

**DISERTASI**

**KINERJA BETON BUSA PREFABRIKASI SEBAGAI  
DINDING PENGISI AKIBAT PEMBEBANAN  
SIKLIK LATERAL**

*(Performance of Prefabricated Foam Concrete as Infilled  
Wall Under Cyclic Lateral Loading)*

**MANSYUR  
D013191013**



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

# LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

## KINERJA BETON BUSA PREFABRIKASI SEBAGAI DINDING PENGISI AKIBAT PEMBEBANAN SIKLIK LATERAL

### PERFORMANCE OF PREFABRICATED FOAM CONCRETE AS INFILLED WALL UNDER CYCLIC LATERAL LOADING

disusun dan diajukan oleh :

**MANSYUR**

**D013191013**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Doktor Program Studi Doktor Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada Tanggal 18 November 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Promotor,

  
Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng

NIP. 196805292002121002

Co Promotor,

Co Promotor,

  
Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT

NIP. 197206192000122001

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

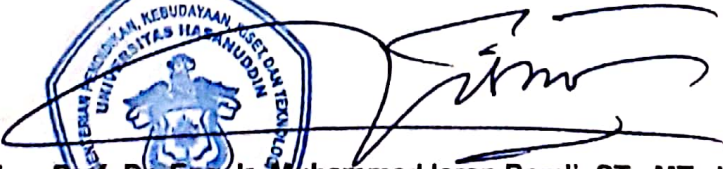
NIP. 197912262005011001

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas Teknik,

  
Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT

NIP. 197206192000122001

  
Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM

NIP. 197309262000121002

## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini

**Nama** : Mansyur  
**Nomor Mahasiswa** : D013191013  
**Program Studi** : Teknik Sipil  
**Jenjang** : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis berjudul

### **KINERJA BETON BUSA PREFABRIKASI SEBAGAI DINDING PENGISI AKIBAT PEMBEBANAN SIKLIK LATERAL**

Adalah karya tulis saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa disertasi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 23 November 2022

Yang menyatakan



*Mansyur*  
**MANSYUR**

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah kami panjatkan ke hadirat Tuhan yang maha kuasa yang atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni **“Kinerja Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Akibat Pembeabnan Siklik Lateral”** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan amat mendalam kepada bapak **Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng**, atas bimbingan, arahan dan petunjuknya sehingga penelitian dan penyusunan disertasi ini dapat kami laksanakan dengan baik. Ucapan dan penghargaan yang sama kami sampaikan kepada **Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT** dan **Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT** selaku Co-Promotor yang banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami. Kepada bapak kami mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang begitu tulus dan ikhlas.

Penghargaan yang setinggi tingginya kepada; Rektor Universitas Hasanuddin (Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc**), Bapak **Prof. dr. Budu, Ph.D., Sp.M(K), M.MedEd** (Dekan Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin), Bapak **Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT** (Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), Bapak **Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng** (Ketua Departemen Teknik

Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin), Ibu **Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT** (Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin) dan bapak/ibu dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengarahkan dan membimbing dalam proses perkuliahan. Bapak/ibu staf Pascasarjana Unhas dan staf Prodi S3 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi, kami sampaikan banyak terima kasih.

Ucapan terimakasih yang setinggi tingginya atas segala keikhlasan, pikiran dan tenaganya yang tidak ternilai. Hanya dengan doa semoga Allah Rabbul Alamin dapat membalasnya. Akhirnya kami ucapkan Nun Wal Kalami Wamayasturuun.

Makassar, November 2022  
Wassalam

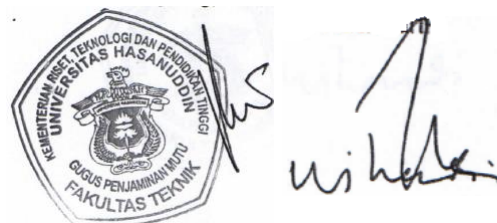
Mansyur

## ABSTRAK

**MANSYUR.** Kinerja Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Akibat Pembeabnan Siklik Lateral (dibimbing oleh **H. M. Wihardi Tjaronge, Rita Irmawaty** dan **A. Arwin Amiruddin**).

Banyak daerah di Indonesia yang terletak di dekat patahan gempa sehingga hampir setiap tahun bencana gempa bumi terjadi di berbagai daerah di Indonesia. Penelitian ini merupakan studi eksperimental pada perilaku beton busa prefabrikasi sebagai dinding pengisi terhadap pembebanan siklik lateral. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku kekuatan, daktilitas, kekakuan dan kapasitas disipasi energi pada beton busa prefabrikasi sebagai dinding pengisi. Benda uji terdiri dari 3 model dinding yaitu rangka beton bertulang (DB 1), beton busa prefabrikasi tanpa penambahan serat sebagai dinding (DB 2) dan beton busa prefabrikasi dengan penambahan serat sebagai dinding (DB 3). Pembebanan siklik lateral dengan metode displacement control diterapkan untuk mengevaluasi perilaku struktur dari dinding. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kekuatan pada benda uji DB 3 (panel pracetak beton busa menggunakan serat *polyolefin*) dan benda uji DB 2 (panel pracetak beton busa tidak menggunakan serat *polyolefin*), hampir sama dalam menerima beban siklik yang bekerja, yaitu masing-masing sebesar 44,88 kN dan 29,84 kN dimana kekuatan benda uji DB 3 29,61% lebih besar dibandingkan benda uji DB 2. Selain itu, nilai daktilitas rata-rata untuk semua benda uji baik dalam keadaan beban tekan maupun beban tarik, berdasarkan SNI 1726-2019, maka benda uji DB 3 termasuk dalam taraf kinerja struktur daktail parsial dengan nilai daktilitas lebih dari 2,00. Pada benda uji DB 2 dan DB 1 termasuk dalam taraf kinerja struktur daktail parsial dengan nilai daktilitas yang dihasilkan lebih dari 3,00. Oleh karena itu, terlihat bahwa bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat sangat berpengaruh terhadap nilai daktilitas. Sedangkan rasio disipasi energi relatif ( $\beta$ ) pada ketiga benda uji memenuhi persyaratan minimum yang disyaratkan dalam SNI 7834:2012 atau ACI 374.1-05 sebesar 0,125, sehingga ketiga spesimen uji masih memiliki kemampuan untuk menjaga stabilitasnya sebelum mengalami keruntuhan. Oleh karena itu, benda uji rangka beton bertulang dengan menggunakan bahan pengisi beton busa prefabrikasi memiliki karakteristik atau perilaku struktur yang baik dalam menerima beban gempa dibandingkan dengan tanpa menggunakan bahan pengisi dan dapat dijadikan sebagai alternatif bahan pengisi pada dinding struktur pengganti batu bata, hebel, batako, dll.

**Kata kunci** : Pembebanan siklik lateral, Beton busa prefabrikasi, Dinding pengisi

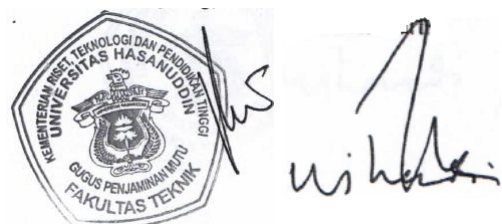


## ABSTRACT

**MANSYUR.** *Performance of Prefabricated Foam Concrete as Infilled Wall Under Cyclic Lateral Loading* (supervised by **H. M. Wihardi Tjaronge, Rita Irmawaty** and **A. Arwin Amiruddin**).

Many areas in Indonesia are located near earthquake faults so that almost every year earthquakes occur in various regions in Indonesia. This research is an experimental study on the behavior of prefabricated foam concrete as an infill wall against lateral cyclic loading. This study aims to evaluate the behavior of strength, ductility, stiffness and energy dissipation capacity of prefabricated foam concrete as infill walls. The test object consisted of 3 wall models, namely reinforced concrete frame (DB 1), prefabricated foam concrete without the addition of fiber as a wall (DB 2) and prefabricated foam concrete with the addition of fiber as a wall (DB 3). Lateral cyclic loading with displacement control method was applied to evaluate the structural behavior of the walls. The results showed that the strength values of the DB 3 specimens (precast foam concrete panels using polyolefin fibers) and DB 2 specimens (precast foam concrete panels not using polyolefin fibers) were almost the same in receiving working cyclic loads, each of which was equal to 44.88 kN and 29.84 kN where the strength of the specimen DB 3 is 29.61% greater than the specimen DB 2. In addition, the average ductility value for all test specimens both under compression and tensile loads, based on SNI 1726-2019, then the test object DB 3 is included in the performance level of partial ductile structures with a ductility value of more than 2.00. The test objects DB 2 and DB 1 are included in the performance level of partial ductile structures with the resulting ductility value of more than 3.00. Therefore, it can be seen that the filler material for precast foam concrete panels with and without the addition of fiber greatly affects the ductility value. Meanwhile, the relative energy dissipation ratio ( $\beta$ ) in the three test specimens met the minimum requirements required in SNI 7834:2012 or ACI 374.1-05 of 0.125, so that the three test specimens still had the ability to maintain their stability before collapsing. Therefore, reinforced concrete truss specimens using prefabricated foam concrete fillers have good structural characteristics or behavior in receiving earthquake loads compared to those without using infill materials and can be used as an alternative infill material in structural walls to replace bricks, hebel, bricks, etc.

**Keywords** : Lateral cyclic loading, Prefabricated foam concrete, Infill wall



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR NOTASI</b> .....	xii
<b>BAB I     PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang Masalah .....	1
B. Rumusan Masalah.....	6
C. Tujuan Penelitian.....	7
D. Batasan Masalah.....	8
E. Manfaat Penelitian.....	9
F. Sistematika Penulisan .....	10
<b>BAB II    TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Isu Strategis .....	12
B. Konstruksi Non-Rekayasa ( <i>Non Engineered Building</i> )	16
C. Bata Pengisi Rangka Beton Bertulang Pada Gedung ( <i>Masonry Infilled RC Frame of Building</i> ) .....	20
D. Teori Beton Ringan .....	23
E. Spesifikasi dan Aplikasi Beton Ringan.....	28



F. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan Dengan Pembebanan Siklik Lateral	32
G. Perilaku Struktur ( <i>Structural Properties</i> ).....	46
H. Titik Leleh ( <i>Yield Point</i> ) .....	53
I. Disipasi Energi .....	56
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	59
B. Material dan Peralatan Penelitian .....	59
C. Pembuatan Panel Pracetak Beton Busa .....	62
D. Benda Uji dan Instrumen Penelitian .....	65
E. Pelaksanaan Penelitian .....	70
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	
A. Karakteristik Material .....	82
B. Kekuatan Benda Uji Dinding .....	88
C. Daktalitas dan Kekakuan Benda Uji Dinding.....	96
D. Disipasi Energi Benda Uji Dinding .....	113
E. Interpretasi Pola Retak Benda Uji Dinding .....	121
F. Temuan Empirik .....	132
<b>BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
A. Kesimpulan.....	134
B. Saran .....	135
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>125</b>

## DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1.	Material Penelitian.....	60
2.	Peralatan Penelitian .....	61
3.	Dimensi Benda Uji.....	65
4.	Posisi Penempatan <i>Strain Gauge</i> Baja Tulangan Pada Benda Uji .....	68
5.	Posisi Penempatan <i>Strain Gauge</i> Beton pada Benda Uji.....	70
6.	Metode Pengujian Karakteristik Agregat Halus .....	72
7.	Karakteristik Fisik dan Metode Pengujian Beton Busa .....	73
8.	Metode Pengujian B – Amplitude Dari Siklus Terbalik .....	80
9.	Komposisi Kebutuhan Bahan Campuran Beton Busa Untuk 1 m <sup>3</sup> .....	82
10.	Karakteristik Beton Busa .....	83
11.	Karakteristik Serat <i>Polyolefin</i> .....	84
12.	Rancangan Campuran Beton Untuk Sloof (1 m <sup>3</sup> ).....	85
13.	Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan Untuk Penulangan Sloof ....	86
14.	Rancangan Campuran Beton Untuk Kolom dan Balok (1 m <sup>3</sup> )...	87
15.	Hasil Uji Kuat Tarik Baja Untuk Penulangan Kolom dan Ring Balk .....	88
16.	Perbandingan Tingkat Kekuatan Pada Semua Benda Uji.....	95
17.	Hasil Perhitungan Beban Leleh dan Perpindahan Leleh .....	104

18.	Daktalitas Benda Uji .....	107
19.	Kekakuan Benda Uji DB 1 .....	108
20.	Kekakuan Benda Uji DB 2 .....	110
21.	Kekakuan Benda Uji DB 3 .....	113
22.	Kekakuan Pada Semua Benda Uji .....	114
23.	Persyaratan Rasio Disipasi Energi Relatif .....	120

## DAFTAR GAMBAR

<b>Nomor</b>	<b>Halaman</b>
1. Peta Rawan Gempa yang Ada di Indonesia .....	13
2. Gempa yang Terjadi di (a) Padang dan (b) Palu .....	13
3. Bangunan Tradisional (Konstruksi Non-Rekayasa Klasifikasi 1)	17
4. Material Batu Bata, Batako dan Hebel (Bata Ringan) .....	20
5. Bangunan Rumah yang Terbuat dari Pasangan Bata .....	20
6. Kerusakan Akibat Gempa Bagunan Gedung yang Memiliki Pengisi Bata Pada Kerangka Beton Bertulang (Bangunan Dengan Rekayasa).....	23
7. Perkiraan Berat Unit dan Klasifikasi Penggunaan Beton Agregat Ringan Menurut ACI 213R3 .....	24
8. Parameter Kinerja Spesimen: (A) Titik Terakhir di $P_u \geq 0,8 P_{peak}$ .....	36
9. Parameter Kinerja Spesimen: (B) Titik Terakhir di $P_u = 0,8 P_{peak}$ (Dilanjutkan) .....	37
10. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian A.....	37
11. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian B (Dilanjutkan) .....	38
12. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian C (Dilanjutkan).....	38
13. Contoh Rata-Rata Kurva Envelope .....	39

14.	Contoh Spesimen Dinding Geser .....	40
15.	Contoh Set Up Pengujian Siklik Spesimen Dinding Geser .....	41
16.	Schedule Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji A .....	42
17.	Pola Fase Tunggal 2 (Metode Uji A) .....	43
18.	Schedule Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji B .....	43
19.	Schedule Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji C .....	44
20.	Hubungan Beban-Lendutan Pada Beton Bertulang .....	46
21.	Definisi Daktalitas Kelengkungan .....	49
22.	Hubungan Momen, Curvature dan Lendutan Pada Struktur Kantilever .....	50
23.	Beban dan Defleksi Pada Kurva Histeresis .....	50
24.	Degradasi Kekakuan Pada Kurva Histeresis Berdasarkan $tg \alpha$ .....	51
25.	Titik Leleh Kurva Beban Displacement (Zhu, 1989) .....	53
26.	Titik Leleh Kurva Beban Displacement (Mander et al., 1988)....	54
27.	Titik Leleh Kurva Beban Displacement (Park, R., 1988) .....	55
28.	Titik Leleh Kurva Beban Displacement (ECCS, 1986) .....	56
29.	Disipasi Energi Menurut ATC 40 (Park dan Eom, 2004) .....	57
30.	Proses Pembuatan Beton Busa .....	63
31.	Panel Pracetak Beton Busa.....	64
32.	Benda Uji DB 1 .....	66
33.	Benda Uji DB 2 .....	66
34.	Benda Uji DB 3.....	67
35.	Jarak Penempatan <i>Strain Gauge</i> Pada Baja Tulangan .....	68

36.	Jarak Penempatan <i>Strain Gauge</i> Pada Beton Benda Uji DB 1 .	69
37.	Jarak Penempatan <i>Strain Gauge</i> Pada Beton Benda Uji DB 2 dan DB 3 .....	69
38.	Jarak Diagram Alir Penelitian .....	71
39.	Sketsa <i>Setting Up</i> Pengujian.....	76
40.	Hasil <i>Setting Up</i> Pengujian.....	76
41.	Siklus Pembebanan Menurut ASTM E2126-02a .....	78
42.	Tampak Fisik Dari Serat <i>Polyolefin</i> .....	85
43.	Kuat Tekan Beton Untuk Sloof .....	86
44.	Kuat Tekan Beton Untuk Kolom dan Ring Balk .....	88
45.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji DB 1 .....	90
46.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji DB 2 .....	92
47.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji DB 3 .....	93
48.	Perbandingan Hubungan Beban dan Lendutan Semua Benda Uji .....	95
49.	Perbandingan Kekuatan Untuk Semua Benda Uji.....	96
50.	Kurva Titik Leleh DB 2 Metode General Yield Momen .....	98
51.	Kurva Titik Leleh DB 2 Metode Mander.....	99
52.	Kurva Titik Leleh DB 2 Metode Park (Luas Area).....	101
53.	Kurva Titik Leleh DB 2 Metode ECCS .....	102
54.	Kurva Titik Leleh DB 2 Metode ASTM E2126-11 .....	103
55.	Perbandingan Nilai Daktalitas Akibat Beban Tekan .....	106
56.	Perbandingan Nilai Daktalitas Akibat Beban Tarik .....	106

57.	Kekakuan Benda Uji DB 1 .....	109
58.	Kekakuan Benda Uji DB 2 .....	111
59.	Kekakuan Benda Uji DB 3 .....	112
60.	Perbandingan Kekakuan Pada Benda Uji Kondisi Tekan.....	114
61.	Perbandingan Kekakuan Pada Benda Uji Kondisi Tarik.....	115
62.	Disipasi Energi Benda Uji DB 1 .....	117
63.	Disipasi Energi Benda Uji DB 2 .....	118
64.	Disipasi Energi Benda Uji DB 3 .....	119
65.	Rasio Disipasi Energi Relatif .....	121
66.	Pola Retak Benda Uji DB 1 .....	122
67.	Retak Yang Terjadi Pada Daerah Sendi Plastis .....	124
68.	Pola Retak Benda Uji DB 2 .....	125
69.	Kegagalan Yang Terjadi Pada Benda Uji DB 2 .....	127
70.	Pola Retak Benda Uji DB 3 .....	129
71.	Serat Yang Timbul Pada Benda Uji DB 3 .....	130
72.	Pemisahan Antara Bahan Pengisi Dan Kolom .....	132

## DAFTAR NOTASI

<b><math>K_e</math></b>	= Kekakuan elastik (kN/mm)
<b><math>P_{peak}</math></b>	= Beban pada saat 0,4 $P_{peak}$ (kN)
<b><math>\Delta P_{peak}</math></b>	= Simpangan pada saat beban 0,4 $P_{peak}$ (mm)
<b><math>P_{yield}</math></b>	= Beban pada kondisi leleh
<b><math>A</math></b>	= Luas (kN.mm) sesuai beban-simpangan yang diamati
<b><math>\Delta_{yield}</math></b>	= Simpangan leleh (mm)
<b><math>P_{yield}</math></b>	= Beban leleh (kN)
<b><math>V_{peak}</math></b>	= Kekuatan geser (N/m)
<b><math>P_{peak}</math></b>	= Beban maksimum yang dapat dipikul oleh specimen (kN)
<b><math>L</math></b>	= Panjang specimen (m)
<b><math>G'</math></b>	= Modulus geser spesimen yang diperoleh dari pengujian (termasuk deformasi geser dan angkat untuk koneksi sistem), (N/m); mewakili geser garis potong kekakuan pada perpindahan spesimen tertentu terhadap rasio aspek
<b><math>P</math></b>	= Beban yang diterapkan diukur di tepi atas spesimen (N)
<b><math>\Delta</math></b>	= Perpindahan tepi atas spesimen berdasarkan hasil pengujian (m)
<b><math>H</math></b>	= Tinggi spesimen (m)
<b><math>\Delta_e</math></b>	= Perpindahan tepi atas spesimen pada 0,4 $P_{peak}$
<b><math>D</math></b>	= Densitas beton (kg/m <sup>3</sup> )
<b><math>M_c</math></b>	= Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)
<b><math>M_m</math></b>	= Massa wadah ukur (kg)
<b><math>V_c</math></b>	= Volume wadah ukur (m <sup>3</sup> )
<b><math>M</math></b>	= Massa total dari semua material dalam campuran (kg)
<b><math>V</math></b>	= Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m <sup>3</sup> )
<b><math>f'_c</math></b>	= Kuat tekan beton (N/mm <sup>2</sup> )
<b><math>P</math></b>	= Beban maksimum (N)
<b><math>A</math></b>	= Luas penampang yang menerima beban (mm <sup>2</sup> )



$f'_{ct}$	= Kuat tarik belah (N/mm <sup>2</sup> )
$P$	= Beban maksimum (N)
$L$	= Panjang benda uji silinder (mm)
$D$	= Diameter benda uji silinder (mm)
$\mu_{\varepsilon}$	= Daktilitas Regangan
$\varepsilon$	= Total Regangan yang Terjadi
$\varepsilon_y$	= Regangan Pada Saat Leleh
$\mu_{\theta}$	= Daktilitas Kelengkungan
$\theta_m$	= Kelengkungan Maksimum
$\theta_y$	= Kelengkungan Pada Saat Leleh
$\mu_{\Delta}$	= Daktilitas Perpindahan
$\Delta$	= $\Delta_y + \Delta_p$
$\Delta_y$	= Perpindahan Pada Titik Leleh
$\Delta_p$	= Perpindahan Pada Titik Plastis Penuh
$\mu_{oi}^+ \text{ \& } \mu_{oi}^-$	= Daktilitas Parsial
$e^+ \text{ \& } e^-$	= Lendutan Batas
$\mu_i^+ \text{ \& } \mu_i^-$	= Daktilitas Penuh
$\Delta e_i^+ \text{ \& } \Delta e_i^-$	= Lendutan Batas Total
$e_y^+ \text{ \& } e_y^-$	= Lendutan Leleh
$\xi^+ \text{ \& } \xi^-$	= Rasio Kekakuan Pada Daerah Positif dan Negatif
$\xi^+ (\mu_{oi}^+)$	= Nilai Minimum Dari $\xi^+$ yang Dievaluasi Dari Tiga Siklus Tiap Grup
$\xi^-(\mu_{oi}^-)$	= Nilai Minimum Dari $\xi^-$ yang Dievaluasi Dari Tiga Siklus Tiap Grup
$P_{maks}$	= Beban Maksimum
$P_y$	= Beban Pada Saat Awal Leleh
$\varepsilon^+ \text{ \& } \varepsilon^-$	= Rasio Kekuatan Pada Daerah Positif dan Negatif
$E$	= Disipasi Energi Total
$E_N$	= Disipasi Energi yang Dinormalisasi
$n$	= Jumlah Siklus Selama Pengujian
$E_{max}$	= Beban Lateral Maksimum

- ED** = Kapasitas Disipasi Energi Pada Area Sendi Plastis  
**ed** = Energi Disipasi Pada Kolom  
**Lp** = Perkiraan Panjang Daerah Sendi Plastis Kolom

# BAB I

## PENDAHULUAN

### A. Latar Belakang Masalah

Banyak wilayah di Indonesia yang terletak tepat di atas sesar gempa, sehingga wilayah tersebut memiliki kerentanan gempa yang relatif tinggi. Kejadian gempa bumi dangkal banyak dikaitkan dengan kesalahan (Latief *et al.*, 2000). Di Indonesia, dinding pengisi dari pasangan bata digunakan sebagai dinding eksterior dan partisi interior pada tipikal rumah hunian. Ada beberapa tipe rumah hunian di Indonesia, seperti hunian satu sampai dua lantai di pedesaan dan di kawasan pemukiman perkotaan, atau bangunan komersil campuran dua sampai empat lantai di kawasan komersial perkotaan.

Banyak daerah dengan rumah hunian pernah mengalami gempa bumi dahsyat di masa lalu. Meskipun rumah hunian satu sampai dua lantai dibangun dari rangka beton bertulang yang diisi dengan pasangan bata merah, sebagian besar di antaranya dirancang tanpa ketentuan seismik yang sesuai dan dapat dikategorikan sebagai bangunan non rekayasa (*non engineered building*). Rangka beton bertulang dengan desain non-seismik pada rumah hunian mudah rusak dalam gempa yang bermagnitudo sedang hingga tinggi dengan korban jiwa dan ekonomi yang cukup besar. Dalam

beberapa dekade terakhir, kerentanan seismik dari bangunan non-rekayasa telah mendapat perhatian besar (Boen T., 2003).

Dalam beberapa dekade terakhir, keberlanjutan pembangunan merupakan parameter utama dalam perkembangan teknologi termasuk industri konstruksi. Berkaitan dengan hal tersebut, inovasi berbasis keberlanjutan dalam produksi semen merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam konstruksi. Dengan memproduksi campuran semen yang memungkinkan penggunaan produk sampingan (abu terbang) yang mengandung silika dalam jumlah besar, mendukung pengurangan gas emisi CO<sub>2</sub>, mengurangi ekstraksi bahan alami dan mengurangi konsumsi bahan bakar (Deja, J. et. al. 2010). Abu terbang merupakan produk sampingan yang mengandung silika (SiO<sub>2</sub>) dalam jumlah besar dan sejumlah bahan yang dapat digunakan sebagai bahan pembuatan semen. Di Indonesia, salah satu semen campuran yang telah diproduksi oleh pabrik semen nasional adalah semen Portland komposit yang mengandung abu terbang hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik. Semen Portland komposit diproduksi berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 7064:2014). Banyak penelitian yang menunjukkan bahwa semen Portland komposit mampu menghasilkan beton dengan kinerja yang baik (Tjaronge M. W. et al., 2014; Erniati, et al., 2015; Caronge M. A. et al., 2017, 2020; Marewangeng et al., 2020).

Penggunaan material busa pada struktur gedung tingkat tinggi dan rumah hunian merupakan bagian dari inovasi berkelanjutan yang berbasis material yang ramah lingkungan. Penggunaan material beton busa sebagai dinding dapat mengurangi beban yang ditanggung oleh elemen struktur sehingga dapat memperkecil dimensi balok, kolom dan pondasi yang berimplikasi pada pengurangan penggunaan material beton. Konsumsi bahan bakar dapat dikurangi dengan penggunaan struktur elemen pracetak dengan yang terbuat dari beton busa.

Beton busa terdiri dari pasta yang berbahan dasar semen Portland, filler atau agregat halus, air dan busa tanpa menggunakan agregat kasar. Kandungan busa banyak menghasilkan rongga-rongga kecil pada beton busa yang telah mengeras sehingga bobotnya lebih ringan dari pada beton konvensional, sedangkan pada kondisi segar bubur beton busa memiliki konsistensi yang baik untuk mengalir bebas dengan bobotnya sendiri yang dapat mengisi cetakan atau mould (Amran Y. H. M. et al., 2015; Lesovik, V. et al., 2020). Penelitian pendahuluan tentang penggunaan semen Portland komposit dalam pembuatan beton busa telah dilakukan oleh Sunarno, Y., et al. 2020; Tumpu, M., et al. 2021; Mansyur et. al., 2021, Salu Y. L., et al., 2021 menunjukkan bahwa beton busa keras berbahan semen Portland komposit memiliki kuat tekan awal yang sama dengan beton busa berbahan OPC (*Ordinary Portland Cement*).

Di lain hal, permintaan akan perumahan murah dalam beberapa tahun terakhir telah menyebabkan meningkatnya popularitas perumahan buatan. Keinginan pabrikan untuk menggunakan material secara efisien mensyaratkan bahwa perilaku struktur-struktur ini dapat diteliti dan dikembangkan sepenuhnya sehingga prosedur desain berdasarkan perilaku yang diamati akan memastikan kemudahan pelaksanaan dan perawatan pada unit struktural. Salah satu yang dapat dimanfaatkan adalah dinding dengan rangka beton bertulang berbahan panel pracetak beton busa sebagai bahan pengisi dengan tujuan untuk menghasilkan dinding beton busa yang tahan terhadap gempa.

Salah satu solusi yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja struktur bangunan tingkat tinggi maupun bangunan rumah hunian dalam mengatasi simpangan horisontal adalah dengan pemasangan dinding yang menggunakan panel pracetak beton busa sebagai bahan pengisi pada rangka beton bertulang. Dinding yang menggunakan bahan pengisi panel pracetak beton busa dapat dipasang dalam posisi vertikal pada sisi bangunan tertentu yang berfungsi menambah kekakuan struktur dan menyerap gaya geser yang besar seiring dengan semakin tingginya struktur. Fungsi dinding dalam suatu struktur bangunan juga penting untuk menopang lantai pada struktur dan memastikannya tidak runtuh ketika terjadi gaya lateral akibat gempa. Ketika dinding ditempatkan pada lokasi-lokasi tertentu yang cocok

dan strategis, dinding tersebut dapat digunakan secara ekonomis untuk menyediakan tahanan beban horisontal yang diperlukan.

Banyak keuntungan yang diperoleh dari beton busa, diantaranya adalah beban suatu konstruksi menjadi lebih kecil terutama untuk bangunan gedung bertingkat banyak, memiliki tahanan rambatan panas yang baik, tahan terhadap api, tidak berbahaya terhadap kesehatan, ramah lingkungan dan memiliki tahanan rambatan suara yang lebih baik jika dibandingkan dengan bahan dinding yang umum dipakai seperti bata merah. Kendala yang dimiliki oleh beton terutama beton busa adalah rendahnya tegangan tarik dan sifat getas. Sehingga beton busa membutuhkan perkuatan berupa tulangan tarik atau harus ada perlakuan khusus terhadap beton untuk meningkatkan tegangan tariknya. Untuk memperbaiki kelemahan sifat-sifat beton tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan serat (fiber) pada adukan beton. Konsep dasar pada penelitian ini adalah untuk menanggulangi kelemahan dari beton busa dengan menambahkan serat yang tersebar secara merata ke dalam adukan beton, sehingga dapat mencegah terjadi retakan yang terlalu dini. Banyak jenis serat yang telah digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat beton. Diantaranya adalah serat bahan alamiah ataupun serat buatan/sintetik.

Oleh karena itu, penelitian ini menyajikan upaya pengurangan kerentanan seismik pada rumah tinggal satu sampai dua lantai. Pengaruh

bahan pengisi dari panel pracetak beton busa dengan dan tanpa menggunakan serat perlu diperhitungkan sebagai parameter penting bersama dengan karakteristik dari rangka beton bertulang yang dijadikan sebagai portal untuk mengevaluasi kinerja seismik rumah hunian satu sampai dua lantai secara proporsional. Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, penelitian disertasi ini berjudul **“Kinerja Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Akibat Pembebanan Siklik Lateral”**.

## **B. Rumusan Masalah**

Hingga saat ini informasi mengenai hasil-hasil penelitian tentang penggunaan beton busa dalam bentuk panel pracetak sebagai material bahan pengisi pada dinding masih sangat terbatas. Untuk itu sangat menarik untuk dikaji lebih mendalam pengaruh material beton busa terhadap karakteristik pembebanan siklik lateral dinding yang menggunakan panel pracetak beton busa sebagai bahan pengisi. Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana kekuatan dinding rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.



2. Bagaimana perilaku daktilitas dan kekakuan rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.
3. Bagaimana kapasitas disipasi energi rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.

### **C. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah dikemukakan, adapun tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis kekuatan dinding rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.
2. Mengevaluasi dan menemukan perilaku daktilitas dan kekakuan rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.

3. Mengevaluasi dan menemukan kapasitas disipasi energi rangka beton bertulang dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa dengan dan tanpa penambahan serat polyolefin serta rangka beton bertulang dalam menerima beban siklik lateral yang bekerja pada dinding.

#### **D. Batasan Masalah**

Agar penelitian ini berjalan dengan baik, adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.
2. Menggunakan satu tipe rancangan campuran (*mix design*) hasil uji coba campuran awal yang terbaik.
3. Beton busa diproduksi dengan menggunakan semen portland komposit (PCC) dari salah satu produsen semen PCC di Indonesia.
4. Panel pracetak beton busa yang dibuat berdasarkan hasil dari serangkaian uji coba campuran beton busa.
5. Proses curing yang dilakukan pada dinding rangka beton bertulang dengan menggunakan bahan pengisi panel pracetak beton busa adalah curing udara.
6. Ukuran panel pracetak (panjang; lebar dan tebal) yaitu 70 cm; 40 cm dan 8 cm.

7. Pengujian benda uji silinder yaitu pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah) ukuran 10 cm x 20 cm.
8. Digunakan serat tipe *polyolefin* dengan berat 6 kg dari volume mortar.
9. Pengujian karakteristik siklik lateral dinding dengan bahan pengisi panel pracetak beton busa yaitu dilakukan pada dinding dengan ukuran tinggi yaitu 2 meter dan lebar 1,75 meter yang disusun menyerupai susunan batu bata (*masonry wall*) dilakukan pada umur 28 hari.
10. Tidak melakukan pengujian secara semikuantitatif berupa pengujian dengan metode XRD (*X-Ray Diffraction*) terhadap beton busa yang dihasilkan.

### **E. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah :

1. Dengan pemahaman karakteristik mekanik beton busa yang menggunakan air semen PCC sebagai material utama, dapat digunakan sebagai acuan awal dalam pekerjaan konstruksi.
2. Sebagai bahan pertimbangan dan masukan bagi pemerintah, swasta, dan seluruh komponen yang terlibat dalam dunia konstruksi, terutama dalam kaitannya dengan bangunan busa untuk mereduksi besarnya gaya gempa yang terjadi.

3. Sebagai bahan pertimbangan dan masukan bagi pemerintah, swasta dan seluruh komponen yang terlibat dalam dunia konstruksi, terutama dalam penyediaan perumahan murah untuk masyarakat.
4. Sebagai referensi untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai beton busa.

#### **F. Sistematika Penulisan**

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu: Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metodologi Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Sistematika penulisan digunakan untuk memudahkan penulisan naskah ilmiah seperti disertasi. Berikut ini secara garis besar merupakan rincian secara umum mengenai kandungan dari kelima bab tersebut di atas:

##### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menyajikan hal-hal mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan yang berisi tentang gambaran secara garis besar mengenai hal-hal yang dibahas dalam bab-bab berikutnya.

##### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi uraian mengenai dasar-dasar teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Uraian tersebut berisi pola-pola

kegagalan bahan pengisi sebagai dinding dengan struktur rangkan beton bertulang, pengujian siklik lateral tentang pengujian dinding dengan bahan pengisi beton busa prefabrikasi. Selain itu, dibahas juga kerangka pikir penelitian sebagai landasan berpikir dari penelitian yang dilakukan.

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tempat dan waktu penelitian, persiapan alat dan bahan, cara penelitian serta uraian tentang pelaksanaan penelitian.

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini merupakan pembahasan dari hasil-hasil pengujian karakteristik material, densitas benda uji, kuat tekan benda uji, hubungan tegangan regangan benda uji, dan pola keruntuhan benda uji.

### BAB V PENUTUP

Bab ini memuat simpulan mengenai analisis hasil yang diperoleh saat penelitian yang disertai dengan saran-saran yang diusulkan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **A. Isu Strategis**

Salah satu fenomena alam yaitu gempa bumi belum dapat diprediksi kapan akan terjadi, dimana lokasi terjadinya dan berapa besar energi (*magnitude*) yang akan dilepaskan pada saat terjadinya gempa. Secara umum, gempa bumi yang terjadi lebih dominan disebabkan oleh aktivitas pelat tektonik, dimana gempa tektonik selalu membawa ancaman dan potensi kerusakan pada struktur bangunan khususnya pada bangunan-bangunan yang tidak didesain dan dibuat berdasarkan standar dan peraturan struktur tahan gempa. Sebagian besar gempa yang terjadi di Indonesia adalah gempa dangkal. Gambar 1 memperlihatkan peta rawan gempa yang ada di Indonesia.

Menurut Parung (2012), bahwa kerusakan yang terjadi pada struktur akibat gempa sangat bervariasi, mulai dari kerusakan secara non struktural sampai kerusakan total yang terjadi, dimana perbedaan kerusakan ini disebabkan oleh beberapa faktor yaitu diantaranya magnitude gempa, kekakuan struktur, massa struktur, periode alami struktur dan kemampuan struktur dalam menyerap dan menyalurkan energi gempa. Gambar 2 memperlihatkan kerusakan bangunan dengan bahan pengisi batu bata yang terjadi di Padang tahun 2008 dan di Palu tahun 2018.



Menurut Tsonos (2008) bahwa struktur yang dibangun pada periode tahun 1960an dan 1970an memiliki kekurangan pada desain, khususnya pengaruh akibat gaya lateral dan memiliki daktilitas yang rendah, sehingga hal ini yang menjadi alasan mengapa konstruksi yang dibangun pada era tersebut rawan terhadap gempa. Menurut Abdullah *et al.* (2003), bahwa pada struktur kolom beton bertulang yang dibangun sebelum era tahun 1980an, kegagalan geser yang bersifat getas merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kegagalan struktur yang sering terjadi akibat gempa besar.

Gempa bumi dapat menimbulkan bahaya dan bencana yang pada umumnya terjadi akibat rusak atau runtuhnya gedung-gedung dan bangunan-bangunan buatan manusia lainnya. Sampai saat ini manusia masih belum dapat berbuat banyak untuk mencegah terjadinya gempa bumi. Walaupun demikian manusia dapat mengurangi akibat buruk yang ditimbulkan oleh gempa dengan merencanakan dan membangun bangunan tahan gempa atau memperkuat bangunan buatannya. Bangunan tahan gempa ada 2 tipe yaitu (1) bangunan tahan gempa konvensional yang mengandalkan kekuatan bahan bangunannya yaitu sifat elastik (*kaku*) dan sifat liat (*daktil*), sifat kaku dimiliki oleh bahan dari beton dan pasangan batu, sedangkan sifat liat dimiliki oleh logam, kayu dan bambu, (2) bangunan dengan isolator dasar (*base isolator*). *Base isolator* merupakan bahan yang terbuat dari karet dan baja lunak yang ditempatkan di antara fondasi (*sub structure*) dan sloof/kolom (*super*



*structure*) yang berfungsi mereduksi atau mengurangi energi gempa atau percepatan tanah dasar ke bangunan sehingga sifat merusak dari gempa dapat diminimalkan.

Dari hasil studi lapangan pada kejadian dan kerusakan bangunan akibat gempa menunjukkan bangunan yang dominan mengalami kerusakan adalah bangunan penduduk (*non-engineered structures*) mencapai 85% dari total kerusakan. Daerah Sulawesi Tengah khususnya Kota Palu merupakan salah satu daerah di Indonesia dengan resiko gempa yang tinggi. Dilihat dari segi geoteknik, peraturan perencanaan tahan gempa untuk rumah dan gedung belum sepenuhnya memperhatikan aspek geologi dan seismologi. Bangunan belum didesain berdasarkan kondisi tanah setempat dan catatan gempa terbaru. Mempelajari dan menganalisis kenyataan tersebut, maka sangat dibutuhkan segala usaha yang bertujuan untuk melakukan penelitian, penyuluhan, pelatihan serta peraturan yang bertujuan untuk melakukan upaya pengurangan dampak bencana.

Usaha-usaha tersebut dapat berupa kegiatan aktif seperti penelitian bangunan tahan gempa, perkuatan dan perbaikan bangunan yang belum tahan terhadap gempa berdasarkan peraturan bangunan tahan gempa terbaru. Dapat pula berupa kegiatan pasif seperti pelatihan dan kursus bagi para pekerja konstruksi yang langsung bersentuhan di lapangan, sehingga bangunan yang akan dibangun sudah memenuhi kaidah bangunan tahan gempa, sehingga jika di masa mendatang terjadi gempa,

maka kerusakan yang terjadi dapat direduksi seminimal mungkin. Kerugian harta benda dan jiwa dapat diminimalisasi.

Di Indonesia, potensi dan bahaya akibat gempa bumi selalu mengancam, khususnya pada bangunan-bangunan publik di daerah rawan gempa yang sudah dibangun sebelum peraturan gempa Indonesia berdasarkan Peta Hazard Tahun 2017 dan SNI 1726-2019 diterbitkan. Untuk mengantisipasi hal tersebut, perlu adanya sosialisasi terhadap bahaya gempa dan implementasi standar yang berlaku dalam setiap desain dan pelaksanaan konstruksi, khususnya di daerah-daerah pedalaman yang rawan gempa.

Penggunaan material dengan berat volume yang ringan seperti beton ringan yang sudah populer di dunia termasuk Indonesia, tetapi untuk penerapannya pada daerah-daerah yang rawan gempa di Indonesia dan kawasan terpencil, masih terkendala pada metode pelaksanaan yang belum ada panduan teknisnya. Untuk mengantisipasi hal tersebut, pengembangan metode beton busa dianggap cocok untuk diterapkan di Indonesia, khususnya untuk bangunan rumah tinggal dan bangunan publik seperti sekolah, kantor pemerintahan, pertokoan dan rumah tinggal di daerah-daerah terpencil yang rawan gempa.

### **B. Konstruksi Non-Rekayasa (*Non Engineered Building*)**

Secara umum konstruksi bangunan dapat dibagi menjadi dua kategori utama yaitu konstruksi yang terekayasa (*engineered building*)

dan konstruksi non-rekayasa (*non engineered building*), dimana konstruksi bangunan non-rekayasa jumlahnya dan bentuknya sangat berbeda di negara maju, berkembang, dan terbelakang. Di Indonesia, berdasarkan konstruksinya bangunan non-rekayasa dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu :

### 1. Bangunan Tradisionil

Gambar 3 menunjukkan sejumlah bangunan tradisional yang dapat diklasifikasi sebagai konstruksi non-rekayasa klasifikasi 1. Jenis bangunan pada Gambar 3 umumnya dikenal sebagai bangunan adat atau vernakular.



North Sumatera (Batak) (1975)



Lombok (1977)



Sumbawa (1977)



West Java (Sukabumi) (1978)

**Gambar 3.** Bangunan tradisional (konstruksi non-rekayasa klasifikasi 1)

Disebagian besar wilayah pedesaan, bangunan adat secara bertahap memudar karena urbanisasi, keahlian untuk membangun rumah-rumah tradisional bernuansa vernakular secara berangsur tidak dialihkan ke generasi selanjutnya. Hal ini disebabkan oleh sebagian besar anak muda dari desa pindah ke kota untuk mencari hidup yang lebih baik. Begitu berhasil, mereka kembali ke desa masing-masing dan cenderung membangun rumah dengan pasangan bata. Peningkatan pesat dalam jumlah bangunan non rekayasa klasifikasi kedua antara lain karena pertumbuhan penduduk dan peningkatan konsentrasinya di perkotaan dan kondisi ekonomi yang lebih makmur.

## **2. Konstruksi Pasangan Bata (*Masonry*)**

Klasifikasi pertama bangunan non-rekayasa adalah rumah atau bangunan tradisional yang dibangun berdasarkan kearifan lokal, tradisi, dimana jenisnya sesuai dengan budaya dan bahan yang tersedia di daerah itu (Boen T., 2009). Klasifikasi kedua bangunan non-rekayasa, yaitu konstruksi batu bata (*masonry*) tipe kota atau kombinasi hanya berpenampilan tradisional tetapi tidak mengadopsi keterampilan dan kerajinan tradisional dalam merinci penggunaan material, dll. Kata *masonry* dalam penelitian ini merujuk pada dinding yang terbuat dari pasangan bata. Selain itu menurut Arya dkk. (2014), "istilah konstruksi non-rekayasa (*non-engineered building*) mungkin hanya secara tersamar didefinisikan sebagai bangunan yang muncul secara spontan dan secara

informal dibangun dengan cara tradisional tanpa intervensi oleh arsitek dan insinyur yang berkualifikasi dalam desain mereka.




Di Indonesia, konstruksi pasangan bata merupakan hal yang lumrah sebagai bangunan rumah. Dewasa ini, rumah sebagian besar dibangun dengan tiga tipe unit rumah pasangan bata:

- a. Batu bata
- b. Bataco (balok beton)
- c. Hebel
- d. Beton busa

Batu bata telah secara tradisional digunakan di sebagian besar jenis bangunan, termasuk tempat tinggal dan bangunan umum dan keagamaan, sejak awal penjajahan Belanda pada abad ke-17.

Batako adalah material pasangan bata yang terdiri dari semen dan pasir mirip dengan balok beton. Bahan mulai digunakan saat industri semen dalam negeri berkembang dengan pesat pada tahun 1970-an (Kobayashi H., 2006).

Hebel adalah jenis yang ringan blok beton dikembangkan di Jerman. Hebel banyak digunakan sebagai material dinding di bangunan berlantai rendah dan gedung bertingkat tinggi dan telah menjadi populer di konstruksi rumah hunian (*residential house*) dalam beberapa tahun terakhir. Gambar 4 menunjukkan material batu bata, bataco dan hebel (bata ringan). Gambar 5 menunjukkan bangunan yang terbuat dari pasangan bata.

Masonry material	Brick	<i>Bataco</i> (Concrete block)	Hebel (Lightweight concrete block)
Photo			

**Gambar 4.** Material batu bata, batako dan hebel (bata ringan)



**Gambar 5.** Bangunan rumah yang terbuat dari pasangan bata

### **C. Bata Pengisi Rangka Beton Bertulang Pada Gedung (*Masonry Infilled RC Frame of Building*)**

Pada bangunan yang terkategori *engineered building* seperti konstruksi struktur rangka beton bertulang dengan pengisi pasangan bata adalah bagian dari praktek bangunan tradisional di banyak negara Eropa tetapi juga di seluruh dunia termasuk di Indonesia. Sebagai partisi interior, penutup eksterior atau veneer fasad, pengisi dari pasangan bata tanpa perkuatan sering ditemukan sebagai solusi yang lebih disukai untuk

memenuhi kebutuhan arsitektural dengan tepat; daya tahan, suara yang efisien dan isolasi termal dari pasangan bata, selain sederhana dan hemat biaya konstruksi, sehingga sering digarisbawahi sebagai keunggulan konstruksi ini secara teknik teknik.

Panel bata biasanya dibangun dengan kontak penuh dengan rangka RC sekitarnya, tanpa ketentuan dari setiap celah atau koneksi di sekitar batas. Biasanya ditempatkan pasangan bata setelah bingkai RC di sekitarnya telah mengeras, sehingga diasumsikan sebagai landasan tidak memikul beban dan dalam desain praktek biasanya diperlakukan sebagai elemen non-struktural.

Meskipun unsur-unsurnya dianggap non-struktural, kerusakan pada pasangan bata pengisi yang disebabkan oleh gerakan tanah gempa dapat menjadi ancaman bagi nyawa manusia dan menyebabkan kerugian ekonomi yang luas. Kerentanan seismik pada pengisi dari pasangan bata yang agak rapuh secara umum telah dikenali dan telah diamati secara berulang kali di lapangan, berdasarkan pengalaman yang dilaporkan setelah gempa bumi yang merusak, sekali lagi baru-baru ini tahun, seperti di L'Aquila 2009 (lihat misalnya, Ricci et al. [1]), di Emilia 2012 (lihat misalnya, Manzini dan Morandi [2]) dan dalam peristiwa terbaru di Central Italia 2016 (lihat misalnya, Morandi [3], Gambar 6). Namun demikian, meskipun pentingnya tindakan khusus untuk pengendalian kerusakan dinding pengisi dari pasangan bata telah diakui secara luas, prosedur dan aturan untuk desain bangunan baru saat ini hanya memberikan sedikit

rekomendasi untuk elemen nonstruktural, masih dalam banyak aspek masih kurang memadai, tidak lengkap atau tidak jelas.

Untuk alasan ini, di masa lalu sejumlah besar investigasi secara numerik dan eksperimental terkait dengan kinerja seismik secara umum kerangka beton bertulang dengan pengisi dari pasangan bata telah banyak dilakukan, namun seringkali berfokus pada analisis dan penilaian pada kerangka beton bertulang, lebih dari sekadar pengendalian yang efektif pada kerusakan pengisi struktur yang baru dirancang. Selain itu, respon eksperimental pengisi dari bata telah dipelajari lebih ekstensif hanya untuk tipologi pasangan bata yang dipilih, seperti batu bata tanah liat dan balok beton dan uji eksperimental yang sangat terbatas telah dilakukan pada spesimen RC terisi skala nyata, di mana kumpulan hasil dari beberapa tes dalam bidang pada pengisi yang dilakukan di seluruh dunia telah diringkas. Di antaranya, hanya penelitian yang dilaporkan di Da Porto *et al.*, 2009 telah dikhususkan untuk mempelajari dinding pengisi dari bata dengan unit tanah liat berlubang yang kuat yang dicirikan oleh ketebalan sedang/besar (yaitu, lebih besar dari 25-30 cm) yang, bagaimanapun, saat ini di Eropa diadopsi dengan frekuensi yang meningkat, bahkan dalam gempa bumi daerah rawan, untuk memanfaatkan panasnya yang sangat baik dan kinerja akustik yang diperlukan untuk memenuhi peraturan Eropa terbaru tentang efisiensi energi bangunan dan kelestarian lingkungan. Di sisi lain, perhatian khusus perlu diberikan pada kemungkinan efek merugikan karena daya dorong



pengisi pada rangka, yang dapat menonjol terutama untuk tipologi pasangan bata yang tebal/kuat dengan risiko menghasilkan kerusakan getas lokal pada elemen RC.



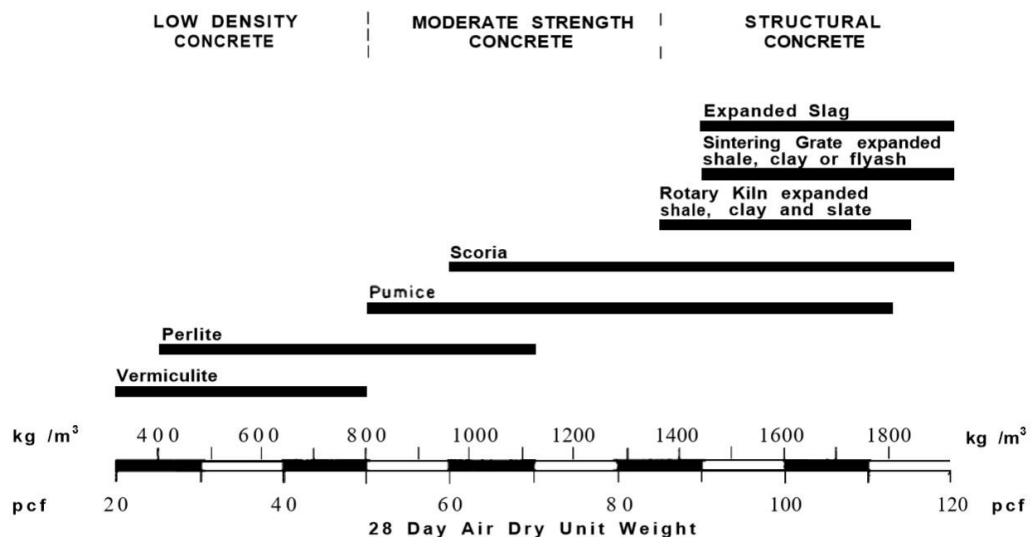
**Gambar 6.** Kerusakan akibat gempa bangunan gedung yang memiliki pengisi bata pada kerangka beton bertulang (bangunan dengan rekayasa) (Da Porto *et al.*, 2009)

#### D. Teori Beton Ringan

Beton ringan adalah beton yang memiliki berat jenis (*density*) lebih ringan daripada beton pada umumnya. Beton ringan adalah beton yang memiliki agregat ringan atau campuran agregat kasar ringan dan pasir alam sebagai pengganti agregat halus ringan dengan ketentuan tidak boleh melampui berat isi maksimum beton  $1850 \text{ kg/m}^3$  (SNI 03-3449-2002). SNI T-03-3449-2002 tentang tata cara rencana pembuatan campuran beton ringan dengan agregat ringan, memberikan batasan kriteria beton ringan adalah beton dengan kepadatan kurang dari  $1850 \text{ kg/m}^3$ . Agregat ringan adalah agregat yang mempunyai berat jenis yang ringan dan porositas yang tinggi, yang dapat dihasilkan dari agregat alam maupun hasil fabrikasi.

Berdasarkan pengertian tersebut ada dua metode untuk membuat beton ringan menggunakan agregat ringan. Pertama adalah dengan menggunakan agregat ringan (*fly ash*, batu apung, *expanded polystyrene*, dll). Beton yang dihasilkan dinamakan beton agregat ringan. Kedua adalah membuat pori yang tinggi dalam massa mortar, yaitu dengan menambah kandungan udara ke dalamnya. Beton yang dihasilkan dinamakan beton busa/*foam concrete*. Aplikasi beton busa banyak digunakan untuk konstruksi-konstruksi ringan.

Sesuai ACI 213R-87 *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, beton ringan diklasifikasikan berdasarkan jenis agregat, tingkat kepadatan, dan kekuatan material yang diperlihatkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Perkiraan berat unit dan klasifikasi penggunaan beton agregat ringan menurut ACI 213R-87

Sementara itu, beton busa adalah campuran antara semen, air, agregat dengan bahan tambah (admixture) tertentu yaitu dengan

membuat gelembung-gelembung gas atau udara dalam adukan semen sehingga terjadi banyak pori-pori udara didalam beton. Dengan ditambahkan foaming agent maka akan terbentuk pori-pori yang terjadi akibat reaksi kimia dimana kalsium hidroksida yang terkandung dalam pasir akan bereaksi membentuk gas hidrogen. Gas hidrogen tersebut akan membentuk gelembung-gelembung didalam campuran beton yang mengakibatkan volumenya akan menjadi lebih besar dari volume semula. Diakhir pengembangan, hidrogen yang terbentuk tadi akan terlepas ke atmosfer dan akan digantikan udara. Akibat terbentuknya rongga di dalam campuran beton tadi, maka berat jenis dari beton tersebut akan lebih kecil dari semula. Penggunaan foaming agent bertujuan untuk memperoleh berat jenis beton yang lebih ringan. *Foam agent* adalah suatu larutan pekat dari bahan surfaktan, dimana apabila hendak digunakan harus dilarutkan dengan air. Surfaktan adalah zat yang cenderung terkonsentrasi pada antarmuka dan mengaktifkan antarmuka tersebut dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen. Dengan demikian akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya.

**a. Beton kepadatan rendah (*low density concrete*)**

Beton ringan dengan berat isi (*density*) antara  $300 \text{ kg/m}^3$  -  $800 \text{ kg/m}^3$  dan berkekuatan tekan berkisar 0,69 MPa sampai dengan 6,89 MPa, yang biasanya dipakai sebagai beton penahan panas (insulasi panas) disebut juga *Low Density Concrete*. Beton ini banyak digunakan untuk keperluan insulasi, karena mempunyai kemampuan konduktivitas panas yang

rendah, serta untuk peredam suara. Jenis agregat yang biasa digunakan adalah *Perlite* dan *Vermiculite*.

**b. Beton kekuatan sedang (*moderate strength concrete*)**

Beton ringan dengan berat (*density*) antara  $800 \text{ kg/m}^3$  -  $1440 \text{ kg/m}^3$  dan berkekuatan tekan berkisar 6,89 MPa hingga 17,24 MPa, yang biasanya dipakai sebagai beton struktur ringan atau sebagai pengisi (*fill concrete*). Beton ini terbuat dari agregat ringan buatan seperti: terak (*slag*), abu terbang (*fly ash*), lempung, batu sabak (*slate*), batu serpih (*shale*), dan agregat ringan alami, seperti *pumice*, *skoria*, dan *tufa*.

**c. Beton struktural (*structural concrete*)**

Beton ringan dengan berat (*density*) antara  $1440 \text{ kg/m}^3$  -  $1850 \text{ kg/m}^3$  yang dapat dipakai sebagai beton struktural jika bersifat mekanik (kuat tekan) dapat memenuhi syarat pada umur 28 hari mempunyai kuat tekan di atas 17,24 MPa Untuk mencapai kekuatan sebesar itu, beton ini dapat memakai agregat kasar seperti *expanded shale*, *clays*, *slate*, dan *slag*.

Produksi beton ringan tergantung pada adanya rongga udara dalam agregat, atau pembuatan rongga udara dalam beton (Prawito, 2010), yaitu dilakukan dengan 3 cara :

- a. Beton ringan dengan bahan batuan yang berongga atau agregat ringan buatan yang digunakan juga sebagai pengganti agregat kasar/kerikil. Beton ini memakai agregat ringan yang mempunyai berat jenis yang rendah (berkisar  $1400 \text{ kg/m}^3$  –  $2000 \text{ kg/m}^3$ ).

- b. Beton ringan tanpa pasir (*No fines concrete*), dimana beton tidak menggunakan agregat halus (pasir) pada campuran pastinya atau sering disebut beton non pasir, sehingga tidak mempunyai sejumlah besar pori-pori. Berat isi berkisar antara 880 – 1200 kg/m<sup>3</sup> dan mempunyai kekuatan berkisar 7 – 14 MPa.
- c. Beton ringan yang diperoleh dengan memasukan udara dalam adukan atau mortar (beton aerasi), sehingga akan terjadi pori-pori udara berukuran 0,1– 1 mm. Memiliki berat isi 200 – 1440 kg/m<sup>3</sup>.

Menurut *American Society for Testing and Materials* (ASTM) C 330, agregat ringan dapat dibedakan menjadi dua yaitu agregat alami dan agregat buatan. Agregat ringan alami meliputi jenis-jenis agregat diatomite, batu apung, scoria, volcanic dinder dan tuff yang semuanya termasuk batuan asli vulkanik. Agregat ringan buatan dapat berasal dari proses pemanasan, pendinginan dan dari industri cinder. Agregat ringan buatan ini dapat berupa *expanded clay, shale, slate, perlite, vermiculite*, abu terbang (*fly ash*).

Menurut Tjokrodimuljo ada beberapa metode yang digunakan untuk mengurangi berat jenis beton atau membuat beton lebih ringan antara lain adalah :

- a. Dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen sehingga terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan menambah bubuk aluminium ke dalam bubuk campuran beton.

- b. Dengan menggunakan agregat ringan, misalnya tanah liat bakar, batu apung atau agregat buatan sehingga beton yang dihasilkan akan lebih ringan daripada beton biasa.
- c. Dengan cara membuat beton tanpa menggunakan butir-butir agregat halus atau pasir yang disebut sebagai beton non pasir.

Secara garis besar pembagian penggunaan beton ringan dapat dibagi menjadi tiga yaitu untuk non struktur, untuk struktur ringan dan untuk struktur.

- a. Untuk non struktur dengan berat jenis antara  $240 \text{ kg/m}^3$  sampai  $800 \text{ kg/m}^3$  dan kuat tekan antara  $0,35 \text{ MPa}$  sampai  $7 \text{ MPa}$  yang umumnya digunakan seperti untuk dinding pemisah atau dinding isolasi.
- b. Untuk struktur ringan dengan berat jenis  $800 \text{ kg/m}^3$  sampai  $1400 \text{ kg/m}^3$  dan kuat tekan antara  $7 \text{ MPa}$  sampai  $17 \text{ MPa}$  yang umumnya digunakan seperti untuk dinding yang juga memikul beban.
- c. Untuk struktur dengan berat jenis antara  $1400 \text{ kg/m}^3$  sampai  $1800 \text{ kg/m}^3$  dan kuat tekan lebih dari  $17 \text{ MPa}$  yang dapat digunakan sebagai beton normal.

### **E. Spesifikasi dan Aplikasi Beton Ringan**

Beton busa didefinisikan sebagai beton seluler ringan yang dapat diklasifikasikan sebagai beton ringan (*density*  $400\text{--}1850 \text{ kg/m}^3$ ) dengan rongga udara acak yang dibuat dari campuran *foam agent* dalam mortar. Beton busa diakui memiliki *flowability* yang tinggi, penggunaan kadar semen yang rendah, penggunaan agregat yang efisien (Ramamurthy, K.,

2009) dan isolasi panas yang sangat baik (Richard, T. G. *et al.*, 1975). Selanjutnya beton busa dianggap sebagai solusi ekonomis dalam fabrikasi masal untuk bahan dan konstruksi ringan seperti bahan struktural, partisi, grade pengisian, dan tanggul jalan. Karena proses produksinya yang mudah dari pabrik hingga ke posisi akhir pekerjaan (Ramamurthy, K., 2009). Dalam praktek, beton busa telah umum digunakan dalam aplikasi konstruksi di banyak negara seperti Jerman, Inggris, Filipina, Turki dan Thailand. (Mydin, M. A . O., dan Wang Y. C., 2011).

Menurut Neville dan Brooks (2010), ukuran gelembung udara (busa) dalam beton busa sangat kecil kira-kira 0,1~1,0 mm dan tersebar merata menjadikan sifat beton lebih baik untuk campuran beton adalah bahan berbasis protein hydrolyzed dalam adukan beton. Ada 2 metode dasar yang dapat ditempuh untuk menghasilkan gelembung gas/udara dalam beton busa atau membuat membuat beton ber-aerasi yaitu :

- a. *Gas concrete*, dibuat dengan memasukkan suatu reaksi kimia dalam bentuk gas/udara ke dalam mortar basah, sehingga ketika bercampur menghasilkan gelembung-gelembung gas/udara dalam jumlah yang banyak. Cara yang sering digunakan adalah dengan menambahkan bubuk aluminium kira-kira 0,2% dari berat semen ke dalam campuran.
- b. *Foamed concrete*, dibuat dengan menambahkan foaming agent ke dalam campuran. Foaming agent merupakan salah satu bahan pembuat busa yang biasanya berasal dari bahan berbasis protein hydrolyzed atau resin sabun. Fungsi dari *foam agent* adalah untuk

menstabilkan gelembung udara selama pencampuran dengan cepat. Bahan pembentuk foam agent dapat berupa bahan alami dan buatan. Foam agent dengan bahan alami berupa protein memiliki kepadatan 80 gram/liter, sedangkan bahan buatan berupa synthetic memiliki kepadatan 40 gram/liter.

Menurut Bombatkar, S. dkk. (2017), beton busa memiliki karakteristik yaitu isolator panas yang baik, tahan api dan isolator suara yang baik dan memiliki performa seismik yang baik.

- a. Isolator panas yang baik. Beton busa adalah sejenis penahan panas dan bahan insulasi yang sering digunakan pada pekerjaan dinding dan atap, dan memiliki efisiensi penghematan energi yang tinggi. Interiornya memiliki banyak pori-pori seragam yang mengontrol sebagian besar udara dan dapat mencegah dari pertukaran panas dan dingin. Konduktivitas termal dari beton busa yang biasa digunakan adalah sekitar 7 kali lebih kecil dari pada bata tanah liat dan 14 kali lebih sedikit dari beton semen biasa.
- b. Tahan api dan isolator suara yang baik. Beton busa terutama terdiri dari pasta semen, agregat, karakteristik bahan anorganik lainnya dari pembakaran spontan dan pori-pori yang tersebar, sehingga memiliki ketahanan api yang baik. Pada saat yang sama, karena keberadaan banyak pori-pori tertutup, beton busa memiliki kinerja sebagai insulasi suara yang baik.



- c. Memiliki performa seismik yang baik. Beton busa, dengan density yang kecil dan modulus elastis kecil, merupakan bahan struktur berpori yang banyak mengandung gelembung tertutup. Beton busa adalah bahan bangunan dengan kinerja seismik yang sangat baik ketika mengalami aksi gelombang gempa, yang dapat meredakan dan menyerap beban dampak yang timbul.

Namsonea E., Šahmenkoa G., dan Korjakinsa A. (2017) menjelaskan dalam penelitiannya mengenai beton busa sebagai bahan yang menjanjikan dalam industri bangunan modern karena teknologi sederhana dan berbagai properti dapat dicapai. Masalah dasar beton busa adalah susut dan penurunan kekuatan, dibandingkan dengan beton aerasi yang diautasi. Dalam kasus iklim basah dan dingin, daya tahan juga berperan penting. Penelitian ini membahas kemungkinan untuk menciptakan beton busa dengan menghasilkan kinerja tinggi yang tahan lama dengan menerapkan teknologi pencampuran intensif dan menggunakan modifikasi pencampuran mikro. Karakteristik beton busa, seperti kekuatan, kerapatan, penyerapan air, karbonisasi dan ketahanan beku, dibahas sebagai komponen dasar daya tahan. Sifat-sifat komposisi beton busa yang berbeda diuji dan dibandingkan. Metode teknologi untuk mendapatkan beton kinerja tinggi dirangkum dan dapat dihasilkan dengan menggunakan metode-metode yang sederhana. Dikatakan, bahwa menciptakan beton busa yang lebih tahan lama dan lebih kuat dari segi karakteristik mekanik memungkinkan untuk meningkatkan siklus hidup

material dan mempromosikan penggunaan sumber daya alam secara rasional. Selain itu, beton busa juga ramah lingkungan dan mampu mereduksi berat jenis beton menjadi kecil.

#### **F. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan Dengan Pembebanan Siklik Lateral**

Beban siklik adalah beban yang diterima oleh suatu struktur. Kegagalan struktur juga bisa disebabkan oleh beban siklik yang terjadi, meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Kegagalan fatigue yang merupakan fenomena di mana benda uji pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum dan kekuatan fatigue yang didefinisikan sebagai kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. Kekuatan fatigue dipengaruhi oleh berbagai pembebanan, *load history* dan sifat material (ASTM E2126-02a (ASTM 2003)).

Berbagai penelitian telah dilakukan dengan pembebanan secara siklik pada dinding geser diantaranya perilaku siklik statis dari dinding geser penampang persegi panjang dan diberi perkuatan dibahas oleh Paulay *et al.*, 1982. Dalam konteks makalah ini, spesimen dinding menarik perhatian. Rasio tulangan horizontal (1,6%) dua kali lipat vertikal (0,8%). Spesimen dirancang tanpa tulangan batas yang kuat dan hanya dikenai beban siklik statis lateral. Gaya aksial tidak diterapkan pada spesimen ini.

Respons spesimen ini didominasi oleh gaya geser. Kehilangan kekuatan yang signifikan yang berasal dari degradasi agregat interlock terjadi pada daktilitas perpindahan  $\mu\Delta = 4$ . Selain itu, retak diagonal yang stabil diamati dan perpindahan akibat gerakan geser menghasilkan hingga 65% dari total perpindahan.

Salonikios *et al.*, 1999 melakukan penyelidikan eksperimental dari validitas ketentuan desain EC8 untuk dinding tinggi untuk rasio panjang 1,0 dan 1,5. Parameter dari seri uji ini adalah rasio tulangan web, jumlah tulangan batas, dan keberadaan tulangan diagonal. Spesimen diuji sebagai penopang. Daktilitas perpindahan hingga 5,3 diamati. Lebih lanjut, gaya geser terbukti untuk spesimen tanpa tulangan diagonal yang merupakan spesimen LSW1, LSW2, dan LSW3. Kegagalan terjadi karena kerusakan lokal seperti penumpukan beton dan rebar buckling di tepi dinding. Pengurangan rasio perkuatan vertikal dan horizontal dari 0,57% menjadi 0,28% dan perkuatan batas dari 1,7% menjadi 1,3% tidak mempengaruhi mode kegagalan maupun pergeseran yang diamati. Namun, disimpulkan bahwa kurangnya tulangan diagonal yang tertambat pada pondasi dinding mengarah pada loop histeretik dan berkurangnya disipasi energi.

Foure, 1993 melaporkan uji siklik statis dari dinding dengan rasio tinggi terhadap panjang 0,5 yang memiliki rotasi penuh menahan di atas dan yang mengalami rasio gaya aksial hampir 0,03. Spesimen gagal dalam tegangan diagonal. Penguatan horizontal sedikit memengaruhi

kekuatan dan kapasitas deformasi sementara penguat vertikal dianggap perlu untuk kedua lentur dan geser.

Parameter-parameter yang dihasilkan pada pengujian siklik atau *cyclic loading* (pembebanan bolak-balik) adalah :

- a. Kekuatan geser ( $V_{peak}$ ) adalah Beban maksimum per satuan panjang spesimen yang dapat dipikul oleh spesimen dalam envelope yang diberikan harus dihitung berdasarkan persamaan 1.

$$V_{peak} = \frac{P_{peak}}{L} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

$V_{peak}$  = Kekuatan geser (N/m)

$P_{peak}$  = Beban maksimum yang dapat dipikul oleh specimen (N)

$L$  = Panjang specimen (m)

- b. Modulus geser yaitu dihitung pada 0,4  $P_{peak}$  dan  $P_{peak}$  pada saat beban maksimum dapat dihitung berdasarkan persamaan 2.

$$G' = \frac{P}{\Delta} \times \frac{H}{L} \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

$G'$  = Modulus geser spesimen yang diperoleh dari pengujian (termasuk deformasi geser dan angkat untuk koneksi sistem), (N/m); mewakili geser garis potong kekakuan pada perpindahan spesimen tertentu terhadap rasio aspek

$P$  = Beban yang diterapkan diukur di tepi atas spesimen (N)

$\Delta$  = Perpindahan tepi atas spesimen berdasarkan hasil pengujian (m)

H = Tinggi spesimen (m)

L = Panjang spesimen (m)

- c. Rasio daktalitas, cyclic (D), n — rasio ultimate perpindahan ( $\Delta u$ ) dan perpindahan hasil ( $\Delta$  hasil) dari spesimen diamati dalam uji siklik.
- d. FME dan perpindahan harus ditentukan langsung dari kurva envelope. Menghitung nilai perpindahan, gaya geser, dan modulus geser pada status batas hasil dan batas kekuatan.
- e. Berdasarkan penentuan rasio daktalitas berdsarkan kurva *equivalent energy elastic-plastic (EEEEP)*. Bagian elastis dari kurva EEEP dan memiliki kemiringan yang sama dengan kekakuan geser elastis,  $K_e$ . Bagian plastik adalah garis horizontal sama dengan  $P_{yield}$  ditentukan dengan persamaan 3.

$$P_{yield} = \left( \Delta_u - \sqrt{\Delta_u^2 - \frac{2A}{K_e}} \right) K_e \dots \dots \dots (3)$$

Jika  $\Delta^2 u < \frac{2A}{K_e}$ , diasumsikan  $P_{yield} = 0,85 P_{peak}$

Dimana :

$P_{yield}$  = Beban yield/leleh (N)

A = Area di bawah kurva envelope spesimen dari perpindahan nol ke puncak ( $\Delta u$ )

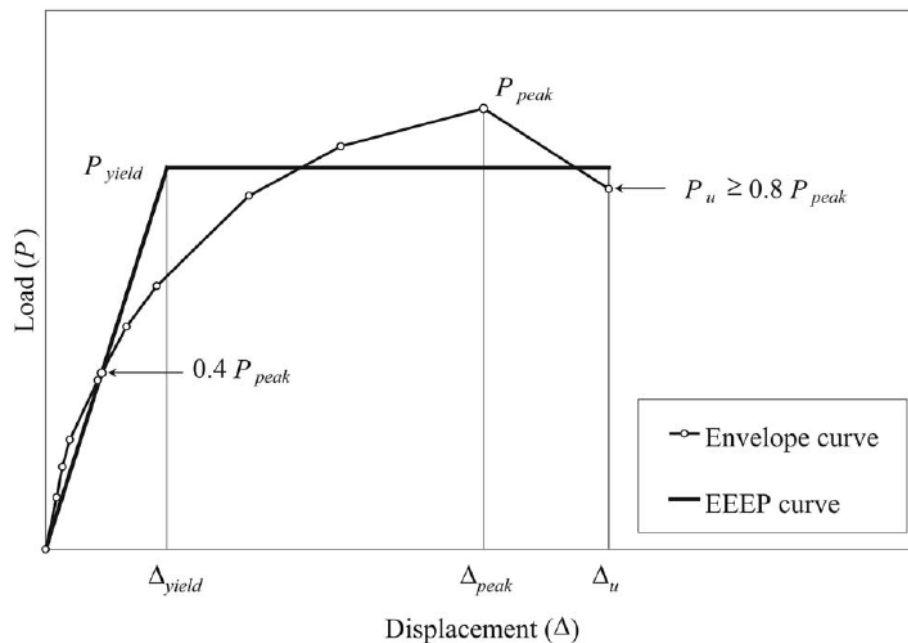
$P_{peak}$  = Beban absolut maksimum oleh spesimen pada envelope yang diberikan

$\Delta_e$  = Perpindahan tepi atas spesimen pada 0,4  $P_{peak}$

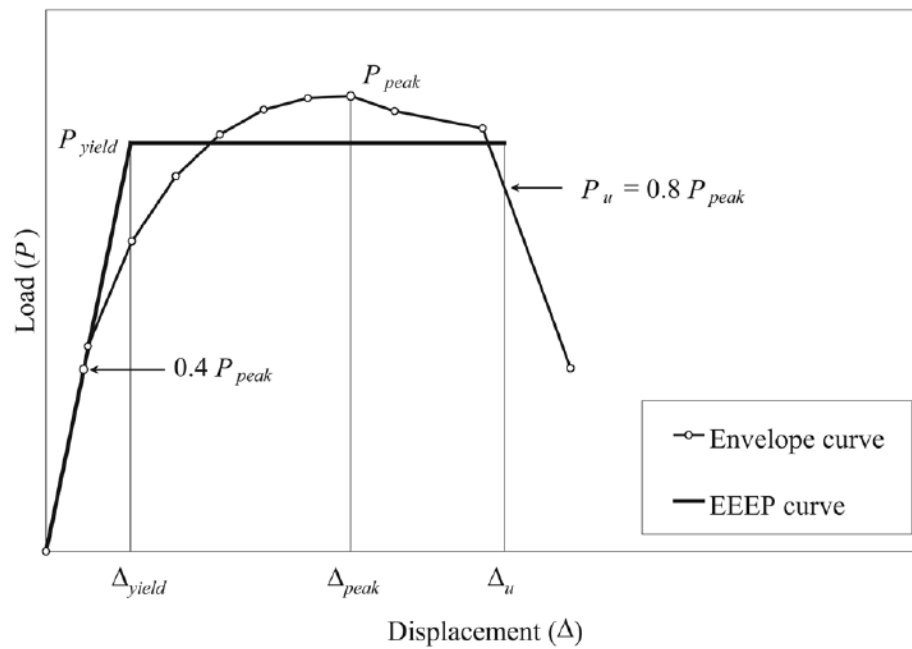
$K_e$  =  $0,4 P_{peak} / \Delta_e$

Kekakuan geser elastis, kekuatan geser dan daktalitas spesimen ditentukan dengan melakukan pengujian spesimen ke pembalikan penuh (bolak balik) beban geser secara siklik. Ini dilakukan oleh jangkar tepi bawah spesimen ke basis uji mensimulasikan aplikasi pengguna akhir yang dimaksudkan dan menerapkan gaya sejajar dengan bagian atas spesimen. Perpindahan siklik aktuator harus dikontrol untuk mengikuti prosedur perpindahan siklik yang dijelaskan dalam baik (metode uji A = *Sequential-Phased Displacement Procedure*), (metode uji B = *ISO 16670 Protocol*), atau (metode uji C = *CUREE Basic Loading Protocol*).

Gambar 8 memperlihatkan parameter kinerja spesimen: (A) titik terakhir di  $P_u \geq 0,8 P_{peak}$ . Gambar 9 memperlihatkan parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada  $P_u = 0,8 P_{peak}$ .

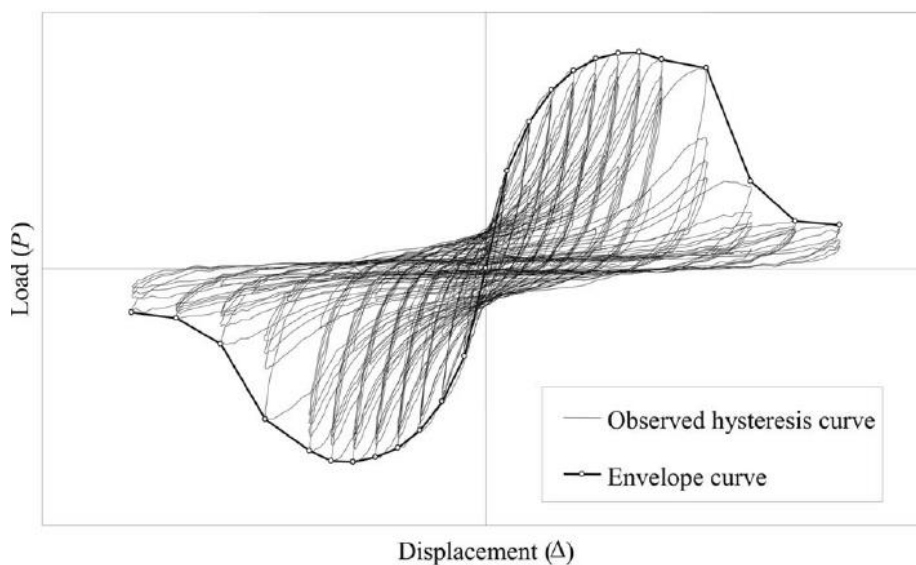


**Gambar 8.** Parameter kinerja spesimen: (A) titik terakhir di  $P_u \geq 0,8 P_{peak}$

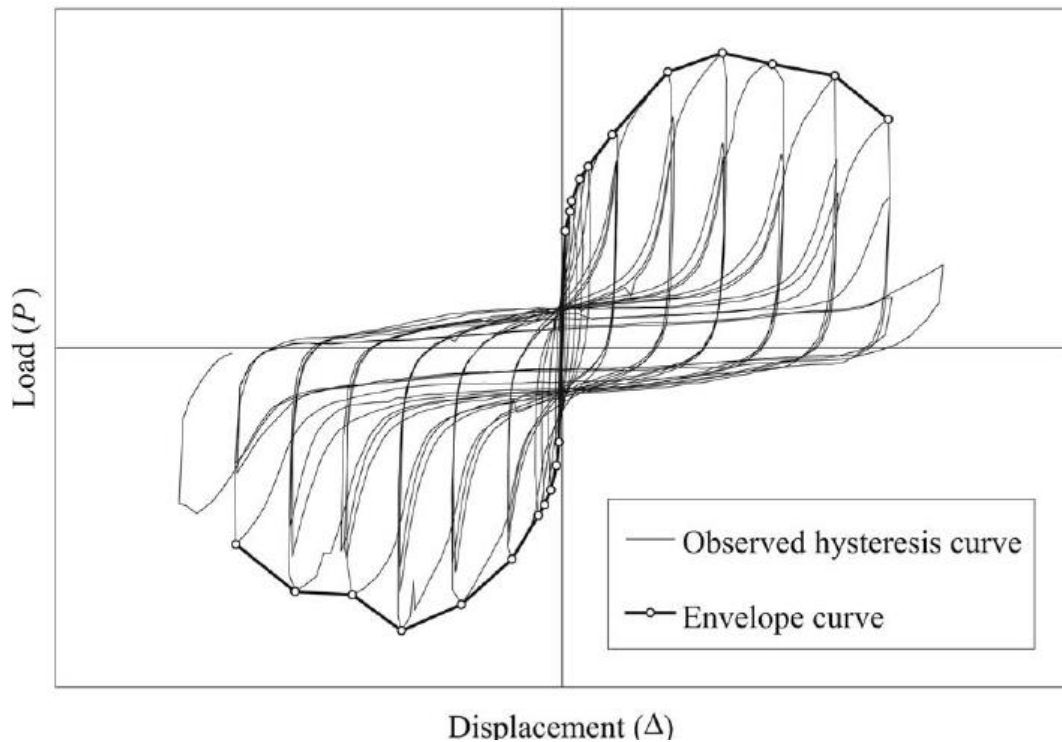


**Gambar 9.** Parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada  $P_u = 0,8 P_{peak}$  (dilanjutkan)

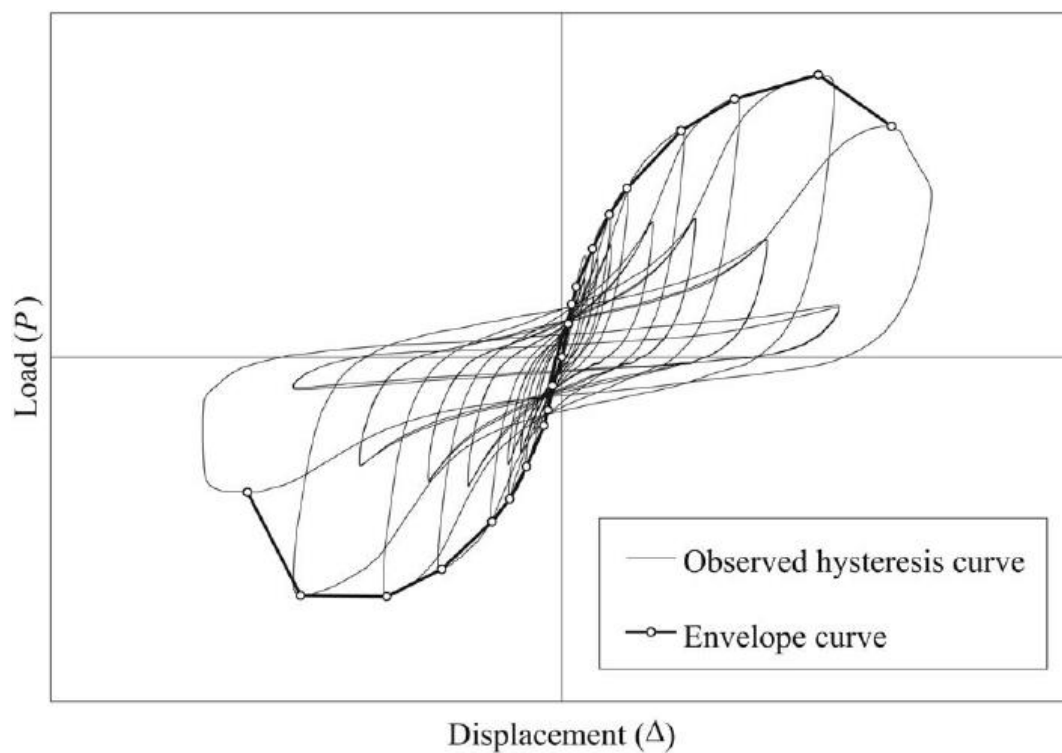
Gambar 10 dan 11 masing-masing memperlihatkan contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian A dan metode pengujian B.



**Gambar 10.** Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian A

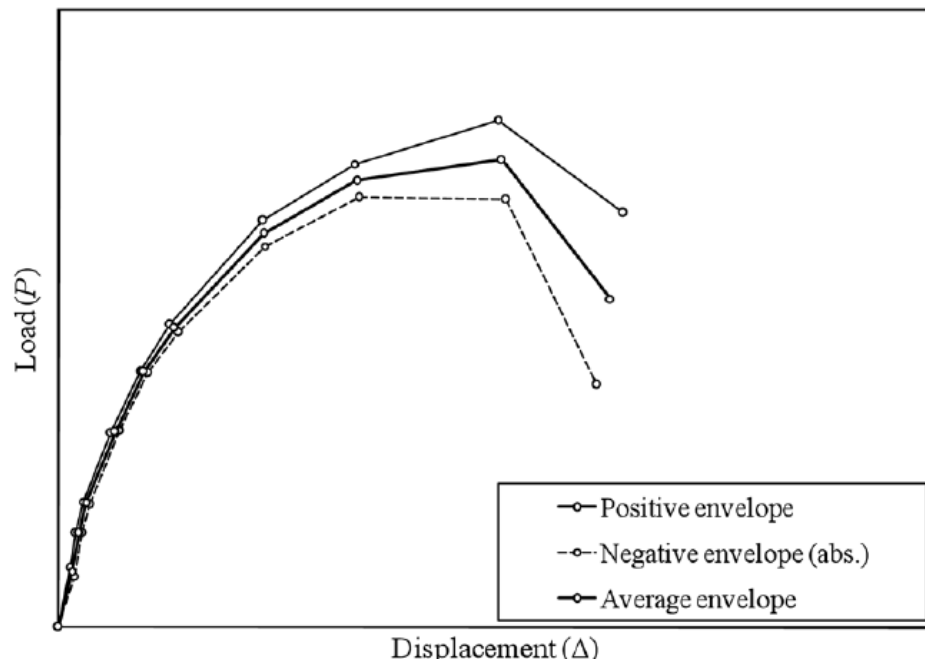


**Gambar 11.** Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian B (dilanjutkan)



**Gambar 12.** Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian C (dilanjutkan)





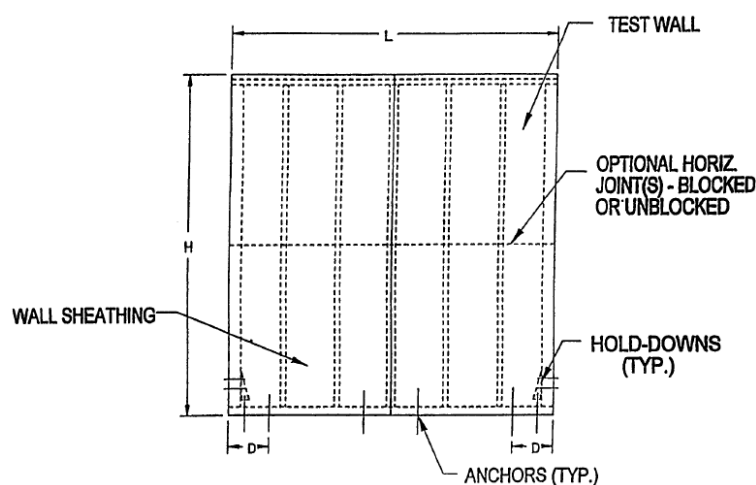
**Gambar 13.** Contoh rata-rata kurva envelope

Gambar 12 dan Gambar 13 masing-masing memperlihatkan contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian C dan contoh rata-rata kurva envelope.

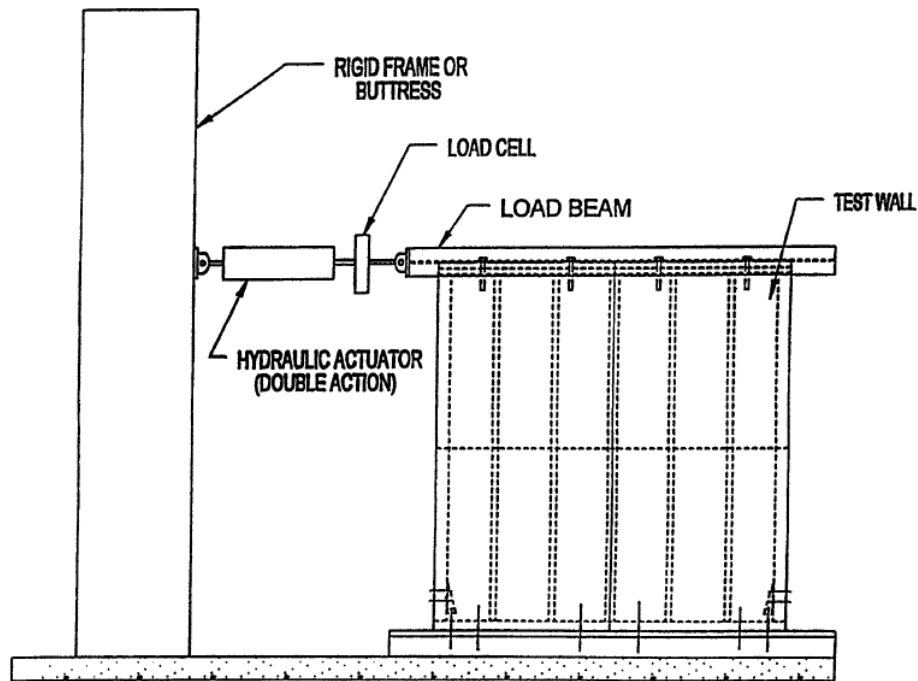
Aplikasi beban siklik dapat dilaksanakan dalam dua kondisi, yaitu *force controlled* atau *displacement controlled*. Pada umumnya, beban siklik yang digunakan berdasarkan pada *displacement controlled*. Pemberian beban siklik berdasarkan *displacement controlled* disesuaikan dengan perpindahan leleh pertama yang terjadi pada struktur. Umumnya, siklus pendahuluan atau prasiklus diberikan. Setiap sub siklus diselingi dengan siklus antara. Setelah siklus pendahuluan selesai, dilakukan pemberian beban sesuai jumlah rencana siklus sampai terpenuhi. Tidak ada beban siklik yang bersifat unik dan beban siklik yang “terbaik”. Hal ini dikarenakan tidak ada dua gempa yang mirip seutuhnya dan umumnya

struktur terdiri dari bagian-bagian yang berbeda tergantung pada konfigurasi struktur itu sendiri (Krawinkler, 2009). Pemberian *displacement controlled* harus berdasarkan pada jarak tempuh maksimum yang dapat dicapai oleh aktuator. Pada penelitian ini, *ATC-24 Protocol* digunakan sebagai acuan untuk menentukan riwayat pembebanan. *ATC-24* menggunakan perpindahan leleh sebagai acuan pemberian riwayat perpindahan pada struktur dengan tahapan enam siklus elastis dan diikuti masing-masing tiga siklus inelastis sampai keruntuhan atau target perpindahan terpenuhi.

Gambar 14 memperlihatkan contoh spesimen dinding geser dan Terlihat bahwa specimen dinding geser memiliki tebal, panjang dan tinggi dimana mempunyai selubung dinding (plesteran dinding) untuk membuat rata permukaan dari dinding geser. Gambar 15 memperlihatkan contoh set up pengujian siklik spesimen dinding geser. Terlihat satu set alat hydraulic actuator untuk memberikan beban bolak balik (siklik), load cell untuk pemberian beban pada dinding geser.



**Gambar 14.** Contoh spesimen dinding geser



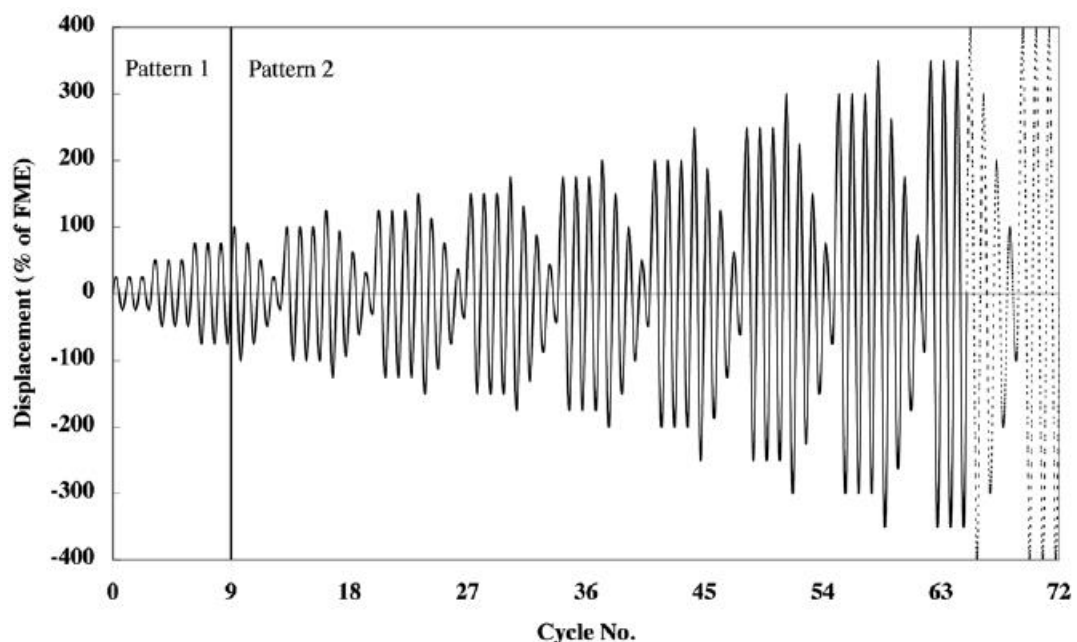
**Gambar 15.** Contoh set up pengujian siklik spesimen dinding geser

Disipasi energi adalah jumlah energi yang dikeluarkan saat terjadinya peristiwa dinamik seperti beban gempa atau dengan kata lain disipasi energi adalah peristiwa penyerapan energi oleh komponen struktur pada saat setelah siklus inelastik terjadi. Sebagai contoh, diambil suatu pendisipasi energi dari pipa baja untuk menggambarkan perhitungan nilai energi disipasi dari suatu sistem struktur. Untuk menentukan nilai dari parameter-parameter penentu seismik ini perlu direkonstruksi terlebih dahulu kurva histeresis ( $Q-\delta$  curve) yang didapatkan dari hasil uji numerik ataupun eksperimental.

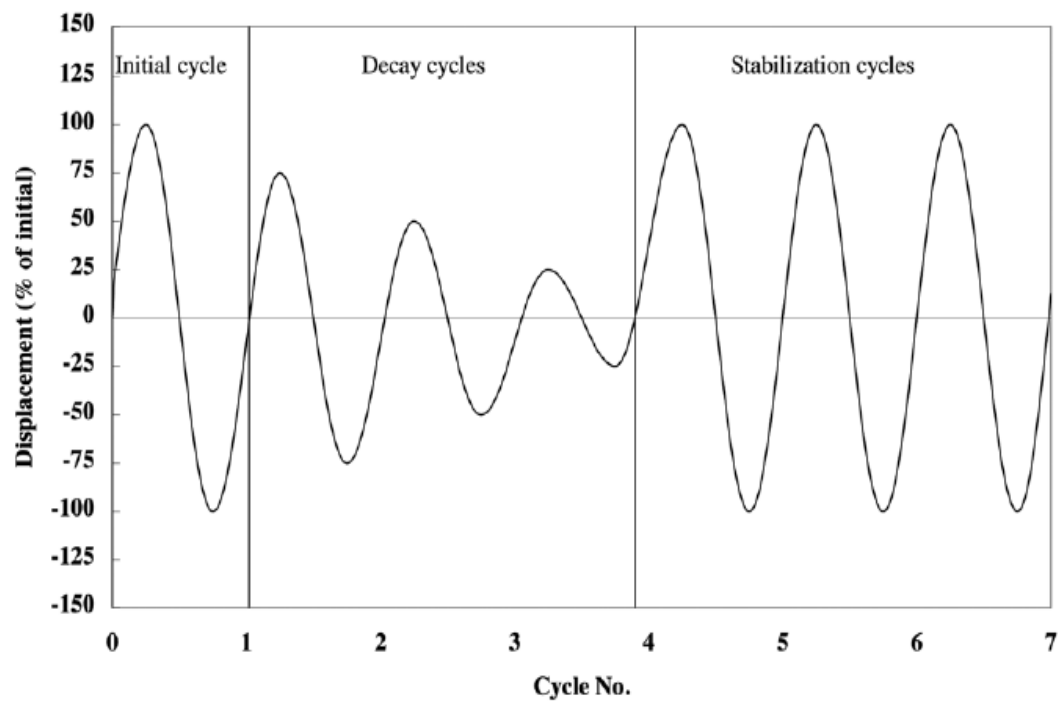
Benavent-Climent (2007) mengusulkan suatu model untuk mendekomposisikan kurva histeresis yang didapatkan menjadi dua bagian besar, yaitu bagian skeleton dan bagian Bauschinger pada *domain* positif

dan *domain* negatif. Model ini disebut *energy-based damage model*. Setelah kurva histerisis telah didekomposisi, total energi yang didisipasi didapatkan dengan menghitung luas area (segmen) dari masing-masing bagian (skeleton dan Bauschinger), setiap segmen pada bagian skeleton maupun Bauschinger adalah polygon tertutup sehingga dapat dengan mudah didapatkan dengan menggunakan fungsi-fungsi yang ada pada program bantu. Luas tiap segmen ini mewakili total energi yang didisipasi. Dan jika total luas segmen pada bagian skeleton dan bagian Bauschinger dijumlahkan, akan didapatkan total energi yang didisipasi.

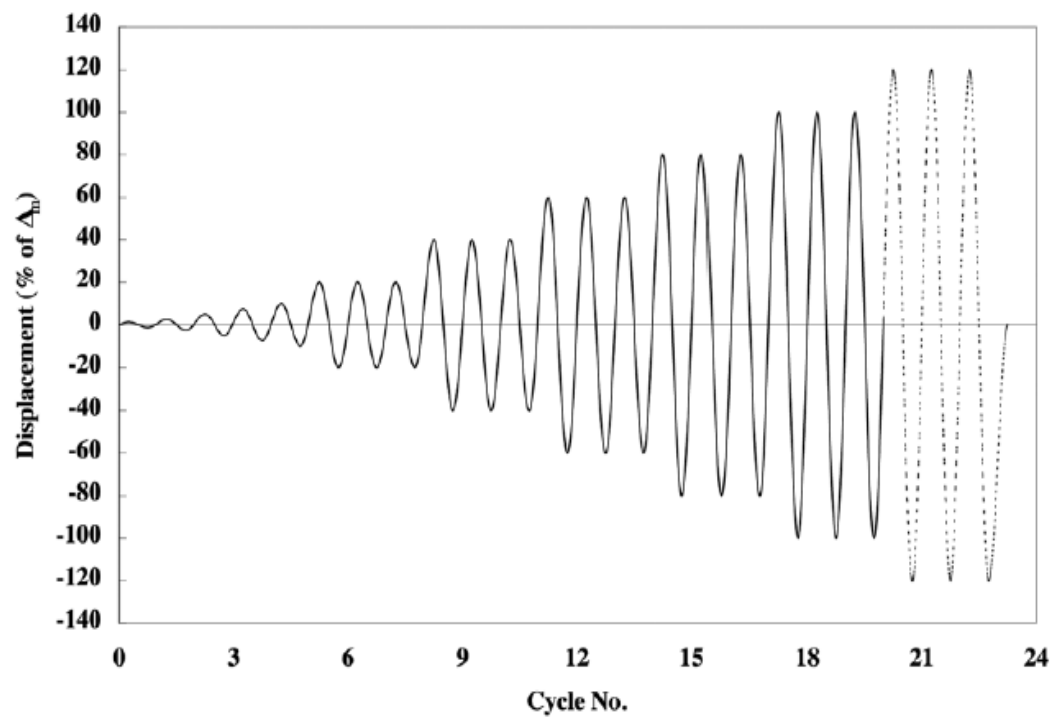
Gambar 16 dan 17 masing-masing memperlihatkan schedule perpindahan siklik dan pola fase tunggal 2 untuk metode uji A. Sedangkan Gambar 18 dan 19 masing-masing memperlihatkan schedule perpindahan siklik untuk metode uji B dan C.



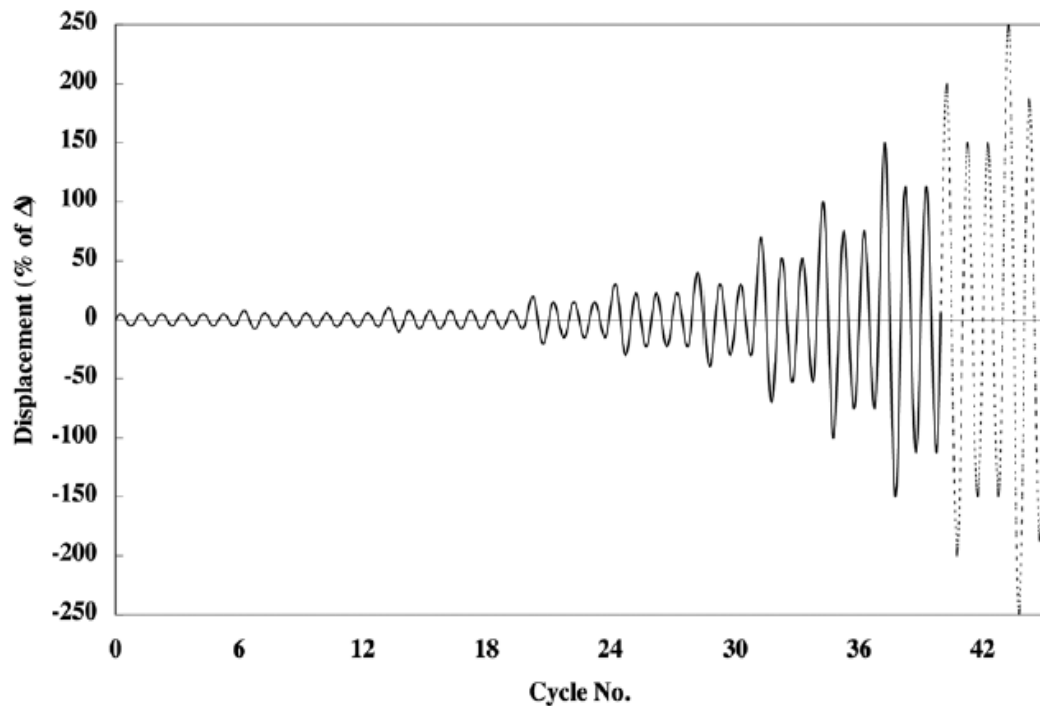
**Gambar 16.** Schedule perpindahan siklik untuk metode uji A



**Gambar 17.** Pola fase tunggal 2 (metode uji A)



**Gambar 18.** Schedule perpindahan siklik untuk metode uji B



**Gambar 19.** Schedule perpindahan siklik untuk metode uji C

Perilaku yang berbeda akan dijumpai untuk material beton ringan ataupun material komposit. Akan tetapi perhitungan dari energi disipasi hampir menyerupai ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar 16, 17, 18 dan 19, hanya saja pada material komposit tidak terdapat efek Bauschinger seperti yang ada pada material baja.

Beban siklik atau *cyclic load* adalah pembebanan berulang yang teratur pada suatu bagian struktur yang dapat menyebabkan fraktur kelelahan (*fatigue*). Mengingat Indonesia berada pada daerah wilayah gempa intensitas gempa tinggi, gempa bumi merupakan salah satu penyebab runtuhnya sebuah bangunan terlebih pada bangunan bertingkat. Beban siklik dapat di artikan sebagai beban gempa yang bekerja pada gedung bertingkat secara bolak balik (2 arah).

Penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan beban sikli (quasi statik diantaranya Hidalgo et al., 2002 mempelajari spesimen yang dirancang untuk gagal dalam tegangan diagonal. Sifat penting dari spesimen ini adalah bala bantuan batas vertikal yang kuat ( $6 - 11 \text{ cm}^2$ ), penahan rotasi dan vertikal pada bagian atas, dan rasio tulangan web antara 0% dan 0,38%. Hanya spesimen dengan rasio tinggi terhadap panjang 1,0 yang dilaporkan dalam penelitiannya. Kegagalan tegangan diagonal membatasi kekuatan dinding sehingga kekuatan yang diamati antara 36% dan 73% dari geser dasar pada kekuatan lentur nominal.

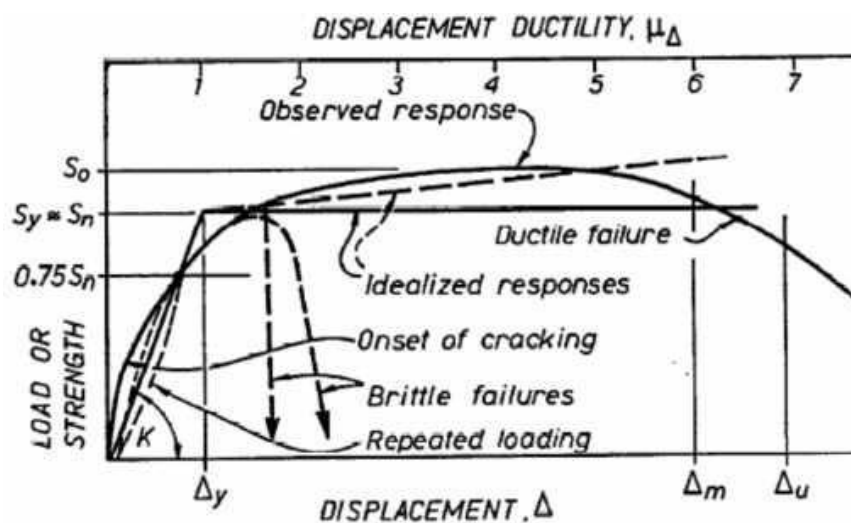
Rothe, 1992 menyelidiki secara eksperimental perilaku statis monotonik, siklik statis, dan dinamis dari dinding kantilever dengan penampang persegi panjang dan flens. Yang menarik adalah spesimen T01, T04, T10, dan T11 karena mode kegagalan yang berbeda. Susunan tulangan dari spesimen ini adalah sama kecuali untuk spesimen T04, dimana tulangan horizontal dihilangkan. Spesimen T01 gagal karena pecahnya tulangan vertikal sementara tegangan diagonal menyebabkan kegagalan spesimen T04. Kedua spesimen diuji di atas meja goyang. Geser diamati dalam uji siklik statis T10. Spesimen T11 mengalami rasio gaya aksial 0,07 dan gagal dalam kompresi diagonal. Disimpulkan bahwa mode kegagalan geser tidak akan terjadi dalam uji dinamis karena kekuatan geser geser dinamis dianggap secara signifikan lebih besar daripada kasus statis. Metode pemberian beban secara lateral yaitu dinding geser diberi beban geser yang terdiri dari beban statis dan siklik.

### G. Perilaku Struktur (*Structural Properties*)

Perilaku struktur penting untuk dikaji dalam perilaku dari suatu struktur yang menerima beban siklik lateral (bolak balik). Menurut Paulay & Priestley (1992), sifat spesifik struktural yang perlu dipertimbangkan sehubungan dengan tiga tingkat perlindungan terhadap gempa adalah :

#### a. Kekakuan (*Stiffness*)

Apabila deformasi akibat beban lateral diukur dan dikontrol, desain struktur harus memperkirakan kekakuan yang relevan. Hal ini berhubungan dengan beban untuk deformasi struktur berikutnya. Hubungan dapat dibentuk dari prinsip pertama mekanika struktur, menggunakan sifat geometris dan modulus elastisitas untuk material. Menurut Kenneth-Belanger (1981) kekakuan balok beton merupakan fungsi dari modulus elastis ( $E$ ) dan momen inersia ( $I$ ). Modulus elastisitas didefinisikan sebagai perbandingan antara kekuatan (*strength*) dengan regangan (*strain*).



**Gambar 20.** Hubungan beban-lendutan pada beton bertulang



Sebuah grafik nonlinier yang menggambarkan hubungan antara beban dan perpindahan pada komponen beton bertulang yang mengalami peningkatan perpindahan secara monoton ditunjukkan pada Gambar 20. Untuk perhitungan desain, salah satu dari dua pendekatan bilinear dapat digunakan, dimana  $S_y$  adalah beban pada saat leleh atau beban ideal  $S_i$ . Kemiringan linier elastik,  $K = S_y / \Delta y$  digunakan untuk mengukur kekakuan.

#### **b. Kekuatan (*Strength*)**

Jika struktur beton harus dilindungi terhadap kerusakan selama terjadinya peristiwa seismic, peristiwa inelastic selama respon dinamik harus dicegah. Ini berarti struktur harus memiliki kekuatan yang memadai untuk melawan gaya dalam yang dihasilkan selama respon dinamik elastis struktur. Oleh karena itu, cara yang tepat untuk mengatasi gempa adalah analisa elastis, berdasarkan sifat kekakuan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Gaya gempa dikombinasi dengan gaya akibat beban lain pada struktur seperti gravitasi. Dengan demikian perancang dapat memberikan kekuatan yang diinginkan, diperlihatkan sebagai  $S_i$  pada Gambar 12, yaitu kekuatan terhadap gaya lateral.

#### **c. Daktalitas (*Ductility*)**

Daktalitas pada umumnya adalah kemampuan untuk mempertahankan deformasi yang besar, setelah terjadinya leleh, tanpa kehilangan perlawanan (Paulay, 1996).

Pada dasarnya daktalitas dibagi atas beberapa jenis. Hal ini terjadi karena adanya beberapa pengertian yang timbul. Pengertian daktalitas

dapat ditinjau dari tiga jenis metode perhitungan. Daktalitas dapat ditinjau dari segi regangan (*strain*), kelengkungan (*curvature*), dan lendutan (*displacement*).

#### 1. Daktalitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktalitas regangan adalah kemampuan dari material/ struktur untuk menahan regangan plastis tanpa penurunan yang drastis dari regangan. Dengan kesamaan respon yang ditunjukkan pada Gambar 20, daktalitas regangan dapat didefinisikan seperti pada persamaan 4.

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_y} \dots \dots \dots (4)$$

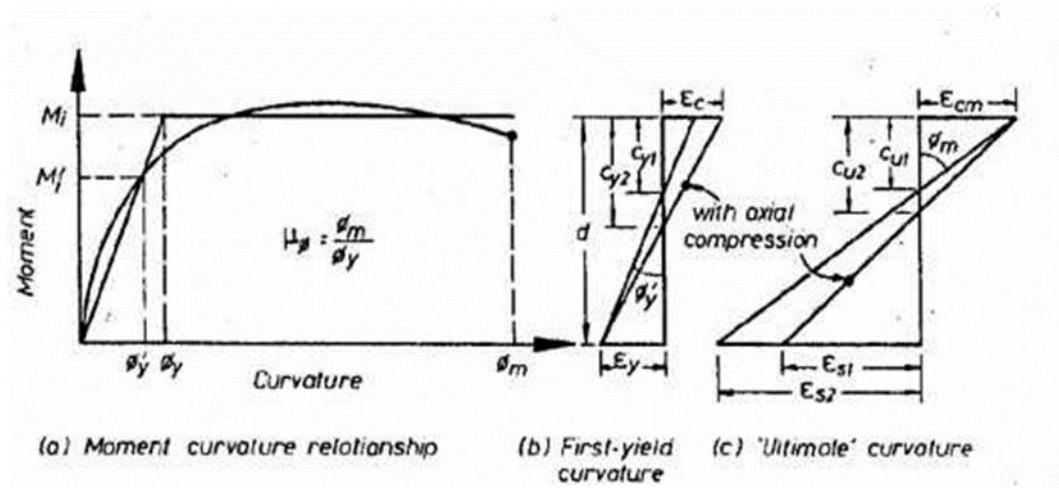
Dimana  $\epsilon$  adalah total regangan yang terjadi dan  $\epsilon_y$  adalah regangan pada saat leleh. Daktalitas yang sangat berpengaruh pada struktur dapat tercapai pada panjang tertentu pada salah satu bagian dari struktur tersebut. Jika regangan inelastik dibatasi dengan panjang yang sangat pendek, maka akan terjadi penambahan yang besar pada daktalitas regangan. Daktalitas regangan merupakan daktalitas yang dimiliki oleh material yang digunakan.

#### 2. Daktalitas Kelengkungan (*Curvature Ductility*)

Pada umumnya yang paling berpengaruh terhadap terjadinya deformasi struktural inelastis adalah rotasi pada daerah yang berpotensi sendi plastis. Oleh karena itu, hal ini berguna untuk menghubungkan bagian rotasi per satuan panjang (*curvature*) sebagai penyebab momen lentur. Daktalitas kelengkungan maksimum dapat dinyatakan pada persamaan 5.

$$\mu_{\phi} = \phi_m / \phi_y \dots \dots \dots (5)$$

Dimana  $\phi_m$  adalah kelengkungan maksimum, dan  $\phi_y$  adalah kelengkungan pada saat leleh. Definisi *Curvature Ductility* ini juga dapat dilihat pada Gambar 21.



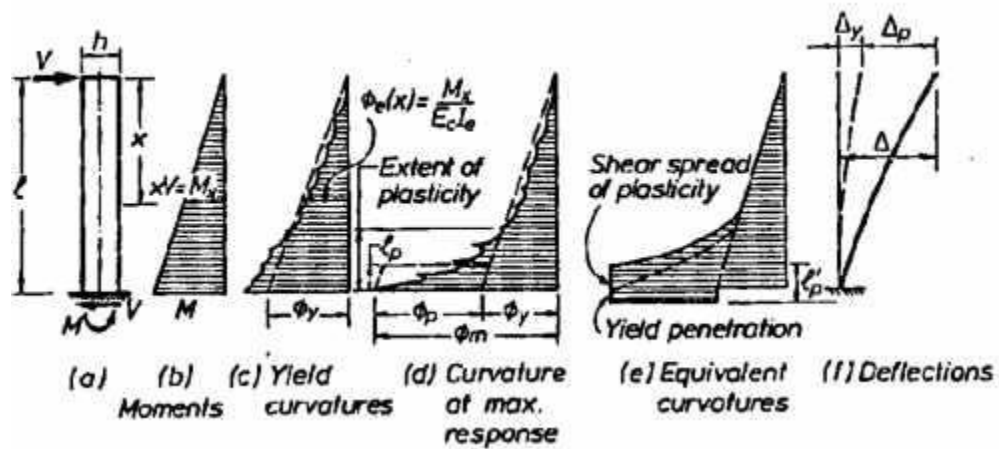
**Gambar 21.** Definisi daktalitas kelengkungan

3. Daktalitas Perpindahan (*Displacement Ductility*)

Daktalitas perpindahan biasanya digunakan pada evaluasi struktur yang diberikan gaya gempa. Daktalitas perpindahan merupakan rasio dari total perpindahan yang terjadi  $\Delta$  dengan perpindahan pada awal titik leleh (*yield point*)  $\Delta_y$ , yang dirumuskan pada persamaan 6.

$$\mu_{\Delta} = \Delta / \Delta_y \dots \dots \dots (6)$$

Dimana  $\Delta = \Delta_y + \Delta_p$ . Perpindahan pada titik leleh ( $\Delta_y$ ) dan pada titik plastis penuh ( $\Delta_p$ ) adalah komponen-komponen dari total lendutan ujung lateral seperti pada Gambar 22.

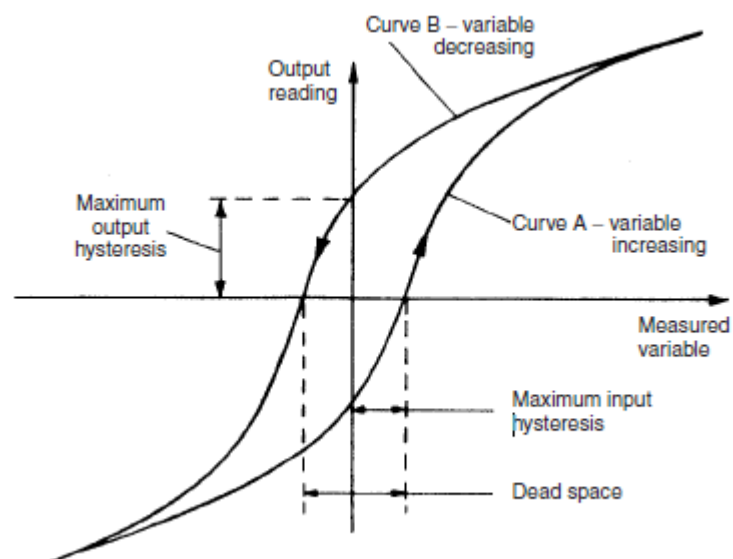


**Gambar 22.** Hubungan Momen, Curvature, dan Lendutan Pada Struktur Kantilever

Berdasarkan *European Convention for Constructional Steelwork (ECCS)*, sifat spesifik struktur terdiri dari :

#### a. Daktalitas

Menurut *ECCS (1986)*, daktalitas terbagi atas dua bentuk yaitu daktalitas parsial dan daktalitas penuh.



**Gambar 23.** Beban dan defleksi pada kurva histerisis

Daktalitas parsial dan penuh untuk daerah momen positif dan negatif, yaitu :

$$\mu_{oi}^+ = \frac{e_i^+}{e_y^+} \dots \dots \dots (7)$$

$$\mu_{oi}^- = \frac{e_i^-}{e_y^-} \dots \dots \dots (8)$$

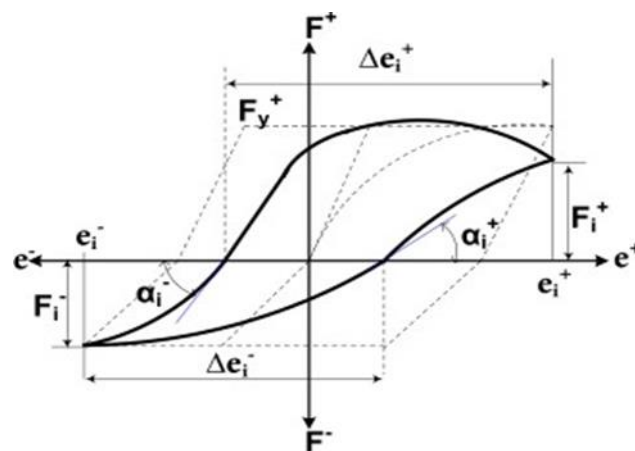
$$\mu_i^+ = \frac{\Delta e_i^+}{e_y^+} \dots \dots \dots (9)$$

$$\mu_i^- = \frac{\Delta e_i^-}{e_y^-} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana  $\mu_{oi}^+$  dan  $\mu_{oi}^-$  adalah daktalitas parsial,  $e^+$  dan  $e^-$  adalah lendutan batas,  $\mu_i^+$  dan  $\mu_i^-$  adalah daktalitas penuh,  $\Delta e_i^+$  dan  $\Delta e_i^-$  adalah lendutan batas total, dan  $e_y^+$  dan  $e_y^-$  adalah lendutan leleh.

### b. Degradasi Kekakuan

Degradasi kekakuan disajikan dalam bentuk rasio kekakuan, yaitu kekakuan setiap siklus pembebanan dengan kekakuan pada saat awal terjadinya leleh.



**Gambar 24.** Degradasi kekakuan pada kurva histeresis berdasarkan  $\tan \alpha$

$$\xi^+ = \frac{tg\alpha_i^+}{tg\alpha_y^+} \dots\dots\dots(11)$$

$$\xi^- = \frac{tg\alpha_i^-}{tg\alpha_y^-} \dots\dots\dots(12)$$

Dimana  $\xi^+$  dan  $\xi^-$  adalah masing-masing rasio kekakuan pada daerah positif dan negatif. Parameter spesifik  $\xi^+$  ( $\mu_{oi}^+$ ), adalah nilai minimum dari  $\xi^+$  yang dievaluasi dari tiga siklus tiap grup dan  $\xi^-(\mu_{oi}^-)$ , adalah nilai minimum dari  $\xi^-$  yang dievaluasi dari tiga siklus tiap grup.

Kemampuan balok memikul beban akan maksimum bila tegangan yang terjadi mencapai tegangan leleh dan akan menurun setelah penampang mengalami retakan-retakan pada daerah tertentu yang akan mengurangi besaran momen inersia penampang.

### c. Degradasi Kekuatan

Kekuatan balok merupakan kemampuan suatu balok dalam memikul beban. Degradasi kekuatan disajikan dalam bentuk rasio kekuatan, yaitu perbandingan antara beban maksimum ( $P_{maks.}$ ) dengan beban pada saat awal leleh ( $P_y$ )

$$\varepsilon^+ = \frac{P_{maks}^+}{P_y^+} \dots\dots\dots(13)$$

$$\varepsilon^- = \frac{P_{maks}^-}{P_y^-} \dots\dots\dots(14)$$

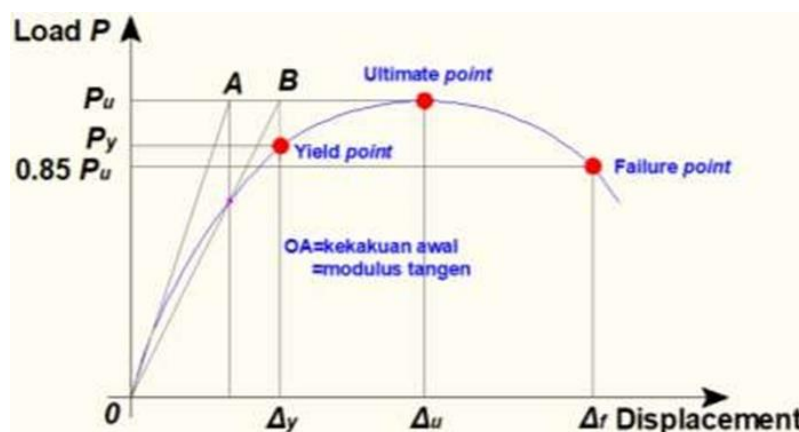
Dimana  $\varepsilon^+$  dan  $\varepsilon^-$  masing-masing adalah rasio kekuatan pada daerah positif dan negatif. Parameter spesifik  $\varepsilon^+(\mu_{oi}^+)$ , adalah nilai minimum dari  $\varepsilon^+$  yang dievaluasi dari tiga siklus tiap grup. Dan  $\varepsilon^-(\mu_{oi}^-)$ , adalah nilai minimum dari  $\varepsilon^-$  yang dievaluasi dari tiga siklus tiap grup.

## H. Titik Leleh (*Yield Point*)

Definisi titik leleh (perpindahan, rotasi atau kelengkungan) sering sulit ditetapkan karena hubungan deformasi dengan gaya mungkin tidak memiliki titik leleh yang terdefinisi dengan baik. Hal ini dapat terjadi, misalnya, karena perilaku bahan yang nonlinier, atau karena penampang yang berbeda pada batang memanjang beton bertulang sehingga menghasilkan tingkat momen yang berbeda, atau karena sendi plastik yang terbentuk di berbagai bagian struktur pada level beban berbeda. Berbagai definisi alternatif telah digunakan peneliti untuk memperkirakan titik leleh ini yaitu :

### 1. Metode General Yield Moment (Zhu, 1989)

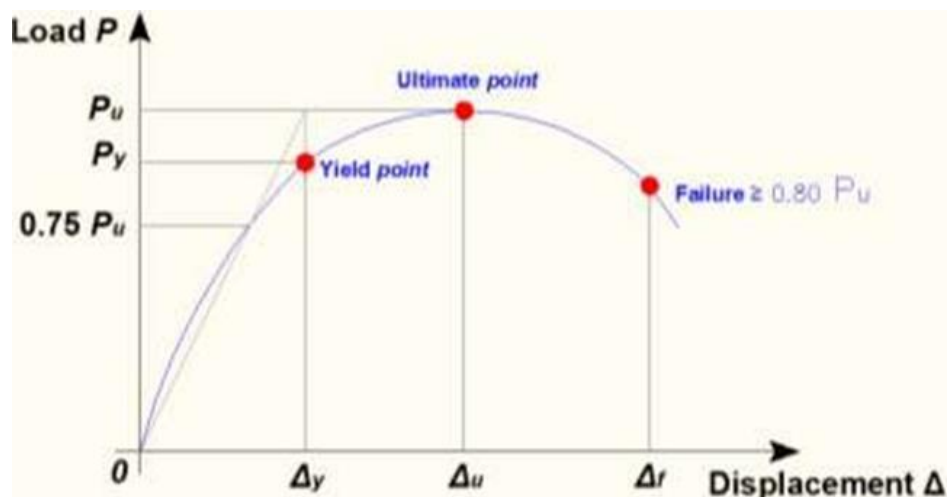
Titik leleh ( $P_y, \Delta_y$ ) dapat ditentukan dengan menggunakan metode grafis yang dilaporkan oleh Zhu (1989), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 25. Beban ultimate  $P_u$  dipilih sebagai beban maksimum, dan perpindahan runtuh  $\Delta_r$  didefinisikan sebagai perpindahan maksimum yang sesuai dengan beban tidak kurang dari  $0,85P_u$  sesuai beban karakteristik dan perpindahan yang diturunkan dari kurva skeleton.



**Gambar 25.** Titik leleh kurva beban displacement (Zhu, 1989)

## 2. Mander *et al* (1988)

Berdasarkan pada pengurangan kekakuan setara leleh elasto-plastik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 26. Perpindahan leleh didefinisikan dengan menggunakan kekakuan garis potong yang menghubungkan sumber dan 75% beban ultimit (Mander *et al.*, 1988). Perpindahan maksimum  $\Delta_f$  didefinisikan sebagai perpindahan yang sesuai dengan 80% dari beban ultimit (Mander *et al.*, 1988).

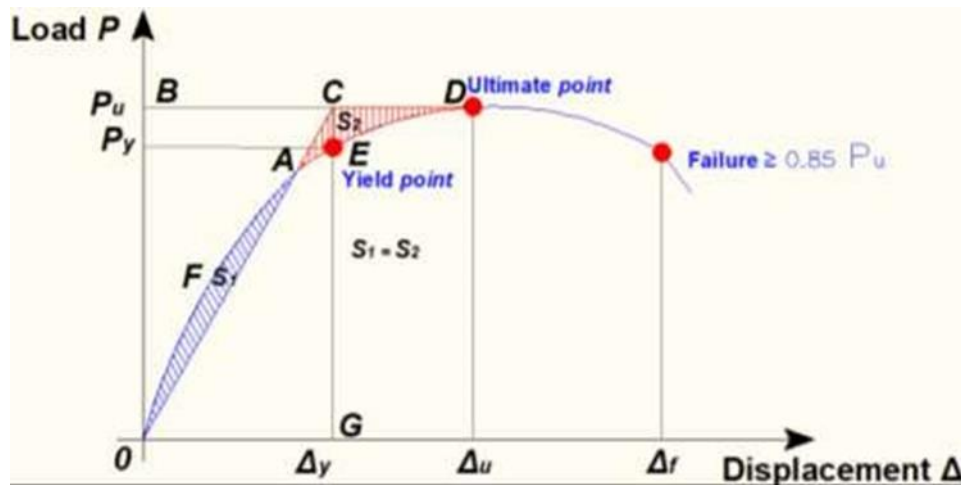


**Gambar 26.** Titik leleh pada kurva beban displacement (Mander *et al.*, 1988)

## 3. Park, R (1988)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 27, perpindahan leleh didefinisikan dengan menyamakan luas  $S_1$  sama dengan luas  $S_2$ , posisi titik  $C$  ditentukan. Garis  $CG$ , tegak lurus terhadap sumbu transversal, memotong kurva  $P - \Delta$  pada titik  $E$ . Perpindahan yang sesuai dengan titik  $E$  digunakan sebagai  $\Delta_y$ . Perpindahan maksimum  $\Delta_f$  didefinisikan sebagai perpindahan yang sesuai dengan 80% dari beban ultimit.





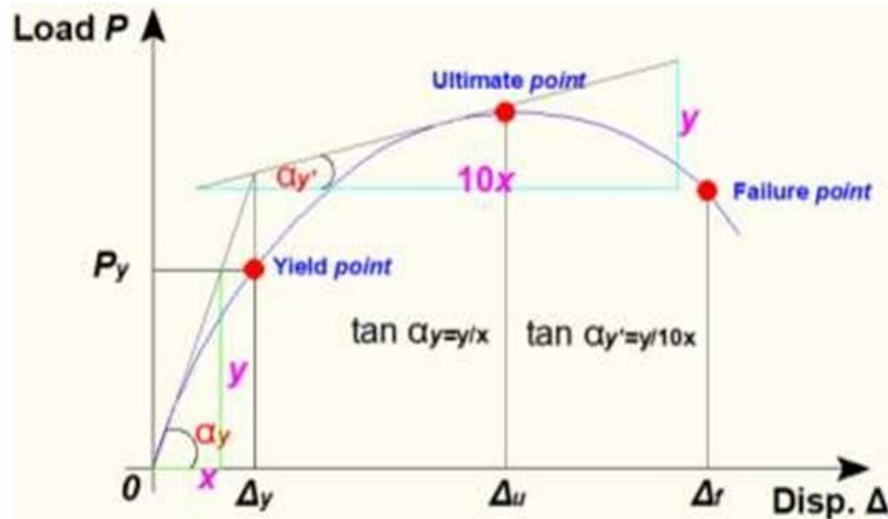
**Gambar 27.** Titik leleh pada kurva beban displacement (Park, R., 1988)

#### 4. ECCS (1986)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 28, dengan mengevaluasi garis singgung pada titik asal kurva F-e; akan memberikan modulus tangen  $E_t^+ = \text{tg } \alpha_y^+$ . kemudian tetapkan garis singgung yang memiliki kemiringan  $E_t^+ / 10$ . Persimpangan dua garis singgung mendefinisikan tingkat  $F_y^+$  dan  $e_y^+$  (perpindahan leleh). Beberapa point yang perlu diperhatikan pada penentuan titik leleh dengan metode ECCS ini adalah :

1. Tes harus dilakukan dengan langkah-langkah perpindahan yang cukup kecil untuk memastikan bahwa setidaknya 4 tingkat perpindahan tercapai sebelum  $e^+$  dan  $e^-$
2. Modulus tangen pada titik asal  $\text{tg } \alpha_y^+$  dan  $\text{tg } \alpha_y^-$  dievaluasi dari kurva siklus pertama
3. Kemudian  $F_y$  didefinisikan oleh persimpangan dua garis singgung atau dengan definisi lain yang dibenarkan. Dalam kasus pertama, satu **garis singgung** dievaluasi pada titik asal (kemiringan  $\text{tg } \alpha$ ); yang

lainnya adalah garis singgung ke kurva envelope siklus dengan kemiringan  $0,1 \tan \alpha$ .



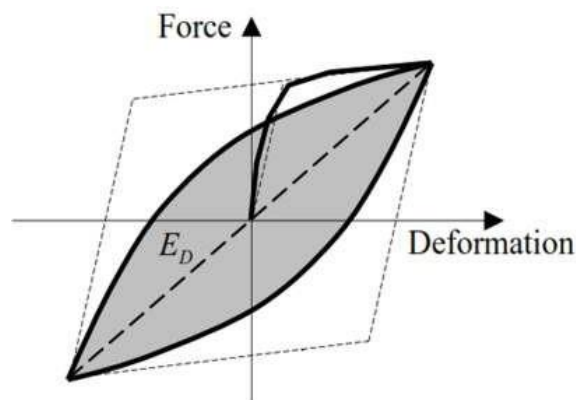
**Gambar 28.** Titik leleh pada kurva beban displacement (ECCS, 1986)

### I. Disipasi Energi

Menurut Park dan Paulay (1975), bahwa hal yang harus diperhatikan dalam desain struktur beton bertulang di daerah rawan gempa, sehingga menghasilkan desain yang memenuhi persyaratan dan pertimbangan ekonomis adalah daktilitas struktur, dimana hal ini dapat dicapai dengan cara membatasi pengaruh energi gempa yang terjadi pada struktur, agar dapat diserap dan disebarkan (disipasi) melalui mekanisme inelastic tetapi masih dalam kondisi yang terkendali.

Menurut Legeron *et al.* (2000) bahwa kapasitas disipasi energi merupakan salasatu parameter penting bagi struktur yang direncanakan dengan beban gempa yang memiliki periode ulang gempa yang lama.

Menurut Elmenshawi dan Brown (2009), salah satu tujuan utama dari retrofit adalah untuk meningkatkan kapasitas dari elemen struktur, dimana kapasitas dapat meningkat jika terjadi peningkatan kapasitas disipasi energi pada saat struktur mengalami gempa, tanpa terjadi penurunan kekuatan yang signifikan.



**Gambar 29.** Disipasi energi menurut ATC 40 (Park dan Eom, 2004)

Pada struktur yang dibebani dengan beban siklik, nilai disipasi energi dalam satu siklus ( $E_D$ ) dapat dihitung berdasarkan luas area dari hubungan antara gaya lateral yang terjadi, dengan deformasi dalam bentuk kurva menutup yang disebut dengan *hysteresis loops* (Legeron et.al, 2000).

Luas area *hysteresis loops* pada Gambar 29 dapat dihitung dengan menggunakan pendekatan aturan trapesium banyak pias (Legeron et al., 2000), dalam bentuk persamaan :

$$A = \sum_{i=1}^n \Delta_i \frac{f(x_i) + f(x_{i-1})}{2} \dots\dots\dots(15)$$

Disipasi energi total ( $E$ ) yang terjadi dan disipasi energi yang dinormalisasi ( $E_N$ ) dapat dihitung dengan persamaan :

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \dots\dots\dots(16)$$

$$E_N = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{E_{max}\Delta y} \dots\dots\dots(17)$$

dengan :

n = jumlah siklus selama pengujian.

E<sub>max</sub> = beban lateral maksimum.

Menurut Park dan Eom (2004), kapasitas disipasi energi pada daerah sendi plastis kolom dapat dihitung berdasarkan persamaan :

$$E_D = e_d \cdot L_p \dots\dots\dots(18)$$

dengan :

ED = kapasitas disipasi energi pada area sendi plastis.

ed = energi disipasi pada kolom.

L<sub>p</sub> = perkiraan panjang daerah sendi plastis kolom.