukkan sebagian besar wilayah di Indonesia mengalami kenaikan nilai PGA (g). Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi terhadap bangunan-bangunan yang didesain sebelum tahun 2000-an.

Menurut Wiryanto Dewobroto (2006), keamanan dan keselamatan bangunan tidak hanya bergantung pada tingkat kekuatan, tetapi juga pada tingkat deformasi dan energi terukur 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 PBEE dapat digunakan untuk mendesain bangunan baru (*Performance Based Seismic Design*) maupun mengevaluasi bangunan yang sudah ada (*Performance Based Seismic Evaluation*). Dalam perkembangannya, analisis statik nonlinier yang lebih dikenal dengan istilah *pushover analysis* merupakan pilihan yang menarik dalam mengevaluasi bangunan karena menggunakan konsep PBEE sehingga dapat

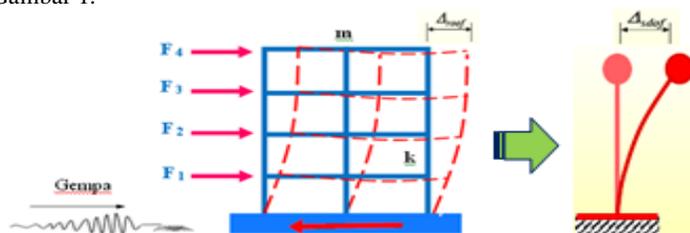
diketahui kinerja seismik strukturnya. Prosedur *pushover analysis* sesuai konsep PBEE telah ada pada dokumen ATC-40 (*capacity spectrum method*) serta FEMA 356 dan FEMA 440 (*displacement coefficient method*).

Penelitian bertujuan melakukan evaluasi kinerja seismik (*seismic performance*) dari gedung rangka beton bertulang tahan gempa. Ruang lingkup studi menggunakan model gedung rangka beton bertulang beraturan empat lantai hasil perencanaan Anung Hasmar Dwipa yang didesain sesuai SNI T-15-1991-03 dengan prinsip daktilitas tingkat 3. Analisis menggunakan peraturan pembebanan sesuai SNI 03-1726-2002. Model sendi *default* dan prosedur analisis mengacu ATC 40 (*Capacity Spectrum Method*, Prosedur B).

Dasar Teori

Respon Struktur Akibat Gempa

Gaya gempa mempunyai besar, arah dan intensitas yang selalu berubah menurut waktu (*time varying*) sehingga menimbulkan respon dinamis pada struktur yang merupakan fungsi dari waktu. Karena sifat getarannya yang random dan tidak seperti beban statik pada umumnya, maka efek beban terhadap respon struktur tidaklah dapat diketahui dengan mudah. Struktur hanya memikul beban mati (D) dan beban hidup (L) dalam kondisi statis. Gempa sebagai beban dinamis nonharmonis, nonperiodis dan nonstasioner dalam bentuk radiasi gelombang dari sumbernya. Gelombang tersebut selanjutnya terpancar ke segala arah dengan medium tanah dan bebatuan di sekitarnya hingga mencapai permukaan bumi dan menimbulkan getaran. Getaran tanah yang diterima pondasi kemudian diteruskan pada struktur di atasnya sehingga terjadi goyangan pada bangunan sebagai gaya inersia. Respon struktur akibat gempa disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Respon struktur akibat gempa

Goyangan dengan intensitas tertentu tersebut menimbulkan kerusakan dan keruntuhan struktur bangunan. Karena gaya gempa berubah-ubah intensitasnya menurut waktu, maka pengaruhnya terhadap struktur juga berubah-ubah menurut waktu. Kerusakan dan keruntuhan yang terjadi dapat dibagi ke dalam beberapa tingkat baik tingkat rendah maupun parah.

Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)

ATC 40 (1996) dan FEMA 273 (1997) menawarkan suatu pendekatan baru dalam desain/perencanaan gempa terhadap struktur bangunan tahan gempa yaitu konsep *Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)*. PBEE adalah suatu metode untuk mendesain, mengevaluasi, merancang dan memonitor fungsi dan *maintenance* fasilitas-fasilitas *engineering* yang kinerjanya di bawah target dan respon bebannya ekstrim untuk memenuhi kebutuhan dan keinginan *owner* dan masyarakat sekitar (Bozorgnia, 2004). Metode PBEE memungkinkan seorang *engineer* untuk dapat lebih dahulu menetapkan sasaran kinerja struktur dari beberapa magnitudo beban gempa. Respon yang terjadi diharapkan tidak melebihi batas ketentuan penerimaan maksimum. Pada PBEE, batas yang dimaksud adalah kategori level kinerja *Life Safety (LS)*.

Metode PBEE terdiri atas dua konsep, yaitu konsep *Performance Based Seismic Design (PBSD)* dan *Performance Based Seismic Evaluation (PBSE)*. *Performance based seismic design* adalah suatu konsep yang menetapkan tingkat kinerja (*performance level*) yang diharapkan dapat dicapai saat struktur dilanda gempa dengan intensitas tertentu, sedangkan *performance based seismic evaluation* adalah suatu konsep yang digunakan untuk mengevaluasi struktur bangunan yang sudah ada, apakah memenuhi level kinerja yang telah direncanakan pada desain awal sehingga dapat diketahui tindakan apa yang hendaknya dilakukan, seperti perkuatan ataupun rehabilitasi. Konsep *Performance Based Earthquake Engineering (PBEE)* menggunakan perbandingan dasar antara kurva *pushover* dengan kurva *demand* pada suatu bagian, kelompok atau struktur secara keseluruhan.

Analisis Statik Nonlinier

Analisis statik nonlinier merupakan analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa. Analisis nonlinear sangat tepat digunakan karena ketika terjadi gempa yang cukup besar pada struktur terjadi plastifikasi di beberapa tempat, sehingga bangunan tidak lagi berperilaku linear, akan tetapi berperilaku nonlinear. Analisis statik nonlinier dikenal pula sebagai analisis *pushover*, digunakan sebagai metode alternatif dalam melaksanakan *performance based earthquake engineering*.

Analisis *pushover* adalah analisis statik nonlinier dimana pengaruh Gempa Rencana terhadap struktur bangunan 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 pelepasan (sendi plastis) pertama di dalam struktur bangunan gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai kondisi plastik (Pranata, 2006).

Dewobroto (2006) menyatakan Analisis *pushover* dapat digunakan sebagai alat bantu perencanaan tahan gempa, asalkan menyesuaikan dengan keterbatasan yang ada, yaitu:

1. Hasil analisis *pushover* masih berupa suatu pendekatan, karena bagaimanapun perilaku gempa yang sebenarnya adalah bersifat bolak-balik melalui suatu siklus tertentu, sedangkan sifat pembebanan pada analisis *pushover* adalah statik monotonik.
2. Pemilihan pola beban lateral yang digunakan dalam analisis adalah sangat penting.
3. Untuk membuat model analisis nonlinier akan lebih rumit dibanding model analisis linier. Analisis nonlinier harus memperhitungkan karakteristik inelastik beban-deformasi dari elemen-elemen yang penting dan efek $P-\Delta$.

Applied Technology Council (ATC) 40

Sasaran kinerja pada dokumen ATC 40 memasukkan beberapa pertimbangan kondisi kerusakan (*damage states*) untuk beberapa level gerakan tanah. Dokumen ATC 40 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. Pembagian level kinerja bangunan ATC 40 disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Level kinerja bangunan

Building Performance Levels						
Nonstructural Performance Levels	Structure Performance Levels					
	SP-1	SP-2	SP-3	SP-4	SP-5	SP-6
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Limited Safety (Range)	Structural Stability	Not Considered
NP-A Operational	1-A Operational	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B Immediate Occupancy	1-B Immediate Occupancy	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C Life Safety	1-C	2-C	3-C Life Safety	4-C	5-C	6-C
NP-D Hazards Reduced	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E Not Considered	NR	NR	3-E	4-E	5-E Structural Stability	Not Applicable

Sumber: Applied Technology Council (ATC) 40, 1996

Penjelasan lebih lanjut kinerja struktur menurut ATC 40 sebagai berikut :

- 1) *Immediate Occupancy*, SP-1: 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.
- 2) *Damage Control*, SP-2: Dalam kategori ini, pemodelan bangunan baru dengan beban gempa rencana dengan nilai beban gempa yang peluang dilampauinya dalam rentang masa layan gedung 50 tahun adalah 10%.
- 3) *Life Safety*, SP-3: Bila terjadi gempa, mulai muncul kerusakan yang cukup signifikan pada struktur, akan tetapi struktur masih dapat menahan gempa. Komponen-komponen struktur utama tidak runtuh. Bangunan dapat dipakai kembali jika sudah dilakukan perbaikan, walaupun kerusakan yang terjadi kadangkala membutuhkan biaya yang tidak sedikit.
- 4) *Limited Safety*, SP-4: 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.
- 5) *Structural Stability*, SP-5: 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.
- 6) *Not Considered*, SP-6: Pada kategori ini, struktur sudah dalam kondisi runtuh, sehingga hanya dapat dilakukan evaluasi seismik dan tidak dapat dipakai lagi.

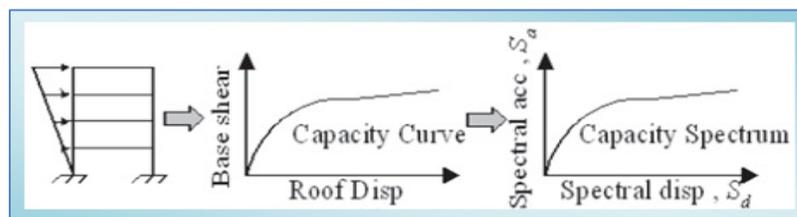
ATC 40 memberikan batasan rasio drift atap yang dievaluasi pada *performance point* (PP) dalam rangka mengevaluasi kinerja struktur daktail dengan analisis statik nonlinier. Parameter yang digunakan adalah maksimum total drift dan maksimum inelastik drift. Batasan rasio *drift* atap sesuai ATC 40 disajikan pada Tabel 2.

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

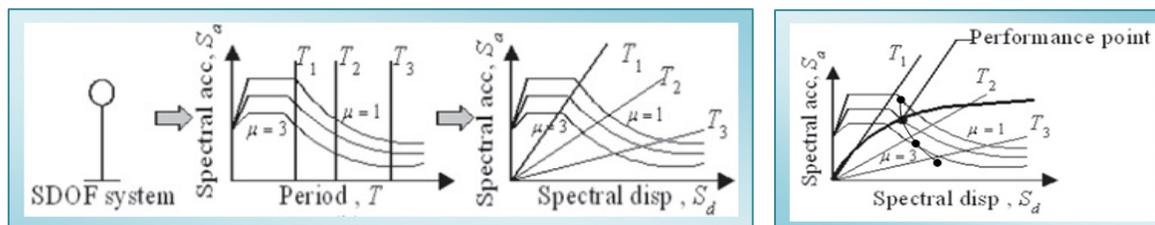
Parameter	Performance Level			
	IO	Damage Control	LS	Structural Stability
Maksimum Total Drift	0.01	0,01 s.d 0,02	0.02	$0.33 \frac{W_i}{P_i}$
Maksimum Inelastik Drift	0.005	0,005 s.d 0,015	no limit	no limit

Metode Capacity Spectrum

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). Metode ini dimulai dengan menghasilkan kurva yang menampilkan hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Konsep CSM adalah mereduksi spektrum elastis hingga memotong kurva kapasitas pada koordinat spektrum untuk mendapatkan *performance point*.



a). Konversi *capacity curve* ke bentuk *capacity spectrum*



b). Konversi *response spectrum* ke bentuk *demand spectrum*

c). *Performance Point*

Gambar 2. Proses plot kurva *performance point*

Konsep desain kinerja struktur metode spektrum kapasitas pada dasarnya untuk mendapatkan peralihan aktual struktur gedung. Peralihan aktual yang didapat dari hasil tersebut menunjukkan besar simpangan atap struktur. Perbandingan antara simpangan atap struktur terhadap tinggi total struktur menunjukkan kinerja struktur.

Model Struktur dan Metode Penelitian

Gedung yang dianalisis adalah gedung beraturan 4 yang terdiri dari 5 bentang balok pada arah x dan 3 bentang balok pada arah y dengan panjang bentang balok masing-masing 7m. Tinggi lantai dasar 5,75m, tinggi lantai 2-4 4m. Terletak di wilayah gempa 3 dan berfungsi sebagai perkantoran. Mutu beton $f'c = 20$ MPa, mutu baja $f_y = 350$ MPa. Tebal pelat lantai 120 mm dan pelat atap 90 mm.

Dimensi penampang sebagai berikut:

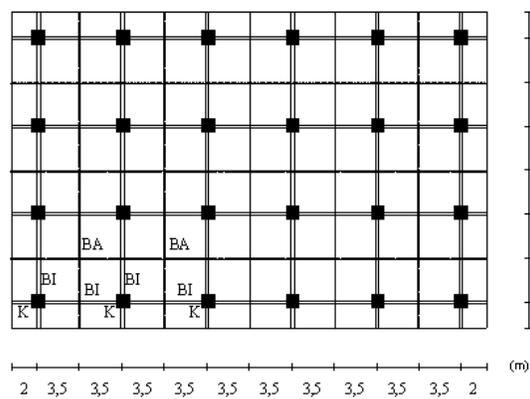
- a) Balok induk = 500 mm x 700 mm
- b) Balok anak = 300 mm x 500 mm
- c) Kolom = 700 mm x 700 mm

Denah pelat dan model stuktur portal selengkapnya disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4.

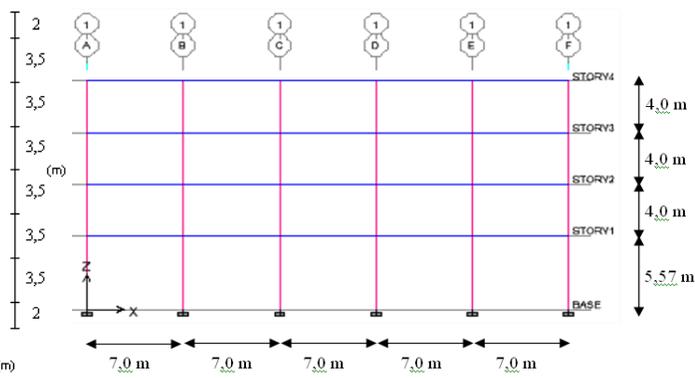
Langkah analisis yang dilakukan sebagai berikut :

1. Pemodelan geometri struktur gedung sesuai data perencanaan dengan memperhatikan dimensi profil yang digunakan.
2. Pendetailan elemen struktur sesuai data perencanaan gedung.

3. Menghitung beban dan gaya yang bekerja. Pada analisis ini berupa beban mati, beban hidup dan beban gempa.
4. Melakukan analisis *pushover* menggunakan metode *capacity spectrum* prosedur B ATC-40 dengan bantuan ETABS V9.0 *Nonlinear* untuk mendapatkan *capacity curve*, *performance point* dan titik-titik plastis.
5. Melakukan evaluasi kinerja struktur sesuai ATC 40.
6. Pengambilan kesimpulan



Gambar 3. Denah pelat



Gambar 4. Model struktur portal gedung

Analisis Struktur

Gaya Geser Dasar (V)

Gaya geser dasar akibat gempa menurut SNI 03-1726-2002 sebagai berikut:

$$V = \frac{C \times I}{R} \times W_i = \frac{0,443 \times 1,0}{8,5} \times 3547,9551 \text{ ton} = 184,9111 \text{ ton}$$

Rasio tinggi gedung dengan lebar ukuran gedung terbebani gempa :

$$\frac{H}{L_x} = \frac{17,75}{39} = 0,455$$

Hasil perhitungan di atas menghasilkan nilai $H/L_x < 3$, maka gaya geser dasar nominal (V) harus dibagikan sepanjang tinggi struktur gedung menjadi beban-beban gempa nominal statik ekuivalen F_i yang menangkap pada pusat massa lantai tingkat ke-i.

$$F_i = \frac{W_i \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot Z_i} V ; \text{ Hasil perhitungan gaya geser dasar disajikan pada Tabel 3.}$$

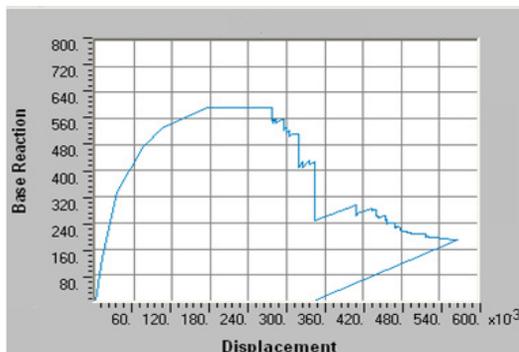
Tabel 3. Distribusi beban geser dasar nominal

Lantai	Z_i (m)	W_i (ton)	$W_i \times Z_i$	V	F_{iy}
Atap	17,75	658,0932	11681,1543	184,9111	54,4815
3	13,75	945,6798	13003,0973	184,9111	60,6471
2	9,75	945,6798	9220,3781	184,9111	43,0043
1	5,75	998,5023	5741,3882	184,9111	26,7781
Σ		3547,9551	39646,0178		184,9111

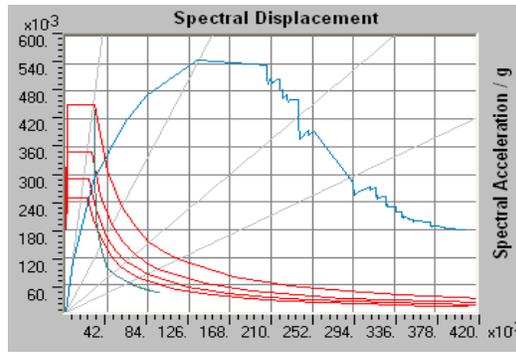
Analisis Pushover

Elemen kolom menggunakan tipe sendi *default-PMM* → hubungan gaya aksial dengan momen (diagram interaksi P-M). Sedangkan Elemen balok menggunakan tipe sendi *default-M3* → balok efektif menahan momen dalam arah sumbu kuat (sumbu-3). Evaluasi dilakukan untuk setiap titik yang berpotensi mengalami sendi plastis, yang lokasinya ditentukan dalam model analisis. Monitor target peralihan pada sumbu-y, sesuai dengan arah pola beban. Setelah melakukan running analisis pushover dengan program Etabs Nonlinear V9 didapatkan output berupa kurva kapasitas (*capacity curve*) yang disajikan pada Gambar 5, sedangkan hasil konversi ke bentuk spektrum kapasitas output dari analisis pushover disajikan pada Gambar 6.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar (ton) dengan perpindahan (m) dari step ke-1 sampai step ke-153, yaitu step dimana struktur telah mengalami keruntuhan (*collapse*). Sedangkan Gambar 6 menunjukkan grafik spektrum kapasitas yang kemudian dibandingkan dengan *response spectrum* yang telah diubah dalam bentuk format *acceleration-displacement response spectrum*, ADRS (SaSd).



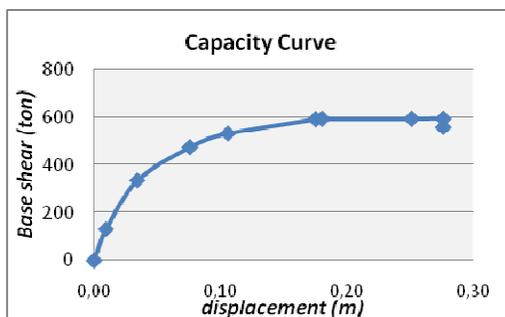
Gambar 5. Kurva kapasitas (*pushover curve*)



Gambar 6. Spektrum kapasitas (*capacity spectrum*)

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil perhitungan iterasi, analisis pushover berhenti pada step 153. Gambar 5 menunjukkan bahwa setelah terjadi perpindahan maksimum struktur sebesar 0,5688m, struktur bergoyang ke arah berlawanan dan mengalami penurunan gaya geser dasar dan mendadak *collapse*. Hasil analisis seismik gedung rangka beton bertulang pasca elastik adalah berupa kurva kapasitas (*pushover curve*) dan skema kelelahan/distribusi sendi plastis. Untuk mengetahui distribusi sendi plastis secara lebih jelas, dilakukan peregang kurva kapasitas. Kurva kapasitas menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan. Kurva kapasitas untuk step-1 sampai step-9 secara lebih jelas disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva kapasitas pada step-1 sampai step-9 *pushover analysis*

Perubahan kemiringan dari kurva kapasitas tersebut menunjukkan adanya leleh pada komponen. Dari hasil plot sendi plastis ke dalam kurva tersebut, dapat diketahui bahwa pada step-7 analisis *pushover*, struktur gedung sudah termasuk dalam kategori lebih rendah dari *Life Safety (LS)*. Berdasarkan Gambar 12, dapat diketahui besarnya gaya lateral maksimum yang masih mampu ditahan oleh struktur, yaitu sebesar 594,0694 ton yang terjadi pada step-8 *pushover analysis*. Pada step tersebut, *displacement* yang terjadi sebesar 0,2768m, sedangkan pada step-9, gaya lateral yang mampu ditahan oleh struktur mulai menurun yaitu sebesar 558,7686ton.

Pada metode spektrum kapasitas (ATC 40), kurva pushover dengan modifikasi tertentu diubah menjadi spektrum kapasitas (*capacity spectrum*) seperti yang terlihat pada Gambar 6. Dari kurva Respons Spektrum Rencana SNI 1726-2002 untuk wilayah gempa 3, kondisi tanah keras, didapat nilai $C_a = 0,18$ dan $C_v = 0,23$ sebagai input analisis pushover dalam format ADRS. Hasil analisis pushover juga menunjukkan *output* titik kinerja struktur gedung dengan nilai redaman efektif (β_{eff}) yang diperoleh adalah 10,30%. Nilai tersebut lebih kecil dari batasan redaman efektif maksimum yang diijinkan yaitu 40%. Hasil evaluasi selengkapnya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Evaluasi kinerja struktur sesuai ATC 40

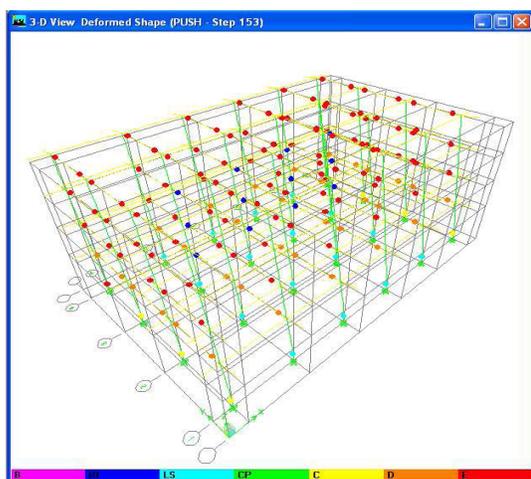
Gaya geser dasar (ton)	Performance point			
	V_t (ton)	D_t (m)	β_{eff} (%)	T_{eff} (detik)
184,9111	345,3610	0,037	10,30	0,6310

Pada Tabel 4, dapat dilihat besarnya nilai gaya geser dasar $V_t = 345,3610 \text{ ton} > V_y = 184,9111 \text{ ton}$. Maka berdasarkan metode spektrum kapasitas (ATC 40, 1996) perilaku struktur arah Y pada gempa rencana telah mengalami kondisi in-elastis yang disebabkan pelelehan pada sendi-sendi plastisnya. Batasan maksimum

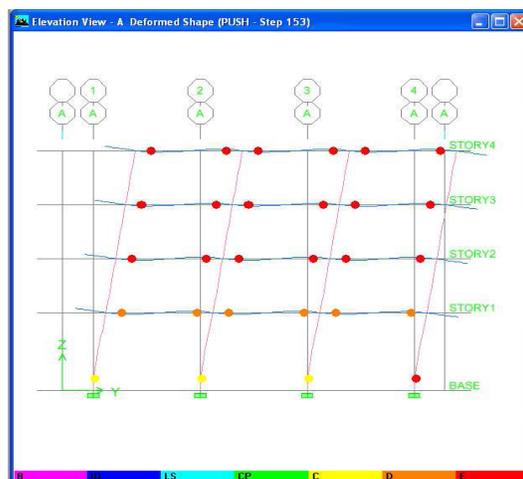
$displacement = 0,02 H = 0,02 \cdot 17,75m = 0,355 m$. Target $displacement$ hasil analisis pushover sebesar $0,037m < 0,355m$, sehingga memenuhi syarat keamanan.

Sendi Plastis (Plastic Hinge)

Sendi plastis akibat momen lentur dapat terjadi pada struktur dimana beban yang bekerja melebihi kapasitas momen lentur yang ditinjau. Setelah dilakukan analisis beban dorong, struktur mengalami keretakan pada bagian-bagian yang lemah. Sendi plastis hasil analisis pushover pada step pertama terletak pada salah satu ujung balok lantai 2 dari As-B, As-C, As-D dan As-E, sedangkan distribusi sendi plastis pada step-153 disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Distribusi sendi plastis sampai step ke-153



Gambar 9. Sendi plastis portal As-A step ke-153

Hasil akhir analisis *pushover* menunjukkan distribusi sendi pada model gedung yang ditinjau hanya terjadi pada elemen balok dan kolom lantai dasar saja, sehingga tidak terjadi mekanisme tingkat. Hal tersebut sesuai dengan metode perencanaan kolom kuat-balok lemah (*strong column weak beam*) dan memenuhi kriteria desain pada struktur gedung berdaya tahan penuh. Hasil distribusi sendi plastis berdasarkan level/kategori kinerja menurut ATC 40 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Distribusi sendi plastis

Step	Displ. (m)	Base Force (ton)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
0	0.0000	0.0000	1116	4	0	0	0	0	0	0	1120
1	0.0095	131.9391	1052	68	0	0	0	0	0	0	1120
2	0.0343	336.3177	984	100	36	0	0	0	0	0	1120
3	0.0760	475.3519	968	68	84	0	0	0	0	0	1120
4	0.1062	532.7492	944	32	64	80	0	0	0	0	1120
5	0.1757	592.2501	940	36	58	86	0	0	0	0	1120
6	0.1808	593.7995	940	8	28	144	0	0	0	0	1120
7	0.2518	593.9993	940	0	36	136	0	8	0	0	1120
8	0.2768	594.0694	940	0	36	136	0	0	8	0	1120
9	0.2768	558.7686	940	0	36	134	0	2	8	0	1120
10	0.2773	562.2314	940	0	36	134	0	0	10	0	1120
11	0.2773	551.2112	940	0	36	132	0	2	10	0	1120
12	0.2780	557.0987	940	0	36	132	0	0	12	0	1120
13	0.2780	549.2189	940	0	36	130	0	2	12	0	1120
14	0.2785	551.5440	940	0	36	130	0	0	14	0	1120
15	0.2785	546.0874	940	0	36	130	0	0	14	0	1120

Tabel tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan target perpindahan $D_t = 0,037m$, terlihat besar nilai $displacement$ pada step ke-3 adalah $0,0760m > D_t$, kinerja yang diperlihatkan oleh struktur tidak ada yang melewati

batas LS (*life safety*). Maka, kinerja struktur arah Y adalah OK. Sendi plastis yang terjadi pada step ke-6 masih termasuk dalam kategori LS-CP (ATC 40, 1996), hal tersebut menunjukkan bahwa gedung yang ditinjau dalam studi ini masih memenuhi persyaratan, yaitu didesain untuk kategori perkantoran.

Berdasarkan Tabel 5. dapat diketahui batasan rasio *drift* atap yang dievaluasi pada *performance point* (PP), yang mana parameternya adalah maksimum total *drift* dan maksimum inelastik *drift*. Perhitungannya sebagai berikut:

$$\text{Maksimum total drift} = \frac{D_t}{H_{\text{total}}} = \frac{0,037}{17,75} = 0,0021 < 0,001 \text{ (IO)}$$

$$\text{Maksimum inelastik drift} = \frac{(D_t - D_1)}{H_{\text{total}}} = \frac{(0,037 - 0,0095)}{17,75} = 0,00155 < 0,005 \text{ (IO)}$$

Berdasarkan Tabel 2. Batasan rasio *drift* atap menurut ATC 40, hasil perhitungan di atas menunjukkan bahwa gedung yang ditinjau dalam studi ini termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy* (IO).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diambil kesimpulan:

1. Besar gaya lateral maksimum sebesar 594,0694 ton terjadi pada step-8 *pushover analysis*.
2. Berdasarkan *performance point* didapat gaya geser dasar $V_t = 345,3610$ ton, *displacement* pada step ke-3 sebesar 0,0760m > 0,037m (D_t), kinerja struktur tidak melewati LS (*life safety*).
3. Nilai maksimum total *drift* = 0,0021 dan maksimum inelastik *drift* = 0,00155. Hal ini menunjukkan bahwa gedung yang ditinjau termasuk dalam level kinerja *Immediate Occupancy* (IO), maka apabila terjadi gempa, gedung tidak mengalami kerusakan struktural dan nonstruktural, sehingga bangunan aman dan dapat langsung dipakai.

Daftar Pustaka

- Anwar, Naveed, (2007), "Pushover Analysis using ETABS and SAP 2000", *Workshop "Introduction and Application of Pushover Analysis for Seismic Design/Evaluation of Buildings"*, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta
- Applied Technology Council (ATC-40), (1996), "*Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*", Volume 1, Redwood City, California
- Applied Technology Council (ATC-40), (1996), "*Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*", Volume II, Redwood City, California
- Badan Standarisasi Nasional, (1989), "*Tata Cara Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung*", SNI 03-1727-1989, Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional, (2002), "*Tata Cara Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*", SNI 03-1726-2002, Jakarta
- Bozorgnia, Yousef, and Vitelmo V. Bertero., (2004), "*Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*", United States Amerika, CRC Press LLC
- Budiono, Bambang, dan Yusuf Royanes Goro., (2007), "Studi Perbandingan Respon Struktur Non Linier pada Struktur Beton Bertulang di Bawah Beban Gempa dengan Standar FEMA 273 dan ATC 40", Seminar dan Pameran HAKI – "Konstruksi Tahan Gempa di Indonesia".
- Dewobroto, Wiryanto., (2006), "Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000", *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.3 No.1
- Dwipa, Anung Hasmaria, (2008), "*Perencanaan Gedung DPU Empat Lantai di Wilayah Kabupaten Wonogiri dengan Daktilitas Tingkat Tiga*", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, FT UMS, Surakarta
- Federal Emergency Management Agency (Fema 273), (1997), "*NERHP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings*", Redwood City, California
- Pranata, Yosafat Aji, (2006), "Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analysis (Sesuai ATC-40, FEMA 356, dan FEMA 440)", *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.3 No.1
- Pranata, Yosafat Aji, (2006), "Studi Perencanaan Berbasis Kinerja pada Rangka Beton Bertulang dengan Metode Direct Displacement-Based Design", *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.3 No.2
- Widodo, (2001), "*Respons Dinamik Struktur Elastik*", UII Press, Yogyakarta