

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Negara Indonesia adalah salah satu negara terbesar di dunia yang berkembang dan masih fokus pada pembangunan gedung dan infrastruktur yang berkelanjutan menuju *new era* 4.0 dan 5.0, ini bisa dilihat dari pesatnya pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan di seluruh Indonesia. Namun, Indonesia juga merupakan negara yang sering terjadi bencana alam seperti gempa. Hal ini karena Indonesia terletak diantara pertemuan tiga lempeng yaitu ; Lempeng Eurasia, Indo-Aurasia dan Pasifik. Indonesia menjadi negara dengan tingkat resiko terjadinya gempa sangat tinggi. Oleh karena itu, dalam merencanakan dan melaksanakan pembangunan suatu struktur bangunan tinggi, maka wajib sesuai persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Gempa bumi adalah suatu fenomena yang terjadi karena terjadi getaran pada bumi yang diukur dengan *magnetudo* (M) untuk menggambarkan kekuatan gempa dalam skala intensitas seismik. Dalam artikel Zur, L (2021) gempa yang pernah terjadi di Malang, Jawa Timur pada 10 April 2021 dengan kerusakan pada bangunan yang parah, 10 orang meninggal, dan 105 orang mengalami luka luka. Gempa bumi tersebut banyak menimbulkan korban jiwa dan kerusakan struktur bangunan. Dalam merencanakan struktur bangunan yang tahan gempa, maka harus mempertimbangkan aspek periode bangunan ketika bangunan mengalami pergoyangan akibat gempa dan juga bangunan harus kokoh, kaku dan kuat. Periode bangunan itu sendiri dipengaruhi oleh massa (berat) dan kekakuan struktur.

Kekakuan struktur dipengaruhi oleh kondisi geografis, bahan yang dipakai serta dimensi dari setiap elemen struktur tersebut. Bangunan gedung yang memiliki struktur yang tahan akibat gempa direncanakan dengan perencanaan struktur dan penulangan yang detail dan baik sesuai dengan BSN, (2019) tentang persyaratan beton bertulang dan BSN, (2019) tentang cara perencanaan ketahanan gempa serta BSN, (2020) tentang pembebanan. Penelitian Patria, A, (2021) membuktikan dengan naiknya nilai S_{Ds} dan S_{D1} , perlu untuk melakukan evaluasi keamanan struktur bangunan pada 39 kota di pulau Jawa termasuk kota Malang.

Evaluasi struktur bangunan gedung dengan Analisis *Static Nonlinear Pushover* adalah kombinasi dari aspek ketahanan dan layan dengan menggunakan teknik Analisis *Static Nonlinear Pushover* berbasis program *software* SAP 2000 yang menganalisis perilaku atau kinerja inelastis struktur bangunan gedung dari intensitas gempa untuk mengetahui level kinerja bangunan gedung pada saat kondisi kritis. Analisis *Static Nonlinear Pushover* mengacu pada peraturan *federal emergensi managemen agency* (FEMA) dan *applied technology countcil* (ATC). Ketentuan level kinerja yang ditentukan yaitu : level *operational* (O), level *immediate occupancy* (IO), level *life safety* (LS), dan level *collapse prevention* (CP). Ada beberapa penelitian terkait yaitu : Penelitian Rachman, et al, (2014) menganalisis kinerja struktur pada gedung bertingkat dengan analisis *pushover* dengan hasil kinerja *immediate occupancy* (IO). Penelitian Candra, (2021) menganalisis kinerja struktur gedung Fakultas Pariwisata UNUD dengan analisis *pushover* dengan hasil analisis *immediate occupancy* (IO). Penelitian Prawira, (2021) yang menganalisis struktur gedung terhadap beban gempa dengan metode

static pushover pada gedung Rektorat UNMAS Denpasar dengan hasil *collapse prevention* (CP).

Penelitian ini mengambil studi kasus gedung beton bertulang pada Rumah Susun Rindam V Brawijaya, Tipe 24, 4 Lantai, Jln. Puntodewo No.12, Polehan, Kec. Blimbing, Malang, Jawa Timur. Bangunan gedung rumah susun ini memiliki panjang 38,25 m dan lebar 12,75 m dengan tinggi gedung 19 m yang dibangun pada tahun 2018 yang berisi 15 kamar untuk setiap lantai. Fungsi gedung ini adalah sebagai rumah susun dengan kategori resiko dalam BSN, (2019) tabel 3 adalah kategori resiko II. Rumah Susun Rindam V Brawijaya ini menarik untuk dievaluasi, dianalisis dan diteliti level kinerja bangunan dengan menggunakan Analisis *Static Nonlinear Pushover* karena berada di daerah rawan gempa bumi. Pada perencanaan gedung hanya sampai pada batas atau kondisi *linear* (batas tahan terhadap gempa rencana). Analisis *Static Nonlinear Pushover* merupakan analisis lanjutan dari analisis *linear* yang mensimulasikan kinerja struktur bangunan jika terjadi gempa yang melewati gempa rencana atau mengetahui level kinerja struktur bangunan gedung (sampai pada kondisi seperti apa bangunan gedung tahan terhadap gempa hingga mengalami keruntuhan), dengan level kinerja antara: *immediate occupancy* (IO), *life safety* (LS) dan *collapse prevention* (CP).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dalam latar belakang diatas, berikut ini adalah rumusan masalah penelitian yaitu sebagai berikut :

1. Bagaimana Perilaku Struktur Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya Akibat Gaya Gempa ?

2. Bagaimana Hasil Evaluasi Level Kinerja Struktur Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya Dengan Analisis *Static Nonlinear Pushover* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Untuk Mengetahui Perilaku Struktur Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya Akibat Gaya Gempa.
2. Untuk Mengetahui Hasil Evaluasi Level Kinerja Struktur Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya Dengan Analisis *Static Nonlinear Pushover*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Memberi Kontribusi Dalam Menambah Wawasan Pengetahuan Mengenai Aturan Dan Cara Evaluasi Bangunan Gedung Tahan Gempa.
2. Memberikan Informasi Mengenai Hasil Evaluasi Level Kinerja Struktur Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya Dengan Analisis *Static Nonlinear Pushover*.

1.5 Batasan Masalah Dan Ruang Lingkup Penelitian

Untuk mencapai tujuan yang diharapkan dari penelitian ini maka, diperlukan batasan masalah dan ruang lingkup penelitian yaitu sebagai berikut :

1. Bangunan yang ditinjau adalah bangunan gedung rumah susun 4 (empat) lantai dengan struktur beton bertulang.
2. Lokasi bangunan Rumah Susun Rindam V Brawijaya, Malang, Jawa Timur.
3. Perletakan struktur pondasi dianggap sebagai perletakan jepit lateral pada sloof.

4. Baban atap langsung dibebankan pada ring balok (*ringbalk*).
5. Analisis struktur bangunan Gedung Rumah Susun Rindam V Brawijaya dengan *software* SAP2000 V.14.
6. Peraturan yang digunakan adalah sebagai berikut :
 - a. BSN, (2019), SNI 2847 : 2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan.
 - b. BSN, (2019), SNI 1726 : 2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Nongedung.
 - c. BSN, (2020), SNI 1727 : 2020 Beban Desain Minimum Dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung Dan Struktur Lain.
 - d. *Seismic Safety Commission*, (1996), *Applied Technology Council* (ATC 40) *Seismic Evaluation And Retrofit Of Concrete Buildings*.
 - e. *American Society Of Civil Engineers* (ASCE), (2000), *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 356) *Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*
 - f. *Departement Of Homeland Security*, (2005), *Federal Emergency Management Agency* (FEMA 440), *Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Prosedures*.
7. Tidak meninjau aspek seni, keindahan dan budaya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gempa

Gempa bumi adalah suatu fenomena yang terjadi karena terjadi getaran pada bumi yang diukur dengan *magnitudo* (M) untuk menggambarkan kekuatan gempa dalam skala intensitas seismik. Dalam artikel Zur, L, (2021) gempa yang pernah terjadi di Malang, Jawa Timur pada 10 April 2021 dengan kerusakan pada bangunan gedung yang parah, 10 orang meninggal, dan 105 orang mengalami luka luka. Gempa bumi tersebut banyak menimbulkan korban jiwa dan kerusakan struktur bangunan gedung.

Menurut BMKG menjelaskan bahwa gempa bumi merupakan peristiwa bergetarnya bumi karena bumi melepaskan energi secara tiba tiba akibat patahnya lapisan batuan dalam kerak bumi. Hal tersebut menyebabkan gempa bumi atau pergerakan lempeng tektonik sehingga energi yang dihasilkan oleh pergerakan lempeng tektonik dipancarkan ke segala arah bumi berupa gelombang gempa bumi yang efeknya bisa dirasakan sampai ke permukaan tanah yang sering menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan.

Peraturan tentang perencanaan bangunan tahan gempa merupakan salah satu langkah untuk upaya menanggulangi dampak yang ada atau timbul akibat gaya gempa, sehingga dalam melaksanakan evaluasi terhadap kinerja struktur bangunan gedung menjadi hal wajib dilakukan karena penilaian terhadap perencanaan suatu struktur menjadi lebih rinci, yaitu perubahan dari penilaian kekuatan dan daktilitas menjadi kinerja. Putra, et al, (2013).

2.2 Prinsip Perencanaan Struktur Bangunan Tahan Gempa

Perencanaan struktur bangunan tahan gempa tentu harus dengan tiga prinsip dasar yaitu : bangunan harus kaku, kokoh dan kuat. Hoedajanto dan Imran, (2002) ada enam prinsip dasar dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa.

1. Sistem struktur harus disesuaikan dengan tingkat resiko daerah dimana struktur tersebut dibangun.
2. Sistem struktur harus bersifat kontinyu dan utuh. Unsur bangunan termasuk penulangan harus efektif untuk meningkatkan integritas struktur dan perubahan kekakuan yang terlalu signifikan harus dihindari.
3. Asumsi sistem struktur dalam perencanaan desain tidak berubah ubah.
4. Material yang dipakai seperti beton dan baja harus memenuhi syarat material konstruksi untuk bangunan tahan gempa.
5. Bagian arsitektural yang mempunyai massa yang masif harus menyatu dengan kuat pada sistem portal utama dan direncanakan pengaruhnya terhadap sistem struktur.
6. Sistem *quality control* dan *quality assurance* dalam metode pelaksanaan harus tepat sesuai dengan peraturan yang berlaku.

2.3 Elemen Struktur Bangunan Gedung

Struktur gedung terdiri dari beberapa komponen penyusun struktur. Elemen struktur gedung terdiri dari elemen vertikal (kolom) dan elemen horizontal (balok) yang saling terhubung sehingga terbentuk rangka utama struktur bangunan gedung. Menurut Nasution, (2009) setiap suatu sistem struktur, elemen elemen penyusunnya mempunyai suatu mekanisme penyaluran beban dari atas ke pondasi.

1. Balok

Balok merupakan bagian utama dari struktur bangunan yang berfungsi untuk mendistribusikan semua beban pada pelat lantai ke kolom. Purnamasari, (2019) gaya yang bekerja pada balok akan menimbulkan reaksi pada perletakan, gaya geser, momen lentur, gaya aksial dan lendutan pada balok.

2. Kolom

Kolom adalah elemen rangka struktur yang menerima gaya aksial murni (beban dari pelat lantai, balok dan atap) lalu meneruskan semua beban ke struktur pondasi. Nawy, E. G, (1998) mengilustrasikan pembuatan diagram P dan M untuk penampang segi empat tipikal. Semua persyaratan berpengaruh terhadap diagram interaksi P (beban aksial) dan M (momen).

3. Pelat

Pelat adalah elemen struktur lantai yang bekerja menerima semua beban layan pertama pada struktur. Nasution, (2009) elemen pelat mempunyai fungsi sebagai penopang langsung beban atau tumpuan beban.

4. Pondasi

Pondasi adalah bagian utama dari struktur bawah bangunan yang berfungsi meneruskan beban bangunan ke tanah. Berdasarkan BSN, (2019) pondasi dibedakan menjadi enam tipe yaitu :

1. Pondasi menerus
2. Pondasi setempat
3. Pondasi tangga
4. Pondasi kombinasi
5. Pondasi pelat penuh atau rakit
6. Pondasi tiang pancang / pile cap

5. Rangka Atap

Nur, K. S dan Utiahman, A. (2012) menjelaskan bahwa rangka batang (*truss*) adalah konfigurasi batang yang satu dan lainnya terhubung dengan sendi pada setiap ujungnya agar tersusun suatu struktural.

2.4 Perhitungan Gaya Gempa

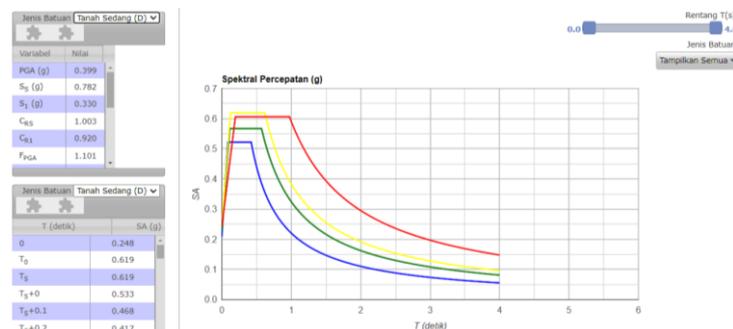
1. Klasifikasi Situs

Kelas situs adalah suatu batuan dasar atau spektra desain tanah atau berbagai jenis lapisan tanah, seperti : lapisan batuan keras, lapisan batuan, lapisan tanah keras, lapisan tanah sedang dan lapisan tanah lunak. Berdasarkan BSN, (2019) klasifikasi kelas situs terbagi menjadi beberapa kelas situs, yaitu :

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------|
| a. SA (Batuan keras) | d. SD (Tanah sedang) |
| b. SB (Batuan) | e. SE (Tanah lunak) |
| c. SC (Tanah keras atau batuan lunak) | f. SF (Respon spesifik) |

Winata, T. A. et al, (2018) berdasarkan *standart penetration test* (SPT) Malang adalah kelas situs tanah sedang (SD) dan nilai *standart penetration test* (SPT) Malang adalah 609.816 KN. (Mayangsari, 2018).

2. Kategori Desain Seismik



Gambar 2.1 Parameter respons spektrum gempa

Sumber : Puskim, 2022

Berdasarkan Puskim, parameter respons spektrum gempa untuk kota Malang yang dicari dengan koordinat lintang (-7.982705849814445) dan koordinat bujur (112.64745980501175), berikut adalah nilai spektral percepatan gempa dengan probabilitas keruntuhan 1% dalam 50 tahun.

Tabel 2.1 Nilai parameter respons spektrum SD

Variabel	Nilai
PGA (g)	0,399
S _s (g)	0,782
S ₁ (g)	0,330
C _{RS}	1,003
C _{R1}	0,920
F _{PGA}	1,101
F _A	1,187
F _V	1,739
PSA (g)	0,440
S _{MS} (g)	0,929
S _{M1} (g)	0,575
S _{DS} (g)	0,619
S _{D1} (g)	0,383
T ₀	0,124
T _s	0,619

Sumber : Puskim, 2022

Nilai nilai pada Tabel 2.1 diatas dapat dihitung dengan persamaan rumus dalam BSN, (2019) yaitu :

$$S_{MS} = F_A \times S_s \dots\dots\dots (2.2.a)$$

$$S_{M1} = F_V \times S_1 \dots\dots\dots (2.2.b)$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots (2.2.c)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots\dots\dots (2.2.d)$$

Untuk periode lebih kecil dari T_0 , harus dihitung dengan rumus berikut ;

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots\dots\dots (2.2.e)$$

Untuk periode lebih besar dari atau sama dengan T_0 dan lebih kecil dari atau sama dengan T_s , spektrum respons percepatan desain, S_a , sama dengan S_{DS} , spektrum respons percepatan desain, $S_a = S_{DS}$.

Untuk periode lebih besar dari T_s tetapi lebih kecil dari atau sama dengan T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , dihitung berdasarkan rumus berikut :

$$S_a = \frac{S_{DS}}{T} \dots\dots\dots (2.2.f)$$

Untuk periode lebih besar dari T_L , respons spektral percepatan desain, S_a , dihitung berdasarkan rumus berikut :

$$S_a = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2} \dots\dots\dots (2.2.g)$$

Keterangan ;

S_{MS} : Parameter respons spektral percepatan pada periode pendek

S_{M1} : Parameter respons spektral percepatan pada periode 1 detik

F_A : Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode pendek

F_V : Faktor amplifikasi getaran terkait percepatan pada getaran periode 1 detik

S_s : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S_1 : Parameter respons spektral percepatan gempa MCE_R terpetakan untuk periode pendek

S_{DS} : Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek

S_{D1} : Parameter percepatan spektral desain untuk periode 1 detik

T : Periode getar fundamental struktur

Rumus menghitung T_0 , T_S dan T_L adalah sebagai berikut :

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} ; T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots\dots\dots(2.2.h)$$

T_L : Merupakan peta transisi periode panjang pada gambar kurva spektra respons desain.

3. Gaya Geser Dasar

Static ekuivalen merupakan metode yang menyederhanakan perhitungan beban gempa. Dalam metode ekuivalen beban gempa berupa percepatan tanah yang diganti dengan beban lateral *static* yang bekerja pada setiap tingkat bangunan. Besar atau kecilnya gaya yang bekerja tergantung dari koefisien respons seismik (C_s) dan berat total struktur bangunan (W). Berdasarkan BSN, (2019) untuk menghitung gaya geser dengan metode *static* ekuivalen yaitu sebagai berikut :

$$V = C_s \times W \dots\dots\dots(2.3.a)$$

Keterangan ;

V : Gaya geser dasar

C_s : Koef. respons seismik

W : Berat bangunan

Dalam menghitung koefisien respons seismik (C_s) dengan rumus, yaitu sebagai berikut :

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots(2.3.b)$$

Keterangan ;

S_{DS} : Parameter percepatan respons seismik periode pendek

R : Faktor modifikasi respons

I_e : Faktor keutamaan gempa

Nilai (C_s) yang telah dihitung dengan rumus diatas tidak boleh melebihi nilai dari ketentuan berikut :

Untuk $T \leq T_L$; $C_s = \frac{S_{D1}}{T \cdot \left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.3.c)$

Untuk $T > T_L$; $C_s = \frac{S_{D1} - T_L}{T^2 \cdot \left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.3.d)$

C_s tidak boleh kurang dari ; $C_s = 0,044 \times S_{DS} \times I_e \geq 0,01 \dots\dots\dots (2.3.e)$

Untuk struktur yang berlokasi di daerah dimana S_1 sama dengan atau lebih besar dari 0,6 g, maka C_s harus tidak kurang dari :

$C_s = \frac{0,5 \cdot S_1}{\left(\frac{R}{I_e}\right)} \dots\dots\dots (2.3.f)$

Keterangan ;

S_{D1} : Parameter percepatan respons seismik periode 1,0 detik

S_1 : Parameter percepatan respons spektral maksimum

T : Periode fundamental struktur (detik)

Berikut ini adalah parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCE_R) untuk kelas situs tanah sedang (SD).

Tabel 2.2 Koefisien situs, *Fa*

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode pendek, $T = 0,2$ detik, S_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,5$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,0$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,5$
SD	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	1,0

Sumber : BSN,

Tabel 2.3 Koefisien situs, F_v

Kelas Situs	Parameter respons spektral percepatan gempa maksimum yang dipertimbangkan risiko tertarget (MCE_R) terpetakan pada periode 1 detik, S_1					
	$S_1 \leq 0,1$	$S_1 = 0,2$	$S_1 = 0,3$	$S_1 = 0,4$	$S_1 = 0,5$	$S_1 \geq 0,6$
<i>SD</i>	2,4	2,2	2,0	1,9	1,8	1,7

Sumber : BSN, 2019

2.5 Gempa Rencana, Faktor Keutamaan dan Kategori Resiko Struktur Bangunan

Dalam BSN, (2019) gempa rencana ditetapkan sebagai gempa dengan kemungkinan terlampaui besarnya selama umur struktur bangunan 50 tahun adalah sebesar 2%. Gempa rencana yang mempunyai peluang 2% (R_n 2% dari periode 50 tahun dan pengaruh beban gempa dengan perilaku dinamis). Kategori resiko struktur bangunan dengan faktor keutamaan gempa rencana harus dikalikan dengan koefisien faktor keutamaan gempa I_e berdasarkan kategori resiko.

Tabel 2.4 Faktor keutamaan gempa

Kategori Resiko	Faktor Keutamaan Gempa, I_e
I atau II	1,0
III	1,25
IV	1,50

Sumber : BSN, 2019

Menuru BSN, (2019) kategori risiko untuk perumahan (rumah susun) adalah kategori resiko II dan faktor keutamaan gempa untuk ketegori II, $I_e = 1,0$.

2.6 Kategori Desain Seismik

Kategori desain seismik adalah klasifikasi struktur yang berdasarkan seismik dan keparahan dari gempa sesuai dengan kelas situs nilai S_{DS} dan S_{D1} . Dalam BSN, (2019) berikut adalah tabel kategori desain seismik berdasarkan parameter respons percepatan pada periode pendek dan periode 1 detik.

Tabel 2.5 Kategori desain seismik periode pendek

Nilai S_{DS}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{DS} < 0,167$	A	A
$0,167 \leq S_{DS} < 0,33$	B	C
$0,33 \leq S_{DS} < 0,50$	C	D
$0,50 \leq S_{DS}$	D	D

Sumber : BSN, 2019

Tabel 2.6 Kategori desain seismik periode 1 detik

Nilai S_{D1}	Kategori Risiko	
	I atau II atau III	IV
$S_{D1} < 0,067$	A	A
$0,067 \leq S_{D1} < 0,133$	B	C
$0,133 \leq S_{D1} < 0,20$	C	D
$0,20 \leq S_{D1}$	D	D

Sumber : BSN, 2019

Dalam Tabel 2.1 Nilai parameter respons spektrum yang berdasarkan Puskim, (2022) nilai $S_{DS} = 0,619$ dan $S_{D1} = 0,383$.

$0,50 \leq 0,619$ adalah kategori risiko desain seismik = D (2.4.a)

$0,20 \leq 0,383$ adalah kategori risiko desain seismik = D (2.4.b)

Dari persamaan rumus diatas yang berdasarkan BSN, (2019) diketahui bahwa kategori desain seismik periode S_{DS} dan S_{D1} adalah kategori D.

Tabel 2.7 Koefisien untuk batas atas pada periode yang dihitung

Parameter Percepatan Respons Spektral Desain Pada 1 Detik, S_{D1}	C_U
$\geq 0,4$	1,4
0,3	1,4
0,2	1,5
0,15	1,6
$\leq 0,1$	1,7

BSN, 2019

2.7 Periode Alami Fundamental

Periode alami fundamental (T) dalam BSN, (2019) tidak boleh melebihi hasil perhitungan koefisien untuk batasan periode yang dihitung (C_U) sesuai ketentuan. Periode fundamental dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$T_a = C_t \cdot h_n^x \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan ;

h_n : Tinggi struktur (m)

T_a : Nilai batas bawah periode struktur

Tabel 2.8 Nilai parameter periode pendekatan C_t dan x

Tipe Struktur	C_t	x
Sistem rangka pemikul momen dimana rangka memikul 100 % gaya gempa yang diisyaratkan dan tidak dilingkupi atau dihubungkan dengan komponen yang lebih kaku dan akan mencegah rangka dari defleksi jika dikenai beban gempa		
Rangka baja pemikul momen	0,0724	0,8
Rangka beton pemikul momen	0,0466	0,9
Rangka baja dengan bresing eksentris	0,0731	0,75
Rangka baja dengan bresing terkekang terhadap tekuk	0,0731	0,75
Semua sistem struktur lainnya	0,0488	0,75

Sumber : BSN, 2019

2.8 Sistem Struktur Penahan Gempa

Menurut BSN, (2019) sistem pemikul gaya gempa horizontal dan vertikal harus memenuhi salah satu tipe sistem struktur berikut ini yaitu :

Tabel 2.9 Faktor R, Ω_0^b dan C_d^b untuk pemikul gaya gempa

Sistem Penahan Gaya Seismik	Koefisien Modifikasi Respons, R^a	Faktor Kuat Lebih Sistem, Ω_0^b	Faktor Pembesaran Defleksi, C_d^b	Batasan Sistem Struktur dan Tinggi Struktur, h^n				
				Kategori Desain Seismik				
				B	C	D ^d	E ^d	F ^e
Rangka beton bertulang pemikul momen khusus	8	3	5,5	TB	TB	TB	TB	TB
Rangka beton bertulang pemikul momen menengah	5	3	4,5	TB	TB	TI	TI	TI

Sumber : BSN, 2019

2.9 Simpangan Antar Tingkat

Menurut BSN, (2019) simpangan antar tingkat (δ_x) dapat ditentukan dengan persamaan rumus berikut :

$$\delta_x = \frac{C_d \times \delta_{xe}}{I_e} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan ;

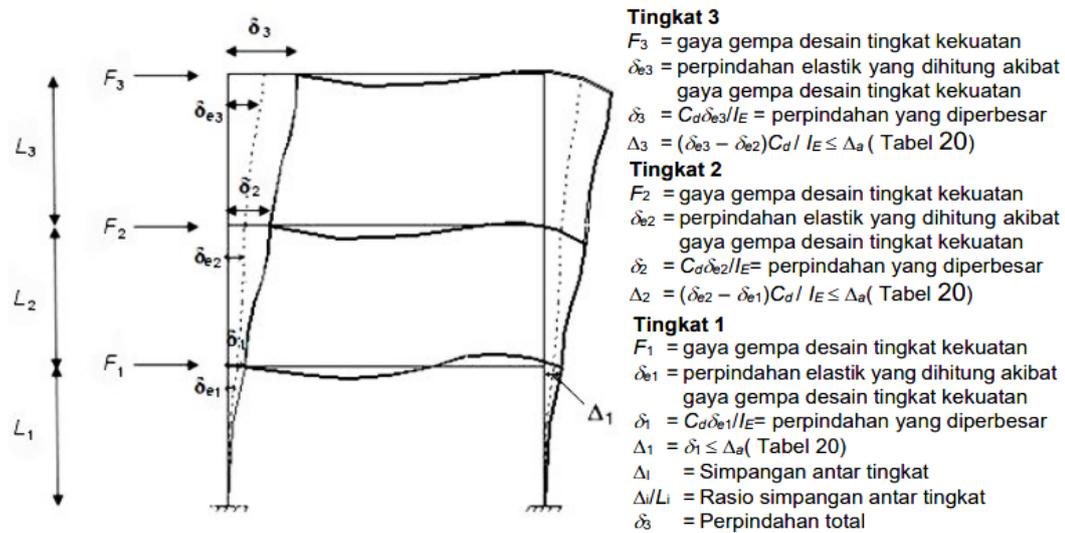
C_d : Faktor amplifikasi defleksi

δ_{xe} : Defleksi pada lokasi yang di isyaratkan dengan analisis elastis

I_e : Faktor keutamaan gempa

Δa : Simpangan antar tingkat (lantai)

Berikut ini adalah gambar simpangan antar tingkat yaitu :



Gambar 2.2 Penentuan simpangan antar tingkat

Sumber : BSN, 2019

Tabel 2.10 Kategori desain seismik periode 1 detik

Struktur	Kategori Risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar tingkat.	$0,025h_{sx}^c$	$0,020 h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010 h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020 h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

Sumber : BSN, 2019

2.10 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban (*load combination*) adalah formula untuk perhitungan semua beban pada struktur bangunan yang di kombinasikan untuk mendapatkan batasan kekuatan struktur yang paling mendekati kenyataan yang *real*. BSN, (2020) mengatur tentang kombinasi dasar dalam pembebanan struktur bangunan yaitu sebagai berikut :

$$1,4D \dots\dots\dots (2.7.a)$$

$$1,2D + 1,6L + 0,5 (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \dots\dots\dots (2.7.b)$$

$$1,2D + 1,6L (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) + (L \text{ atau } 0,5W) \dots\dots\dots (2.7.c)$$

$$1,2D + 1,0W + L + 0,5 (L_r \text{ atau } S \text{ atau } R) \dots\dots\dots (2.7.d)$$

$$0,9D + 1,0W \dots\dots\dots (2.7.e)$$

Keterangan ;

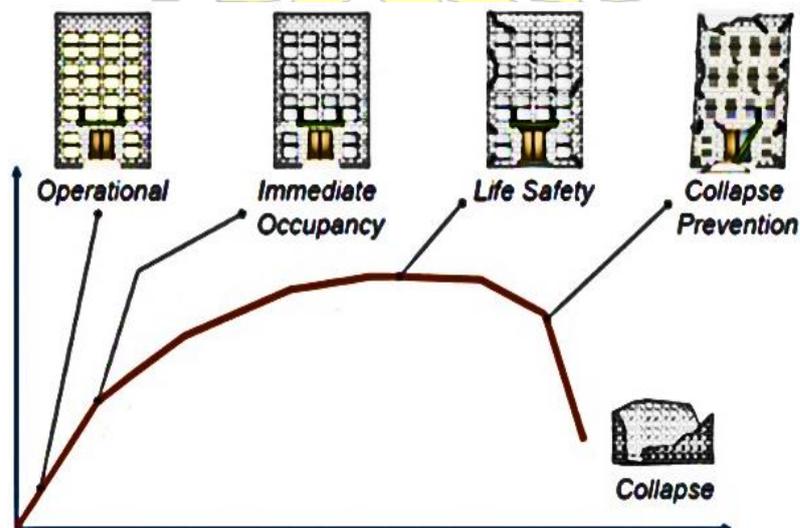
D : Beban mati R : Beban hujan

L : Beban hidup S : Beban salju

L_r : Beban hidup atap W : Beban angin

2.11 Desain Berbasis Kinerja

Bangunan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) adalah bangunan gedung yang direncanakan menggunakan metode mendesain bangunan dengan tingkat kerumitan apapun, melalui evaluasi kinerja struktur. Dalam peraturan ATC 40, FEMA 365 dan FEMA 440 berikut adalah rangkuman *performance level* kinerja.



Gambar 2.3 Level kinerja bangunan

Sumber : Mattei, S. et al, 2021

1. *Operational*, level kinerja (O). Tidak ada kerusakan pada struktur atau nonstruktur dan bangunan masih sangat baik dan tetap berfungsi sesuai peruntukan.
2. *Immediate occupancy*, level kinerja (IO). Struktur seperti kolom, balok dan pondasi dan nonstruktur tidak mengalami kerusakan sehingga struktur bangunan masih aman dan bisa kembali berfungsi sesuai peruntukan, jika ada perbaikan estimasi perkiraan biaya sekitar 20% s.d 25%.
3. *Life safety*, level kinerja (LS). Struktur dan nonstruktur masih aman tetapi dengan dengan perbaikan atau perkuatan pada komponen struktur sehingga masih dapat digunakan sesuai peruntukan, jika ada perbaikan estimasi perkiraan biaya sekitar 25% s.d 50%.
4. *Collapse prevention*, level kinerja (CP). Struktur mengalami kerusakan tetapi belum runtuh atau nyaris runtuh, terjadi pergeseran dan perubahan kekakuan struktur, jika diperbaiki estimasi biaya diperkirakan 50% s.d 80%.
5. *Collapse*, (C). Terjadi keruntuhan pada struktur karena beban gempa telah melewati batas dari kekuatan struktur, jika diperbaiki maka diperkirakan 100% dari biaya total.

2.12 Analisis Static Nonlinear Pushover

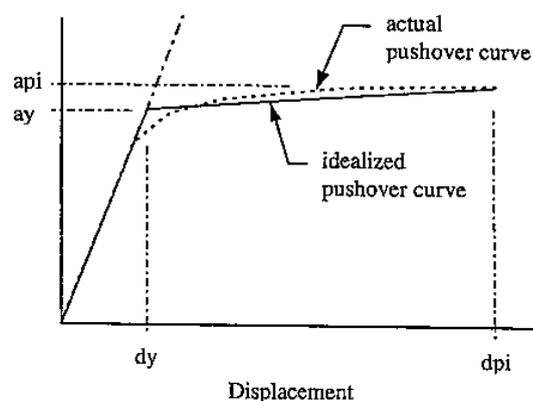
Metode *Static Nonlinear Pushover* adalah analisis yang dengan beban dorong yang menganalisis pengaruh gempa rencana terhadap struktur bangunan gedung dianggap sebagai beban *static* pada setiap lantai atau masing masing lantai dari bangunan gedung, nilai dari beban *static* ditingkatkan secara berangsur angsur sampai melampaui beban dan menyebabkan leleh (sendi plastis) pertama, hingga

menjadi pasca elastis yang sangat besar sampai mencapai target plastis yang diharapkan. Dewobroto, W, (2007) analisis *pushover* bisa digunakan sebagai metode perencanaan bangunan tahan gempa, sesuai syarat berikut :

1. Hasil analisis *pushover* masih berupa pendekatan, karena bagaimanapun perilaku gempa yang sebenarnya adalah bersifat bolak balik melalui suatu siklus tertentu, sedangkan sifat pembebanan pada analisis *pushover* adalah *static* monotonik.
2. Pemilihan pola beban lateral yang digunakan dalam analisis sangat penting.
3. Untuk membuat model analisis *nonlinear* lebih rumit dibandingkan dengan analisis *linear*. Analisis *nonlinear* diperhitungkan berdasarkan sifat inelastik beban deformasi yang diambil dari komponen penting dan dari efek P- Δ .

2.12.1 Metode Analisis ATC 40

Metode analisis *applied technology council* (ATC 40) adalah desain kinerja struktur bangunan dengan *capacity spektrum* untuk mengetahui peralihan aktual dari struktur gedung. Peralihan aktual yang dimaksud adalah besarnya simpangan pada struktur. Prosedur metode ATC 40 dilakukan dengan menentukan kordinat titik $ay - dy$ dan $api - dpi$ yang digunakan sebagai performa.



Gambar 2.4 Kurva ideal *pushover*

Sumber : ATC 40,1996

Analisis *capacity spektrum* sesuai aturan ATC 40 adalah sebagai berikut :

1. Konversi kurva kapasitas hasil analisis beban dorong atau *pushover* menjadi *capacity spektrum*.

- a. *Modal participation faktor*.

$$PF_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \frac{W_i \cdot \phi_{i1}}{g} \right]}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(W_i \cdot \phi_{i1})^2}{g} \right]} \dots\dots\dots (2.8.a)$$

- b. *Modal mass coefficient*.

$$\alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n \frac{W_i \cdot \phi_{i1}}{g} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{g} \right] \left[\sum_{i=1}^n \frac{(W_i \cdot \phi_{i1})^2}{g} \right]} \dots\dots\dots (2.8.b)$$

- c. *Spektrum acceleration*

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \dots\dots\dots (2.8.c)$$

- d. *Spektrum displacement*

$$S_d = \frac{\Delta_{\text{roof}}}{PF_1 \cdot \phi_{\text{roof1}}} \dots\dots\dots (2.8.d)$$

- e. *Drift maximum*

$$D = \frac{D_t}{H} \dots\dots\dots (2.8.e)$$

- f. *Maximum inelastic drift*

$$MID = \frac{D_t - D_1}{H} \dots\dots\dots (2.8.f)$$

Keterangan ;

D : Simpangan / perpindahan (*drift*)

H : Tinggi bangunan (m)

MID : Simpangan / perpindahan maksimum (*maximum inelastic drift*)

PF₁ : Faktor partisipasi (*modal participation faktor*) untuk periode 1

α_1 : Koefisien massa modal (*modal mass coefficient*) untuk periode 1

S_a : Percepatan spektral (*spektrum acceleration*)

S_d : Percepatan spektral (*spektrum displacement*)

ϕ_{i1} : Amplitudo modal (*amplitude of mode*) periode 1 pada level i

V : Geser dasar (*base shear*)

W : Beban gravitasi

Δ_{roof} : Perpindahan pada atap (*roof displacement*)

$\frac{W_i}{g}$: Massa pada level i

2. Menentukan *performance point*, pada tahap ini dilakukan literasi sesuai prosedur B ATC 40 ; Plot *demand spectrum* dengan nilai damping 5% sesuai kondisi tanah dan wilayah gempa, lalu menggabungkan *demand spectrum* dengan *capacity spectrum* untuk menentukan *performance point*.
3. Ubah *performance point* menjadi simpangan.

Berikut ini adalah batasan rasio *drift* berdasarkan ATC 40 yaitu :

Tabel 2.11 Batasan rasio *drift* ATC 40

<i>Parameter</i>	<i>Performance Level</i>			
	IO	DC	LS	SB
Maksimum Total <i>Drift</i>	0,01	0,01 s.d 0,002	0,02	0,33 V_i/P_i
Maksimum Total Inelastik <i>Drift</i>	0,005	0,005 s.d 0,015	<i>No Limit</i>	<i>No Limit</i>

Sumber : ATC 40, 1996

Keterangan :

IO : *Immediate occupancy*

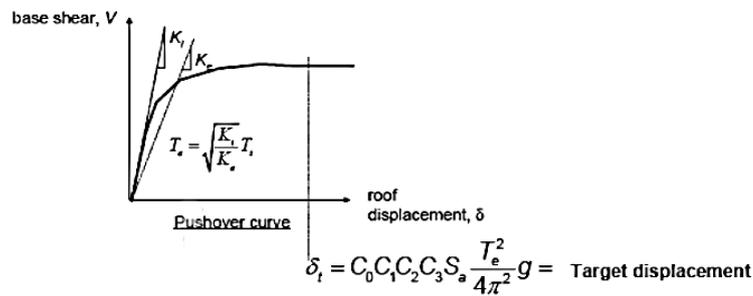
LS : *Life safety*

DC : *Damage control*

SB : *Structural stability*

2.12.2 Metode Analisis FEMA 356

Metode analisis perpindahan dalam peraturan *federal emergensi managemen agency* (FEMA 356) adalah *displacement coefficient method* (DCM) untuk prosedur *nonlinear*. DCM yaitu dilakukan dengan modifikasi respons elastis *linear* dari sistem DOF ekuivalen dengan faktor koefisien $C_0, C_1, C_2,$ dan C_3 untuk mencari target perpindahan δ_t . Berikut ini adalah kurva *pushover* target *displacement*.



Gambar 2.5 Kurva *pushover*
 Sumber : FEMA 356, 2000

Berikut adalah persamaan rumus yang digunakan dalam perhitungan.

$$\delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \left(\frac{T_e}{2 \cdot \pi}\right)^2 \cdot g \dots\dots\dots (2.9.a)$$

δ_t : Target perpindahan

T_e : Waktu getar alami efektif

C_0 : Koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, bisa dengan faktor ragam pertama atau sesuai faktor dalam tabel FEMA 356.

C_1 : Koefisien modifikasi, untuk menghubungkan perpindahan inelastis maksimum dengan perpindahan respons elastis *linear*.

untuk $T_e \geq T$; $C_1 = 1,0 \dots\dots\dots (2.9.b)$

untuk $T_e < T$; $C_1 = \frac{[1 + (R - 1) \cdot \frac{T_s}{T_e}]}{R} \dots\dots\dots (2.9.c)$

C_2 : Koefisien untuk perhitungan efek “pinching” dari hubungan beban deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, dalam tabel FEMA 356.

C_3 : Koefisien untuk perhitungan perbesaran lateral akibat adanya efek P Delta. Perilaku kekakuan pasca leleh bernilai positif,

$$C_3 = 1,0 \dots\dots\dots (2.9.d)$$

Perilaku kekakuan pasca leleh bernilai negatif,

$$C_3 = 1,0 + \frac{|a| (R-1)^{2/3}}{T_e} \dots\dots\dots (2.9.e)$$

a : Rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastis efektif.

R : Rasio “kuat elastis perlu” terhadap “koefisien kuat leleh terhitung”.

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} \cdot C_m \dots\dots\dots (2.9.f)$$

S_a : Akselerasi respons spektrum yang sesuai dengan waktu getar alami efektif pada jarak yang di tinjau.

S_d : Puncak perpindahan elastis.

$$S_d = \frac{T_s}{4 \cdot \pi^2 \cdot T_e} \cdot g \dots\dots\dots (2.9.g)$$

V_y : Geser dasar pada saat leleh.

W : Total beban dan beban hidup yang dapat di reduksi.

C_m : Faktor massa efektif yang diambil dari FEMA 356.

g : Percepatan gravitasi 9,81 m/detik.

2.12.3 Metode Analisis FEMA 440

Metode *federal emergency managemen agency* (FEMA 440) adalah metode *federal emergency managemen agency* (FEMA 356) yang dimodifikasi dan dilakukan penambahan *displacement coefficient method* (DCM) dalam menghitung faktor C_1 dan C_2 , sesuai dalam persamaan rumus berikut yaitu :

$$C_1 = 1 + \frac{R - 1}{\alpha \cdot T_e^2} \dots\dots\dots (2.10.a)$$

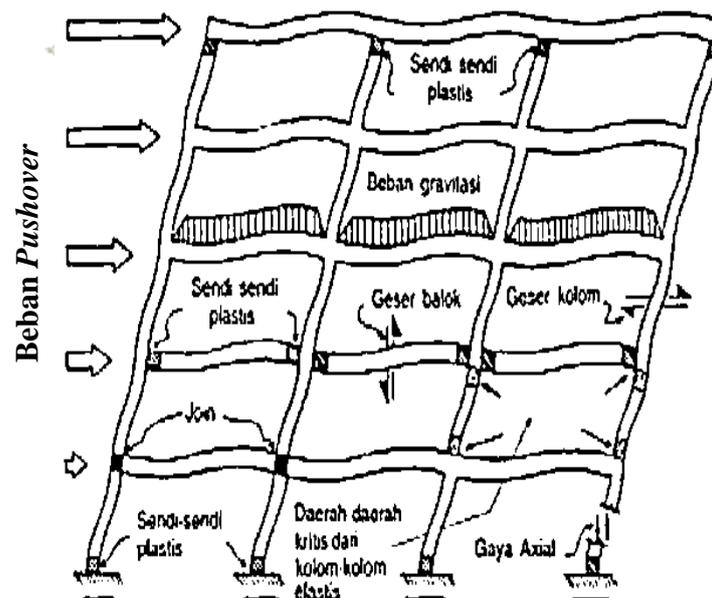
Nilai konstanta α adalah 130, 90 dan 60 untuk daerah kelas situs kategori B, C dan D dengan waktu getar alami $< 0,2$ detik maka nilai C_1 pada 0,2 detik dapat dipakai. Sedangkan untuk waktu getar > 1 detik maka $C_1 = 1,0$

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \cdot \left(\frac{R - 1}{T_e} \right)^2 \dots\dots\dots (2.10.b)$$

Untuk waktu getar alami $< 0,2$ detik maka nilai $C_2 = 0,2$ detik. Sedangkan untuk waktu getar $> 0,7$ detik maka $C_2 = 1,0$.

2.13 Sendi Plastis

Sendi plastis terbentuk ketika beban melampaui kapasitas dari elemen struktur kolom dan balok. Jika kolom yang runtuh pertama maka gedung akan langsung runtuh tetapi jika balok yang pertama runtuh maka gedung tidak langsung runtuh. Jadi dalam perencanaan struktur gedung kolom harus lebih kuat dari balok. Candra, (2021) struktur gedung apabila menerima beban gempa pada tingkatan/kondisi tertentu, akan terjadi plastis (*hinge*) pada balok struktur gedung tersebut.



Gambar 2.6 Sendi plastis

2.14 Displacement Control

Displacement control (DC) adalah parameter yang dipakai untuk mengukur besaran perpindahan atau geser pada struktur bangunan gedung dan digunakan untuk menganalisis struktur dalam keadaan atau dalam kondisi inelastis dan karena kehilangan kapasitas daya tahan beban. Berdasarkan FEMA 356, ada 4 level kinerja struktur bangunan yaitu ; level *operatinel* (O), level *immediate occupancy* (IO), level *life safety* (LS) dan level *collapse prevention* (CP) serta besar perpindahan untuk *displacement control* adalah sebesar 2% dari ketinggian struktur bangunan.

Tabel 2.12 Kontrol kerusakan dan *performance* level kinerja struktur

Tipe	Target Level Kinerja Bangunan		
	<i>Immediate Occupancy</i> (IO)	<i>Life Safety</i> (LS)	<i>Collapse Prevention</i> (CP)
	Ringan	Sedang	Parah
<i>Primary</i>	Retak halus pada beberapa lokasi. Tidak ada keruntuhan yang terjadi.	Kerusakan parah pada balok dan pengelupasan selimut beton dan retak geser pada kolom daktil. Pengelupasan beton pada kolom nondaktil.	Banyak retakan dan sendi plastis pada elemen struktur yang daktil. Retakan pada beberapa kolom nondaktil. Kerusakan parah pada kolom pendek.
<i>Secondary</i>	Pengelupasan selimut beton pada beberapa balok dan kolom daktil. Retak lentur pada balok dan kolom.	Banyak retakan dan sendi plastis pada elemen yang daktil. Retakan pada beberapa kolom nondaktil. Kerusakan parah.	Pengelupasan beton pada kolom dan balok yang berlebihan. Kerusakan parah pada joint dan beberapa tulangan bengkok.
<i>Drift</i>	1% sementara	2% sementara 1% permanen	4% sementara permanen

Sumber : FEMA 356, 2000