

**STUDI PERBANDINGAN PERILAKU STRUKTUR BAJA
TAHAN GEMPA SISTEM *EBF* (*ECCENTRICALLY-BRACED
FRAME*) DAN SISTEM ISOLASI**

*A COMPARATIVE STUDY OF EARTHQUAKE RESISTANT STEEL
STRUCTURE SYSTEM OF ECCENTRICALLY-BRACED FRAME (EBF)
AND ISOLATION SYSTEM*

**MUHAMMAD SOFYAN
P2303211005**



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

TESIS

STUDI PERBANDINGAN PERILAKU STRUKTUR BAJA TAHAN
GEMPA SISTEM EBF (ECCENTRICALLY-BRACED FRAME) DAN
SISTEM ISOLASI

Disusun dan diajukan oleh

MUHAMMAD SOFYAN

P2303211005



Menyetujui

Komisi Penasihat :

Prof. Dr.-Ing. Ir. Herman Parung, M.Eng.
Ketua

Dr. Eng. A. Arwin Amiruddin, ST., MT.
Sekretaris

Mengetahui :

Ketua Program Studi S2 Teknik Sipil

Dr. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Sofyan

Nomor mahasiswa : P2303211005

Program studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat di buktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Agustus 2013

Yang menyatakan

Muhammad Sofyan

KATA PENGANTAR

Assalamu Alaikum Waramatullahi Wabarakatu, segala puji bagi Allah SWT, karena dengan rahmat dan kehendaknya penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan tesis dengan judul “**Studi Perbandingan Perilaku Struktur Baja Tahan Gempa Sistem *EBF* (*Eccentrically-Braced Frame*) dan Sistem Isolasi**“. Berbagai kendala dan permasalahan yang menyertai selama penyusunan tesis ini, namun dengan bantuan berbagai pihak sehingga dapat selesai.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini tidak akan selesai tanpa adanya berbagai bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis dengan tulus menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Prof.Dr.-ing. Ir. Herman Parung, M.Eng sebagai ketua komisi penasehat dan Dr.Eng.A. Arwin Amiruddin, ST, MT yang telah meluangkan waktunya dalam memotivasi dan membimbing penulis mulai persiapan penulisan, penelitian sampai dengan penyelesaian tesis ini.
2. Prof.Dr. Ir. Muh. Wihardi Tjaronge, M.Eng, Ir. Ahmad Bakri Muhiddin, MSc, Ph.D, dan Dr. Rudy Djamaluddin, ST, M.Eng selaku tim penguji yang telah memberikan masukan dalam perbaikan penulisan tesis ini.
3. Dr. Rudy Djamaluddin, ST, M.Eng selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil yang telah memberikan dukungan kepada penulis.

4. Prof. Dr. Ir. H. Lawalenna S, MS, M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil yang telah membantu penulis selama pendidikan.
5. Para dosen dan staff yang telah membantu penulis selama mengikuti pendidikan pada Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin Makassar.
6. Orang tua tercinta Ayahanda DR. Junaidin Zakaria, SE, MSi dan Ibunda Murniati, SE.
7. Teman-teman seperjuangan Teknik Sipil Struktur 2011 (Pak Mansur, Pak Hamzah, Pak Adi, Pak Sandy, Pak Henry, Pak Safar, Bu Tini, Pak Raun, kanda takim, kanda muharrar dan Teguh) serta Pascasarjana Teknik Sipil angkatan 2011 pada umumnya.
8. Sudirman Sitang, ST selaku asisten Laboratorium Struktur dan Bahan, dan Adik-adik Jurusan Sipil-FT-UH yang telah membantu penulis dan semua pihak yang namanya tidak tercantum tetapi telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tesis ini, semoga Allah SWT membalasnya dengan amalan yang setimpal.

Akhir kata penulis berharap tesis ini dapat berguna bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya di bidang perancangan struktur.

Makassar, Agustus 2013

Muhammad Sofyan

ABSTRAK

MUHAMMAD SOFYAN *Studi Perbandingan Perilaku Struktur Baja Tahan Gempa Sistem EBF (Eccentrically-Braced Frame) dan Sistem Isolasi* (dibimbing oleh Herman Parung dan A. Arwin Amiruddin).

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan daktilitas dan nilai *drift* antara struktur baja sistem *EBF* dan sistem *rubber isolator* (sistem isolasi).

Jenis penelitian merupakan telaah literatur. Kasus yang ditinjau adalah suatu portal tiga dimensi simetrik beraturan bertingkat 8. Dimana akan didesain 3 jenis portal sistem struktur baja tahan gempa yaitu sistem *Eccentrically-braced frame*, sistem *Rubber isolator (Lead Rubber Bearing)* dan sistem portal biasa sebagai struktur pembanding. Metode analisis yang akan dilakukan adalah analisis *Time History*, analisis Respon Spektrum dan *Analisis Pushover*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi elastis baik untuk metode analisis dinamik linier *time history* maupun metode analisis respon spektrum, portal sistem *EBF* memiliki *drift* yang lebih kecil dari sistem *rubber isolator* yaitu sebesar 0.71 cm sedangkan sistem *rubber isolator* sebesar 0.91 cm. Kemudian pada kondisi inelastis (setelah dilakukan analisis *pushover*) Sistem *EBF* menunjukkan nilai daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem *rubber isolator* dimana nilai daktilitasnya sebesar 1.81 sedangkan sistem *rubber isolator* sebesar 1.45.

kata kunci : Sistem *EBF*, Sistem *rubber isolator*, *drift*, daktilitas

ABSTRACT

MUHAMMAD SOFYAN *Comparative Study of Seismic Steel Structures Performance EBF System (Eccentrically-Braced Frame) and Isolation System* (supervised by Herman Parung and A. Arwin Amiruddin).

This research aimed to compare ductility and story drift between EBF system and rubber isolator system of steel structure.

This type of research is literature study. The case reviewed is a symmetric three-dimensional structure of irregular buildings 8 story. In which system will be designed 3 types of seismic steel structure which Eccentrically-braced frame system, Rubber isolator system (Lead Rubber Bearing) and Fixed base system as the structure comparison. Methods of analysis be performed is the Time history analysis, Response spectrum analysis and Pushover analysis.

The results of the research indicated that the elastic condition either for time history linear dynamic analysis method or response spectrum analysis method, the EBF system has a story drift smaller than rubber isolator system namely 0.71 cm while the rubber isolator system is 0.91 cm. Then in inelastic condition (after pushover analysis conducted) EBF system indicated higher ductility values than rubber isolator system where the value of ductility at 1.81 while the rubber isolator system amounted to 1.45.

keywords: EBF System, rubber isolator system, drift, ductility

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN	xxii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	6
C. Tujuan Penelitian	6
D. Batasan Masalah	7

E. Manfaat Penelitian	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
A. Struktur Baja Tahan Gempa	9
B. Struktur Gedung Beraturan	10
C. Rangka Berpengaku Eksentrik (<i>EBF/Eccentrically-Braced Frame</i>)	12
D. Elemen Link	14
E. Sistem Isolasi Dasar Seismik	18
F. <i>Lead Rubber Bearing (LRB)</i>	18
G. Analisis Dinamik Linier	22
1. Analisis Linier Respons Spektrum	22
2. Analisis Linier <i>Time History</i>	23
H. Perencanaan Tahan Gempa Berbasis Kinerja	24
I. Analisa Statik Nonlinier (<i>Pushover</i>)	26
J. Tahapan Utama dalam Analisa <i>Pushover</i>	28
K. Target Perpindahan	29
L. Metode Koefisien Perpindahan (<i>FEMA 273/356</i>)	31
M. Metode Koefisien Perpindahan yang diperbaiki (<i>FEMA 440</i>)	33
N. Teori Daktilitas	34
III. METODE PENELITIAN	37
A. Jenis Penelitian	37
B. Alat dan Bahan	37
C. Model Struktur Bangunan	38

D. Pendefinisian model struktur	42
1. Sistem EBF	42
2. Sistem portal biasa dan sistem <i>Rubber Isolator</i>	44
E. Data-data Struktur	47
F. Metode Pemodelan <i>Base Isolator</i> menggunakan Program Komputer	47
G. Analisa Pembebanan Pada Struktur	54
H. Diagram Alir Penelitian	57
I. Kerangka Pikir Penelitian	58
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	59
A. Hasil Desain Elemen Balok dan Kolom Berdasarkan Analisis <i>Time History</i>	59
B. Hasil Desain Elemen Balok dan Kolom Berdasarkan Analisis Respons Spektrum	77
1. Evaluasi Gempa untuk sistem Portal Biasa	78
2. Evaluasi Gempa untuk sistem <i>EBF</i>	79
C. Hasil Desain <i>Rubber Isolator</i>	97
D. Hasil Desain Balok Link sistem <i>EBF (Eccentrically-Braced Frame)</i>	99
E. Analisa <i>Drift</i>	107
F. Target Perpindahan	114
1. Target Perpindahan arah x untuk Struktur Sistem Portal Biasa	114
2. Target Perpindahan arah x untuk Struktur Sistem <i>Rubber Isolator</i>	115
3. Target Perpindahan arah x untuk Struktur Sistem <i>EBF</i>	116

G. Analisis <i>Pushover</i> (Statik Nonlinier)	117
H. Rekapitulasi Hasil Analisis	130
V. KESIMPULAN DAN SARAN	134
A. Kesimpulan	134
B. Saran	135
Daftar Pustaka	136
Lampiran	138

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1	Kriteria Kinerja	3
2	Tabel profil balok hasil desain untuk sistem portal Biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	63
3	Tabel profil kolom hasil desain untuk sistem portal Biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	63
4	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	64
5	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	64
6	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan oleh sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	65
7	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan oleh sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis <i>time history</i>	65
8	Tabel profil balok hasil desain untuk portal sistem <i>rubber isolator</i> tipe <i>lead rubber bearing</i> dari analisis <i>time history</i>	68
9	Tabel profil kolom hasil desain untuk portal sistem <i>rubber isolator</i> tipe <i>lead rubber bearing</i> dari analisis <i>time history</i>	69
10	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis <i>time history</i>	69

11	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis <i>time history</i>	69
12	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan pada sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis <i>time history</i>	70
13	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan pada sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis <i>time history</i>	70
14	Tabel profil balok hasil desain untuk portal sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	71
15	Tabel profil kolom hasil desain untuk portal sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	71
16	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	72
17	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	72
18	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan pada sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	76
19	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan pada sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	76
20	Koefisien ζ yang membatasi waktu getar alami Fundamental struktur gedung	77
21	Tabel profil balok hasil desain untuk sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis dinamik respon spektrum	81
22	Tabel profil kolom hasil desain untuk sistem portal biasa (<i>Fixed Base</i>) dari analisis dinamik respon spektrum	81

23	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem portal biasa dari analisis respon spektrum	82
24	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem portal biasa dari analisis respon spektrum	82
25	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan pada sistem portal biasa dari analisis respon spektrum	83
26	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan pada sistem portal biasa dari analisis respon spektrum	84
27	Tabel profil balok hasil desain untuk portal sistem <i>rubber isolator</i> tipe <i>lead rubber bearing</i> dari analisis dinamik respon spektrum	89
28	Tabel profil kolom hasil desain untuk portal sistem <i>rubber isolator</i> tipe <i>lead rubber bearing</i> dari analisis dinamik respon spektrum	89
29	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis respon spektrum	90
30	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis respon spektrum	90
31	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan pada sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis respon spektrum	91
32	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan pada sistem <i>rubber isolator</i> dari analisis respon spektrum	91
33	Tabel profil balok hasil desain untuk portal sistem <i>EBF</i> dari analisis dinamik respon spektrum	94

34	Tabel profil kolom hasil desain untuk portal sistem <i>EBF</i> dari analisis dinamik respon spektrum	94
35	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen balok untuk sistem <i>EBF</i> dari analisis respon spektrum	95
36	Tabel <i>P-M Ratio</i> elemen kolom untuk sistem <i>EBF</i> dari analisis respon spektrum	95
37	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen balok (A) yang digunakan pada sistem <i>EBF</i> dari analisis respon spektrum	96
38	Tabel data inersia (I_x, I_y) dan luas penampang elemen kolom (A) yang digunakan pada sistem <i>EBF</i> dari analisis respon spektrum	96
39	Perbandingan lebar terhadap tebal (b/t) balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	101
40	Kuat geser rencana (ϕV_n) dan kuat geser perlu (V_u) balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	102
41	Beban aksial terfaktor (N_u) dan Gaya aksial layan ($0.15N_y$) balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis <i>time history</i>	103
42	Perbandingan lebar terhadap tebal (b/t) balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis Respon Spektrum	104
43	Kuat geser rencana (ϕV_n) dan kuat geser perlu (V_u) balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis Respon Spektrum	105
44	Beban aksial terfaktor, N_u , dan Gaya aksial rencana, N_y balok link portal sistem <i>EBF</i> dari analisis Respon Spektrum	106
45	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis <i>time history</i> sistem portal biasa	108

46	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis <i>time history</i> portal sistem <i>rubber isolator</i>	108
47	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis <i>time history</i> portal sistem <i>EBF</i>	109
48	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis respon spektrum sistem portal biasa	111
49	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis respon spektrum portal sistem <i>rubber isolator</i>	111
50	Tabel <i>drift</i> dari hasil analisis Respon Spektrum portal sistem <i>EBF</i>	112
51	Kontrol nilai daktilitas struktur	129
52	Gaya-gaya dalam pada titik kritis struktur pada sistem portal biasa	131
53	Gaya-gaya dalam pada titik kritis struktur pada sistem <i>rubber isolator</i>	131
54	Gaya-gaya dalam pada titik kritis struktur pada sistem <i>EBF</i>	132
55	Rekapitulasi hasil analisis <i>drift</i> dan nilai daktilitas struktur	132

DAFTAR GAMBAR

Nomor		Halaman
1	Beberapa konfigurasi <i>Eccentrically-Braced Frames</i> (AISC, 2005)	13
2	Gaya-gaya pada elemen link	14
3	<i>Lead Rubber Bearing</i>	19
4	<i>Hysteresis loop</i> gaya-perpindahan dari <i>base isolation</i> (A. B. M. Saiful Islam dkk, 2011)	22
5	Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (ATC 58)	25
6	Pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban <i>Pushover</i>	28
7	Denah Struktur	38
8	Elevasi Portal tepi 8 Tingkat Sistem <i>EBF</i>	39
9	Elevasi Portal tengah 8 tingkat Sistem <i>EBF</i> , Sistem <i>rubber isolator (LRB)</i> dan Sistem portal biasa	40
10	Elevasi Portal tepi 8 tingkat Sistem <i>rubber isolator (LRB)</i>	41
11	<i>Degree of freedom</i> elemen plat yang didefinisikan sebagai <i>shell</i> .	42
12	Diagram <i>Free body</i> sistem <i>EBF</i>	43
13	Tampilan tiga dimensi struktur 8 tingkat Sistem <i>EBF</i>	44
14	Tampilan tiga dimensi struktur 8 tingkat Sistem <i>rubber isolator (LRB)</i>	45
15	Tampilan tiga dimensi struktur 8 tingkat Sistem	46

	portal biasa	
16	Kotak dialog <i>Link/Support properties</i>	48
17	Kotak dialog <i>Link/Support property data</i>	48
18	Kotak dialog <i>Link/Support Directional Properties</i>	49
19	Penomoran Elemen <i>Base Isolator</i> untuk portal 4	50
20	Penomoran Elemen <i>Base Isolator</i> untuk portal 3	51
21	Penomoran Elemen <i>Base Isolator</i> untuk portal 2	52
22	Penomoran Elemen <i>Base Isolator</i> untuk portal 1	53
23	Respons spektrum wilayah 6 (SNI-1726-2002)	55
24	Akselerogram <i>El Centro</i> (KAAB Mohamed Zohair, 2011)	55
25	Diagram alir penelitian	57
26	Kerangka pikir penelitian	58
27	Denah Balok	59
28	Denah Kolom	60
29	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem portal biasa arah x dari analisis <i>time history</i>	61
30	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem portal biasa arah y dari analisis <i>time history</i>	62
31	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>rubber isolator</i> arah x dari analisis <i>time history</i>	66

32	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>rubber isolator</i> arah y dari analisis <i>time history</i>	67
33	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>EBF</i> arah x dari analisis <i>time history</i>	73
34	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>EBF</i> arah y dari analisis <i>time history</i>	74
35	Faktor reduksi gempa terhadap gaya geser dasar untuk sistem portal biasa	78
36	Faktor reduksi gempa terhadap gaya geser dasar untuk sistem <i>EBF</i>	80
37	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem portal biasa arah x dari analisis respon spektrum	85
38	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem portal biasa arah y dari analisis respon spektrum	86
39	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>rubber isolator</i> arah x dari analisis respon spektrum	87
40	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>rubber isolator</i> arah y dari analisis respon spektrum	88
41	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>EBF</i> arah x dari analisis respon spektrum	92
42	Indikator Rasio Kuat perlu dengan Kuat nominal (<i>P-M Ratio</i>) elemen balok dan kolom Sistem <i>EBF</i> arah y dari analisis respon spektrum	93

43	<i>Drift</i> arah x dari ketiga sistem struktur berdasarkan analisis <i>time history</i>	109
44	<i>Drift</i> arah y dari ketiga sistem struktur berdasarkan analisis <i>time history</i>	110
45	<i>Drift</i> arah x dari ketiga sistem struktur berdasarkan analisis respon spektrum	113
46	<i>Drift</i> arah y dari ketiga sistem struktur berdasarkan analisis respon spektrum	113
47	Kurva <i>pushover</i> arah x dari sistem portal biasa	118
48	Sendi plastis pada <i>step</i> 3 analisa <i>pushover</i> dari sistem portal biasa	119
49	Sendi plastis pada <i>step</i> 4 analisa <i>pushover</i> dari sistem portal biasa	120
50	Sendi plastis pada <i>step</i> 6 analisa <i>pushover</i> dari sistem portal biasa	120
51	Kurva <i>pushover</i> arah x untuk sistem <i>rubber isolator</i>	121
52	Sendi plastis pada <i>step</i> 4 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>rubber isolator</i>	123
53	Sendi plastis pada <i>step</i> 5 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>rubber isolator</i>	123
54	Sendi plastis pada <i>step</i> 6 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>rubber isolator</i>	124
55	Sendi plastis pada <i>step</i> 7 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>rubber isolator</i>	124
56	Kurva <i>pushover</i> arah x untuk sistem <i>EBF</i>	125
57	Sendi plastis pada <i>step</i> 1 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>EBF</i>	126
58	Sendi plastis pada <i>step</i> 2 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>EBF</i>	127

59	Sendi plastis pada <i>step</i> 3 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>EBF</i>	127
60	Sendi plastis pada <i>step</i> 4 analisa <i>pushover</i> dari sistem <i>EBF</i>	128
61	Kurva <i>Pushover</i> gabungan dari sistem portal biasa, sistem <i>rubber isolator</i> dan sistem <i>EBF</i>	130

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang/Singkatan	Arti dan keterangan
A	Luas penampang profil baja
A_g	Luas Penampang Bruto
A_{pl}	Luas inti <i>Lead Rubber Bearing</i>
A_r	Luas bidang karet
A_w	Luas Pelat Badan
b	Lebar Sayap
C	Faktor respon gempa
C_m	Faktor massa efektif yang diambil dari Tabel 3-1 dari <i>FEMA 356</i>
C_0	Koefisien faktor bentuk
C_1	Faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik linier
C_2	Koefisien untuk memperhitungkan efek <i>pinching</i> dari hubungan beban-deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan Tabel 3-3 dari <i>FEMA 356</i>
C_3	Koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta
D	Perpindahan titik acuan pada atap
d	Tinggi penampang
DL	Beban Mati

d_b	Tinggi Bruto Penampang
E	Beban Gempa
e	Panjang Link
e_{all}	Panjang Link yang diisyaratkan
f'_c	Kuat Tekan Karakteristik
F_m	Gaya pada saat perpindahan maksimum
f_u	Tegangan Putus
f_y	Tegangan Leleh Baja
F_{zd}	Gaya Vertikal Layan
F_2	Gaya Horisontal Layan
G	Modulus Geser
g	Percepatan Gravitasi
G_Y	Modulus Geser isolator
I	Faktor keutamaan
I_x	Momen inersia sumbu x
I_y	Momen inersia sumbu y
K_e	Kekakuan Lateral Efektif
K_{eff}	Kekakuan Efektif
K_i	Kekakuan awal
K_r	Kekakuan Setelah leleh
K_u	Kekakuan Elastis
LL	Beban Hidup
M_p	Momen Plastis

N_u	Beban aksial terfaktor pada Link
Q_d	Kekuatan karakteristik
R	Rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung
R	Faktor reduksi gempa
S_a	Akselerasi Puncak
S_d	Puncak perpindahan spektra elastis
T	Periode Getar Alami
t	Tebal Sayap
T_e	Waktu getar efektif
t_f	Tebal Flens
T_i	Periode alami awal
T_r	Tebal Karet
TS	Waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan
t_w	Tebal badan penampang
T_1	Waktu getar alami fundamental
V	Gaya geser dasar
V_n	Kuat Geser Rencana Link
V_p	Kapasitas Geser Plastis
V_{rsp}	Gaya geser dasar akibat beban gempa dinamik

V_t	Gaya geser dasar nominal
V_u	Kuat Geser Perlu
V_y	Kuat leleh bangunan
V_1	Gaya geser dasar ragam pertama
W	Berat bangunan total
W_t	Berat total struktur
Z_x	Modulus penampang sumbu x
α	Rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya-lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinear
β_{eff}	Redaman Efektif
Δ	Perpindahan Lateral/drift
Δ_m	Perpindahan Lateral Maksimum
Δ_y	Perpindahan Setelah Leleh
δ_m	simpangan maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana
$\bar{\delta}_u$	Perpindahan Maksimum
δ_t	Target perpindahan
$\bar{\delta}_y$	Perpindahan pada saat Leleh
ϵ_u	Regangan maksimum
ϵ_y	Regangan Leleh
θ_u	Putaran sudut maksimum
θ_y	Putaran sudut pada saat leleh
σ_y	Tegangan Leleh inti

μ	Faktor daktilitas struktur gedung
μ	Nisbah poisson
μ_m	Faktor daktilitas maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur gedung
μ_δ	Daktilitas perpindahan
μ_ε	Daktilitas regangan
μ_θ	Daktilitas rotasi
ρ'	Rasio antara gaya aksial terfaktor dengan gaya geser terfaktor
ϕ	Faktor reduksi kekuatan
ζ	Koefisien yang membatasi waktu getar alami fundamental

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Indonesia terletak pada wilayah geografis pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Philipina. Keadaan ini menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara yang memiliki potensi aktivitas seismik cukup tinggi dan rawan terhadap bahaya gempa. Karena tingginya aktifitas seismik tersebut, maka dalam perencanaan bangunan di Indonesia harus diperhitungkan aspek-aspek kegempaan, disamping tinjauan aspek-aspek pembebanan lainnya. Dalam kurun waktu 9 tahun terakhir ada 6 gempa besar yang terjadi di Indonesia yang cukup memakan korban jiwa dan kerugian materil yang cukup besar yaitu, gempa Nanggroe Aceh Darussalam (NAD) 11 April 2012, gempa bumi Singkil 2011, gempa bumi di Sumatera Barat tahun 2009 berkekuatan 7.6 SR, gempa bumi Bengkulu tahun 2007 berkekuatan 7.9 SR, gempa bumi Jawa Barat 17 juli tahun 2006 berkekuatan 7.7 SR, dan gempa NAD 26 Desember 2004 yang menimbulkan tsunami.

Beban gempa sulit diukur baik jenis maupun besarnya. Dimensi dan geometri struktur yang tidak tepat dapat memperbesar getaran yang terjadi akibat terjadinya resonansi dan struktur bangunan tidak mampu untuk menerima beban-beban dinamik tersebut, sehingga performa

bangunan menjadi sangat rendah dan dapat mengakibatkan kerusakan struktural yang tidak diharapkan.

Bangunan pada daerah rawan gempa harus direncanakan mampu bertahan terhadap gempa. Metode perencanaan yang terkini yaitu *performance based seismic design*, yang merupakan teknik analisa non-linier berbasis komputer untuk menganalisa perilaku inelastis struktur dari berbagai macam gempa, sehingga dapat diketahui kinerjanya pada kondisi inelastis (Wiryanto Dewobroto, 2005). Selanjutnya dapat dilakukan tindakan bilamana tidak memenuhi persyaratan yang diperlukan. Metode tersebut mulai populer sejak diterbitkannya dokumen *Vision 2000* (SEAOC, 1995) dan *NEHRP* (BSSC, 1995), yang didefinisikan sebagai strategi dalam perencanaan, pelaksanaan dan perawatan/perkuatan sedemikian agar suatu bangunan mampu berkinerja pada suatu kondisi gempa yang ditetapkan, yang diukur dari besarnya kerusakan dan dampak perbaikan yang diperlukan. Kriteria kinerja yang ditetapkan *Vision 2000* dan *NEHRP* dipaparkan pada tabel 1.

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistik terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang.

Tabel 1. Kriteria Kinerja

Level Kinerja		Penjelasan
NEHRP	Vision 2000	
<i>Operational</i>	<i>Fully Functional</i>	Tak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur, bangunan tetap berfungsi.
<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Operational</i>	Tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur, dimana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Komponen non-struktur masih berada ditempatnya dan sebagian besar masih berfungsi jika utilitasnya tersedia. Bangunan dapat tetap berfungsi dan tidak terganggu dengan masalah perbaikan.
<i>Life Safety</i>	<i>Life Safe</i>	Terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Komponen non-struktur masih ada tetapi tidak berfungsi. Dapat dipakai lagi jika sudah dilakukan perbaikan.
<i>Collapse Prevention</i>	<i>Near Collapse</i>	Kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan non-struktur. Kekuatan struktur dan kekakuannya berkurang banyak, hampir runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi.

Sumber : (Wiryanto Dewobroto, 2005)

Berdasarkan kriteria kinerja pada tabel 1 maka perlu perencanaan bangunan tahan gempa pada bangunan-bangunan yang memiliki fungsi atau peranan yang vital bagi masyarakat maupun pemerintah. Struktur baja merupakan salah satu sistem struktur yang baik pada daerah rawan

gempa, karena material baja mempunyai sifat daktilitas dan kekuatan yang tinggi. Tiga sistem struktur baja tahan gempa yang umum digunakan yaitu : Rangka penahan momen (*Momen Resisting Frame/MRF*), Rangka berpenguat eksentrik (*Concentrically-Braced Frame/CBF*), Rangka berpenguat eksentris (*Eccentrically-Braced Frame/EBF*). Masing-masing sistem struktur tersebut mempunyai karakteristik yang berbeda yaitu :

- *MRF* : Mempunyai daktilitas yang baik, tetapi kurang kaku.
- *CBF* : Mempunyai kekakuan yang baik, tetapi kurang daktil.
- *EBF* : Tidak lebih kaku dari *CBF* namun mempunyai daktilitas yang lebih baik dari *CBF*.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan sistem *EBF* lebih baik dari sistem *CBF* karena dianggap mampu menggabungkan keunggulan dan menutupi kekurangan sistem *CBF* dan *momen resistant frame (MRF)*. Pada tahun 2006, Berman JW telah melakukan eksperimen terhadap *Eccentrically-Braced Frame/EBF*. Dari hasil analisa dan eksperimen yang dilakukan, *Eccentrically-Braced Frame/EBF* lebih stabil terhadap *lateral torsional buckling* dan lebih daktil.

Selain dari sistem *bracing*/penguat pada struktur tahan gempa muncul konsep baru mengenai bangunan tahan gempa. Gagasan dari konsep ini ialah bangunan tahan gempa tidak didesain dengan memperkuat tahanan strukturnya terhadap gaya gempa melainkan bagaimana cara mereduksi gaya gempa yang bekerja pada bangunan tersebut dengan menambah suatu sistem struktur yang dikhususkan untuk menyerap sebagian energi gempa yang masuk ke bangunan

sehingga hanya sebagian kecil (sisanya) yang akan dipikul oleh komponen struktur bangunan tersebut. Sistem struktur yang mampu mereduksi gaya gempa dan menyerap energi gempa ini dikenal dengan nama *base isolator* atau isolasi seismik.

Base isolator terdiri dari lapisan-lapisan karet baik karet alam maupun karet sintetis yang mempunyai nisbah redaman tertentu. Untuk menahan beban vertikal (tidak terjadi tekuk), maka karet diberi lempengan baja yang dilekatkan ke lapisan karet dengan sistem vulkanisir. Secara umum base isolator terdiri dari beberapa tipe yaitu:

- 1.) *Lead Rubber Bearing (LRB)*
- 2.) *High Damping Rubber Bearing (HDRB)*
- 3.) *Friction Pendulum System (FPS)*

Konsep isolasi seismik merupakan konsep yang telah berkembang dan banyak digunakan oleh negara-negara di dunia yang memiliki resiko gempa tinggi seperti Jepang, Italy, USA, Selandia Baru, Indonesia, Turki, China, Taiwan, Portugal, Iran dan lain-lain. Beberapa peneliti (*Connor, 2003; Housner, dkk, 1997; Kelly, 1986*) telah berusaha untuk mempelajari kinerja dan parameter desain paling menguntungkan untuk sistem isolasi dasar dengan menggunakan berbagai jenis isolator yang berbeda. Berbagai *base isolator* seperti *lead rubber bearings, frictional/ sliding bearings, high damping rubber bearing* juga telah dikembangkan dan digunakan dalam desain bangunan tahan gempa dan jembatan selama 30 tahun terakhir di banyak negara.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang masalah, maka dalam penelitian ini pokok permasalahan yang ada dirumuskan sebagai berikut :

1. Bagaimana membandingkan level kinerja struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator* berdasarkan dokumen *Vision 2000* dan *NEHRP*.
2. Bagaimana membandingkan daktilitas struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator*.
3. Bagaimana membandingkan analisis *Drift* struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator*.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah :

1. Menentukan level kinerja struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator* berdasarkan dokumen *Vision 2000* dan *NEHRP*.
2. Menentukan dan membandingkan *Drift* antara struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator* pada kondisi linier.
3. Menentukan dan membandingkan daktilitas struktur baja tahan gempa sistem *EBF* dan sistem *Rubber Isolator*.

D. Batasan Masalah

Agar penelitian dapat berjalan efektif dan mencapai sasaran yang diinginkan maka penelitian dibatasi pada :

1. Desain dan analisis struktur menggunakan bantuan program komputer *SAP 2000*.
2. Model struktur bangunan yang akan di analisis adalah bangunan simetrik beraturan bertingkat 8, difungsikan sebagai kantor, berlokasi di zona gempa wilayah 6 di Indonesia.
3. Tipe *Rubber Isolator* yang akan digunakan pada struktur adalah tipe *Lead Rubber Bearing* yang diproduksi oleh *FIP Industriale*.
4. Tipe *Bracing* yang akan digunakan pada struktur adalah *Split-K-Braced EBF*.
5. Akselerogram yang digunakan adalah *El Centro* dengan nilai damping sebesar 5%.
6. Tidak menganalisa efek torsi.
7. Tidak menganalisa elemen plat dan perilaku material elemen.

E. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai bahan masukan bagi dunia perkonstruksian khususnya pada perencanaan struktur baja tahan gempa yang menggunakan pengaku (*bracing*) dan *Base isolator*.
2. Level Kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas, sehingga perencana dapat memberikan opsi kepada pemilik, penyewa

, asuransi, pemerintah atau penyandang dana dalam sebuah proyek konstruksi baja tahan gempa untuk menetapkan level kinerja apa yang akan dipilih, selanjutnya ketentuan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedoman dalam mendesain.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Struktur Baja Tahan Gempa

Struktur baja merupakan salah satu sistem struktur tahan gempa dengan kinerja yang sangat baik, karena material baja mempunyai karakteristik yang unik dibandingkan dengan material struktur lainnya, dengan mengandalkan pada sifat daktilitas dan kekuatannya yang tinggi maka struktur baja sangat cocok digunakan untuk daerah-daerah dengan tingkat seismisitas yang tinggi. Dari hasil-hasil riset yang pernah dilakukan telah didapatkan tiga sistem struktur baja tahan gempa yang umum digunakan yaitu:

- (1) Rangka penahan momen (*Moment Resisting Frame/MRF*).
- (2) Rangka berpengaku konsentrik (*Concentrically-Braced Frame/CBF*).
- (3) Rangka berpengaku eksentrik (*Eccentrically-Braced Frame/ EBF*).

Rangka baja penahan momen (*MRF*) mempunyai kemampuan dissipasi energi yang cukup untuk dapat memberikan daktilitas yang diperlukan (*required ductility*) tetapi struktur ini kurang kaku sehingga memerlukan ukuran penampang yang lebih besar dan panel zone pelat ganda yang mahal untuk memenuhi persyaratan *drift* (*drift requirements*). Pada sisi lain sistem rangka berpengaku konsentrik (*CBF*) secara efisien dapat memenuhi batas-batas lendutan melalui aksi rangkanya tetapi tidak

memberikan suatu mekanisme yang stabil dalam disipasi energi (Popov, 1983). Karena keterbatasan kedua sistem struktur tersebut maka dikembangkan suatu sistem struktur baru yang disebut struktur rangka berpengaku eksentrik (*EBF*).

B. Struktur Gedung Beraturan

Menurut SNI 1726-2002 pasal 4.2 hal 12, Struktur gedung ditetapkan sebagai struktur gedung beraturan, apabila memenuhi ketentuan sebagai berikut :

- Tinggi struktur gedung diukur dari taraf penjepitan lateral tidak lebih dari 10 tingkat atau 40 m.
- Denah struktur gedung adalah persegi panjang tanpa tonjolan dan walaupun mempunyai tonjolan, panjang tonjolan tersebut tidak lebih dari 25% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah tonjolan tersebut.
- Denah struktur gedung tidak menunjukkan coakan sudut dan walaupun mempunyai coakan sudut, panjang sisi coakan tersebut tidak lebih dari 15% dari ukuran terbesar denah struktur gedung dalam arah sisi coakan tersebut.
- Sistem struktur gedung terbentuk oleh subsistem-subsistem penahan beban lateral yang arahnya saling tegak lurus dan sejajar dengan sumbu-sumbu utama orthogonal denah struktur gedung secara keseluruhan.

- Sistem struktur gedung tidak menunjukkan loncatan bidang muka dan walaupun mempunyai loncatan bidang muka, ukuran dari denah struktur bagian gedung yang menjulang dalam masing-masing arah, tidak kurang dari 75% dari ukuran terbesar denah struktur bagian gedung sebelah bawahnya. Dalam hal ini, struktur rumah atap yang tingginya tidak lebih dari 2 tingkat tidak perlu dianggap menyebabkan adanya loncatan bidang muka.
- Sistem struktur gedung memiliki kekakuan lateral yang beraturan, tanpa adanya tingkat lunak. Yang dimaksud dengan tingkat lunak adalah suatu tingkat, di mana kekakuan lateralnya adalah kurang dari 70% kekakuan lateral tingkat di atasnya atau kurang dari 80% kekakuan lateral rata-rata 3 tingkat di atasnya. Dalam hal ini, yang dimaksud dengan kekakuan lateral suatu tingkat adalah gaya geser yang bila bekerja di tingkat itu menyebabkan satu satuan simpangan antar-tingkat.
- Sistem struktur gedung memiliki berat lantai tingkat yang beraturan, artinya setiap lantai tingkat memiliki berat yang tidak lebih dari 150% dari berat lantai tingkat di atasnya atau di bawahnya. Berat atap atau rumah atap tidak perlu memenuhi ketentuan ini.
- Sistem struktur gedung memiliki unsur-unsur vertikal dari sistem penahan beban lateral yang menerus, tanpa perpindahan titik

beratnya, kecuali bila perpindahan tersebut tidak lebih dari setengah ukuran unsur dalam arah perpindahan tersebut.

- Sistem struktur gedung memiliki lantai tingkat yang menerus, tanpa lubang atau bukaan yang luasnya lebih dari 50% luas seluruh lantai tingkat. Kalaupun ada lantai tingkat dengan lubang atau bukaan seperti itu, jumlahnya tidak boleh melebihi 20%

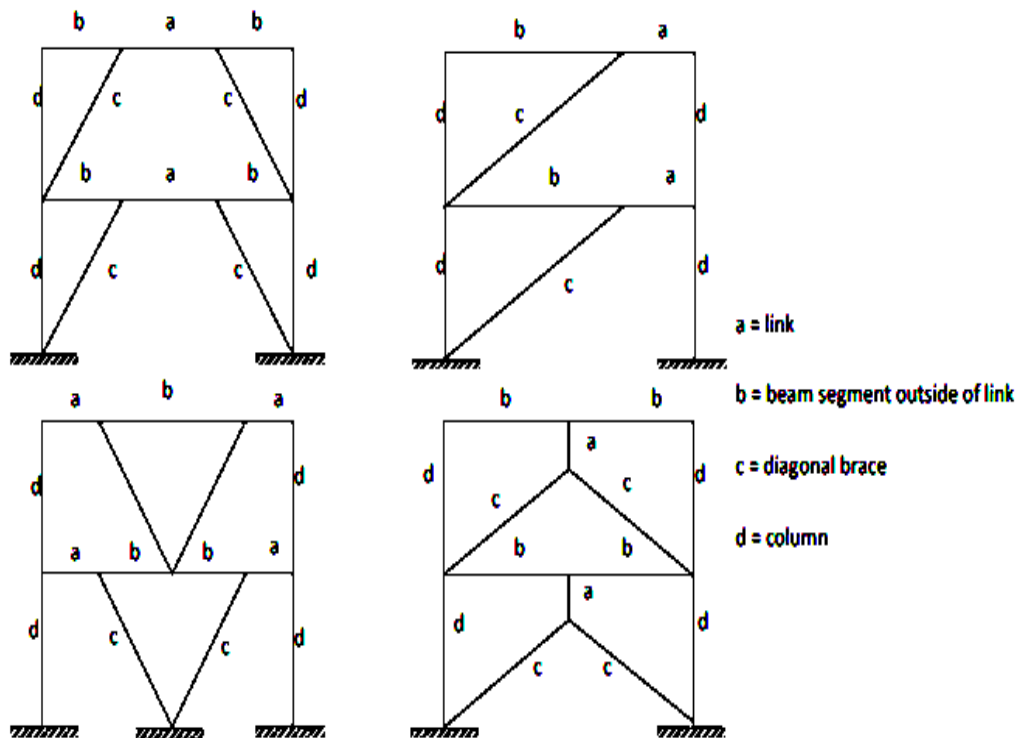
dari jumlah lantai tingkat seluruhnya.

C. Rangka Pengaku Eksentrik (*EBF/Eccentrically-Braced Frame*)

Eccentrically-Braced Frames (EBF) merupakan konsep desain gabungan antara konsep daktilitas dan disipasi energi yang baik dari desain *Moment Resisting Frames (MRF)* dengan karakteristik kekakuan elastik yang tinggi dari desain *Centrically-Braced Frames (CBF)*. Karakteristik yang membedakan *EBF* dengan desain struktur tahan gempa *MRF* dan *CBF* adalah adanya penghubung yang terdapat pada setidaknya salah satu ujung dari *bracing* yang disebut sebagai Link (Gambar 1). Konsep desain tahan gempa *EBF* adalah elemen link ditetapkan sebagai bagian yang akan rusak sedangkan elemen lain diharapkan tetap berada dalam kondisi elastik. Kelelahan yang terjadi pada elemen link dapat berupa kelelahan geser atau kelelahan lentur. Tipe kelelahan ini sangat tergantung pada panjang link tersebut (*Engelhardt dan Popov, 1992*).

Sistem *Eccentrically-Braced Frames (EBF)* memiliki beberapa karakteristik untuk menahan beban gempa yaitu :

- Sistem *EBF* dapat didesain untuk kekakuan atau kontrol *drift*
- Balok Link didesain pada kondisi leleh geser atau lentur sebelum terjadinya tekuk atau leleh pada batang *bracing*.
- Pelelehan pada balok link adalah aksi daktail dari balok link yang menyerap energi dan mengurangi respon dinamik struktur dengan meningkatkan redaman dan waktu getar alami dari bangunan (Herman Parung, 2012).

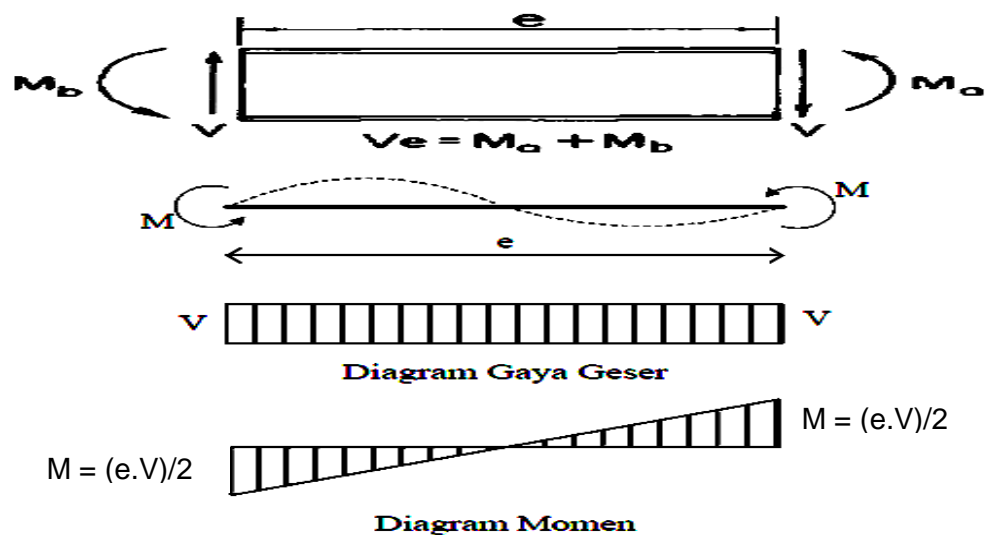


Gambar 1. Beberapa konfigurasi *Eccentrically-Braced Frames* (AISC, 2005)

D. Elemen Link

Link adalah salah satu elemen yang terdapat dalam sistem *EBF* yang berperilaku sebagai balok pendek yang pada kedua sisinya bekerja gaya

geser dengan arah yang berlawanan serta momen lentur yang diakibatkan oleh gaya geser tersebut (Yurisman dkk, 2009). Karena gaya geser yang berlawanan arah maka momen yang bekerja pada ujung-ujung elemen link mempunyai besar dan arah yang sama seperti yang diperlihatkan dalam gambar 2. Plastifikasi yang terjadi pada elemen link disebabkan oleh kedua gaya tersebut di atas, oleh karena itu maka perilaku elemen link secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua tipe yaitu link lentur (*moment link*) dan link geser (*shear link*) (Popov, Engelhardt, 1992). Link dikatakan sebagai link geser apabila kelelahan yang terjadi disebabkan oleh gaya geser, dan dikatakan sebagai link lentur apabila kelelahan yang terjadi disebabkan oleh momen lentur.



Gambar 2. Gaya-gaya pada elemen link

Panjang link yang disyaratkan (e_{all}) disesuaikan dengan klasifikasi link berdasarkan perbedaan panjang berdasarkan AISC, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. Mekanisme kelelahan link, kapasitas energi

disipasi dan mode kegagalan sangat erat hubungannya dengan faktor panjang dari link. Untuk link pendek, perilaku inelastik dominan terhadap gaya geser, sebaliknya untuk link panjang perilaku inelastis didominasi oleh lentur. Untuk link antara (*intermediate link*), kelelahan dipengaruhi oleh geser dan lentur.

Kelelahan geser terjadi seragam sepanjang link. Untuk link yang sangat pendek gaya geser link mencapai kapasitas geser plastis ($V_p = 0.6 \cdot d \cdot t_w \cdot f_y$), sebelum momen ujung mencapai momen plastis ($M_p = Z_x \cdot f_y$), dan link leleh akibat geser membentuk sebuah sendi geser.

Dimana :

d = Tinggi penampang (mm)

t_w = Tebal badan penampang (mm)

Z_x = Modulus penampang sumbu x (cm^3)

f_y = Tegangan leleh baja (MPa)

Untuk link yang lebih panjang, momen ujung mencapai momen plastis membentuk sendi-sendi lentur sebelum terjadinya kelelahan geser. Mekanisme keruntuhan yang terjadi pada link panjang disebabkan karena deformasi lentur yang menyebabkan terjadinya kegagalan yang merupakan kombinasi dari terjadinya *buckling* pada sayap (*flens*), *compression buckling* pada badan (*web*) dan *lateral torsional buckling*. Sebagai tambahan, akibat regangan yang sangat besar pada kedua ujung link maka besar kemungkinan terjadinya fraktur pada sambungan

las ujung pada saat terjadi ragam keruntuhan batas (*The ultimate failure mode*).

Klasifikasi link berdasarkan perbedaan panjang berdasarkan *AISC, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* adalah sebagai berikut :

a. Link geser murni ($e \leq 1.6 M_p/V_p$)

Kelelahan pada link jenis ini didominasi oleh geser.

b. Link dominan geser ($1.6 M_p/V_p \leq e \leq 2.6 M_p/V_p$).

Kelelahan pada link jenis ini merupakan kombinasi antara geser dan lentur.

c. Link dominan lentur ($2.6 M_p/V_p < e \leq 5 M_p/V_p$).

Kelelahan pada link jenis ini merupakan kombinasi antara geser dan lentur.

d. Link lentur murni ($e \geq 5 M_p/V_p$).

Kelelahan pada link jenis ini didominasi oleh lentur.

Menurut SNI-03-1729-2002 halaman 147 untuk perencanaan baja tahan gempa link harus memenuhi persyaratan berikut :

- Untuk Sayap-sayap profil I perbandingan lebar terhadap tebal (b/t) harus lebih kecil dari λ_p

$$\frac{b}{t} < \frac{135}{\sqrt{f_y}} \quad (1)$$

- Tegangan leleh bahan baja yang digunakan pada link tidak boleh melebihi 350 MPa.
- kuat geser rencana link (ϕV_n) harus lebih besar daripada kuat geser perlu V_u , dengan:

V_n = Kuat geser nominal link, diambil yang terkecil dari V_p atau $2M_p/e$

$$V_p = 0.6 f_y (d - 2t_f)t_w \quad (2)$$

t_f = Tebal Sayap

ϕ = 0.9

e = Panjang link

- Apabila beban aksial terfaktor pada link (N_u) tidak melebihi $0.15N_y$, dengan $N_y = A_g f_y$, pengaruh gaya aksial pada kuat geser rencana Link tidak perlu diperhitungkan. A_g adalah luas penampang bruto (mm^2)
- Apabila beban terfaktor pada link (N_u), melebihi $0.15N_y$, ketentuan tambahan berikut ini harus dipenuhi:

1) Kuat geser rencana link harus ditentukan sebagai nilai terkecil

dari ϕV_{pa} atau $2 \phi M_{pa}/e$, dengan:

$$V_{pa} = V_p \sqrt{1 - (N_u/N_y)^2} \quad (3)$$

$$M_{pa} = 1.18M_p [1 - (N_u/N_y)] \quad (4)$$

$\phi = 0.9$

2) Panjang Link tidak boleh melebihi:

$$[1, 15 - 0,5\rho'(A_w/A_g)] 1.6M_p/V_p \text{ untuk } \rho' (A_w/A_g) \geq 0.3 \quad (5)$$

$$1.6M_p / V_p \text{ untuk } \rho' (A_w/A_g) < 0.3 \quad (6)$$

Dimana:

$$A_w = (d_b - 2t_f)t_w \quad (7)$$

$$\rho' = N_u/V_u \quad (8)$$

d_b = Tinggi bruto penampang (mm)

E. Sistem Isolasi Dasar Seismik

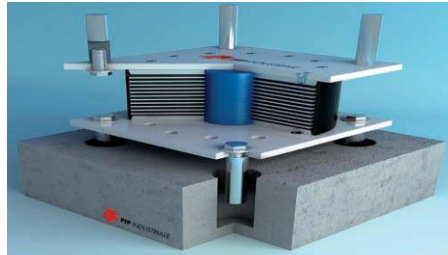
Salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan akibat gempa bumi adalah dengan mengembangkan desain struktur dengan sistem isolasi dasar pada bangunan (*Base isolated system*). Ada dua sistem isolasi dasar yang umum digunakan dewasa ini yaitu sistem isolasi dengan menggunakan bantalan *elastomeric* dan *friction pendulum system*.

Prinsip utama cara kerja base isolator jenis *elastomeric* (*HDRB* atau *LRB*) adalah dengan memperpanjang waktu getar alami struktur diluar frekuensi dominan gempa sampai 2.5 atau 3 kali dari waktu getar struktur tanpa isolator (*Fixed base structures*) dan memiliki damping antara 10 sampai dengan 20% bahkan di atas 20%. Akibatnya gaya gempa yang disalurkan ke struktur menjadi lebih kecil.

F. Lead Rubber Bearing (LRB)

Lead rubber bearing adalah *laminated rubber bearing* yang lebih besar terbuat dari lapisan karet dan dipadu dengan lapisan baja, tetapi ditengahnya diberi rongga yang diisi dengan *lead* (perunggu). Lapisan karet yang divulkanisir yang bisa bergerak ke semua arah horizontal dilaminasi diantara lapisan baja yang mampu menahan beban aksial. *Lead* (perunggu) yang terletak ditengah berfungsi sebagai tempat

penyerapan energi sehingga mampu mengurangi gaya gempa dan perpindahan.



Gambar 3. *Lead Rubber Bearing*

Lapisan karet pada bantalan memberikan fleksibilitas lateral sedangkan lapisan baja memberikan kemampuan untuk menahan beban aksial. Lapisan penutup karet pada bantalan berfungsi untuk melindungi pelat baja agar tidak korosi. Pelat baja pada bagian atas dan bawah bantalan berfungsi untuk menghubungkan isolator dengan struktur di atas dan dibawahnya.

Lead rubber bearing (LRB) didesain sangat kaku dan kuat diarah vertikal dan lentur diarah horizontal sehingga beban vertikal dan lateral yang kecil bisa didukung tanpa menimbulkan perpindahan yang berarti. *LRB* mengalami kelelahan pada tegangan rendah dan berperilaku sebagai solid elastis-plastis. Kekakuan pasca kelelahan dapat direpresentasikan oleh kekakuan geser lapisan karet. Selain itu, *LRB* memiliki propertis kelelahan yang baik terhadap *cyclic loading* karena dapat memulihkan hampir seluruh propertis mekaniknya tepat setelah terjadi kelelahan.

Secara garis besar tahap-tahap dalam mendesain *lead rubber bearing* adalah (A. B. M. Saiful Islam dkk, 2011) :

- Menentukan Kekuatan karakteristik, Q_d (N)

$$Q_d = \sigma_y \cdot A_{pl} \quad (9)$$

Dimana :

σ_y = Tegangan leleh inti (MPa)

A_{pl} = Luas inti *Lead rubber bearing* (mm²)

- Menentukan kekakuan setelah leleh, K_r (N/mm)

$$K_r = \frac{G_Y A_{pl}}{T_r} \quad (10)$$

Dimana :

G_Y = Modulus Geser (MPa)

A_{pl} = Luas inti *Lead rubber bearing* (mm²)

T_r = Tebal Karet (mm)

- Menentukan kekakuan efektif, K_{eff} (N/mm) dari *lead rubber bearing*.

$$K_{eff} = K_r + \frac{Q_d}{\Delta} \quad (11)$$

Dimana :

$K_r = K_d$ = Kekakuan setelah leleh

Q_d = Kekuatan karakteristik

Δ = Perpindahan Horisontal

Δ_y = Perpindahan setelah leleh

- Menentukan perioda getar alami, T(detik)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_{\text{eff}} \cdot g}} \quad (12)$$

Dimana :

g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s²)

W = Berat Bangunan Total (N)

- Menentukan kekakuan elastis, K_u (kN/mm)

$$K_u = 6.5K_r \left(1 + \frac{12A_{\text{pl}}}{A_r}\right) \quad (13)$$

Dimana :

A_{pl} = Luas inti *Lead rubber bearing* (mm²)

A_r = Luas bidang karet (mm²)

- Menentukan redaman efektif (β_{eff})

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{4Q_d(\Delta_m - \Delta_y)}{2\pi\Delta_m^2} \quad (14)$$

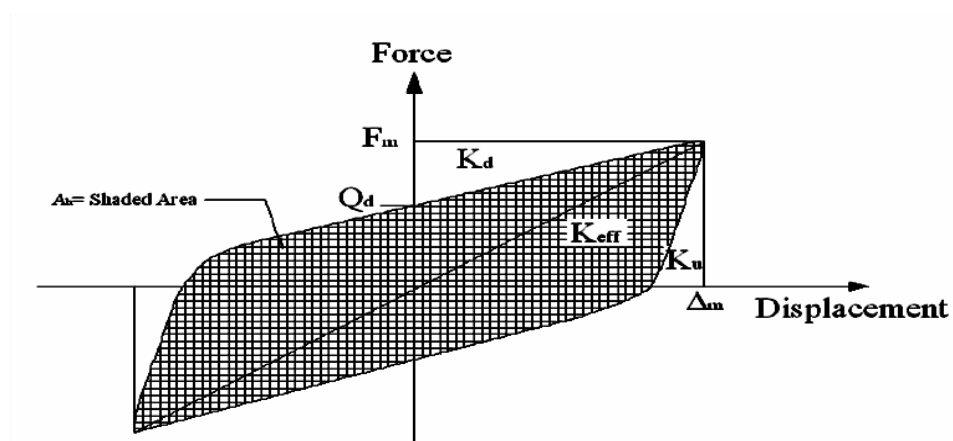
Dimana :

Δ_m = Perpindahan lateral maksimum (mm)

Δ = Perpindahan Lateral (mm)

Material karet pada *LRB* berfungsi sebagai material isolasi getaran selama lebih dari satu abad. Perkembangan yang terbesar pada isolator karet terjadi karena penemuan teknik penggabungan metal dengan karet melalui proses vulkanisasi, sehingga dimungkinkan membuat unit isolator

dengan dimensi dan karakteristik yang diinginkan yang dapat menerima beban tekan, tarik dan geser.



Gambar 4. *Hysteresis loop* gaya-perpindahan dari *base isolation* (A. B. M. Saiful Islam dkk, 2011)

G. Analisis Dinamik Linier

Analisis dinamik linier dipakai untuk memperoleh hasil evaluasi yang lebih akurat dari gaya gempa dan perilaku struktur pada kondisi elastis. Ada dua metode yang dapat digunakan yaitu :

1. Analisis Linier Respons spektrum

suatu cara analisis untuk menentukan respons dinamik struktur gedung 3 dimensi yang berperilaku elastik penuh terhadap pengaruh suatu gempa melalui suatu metoda analisis yang dikenal dengan analisis ragam spektrum respons, di mana respons dinamik total struktur gedung tersebut didapat sebagai superposisi dari respons dinamik maksimum

masing-masing ragamnya yang didapat melalui spektrum respons gempa rencana.

SNI 03-1726-2003 pasal 7.1.3 menyatakan bahwa nilai akhir respon dinamik struktur gedung terhadap gempa nominal gempa rencana tidak boleh diambil kurang dari 80% nilai respon spektrum ragam yang pertama. Bila respon dinamik struktur gedung dinyatakan dalam gaya geser dasar nominal V_t , maka persyaratannya dinyatakan menurut persamaan 15 dimana C adalah faktor respon gempa, I adalah faktor keutamaan bangunan, W_t adalah berat total struktur dan R adalah faktor daktilitas.

$$V_t > 0.8(C.I.W_t)/R \quad (15)$$

SNI 03-1726-2002 pasal 5.6 menyatakan untuk mencegah penggunaan struktur gedung yang terlalu fleksibel, nilai waktu getar alami fundamental (T_1) dari struktur gedung harus dibatasi, bergantung pada koefisien ζ untuk wilayah gempa tempat struktur gedung berada dan jumlah tingkatnya (n) menurut persamaan :

$$T_1 < \zeta n \quad (16)$$

2. Analisis linier *Time History*

Suatu cara analisis untuk menentukan riwayat waktu respons dinamik struktur gedung 3 dimensi yang berperilaku elastik penuh terhadap gerakan tanah akibat gempa rencana pada taraf pembebanan gempa nominal sebagai data masukan, dimana respons dinamik dalam setiap

interval waktu dihitung dengan metoda integrasi langsung atau dapat juga melalui metoda analisis ragam.

H. Perencanaan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

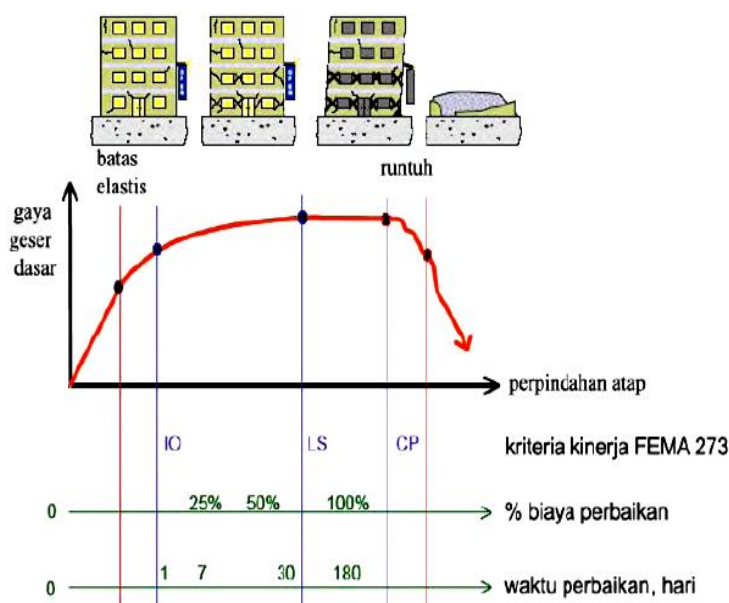
Saat ini, sebagian besar bangunan tahan gempa direncanakan dengan prosedur yang ditulis dalam peraturan perencanaan bangunan (*building codes*). Peraturan dibuat untuk menjamin keselamatan penghuni terhadap gempa besar yang mungkin terjadi, dan untuk menghindari atau mengurangi kerusakan atau kerugian harta benda terhadap gempa sedang yang sering terjadi. Meskipun demikian, prosedur yang digunakan dalam peraturan tersebut tidak dapat secara langsung menunjukkan kinerja bangunan terhadap suatu gempa yang sebenarnya, kinerja tadi tentu terkait dengan resiko yang dihadapi pemilik bangunan dan investasi yang dibelanjakan terkait dengan resiko diambil.

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang.

Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian gempa. Setiap simulasi

memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi. Perencana selanjutnya dapat mengatur ulang resiko kerusakan yang dapat diterima sesuai dengan resiko biaya yang dikeluarkan.

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah sasaran kinerja bangunan terhadap gempa dinyatakan secara jelas, sehingga pemilik, penyewa, asuransi, pemerintah atau penyandang dana mempunyai kesempatan untuk menetapkan kondisi apa yang dipilih, selanjutnya ketentuan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedomannya (Wiryanto Dewobroto, 2005).



Gambar 5. Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (ATC 58)

Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*), dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut. Mengacu pada *FEMA-273 (1997)* yang menjadi acuan bagi perencanaan berbasis kinerja maka kategori level kinerja struktur, adalah :

- Segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*).
- Keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life-Safety*).
- Terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*).

Gambar 5 menjelaskan secara kualitatif level kinerja (*performance levels*) *FEMA 273* yang digambarkan bersama dengan suatu kurva hubungan gaya-perpindahan yang menunjukkan perilaku struktur secara menyeluruh (global) terhadap pembebanan lateral. Kurva tersebut dihasilkan dari analisa statik non-linier khusus yang dikenal sebagai analisa *pushover*, sehingga disebut juga sebagai kurva *pushover*.

Selanjutnya diatas kurva *pushover* dapat digambarkan secara kualitatif kondisi kerusakan yang terjadi pada level kinerja yang ditetapkan agar kita mempunyai bayangan seberapa besar kerusakan itu terjadi. Selain itu dapat juga dikorelasikan dibawahnya berapa prosentase biaya dan waktu yang diperlukan untuk perbaikan. Informasi itu tentunya sekedar gambaran perkiraan, meskipun demikian sudah mencukupi untuk mengambil keputusan apa yang sebaiknya harus dilakukan terhadap hasil analisis bangunan tersebut.

I. Analisa Statik Nonlinier (*Pushover*)

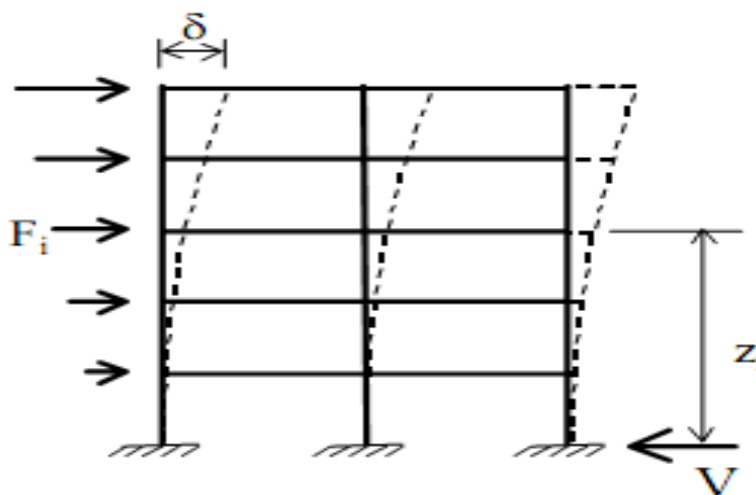
Analisa statik nonlinier merupakan prosedur analisa untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisa *pushover* atau analisa statik beban dorong. Analisa ini memerlukan program komputer untuk dapat merealisasikannya pada bangunan nyata. Beberapa program komputer komersil yang tersedia adalah *SAP2000*, *ETABS*, *GTStrudl*, *Adina*.

Analisa dilakukan dengan memberikan suatu pola beban lateral statik pada struktur, yang kemudian secara bertahap ditingkatkan dengan faktor pengali sampai satu target perpindahan lateral dari suatu titik kontrol tercapai. Titik tersebut adalah titik kontrol pada atap, atau lebih tepat lagi adalah pusat massa atap.

Analisa *pushover* menghasilkan kurva *pushover* (Gambar 5), kurva yang menggambarkan korelasi antara gaya geser dasar (V) dengan perpindahan titik acuan pada atap (D). Pada proses *pushover*, struktur didorong sampai mengalami leleh disatu atau lebih lokasi di struktur tersebut. Kurva kapasitas akan memperlihatkan suatu kondisi linier sebelum mencapai kondisi leleh dan selanjutnya berperilaku non-linier. Kurva *pushover* dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorong (gambar 6).

Tujuan analisa *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta untuk memperoleh informasi bagian

mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetailan atau stabilitasnya.



Gambar 6. Pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban *Pushover*

J. Tahapan Utama dalam Analisa *Pushover*

Tahapan utama dalam analisa *pushover* adalah :

- 1.) Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar digunakan untuk menyusun kurva *pushover*.
- 2.) Membuat kurva *pushover* berdasarkan berbagai macam pola distribusi gaya lateral terutama yang ekuivalen dengan distribusi dari gaya inersia , sehingga diharapkan deformasi yang terjadi hampir sama atau mendekati deformasi yang terjadi akibat gempa. Oleh karena sifat gempa adalah tidak pasti, maka perlu dibuat beberapa pola pembebanan lateral yang berbeda untuk mendapatkan kondisi yang paling menentukan.

3.) Estimasi besarnya perpindahan lateral saat gempa rencana (target perpindahan). Titik kontrol didorong sampai taraf perpindahan tersebut, yang mencerminkan perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh intensitas gempa rencana yang ditentukan.

4.) Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dan aksi perilakunya dapat dianggap memuaskan jika memenuhi kriteria yang dari awal sudah ditetapkan, baik terhadap persyaratan deformasi maupun kekuatan. Karena yang dievaluasi adalah komponen maka jumlahnya relatif sangat banyak, oleh karena itu proses ini sepenuhnya harus dikerjakan oleh komputer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara *built-in* pada program *SAP2000*, mengacu pada *FEMA 356* dan *440*). Oleh karena itulah mengapa pembahasan perencanaan berbasis kinerja banyak mengacu pada dokumen *FEMA*.

K. Target Perpindahan

Gaya dan deformasi setiap komponen/elemen dihitung terhadap perpindahan tertentu di titik kontrol yang disebut sebagai target perpindahan (δ_t) dan dianggap sebagai perpindahan maksimum yang terjadi saat bangunan mengalami gempa rencana.

Untuk mendapatkan perilaku struktur pasca keruntuhan maka perlu dibuat analisa *pushover* untuk membuat kurva hubungan gaya geser dasar dan

perpindahan lateral titik kontrol sampai minimal 150% dari target perpindahan (δ_t). Permintaan membuat kurva *pushover* sampai minimal 150% target perpindahan adalah agar dapat dilihat perilaku bangunan yang melebihi kondisi rencananya. Perencana harus memahami bahwa target perpindahan hanya merupakan rata-rata nilai dari beban gempa rencana. Analisa *pushover* dilakukan dengan memberikan beban lateral pada pola tertentu sebagai simulasi beban gempa, dan harus diberikan bersama-sama dengan pengaruh kombinasi beban mati dan tidak kurang dari 25% dari beban hidup yang disyaratkan. Beban lateral harus diberikan pada pusat massa untuk setiap tingkat. *FEMA 273* mensyaratkan minimal harus diberikan dua pola beban yang berbeda sebagai simulasi beban gempa yang bersifat random, sehingga dapat memberikan gambaran pola mana yang pengaruhnya paling jelek. Selanjutnya beban tersebut harus diberikan secara bertahap dalam satu arah (monotonik).

Kriteria evaluasi level kinerja kondisi bangunan didasarkan pada gaya dan deformasi yang terjadi ketika perpindahan titik kontrol sama dengan target perpindahan (δ_t). Jadi parameter target perpindahan sangat penting peranannya bagi perencanaan berbasis kinerja.

Ada beberapa cara menentukan target perpindahan, dua yang cukup terkenal adalah *Displacement Coefficient Method* atau Metoda Koefisien Perpindahan (*FEMA 273/274, FEMA 356/440*).

L. Metoda Koefisien Perpindahan (FEMA 273/356)

Metoda Koefisien Perpindahan merupakan metoda utama yang terdapat dalam *FEMA 273/356* untuk prosedur statik non-linier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem *S-DOF* ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut target perpindahan (δ_t).

Proses dimulai dengan menetapkan waktu getar efektif (T_e), yang memperhitungkan kondisi inelastis bangunan (lihat bagian tentang waktu getar alami). Waktu getar alami efektif mencerminkan kekakuan linier dari sistem *S-DOF* ekuivalen. Jika diplotkan pada spektrum respons elastis akan menunjukkan percepatan gerakan tanah pada saat gempa yaitu akselerasi puncak (S_a), versus waktu getar (T). Redaman yang digunakan selalu 5% yang mewakili level yang diharapkan terjadi pada struktur yang mempunyai respons pada daerah elastis. Puncak perpindahan spektra elastis (S_d), berhubungan langsung dengan akselerasi spektra (S_a) dengan hubungan berikut:

$$S_d = \frac{T_e^2}{4\pi^2} S_a \quad (17)$$

Selanjutnya target perpindahan pada titik kontrol δ_t (m) ditentukan dari rumus berikut:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (18)$$

Dimana

T_e = Waktu getar alami efektif yang memperhitungkan kondisi inelastis (s).

C_0 = Koefisien faktor bentuk, untuk merubah perpindahan spektral menjadi perpindahan atap, umumnya memakai faktor partisipasi ragam yang pertama (*first mode participation factor*) atau berdasarkan Tabel 3-2 dari FEMA 356.

C_1 = Faktor modifikasi yang menghubungkan perpindahan inelastik maksimum dengan perpindahan yang dihitung dari respon elastik linier.

$$= 1.0 \text{ untuk } T_e \geq TS$$

$$= [1.0 + (R - 1)TS/T_e] / R \text{ untuk } T_e < TS$$

TS = Waktu getar karakteristik yang diperoleh dari kurva respons spektrum pada titik dimana terdapat transisi bagian akselerasi konstan ke bagian kecepatan konstan (s).

R = Rasio kuat elastik perlu terhadap koefisien kuat leleh terhitung.

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m \quad (19)$$

S_a = Akselerasi respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau.

V_y = Gaya geser dasar pada saat leleh, dari idealisasi kurva *pushover* menjadi bilinear (Kg).

W = Total beban mati dan beban hidup yang dapat direduksi (Kg).

C_m = Faktor massa efektif yang diambil dari Tabel 3-1 dari *FEMA 356*.

C_2 = Koefisien untuk memperhitungkan efek *pinching* dari hubungan beban-deformasi akibat degradasi kekakuan dan kekuatan, berdasarkan Tabel 3-3 dari *FEMA 356*.

C_3 = Koefisien untuk memperhitungkan pembesaran lateral akibat adanya efek P-delta. Koefisien diperoleh secara empiris dari studi statistik analisa riwayat waktu non-linier dari *S-DOF* dan diambil berdasarkan pertimbangan *engineering judgement*, dimana perilaku hubungan gaya geser dasar dengan lendutan pada kondisi pasca leleh kekakuannya positif (kurva meningkat) maka $C_3 = 1$, sedangkan jika perilaku pasca lelehnya negatif (kurva menurun) maka :

$$C_3 = 1.0 + \frac{|\alpha|(R-1)^{3/2}}{T_e} \quad (20)$$

α = Rasio kekakuan pasca leleh terhadap kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya-lendutan diidealisasikan sebagai kurva bilinear (lihat waktu getar efektif).

g = Percepatan gravitasi 9.81 m/s^2 .

M. Metoda Koefisien Perpindahan yang Diperbaiki (*FEMA 440*)

Adanya dua macam metode evaluasi non-linier yaitu Metode Koefisien Perpindahan (*FEMA 273/356*) dan Metode Spektrum Kapasitas (*ATC 40, FEMA 274*) kadang-kadang menimbulkan keraguan karena hasilnya belum tentu sama . Untuk mengantisipasi hal tersebut dilakukan evaluasi melalui *ATC 55 Project* dan menghasilkan *FEMA 440 (Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures)* yang mana kedua metode

tersebut dimodifikasi. Untuk Metode Koefisien Perpindahan, persamaan target perpindahannya yaitu :

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 g \quad (21)$$

Tetapi modifikasi diberikan dalam menentukan parameter C_1 dan C_2 :

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{aT_e^2} \quad (22)$$

dimana T_e adalah waktu getar efektif dari struktur *SDOF* dalam detik, R adalah rasio kekuatan yang dihitung dengan persamaan 19. Konstanta a adalah sama dengan 130, 90 dan 60 untuk lokasi kategori B, C dan D. Untuk waktu getar kurang dari 0.2 detik maka nilai C_1 pada 0.2 detik dapat dipakai. Untuk waktu getar lebih dari 1.0 detik maka C_1 dapat dianggap sama dengan 1.

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (23)$$

Untuk waktu getar kurang dari 0.2 detik maka nilai C_2 pada 0.2 detik dapat dipakai. Untuk waktu getar lebih dari 0.7 detik maka C_2 dapat dianggap sama dengan 1.

N. Teori Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur atau unsur struktur untuk menahan respon inelastis yang dominan sambil mempertahankan sebagian besar dari kekuatan awalnya dalam memikul beban. Daktilitas pada elemen struktur merupakan perbandingan antara deformasi batas dan deformasi

leleh. Deformasi yang terjadi dapat berupa regangan kelengkungan, lendutan translasi dan lendutan rotasi, yaitu:

1) Daktilitas regangan

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad \text{Adalah}$$

perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh pada balok yang dibebani aksial tekan maupun tarik.

$$\mu_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} \quad (24)$$

2) Daktilitas kelengkungan

Adalah perbandingan antara sudut kelengkungan (putaran sudut per unit panjang) maksimum dengan kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat momen lentur. Persamaan matematis daktilitas kelengkungan sebagai berikut:

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (25)$$

3) Daktilitas perpindahan

$$\mu_{\delta} = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad \text{Adalah}$$

perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh.

(26)

4) Daktilitas rotasi

Adalah perbandingan putaran sudut maksimum terhadap putaran sudut pada saat leleh.

$$\mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y}$$

(27)

Menurut SNI 1726-2002 pasal 4.3.1 Faktor daktilitas struktur gedung μ adalah rasio antara simpangan maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana pada saat mencapai kondisi di ambang keruntuhan δ_m dan simpangan struktur gedung pada saat terjadinya pelepasan pertama δ_y , yaitu :

$$1 \leq \mu = \frac{\delta_m}{\delta_y} \leq \mu_m \quad (28)$$

$\mu = 1,0$ adalah nilai faktor daktilitas untuk struktur gedung yang berperilaku elastik penuh, sedangkan μ_m adalah nilai faktor daktilitas maksimum yang dapat dikerahkan oleh sistem struktur gedung yang bersangkutan. Nilai μ_m yang diisyaratkan SNI 1726-2002 pasal 4.3.6. untuk sistem portal biasa sebesar 2.7, untuk sistem *rubber isolator* sebesar 4 dan untuk sistem *EBF* sebesar 4.3.