





Gambar 2. Salah Satu Contoh Runtuhnya Bangunan Bertingkat (Widodo, 2007)

Analisis bangunan bertingkat banyak dengan metode pushover sudah banyak diteliti sebelumnya, diantaranya Dewabroto (2005), Afandi (2010), Yanto (2010), Wisnumurti, dkk (2012) dan Khaldun, dkk (2014). Penelitian terdahulu ini diterapkan untuk struktur baja maupun beton bertulang. Namun belum banyak dijumpai penelitian yang mengkaji pengaruh gempa terhadap kinerja bangunan tinggi di wilayah dengan nilai  $g$  tinggi berdasarkan SNI 1726-2012 Peta Gempa Tahun 2010. Sehingga fokus penelitian ini adalah analisis struktur bangunan bertingkat di wilayah gempa intensitas tinggi.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka beberapa permasalahan berikut dapat dirumuskan:

1. Respons struktur gedung bertingkat banyak di daerah gempa intensitas tinggi berdasarkan Respons Spektrum Gempa Indonesia yang disyaratkan dalam SNI 1726-2012.
2. Hubungan perpindahan dan gaya geser pada kurva kapasitas dengan analisis statis nonlinier (pushover) untuk kondisi tanah yang berbeda.
3. Sejauh mana target perpindahan yang terjadi berdasarkan FEMA 356 dan kurva spektrum kapasitas berdasarkan ATC-40.
4. Mekanisme distribusi sendi plastis dan kinerja struktur bangunan dengan analisis statis nonlinier.

## B. TINJAUAN PUSTAKA

### B.1 Mekanisme Dasar Gempa

Gempa bumi adalah bergetarnya permukaan tanah karena pelepasan energi secara tiba-tiba akibat dari pecah atau slipnya massa batuan di lapisan kerak bumi. Bergetarnya permukaan tanah ini dikarenakan kekuatan dari energi gempa yang merambat dari pusat gempa ke segala arah.

Gempa bumi bisa diakibatkan oleh adanya pertemuan lempeng benua, tumbukan meteor, keruntuhan tanah di dalam gua maupun aktivitas gunung berapi. Adapun tingkat kekuatan atau intensitas getaran gempa berbeda di setiap kejadiannya, kekuatan getaran gempa tersebut biasanya diukur menggunakan tiga macam skala yaitu:

- a. Skala Richter ( $R$ ), merupakan besaran energi yang dilepas tepat di pusat gempa.
- b. Skala Modified Mercalli ( $MM$ ), menunjukkan tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempa atau intensitas lokal.
- c. Skala gravitasi bumi ( $g$ ), menggambarkan besarnya percepatan tanah maksimum yang terjadi pada saat gempa.

SNI 1726-2012 menetapkan gempa rencana sebagai gempa dengan kemungkinan terlewati besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2% atau gempa dengan periode ulang 2500 tahun yang merupakan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tetarget (*MCER – Maximum Considered Earthquake Targeted Risk*) dengan memperhitungkan:

1. Gempa Hazard (bahaya kerusakan – MCE)
2. *MCER probabilistic*
3. *MCER deterministic* (adanya patahan/*fault*)
4. Koefisien Risiko ( $Cr$ ) atau *Collapse Fragility (Vulnerability)*: probabilitas keruntuhan struktur dengan risiko gempa 2% umur bangunan 50 tahun.

### B.2 Analisis Ragam (*Modal Analysis*)

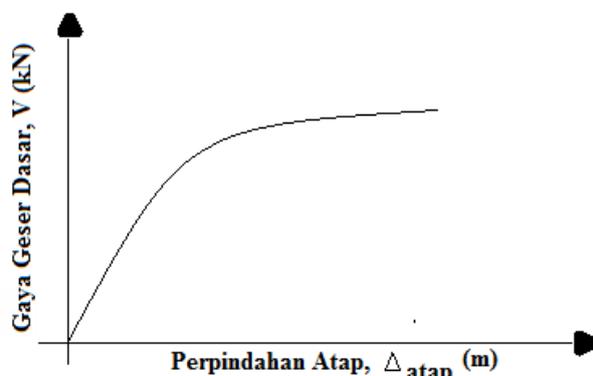
Analisis ragam (*modal analysis*) adalah analisis yang menentukan gerak struktur pada kondisi getaran bebas, dimana gerakannya hanya dipengaruhi oleh kondisi awal. Kondisi seperti ini jarang dijumpai namun, analisis ini

memberikan sifat dinamis yang paling penting dari struktur yaitu perioda natural dan pola perubahan bentuknya (*mode shapes*).

### B.3 Analisis Statis Nonlinier (*Pushover*)

Widhiastuti and Simanjuntak (2007) juga menyatakan bahwa analisis statis nonlinier merupakan prosedur analisis untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisis pushover atau analisis beban dorong statis. Proses analisis statis nonlinier dapat dilakukan dengan prosedur *load-controlled* atau *displacement-controlled*. Jika beban yang digunakan saat analisis sudah diketahui misalkan beban gravitasi maka prosedur *load-controlled* dapat diaplikasikan. Sedangkan prosedur *displacement-controlled* biasanya digunakan disaat beban yang bisa ditahan oleh struktur belum diketahui pasti sehingga beban tersebut ditingkatkan hingga struktur mencapai simpangan target.

Analisis statis nonlinier akan menghasilkan sebuah kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar ( $V$ ) dengan perpindahan titik acuan pada atap ( $D$ ), yang dinamakan kurva *pushover* atau kurva kapasitas (Gambar 3).



Gambar 3. Kurva *Pushover*

#### B.3.1 Metode koefisien perpindahan (FEMA 356)

FEMA 356 telah mengatur mengenai metode koefisien perpindahan atau *Displacement Coefficient Method (DCM)* yang merupakan salah satu prosedur analisis statis nonlinier. Perhitungan dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier sistem struktur *SDOF* ekuivalen dengan faktor modifikasi  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  sehingga dapat dihitung target perpindahan, dengan menetapkan waktu getar efektifnya dahulu

untuk memperhitungkan kondisi inelastis struktur gedung.

Target perpindahan ( $\delta_t$ ) dari metode perpindahan FEMA 356 dapat dihitung menggunakan Persamaan 1 berikut:

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

Dimana:

$\delta_t$  = target perpindahan.

$C_0$  = Merupakan koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral struktur *SDOF* ekuivalen menjadi perpindahan atap struktur sistem *MDOF*, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama atau berdasarkan Tabel 3-2 dari FEMA 356.

$C_1$  = Faktor modifikasi untuk Menghubungkan perpindahan inelastis maksimum dengan perpindahan respons elastis linier. Nilai  $C_1 = 1,0$  untuk  $T_e \geq$

$$T_s \text{ dan } C_1 = \frac{[1+(R-1)\frac{T_s}{T_e}]}{R} \text{ untuk } T_e < T_s.$$

$T_e$  = waktu getar alami efektif.

$T_s$  = waktu getar karakteristik respons spektrum.

$R$  = adalah *strength ratio*, besarnya dapat dihitung dengan persamaan:

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

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

$C_2$  = koefisien untuk memperhitungkan efek *pinched hysteresis shape*, dari hubungan beban deformasi akibat degradasi kekuan dan kekuatan, nilainya berdasarkan Tabel 3-3 dari FEMA 356.

$C_3$  = faktor modifikasi untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek  $P \cdot \Delta$ . untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca leleh bernilai positif maka  $C_3 = 1,0$  sedangkan untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca leleh negatif

$$C_3 = 1,0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e}$$

$\alpha$  = rasio kekakuan pasca leleh dengan kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya-gaya peralihan nonlinier diidealisasikan sebagai kurva bilinear.

### B.3.2 Metode spektrum kapasitas (ATC-40)

Metode yang sederhana ini dapat memberikan informasi yang sangat berguna karena mampu menggambarkan respon inelastic bangunan. Kurva kapasitas hasil pushover diubah menjadi kapasitas spektrum dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut ini:

$$S_a = \frac{V}{\alpha 1 \bar{W}} \quad (2)$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF1 \Phi_{roof}.1} \quad (3)$$

$$PF = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(wi\Phi i1)}{g}}{\sum_{i=1}^n \frac{(wi\Phi^2 i1)}{g}} \right] \quad (4)$$

$$\alpha 1 = \frac{[\sum_{i=1}^n \frac{(wi\Phi i1)}{g}]^2}{[\sum_{i=1}^n \frac{wi}{g}] [\sum_{i=1}^n \frac{(wi\Phi^2 i1)}{g}]} \quad (5)$$

Dimana:

- Sa = spectral acceleration
- Sd = spectral displacement
- PF1 = modal participation untuk modal pertama
- $\alpha 1$  = modal mass coefficient untuk modal pertama
- $\Phi i1$  = amplitude of first untuk level i
- V = gaya geser dasar
- W = berat mati bangunan ditambah beban atap
- $\Delta_{roof}$  = roof displacement
- Wi/g = massa pada level i

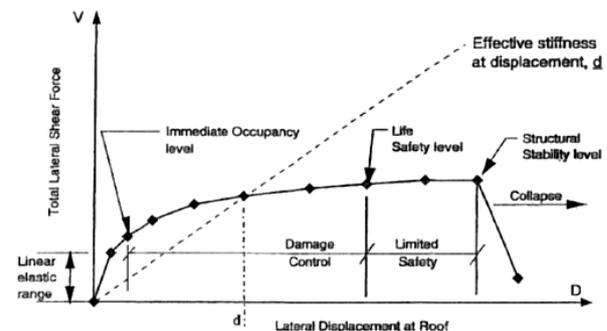
### B.4 Level Kinerja

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja melalui beberapa proses yang diawali dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan percobaan kinerjanya terhadap berbagai intensitas gempa. Setiap percobaan memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur sehingga dapat memperkirakan tingkat keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi. Sehingga pada perencanaan bangunan berikutnya dapat diatur ulang kerusakan yang sesuai atau dapat diterima

sesuai dengan resiko biaya yang akan dikeluarkan.

Menurut ATC-40 (Gambar 4) yang menjadi acuan dalam perencanaan berbasis kinerja pada penelitian ini, kategori kriteria-kriteria struktur tahan gempa adalah sebagai berikut:

1. *Immediate Occupancy (IO)*  
Kondisi pasca gempa 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)*  
Kondisi antara *Immediate Occupancy (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)*  
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 jiwa manusia.
4. *Structural Stability (SS)*  
Kondisi dimana struktur telah mengalami kerusakan parsial ataupun total, kerusakan yang terjadi telah menyebabkan degradasi kekuatan dan kekakuan pada sistem penahan gaya lateral.



Gambar 4. Spektra Kapasitas (ATC-40)

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

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

Tingkat Kinerja	Tingkat Kinerja			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Interstory Drift Limit (Batas Simpangan antar Lantai)				
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

Penentuan tingkat kinerja tersebut sebelumnya harus menggunakan Persamaan 5 dan 6 berikut:

$$\text{Maximum Total Drift} = \frac{D_t}{H} \quad (5)$$

$$\text{Maximum Inelastic Drift} = \frac{D_t - D_1}{H} \quad (6)$$

Dimana:

$D_t$  = Target displacement (m)

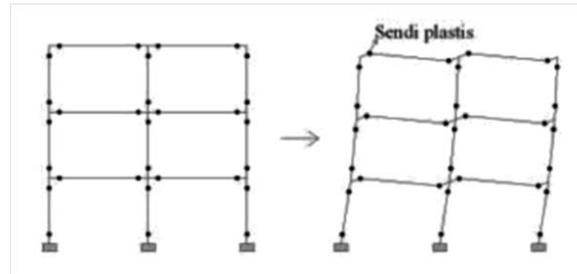
$D_1$  = Displacement pertama (m)

H = Tinggi total bangunan (m)

### B.5 Sendi Plastis

Mekanisme kerusakan sebuah struktur harus didesain pada lokasi-lokasi tertentu sehingga setelah gempa kuat terjadi, dapat dengan mudah diperbaiki. Lokasi keruntuhan harus didesain pada balok dan kolom yang disebut sendi plastis. Sendi plastis atau *hinge* merupakan bentuk ketidak mampuan elemen struktur (balok dan kolom) menahan gaya dalam. Konsep perencanaan struktur harus sesuai dengan *strong column-weak beam*. Apabila terjadi keruntuhan struktur maka baloklah yang harus runtuh dahulu, namun apabila kolomnya yang runtuh dahulu maka struktur langsung hancur.

Dalam menentukan letak sendi plastis harus diketahui dahulu bahwa posisi 0 menyatakan posisi awal dari panjang balok, sedangkan posisi 1 merupakan posisi akhir dari balok. Kedua posisi ini terletak dimuka kolom. Hal yang sama juga berlaku untuk posisi sendi plastis kolom. Kedua posisi sendi plastis kolom terletak pada tepi muka balok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Sendi Plastis yang Terjadi pada Balok dan Kolom

Menurut Mamesah, Wallah, and Windah (2014) *software* elemen hingga mendefinisikan tingkat kerusakan struktur seperti yang telah ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Tingkat Kerusakan Struktur Akibat Terbentuknya Sendi Plastis dalam *Software* Elemen Hingga

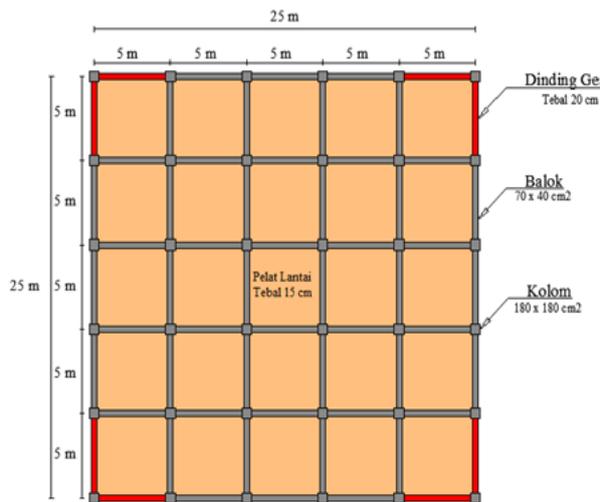
Keterangan	Penjelasan
B	Memunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelelehan pertama pada struktur
IO	Terjadinya kerusakan yang kecil atau tidak berarti pada struktur, kekakuan struktur hampir sama pada saat belum terjadi gempa
LS	Terjadi kerusakan mulai dari kecil hingga tingkat sedang.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

## C. METODOLOGI PENELITIAN

### C.1 Data Struktur

Stuktur gedung yang ditinjau memiliki denah lantai yang sama mulai dari lantai dasar (*base*) hingga lantai atap (*rooftop*). Adapun denah yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 6.

Pemodelan struktur pada penelitian ini divariasikan terhadap jumlah lantai yang dimodelkan, yaitu Model 1 dengan 5 lantai, Model 2 dengan 10 lantai, dan Model 3 dengan 15 lantai. Bentuk bangunan masuk kedalam kategori struktur dengan bentuk beraturan dimana bentang arah X dan arah Y simetris, ketinggian antar lantai konstan yaitu 4 m.



Gambar 6. Denah Lantai Pemodelan

Data geometri struktur untuk semua model disajikan dalam Tabel 3.

Pemodelan	Keterangan Geometri				Jumlah Lantai	Tinggi Total Gedung
	Jumlah Bentang		Total Panjang Bentang (m)			
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y		
Model 1	5	5	25	25	5	20 m
Model 2	5	5	25	25	10	40 m
Model 3	5	5	25	25	15	60 m

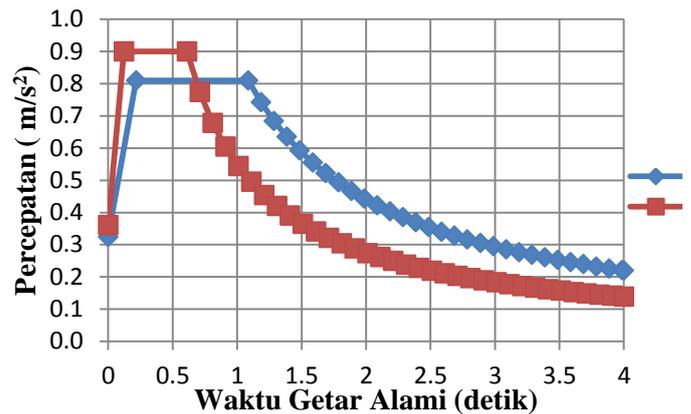
Dimensi elemen struktur yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Balok 70x40 cm<sup>2</sup>,  $f_c' = 45$  MPa
2. Kolom 180x180 cm<sup>2</sup>,  $f_c' = 45$  MPa
3. Pelat lantai tebal 15 cm,  $f_c' = 30$  MPa
4. Dinding geser tebal 20 cm,  $f_c' = 45$  MPa

### C.2 Data Beban

Penelitian ini ditujukan untuk melihat pengaruh gaya gempa terhadap struktur rencana, sehingga data beban yang digunakan untuk analisis hanya berupa beban mati dan beban gempa.

Beban gempa yang digunakan berupa respons spectrum (Gambar 7), yaitu sebuah grafik hubungan antara spektrum respons percepatan desain ( $S_a$ ) dengan periode getar struktur ( $T$ ). Nilai parameter  $S_a$  ini tergantung pada lokasi gempa dan kondisi tanah. Pada penelitian ini data gempa yang diambil yaitu berdasarkan standar perencanaan ketahanan gempa Indonesia SNI 1726-2012 dengan nilai  $g$  tinggi, lokasi gempa yang dipilih adalah Kota Banda Aceh dengan 2 kondisi tanah (tanah sedang dan lunak).



Gambar 7. Respon Spektrum Kota Banda Aceh

### C.3 Tahapan Analisis

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 penjelasan tahapan analisis dengan *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 persiapan 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.

## D. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### D.1 Analisis Ragam

Jumlah ragam dipengaruhi oleh terpenuhinya syarat partisipasi massa ragam. Berdasarkan SNI 1726-2012 jumlah ragam yang diambil menghasilkan partisipasi massa ragam melebihi 90% massa aktual arah horizontal tegak lurus dari struktur. Pada penelitian ini jumlah ragam getar yang digunakan sebanyak 12 ragam. Tabel 4 memperlihatkan hasil partisipasi ragam ke-12 untuk ketiga pemodelan.

Tabel 4. Partisipasi Massa Ragam

Model	Partisipasi Massa Ragam (%)		Syarat SNI 1726-2012	Memenuhi
	Arah X	Arah Y		
	1	95,573		
2	96,697	96,697	≥90%	Ya
3	97,055	97,054	≥90%	Ya

Periode fundamental getaran (*fundamental period of vibration*) adalah periode pada ragam pertama dari hasil analisis ragam karena nilainya yang paling besar. Dalam hal ini SNI 1726-2012 juga memberikan batasan nilai periode fundamental tidak boleh

melebi  $C_u T_a$ . Langkah-langkah pemeriksaannya adalah sebagai berikut:

1. Menetapkan nilai  $C_t$  dan  $x$  berdasarkan Tabel 15 pada SNI 1726-2012. Nilai tersebut dipengaruhi oleh sistem yang digunakan pada struktur.
2. Menentukan nilai koefisien  $C_u$  berdasarkan Tabel 14 SNI 1726-2012 yang dipengaruhi nilai  $S_{D1}$ .
3. Menghitung nilai periode fundamental pendekatan ( $T_a$ ) dan batasannya ( $C_u T_a$ ), menggunakan persamaan yang diberikan SNI 1726-2012.
4. Memeriksa nilai periode fundamental apakah sudah memenuhi syarat yaitu nilainya kurang dari  $C_u T_a$ , ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pemeriksaan Nilai Periode Fundamental

Model	Periode Fundamental (detik)	$C_u T_a$ (detik)	Memenuhi
1	0,248	0,647	Ya
2	0,633	1,086	Ya
3	1,081	1,473	Ya

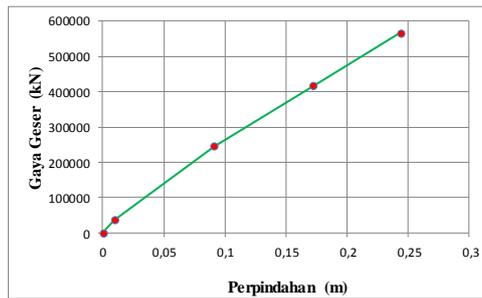
### D.2 Analisis Statis Nonlinier (*Pushover*)

Setelah dilakukan proses analisis statis nonlinier (*pushover*) dalam penelitian ini diperoleh hasil yaitu berupa kurva kapasitas, target perpindahan berdasarkan metode koefisien perpindahan FEMA 356 dan spektrum kapasitas ATC-40, level kinerja, serta mekanisme distribusi sendi plastis.

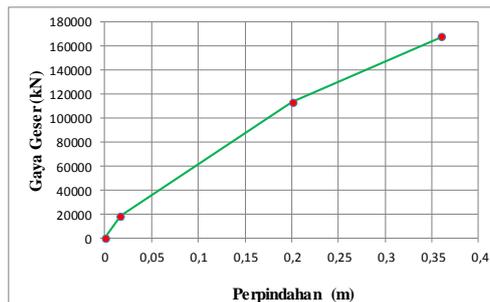
#### D.2.1 Kurva kapasitas

Berikut ini ditampilkan kurva kapasitas masing-masing Model dan untuk 2 kondisi tanah (tanah sedang dan tanah lunak).

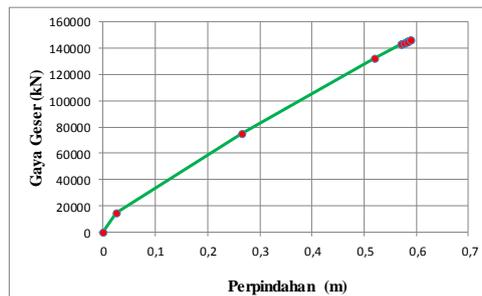
Untuk Model yang sama dapat dilihat bahwa hasil kurva yang diperoleh untuk tanah sedang dan tanah lunak tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Hasil kurva kapasitas dari ketiga pemodelan menunjukkan nilai perpindahan dan gaya dasar yang paling besar terjadi pada Model 3, disusul Model 2 dan paling kecil untuk Model 1, hal ini dikarenakan Model 3 yang memiliki tingkatan gedung yang paling tinggi dibandingkan Model 2 dan Model 1.



Gambar 8. Kurva Kapasitas Gedung Model 1



Gambar 9. Kurva Kapasitas Gedung Model 2



Gambar 10. Kurva Kapasitas Gedung Model 3

### D.2.2 Metode koefisien perpindahan FEMA 356

Target perpindahan yang diperoleh dari hasil analisis (Tabel 6) menunjukkan Model 3 memiliki hasil yang lebih besar dibandingkan Model 2 dan Model 1. Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah nilai kekakuan suatu struktur maka semakin besar target perpindahannya, sehingga akan mempengaruhi tingkat keamanan dari struktur tersebut. Target perpindahan bisa dikurangi dengan menambahkan elemen-elemen perkuatan gaya lateral pada bangunan seperti dinding geser (*shear wall*) pada bangunan beton bertulang ataupun memodifikasi dimensi balok dan kolom.

Tabel 6. Target Perpindahan dengan Metode FEMA 356

Metode	Model	Kondisi Tanah	Target Perpindahan	Batas SNI 0,02xH (m)
Koefisien Perpindahan FEMA 356	1	SD	0.025	0.4
		SE		
	2	SD	0.142	0.8
		SE		
	3	SD	0.27	1.2
		SE		

Untuk Model yang sama nilai gaya geser dan target perpindahan pada kondisi tanah sedang hampir sama dengan nilai pada kondisi tanah lunak. Dikarenakan pada penentuan parameter *pushover* metode FEMA 356 hanya dipengaruhi nilai  $S_s$  dan  $S_l$  dari desain respon spektrum, dimana nilai tersebut tidak dipengaruhi oleh kondisi tanah melainkan intensitas gempa.

### D.2.3 Metode spectrum kapasitas ATC-40

Metode ini merupakan konsep desain yang mengubah kurva kapasitas ( $V$  vs  $\delta$ ) yang merupakan kurva MDOF menjadi kurva kapasitas spektrum yang memperlihatkan respon struktur inelastik SDOF ( $S_a$  vs  $S_d$ ). *Performance point* adalah titik dimana *capacity curve* berpotongan dengan *response spectrum curve* seperti yang dipergunakan *capacity spectrum method* (ATC-40,1996).

Target perpindahan dengan metode spektrum kapasitas ditabulasikan dalam Tabel 7 sebagai berikut:

Tabel 7. Target Perpindahan dengan Metode ATC-40

Metode	Model	Kondisi Tanah	Target Perpindahan	Batas SNI $0,02xH$ (m)
Spektrum Kapasitas ATC-40	1	SD	0.012	0.4
		SE	0.01	
	2	SD	0.105	0.8
		SE	0.099	
	3	SD	0.203	1.2
		SE	0.346	

Parameter *pushover* metode ATC 40 dipengaruhi oleh desain respons spektrum gempa, sehingga kondisi tanah sedang dan tanah lunak memberikan hasil yang berbeda-beda terhadap nilai *performance point*. Target perpindahan untuk pemodelan yang sama, nilai yang diberikan pada kondisi tanah sedang lebih besar dibandingkan tanah lunak. Namun hal yang berbeda ditunjukkan Model 3, target perpindahan yang diberikan pada kondisi tanah sedang lebih kecil dibandingkan tanah lunak. Sama halnya dengan hasil metode FEMA 356, Model 3 memberikan hasil target perpindahan yang lebih besar dibandingkan Model 2 dan Model 1.

### D.3 Level Kinerja

Nilai level kinerja pada penelitian ini ditentukan berdasarkan ATC-40 menggunakan Persamaan 5 dan 6 dengan batas yang telah disyaratkan ATC-40 pada Tabel 1. Level kinerja dipengaruhi oleh perpindahan awal ( $D_i$ ) dan target perpindahan ( $D_t$ ) yang diperoleh dari hasil metode FEMA 356 dan ATC-40 (8).

Tabel 8. Nilai  $D_t$  dan  $D_i$

Model	H	Kondisi Tanah	FEMA 356	ATC - 40
1	20	SD	0,025	0,0093
2	40	SD	0,142	0,0167
3	60	SD	0,270	0,0254
		SE		0,346

	(m)	Tanah	$D_i$ (m)	$D_t$ (m)	$D_i$ (m)	$D_t$ (m)
1	20	SD	0,025	0,0093	0,012	0,0093
		SE			0,011	
2	40	SD	0,142	0,0167	0,105	0,0167
		SE			0,099	
3	60	SD	0,270	0,0254	0,203	0,0254
		SE			0,346	

Level kinerja untuk pemodelan yang lain ditabulasikan pada Tabel 9 dengan kondisi tanah sedang dan tanah lunak untuk hasil target perpindahan metode FEMA 356 dan ATC-40 berikut:

Model	H (m)	Kondisi Tanah	Kinerja							
			FEMA 356		ATC 40		FEMA 356		ATC 40	
			(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
1	20	SD	0,00125	0,00078	0,0006	0,000134	IO	IO	IO	IO
		SE			0,0005	0,000034	IO	IO	IO	IO
2	40	SD	0,00355	0,00313	0,00263	0,002209	IO	IO	IO	IO
		SE			0,00348	0,002059	IO	IO	IO	IO
3	60	SD	0,0045	0,00408	0,00338	0,002961	IO	IO	IO	IO
		SE			0,00577	0,005344	IO	IO	IO	DC

Catatan: (a) Maximum Total Drift

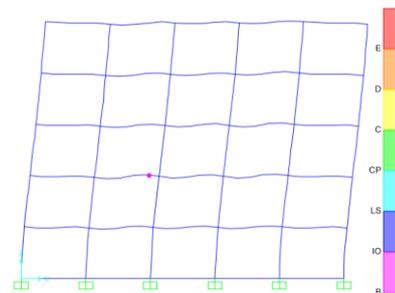
(b) Maximum Inelastik Drift

### D.4 Distribusi Sendi Plastis

Sendi plastis yang akan ditampilkan dan dibahas hanya yang terjadi pada Model 1 di portal yang merupakan portal eksternal dan merupakan titik kontrol pada case PUSH.

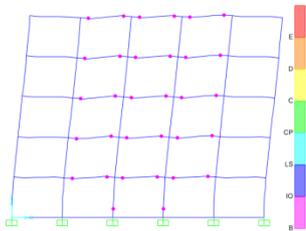
#### Model 1

Pada langkah awal ini sendi plastis muncul pada balok dengan level B dengan warna merah muda seperti yang ditunjukkan Gambar 11. Sendi plastis pada kolom belum muncul, sehingga konsep desain *strong column-weak beam* sudah terpenuhi. Besar perpindahan pada Langkah 1 ini adalah 0,00932 m dengan gaya geser sebesar 35515,086 kN.



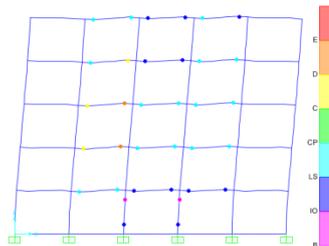
Gambar 11. Distribusi Sendi Plastis Langkah 1 pada Model 1

Sendi plastis pada Langkah 2 ini sudah terjadi pada balok secara keseluruhan dengan level B. Pada Gambar 12 juga dapat dilihat bahwa sendi plastis pada kolom lantai dasar sudah mulai muncul dengan level B. Perpindahan yang terjadi yaitu 0,090935 m dan gaya geser 246170,033 kN.



Gambar 12. Distribusi Sendi Plastis Langkah 2 pada Model 1

Perpindahan sudah mencapai 0,243838m dengan gaya geser 566674,937 kN. Sendi plastis dengan level D yang ditandai dengan warna jingga/oranye sudah muncul pada beberapa balok bagian tengah. Gambar 13 menunjukkan distribusi sendi plastis Langkah 5 yang merupakan keadaan maksimum.



Gambar 13. Distribusi Sendi Plastis Langkah 4 pada Model 1

## E. KESIMPULAN DAN SARAN

### E.1 Kesimpulan

1. Nilai periode fundamental semakin besar seiring bertambahnya jumlah tingkat pada struktur karena semakin berkurangnya kekakuan struktur tersebut. Berdasarkan hasil analisis Model 3 (15 lantai) memiliki periode fundamental 1,081 detik, sedangkan Model 1 (5 lantai) memiliki periode fundamental 0,248 detik.
2. Berdasarkan kurva kapasitas yang dihasilkan dari analisis *pushover*, dapat diambil kesimpulan bahwa perpindahan yang terjadi berbanding lurus dengan jumlah lantai, sehingga semakin banyak jumlah lantai maka

semakin besar perpindahannya. Perpindahan pada Model 3 memiliki nilai lebih besar dibandingkan pada Model 2 dan Model 1. Namun gaya geser yang dialami berbanding terbalik karena semakin besar tingkat fleksibilitas maka semakin kecil gaya geser yang terjadi untuk menghasilkan perpindahan di lantai atap.

3. Target perpindahan yang diperoleh dari hasil analisis dengan metode FEMA 356 rata-rata lebih besar dibandingkan hasil analisis dengan metode ATC-40. Namun pada Model 3 dengan kondisi tanah lunak, target perpindahan dengan metode ATC-40 lebih besar dibandingkan dengan metode FEMA 356.
4. Level kinerja struktur berdasarkan target perpindahan dari metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 menunjukkan bahwa pada ketiga pemodelan dengan kondisi tanah sedang dan tanah lunak berada pada level *Immediate Occupancy* yakni ada kerusakan pada struktur dimana kekuatannya hampir sama dengan kondisi sebelum gempa dan gedung dapat digunakan kembali.
5. Level kinerja struktur berdasarkan target perpindahan dari metode Spektrum Kapasitas ATC-40 menunjukkan bahwa Model 1 dan Model 2 pada kondisi tanah sedang dan tanah lunak berada pada level *Immediate Occupancy*. Namun pada Model 3 dengan kondisi tanah lunak, level kinerja berada pada level *Damage Control* dimana kondisi gedung belum mengalami kerusakan berarti dan dapat digunakan kembali.
6. Pengaruh kondisi tanah dapat dengan jelas dilihat dari grafik respons spektrum, untuk Kota Banda Aceh dapat diambil kesimpulan bahwa kondisi tanah lunak akan sangat berpengaruh pada gedung dengan periode fundamental  $\geq 0,7$  detik. Namun apabila periode fundamental  $< 0,7$  detik maka respons spektrum kondisi tanah sedang yang berpengaruh.
7. Distribusi sendi plastis yang terjadi sesuai yang direncanakan yaitu dengan sistem *strong column-weak beam*, karena terjadi munculnya sendi plastis pertama pada balok dulu kemudian diikuti pada kolom.

## E.2 Saran

1. Menambah variasi kondisi tanah lainnya yaitu batuan dan tanah keras untuk melakukan analisis serupa.
2. Menambahkan beban respons spektrum dengan nilai  $g$  tinggi lainnya, dan melakukan perbandingan dengan pemodelan dan kondisi tanah yang sama.
3. Dapat melakukan penelitian dengan membandingkan level kinerja yang dihasilkan dengan level kinerja menggunakan analisis dinamik nonlinier, dengan nilai  $g$  tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, N. R. (2010). *Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Beton dengan Analisis Pushover Menggunakan Program SAP 2000 Studi Kasus: Gedung Rumah Sakit di Surakarta*. Universitas Sebelas Maret.
- Anonim. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building Volume 1*. California: Applied Technology Council.
- Asneindra, M. (2013). *Analisis Perbandingan Kinerja Struktur Gedung tak Beraturan Akibat Beban Gempa SNI 03-1726-2002 dan RSNI3 03-1726-201X (Studi Kasus Menara Dang Merdu Bank Riau Kepri)*. Universitas Riau, Pekanbaru.
- Badan Standarisasi Nasional. 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan non Gedung (SNI 1726-2012)*. Bandung.
- Dewobroto, W. (2013). *Evaluasi Kinerja Bangunan Baja Tahan Gempa dengan SAP2000*.
- 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 Bertulang 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)*.
- Rizky, M. (2015). *Evaluasi Komprehensif Struktur Portal Beton Bertulang dengan Dinding Geser dengan Menggunakan FEMA 310*. Universitas Riau, Pekanbaru.
- Sugiyatno, A. (2012). *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Pushover Analysis*.
- Widhiastuti, E. D., & Simanjuntak, M. A. (2007). *Evaluasi Kinerja Portal Baja 3 Dimensi Dengan Pengaku Lateral Akibat Gempa Kuat Berdasarkan Performance Based Design*. Unika Soegijapranata.
- Wisnumurti, W., Cahya, I., & Anas, A. (2012). Analisis Pushover pada Gedung Tidak Beraturan Dengan Study Kasus pada Gedung Baru FIA Unibraw. *Rekayasa Sipil*, 2(1), pp. 11-22.
- Yanto, D. (2010). *Evaluasi perilaku seismik gedung balai Kota Surakarta pasca gempa dengan nonlinier static pushover analysis metode spektrum kapasitas*. Universitas Sebelas Maret.
- Zamharir. (2011). *Mekanisme Keruntuhan Soft Story Struktur Portal Beton Bertulang dengan Metode Koefisien Perpindahan FEMA 356 Studi Kasus: Struktur Portal Beton Bertulang Gedung Rektorat Universitas Islam Negeri Pekanbaru*. Universitas Riau, Pekanbaru.