



KAJIAN EKSPERIMENTAL DAKTILITAS STRUKTUR RANGKA BAJA TIPE PORTAL TERBUKA, PORTAL DIPERKAKU KONSENTRIK DAN PORTAL DIPERKAKU EKSENTRIK

Setyo Hardono^[1]

RINGKASAN

Tujuan utama dari penelitian eksperimental ini adalah untuk mempelajari dan mendapatkan nilai daktilitas struktur rangka baja. Dalam penelitian, digunakan 3 (tiga) model yaitu *Moment Resisting Frame (MRF)*, *Concentrically Braced Frame (CBF)* dan *Eccentrically Braced Frame (EBF)* tipe D. Model tersebut dikenakan gaya secara bertahap dengan beban berdasarkan *stroke control*, dengan harapan dapat mempelajari perilaku ketiga model tersebut secara lebih cermat. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa perilaku dari Model D-EBF mempunyai nilai daktilitas, penyerapan energi yang paling baik diantara dua model yang lain.

SUMMARY

The main goal of this experimental research is to study and obtain the ductility values of steel frame structure. In this research there are three models used i. e. *Moment Resisting Frame (MRF)*, *Concentrically Braced Frame (CBF)* and *Eccentrically Braced Frame (EBF)* type D. Such models are subjected to forces in stages and loaded based on *stroke control*, so that one can study the behaviours of those models in details. The results of experiment show that the behaviour of D-EBF model has better ductility value and energy absorption compared to the other two.

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang terletak pada pertemuan empat lempeng litosfer, yaitu Eurasia, India, Australia dan Filipina serta terletak pada jalur gempa *Trans-Asia* dan *Circum Pasific*. Hal ini membuat terjadi banyak gerakan-gerakan tanah baik dalam bentuk gempa kecil maupun gempa besar.

Memperhatikan masalah-masalah yang berkaitan dengan gempa dalam merancang suatu struktur merupakan hal yang penting untuk dilakukan, mengingat kerusakan yang timbul akibat gempa dapat menyebabkan penderitaan, kehilangan nyawa dan harta benda. Dalam skala yang lebih luas dapat menyebabkan kesulitan yang serius bagi suatu negara, misalnya saja terjadi kelumpuhan ekonomi.

Sampai saat ini, gaya gempa rencana yang digunakan mengacu kepada gaya maksimum yang mungkin diterima struktur akibat gempa yang diperoleh dari perkalian percepatan maksimum gempa yang mungkin terjadi dengan massa bangunan.

Untuk mendapatkan nilai percepatan gempa digunakan respons spektrum inelastis, karena sangatlah tidak ekonomis untuk mendesain bangunan agar berperilaku elastik bila gempa besar terjadi. Cara mendapatkan respons spektrum inelastik adalah dengan mereduksi respons spektrum elastik dengan daktilitas strukturnya.^[6] Sedangkan untuk mendapat

kan gaya gempa desain didapatkan dengan cara gaya geser dasar dikalikan dengan suatu faktor yang disebut faktor Jenis Struktur (*K*). Faktor ini dimaksudkan untuk mengatasi perbedaan perilaku dari suatu jenis struktur yang mana tergantung pada konfigurasi struktur dan pemakaian bahan struktur.

1. 2. Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan di atas, penelitian yang berupa kegiatan eksperimental mempunyai tujuan sebagai berikut :

1. Memperoleh besarnya beban batas suatu komponen struktur akibat pembebanan statik.
2. Mendapatkan nilai daktilitas dan faktor jenis suatu struktur.

1. 3. Ruang Lingkup Masalah

Pembahasan utama dalam penelitian ini adalah besaran daktilitas struktur. Struktur yang ditinjau berupa struktur baja sederhana, yaitu :

- Struktur portal terbuka sederhana tanpa pengaku (MRF)
- Struktur portal terbuka sederhana dengan pengaku konsentrik (CBF)
- Struktur portal terbuka sederhana dengan pengaku eksentrik tipe D-EBF

Struktur dibebani dengan pembebanan monotonik satu arah sampai mencapai kehancuran. Melalui kurva beban-perpindahan yang didapat, dihitung daktilitas struktur tersebut.

II. DASAR TEORI

2.1. Beban Gempa

Karena kecilnya kemungkinan terjadi gempa besar, maka sangatlah tidak ekonomis untuk merencanakan bangunan agar berperilaku elastik bila gempa besar terjadi. Untuk menentukan beban gempa berlaku prinsip berikut :

1. Struktur harus mampu menahan gempa kecil tanpa rusak
2. Struktur harus mampu menahan gempa sedang tanpa rusak walaupun ada kerusakan non struktural.
3. Struktur mampu menahan gempa besar tanpa runtuh, walaupun terdapat kerusakan struktural.

Untuk menghindari keruntuhan akibat gempa besar, elemen struktur harus memiliki kemampuan yang cukup untuk menyerap dan mendisipasikan energi melalui deformasi inelastiknya. Biasanya kemampuan ini dinyatakan dalam daktilitas (μ).

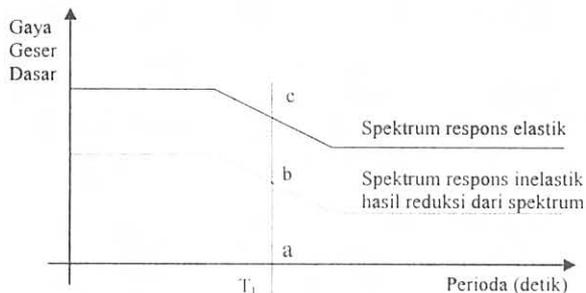
2.2. Respons Spektrum

Respons spektrum adalah kurva yang merepresentasikan respons-respons maksimum dari perpindahan, kecepatan ataupun besaran yang diinginkan dari suatu sistem berderajat kebebasan tunggal terhadap perioda alami (T) atau frekuensi alami (f atau ω). Respons spektrum yang digunakan untuk mendesain adalah respons spektrum inelastik. Cara untuk mendapatkan respons spektrum inelastik adalah dengan mereduksi respons spektrum elastik dengan tingkat daktilitas strukturnya (Gambar 2. 1). Pada cara ini digunakan dua konsep yaitu konsep kesamaan energi dan konsep kesamaan perpindahan. Di dalam "Indonesian Earthquake Study"^[6], disebutkan bahwa harga $T_1 = 0.5$ detik.

Reduksi (tergantung faktor daktilitas)

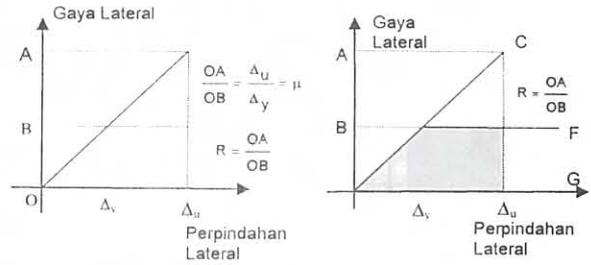
$$= \frac{ac}{ab} = \mu \text{ untuk } T > T_1$$

$$= \sqrt{2\mu - 1} \text{ untuk } T < T_1, \text{ dimana } T_1 = \frac{1}{f_1}$$



Gambar 2.1. Ilustrasi reduksi respons spektrum elastik^[6]

Faktor reduksi untuk kedua konsep tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2.



(a) Konsep Kesamaan Perpindahan (b) Konsep Kesamaan Energi

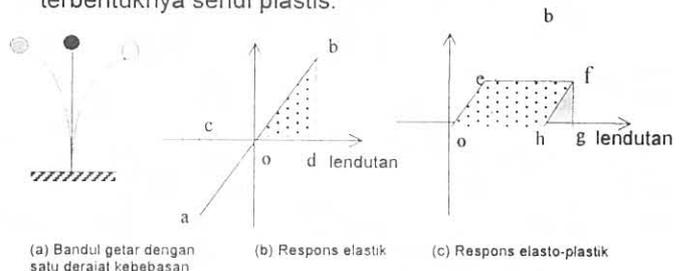
Gambar 2.2. Respons elastik dan elastoplastik^[15]

Dari perbandingan geometri pada Gambar 2.2, didapat $R = 1/\mu$ untuk konsep kesamaan perpindahan dan $R = 1/\sqrt{2\mu - 1}$ untuk konsep kesamaan energi.

2.3. Daktilitas Struktur

Telah diterima secara umum bahwa tidak ekonomis bila merencanakan struktur gedung sedemikian kuat, sehingga mampu menahan gempa secara elastik. Oleh karena itu ditetapkan suatu gempa rencana yang menjamin suatu struktur tidak rusak dalam gempa kecil atau sedang, tetapi dalam gempa kuat yang jarang terjadi, struktur tersebut mampu melakukan perubahan bentuk secara daktil, dengan memancarkan energi gempa dan membatasi gaya gempa yang masuk kedalam struktur.

Untuk menggambarkan prinsip tersebut diatas, ditinjau perilaku struktur dengan satu derajat kebebasan (struktur bandul getar) seperti pada Gambar 2.3.(a). Respons elastik ditunjukkan pada Gambar 2.3.(b), dimana bidang obd menunjukkan Energi Potensial yang tersimpan bila struktur menyimpang ke titik b. Bila struktur berubah kedudukan dari titik b melalui titik awal o maka seluruh energi potensial tersebut dirubah menjadi Energi Kinetik dan kembali disimpan sebagai Energi Potensial pada kedudukan a. Apabila pada struktur bandul tersebut diperbolehkan terjadi sendi plastis, maka idealisasi perilaku struktur tersebut seperti pada Gambar 2.3.(c). Titik e menunjukkan gaya geser yang berhubungan dengan kapasitas momen dari sendi plastis. Simpangan struktur tersebut kemudian mengikuti garis e - f, sampai pada kedudukan akhir yaitu f. Energi Kinetik di o dirubah menjadi Energi Potensial seperti pada bidang oefg, dan gaya geser dibatasi dengan terbentuknya sendi plastis.



(a) Bandul getar dengan satu derajat kebebasan (b) Respons elastik (c) Respons elasto-plastik

Gambar 2.3. Perilaku Struktur dengan satu derajat kebebasan^[7]

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur atau komponen struktur untuk berdeformasi inelastik tanpa terjadi fraktur, dan lebih baik bila tanpa terjadi pengurangan kekuatan secara drastis.

Untuk struktur dengan satu derajat kebebasan (SDOF), dengan perilaku elasto plastik sempurna, faktor daktilitas perpindahan (μ) didefinisikan sebagai perbandingan antara simpangan maksimum f dan simpangan leleh pertama e , yang juga sebagai ukuran bagi perilaku dan kemampuan struktur untuk menyimpan dan memancarkan energi.

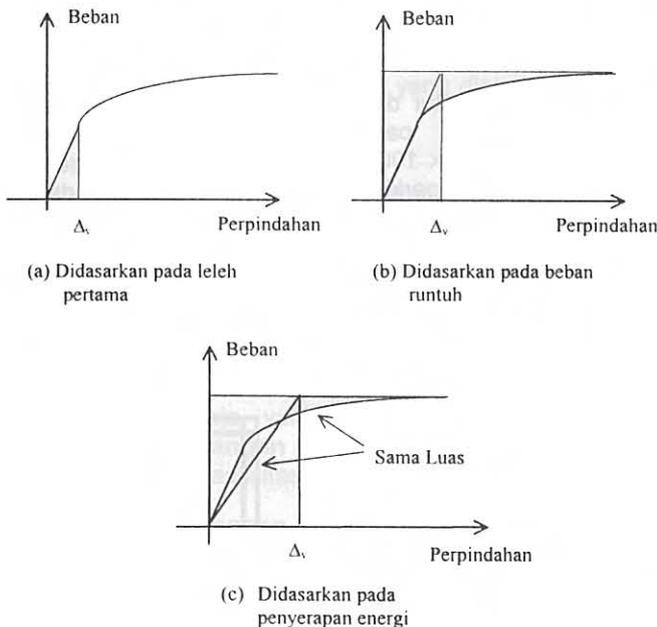
$$\mu = \frac{og}{oe} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad 2.1$$

dimana :

Δ_u = simpangan maksimum

Δ_y = simpangan saat leleh terjadi

Energi total yang disimpan pada simpangan maksimum adalah $oefg$, dan bila struktur kembali ke kedudukan awal (tanpa gaya) maka energi yang di kembalikan hanya hfg sebagai energi kinetik. Perilaku ini berlainan dengan respons elastis yang mana seluruh energi potensial yang tersimpan dikembalikan seluruhnya sebagai energi elastik. Perilaku elasto-plastis ini merupakan dasar bagi teknik pencadangan energi yang dipakai dalam perencanaan struktur yang daktail.^[7]



Gambar 2.4. Alternatif penentuan simpangan leleh

Untuk sistem struktur dengan titik leleh sulit ditentukan, pengambilan simpangan leleh (Δ_y) tidak terlalu jelas. Ada beberapa cara yang digunakan untuk mendefinisikan simpangan leleh seperti pada Gambar 2. 4, yaitu :

1. Didasarkan atas simpangan saat leleh pertama terjadi

2. Didasarkan atas perpotongan simpangan elastik terhadap beban ekuivalen saat beban runtuh (*significant yield*)
3. Simpangan leleh yang didasarkan atas kapasitas penyerapan energi yang sama antara sistem elasto-plastik dengan struktur aktual pada beban ultimit yang sama.

Dari referensi [7] telah ditunjukkan akan pentingnya suatu struktur berperilaku secara daktail. Seperti pada Gambar 2.1, faktor daktilitas dipakai untuk mereduksi spektrum respons elastik menjadi respons inelastik. Pada peraturan gempa, disyaratkan struktur hendaknya mempunyai faktor daktilitas minimum 4^[7].

2. 4. Mekanisme Pemencaran Energi

Sistem struktur baja yang telah dikembangkan untuk keperluan bangunan sipil antara lain :

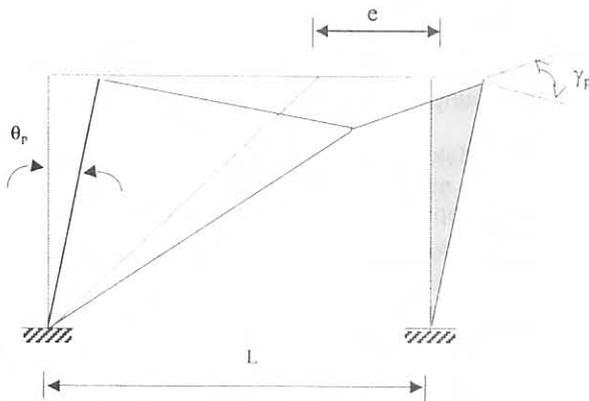
- Rangka Penahan Momen (*Moment Resisting Frame / MRF*)
- Rangka Diperkaku Konsentrik (*Concentrically Braced Frame / CBF*)
- Rangka Diperkaku Eksentrik (*Eccentrically Braced Frame / EBF*)
- Dinding Geser Baja (*Steel Shear Wall*)
- Rangka dengan Pengaku Lengkung (*Bent Bracing Frame*)
- Isolasi Dasar (*Base Isolation*)

Dari bermacam sistem tersebut, yang sering digunakan dalam praktek adalah sistem MRF, CBF dan EBF.

Studi tentang struktur baja pada awalnya difokuskan pada sistem MRF. Sistem struktur ini dikenal memiliki kemampuan menyerap energi gempa yang baik, tetapi memerlukan terjadinya simpangan yang cukup besar agar timbul sendi-sendi plastis pada balok yang berfungsi menyerap energi gempa. Simpangan yang besar ini akan mengakibatkan kerusakan non-struktural yang besar disamping akan memperbesar pengaruh P- Δ efek. Dengan kata lain, struktur ini bersifat daktail, tetapi kurang kaku.

Pengaku pada struktur baja dimaksudkan untuk mengatasi kelemahan pada sistem MRF. Beberapa jenis pengaku yang dikenal adalah sistem CBF dan EBF. Pada sistem CBF, penyerapan energi gempa dilakukan melalui pelelehan dan pasca tekuk dari elemen pengaku.^[9] Ciri khas sistem CBF ini adalah sistem pengaku terletak pada diagonal setiap petak rangka.^[14] Bentuk diagonal ini secara mekanika akan memiliki sifat yang lebih kaku dari segi empat. Dengan perilaku demikian, sistem ini memiliki kemampuan memancarkan energi dan daktilitas terbatas walaupun cukup kaku dibandingkan dengan MRF.

Untuk mengatasi kelemahan pada MRF dan CBF tersebut, maka diusulkan struktur dengan pengaku eksentrik (EBF). Penyerapan energi melalui mekanisme pembentukan sendi plastis pada elemen *active link*. Kelelahan pada *active link* ini dapat berupa kelelahan geser atau lentur dan diijinkan terjadi deformasi yang cukup besar. Karena itu sistem pengaku direncanakan tidak akan mengalami kelelahan baik tarik maupun tekuk. Ini dimaksudkan agar kestabilan elemen *active link* terjaga dengan baik.



Gambar 2.5. Mekanisme Pemencaran Energi Sistem EBF

Berdasarkan hasil studi yang pernah dilakukan oleh [5], [11], [12], bahwa sistem EBF memiliki respons yang paling baik dalam analisis plastis, ketika menerima beban siklik. Hal ini sebabkan pada kemampuan menyerap energi yang sangat besar, dan sangat konsisten (tidak terjadi degradasi kekakuan) sampai sejumlah putaran (*cycle*) yang cukup tinggi. Mekanisme pemencaran energi sistem EBF dapat dilihat pada Gambar 2.5.

2.5 Kriteria Runtuh Struktur

Telah diterima secara luas bahwa struktur baja mempunyai penampilan yang baik akibat beban gempa. Akibat dari karakteristik material baja, struktur rangka baja dapat direncanakan untuk beban ultimit dimana mekanisme plastis dapat diharapkan terjadi. Beban plastis maksimum yang menyebabkan terbentuknya sendi plastis pada seluruh elemen rangka, secara teoritis dapat dipikul oleh portal baja, sehingga memungkinkan untuk penyerapan energi maksimum. Tetapi pada kenyataannya hal ini tidak selalu dapat dicapai, bilaman struktur telah melewati keadaan batasnya.

Keadaan batas dari suatu struktur adalah suatu kondisi dimana struktur tidak dapat berfungsi lagi. Kondisi batas dapat ditentukan oleh :

- persyaratan fungsi, seperti defleksi maksimum, secara konsep dapat berupa sendi plastis atau mekanisme pembentukan sendi plastis.
- Ditentukan oleh keruntuhan nyata dari keseluruhan atau sebagian struktur seperti fraktur atau ketidakstabilan.

III. KAJIAN EKSPERIMENTAL

3.1. Pemodelan Benda Uji

Pemodelan benda uji diambil 3 (tiga) model. Model I struktur sederhana rangka penahan momen portal terbuka (*Moment Resisting Frame, MRF*). Model II seperti Model I dengan tambahan pengaku konsentrik (CBF) dan Model III seperti model dengan tambahan pengaku eksentrik tipe D-EBF. Pengambilan model yang berbeda tersebut dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik masing-masing tipe struktur terhadap beban yang bekerja.

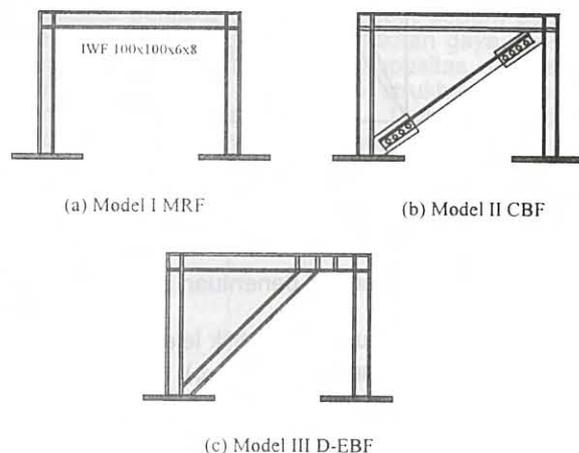
Profil yang dipakai pada setiap model dapat dilihat pada Tabel 3. 1 berikut :

Tabel 3.1
JENIS PROFIL BAJA UNTUK BENDA UJI

Model	Tipe	Elemen	Profil
I	MRF	kolom	IWF 100x100x6x8
		balok	IWF 100x100x6x8
II	CBF	kolom	IWF 100x100x6x8
		balok	IWF 100x100x6x8
		bresing	2 L 40x40x3
III	D-EBF	balok	IWF 100x100x6x8
		kolom	IWF 100x100x6x8
		bresing	2 CNP 8
		link	IWF 100x100x6x8

Ukuran struktur diambil, dengan memperhatikan keterbatasan, panjang kolom 667 mm dan bentang balok 1000 mm. Dari analisis non linear ini dapat diperkirakan gaya-gaya ultimit dan deformasi ultimit, dan digunakan sebagai acuan pemasangan instrumen pada benda uji seperti pencatatan lendutan dan regangan.

Bentuk pemodelan masing-masing benda uji tersaji dalam Gambar 3. 1 berikut ini.



Gambar 3.1. Bentuk model benda uji

Sistem perletakan dibuat sedemikian sehingga berfungsi sebagai tumpuan jepit. Sebelum diletakkan ke sistem perletakan, benda uji menempu ke base plate dengan sambungan las. Base plate benda uji menempel pada sistem tumpuan dengan menggunakan baut mutu tinggi, untuk menjamin tidak terjadi kegagalan pada sistem tumpuan.

3. 2. Set Up Pengujian

3. 2. 1. Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan untuk pelaksanaan pengujian terhadap model benda uji adalah :

Loading Frame

Loading Frame berfungsi memberikan beban pada benda uji sekaligus mengatur jenis pembebanan sesuai dengan kebutuhan pengujian. Sistem pembebanan terhadap benda uji dilakukan dengan kecepatan 0.02 mm/detik berdasarkan *stroke control* sampai runtuh.

Displacement Tranducers (LVDT)

Alat ini digunakan untuk mengukur besarnya perpindahan yang terjadi pada bagian-bagian tertentu benda uji. Untuk merekam hasil pengujian (besarnya perpindahan) maka LVDT dilengkapi dengan Data Logger.

Data Logger

Merupakan alat yang digunakan untuk merekam besarnya regangan maupun perpindahan pada benda uji yang diamati. Data Logger yang digunakan adalah tipe TDS 302.

3. 3. 3. Uji tarik baja

Metode pengujian tarik baja mengikuti ketentuan JIS Z 2201 tentang *Test Pieces for Tensile Test for Mettalic Materials*, JIS Z 2241 tentang *Method of Tensile Test for Mettalic Materials*, JIS G 3101 tentang *Rolled Steels for General Structure*.

Uji tarik baja ini dilakukan dengan *Universal Testing Machine* (UTM). Dari uji tarik baja ini didapat sifat-sifat karakteristik baja, yaitu **tegangan leleh baja** (*yield stress, F_y*), **tegangan ultimit baja** (*ultimate stress, F_u*) dan modulus elastisitas baja (*E*).

3. 3. 4. Pemasangan strain gage

Secara umum strain gage dipasang di tumpuan jepit dan pada beberapa tipe batang yang mengalami gaya dalam yang cukup besar, yang mana dimungkinkan akan terjadi leleh dan atau tekuk di lokasi tersebut. Jenis strain gage yang dipergunakan adalah jenis *post yield*.

Tabel 3.2
KARAKTERISTIK STRAIN GAUGE

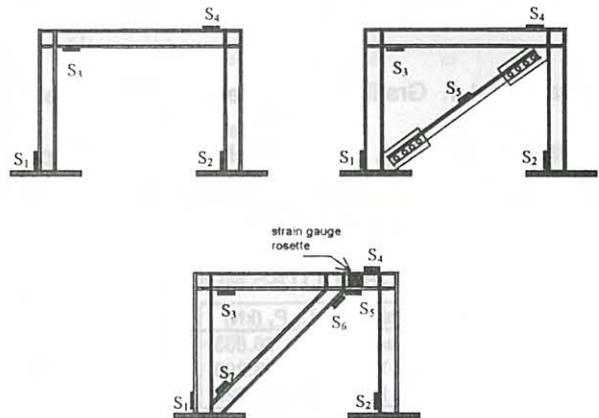
Gauge Type	YFLA-5	YFRA-2
Gauge Factor	2.12	2.2
Gauge Length	5 mm	2 mm
Gauge Resistance	$120 \pm 0.3 \Omega$	$120 \pm 0.5 \Omega$
Adhesive	CN	CN

Setiap strain gage yang terpasang diberi nomor sesuai dengan *chanel* yang tersambung pada Data Logger. Karakteristik strain gage dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Lokasi pemasangan strain gauge didasarkan pada tegangan terbesar yang terjadi pada masing-masing tipe batang, seperti pada Gbr. 3.2.

3. 3. 5. Pemasangan LVDT

Pembebanan struktur ditempatkan pada bagian sambungan balok-kolom. Lokasi tepat di sambungan dimana beban bekerja dipasang LVDT guna mengukur besarnya perpindahan yang terjadi pada joint tersebut. Selain itu LVDT juga dipasang pada tumpuan yang mengalami tarik terbesar untuk mengetahui besarnya pergeseran pada tumpuan tersebut yang seharusnya tidak terjadi.



Gambar 3.2. Lokasi pemasangan *strain gauge*

3. 3. 6. Pelaksanaan pengujian

Setelah segala sesuatu diset up sesuai fungsi dan keperluannya maka benda uji siap dilakukan pengujian di laboratorium dengan sistem penambahan defleksi (*stroke control*) secara bertahap. Dengan penambahan defleksi secara bertahap ini diharapkan akan terdeteksi perilaku struktur akibat beban yang bekerja.

IV. DATA DAN ANALISIS DATA

4. 1. Data Hasil Uji Tarik Baja

Hasil pengujian profil baja dapat disajikan pada Tabel 4. 1 berikut :

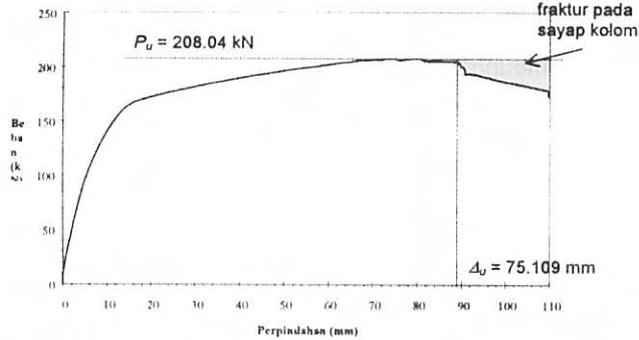
Tabel 4.1
HASIL UJI TARIK BAJA

Profil	Bagian	F_y (MPa)	F_u (MPa)	E (MPa)	ϵ_y μ strain	Dipakai pada
IWF 100x100	Sayap	283.52	413.63	215382	1316.36	MRF
	Badan	392.01	488.27	212084	1848.37	
IWF 100x100	Sayap	300.34	415.46	202936	1479.97	CBF & D-EBF
	Badan	277.70	386.71	203429	1365.10	
L 40x40x3		426.25	551.45	217413	1960.55	CBF
CNP 8	Sayap	360.792	501.83	211274	1707.70	D-EBF
	Badan	220.133	312.51	174096	1264.43	

4. 2. Data Hasil Pengujian Model

4. 2. 1. Data Uji Model I, MRF

Hasil pengujian MRF menunjukkan beban maksimum (ultimit) dapat dicapai sebesar 208.04 kN dengan perpindahan maksimum sebelum keruntuhan sebesar 75.109 mm, seperti pada Gambar 4. 1. Energi yang dapat diterima struktur sampai beban ultimit adalah 13157.66 kN mm.



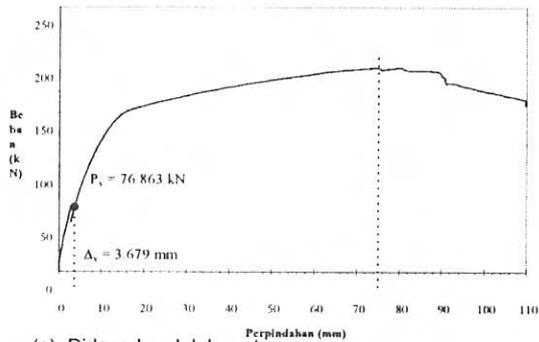
Gambar 4.1. Grafik beban – perpindahan Model MRF

Nilai daktilitas (μ), beban leleh (P_y) dan simpangan leleh (Δ_y), dapat dilihat pada Tabel 4. 2 dan Gambar 4. 2 berikut.

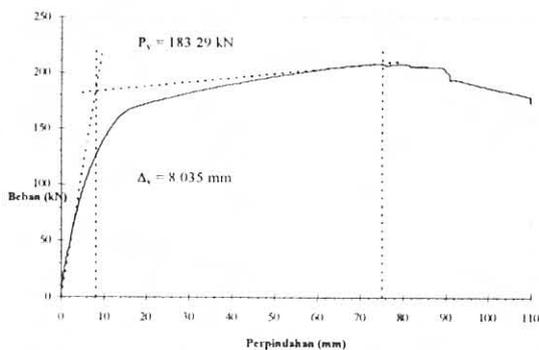
Tabel 4. 2
NILAI DAKTILITAS MODEL MRF

No	Konsep Daktilitas	P_y (kN)	Δ_y (mm)	$\mu = \Delta_u/\Delta_y$
1.	Leleh Pertama	76.863	3.679	20.416
2.	Significant Yield	183.290	8.035	9.348
3.	Kesamaan Energi	186.220	15.848	4.739

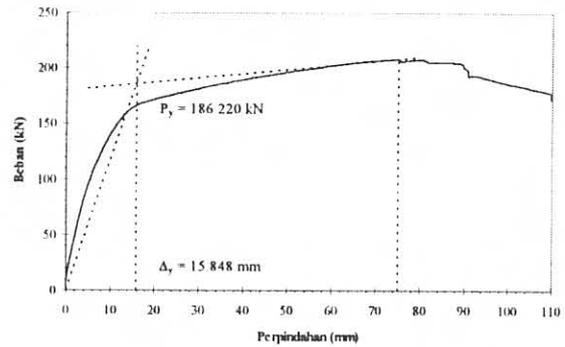
Catatan : $P_u = 208.04$ kN
 $\Delta_u = 75.109$ mm



(a) Didasarkan leleh pertama



(b) Didasarkan garis asimtot beban runtuh (significant yield)



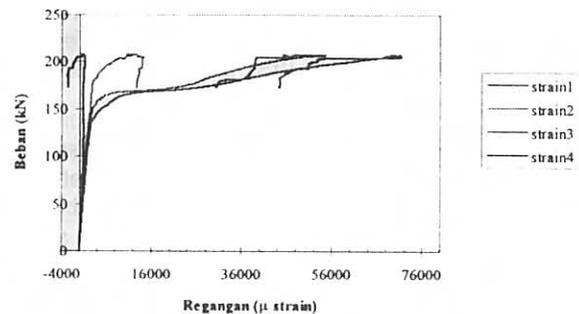
(c) Didasarkan kesamaan penyerapan energi

Gambar 4.2. Nilai Daktilitas Model MRF

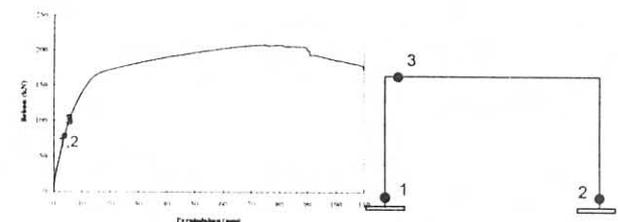
Urutan terjadi leleh pada struktur ditentukan dari nilai regangan leleh pada strain gauge. yaitu sebesar $\epsilon_y = 1320 \mu$ strain. Nilai ini didapat dari hasil uji tarik baja (Tabel 4. 1). Tabel 4. 3 memperlihatkan urutan kelelahan tersebut.

Tabel 4. 3
URUTAN BEBAN LELEH MODEL MRF

	Beban (kN)	Perpindahan (mm)	Regangan (μ strain)	No. Strain Gauge
1.	76.863	3.679	1320	S ₂
2.	79.447	3.859	1324	S ₁
3.	101.593	5.578	1323	S ₃
4.	-	-	-	S ₄

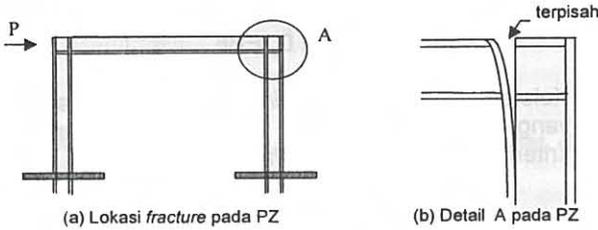


Gambar 4.3. Grafik beban - regangan



Gambar 4.4. Urutan leleh Model MRF

Apabila dilihat dari data regangan (Gambar 4. 3) maka pada strain gauge S4 (Gambar 3. 4) tidak pernah terjadi regangan leleh yang berarti tidak pernah terjadi kelelahan pada batang (daerah) tersebut. Hal ini disebabkan adanya kegagalan pada daerah *Panel Zone* (PZ), dimana terjadi pemisahan (*fracture*) antara bagian sayap (*flange*) dengan bagian badan (*web*) pada daerah batang kolom, seperti pada ilustrasi Gambar 4.5, atau dapat dilihat pada foto pengujian. Kejadian tersebut terjadi pada beban $P = 135$ kN.

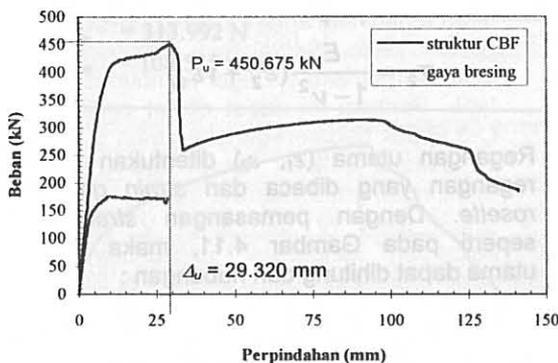


Gambar 4.5. *Fracture* pada daerah *Panel Zone*

Fracture pada PZ tersebut dikarenakan tidak adanya penguaku diagonal pada PZ, sehingga PZ tidak berperilaku sebagai daerah *rigid* tetapi dapat melakukan deformasi. Bilamana hal tersebut tidak terjadi, maka dapat dipastikan struktur Model MRF tersebut akan mempunyai beban maksimum (P_u) dan daktilitas yang lebih tinggi.

4. 2. 2. Data Uji Model II, CBF

Perilaku struktur Model CBF lebih getas (*brittle*) dibandingkan dengan struktur Model MRF, seperti terlihat pada Gambar 4. 6. Dari pengertian daktilitas pada Subbab 2. 3, maka beban maksimum yang dapat dicapai $P_u = 450.675$ kN dengan perpindahan maksimum sebesar $\Delta_u = 29.32$ mm.



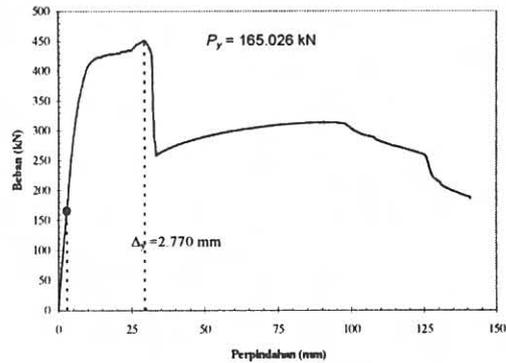
Gambar 4.6. Grafik beban – perpindahan Model CBF

Berbeda dengan Model MRF, pada Model CBF nilai daktilitas (μ), simpangan leleh (Δ_y) lebih kecil tetapi beban leleh dan ultimit lebih besar, seperti terlihat pada Tabel 4. 3 dan Gambar 4. 7.

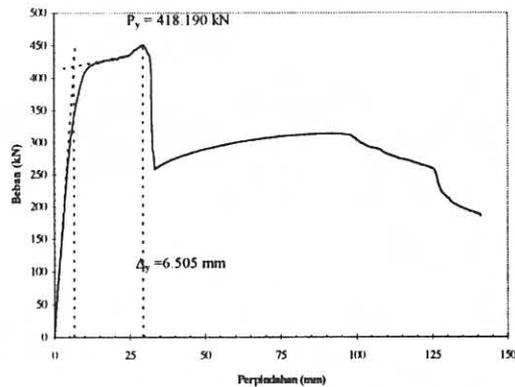
Tabel 4. 4
NILAI DAKTILITAS MODEL CBF

No	Konsep Daktilitas	P_y (kN)	Δ_y (mm)	$\mu = \Delta_u/\Delta_y$
1.	Leleh Pertama	165.026	2.770	10.585
2.	<i>Significant Yield</i>	418.190	6.505	4.507
3.	Kesamaan Energi	419.980	8.482	3.457

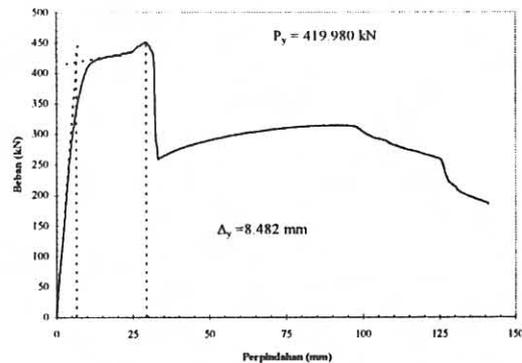
Catatan : $P_u = 450.675$ N
 $\Delta_u = 29.320$ mm



(a) Didasarkan leleh pertama



(b) Didasarkan *significant yield*



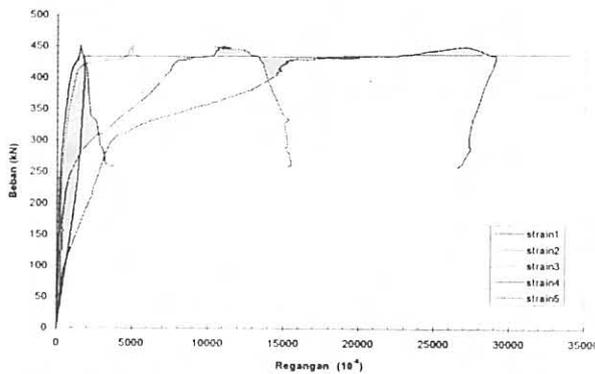
(c) Didasarkan kesamaan penyerapan energi

Gambar 4.7. Nilai daktilitas Model CBF

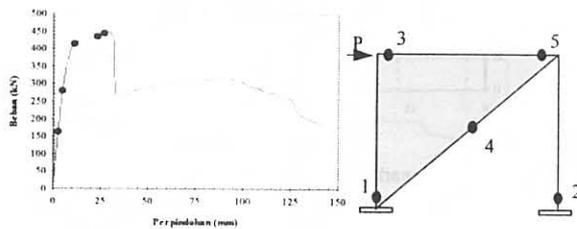
Urutan leleh pada struktur ditentukan dari nilai regangan leleh pada *strain gauge*, yaitu $\epsilon_y = 1480 \mu$ strain untuk frame dan $\epsilon_y = 1960 \mu$ strain untuk bresing (Tabel 4. 1). Grafik beban regangan pada Model CBF ini dapat dilihat pada Gambar 4. 8 atau pada Lampiran C. Urutan kelelahan Model CBF disajikan pada Tabel 4. 5 dan Gambar 4. 9.

Tabel 4. 5
URUTAN LELEH MODEL CBF

No	Beban (kN)	Perpindahan (mm)	Regangan (μ strain)	No. <i>Strain Gauge</i>
1.	165.0263	2.770	1514	S ₁
2.	279.0685	4.830	1527	S ₂
3.	415.3124	11.250	1500	S ₃
4.	434.0810	23.490	1494	S ₅
5.	444.8958	27.312	1500	S ₄



Gambar 4.8. Grafik beban – regangan Model CBF

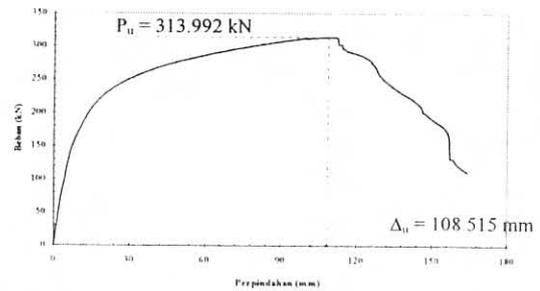


Gambar 4.9. Urutan terjadi leleh Model

Pada Gambar 4. 6 terlihat bahwa setelah beban ± 430 kN, struktur mengalami kenaikan beban yang cukup berarti sampai mencapai beban puncak $P_u = 450.675$ kN. Hal ini disebabkan adanya *strain hardening* pada batang bresing (tepatnya pada sambungan baut). Setelah beban tersebut, batang bresing putus yang mengakibatkan beban turun drastis menjadi 260 kN. Selanjutnya perilaku Model CBF seperti pada MRF.

4. 2. 3. Data Uji Model III, D-EBF

Hasil pengujian Model D-EBF diperoleh beban maksimum yang dapat dicapai sebesar $P_u = 313.992$ kN dengan perpindahan maksimum $\Delta_u = 108.515$ mm, seperti pada Gambar 4. 10. Energi yang dapat diterima struktur sampai beban ultimit (maksimum) adalah 28306 kNmm.



Gambar 4.10. Grafik beban – perpindahan Model D_EBF

Kelelahan pada elemen *link* pada bagian badan yang berperilaku geser dihitung berdasarkan kriteria leleh *Octahedral Shear Stress*, yaitu :

$$\tau_h = \tau_{ho} \quad 4. 1$$

dimana :

$$\tau_h = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad 4. 2$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = tegangan utama

Dengan mengambil tegangan uniaksial pada pengujian tarik $\sigma_1 = F_y$ dan $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ didapat batas leleh :

$$\tau_{ho} = \frac{\sqrt{2}}{3} F_y \quad 4. 3$$

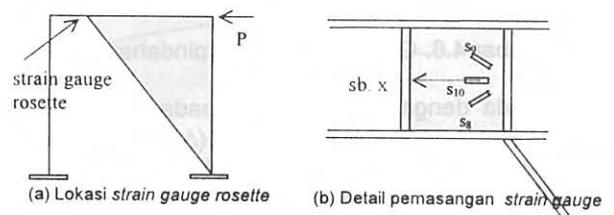
Bila diasumsikan pada bagian badan dari elemen *link* berperilaku sebagai *plane stress* nilai-nilai tegangan utama (σ_1, σ_2) dapat ditentukan dari nilai-nilai regangan utama ϵ_1 dan ϵ_2 yang didapat dari bacaan *strain gauge*. Hubungan tegangan utama dan regangan utama adalah :

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2) \quad 4. 4$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1) \quad 4. 5$$

Regangan utama (ϵ_1, ϵ_2) ditentukan dari nilai regangan yang dibaca dari *strain gauge* tipe *rosette*. Dengan pemasangan *strain gauge* seperti pada Gambar 4.11, maka regangan utama dapat dihitung dari hubungan :

$$\epsilon_{s_i} = \epsilon_{xx} \cos^2 \theta_i + \epsilon_{yy} \sin^2 \theta_i + \gamma_{xy} \sin \theta_i \cos \theta_i \quad 4. 6$$



Gambar 4.11. Strain gauge rosette pada elemen link

Besar sudut masing-masing *strain gauge* terhadap sumbu x, $\theta = 45^\circ$, maka hubungan regangan pada rumus diatas untuk ketiga *strain gauge* dapat ditulis dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_8 \\ S_9 \\ S_{10} \end{Bmatrix} \quad 4.7$$

sehingga regangan terhadap sumbu x adalah :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_8 \\ S_9 \\ S_{10} \end{Bmatrix} \quad 4.8$$

Selanjutnya nilai-nilai regangan utama dapat dihitung dari hubungan :

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad 4.9$$

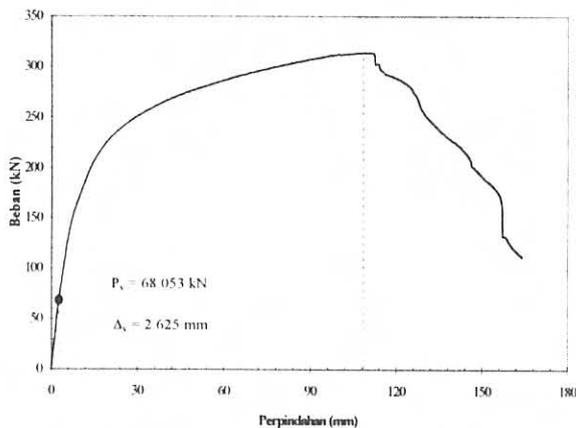
Hasil pengujian bagian badan profil IWF didapat $E = 203429 \text{ N/mm}^2$, $F_y = 277.70 \text{ N/mm}^2$ dan $\nu = 0.3$. Dengan menghitung nilai-nilai regangan dari pengujian Model D-EBF, maka leleh pertama yang disebabkan oleh geser terjadi pada saat beban $P_y = 68.053 \text{ kN}$ dan perpindahan $\Delta_y = 2.625 \text{ mm}$.

Nilai daktilitas (μ), beban leleh (P_y) dan simpangan leleh (Δ_y) dapat dilihat pada Tabel 4. 4 dan Gambar 4. 11 berikut :

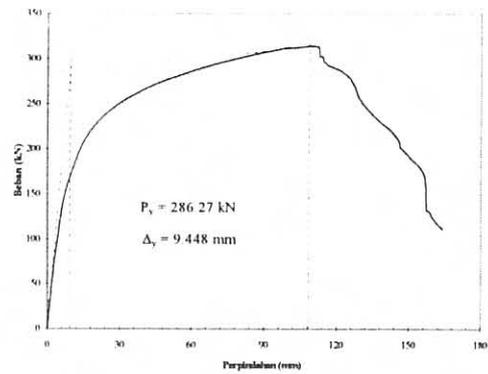
Tabel 4. 6
NILAI DAKTILITAS MODEL D-EBF

No	Konsep Daktilitas	P_y (kN)	Δ_y (mm)	$\mu = \Delta_u/\Delta_y$
1.	Leleh Pertama	68.053	2.625	41.345
2.	Significant Yield	286.27	9.448	11.486
3.	Kesamaan Energi	291.67	29.015	3.740

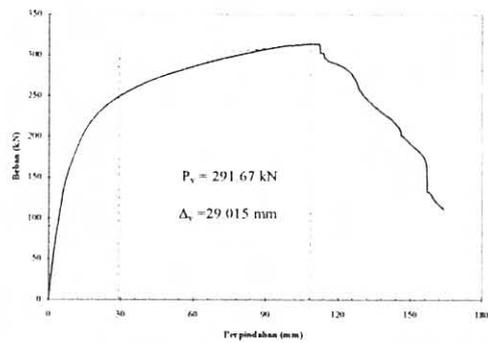
Catatan : $P_u = 313.992 \text{ N}$
 $\Delta_u = 108.515 \text{ mm}$



(a) Didasarkan leleh pertama



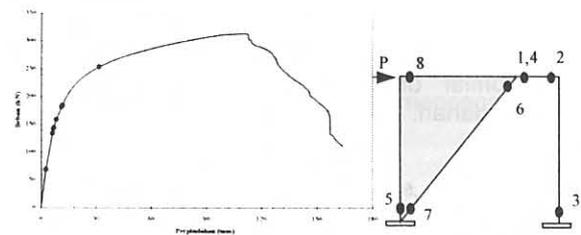
(b) Didasarkan significant yield



(c) Didasarkan kesamaan penyerapan energi

Gambar 4.12. Nilai daktilitas Model D-EBF

Urutan terjadi leleh pada struktur ditentukan dari nilai regangan leleh pada *strain gauge* yang terpasang, seperti pada Tabel 4. 1. Khusus untuk elemen *link*, leleh bagian badan mengikuti kriteria leleh *octahedral shear stress* yang telah diuraikan diatas.



catatan : leleh ke 1 akibat geser
leleh ke 2, 3 dst akibat lentur

Gambar 4.13. Urutan leleh Model D-EBF

Tabel 4. 7 dan Gambar 4. 13 menggambarkan urutan kelelahan pada Model D-EBF selama pembebanan berlangsung.

Tabel 4. 7
URUTAN LELEH MODEL D-EBF

No.	Beban (kN)	Perpindahan (mm)	Regangan (μ strain)	No. Strain Gauge
1.	68.053	2.625	1476	Shear
2.	133.494	6.157	1493	S4
3.	141.965	6.607	1500	S2
4.	143.379	6.828	1498	S5
5.	158.017	8.156	1505	S1
6.	180.968	11.978	1713	S6
7.	184.119	11.513	1718	S7
8.	253.223	31.434	1482	S3

4. 3. Analisis Data Hasil Pengujian

4. 3. 1 Kekuatan struktur

Seperti yang telah disajikan pada Sub-bab 4. 2, Model CBF dan D-EBF, dengan adanya bresing, mengalami kenaikan pada beban leleh maupun beban ultimit bila dibandingkan dengan Model MRF. Kenaikan beban tersebut dapat dilihat pada Tabel 4. 8 berikut :

Tabel 4. 8
PERBANDINGAN KEKUATAN BEBERAPA MODEL

No.	Model	Beban Leleh I		Beban Ultimit	
		P_y (kN)	% thd. MRF	P_u (kN)	% thd. MRF
1	MRF	76.863	100.00	208.040	100.00
2	CBF	165.026	214.70	450.675	216.63
3	D-EBF	68.053	88.54	313.992	150.93

Dari tabel tersebut terlihat bahwa struktur CBF, adanya bresing konsentrik, mampu menaikkan beban leleh maupun ultimit lebih dari 200% dibandingkan Model MRF. Hal yang sama terjadi pada Model D-EBF dimana beban ultimit naik sekitar 150 % dibandingkan dengan Model MRF, namun beban leleh turun yaitu sekitar 68 %. Penurunan beban leleh ini disebabkan terjadi leleh geser pada elemen *link*.

4. 3. 2 Kekakuan struktur

Sebagai pendekatan pengaruh pemasangan bresing terhadap kekakuan struktur, dilakukan regresi polinomial derajat 6 (enam) pada grafik beban-perpindahan. Regresi polinomial tersebut berupa fungsi :

$$y = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + g \quad 4.10$$

dimana :

y = beban

x = perpindahan

Hasil regresi polinomial tersebut cukup mewakili grafik yang ada. Hasil tersebut adalah :

untuk Model MRF

$$y = -2e^{-8}x^6 + 6e^{-6}x^5 - 7e^{-4}x^4 + 0.0423x^3 - 1.3638x^2 + 23419x + 7.137R^2 = 0.9997 \quad 4.11$$

untuk Model CBF

$$y = 3e^{-5}x^6 - 26e^{-3}x^5 + 0.0847x^4 - 1.1758x^3 + 4.0856x^2 + 5.5294x + 5918 \quad R^2 = 0.9998 \quad 4.12$$

untuk Model D-EBF

$$y = -6e^{-9}x^6 + 2e^{-6}x^5 - 3e^{-4}x^4 + 0.026x^3 - 1.1111x^2 + 24984x + 9.744 \quad R^2 = 0.9989 \quad 4.13$$

Dari grafik polinomial tersebut, akan diambil kekakuan tangensial (K_t) pada awal beban dan saat leleh, yang mana kekakuan tangensial diambil dari turunan pertama fungsi polinomial tersebut diatas. Harga-harga kekakuan tangensial dari Model dapat dilihat pada Tabel 4. 9.

Dari Tabel 4. 9, terlihat bahwa Model CBF mempunyai kekakuan awal tertinggi yaitu 55.294 kN/mm, yang mana sesuai dengan prinsip bentuk segitiga berperilaku lebih kaku.

Tabel 4. 9
KEKAKUAN TANGENSIAL BEBERAPA MODEL

No	Model	Kekakuan Tangensial K_t (kN/mm)					
		awal	Leleh				
			I	II	III	IV	V
1	MRF	23.41	14.96	14.62	11.69	-	-
2	CBF	55.29	57.33	44.04	7.37	21.50	51.54
3	D-EBF	24.98	19.68	14.07	13.46	13.18	11.578

Masih untuk Model CBF, kekakuan pada saat leleh I, leleh IV dan leleh V meningkat dari kekakuan sebelumnya. Hal ini disebabkan karena :

- untuk leleh I, adanya perilaku bresing pada sistem sambungan baut. Baut tersebut , adanya lubang baut > diameter baut, dengan semakin meningkatnya gaya pada bresing akan terjadi *slip* antara batang bresing dengan *gusset plate*. Selanjutnya sambungan baut akan berperilaku sebagai sambungan *bearing type*. Perilaku ini dapat dilihat pada Gambar C-5 Grafik beban-regangan strain 5, Lampiran C, dimana setelah beban kira-kira 100 kN kemiringan grafik menjadi tajam.
- untuk leleh IV dan leleh V, peningkatan kekakuan tangensial diakibatkan adanya *strain hardening* pada bresing di lokasi baut, sebelum terjadi putus, seperti pada Gambar 4. 6 atau pada foto pengujian.

Perilaku Model MRF dan D-EBF tidak seperti Model CBF, yaitu kekakuan tangensial semakin turun akibat kelelahan yang terjadi. Hal ini karena semua sistem sambungan menggunakan las. Kekakuan awal dari kedua model tersebut tidak jauh berbeda yaitu 23.419 kN/mm untuk MRF dan 24.984 kN/mm untuk D-EBF.

Adanya penambahan bresing telah mengakibatkan perpindahan leleh I menjadi kecil namun meningkatkan beban leleh (Tabel 4. 3, Tabel 4. 5 dan Tabel 4. 7), yaitu 3.678 mm untuk MRF, 2.769 untuk CBF dan 2.625 untuk D-EBF. Penambahan elemen *link* nampaknya mengakibatkan Model D-EBF mempunyai perpindahan leleh terkecil. Tetapi bila dihubungkan antara penurunan kekakuan tangensial (D_{kt}) dengan perpindahan leleh I dengan leleh II dan seterusnya, penurunan kekakuan Model D-EBF paling kecil, yang berarti struktur D-EBF paling baik dibandingkan model yang lain. Penurunan kekakuan tangensial ini diambil selisih kekakuan leleh dibagi dengan selisih perpindahan leleh, yaitu :

$$D_{kti} = \frac{K_{ti} - K_{ti-1}}{\Delta_{yi} - \Delta_{yi-1}} \quad 4.14$$

Untuk lebih jelas tentang hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 4. 10 dan Tabel 4. 11

Tabel 4. 10
RANGKUMAN BEBAN LELEH, PERPINDAHAN LELEH DAN KEKAKUAN TANGENSIAL

No	Model	Leleh I			Leleh II			Leleh III		
		P_{y1}	K_{t1}	Δ_{y1}	P_{y2}	K_{t2}	Δ_{y2}	P_{y3}	K_{t3}	Δ_{y3}
1	MRF	76.86	14.96	3.67	79.44	14.62	3.85	101.59	11.69	5.57
2	CBF	165.02	57.33	2.76	279.06	44.04	4.82	415.31	7.37	11.25
3	D-EBF	68.05	19.68	2.62	133.49	14.07	6.15	141.96	13.46	6.60

satuan dalam kN-mm

CBF pada kelelahan I, penurunan kekakuan D_{Kt1} bernilai positif karena adanya perilaku dari sambungan baut, seperti yang telah dijelaskan di muka.

Tabel 4. 11
PENURUNAN KEKAKUAN TANGENSIAL

No	Model	D_{Kt1}	D_{Kt2}	D_{Kt3}
1	MRF	-2.297	-1.884	-1.707
2	CBF	0.735	-6.447	-5.712
3	D-EBF	-2.020	-1.588	-1.338

satuan kN/mm/mm

4. 3. 3 Daktilitas struktur dan penyerapan energi

Seperti yang telah dijelaskan pada Sub-Bab 4. 2, daktilitas dan penyerapan energi struktur Model D-EBF paling besar untuk berbagai konsep daktilitas, sedangkan Model CBF paling kecil. Tabel 4. 12 merangkum daktilitas dan penyerapan dari model-model tersebut.

Tabel 4. 12
Rangkuman Daktilitas dan Penyerapan Energi

No	Konsep Daktilitas	Model		
		MRF	CBF	D-EBF
1	Leleh Pertama	20.416	10.585	41.345
2	Significant Yield	9.348	4.507	11.486
3	Kesamaan Energi	4.739	3.457	3.740
4	Penyerapan Energi (kNmm)	13158	10853	28306

Dalam hal penyerapan energi, Model D-EBF juga paling besar. Dengan demikian Model D-EBF berperilaku paling baik diantara model yang lain.

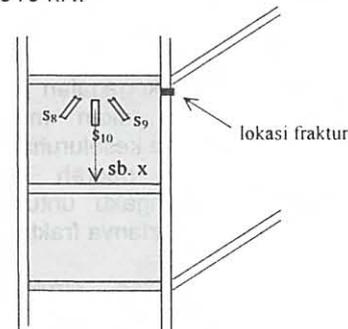
4. 3. 4 Keruntuhan struktur

Seperti yang telah diuraikan pada Bab sebelumnya bahwa semua struktur dibebani sampai mengalami keruntuhan dengan penambahan beban berdasarkan *load control*, dengan harapan pola keruntuhan struktur dapat diamati dengan cermat.

Model MRF mengalami keruntuhan ditandai dengan adanya fraktur pada sayap kolom. Sebagai catatan, Model MRF ini pada bagian pertemuan balok-kolom, *panel zone* (PZ), tidak dipasang pengaku diagonal. Ternyata hal ini mengakibatkan pada daerah PZ terjadi deformasi bahkan terjadi fraktur antara sayap dengan badan pada PZ tersebut, seperti pada Gambar 4. 5. Bentuk akhir Model MRF setelah runtuh dan deformasi PZ dapat dilihat pada foto-foto pengujian.

Perilaku Model CBF paling getas dibanding model lain. Sistem sambungan baut dengan diagonal konsentrik menyumbangkan perilaku yang demikian tersebut. Struktur sebelum runtuh ditandai dengan adanya peningkatan beban sebagai akibat adanya *strain hardening* pada bresing (tepatnya pada sambungan baut). Putus bagian bresing ini mengakibatkan beban turun secara drastis kira-kira menjadi 55 % dari beban ultimit yang dapat dicapai. Karena pembebanan berdasarkan *stroke control* maka perilaku CBF selanjutnya seperti pada MRF. Bentuk akhir setelah runtuh Model CBF dapat dilihat pada foto pengujian.

Struktur D-EBF mengalami keruntuhan (penurunan beban secara drastis) ditandai dengan adanya tanda-tanda fraktur pada elemen link bagian sayap, seperti Gambar 4. 14, dan bagian sayap tumpuan kolom pada saat beban mencapai kira-kira 310 kN.



Gambar 4. 14 Fraktur pada sayap link

Adanya fraktur pada elemen *link* bagian sayap mengakibatkan beban turun secara cepat. Saat beban ± 300 kN bagian sayap *link* telah terjadi fraktur secara penuh dan pada beban ± 275 terjadi fraktur pada *link* bagian badan (lanjutan fraktur dari sayap). Bentuk akhir Model D-EBF setelah runth sesuai dengan Gambar 2. 9 (lihat juga foto-foto pada lampiran), yang mana struktur runtuh pada bagian elemen *link*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5. 1. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen yang dilakukan terhadap model benda uji berupa Model MRF, CBF dan D-EBF dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Beban leleh pertama (P_y) untuk Model MRF, CBF dan D-EBF masing-masing adalah 76.863 kN, 165.026 kN dan 68.053 kN. Beban leleh pertama terkecil pada Model D-EBF yang dikarenakan terjadi leleh geser pada elemen *link*.
2. Beban ultimit (P_u) untuk Model MRF, CBF dan D-EBF masing-masing adalah 208.04 kN, 450.675 kN dan 313.992 kN. Model CBF mempunyai beban ultimit terbesar dibandingkan dengan model yang lain.
3. Daktilitas terbesar pada Model D-EBF yaitu 11.486 dan terkecil pada CBF yaitu 4.507 sedang untuk MRF 9.348. Sedangkan energi yang diserap struktur terbesar terjadi pada Model D-EBF yaitu 28306 kNm dan yang terkecil pada CBF yaitu 10852.7 kNm dan untuk MRF yaitu 13157.66 kNm.
4. Pada pengujian Model MRF terjadi fraktur didaerah *panel zone* (PZ) karena tidak ada pengaku diagonal pada daerah tersebut. Namun kejadian ini tidak terjadi pada model yang lain karena telah dipasang pengaku diagonal.
5. Keruntuhan Model CBF merupakan keruntuhan yang getas, disebabkan sistem sambungan bresing menggunakan baut, dan putus pada sambungan tersebut. Model yang lain keruntuhan lebih daktail karena semua elemen digunakan sambungan las penuh.

5. 2. Saran

Berdasarkan pengalaman yang dialami selama pelaksanaan pengujian di laboratorium, ada beberapa saran yang perlu disampaikan yaitu :

1. Pendetailan pada elemen-elemen struktur, sebagai pengaku atau penguat, sangat penting pada struktur baja agar didapat perilaku baja yang optimal dan tidak terjadi kegagalan pada elemen tersebut yang akhirnya akan mempengaruhi penampilan struktur secara keseluruhan.
2. Pada *panel zone* dan daerah lain, seperti tumpuan, diperlukan pengaku untuk menjamin terjadi *rigiditas* dan tidak adanya fraktur atau tekuk lokal pada daerah tersebut.
3. Perlu dilakukan pengujian struktur dengan pengaku eksentris tipe lain agar diketahui perilaku dari struktur dengan pengaku eksentris tersebut secara lebih mendalam.

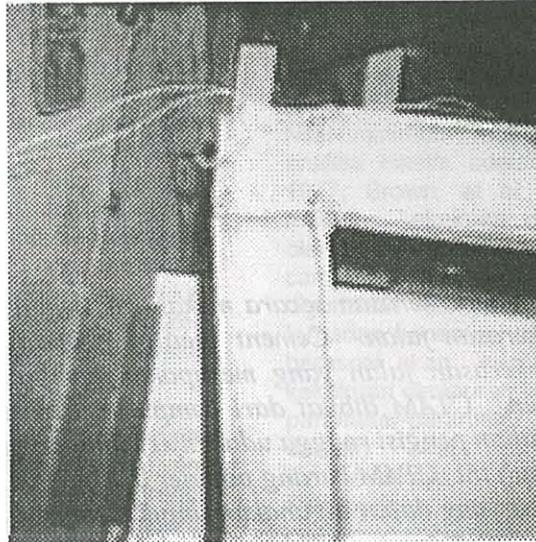
DAFTAR PUSTAKA

1. AISC, "Metric Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, 1993
2. AISC, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, Chicago, 1997
3. Applied Technology Council (ATC), "Structural Response Modification Factors", Vol. 19, 1995
4. ASTM E8 - 96, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials".
5. Balendra, T., et. al., "Behavior of Eccentrically Braced Frame by Pseudo-Dynamic Test", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 113, no. 4, April 1987
6. Beca Carter Hollings & Ferner Ltd. And the Indonsian Counterpart Team, "Indonesian Earhquake Study", New Zealand Bilateral Assistance Programme to Indonesia, Vol. 4, 1980
7. Departemen Pekerjaan Umum, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Rumah dan Gedung", SNI-1726-1989-F, Yayasan Badan Penerbit PU, 1989.
8. Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan, "Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung", 1983
9. Firmansjah, J., et. al., "Pengkajian Ketahanan Gempa Bangunan Rangka Baja Eksentrik 10 Lantai", Kelompok Studi Gempa Jurusan Teknik Sipil ITB, Bandung, 1993
10. Hjelmstad, K. D., Popov, E. P., "Characteristic of Eccentrically Braced Frames", Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 110, No. 2, Feb. 1984
11. Jain, A. K, Goel, S. C., "Seismic Respons of Eccentrically Braced Frames", Journal of Structural Division, ASCE, vol. 106, no. 4, April 1986
12. Hardono, Setyo., "Kajian Eksperimental terhadap Nilai Daktilitas dan Faktor Jenis Struktur Portal Terbuka, Portal dengan Diperkaku Konsentrik, dan Portal dengan Diperkaku Eksentrik", Tesis Magister, Bidang Khusus Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Program Pasca Sarjana, ITB, 2000.
13. Surahman, A., "Analytical and Experimental Evaluation of Earthquake Induced Stress on Structures for Building Code Purpose", Laporan Akhir Tahun kedua Program Hibah Tim Penelitian Pasca Sarjana, Jurusan Teknik Sipil, ITB, 1999.

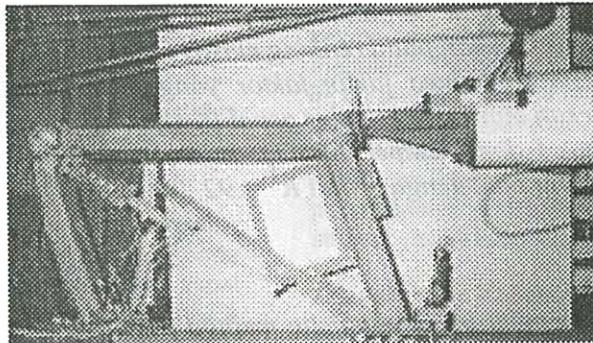
Penulis :

Setyo Hardono, Ir, MT., Asisten Peneliti Muda bidang Konstruksi Jalan, Puslitbang Prasarana Transportasi Badan Litbang Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah.

Foto-foto pengujian



Deformasi pada Panel Zone Model MRF



Deformasi akhir Model CBF



Deformasi pada elemen link Model D-EBF