

PROMOSI DISERTASI

**PERILAKU RANGKA BETON BERTULANG
MENGUNAKAN BETON BUSA PREFABRIKASI DENGAN
PERKUATAN CFRP SEBAGAI DINDING PENGISI DI BAWAH
PEMBEBANAN SIKLIK HORIZONTAL**

*(Behaviour of RC Frames Using Precast Foam Concrete
Strengthened with CFRP as An Infill Wall Under Horizontal
Cyclic Loading)*

**YOHANS SUNARNO
D013202010**



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2023**

DISERTASI
PERILAKU RANGKA BETON BERTULANG MENGGUNAKAN
BETON BUSA PREFABRIKASI DENGAN PERKUATAN CFRP
SEBAGAI DINDING PENGISI DI BAWAH PEMBEBANAN SIKLIK
HORISONTAL

YOHANS SUNARNO
D013202010

Telah dipertahankan dihadapan Panitia Ujian Disertasi yang dibentuk
dalam rangka penyelesaian studi pada Program Doktor Ilmu Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
pada tanggal 16 Oktober 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Promotor



Prof. Dr. Ir. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121007

Co-Promotor



Prof. Dr.Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 19720619 200012 2 001

Co-Promotor



Ir. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D
NIP. 196007301986031003

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr.Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST.MT, IPM, AER
NIP. 197309262000121002

Ketua Program Studi
S3 Ilmu Teknik Sipil



Prof. Dr.Eng. Ir. Rita Irmawaty, ST, MT
NIP. 197206192000122001

**PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI
DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang Bertandatangan di bawah ini:

Nama : Yohans Sunarno
Nomor Mahasiswa : D013202010
Program Studi : S3 Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul "Perilaku Rangka Beton Bertulang Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi Dengan Perkuatan CFRP Sebagai Dinding Pengisi di Bawah Pembebanan Siklik Horisontal" adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng. sebagai promotor, Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT selaku Co-Promotor-1 dan Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D selaku Co-Promotor-2. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apapun kepada perguruan tinggi manapun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Prosiding IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1117 hal. 012034 tahun 2022 sebagai artikel dengan judul "Performance of High Early Strength Concrete (HESC) using Different Superplasticizer" dan di International Journal of GEOMATE volume 25, No 110 tahun 2023, halaman 98-105 sebagai artikel dengan judul "Behavior of RC Frame Using Precast Foam Concrete Strengthened with CFRP As an Infill Wall Under Horizontal Cyclic Loading".

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, November 2023

Yang menyatakan



Yohans Sunarno

KATA PENGANTAR

Puji Tuhan kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa yang atas izin Nya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni “Perilaku Rangka Beton Bertulang Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi Dengan Perkuatan CFRP Sebagai Dinding Pengisi Di Bawah Pembebanan Siklik Horisontal” dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras telah kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya dan 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 Ibu **Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT** dan Bapak **Ir. H. Achmad Bakri Muhiddin, M.Sc., Ph.D** selaku Co-Promotor yang banyak memberikan waktu, arahan dan bimbingannya kepada kami. Kepada Bapak dan Ibu kami mengucapkan terima kasih dan penghormatan yang setinggi-tingginya atas bimbingan yang begitu tulus dan ikhlas.

Penghargaan yang setinggi tingginya kepada Bapak **Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc** (Rektor 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 **Prof. 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 Universitas Hasanuddin 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 Tuhan Yang Maha Kuasa dapat membalasnya.

Makassar, November 2023

Yohans Sunarno

ABSTRAK

YOHANS SUNARNO. Perilaku Rangka Beton Bertulang Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi Dengan Perkuatan CFRP Sebagai Dinding Pengisi di Bawah Pembebanan Siklik Horisontal (dibimbing oleh **H. M. Wihardi Tjaronge, Hj. Rita Irmawaty** dan **H. Achmad Bakri Muhiddin**).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi terjadinya gempa yang sangat tinggi. Banyak wilayah yang posisi geografisnya menempati zona tektonik yang sangat aktif sehingga wilayah tersebut memiliki kerentanan terdampak bencana susulan akibat terjadinya gempa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku rangka beton bertulang menggunakan dinding panel beton busa prefabrikasi yang diberikan perkuatan CFRP secara diagonal di bawah protokol pengujian siklik ASTM E2126-02a (ASTM 2003), menganalisis pengaruh perkuatan CFRP yang dipasang secara diagonal pada dinding beton busa prefabrikasi sebagai bahan pengisi, menemukan tingkat kegagalan dan mekanisme kegagalan berdasarkan FEMA 356 sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral (kekakuan). Benda uji dibuat sebanyak 4 variasi, yaitu: portal rangka beton bertulang kosong/*bare frame* (WT1), portal rangka beton bertulang menggunakan bahan pengisi panel beton busa prefabrikasi (WT2), dua portal rangka beton bertulang menggunakan bahan pengisi panel beton busa prefabrikasi yang diperkuat CFRP secara diagonal dengan lebar masing-masing 0,10D dan 0,15D (WT3 dan WT4). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai beban maksimum yang dihasilkan oleh benda uji WT1, WT2, WT3 dan WT4 pada pembebanan tekan adalah masing-masing sebesar 29,84 kN, 44,88 kN, 101,30 kN dan 102,87 kN sedangkan pada pembebanan tarik adalah sebesar 29,30 kN, 52,30 kN, 58,95 kN dan 80,09 kN. Keberadaan perkuatan CFRP yang dipasang secara diagonal pada dinding beton busa prefabrikasi dapat meningkatkan kemampuan dalam menerima beban lateral dalam bidang pada portal rangka beton bertulang. Kegagalan yang terjadi secara global adalah kegagalan geser yang dimulai dengan *debonding* lembar CFRP dan diakhiri dengan keruntuhan struktur geser. Sedangkan retak yang terjadi pada dinding pengisi adalah retak horizontal/diagonal dengan keruntuhan geser dan tipe keruntuhan berdasarkan gaya yang bekerja adalah keruntuhan *In-plane failure*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji yang diberi perkuatan CFRP secara diagonal bertambah pada setiap tingkat kinerja strukturalnya.

Kata kunci : Perilaku, Rangka beton bertulang, CFRP, Panel beton busa prefabrikasi, Pembebanan siklik

ABSTRACT

YOHANS SUNARNO. *Behaviour of RC Frames Using Precast Foam Concrete Strengthened with CFRP as An Infill Wall Under Horizontal Cyclic Loading* (supervised by **H. M. Wihardi Tjaronge, Hj. Rita Irmawaty dan H. Achmad Bakri Muhiddin**).

Indonesia is one of the countries with a very high potential for earthquakes. Many areas are geographically positioned in very active tectonic zones, so these areas are vulnerable to aftershocks due to earthquakes. This study aims to analyze the behavior of reinforced concrete (RC) frames using precast foam concrete panel walls strengthened with diagonal CFRP under the ASTM E2126-02a cyclic testing protocol (ASTM 2003), analyze the effect of diagonally mounted CFRP strengthened on precast foam concrete as infill walls, and find failure rates and failure mechanisms based on FEMA 356 as a function of lateral strength (stiffness) level. The specimens were made in 4 variations: RC-frame without infill wall as a bare frame (WT1), RC-frame portal using precast foam concrete panel as infill wall (WT2), and two RC-frame portals using precast foam concrete as infill wall with strengthened diagonal CFRP with widths of 0,10D and 0,15D, respectively (WT3 and WT4). The results showed that the maximum load values produced by WT1, WT2, WT3, and WT4 specimens in compressive loading were 29,84 kN, 44,88 kN, 101,30 kN, and 102,87 kN, respectively, while in tensile loading they were 29,30 kN, 52,30 kN, 58,95 kN, and 80,09 kN. The presence of diagonally mounted CFRP strengthened in precast foam concrete as infill walls can improve the ability to accept in-plane lateral loads in RC frame portals. The failure that occurred globally was a shear failure that began with the debonding of the CFRP sheet and ended with the collapse of the shear structure. While the crack that occurs in the infill wall is a horizontal/diagonal crack with shear collapse, the type of collapse based on the acting force is In-plane failure. The results showed that the maximum load that the CFRP-strengthened specimens could withstand diagonally increased at each level of structural performance.

Keywords: Behaviour, RC frame, CFRP, Panel precast foam concrete, Cyclic loading

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR NOTASI	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang Masalah.....	1
B. Rumusan Masalah.....	9
C. Tujuan Penelitian	9
D. Batasan Masalah	10
E. Manfaat Penelitian	11
F. Sistematika Penulisan	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Teori Beton Busa.....	14
B. Spesifikasi dan Aplikasi Beton Busa	19
C. Pengaruh Gempa Terhadap <i>Non Engineered Building</i>	23
D. <i>Fiber Reinforced Polymer (FRP)</i> Komposit Untuk Struktur Beton Bertulang dan Beton Prategang.....	26

E. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan.....	32
F. Kegagalan Struktur Dinding Pengisi Akibat Gempa ..	45
G. Mekanisme Kegagalan Elemen Struktur Berdasarkan FEMA 356.....	50
H. Perhitungan Tegangan Lateral dan Kapasitas Rekatan CFRP	54

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

A. Lokasi dan Waktu Penelitian	57
B. Rancangan Uji.....	64
C. Pembuatan Benda Uji Beton Busa	66
D. Matriks Benda Uji Dinding Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Bahan Pengisi	68
E. Proses Pengecoran Benda Uji Dinding dengan Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Bahan Pengisi dan Pemasangan CFRP	72
F. Setting Up Benda Uji dan Pengujian Dinding Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Bahan Pengisi	78
G. Studi Empirik Penelitian Terdahulu	83

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material	95
B. Kekuatan Benda Uji Dinding.....	109

C. Hubungan Beban dan Regangan pada Baja Tulangan, Beton dan CRFP	121
D. Gaya-gaya dalam Benda Uji Dinding	126
E. Mekanisme Kegagalan Benda Uji Dinding	127
F. Interpretasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji Dinding	180
G. Kekuatan Lateral dan Kapasitas Rekatan CFRP.....	184
H. Temuan Empirik	186
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan	187
B. Saran	188
DAFTAR PUSTAKA.....	189

DAFTAR TABEL

Nomor		Halaman
1.	Sifat Khas Serat Karbon yang Tersedia Secara Komersial	30
2.	Tingkat Kerusakan Elemen Vertikal Berdasarkan FEMA 356 .	52
3.	Metode Pengujian Karakteristik Agregat Halus.....	64
4.	Karakteristik Semen Portland Komposit	64
5.	Karakteristik <i>Admixture</i>	65
6.	Karakteristik Fisik dan Metode Pengujian Beton Busa.....	66
7.	Matriks Benda Uji Panel Dinding Panel Pracetak Beton Busa ..	69
8.	Benda Uji Panel Dinding Panel Pracetak Beton Busa	69
9.	Proses Pembuatan Benda Uji	73
10.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada Baja Tulangan	79
11.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada Beton	81
12.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada CFRP	81
13.	Metode Pengujian B – Amplitude dari Siklus Terbalik.....	83
14.	Studi Empirik Penelitian Terdahulu	85
15.	Rancangan Campuran FC (1 m ³)	96
16.	Hasil Pengujian Berat Volume	96
17.	Hasil Pengujian Kuat Tekan dan Kuat Tarik Tidak Langsung FC	98
18.	Rancangan Campuran Mortar (1 m ³)	99
19.	Rancangan Campuran Balok Bawah (<i>Bottom Beam</i>) (1 m ³)	102

20.	Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan Untuk Penulangan Balok Bawah	103
21.	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Untuk Balok Bawah	104
22.	Rancangan Campuran Beton Untuk Kolom dan Balok Atas (<i>Upper Beam</i>) (1 m ³).....	104
23.	Hasil Uji Kuat Tarik Baja Untuk Penulangan Kolom dan Balok Atas (<i>Upper Beam</i>)	105
24.	Kuat Tekan Beton Untuk Kolom dan Balok Atas (<i>Upper Beam</i>)	106
25.	Karakteristik Komposit CFRP Tyfo SCH-41 dengan Typo Epoxy	108
26.	Perbandingan Tingkat Kekuatan Pada Semua Benda Uji	120
27.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT1	130
28.	Rekapitulasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT1	140
29.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT2	144
30.	Rekapitulasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT2	155
31.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT3	160
32.	Rekapitulasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT3	166
33.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT4	170
34.	Rekapitulasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT4	178
35.	Interpretasi Mekanisme Kegagalan Benda Uji Dinding	180
36.	Rasio Benda Uji Dinding WT1, WT2, WT3 dan WT4	183
37.	Tegangan Lateral dan Kapasitas Rekatan CFRP	185

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Perkiraan Berat Unit dan Klasifikasi Penggunaan Beton Agregat Ringan Menurut ACI 213R3	15
2. Gempa yang Terjadi di (a) Padang dan (b) Palu	24
3. Parameter Kinerja Spesimen: (A) Titik Terakhir di $P_u \geq 0,8 P_{peak}$	37
4. Parameter Kinerja Spesimen: (B) Titik Terakhir di $P_u = 0,8 P_{peak}$ (Dilanjutkan).....	37
5. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian A	38
6. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian B (Dilanjutkan).....	38
7. Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian C (Dilanjutkan)	39
8. Contoh Rata-Rata Kurva Envelope	39
9. Contoh Spesimen Dinding Geser.....	41
10. Contoh Set Up Pengujian Siklik Spesimen Dinding Geser	41

11.	Skedul Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji A.....	43
12.	Pola Fase Tunggal 2 (Metode Uji A)	43
13.	Skedul Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji B	43
14.	Skedul Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji C.....	44
15.	Komponen Dasar Bangunan dan Perilaku Beban Gempa pada Dinding	46
16.	Tension Failure Mode	48
17.	Stepped Cracks Shear Failure	48
18.	Horizontal Sliding Shear Failure.....	48
19.	Diagonal Tensile Cracking	49
20.	Crushing of the Loaded Corners	49
21.	Flexural or Shear Failure of Columns	49
22.	Diagram Alir Penelitian	59
23.	Material Beton Busa	60
24.	Cyclic Actuator Lateral Load.....	61
25.	Switching Box dan Data Logger	62
26.	LVDT dengan Bacaan Maksimum (a) 10 cm, (b) 5 cm, (c) 2,5 cm	62
27.	Strain Gauge Untuk Material Beton Tipe PL-60-11	63
28.	Proses Pembuatan Campuran Beton Busa.....	68
29.	Geometrik Beton Busa Prefabrikasi	71
30.	Proses Pemasangan Lembar CFRP	75
31.	Angkur CFRP	77

32.	Pemasangan Angkur Secara Ortogonal	77
33.	Angkur yang Terpasang Pada Benda Uji.....	78
34.	Setting Up LVDT pada Benda Uji.....	79
35.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada Baja Tulangan	80
36.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada Baja Beton.....	80
37.	Posisi Pemasangan Strain Gauge pada CFRP	81
38.	Hasil Pengujian Slump Test FC	97
39.	Hubungan Antara Umur dengan Kuat Tekan FC	98
40.	Hasil Pengujian Slump Flow Mortar	100
41.	Hubungan Antara Umur dengan Nilai Kuat Tekan Mortar.....	101
42.	Hasil Pengujian Slump Balok Bawah	102
43.	Hubungan Antara Umur dan Kuat Tekan Beton Balok Bawah..	103
44.	Hasil Pengujian Slump Kolom dan Balok Atas (<i>Upper Beam</i>)...	105
45.	Hubungan Antara Umur dan Kuat Tekan Beton Kolom dan Balok Atas (<i>Upper Beam</i>)	106
46.	Pengujian Tegangan dan Regangan CFRP	108
47.	Hubungan Tegangan dan Regangan CFRP.....	109
48.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji WT1	111
49.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji WT2	112
50.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji WT3	114
51.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji WT4	116
52.	Perbandingan Hubungan Beban dan Lendutan Semua Benda Uji	119

53.	Perbandingan Kekuatan Maksimum Untuk Semua Benda Uji...	120
54.	Hubungan Beban dan Regangan pada Baja Tulangan.....	122
55.	Hubungan Beban dan Regangan pada Beton.....	124
56.	Hubungan Beban dan Regangan pada CFRP	126
57.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT1	128
58.	Interpretasi hubungan beban dan lendutan benda uji WT1	141
59.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT2	142
60.	Interpretasi hubungan beban dan lendutan benda uji WT2	156
61.	Benda uji WT3 sebelum terjadi keretakan	157
62.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT3	158
63.	Interpretasi hubungan beban dan lendutan benda uji WT3	167
64.	Benda Uji WT4 Sebelum Terjadi Keretakan	169
65.	Mekanisme Kegagalan Benda Uji WT4	169
66.	Debonding CFRP Terhadap Beton Busa.....	177
67.	Interpretasi hubungan beban dan lendutan benda uji WT4	179

DAFTAR NOTASI

Ke	= Kekakuan elastik (kN/mm)
P_{peak}	= Beban pada saat 0,4 P _{peak} (kN)
ΔP_{peak}	= Simpangan pada saat beban 0,4 P _{peak} (mm)
P_{yield}	= Beban pada kondisi leleh
A	= Luas (kN.mm) sesuai beban-simpangan yang diamati
Δ_{yield}	= Simpangan leleh (mm)
P_{yield}	= Beban leleh (kN)
V_{peak}	= Kekuatan geser (N/m)
P_{peak}	= Beban maksimum yang dapat dipikul oleh specimen (kN)
L	= Panjang specimen (m)
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)
Δ	= Perpindahan tepi atas spesimen berdasarkan hasil pengujian (m)
H	= Tinggi spesimen (m)
Δ_e	= Perpindahan tepi atas spesimen pada 0,4 P _{peak}
V_{cal}	= Kapasitas kekuatan lateral yang dihitung dari spesimen

V_{masonry}	= Kapasitas strut diagonal setara yang dihitung dari dinding pasangan bata
V_{CFRP}	= Kapasitas tegangan strip CFRP diagonal yang dihitung dari spesimen
h	= Sudut diagonal utama dinding pasangan bata
n	= Nomor strip CFRP
E_{CFRP}	= Modulus elastis CFRP
t_{CFRP}	= Ketebalan strip CFRP
W_{CFRP}	= Lebar strip CFRP
E_{CFRP}	= Regangan strip CFRP
D	= Densitas beton (kg/m^3)
M_c	= Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)
M_m	= Massa wadah ukur (kg)
V_c	= Volume wadah ukur (m^3)
M	= Massa total dari semua material dalam campuran (kg)
V	= Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m^3)
f'_c	= Kuat tekan beton (N/mm^2)
P	= Beban maksimum (N)
A	= Luas penampang yang menerima beban (mm^2)
f'_{ct}	= Kuat tarik belah (N/mm^2)
P	= Beban maksimum (N)
L	= Panjang benda uji silinder (mm)
D	= Diameter benda uji silinder (mm)

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Masalah

Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi terjadinya gempa yang sangat tinggi. Banyak wilayah yang posisi geografisnya menempati zona tektonik yang sangat aktif sehingga wilayah tersebut memiliki kerentanan terdampak bencana yang disebabkan terjadinya gempa. Berdasarkan Peta Hazard Gempa Indonesia tahun 2010, adanya pertemuan tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya di wilayah Indonesia telah membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Karena aktifitas lempeng-lempeng tersebut yang saling berinteraksi, wilayah Indonesia sangat rentan terhadap gempa bumi. Menurut catatan dan rekaman sejarah, antara tahun 1900 dan 2009 terjadi lebih dari 50.000 gempa dengan magnituda M di atas 5,0, dan lebih dari 14.000 gempa utama, atau dalam kondisi jika gempa ikutannya tidak diperhitungkan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2010).

Terjadinya gempa bumi yang memicu runtuhnya dinding pada struktur rangka beton bertulang semakin menjadi perhatian para peneliti akhir-akhir ini. Untuk itu perlu dilakukan perencanaan desain struktur yang benar dan aman

untuk mengantisipasi beban lateral yang ditimbulkan oleh beban siklik yang diakibatkan oleh gempa (Cai G., dan Su, Q., 2017).

Di sisi lain, perumahan hunian telah menjadi lebih populer dalam beberapa tahun terakhir karena kebutuhan akan perumahan yang murah. Karena developer ingin menggunakan material secara efisien, maka perilaku dan evaluasi struktur harus diteliti dan dikembangkan secara menyeluruh. Dengan demikian, prosedur desain yang didasarkan pada perilaku yang diamati akan memastikan kemudahan pemasangan dan perawatan unit strukturalnya.

Pada proses suatu pekerjaan konstruksi, perencanaan desain struktur dilakukan sebelum melaksanakan pembangunan. Hal ini dimaksudkan agar kapasitas dari sebuah struktur diketahui dengan benar. Sistem struktur biasanya terbagi menjadi dua kategori: sistem rangka terbuka (*open frame*) dan sistem rangka berdinding pengisi (*infilled frame*). *Infilled frame* merupakan sistem struktur berisi panel dinding atau panel pengisi rangka yang mempertimbangkan kontribusi panel dinding yang terisi untuk menahan beban lateral. Untuk bangunan bertingkat sedang dan rendah, dinding pengisi sering digunakan hanya sebagai partisi pemisah di bagian dalam atau penutup luar bangunan. Oleh karena itu, dianggap sebagai komponen non-struktur selama perencanaan sebuah gedung. Bahkan dalam pemodelan struktur, keberadaannya tidak menjadi masalah jika intensitas beban yang timbul sudah diantisipasi (misalnya, dianggap sebagai beban merata).

Dalam perkuatan struktur, bermacam teknik yang berbeda telah dikembangkan dan diterapkan dalam praktik di lapangan. Banyak peneliti telah melakukan penelitian tentang teknik perkuatan, termasuk aplikasi dinding pengisi pada rangka beton bertulang, panel pracetak, bresing baja, dan pelapisan (*jacketing*) beton pada rangka, yang dapat digunakan untuk perkuatan struktur yang tahan gempa. Di antara teknik perkuatan yang ada, penambahan dinding pengisi (*Infilled frame*) merupakan teknik penguatan yang paling memungkinkan untuk bangunan beton bertulang bertingkat menengah di banyak negara. Dinding pengisi meningkatkan kapasitas beban lateral dari rangka beton bertulang dan mengurangi *drift lateral* (simpangan lateral) pada beban *ultimate*.

Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan bahan dinding pengisi yang ideal untuk struktur rangka beton bertulang dalam mengantisipasi beban lateral yang ditimbulkan oleh gempa tersebut. Salah satu pilihan material yang dapat dipergunakan untuk dinding pengisi tersebut adalah penggunaan bahan ringan seperti beton busa yang termasuk kategori *cellular lightweight concrete* (CLC). CLC sangat membantu untuk meningkatkan kinerja total seismik rangka beton bertulang, baik kekuatan maupun daktilitas, yang disebabkan oleh bobot sendiri yang kecil dan mereduksi bencana susulan yang disebabkan oleh kerusakan dinding. Meskipun panel CLC merupakan pengisi yang ringan namun tidak efektif untuk mempromosikan mode kegagalan yang lebih aman dari rangka utama, panel CLC sedikit

mempengaruhi anggota rangka batas terutama kolom rangka, dan rangka masih dapat dengan aman menahan aksi gempa kuat sampai *rasio drift* 3,0% dan memiliki kerusakan dinding runtuh kecil dan deformasi sisa. Dibandingkan dengan batu bata dan panel gipsium, CLC lebih mendekati pengisi ideal untuk struktur rangka (Cai G., dan Su, Q., 2017).

Beton busa yang berbentuk pasta semen atau mortar didefinisikan sebagai beton ringan dengan density berkisar antara 400-1850 kg/m³, mengandung udara acak yang dihasilkan dari campuran *foam agent* di dalam mortar. Beton busa memiliki *flowability* yang tinggi, penggunaan jumlah semen yang rendah, dan pemakaian agregat yang lebih efisien (Ramamurthy, K. *et al.*, 2009).

Penelitian terdahulu telah dilakukan oleh Tumpu, M. *et al.*, (2021) dengan meninjau pola kegagalan yang terjadi pada dinding yang menggunakan beton busa prefabrikasi sebagai bahan pengisi, menyebutkan bahwa kegagalan yang terjadi pada dinding pengisi di dominasi pada *bed joint* (sambungan antar beton busa prefabrikasi). Penelitian berikutnya oleh Mansyur *et al.*, (2021) membahas tentang perilaku kekuatan, daktilitas dan kapasitas disipasi energi pada rangka beton bertulang yang menggunakan panel beton busa, menyimpulkan bahwa panel pracetak beton busa yang dijadikan sebagai bahan pengisi mempunyai respon struktur yang baik dalam menerima beban seismik atau beban gempa. Penggunaan serat *polyolefin* dapat meningkatkan

nilai kekakuan sebesar 34,01% terhadap dinding yang tidak menggunakan serat sedangkan terhadap rangka beton bertulang adalah sebesar 805,32%.

Meskipun teknik perkuatan menggunakan dinding pengisi ini efektif, masih ada beberapa kekurangannya yaitu: membutuhkan banyak pekerjaan persiapan, konstruksinya yang dapat mengganggu fungsi bangunan yang ada, dan selain itu elemen struktural yang baru dapat mempengaruhi estetika arsitektur bangunan. Teknik perkuatan ini juga menambah massa yang cukup besar yang mengakibatkan beban seismik yang lebih tinggi. Oleh karena itu, metode alternatif perkuatan layak untuk dipertimbangkan. Pada dekade terakhir penggunaan *Fiber Reinforced Polymers* (FRP) untuk perkuatan dan penguatan menjadi alternatif yang tepat karena ketebalannya yang tipis, dan aplikasinya yang relatif mudah. Menurut terminologi *American Concrete Institute* (ACI) *concrete*, FRP merupakan istilah umum untuk bahan komposit yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat dalam bentuk kain, lembaran, untaian, atau bentuk serat lainnya. Salah satu jenis FRP adalah *Carbon fiber reinforced polymers* (CFRP) yang menggunakan serat karbon sebagai penguatnya. Pada CFRP untuk matriksnya biasa menggunakan resin polimer, seperti epoksi, untuk mengikat penguat bersama-sama. Karena CFRP terdiri dari dua elemen yang berbeda, sifat material bergantung pada dua elemen ini. CFRP tidak hanya memiliki keunggulan kekuatan yang sangat tinggi dibandingkan material konvensional, tetapi juga ringan dan sangat tahan lama pada berbagai kondisi lingkungan. Bobot CFRP

yang ringan membuat teknik rehabilitasi lebih mudah pada ruang terbatas. Selain itu tidak membutuhkan peralatan yang besar untuk aplikasi CFRP. Kekuatan dan kekakuan struktur dapat ditingkatkan dengan peningkatan massa yang sangat kecil, dan sangat menguntungkan dari perspektif seismik (Altin S. *et al.*, 2008).

Beberapa penelitian sebelumnya tentang aplikasi CFRP pada dinding pengisi menyatakan adanya peningkatan kekakuan bangunan dengan CFRP dibandingkan dengan tanpa CFRP. Tegangan yang dihasilkan dari bangunan dengan CFRP jauh lebih kecil, menunjukkan efektivitas penggunaan CFRP dalam memperkuat dan mencegah retakan pada struktur yang diperkuat (Dushimimana A. *et al.*, 2018). Sedangkan menurut L.V.D. Einde (2003) dan Dizhur, D. (2014) menjelaskan keuntungan aplikasi CFRP dalam rehabilitasi struktural, diperoleh dari sifat ringan dan kemudahan penanganan dan pemasangannya. CFRP memberikan teknik retrofit dan perbaikan yang sederhana dan efektif untuk meningkatkan kekuatan geser dan kapasitas deformasi dinding pasangan bata. Selain itu, teknik ini memiliki dampak minimal pada estetika bangunan yang dipasang/diperbaiki. Sedangkan menurut penelitian Altin S *et al.* (2008), Ozkaynak, H. *et al.* (2011), E. Yuksel (2010) menyimpulkan bahwa strip CFRP yang dipasang secara diagonal pada rangka beton bertulang dengan dinding pengisi efektif meningkatkan kekuatan dan kekakuan lateral secara signifikan. Perkuatan CFRP dengan jenis bresing intan silang (*cross diamond-braced type*) yang dipasang secara simetris pada

kedua sisi, menunjukkan kinerja terbaik diantara tipe bresing yang lain. Penggunaan CFRP secara diagonal efektif membawa rangka kosong dari tingkat kinerja *collapse prevention (CP)* menjadi *life safety (LS)*.

Penelitian eksperimental tentang perilaku dinding polos dan dinding pasangan bata yang mengalami simulasi pembebanan dalam bidang seismik telah dilakukan dalam dekade terakhir. Spesimen dinding pasangan bata berskala penuh atau berukuran kecil yang terbuat dari bahan berbeda telah diuji pada kondisi batas yang berbeda. Prosedur pengujian yang berbeda-statis dan dinamis, siklik dan monotonic telah digunakan untuk mensimulasikan efek beban seismic (Magenes, G. dan Calvi G. M., (1997); Tomazevic, M., *et al.*, (1996); Seaders, P., *et al.*, (2009); Graham, *et al.*, (2010); Lindt, J. W. Van de (2004); Silveira, D., *et al.* (2015)).

Bangunan tahan gempa biasanya direncanakan dengan menggunakan prosedur yang tertulis dalam peraturan perencanaan bangunan (kode bangunan), yang dilakukan dengan analisis linier (elastis), sehingga tidak dapat menunjukkan kinerja bangunan terhadap gempa secara langsung. Oleh karena itu, evaluasi terhadap bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada harus dilakukan dengan benar. Tingkat kerusakan dari sebuah struktur dapat dievaluasi berdasarkan tingkat kinerja strukturnya. Tingkat kinerja adalah tingkat atau derajat kerusakan yang ditentukan berdasarkan kerusakan struktur dan elemen struktur. FEMA 273 dan ATC 40 mengatur mengenai tingkat kinerja suatu struktur. Level kinerja gedung ditentukan

berdasarkan kriteria drift ratio yang disyaratkan oleh ATC-40 (1996) dan FEMA 356 (2000).

Oleh karena itu, dalam penelitian ini mengkaji penggunaan beton busa (*foam concrete*) berbahan semen portland komposit (PCC) yang diaplikasikan dalam bentuk panel pracetak yang disusun menyerupai susunan batu bata (*masonry wall*) serta diberikan perkuatan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) yang dipasang secara diagonal pada kedua sisi dinding dan dilakukan pengujian kekuatan geser dengan pembebanan secara siklik lateral. Berdasarkan evaluasi dan kinerja seismik diharapkan dapat ditentukan kapasitasnya, drift ratio, perbandingan tingkat kinerja bangunan, tingkat kinerja bangunan (*performance level*), sendi plastis (*plastics hinge*) pada struktur bangunan. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan rekomendasi yang tepat atas kebijakan dan langkah-langkah yang tepat sasaran dan bermanfaat untuk mengantisipasi terjadinya kegagalan fungsi struktur pada bangunan yang banyak menimbulkan kerugian seperti yang terjadi sebelumnya.

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, penelitian disertasi ini berjudul **“Perilaku Rangka Beton Bertulang Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi Dengan Perkuatan CFRP Sebagai Dinding Pengisi di Bawah Pembebanan Siklik Horisontal”**.

B. Rumusan Masalah

Sehubungan masih terbatasnya informasi mengenai hasil penelitian tentang aplikasi beton busa pracetak sebagai material dinding saat ini, maka perlu dilakukan penelitian lebih mendalam pengaruh material beton busa tersebut terhadap karakteristik kekuatan akibat beban siklik lateral akibat gempa. Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perilaku rangka beton bertulang yang menggunakan panel beton busa prefabrikasi yang diberikan perkuatan CFRP secara diagonal pada kedua sisi sebagai dinding pengisi di bawah protokol pengujian siklik ASTM E2126-02a (ASTM 2003).
2. Bagaimana pengaruh perkuatan CFRP yang dipasang secara diagonal terhadap dinding beton busa prefabrikasi sebagai bahan pengisi.
3. Bagaimana tingkat dan mekanisme kegagalan berdasarkan FEMA 356 rangka beton bertulang yang menggunakan panel beton busa prefabrikasi yang diberikan perkuatan CFRP secara diagonal pada kedua sisi sebagai dinding pengisi sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral.

C. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis perilaku rangka beton bertulang yang menggunakan panel beton busa prefabrikasi yang diberikan perkuatan CFRP secara diagonal pada kedua sisi sebagai dinding pengisi di bawah protokol pengujian siklik ASTM E2126-02a (ASTM 2003).
2. Menganalisis pengaruh perkuatan CFRP yang dipasang secara diagonal terhadap dinding beton busa prefabrikasi sebagai bahan pengisi.
3. Menemukan tingkat dan mekanisme kegagalan berdasarkan FEMA 356 rangka beton bertulang yang menggunakan panel beton busa prefabrikasi yang diberikan perkuatan CFRP secara diagonal pada kedua sisi sebagai dinding pengisi sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral.

D. Batasan Masalah

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

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium dengan skala 1:1.
2. Beton busa diproduksi dengan menggunakan semen portland komposit (PCC) dari salah satu produsen semen PCC di Indonesia.
3. Ukuran panel beton busa prefabrikasi (panjang; lebar dan tebal) yaitu 70 cm, 20 cm dan 8 cm
4. Perawatan panel beton busa prefabrikasi dan beton adalah dengan curing udara.

5. Mortar untuk spasi antar beton busa prefabrikasi dengan komposisi semen terhadap pasir 1:5.
6. Beton mutu K250 dan K350 dilakukan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dengan benda uji silinder ukuran 10 cm x 20 cm.
7. Pengujian siklik lateral dinding yang menggunakan beton busa prefabrikasi sebagai bahan pengisi yaitu dilakukan pada dinding dengan ukuran tinggi yaitu 2,0 m dan lebar 2,3 m yang disusun menyerupai susunan batu bata (*masonry wall*) dilakukan pada umur 28 hari.
8. Bahan CFRP strip yang dipergunakan menggunakan produk dari salah satu merk yang diimpor.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah:

1. Dengan pemahaman karakteristik mekanik beton busa yang menggunakan 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 ringan 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 dan aman terhadap beban siklik lateral yang terjadi akibat gempa.
4. Sebagai referensi untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai beton busa prefabrikasi dan aplikasi lembar CFRP dalam perkuatan dinding yang dipasang secara diagonal.

F. Sistematika Penulisan

Secara umum tulisan ini terbagi dalam lima bab, yaitu: Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, serta Simpulan dan Saran. Sistematika penulisan disertasi yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga produk yang dihasilkan lebih sistematis sehingga susunan disertasi ini dapat diurutkan yaitu:

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 teori-teori yang digunakan sebagai landasan atau acuan penelitian.

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–siklik lateral dinding yang mencakup perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V PENUTUP

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

BAB II

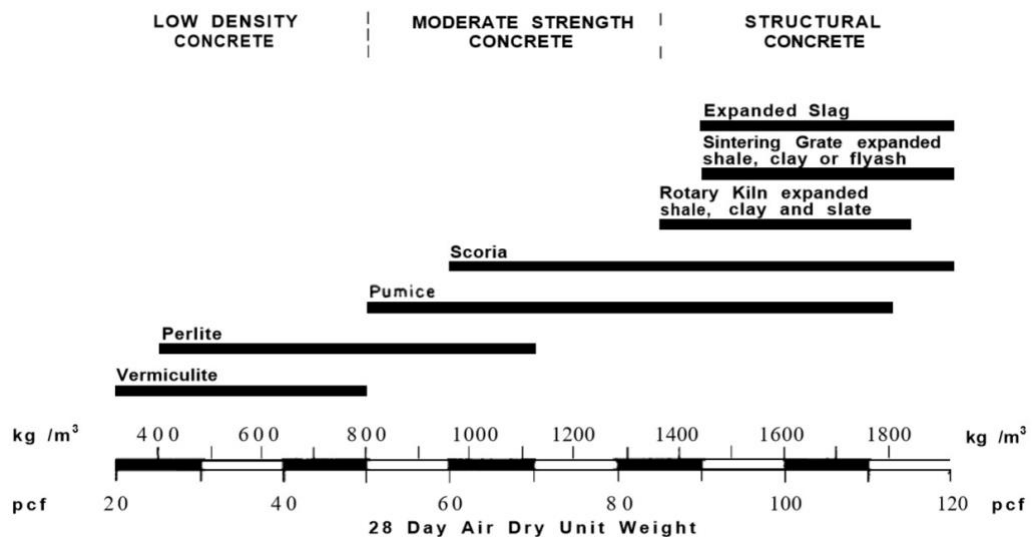
TINJAUAN PUSTAKA

A. Teori Beton Busa

Beton ringan merupakan beton dengan densitas (*density*) lebih ringan daripada beton pada umumnya. Beton ringan menggunakan agregat ringan atau campuran agregat kasar ringan dan pasir alam sebagai pengganti agregat halus ringan dengan ketentuan kurang dari densitas maksimum beton 1850 kg/m^3 . Menurut SNI T-03-3449-2002 tentang tata cara perencanaan pembuatan campuran beton ringan dengan agregat ringan, memberikan batasan kriteria beton ringan adalah beton dengan kepadatan kurang dari 1850 kg/m^3 . Agregat ringan merupakan agregat dengan densitas yang ringan dan porositas yang tinggi, yang biasanya bersumber dari agregat alam maupun hasil fabrikasi.

Berdasarkan SNI T-03-3449-2002 tersebut terdapat dua metode pembuatan beton ringan menggunakan agregat ringan. Metode pertama adalah dengan penggunaan agregat ringan (abu terbang, batu apung, *expanded polystyrene*, dll). Beton yang dihasilkan disebut sebagai beton agregat ringan. Metode kedua dengan membuat pori yang tinggi dalam massa mortar, yaitu dengan meningkatkan kandungan udaranya. Beton yang diproduksi dinamakan beton busa (*foam concrete*). Aplikasi beton busa dalam konstruksi-konstruksi ringan sudah makin banyak digunakan saat ini.

Menurut ACI 213R-87 *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, klasifikasi beton ringan berdasarkan jenis agregat, tingkat kepadatan, dan kekuatan material yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Estimasi densitas dan klasifikasi penggunaan beton agregat ringan menurut ACI 213R-87

Beton busa adalah campuran antara semen, air, agregat dengan bahan tambah tertentu yaitu dengan membuat gelembung-gelembung gas atau udara dalam adukan semen sehingga terjadi banyak pori-pori udara didalam beton. Bahan tambah berbentuk *foaming agent* akan membentuk pori-pori yang terjadi akibat reaksi kimia dari kalsium hidroksida yang terkandung dalam pasir yang bereaksi membentuk gas hidrogen. Gas hidrogen tersebut membentuk gelembung-gelembung didalam campuran beton yang meningkatkan volumenya. Pada akhir proses ini, hidrogen yang terbentuk tadi akan terlepas ke atmosfer dan akan digantikan udara. Dengan terbentuknya rongga di dalam campuran beton tadi, mengakibatkan densitas

beton tersebut akan lebih kecil. Dengan pemanfaatan *foam agent* ini bertujuan untuk memperoleh densitas beton yang lebih ringan. *Foam agent* merupakan suatu larutan pekat berbahan surfaktan yang dilarutkan dengan air sebelum diaplikasikan. Surfaktan cenderung terkonsentrasi pada antarmuka dan mengaktifkan antarmuka tersebut dengan membuat gelembung-gelembung gas/udara dalam adukan semen yang pada akhirnya akan terjadi banyak pori-pori udara di dalam betonnya.

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

Beton ringan dengan densitas antara 300 kg/m^3 - 800 kg/m^3 dan memiliki kuat tekan antara 0,69 MPa hingga 6,89 MPa, yang dapat diaplikasikan sebagai beton penahan panas (insulasi panas) disebut juga *Low Density Concrete*. Pemanfaatannya misalnya 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 densitas antara 800 kg/m^3 - 1440 kg/m^3 dan berkekuatan tekan berkisar 6,89 MPa hingga 17,24 MPa, yang pada umumnya dapat dipergunakan sebagai beton struktur ringan atau sebagai pengisi (*fill concrete*). Beton ini diproduksi menggunakan beberapa jenis 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 densitas berkisar antara 1440 kg/m^3 hingga 1850 kg/m^3 yang dikategorikan sebagai beton struktural jika bersifat mekanik dengan memenuhi syarat mempunyai kuat tekan minimal $17,24 \text{ MPa}$ pada umur 28 hari. Untuk mendapatkan memenuhi persyaratan tersebut, beton ini dapat memakai agregat kasar seperti *expanded shale*, *clays*, *slate*, dan *slag*.

Menurut Prawito, 2010, produksi beton ringan sangat dipengaruhi adanya rongga udara dalam agregat, atau pembuatan rongga udara dalam beton, dimana dapat dilakukan dengan 3 metode berikut:

- 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 densitas 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. Densitas berkisar antara $880 - 1200 \text{ kg/m}^3$ dan mempunyai kekuatan berkisar $7 - 14 \text{ MPa}$.
- c. Beton ringan yang diperoleh dengan memasukan udara dalam adukan atau mortar (beton aerasi), sehingga akan terjadi pori-pori udara berukuran $0,1 - 1,0 \text{ mm}$. Memiliki densitas $200 - 1440 \text{ kg/m}^3$.

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*).

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengurangi densitas beton agar beton yang dihasilkan lebih ringan (Tjokrodinuljo, K. 1996):

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

B. Spesifikasi dan Aplikasi Beton Busa

Definisi beton busa adalah merupakan beton seluler ringan yang diklasifikasikan sebagai beton ringan dengan *densitas* $400\text{--}1850 \text{ kg/m}^3$, yang memiliki rongga udara acak yang dibuat dari campuran *foam agent* dalam mortar. Beton busa memiliki *flowability* yang tinggi, penggunaan massa semen yang rendah, penggunaan agregat yang hemat dan efisien (Ramamurthy, K., 2009) dan merupakan isolasi panas yang sangat baik (Richard, T. G. *et al.* 1975). Pada perkembangan selanjutnya beton busa menjadi solusi ekonomis dalam fabrikasi masal untuk bahan dan konstruksi ringan seperti bahan struktural, partisi, grade pengisian, dan aplikasi infrastruktur. Karena proses produksinya yang mudah dari pabrik hingga ke posisi akhir pekerjaan (Ramamurthy, K., *et al.* 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 A. M., dan Brooks J. J. (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. *et al.* (2017), beton busa memiliki beberapa 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 densitas 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. *et al.* (2017) menjelaskan dalam penelitiannya mengenai beton busa sebagai bahan yang memiliki prospek yang baik bagi industri bangunan modern karena teknologi sederhana dan berbagai keunggulan propertinya dapat dicapai. Masalah dasar beton busa adalah susut dan penurunan kekuatan, jika dibandingkan dengan beton autoklaf aerasi. Padahal dalam kondisi iklim basah dan dingin daya tahan memainkan peran penting. Penelitiannya 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 densitas beton menjadi kecil sehingga memberikan faktor keamanan dalam penggunaannya, terutama ketikan terjadi gempa yang menyebabkan keruntuhan bangunan.

C. Pengaruh Gempa Terhadap *Non-Engineered Building*

Bencana gempa dapat menyebabkan banyak bangunan rusak dan sekaligus menyebabkan keruntuhan. Setelah terjadi gempa, banyak bangunan yang rusak tersebut dirubuhkan atas saran dari pakar, konsultan maupun pihak pemangku kepentingan, sementara sebenarnya bangunan tersebut masih bisa diperbaiki dan dilakukan perkuatan sehingga bangunan tersebut dapat digunakan kembali. Rekomendasi untuk merubuhkan bangunan yang rusak setelah gempa merupakan keputusan yang mudah, tetapi tidak didukung oleh data yang memadai. Sampai saat ini Indonesia belum punya standar dalam melakukan asesmen kerusakan serta metoda perbaikan dan perkuatan bangunan yang rusak pasca gempa. Keuntungan utama melakukan perbaikan dan perkuatan bangunan yang rusak pasca gempa dengan metode yang benar dapat menghemat waktu dan biaya (Latief H. *et al.*, 2000).

Secara umum, bangunan teknik sipil dapat dikelompokkan kedalam bangunan *nonengineered building* dan *engineered building*. *Non engineered building* merupakan bangunan sederhana seperti rumah masyarakat pada umumnya yang tanpa melakukan perhitungan struktur, sedangkan *engineered building* merupakan bangunan yang direncanakan dengan baik dengan melakukan perhitungan struktur oleh konsultan atau ahli struktur (Boen, T., 2009). Gempa yang terjadi di Sumatera Barat pada tahun 2009 dan Gempa di Palu tahun 2018 lalu, banyak mengakibatkan bangunan rusak, baik *non engineered building* maupun *engineered building*.

Wilayah Sumatera Barat terutama kota Padang, adalah daerah dengan potensi sangat besar terhadap terjadinya gempa. Gempa yang terjadi pada September 2009 lalu berkekuatan 7,5 Skala Richter yang bersumber dari lepas pantai daerah Sumatera Barat menjadi bencana yang menimbulkan banyak korban, baik jiwa maupun harta.

Berikutnya gempa yang terjadi di Palu pada 28 September 2018 yang berkekuatan magnitudo Mw 7,4, berpusat di 26 km utara Donggala, propinsi Sulawesi Tengah. Gempa ini membuat guncangan yang kuat dan mengakibatkan terjadinya tsunami di kota Palu, yang berada di teluk Palu, selain itu terjadi juga likuifaksi besar-besaran terutama di daerah Petobo dan daerah Balaroa di kota Palu. Gambar 2 berikut menunjukkan kerusakan bangunan akibat gempa yang melanda kota Padang dan Palu.



Gambar 2. Gempa yang terjadi di (a) Padang dan (b) Palu

Gempa bumi pada umumnya menimbulkan bahaya dan bencana pasca kejadian akibat rusak atau runtuhnya gedung-gedung dan bangunan-bangunan buatan manusia lainnya. Di era modern ini manusia masih belum dapat berbuat banyak untuk mencegah terjadinya gempa bumi. Upaya yang dapat dilakukan adalah dengan meminimalkan akibat buruk susulan yang

ditimbulkan oleh gempa dengan merencanakan dan membangun bangunan tahan gempa atau memperkuat bangunan yang dibuat. Bangunan tahan gempa ada 2 tipe yaitu, (1) bangunan tahan gempa konvensional yang mengandalkan kekuatan bahan bangunannya sendiri yaitu sifat elastik (kaku) dan sifat liat (*daktail*), 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/mengurangi energi gempa/percepatan tanah dasar ke bangunan sehingga sifat merusak dari gempa dapat diminimalkan.

Berdasarkan hasil studi lapangan pada kejadian dan kerusakan bangunan akibat gempa menunjukkan bangunan yang dominan mengalami kerusakan sebesar 85% dari total kerusakan merupakan bangunan penduduk (*non engineered structures*). Propinsi 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 *update* catatan gempa terbaru. Mempelajari dan menganalisis kenyataan tersebut, maka dibutuhkan segala usaha yang bertujuan untuk melakukan penelitian, penyuluhan,

pelatihan serta regulasi yang tepat yang bertujuan untuk melakukan upaya pengurangan dampak akibat bencana gempa.

Usaha-usaha tersebut misalnya berupa 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.

D. Fiber Reinforced Polymer (FRP) Komposit Untuk Struktur Beton Bertulang dan Beton Prategang

Balaguru P., Nanni A., dan Giancaspro J., (2009) di dalam Taylor & Francis Group: New York, USA 328 Halaman (7-12) mengemukakan bahwa dua komponen utama FRP komposit adalah serat berkekuatan tinggi dan matriks yang mengikat serat-serat ini untuk membentuk komponen struktural komposit. Serat memberikan kekuatan dan kekakuan, dan matriks (*resin*) memberikan transfer tegangan dan regangan antara serat. Untuk mendapatkan aksi komposit penuh, permukaan serat harus sepenuhnya dilapisi (dibasahi) dengan matriks. Dua atau lebih jenis serat dapat digabungkan untuk mendapatkan sifat komposit tertentu yang tidak mungkin diperoleh dengan menggunakan jenis serat tunggal. Misalnya kinerja modulus, kekuatan, dan kelelahan dari *Glass Reinforced Polymer*

(GRP) dapat ditingkatkan dengan menambahkan serat karbon. Demikian pula, energi impak *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) dapat ditingkatkan dengan penambahan serat kaca atau *aramid*. Performa optimal yang ditawarkan material komposit hibrida telah menyebabkan pertumbuhan luas dalam pemanfaatannya di seluruh dunia (Hancox, 1981; Shan, Y. dan Liao, K. 2002). Dalam beberapa tahun terakhir, komposit hibrida telah menemukan kegunaan dalam sejumlah aplikasi seperti pelapis tahan abrasif, lensa kontrak, sensor, film optik aktif, membran, dan penyerap (Cornelius, C. dan Marand, E. 2002).

Peran utama serat adalah untuk menahan sebagian besar beban yang bekerja pada sistem komposit. Tergantung pada jenis matriks dan konfigurasi serat, fraksi volume serat berkisar antara 30 hingga 75%. Sifat kekuatan dan kekakuan serat yang tersedia secara komersial mencakup spektrum yang besar dan akibatnya, sifat serat yang tersedia secara komersial mencakup spektrum yang besar dan akibatnya, sifat komposit yang dihasilkan memiliki variasi yang cukup besar (Mallick, 1993). Penguat serat yang umum digunakan dalam industri komposit adalah kaca (E-glass dan S-glass), karbon, dan aramid (*kevlar*). Sifat dan karakteristik serat ini serta jenis serat lainnya seperti basal disajikan pada bagian berikutnya.

Serat karbon menawarkan modulus tertinggi dari semua serat penguat. Di antara kelebihan serat karbon adalah rasio kekuatan tarik terhadap berat yang sangat tinggi. Selain itu, serat karbon memiliki kekuatan lelah yang tinggi dan koefisien ekspansi termal linier yang sangat

rendah dan, dalam beberapa kasus, bahkan ekspansi termal negatif. Fitur ini memberikan stabilitas dimensi, yang memungkinkan komposit mencapai ekspansi mendekati nol hingga suhu setinggi 570 °F (300°C) dalam struktur kritis seperti antena pesawat ruang angkasa. Jika dilindungi dari oksidasi, serat karbon dapat menahan suhu setinggi 3600 °F (2000°C) di atas suhu ini, mereka akan terurai secara termal. Serat karbon secara kimiawi lembam dan tidak rentan terhadap korosi atau oksidasi pada suhu di bawah 750°F (400°C).

Serat karbon memiliki konduktivitas listrik yang tinggi, yang cukup menguntungkan bagi perancang pesawat yang harus memperhatikan kemampuan pesawat untuk mentolerir serangan petir. Namun, karakteristik ini menimbulkan tantangan berat bagi pembuatan tekstil karbon karena serpihan serat karbon yang dihasilkan selama menenun dapat menyebabkan "korsleting" atau sengatan listrik pada mesin listrik yang tidak terlindungi. Kerugian lainnya adalah serat karbon memiliki resistensi dampak yang rendah (*low impact resistance*) dan berbiaya tinggi (Amateau, 2003; Mallick, 1993).

Jumlah komersial serat karbon berasal dari tiga bahan baku utama atau sumber prekursor: rayon, *poliakrilonitril*, dan minyak bumi. Prekursor rayon, yang berasal dari bahan selulosa, adalah salah satu sumber paling awal yang digunakan untuk membuat serat karbon. Keuntungan utama dari rayon adalah ketersediaannya yang tersebar luas. Kelemahan yang paling penting adalah kehilangan berat yang relatif tinggi, atau hasil konversi yang

rendah menjadi serat karbon, selama karbonisasi. Karbonisasi adalah proses dimana bahan baku utama secara kimiawi diubah menjadi serat karbon oleh aksi panas. Rata-rata, hanya 25% dari massa serat awal yang tersisa setelah karbonisasi. Oleh karena itu, serat karbon yang dibuat dari bahan baku prekursor rayon lebih mahal daripada serat karbon yang dibuat dari bahan lain (Hansen, 1987; Pebly, 1987).

Prekursor poliakrilonitril (PAN) merupakan bahan dasar untuk sebagian besar serat karbon yang dihasilkan. Bahan ini memberikan hasil konversi serat karbon mulai dari 50% hingga 55%. Serat karbon berdasarkan bahan baku PAN umumnya memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada prekursor lainnya. Ini hasil dari kurangnya cacat permukaan, yang bertindak sebagai konsentrator tegangan dan, akibatnya, mengurangi kekuatan tarik (Hansen, 1987).

Pitch, produk sampingan dari penyulingan minyak bumi atau kokas batu bara, adalah prekursor biaya yang lebih rendah daripada PAN. Selain biayanya yang relatif rendah, pitch juga dikenal karena hasil karbonnya yang tinggi selama karbonisasi. Kerugian mereka yang paling signifikan adalah ketidakseragaman dari batch ke batch selama produksi (Hansen, 1987; Mallick, 1993)

Serat karbon tersedia secara komersial dengan berbagai modulus tarik mulai dari 30.000 ksi (207 GPa) pada nilai minimum, hingga 150.000 ksi (1035 GPa) pada nilai maksimumnya. Dengan serat yang lebih kaku, dibutuhkan lebih sedikit lapisan keseluruhan untuk mencapai

keseimbangan kekuatan dan kekakuan yang optimal. Serat karbon mempunyai modulus tinggi, dan karbon berkekuatan tinggi memiliki bobot yang sama, tetapi karena modulus tinggi secara inheren lebih kaku, material yang dibutuhkan lebih sedikit, menghasilkan struktur komposit dengan bobot yang lebih ringan untuk aplikasi daripada yang memerlukan komponen yang lebih kaku (Competitive Cyclist, 2003)

Meskipun penggunaan karbon modulus tinggi tidak terlalu umum, serat ini (>64.000 ksi atau 440 GPa) telah digunakan di sejumlah struktur seperti sistem kereta bawah tanah London Underground, salah satu jaringan kereta api bawah tanah tertua dan tersibuk di dunia. Serat karbon modulus tinggi berhasil digunakan untuk memperkuat balok baja, *struts* besi cor, dan girder. (Moy, S. 2002) Tabel 1 membandingkan beberapa sifat mekanik tipikal dan biaya serat karbon yang tersedia secara komersial yang dikategorikan berdasarkan modulus tarik.

Tabel 1. Sifat khas serat karbon yang tersedia secara komersial

Kelas	Modulus Tarik		Kuat (GPa)	Tarik (ksi)	Negara Produsen	Pabrikan	Biaya per pon
	(GPa)	(ksi)					
Standart modulus (<265 GPa) (also known as “high strength”)							
AP38-500	228	33,00	3,4	500	Japan	Graphil	\$16
AP38-600	228	33,00	4,1	600	Japan	Graphil	\$24
AS2	228	33,00	2,8	400	USA	Hercules	
Panex 33	228	33,07	3,6	522	USA/Hungary		
F3C	228	33,07	3,8	551	USA		
T300	230	33,36	3,5	512	USA/France/Japan	Union Carbide /Toray /Amoco	\$26
XAS	234	33,94	3,5	500	USA	Graphil/Hysol	
Celion	234	33,94	3,6	515	USA	Calanese/ToHo	
Celion ST	234	33,94	4,3	629	USA	Calanese/ToHo	
34-700	234	33,94	4,5	653	Japan/USA		
TR30S	234	33,94	4,4	640	Japan		

Lanjutan Tabel 1

Kelas	Modulus Tarik		Kuat	Tarik	Negara Produsen	Pabrik	Biaya per pon
	(GPa)	(ksi)					
T500	234	33,94	3,7	529	France/Japan	Union Carbide/Toray	
G30-500	234	34,00	3,8	550	USA	Celion	\$24
G30-600	234	34,00	4,3	630	USA	Celion	\$34
T700	235	34,08	5,3	769	Japan	Toray	
TR50S	235	34,08	4,8	701	Japan		
HTA	238	34,52	4,0	573	Germany		
UTS	240	34,81	4,8	696	Japan		
AS4	241	34,95	4,0	580	USA	Hercules	\$21
T650-35	241	34,95	4,6	660	USA	Amoco	\$28
AS5	244	35,39	3,5	508	USA	Hercules	
AP38-749	262	38,00	5,2	750	Japan	Graphil	
AS6	245	35,53	4,5	653	USA	Hercules	
Intermediate modulus (265-320 GPa)							
MR40	289	41,92	4,4	638	Japan		
MR50	289	41,92	5,1	740	Japan		
T1000	290	42,00	6,9	1002	USA	Amoco	\$326
42-71	290	42,00	5,0	725	USA	Celion	\$59
T650-42	290	42,06	4,8	699	USA	Amoco	\$53
T40	290	42,06	5,7	819	USA	Amoco/Toray	\$55
T800	294	42,64	5,9	862	France/Japan		
M30S	294	42,64	5,5	796	France		
IMS	295	42,79	4,1	598	Japan		
G40-600	296	43,00	4,3	620	USA	Celion	\$45
AP43-600	296	43,00	4,5	750	Japan	Graphil	
G40-700	296	43,00	5,0	720	USA	Celion	\$47
IM6	303	43,95	5,1	740	USA	Hercules	\$48
IM7	303	43,95	5,3	769	USA	Hercules	\$53
IM8	309	44,82	4,3	624	USA		
XIM8	310	45,00	5,2	750	USA	Hercules	
High modulus (320-440 GPa)							
XMS4	331	48,00	2,8	400	USA	Hercules	
HMS4	338	49,02	3,1	450	USA	Hercules	
MS40	340	49,31	4,8	696	Japan		
HMS	341	49,46	1,5	220	USA	Graphil/Hy sol	
AP50-400	345	50,00	2,8	400	Japan	Graphil	\$55
HMG50	345	50,04	2,1	300	USA	Hitco/OCF	
HMA	358	51,92	3,0	435	Japan		
HMU	359	52,00	2,8	400	USA	Hercules	
G50-300	359	52,07	2,5	360	USA	Celion	\$58
AP53-650	365	53,00	4,5	650	Japan	Graphil	\$100

E. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan

Dinding pengisi membentang pada seluruh jarak vertikal antar lantai. Jika dinding ditempatkan secara hati-hati dan simetris dalam perencanaannya, dinding geser sangat efisien dalam menahan beban vertikal maupun lateral dan tidak mengganggu persyaratan arsitektur. Dinding geser dapat digunakan untuk menahan gaya lateral saja maupun sebagai dinding pendukung. Metode pembeban secara lateral (*lateral loading*) ada beberapa macam diantaranya statik (*monotonik*), siklik dan *siklik quasistatik*.

Beban siklik adalah beban yang diterima secara berulang 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 penelitian 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 *spalling* pada 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 tinggi terhadap panjang dengan rasio 0,5 yang memiliki rotasi penuh dalam menahan beban dan 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 spesimen

L = Panjang spesimen

- 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)

Δ = Perpindahan tepi atas spesimen berdasarkan hasil pengujian (m)

H = Tinggi spesimen (m)

L = Panjang spesimen (m)

c) Rasio daktilitas, cyclic (D), n — rasio perpindahan ultimate (Δ_u) dan perpindahan leleh (Δ_{yield}) dari spesimen yang 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 daktilitas berdasarkan kurva *equivalent energy elastic-plastic (EEEP)*. 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 (Δ_u)

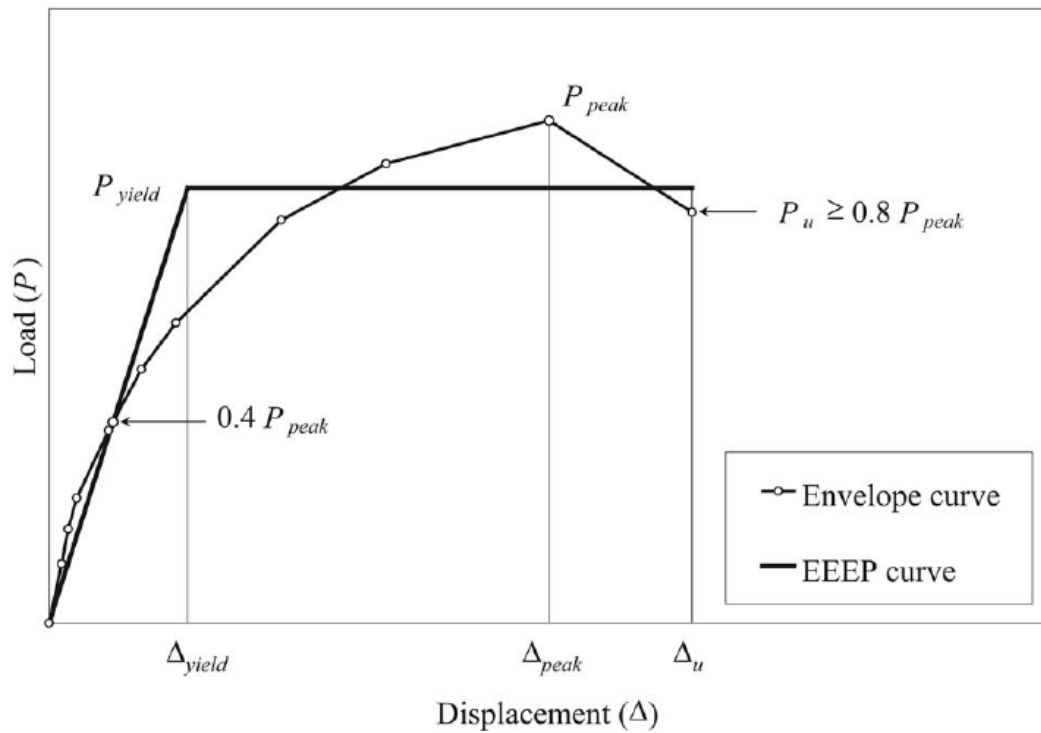
P_{peak} = Beban absolut maksimum oleh spesimen pada envelope yang diberikan

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

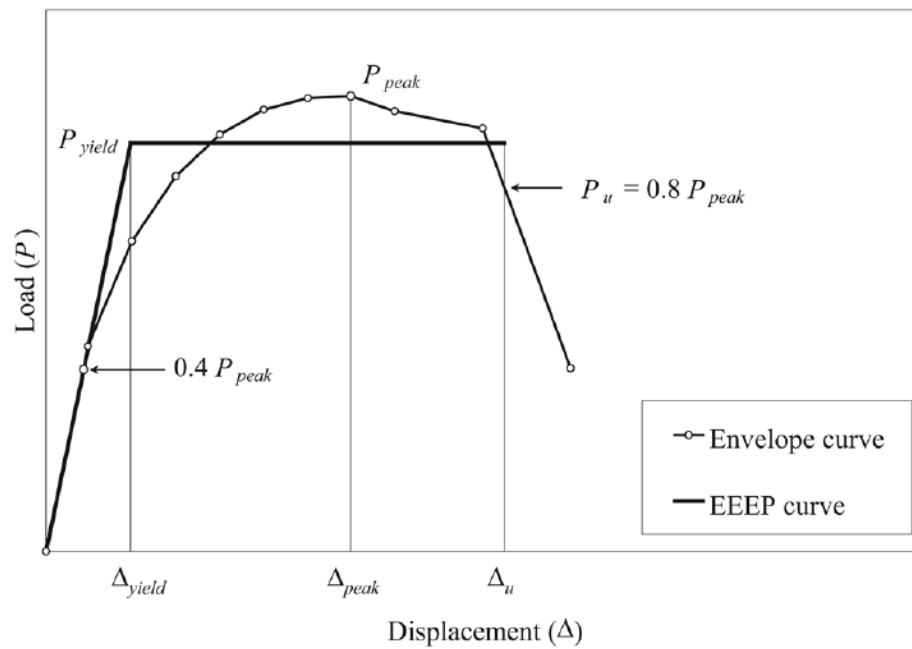
K_e = $0,4 P_{peak}/\Delta_e$

Kekakuan geser elastis, kekuatan geser dan daktilitas spesimen ditentukan dengan melakukan pengujian spesimen ke pembalikan penuh (bolak balik) beban geser secara siklik. Hal ini dilakukan oleh jangkar tepi bawah spesimen pada saat pengujian 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 3 memperlihatkan parameter kinerja spesimen: (A) titik terakhir di $P_u \geq 0,8 P_{peak}$. Gambar 4 memperlihatkan parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada $P_u = 0,8 P_{peak}$.

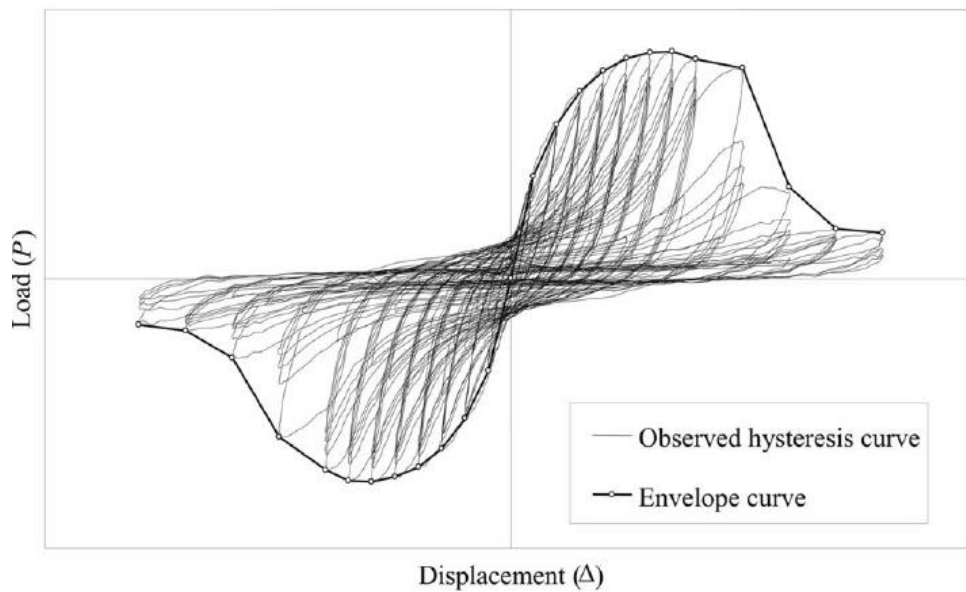


Gambar 3. Parameter kinerja spesimen: (A) titik terakhir di $P_u \geq 0,8 P_{peak}$

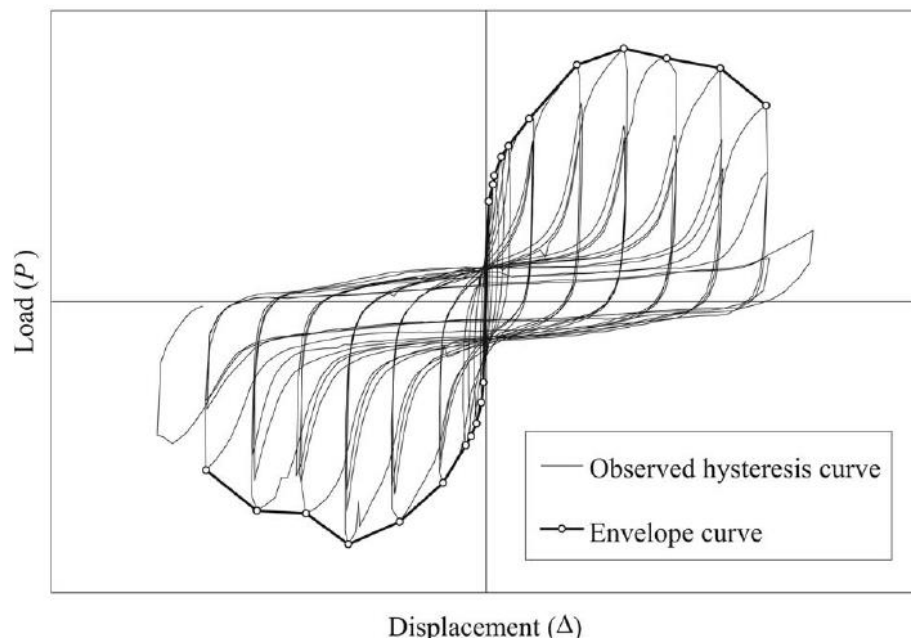


Gambar 4. Parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada $P_u = 0,8 P_{peak}$ (d lanjutkan)

Gambar 5 dan 6 masing-masing memperlihatkan contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian A dan metode pengujian B.

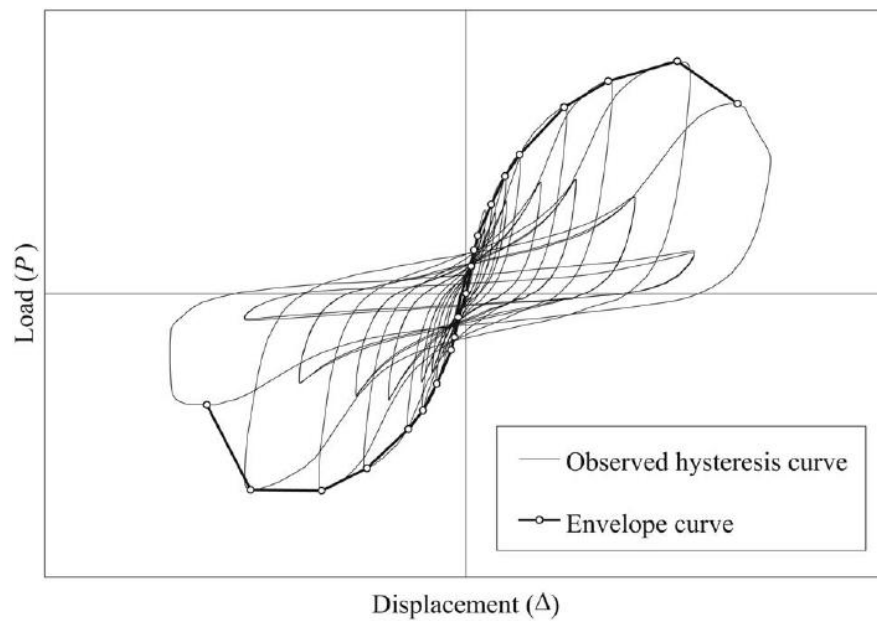


Gambar 5. Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian A

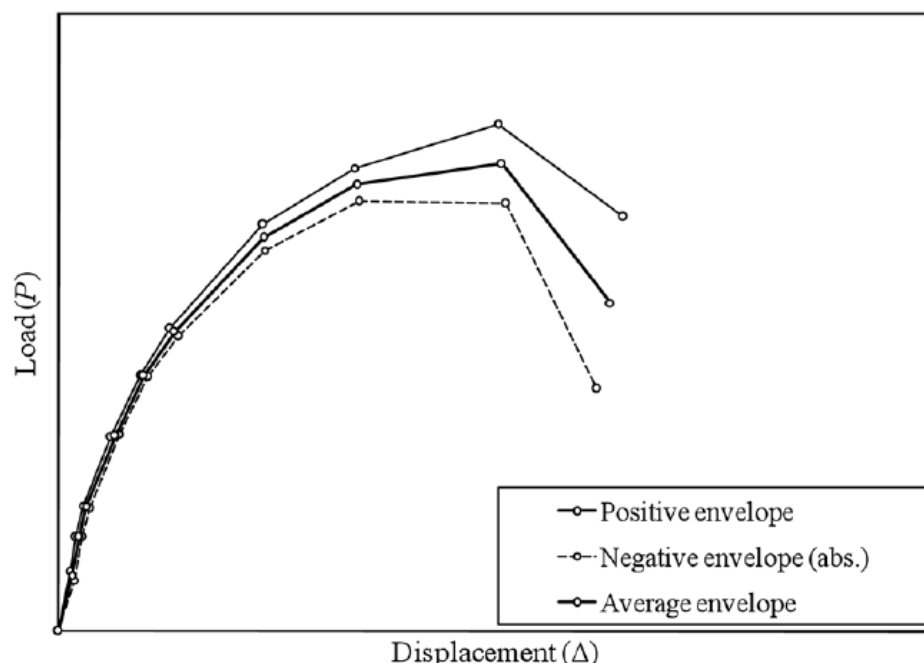


Gambar 6. Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian B (dilanjutkan)

Gambar 7 dan Gambar 8 masing-masing memperlihatkan contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian C dan contoh rata-rata kurva envelope.



Gambar 7. Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian C (dilanjutkan)



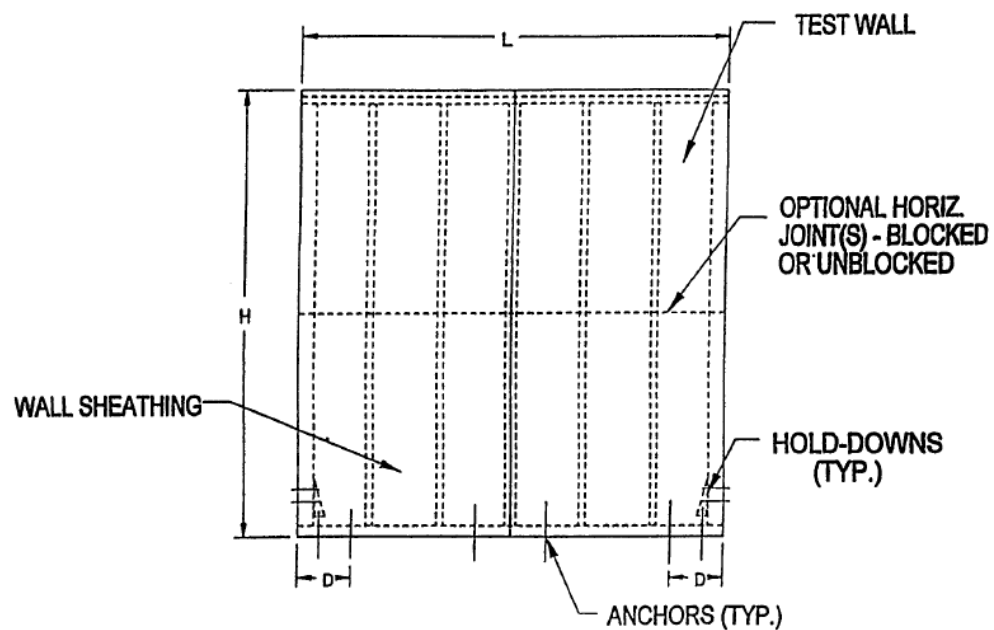
Gambar 8. Contoh rata-rata kurva envelope

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, H. 2009).

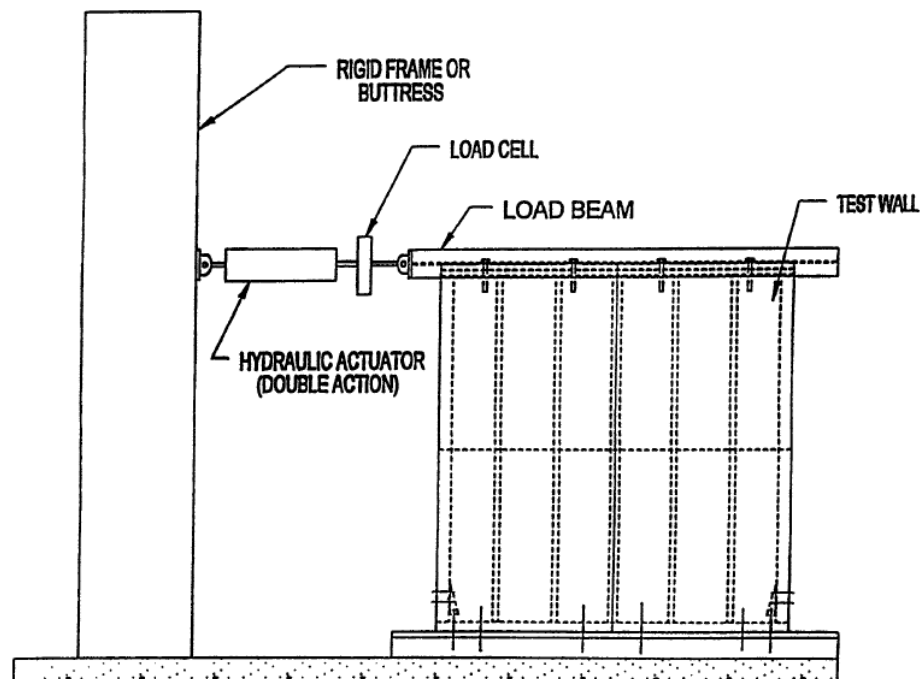
Pemberian *displacement controlled* harus berdasarkan pada jarak tempuh maksimum yang dapat dicapai oleh aktuator. Pada penelitian ini, *ATC-24 Protocol* digunakan sebagai acuan untuk menentukan riwayat pembebanan. *ATC-24* menggunakan perpindahan leleh sebagai acuan pemberian riwayat perpindahan pada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

Gambar 9 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 10 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 9. Contoh spesimen dinding geser



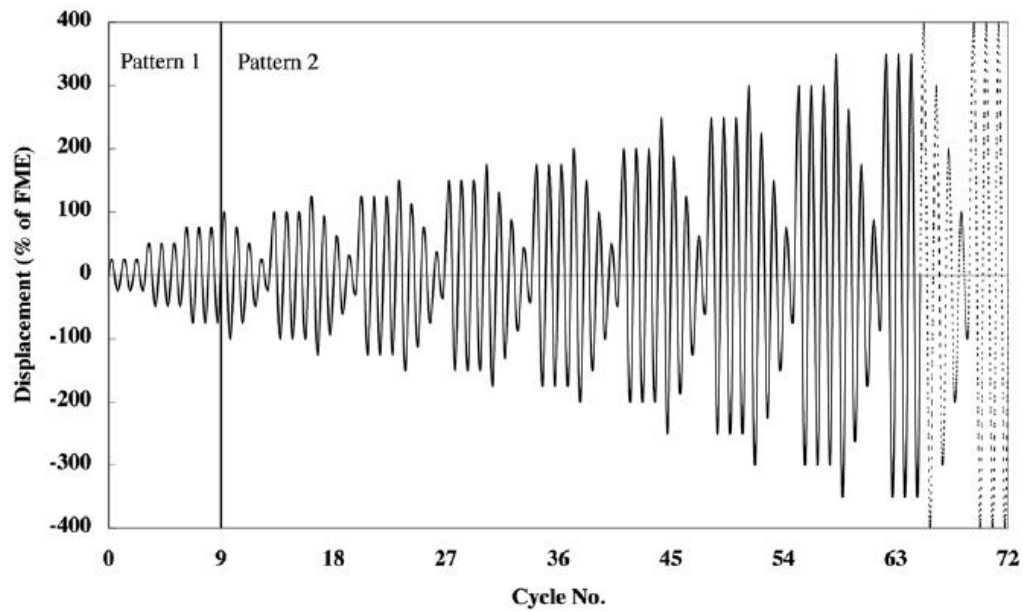
Gambar 10. Contoh set up pengujian siklik spesimen dinding geser

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 disipasi 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.

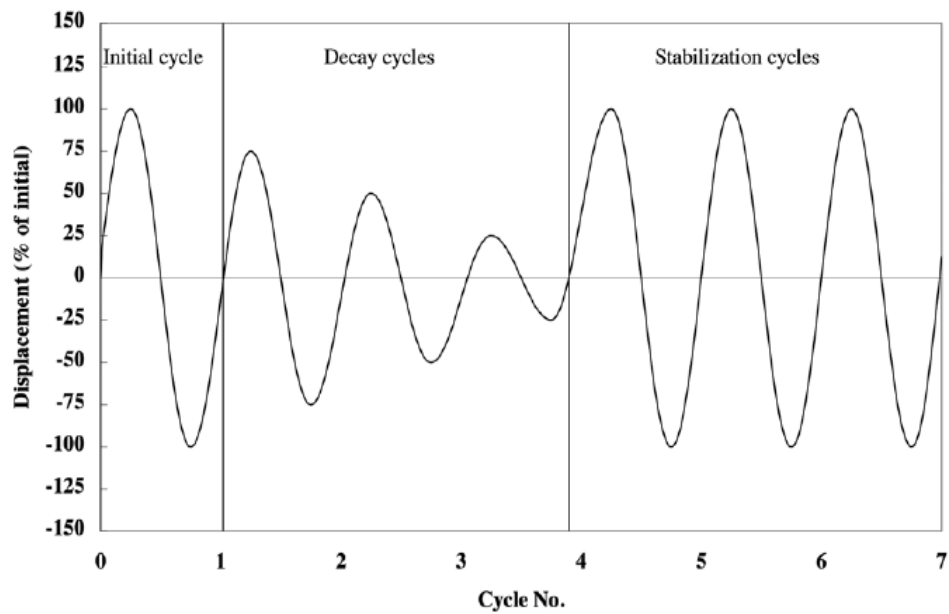
Benavent-Climent (2007) mengusulkan suatu model untuk mendekomposisikan kurva histeresis yang didapatkan menjadi dua bagian besar, yaitu bagian skeleton dan bagian Bauschinger pada *domain* positif dan *domain* negatif. Model ini disebut *energy-based damage model*. Setelah kurva histeresis telah didekomposisi, 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 11 dan 12 masing-masing memperlihatkan skedul perpindahan siklik dan pola fase tunggal 2 untuk metode uji A. Sedangkan

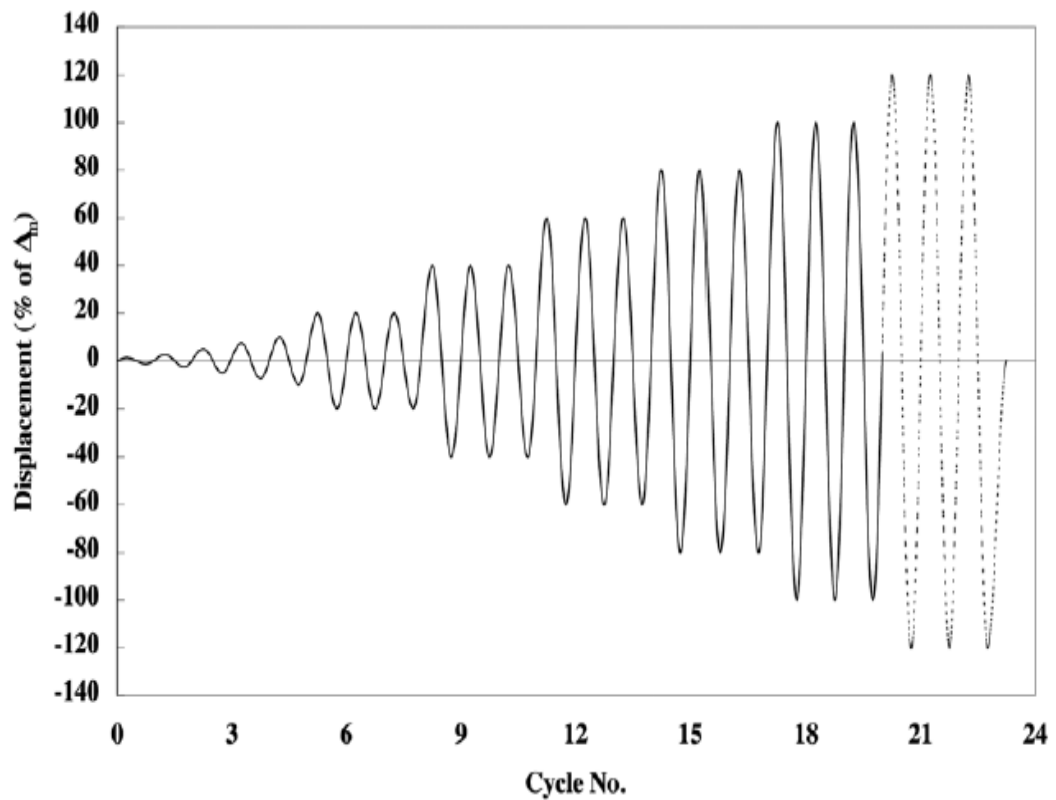
Gambar 13 dan 14 masing-masing memperlihatkan skedule perpindahan siklik untuk metode uji B dan C.



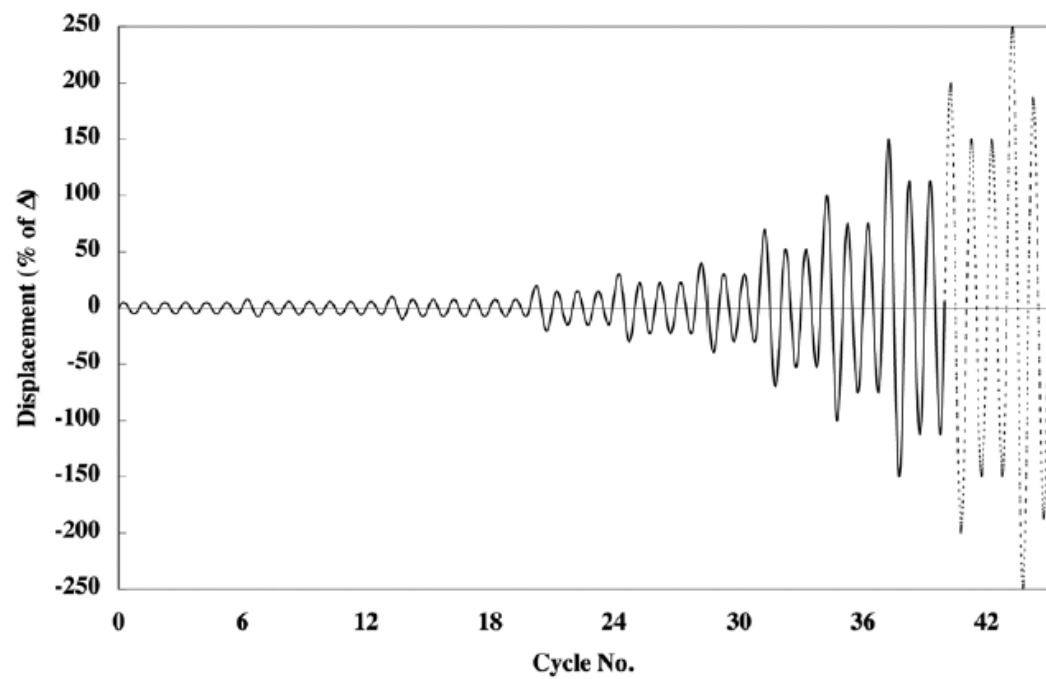
Gambar 11. Skedul perpindahan siklik untuk metode uji A



Gambar 12. Pola fase tunggal 2 (metode uji A)



Gambar 13. Skedul perpindahan siklik untuk metode uji B

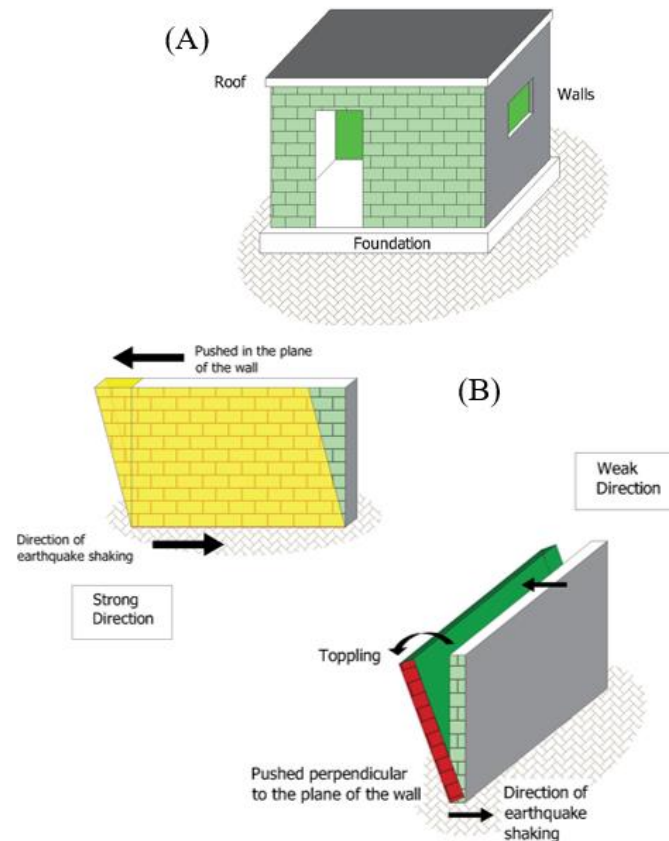


Gambar 14. Skedul perpindahan siklik untuk metode uji C

F. Kegagalan Struktur Dinding Pengisi Akibat Beban Gempa

Getaran tanah yang terjadi pada saat gempa menyebabkan gaya inersia pada pusat massa struktur yang terdistribusi melalui atap, dinding dan fondasi bangunan. Dari ketiga komponen tersebut, dinding merupakan elemen yang paling mudah mengalami kerusakan yang disebabkan oleh beban lateral/horizontal pada saat terjadi gempa. Distribusi pembebanan yang terjadi pada saat gempa berlangsung ke segala arah sumbu kuat dinding maupun sumbu lemah dinding. Pembebanan yang terjadi pada arah sumbu kuat dinding memberikan tahanan lateral yang lebih baik dibandingkan pembebanan yang terjadi pada sumbu lemah dinding (Murty, 2005).

Beban gempa yang terjadi pada arah sumbu kuat dinding dapat menyebabkan dinding mengalami perubahan geometri menjadi bentuk jajaran genjang (*parallelogram*). Perubahan geometri yang terjadi, selain dapat menimbulkan rusaknya elemen lain yang ada di dalam bidang dinding seperti jendela atau kaca, juga dapat menyebabkan kerusakan atau keruntuhan dinding bila defleksi akibat beban yang bekerja melebihi kapasitas dari dinding tersebut. Sedangkan pembebanan yang terjadi searah sumbu lemah dinding dapat menyebabkan dinding menjadi runtuh atau terguling seperti pada Gambar 15 A (Murty, 2005).



Gambar 15. (A) Komponen dasar bangunan dan (B) Perilaku beban gempa pada dinding

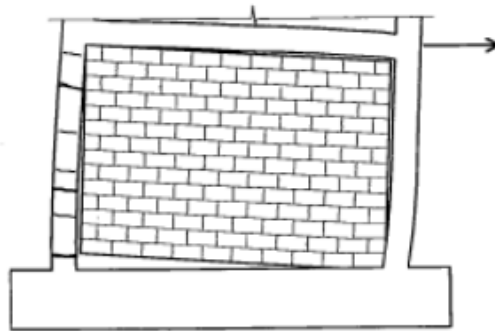
Gaya lateral *in-plane* adalah gaya yang bekerja sejajar dinding terhadap sumbu kuat dinding, sehingga gaya ini memiliki kekuatan lebih dibandingkan dengan gaya lateral *out-plane*, karena gaya lateral *out-plane* adalah gaya yang bekerja sejajar dinding terhadap sumbu lemah dinding (Prayuda, 2015).

Kegagalan pada dinding bata terjadi karena dinding tersebut menerima gaya yang melebihi kapasitas pengisi dinding bata. Ada dua jenis kegagalan pada dinding bata yang berkaitan dengan arah gaya yang bekerja, yaitu:

1. *Out-plane failure*, diakibatkan oleh gaya yang bekerja tegak lurus bidang dinding. Dinding bata akan mengalami keruntuhan menyeluruh karena memiliki kemampuan sangat kecil untuk menahan gaya out-plane.
2. *In-plane failure*, diakibatkan oleh gaya yang bekerja sejajar pada bidang dinding. Keruntuhan ini terjadi karena pada tingkat kekuatan gaya lateral yang relatif rendah, struktur portal dan dinding pengisi akan bekerja bersama sebagai struktur komposit. Ketika deformasi lateral meningkat, struktur akan mengalami perilaku yang kompleks dimana struktur portal akan mengalami deformasi dalam flexural mode sedangkan dinding pengisi mengalami deformasi shear mode. Akibat perilaku ini, maka akan terjadi pemisahan antara portal dan dinding pengisi pada ujung-ujung tarik dan perubahan pada *diagonal compression strut*.

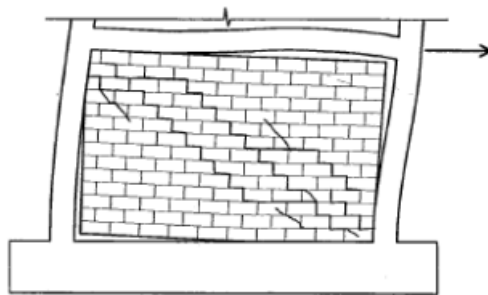
Terdapat beberapa tipe kegagalan pada dinding bata menurut J. C. Francisco (1997) yang bisa digunakan sebagai pendekatan tipe kegagalan yang terjadi pada portal dinding akibat gaya lateral (*in-plane load*) seperti:

1. *Tension Failure Mode*, yaitu kegagalan tarik dari kolom yang tidak kuat menahan tarik akibat momen.



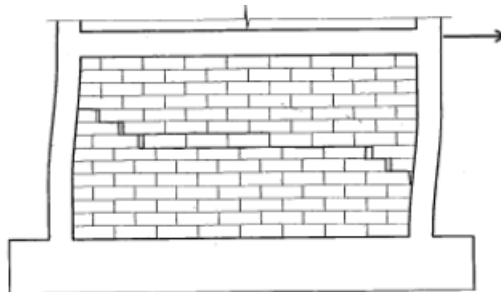
Gambar 16. Tension Failure Mode

2. *Stepped Cracks Shear Failure*, yaitu kegagalan geser pada dinding sepanjang pertemuan mortar di sisi bata dan sedikit timbul retak pada bagian bata.



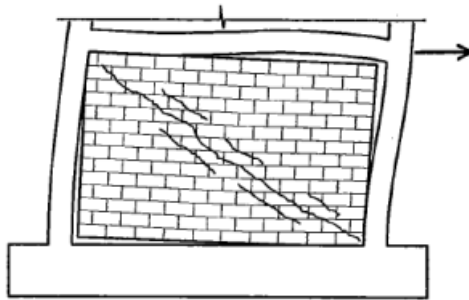
Gambar 17. Stepped Cracks Shear Failure

3. *Horizontal Sliding Shear Failure*, yaitu kegagalan geser pada dinding sepanjang arah horizontal dekat atau tepat pada setengah ketinggian panel dinding pengisi.



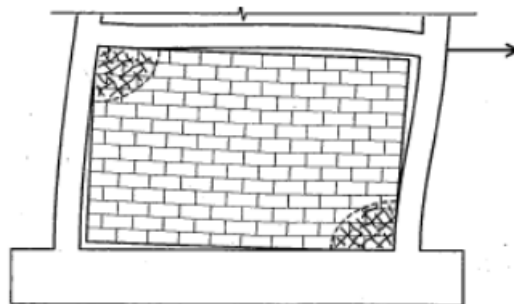
Gambar 18. Horizontal Sliding Shear Failure

4. *Diagonal Tensile Cracking*, yaitu retak sepanjang diagonal dinding bata karena tarik.



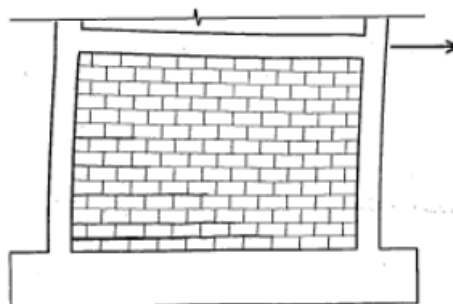
Gambar 19. Diagonal Tensile Cracking

5. *Compression Failure of the Diagonal Strut*, yaitu kegagalan dinding akibat sepanjang sisi diagonal dinding mengalami penekanan. Ilustrasi retak yang terjadi hampir sama seperti Gambar 20.
6. *Crushing of the Loaded Corners*, yaitu kegagalan akibat bagian siku dinding mengalami penekanan.



Gambar 20. Crushing of the Loaded Corners

7. *Flexural or Shear Failure of the Columns*, yaitu kegagalan dinding akibat kolom lemah dan retak lentur terjadi sehingga dapat mengangkat bagian dinding yang mengalami tarik.



Gambar 21. Flexural or Shear Failure of Columns

G. Mekanisme Kegagalan Elemen Struktur Berdasarkan FEMA 356

Berdasarkan standard FEMA (*Federal Emergency Management Agency*) 356, kinerja bangunan (*performance building*) merupakan kombinasi dari kinerja komponen struktural dan nonstrukturalnya. Kinerja bangunan dinyatakan dalam bentuk target Tingkat Kinerja Bangunan (*building performance levels*) yang merupakan pemisahan status kerusakan yang ditentukan berdasarkan spektrum tak terbatas dari kemungkinan status kerusakan yang dapat dialami bangunan selama gempa bumi. Status kerusakan tertentu yang diidentifikasi sebagai target tingkat kinerja bangunan dalam FEMA 356 ini berkaitan dengan konsekuensi yang dapat diidentifikasi akan terjadi terkait dengan disposisi kelayakan bangunan pascagempa bagi penghuni bangunan. Hal ini termasuk kemampuan gedung untuk melanjutkan fungsi normalnya, kelayakan hunian pasca gempa, dan risiko keselamatan jiwa.

Terkait dengan tingkat kinerja struktural suatu bangunan terdiri dari empat Tingkat kinerja Struktural yaitu: *Immediate Occupancy* (S-1), *Life Safety* (S-3), *Collapse Prevention* (S-5), dan *Not Considered* (S-6), ditambah dengan dua Tingkat Kinerja Struktural antara yaitu: *Damage Control Range* (S-2) dan *Limited Safety Range* (S-4).

- a) Tingkat kinerja S-1, *Immediate Occupancy* (IO) berarti keadaan kerusakan pasca gempa bumi di mana hanya kerusakan struktural yang sangat terbatas yang telah terjadi. Sistem kerangka dasar pemikul gaya vertikal dan lateral bangunan mempertahankan hampir semua

kekuatan dan kekakuan sebelum gempa. Risiko cedera yang mengancam jiwa sebagai akibat dari kerusakan struktural sangat rendah, dan meskipun mungkin butuh beberapa perbaikan struktural kecil, secara umum tidak diperlukan sebelum dihuni kembali.

- b) Tingkat kinerja S-3, *Life Safety* (LS) berarti kerusakan pasca-gempa bumi di mana kerusakan signifikan pada struktur telah terjadi, tetapi beberapa penyangga terhadap keruntuhan struktural parsial atau total masih ada. Beberapa elemen dan komponen struktural rusak parah, tetapi tidak mengakibatkan bahaya puing-puing besar yang jatuh, baik di dalam maupun di luar gedung. Cedera dapat terjadi selama gempa bumi; namun, risiko keseluruhan cedera yang mengancam jiwa sebagai akibat dari kerusakan struktural diperkirakan akan rendah. Dapat dilakukan perbaikan struktur, namun tidak praktis secara ekonomi.
- c) Tingkat kinerja S-5, *Collapse Prevention* (CP) didefinisikan sebagai keadaan kerusakan pasca gempa bumi yang mencakup kerusakan komponen struktural sehingga walaupun struktur mampu terus mendukung beban gravitasi namun tidak dapat mempertahankan daya dukung terhadap keruntuhan dalam kriteria penerimaan. Bangunan berada di ambang keruntuhan sebagian atau seluruhnya. Kerusakan substansial pada struktur telah terjadi, berpotensi termasuk degradasi yang signifikan dalam kekakuan dan kekuatan sistem penekal gaya lateral, deformasi lateral permanen yang besar dari struktur, dan pada

tingkat yang lebih terbatas terjadi degradasi pada daya dukung beban vertikal.

- d) Tingkat kinerja S-6, *Not Considered (NC)* merupakan rehabilitasi bangunan yang tidak membahas kinerja strukturnya.
- e) Tingkat kinerja S-2, *Damage Control Range* merupakan rentang keadaan kerusakan berkelanjutan antara tingkat kinerja S-3 dan tingkat kinerja S-1.
- f) Tingkat kinerja S-4, *Limited Safety Range* merupakan rentang status kerusakan berkelanjutan antara tingkat kinerja S-3 dan tingkat kinerja S-5.

Tabel 2 menunjukkan hubungan tingkat kinerja struktural dengan status kerusakan pada elemen vertikal dari sistem penahan gaya lateral.

Tabel 2. Tingkat kerusakan elemen vertikal berdasarkan FEMA 356

Elemen	Type	Structural Performance Levels		
		Collapse Prevention S-5	Life Safety S-3	Immediate Occupancy S-1
Concrete Frames	Primary	Retak yang meluas dan pembentukan engsel pada elemen duktil, retak terbatas dan/atau kegagalan	Kerusakan yang meluas pada balok, spalling pada cover beton dan retak akibat beban geser dengan lebar <3 mm	Terjadi retak rambut skala minor. Leleh terbatas dimungkinkan terjadi di beberapa lokasi. Tidak ada kehancuran

	sambungan di beberapa kolom non-duktil, kerusakan parah pada kolom pendek	untuk kolom daktail. Spalling minor pada kolom non-ductile. Retak sambungan Joint cracks <1/8" wide.	(regangan beton < 0,003).
Secondary	Spalling luas pada kolom (perpendekan terbatas) dan balok. Kerusakan sendi yang parah. Beberapa tulangan tertekuk.	Retak meluas dan pembentukan engsel pada elemen daktail. Retak terbatas dan/atau kegagalan sambungan di beberapa kolom nonductile. Kerusakan parah pada kolom pendek.	Spalling minor terjadi di beberapa tempat pada kolom dan balok yang daktail. Retak lentur pada balok dan kolom. Shear cracking in joints <1/16" width.
Drift	4% transient or permanent	2% transient; 1% permanent	1% transient; negligible permanent

H. Perhitungan Kekuatan Lateral dan Kapasitas Rekatan CFRP

Total gaya lateral yang bekerja pada benda uji merupakan total gabungan gaya geser pada rangka kosong, dinding pengisi dan CFRP. Kekuatan lateral (V_{Total}) spesimen dihitung menggunakan persamaan 4.

$$V_{Total} = V_{Frame} + V_{Infill} + (V_{CFRP} \times \cos\theta) \dots\dots\dots (4)$$

Dimana V_{Total} adalah kapasitas kekuatan lateral total dari spesimen, V_{Frame} adalah kapasitas spesimen rangka kosong, V_{Infill} adalah kapasitas lateral dari dinding pengisi, V_{CFRP} adalah kapasitas rekatan strip CFRP diagonal, dan θ adalah sudut diagonal utama dinding pengisi.

Kapasitas lateral spesimen rangka kosong (V_{Frame}) didapatkan dari kapasitas kolom yang dihitung berdasarkan kekuatan lentur nominal pada penampangnya (M_n) sesuai SNI 2847:2019,

$$V_{Frame} = 2 \times M_n / h_{col} \dots\dots\dots (5)$$

Di mana h_{col} adalah jarak antar *centerline* balok bawah dan atas,

$$M_n = A_s \times f_y \times (d - a'/2) \dots\dots\dots (6)$$

Di mana A_s adalah luas penampang tulangan, f_y adalah kekuatan leleh tulangan, d adalah jarak dari serat tekan terjauh ke pusat tulangan tarik longitudinal, dan a' merupakan hasil persamaan 7 berikut:

$$a' = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times d} \dots\dots\dots (7)$$

Di mana f'_c adalah kuat tekan beton kolom.

Kapasitas lateral dinding pengisi dihitung berdasarkan kapasitas strut diagonal setara sesuai metode versi modifikasi yang disarankan oleh Stafford-Smith dan Carter (1969) sesuai FEMA 306. Gaya geser arah horizontal (V_{Infill}) dari kapasitas strut diagonal dinding dihitung dengan persamaan 8:

$$V_{Infill} = a \times t_{inf} \times f_{m90} \times \cos \theta \dots\dots\dots (8)$$

Di mana a adalah lebar strut ekuivalen sesuai persamaan 9, t_{inf} adalah tebal dinding pengisi, f_{m90} adalah kekuatan dinding arah horisontal yang ditentukan sebesar 50% dari kekuatan *stacked prism* bahan dinding (f_{me}), dan θ adalah sudut diagonal utama dinding.

$$a = 0,175 \times (\lambda_1 \times h_{col})^{-0.4} \times r_{inf} \dots\dots\dots (9)$$

Di mana λ_1 adalah hasil perhitungan persamaan 10, h_{col} adalah jarak antar *centerline* balok bawah dan atas, dan r_{inf} adalah panjang diagonal dinding.

$$\lambda_1 = ((E_{me} \times t_{inf} \times \sin 2\theta) / (4 \times E_{fe} \times I_{coll} \times h_{inf}))^{1/4} \dots\dots\dots (10)$$

Di mana E_{me} merupakan modulus elastisitas material dinding pengisi, t_{inf} adalah tebal dinding pengisi dan strut ekuivalen, E_{fe} adalah modulus elastisitas bahan kolom, I_{coll} adalah momen inersia kolom dan h_{inf} adalah tinggi dinding pengisi.

Untuk perhitungan kapasitas lekatan CFRP diadopsi melalui persamaan yang terdapat pada penelitian yang telah dilakukan oleh Altin, S., *et al.*, (2007). Kekuatan rekatan strip CFRP (V_{CFRP}) sepanjang arah serat

dihitung menggunakan persamaan 11 dengan nilai regangan yang didapatkan dari eksperimen di laboratorium.

$$V_{CFRP} = n \times (\epsilon_{CFRP} \times E_{CFRP} \times W_{CFRP} \times t_{CFRP}) \dots\dots\dots(11)$$

Dimana n adalah jumlah strip CFRP, ϵ_{CFRP} adalah regangan strip CFRP, E_{CFRP} adalah modulus elastis CFRP, W_{CFRP} adalah lebar strip CFRP, dan t_{CFRP} adalah ketebalan strip CFRP.