Annual Civil Engineering Seminar 2015, Pekanbaru
ISBN: 978-979-792-636-6

ANALISIS KINERJA STRUKTUR BETON BERTULANG DI WILAYAH GEMPA INDONESIA INTENSITAS TINGGI DENGAN KONDISI TANAH LUNAK

Sri Fatma Reza[1], Reni Suryanita[2] dan Ismeddiyanto[3]

[1,2,3] *Jurusan Teknik Sipil/Universitas Riau*
sri.fatma.reza@gmail.com

ABSTRAK

Salah satu konsep perencanaan struktur di wilayah Indonesia adalah dengan menganalisis kinerja struktur setelah terjadinya gempa, mengingat Indonesia merupakan bagian dari wilayah yang rentan terjadi gempa bumi dan letusan gunung berapi. Tujuan artikel ini adalah untuk memperlihatkan kinerja dan distribusi sendi plastis gedung beton bertulang beraturan dengan menggunakan metode analisis statik nonlinier. Model bangunan diberikan beban gempa berupa respons spektrum wilayah gempa dengan nilai percepatan tanah (g) tinggi dan berada di kondisi tanah lunak. Kinerja bangunan ditentukan dengan menggunakan *code* ATC-40 yang dipengaruhi oleh target perpindahan. Metode yang digunakan untuk memperoleh nilai target perpindahan adalah metode spektrum kapasitas ATC-40 dan koefisien perpindahan FEMA 356. Hasil analisis memberikan nilai target perpindahan metode spektrum kapasitas ATC-40 adalah 0,295 m sedangkan metode koefisien perpindahan FEMA 356 memberikan hasil 0,536 m. Kinerja struktur untuk kedua nilai target perpindahan menunjukkan level *Damage Control* (*DC*) yang berarti kondisi gedung belum mengalami kerusakan berat dan dapat difungsikan kembali.

Kata kunci: *analisis statik nonlinier, beton bertulang, gempa intensitas tinggi, kinerja struktur, tanah lunak*

1. PENDAHULUAN

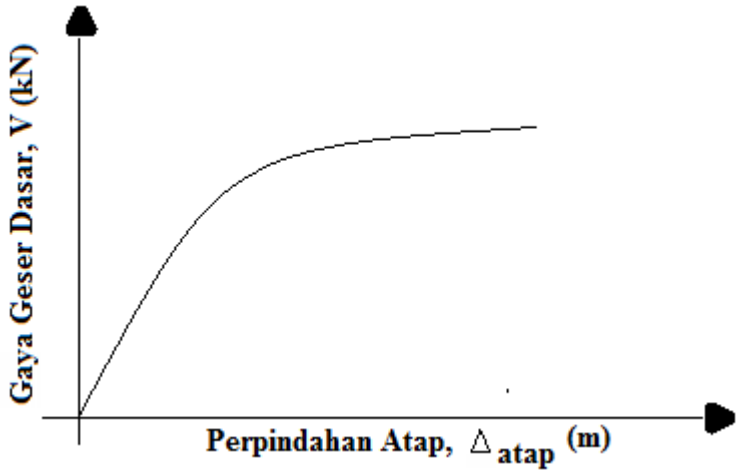
Indonesia merupakan bagian dari wilayah yang mengelilingi cekungan Samudra Pasifik yang rentan akan terjadinya gempa bumi atau letusan gunung berapi. Wilayah-wilayah ini dikenal sebagai lingkaran api pasifik atau *Circum Pasific Ring of Fire*. Gempa bumi adalah bencana alam yang disebabkan oleh pergeseran lempeng bumi atau kerak bumi (gempa tektonik). Gempa bumi juga bisa terjadi karena adanya letusan gunung berapi (gempa vulkanik).

Gempa bumi terjadi secara tiba-tiba sehingga banyak menelan korban jiwa akibat tertimpanya reruntuhan bangunan yang rusak. Gempa dengan kekuatan sedang hingga tinggi dapat merusak dan menghancurkan semua bangunan khususnya bangunan bertingkat banyak. Untuk meminimalisir kerugian akibat rusaknya bangunan, saat ini perencanaan struktur berbasis kinerja perlu digunakan.

Dewobroto (2005), menyatakan bahwa perencanaan struktur bangunan tahan gempa dengan konsep kinerja struktur tergolong hal yang baru. Konsep dari desain kinerja struktur ini lebih menekankan pada kinerja (*performance*) dari pada kekuatan (*strength*) dari struktur. Indikator kinerja yang ditinjau adalah perpindahan lateral maksimum yang dinyatakan dengan perpindahan puncak (*roof drift*) dari struktur tersebut.

Kinerja suatu struktur bisa dianalisis menggunakan analisis statik nonlinier (*pushover*) dan analisis dinamik nonlinier. Namun analisis yang sering digunakan adalah analisis statik nonlinier karena lebih mudah dan menghemat waktu dibandingkan analisis dinamik nonlinier. Analisis statik nonlinier (*pushover*) adalah analisis dengan memberikan beban dorong pada struktur sampai perpindahan pada puncak struktur mencapai perpindahan yang direncanakan. Pada proses analisis dapat menggunakan prosedur *load-controlled* atau *displacement-controlled*. Analisis statik nonlinier akan menghasilkan sebuah kurva yang menggambarkan perbandingan gaya geser dasar (V) dengan perpindahan pada puncak struktur (D). Kurva tersebut dinamai kurva kapasitas atau kurva *pushover* (Gambar 1).

ISBN: 978-979-792-636-6



Gambar 1. Kurva Kapasitas atau Kurva *Pushover*

Level kinerja struktur dapat diketahui salah satunya menggunakan *code* ATC-40 yang menjadi acuan dalam perencanaan penelitian ini. ATC-40 memberikan kriteria tingkatan kinerja struktur yang dinyatakan sebagai *performance* level dijelaskan sebagai berikut:

1. *Immediate Occupancy* (*IO*) adalah kondisi dimana hanya sedikit kerusakan yang terjadi, komponen struktur penahan gravitasi maupun komponen struktur penahan lateral dapat mempertahankan karakteristik dan kapasitas seperti kondisi sebelum gempa terjadi.
2. *Damage Control* (*DC*) adalah kondisi antara *Immediate Occcupancy* (*IO*) dan *Life Safety* (*LS*), dimana kerusakan yang terjadi dibatasi agar dapat diperbaiki, struktur yang direncanakan dengan baik biasanya termasuk dalam kategori ini.
3. *Life Safety* (*LS*) adalah kondisi dimana beberapa komponen utama struktur telah rusak dengan perbaikan yang tidak ekonomis lagi, keselamatan orang baik di dalam maupun di luar gedung terancam, namun ancaman tersebut tidak sampai membahayakan manusia.
4. *Structural Stability* (*SS*) adalah kondisi dimana struktur telah mengalami kerusakan parsial ataupun total, kerusakan yang terjadi telah menyebabkan degradasi kekuatan dan kekakuan pada sistem penahan gaya lateral.

ATC-40 memberikan batasan rasio simpangan atap untuk berbagai macam kategori tingkat kinerja struktur pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat Kinerja Bangunan Gedung Berdasarkan Batas Deformasi (ATC-40)

	Tingkat Kinerja			
Interstory Drift Limit (Batas Simpangan antar Lantai)	*Immediate Occupancy*	*Damage Control*	*Life Safety*	*Structural Stability*
Maximum Total Drift (Simpangan Total Maksimum)	0,01	0,01 - 0,02	0,02	0,33 Vi/Pi
Maximum Inelastic Drift (Simpangan Nonelastis Maksimum)	0,005	0,005 - 0,015	*No Limit*	*No Limit*

Dengan menggunakan Persamaan 1 dan 2 sebagai berikut:

$$Maximum\ Total\ Drift = \frac{Dt}{H} \quad (1)$$

$$Maximum\ Inelastic\ Drift = \frac{Dt - D1}{H} \quad (2)$$

dengan :
D_t = Target perpindahan (m)

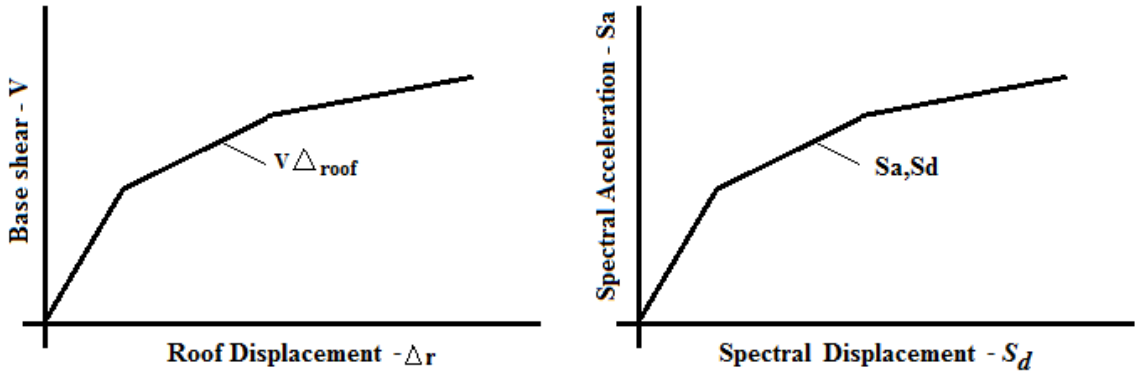
ISBN: 978-979-792-636-6

D_1 = Perpindahan pertama (m)
H = Tinggi total bangunan (m)

Penentuan kinerja struktur dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan target perpindahan yang bisa diperoleh dari beberapa metode yaitu: metode kapasitas spektrum berdasarkan ATC-40 dan metode koefisien perpindahan berdasarkan FEMA 356 (ASCE, 2000) dibahas dalam studi ini.

Metode kapasitas spektrum (ATC-40)

Metode ini mengubah kurva kapasitas menjadi kurva spektrum kapasitas. Metode ini secara khusus telah *build-in* dalam *software* elemen hingga. Metode sederhana ini memberikan informasi yang berguna karena mampu menggambarkan bagaiman respon bangunan secara *inelastic.* Target perpindahan diperoleh dari perpotongan antara kurva kapasitas dengan kurva respons spektrum yang dihasilkan dari analisis statik nonlinier.



Kurva Kapasitas Spektrum Kapasitas

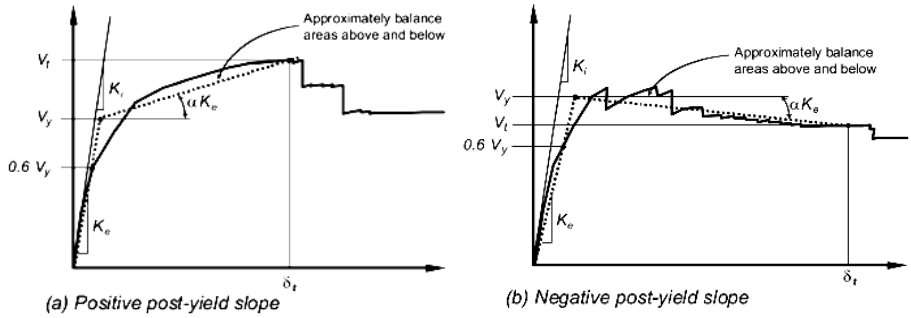
Gambar 2. Modifikasi Kurva Kapasitas menjadi Spektrum Kapasitas

Metode koefisien perpindahan (FEMA 356)

Perhitungan target perpindahan metode ini dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier sistem struktur SDOF ekivalen dengan faktor modifikasi. Target perpindahan (d_t) dari metode perpindahan FEMA 356 dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \left(\frac{T_e}{2.\pi}\right)^2 \cdot g \qquad (3)$$

dengan:
d_t = target perpindahan
T_e = waktu getar alami efektif
T_s = waktu getar karakteristik respons spektrum
a = rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekauan elastis efektif, dimana hubungan gaya-gaya peralihan diidealisasikan sebagai kurva bilinier (Gambar 3)



Gambar 3. Kurva Idealisasi *Force-Displacement*

R = rasio ”kuat elastis perlu” terhadap ”koefisien kuat leleh terhitung”

ISBN: 978-979-792-636-6

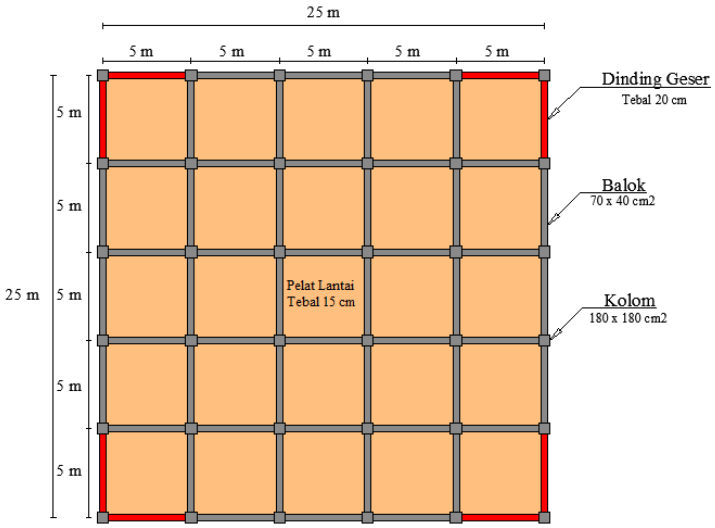
$$R = \frac{S_a}{V_y/W} . C_m$$

S_a = akselerasi spektrum respons pada waktu getar alami fundamental efektif dan rasio resaman pada arah yang ditinjau
$C_m\, C_0\, C_1\, C_2\, C_3$ = Koefisien berdasarkan tabel dari FEMA 356
g = percepatan gravitasi 9,81 m/det^2

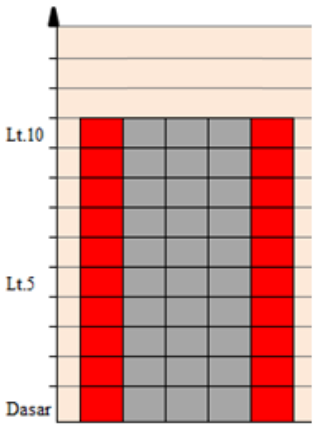
Dalam penelitian ini, analisis respon struktur dilakukan terhadap sistem struktur bangunan beton bertulang yang didesain sesuai Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa SNI 1726-2012. Kinerja struktur dianalisis menggunakan analisis *pushover* metode spektrum kapasitas ATC-40 dan koefisien perpindahan FEMA 356. Penentuan kriteria menggunakan persamaan dan ketentuan sesuai *code* ATC-40. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat perilaku dan kinerja struktur beton bertulang ketika menerima beban gempa kuat di kondisi tanah lunak. Gempa kuat yang dimaksudkan adalah bangunan dianggap berada pada wilayah yang percepatan gempanya besar berdasarkan peta gempa 2010, yaitu yang menggunakan nilai S_s=2,8 g dan S_1=1,2 g.

2. METODOLOGI

Analisis dilakukan pada struktur bangunan beton bertulang 10 lantai dan simetris terhadap arah x dan y. Masing-masing arah terdiri dari 5 bentang dengan jarak 5 m antar bentang. Struktur gedung yang ditinjau memiliki denah lantai yang sama mulai dari lantai dasar (*base*) hingga lantai atap (*rooftop*). Untuk lebih jelas denah yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 4. Elemen struktur menggunakan balok berukuran 70x40 cm^2, kolom 180x180 cm^2, dinding geser dengan ketebalan 20 cm, dan pelat lantai memiliki tebal 15 cm. Mutu beton yang digunakan *fc'*= 45 Mpa. Tinggi antar lantai 4 m mulai dari *base* hingga atap terlihat pada Gambar 5.



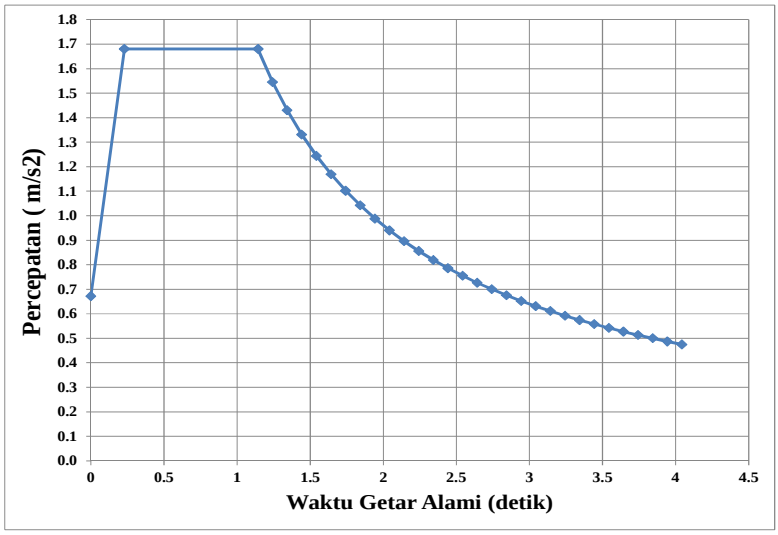
Gambar 4. Denah Lantai Pemodelan



Gambar 5. Tampak Depan

Beban gempa berupa respons spektrum dengan intensitas g tertinggi sesuai pada Peta Gempa Indonesia tahun 2010. Kondisi tanah merupakan kondisi tanah lunak. Grafik respons spektrum dapat dilihat pada Gambar 6 .

ISBN: 978-979-792-636-6



Gambar 6. Grafik Respons Spektrum Gempa

Analisis dilakukan dengan cara memodelkan struktur gedung ke dalam *software* berupa kolom, balok, dinding geser, dan pelat lantai sesuai data yang akan digunakan. Setelah pemodelan selesai maka selanjutnya dilakukan analisis sehingga mendapatkan kinerja struktur setelah diberikan beban gempa yang telah direncanakan sebelumnya. Berikut tahapan analisis yang dilakukan pada *software* elemen hingga:

1. Melakukan analisis ragam (*modal analysis*) yang hanya dipengaruhi oleh berat sendiri struktur tanpa ada pengaruh gaya-gaya luar yang bekerja pada struktur.
2. Melakukan evaluasi periode alami struktur yang diperoleh dari hasil analisis ragam sesuai dengan yang disyaratkan SNI 1726-2012.
3. Mengevaluasi simpangan antar lantai apakah sudah sesuai dengan yang disyaratkan SNI 1726-2012.
4. Memperbaiki model yang digunakan apabila pada langkah 2 dan 3 tidak terpenuhi.
5. Setelah struktur aman sesuai evaluasi yang dilakukan sebelumnya, berikutnya dilakukan persiapkan untuk analisis selanjutnya yaitu analisis statis nonlinier.
6. Dilanjutkan dengan mendefinisikan nilai sendi plastis (*hinges properties*) dimana pada penelitian ini menggunakan format *default* pada *software* elemen hingga.
7. Menentukan letak sendi plastis yang digunakan, sendi plastis diletakkan pada balok dan kolom. Pada penelitian ini untuk kolom digunakan sendi plastis dengan tipe P-M2-M3, dan untuk balok digunakan sendi plastis tipe M3. Sendi plastis diletakkan pada ujung-ujung elemen balok dan kolom.
8. Mendefinisikan analisis pembebanan *pushover*, pada penelitian ini hanya menggunakan 2 *static case. Case* pertama diberi nama GRAV, beban yang diberikan berupa berat sendiri struktur dan dikontrol oleh gaya (*force-controlled analysis*). Dilanjutkan *case* kedua yang diberi nama PUSH. Pada analisis ini menggunakan *joint* kontrol untuk target perpindahannya, biasanya *joint* ini terletak pada puncak gedung. Analisis ini dikontrol oleh deformasi (*deformation-controlled analysis*). Untuk simpangan target yang diharapkan tercapai digunakan sesuai dengan default software yaitu sebesar 4% dari tinggi total bangunan.
9. Menganalisis hasil dari analisis statik nonlinier berupa kurva kapasitas, kinerja struktur dan distribusi sendi plastis pada balok dan kolom.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis ragam (modal analysis)

Pada hasil analisis ini akan dijabarkan bagaimana hasil getaran bebas yang diberikan pada struktur. Jumlah ragam yang digunakan haruslah menghasilkan nilai partisipasi massa ragam yang lebih besar dari 90% untuk arah horizontal tegak lurus dari struktur. Pada penelitian ini jumlah ragam yang digunakan sebanyak 12

ISBN: 978-979-792-636-6

ragam dengan partisipassi massa ragam 97,3987 % untuk arah x dan y. Periode getar alami struktur atau fundamental bernilai 0,81655 detik dimana syarat dari SNI 1726-2012 periode fundamental ≤1,086 detik. Berdasarkan nilai periode fundamental yang telah memenuhi syarat dari SNI, sehingga dianggap struktur tidak terlalu fleksibel. Dengan demikian berarti perencanaan dimensi struktur sudah cukup baik.

Pemeriksaan simpangan antar lantai

SNI 1726-2012 mengisyaratkan bahwa batas simpangan antar lantai tingkat sesuai Persamaan :

$$\Delta_1 \leq 0{,}020h_{s1} \quad (4)$$

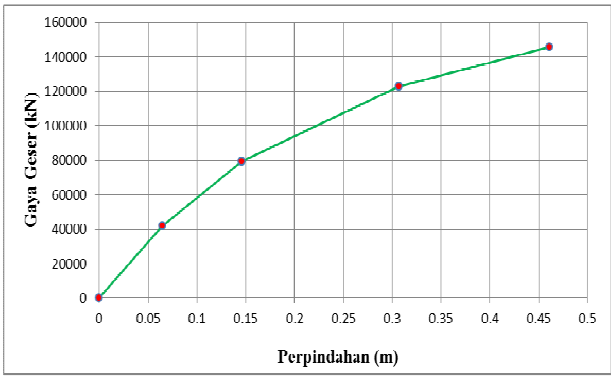
Dengan h_{s1} adalah tinggi tingkat antar lantai, dari hasil perhitungan didapatkanlah hasil sesuai Tabel 2.

Tabel 2. Pemeriksaan Syarat Simpangan Antar Lantai

Elevasi (m)	Lantai ke-	Simpangan Pusat Lantai (m)	Simpangan antar Lantai (m)	Tinggi Lantai (m)	Syarat dari SNI (m)	Memenuhi (Ya/Tidak)
0	Dasar	0				
4	1	0.001620	0.001620	4.0	0.08	Ya
8	2	0.005125	0.003505	4.0	0.08	Ya
12	3	0.009685	0.004560	4.0	0.08	Ya
16	4	0.014855	0.005170	4.0	0.08	Ya
20	5	0.020304	0.005449	4.0	0.08	Ya
24	6	0.025768	0.005464	4.0	0.08	Ya
28	7	0.031040	0.005272	4.0	0.08	Ya
32	8	0.035970	0.004930	4.0	0.08	Ya
36	9	0.040475	0.004505	4.0	0.08	Ya
40	10	0.044609	0.004134	4.0	0.08	Ya

Kurva kapasitas

Berdasarkan hasil analisis *pushover* pada model gedung diperolehlah kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) dengan perpindahan (D). Berikut hasil kurva kapasitas untuk model struktur yang digunakan.



Gambar 7. Kurva Kapasitas

Target Perpindahan

Nilai target perpindahan diperoleh dari dua metode yang digunakan yaitu koefisien perpindahan FEMA 356 dan spektrum kapasitas ATC-40. Berikut hasil yang diperoleh dari kedua metode:

Tabel 3. Target Perpindahan

Metode	Target Perpindahan (m)	Nilai Batas SNI 0,02xH (m)	Perpindahan Awal (m)
Spektrum Kapasitas ATC-40	0,295	0,80	0,06442
Koefisien Perpindahan FEMA 356	0,536		

ISBN: 978-979-792-636-6

Level Kinerja

Level kinerja pada penelitian ini ditentukan menggunakan *code* ATC-40, dimana nilainya dipengaruhi oleh perpindahan awal (D_1) dan target perpindahan (D_t) yang diperoleh dari metode ATC-40 dan FEMA 356. Berikut contoh perhitungan penentuan level kinerja menggunakan target perpindahan FEMA 356:

$$\textit{Maximum Total Drift} = \frac{D_t}{H} = \frac{0{,}536m}{40m} = 0{,}0134$$

$$\textit{Maximum Inelatic Drift} = \frac{D_t - D_1}{H} = \frac{0{,}536m - 0{,}06442m}{40m} = 0{,}01179$$

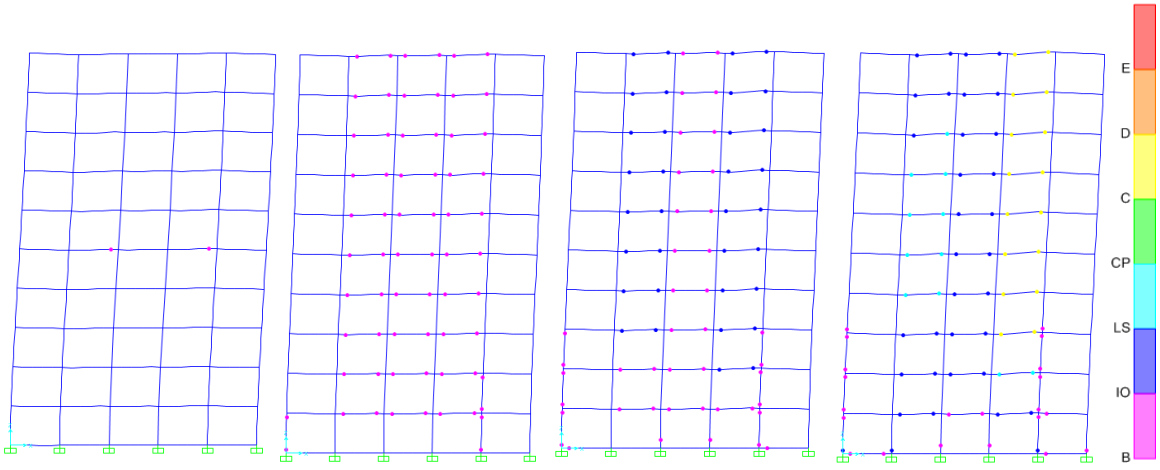
Berdasarkan Tabel 1 maka level kinerja yang dihasilkan dengan menggunakan targer perpindahan FEMA 356 adalah *Damage Control* (*DC*) dimana kerusakan yang terjadi akibat getaran gempa pada struktur dibatasi, sehingga dapat dilakukan perbaikan dengan segera dan masih tergolong ekonomis. Untuk hasil level kinerja dengan target perpindahan ATC-40 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Level Kinerja

Target Perpindahan	MTD	MID	Level Kinerja
ATC-40	0,007375	0,005764	*DC*
FEMA 356	0,0134	0,01179	*DC*

Mekanisme distribusi sendi plastis

Berdasarkan analisis statik nonlinier yang dilakukan hingga mendapatkan perilaku *inelastic* pasca keruntuhan bangunan, maka diperoleh gambar pendistribusian sendi plastis perlangkah pada portal eksternal yang juga menjadi titik kontrol pada *case* PUSH (Gambar 8). Sedangkan distribusi sendi plastis dilihat pada Tabel 5.



Gambar 8. Distribusi Sendi Plastis Langkah 1-4

Tabel 5. Distribusi Sendi Plastis

Langkah	Perpindahan (m)	Gaya Geser (kN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0.00001	0	2040	0	0	0	0	0	0	0	2040
1	0.06442	41982.882	2036	4	0	0	0	0	0	0	2040
2	0.145966	79421.154	1548	492	0	0	0	0	0	0	2040
3	0.306651	123006.05	1406	566	68	0	0	0	0	0	2040
4	0.461221	145618.016	1334	246	406	22	0	32	0	0	2040

ISBN: 978-979-792-636-6

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Periode getar alami yang diperoleh dari gedung sudah memenuhi syarat dari SNI 1726-2012.
2. Target perpindahan pada struktur dari metode FEMA 356 lebih besar dibandingkan hasil dari metode ATC-40. Metode FEMA 356 memberikan target perpindahan bernilai 0,536 m sedangkan metode ATC-40 menghasilkan target perpindahan 0,295 m.
3. Level kinerja struktur berdasarkan target perpindahan dari metode koefisien perpindahan FEMA 356 dan spektrum kapasitas ATC-40 menunjukkan bahwa bangunan yang digunakan berada pada level *Damage Control* (*DC*) dimana kondisi gedung belum mengalami kerusakan berarti dan dapat difungsikan kembali.
4. Distribusi sendi plastis sesuai yang diharapkan yaitu kolom kuat balok lemah, karena terjadi keruntuhan pada balok dahulu kemudian diikuti pada kolom.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Volume 1*. California: Applied Technology Council.

ASCE. (2000). FEMA 356 Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings (Vol. FEMA 356).

Dewobroto, W. (2005). *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*. Paper presented at the Seminar Bidang Kajian.

Mamesah, H. Y., Wallah, S. E., & Windah, R. S. (2014). Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story. *JURNAL SIPIL STATIK, 2*(4).

Nurjannah, S. A., & Megantara, Y. (2011). Pemodelan Struktur Bangunan Gedung Bertingkat Beton Bertualang Rangka Terbuka Simetris di Daerah Rawan Gempa Dengan Metoda Analisis Pushover.

Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik dan Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Pranata, Y. A. (2013). Evaluasi Kinerja Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa dengan Pushover Analysis (sesuai ATS-40, FEMA 356 dan FEMA 440).

SNI-1726-2012. (2012). Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Stuktur Bangunan Gedung: Badan Standarisasi Nasional.