

DISERTASI

**POLA KEGAGALAN BETON BUSA PREFABRIKASI
SEBAGAI DINDING PENGISI DIBAWAH PEMBEBANAN
LATERAL DALAM BIDANG**

*(Failure Pattern of Prefabricated Foam Concrete as Infill
Wall Under In-Plane Lateral Loading)*

**MISWAR TUMPU
D013191003**



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

POLA KEGAGALAN BETON BUSA PREFABRIKASI SEBAGAI DINDING PENGISI DIBAWAH PEMBEBANAN LATERAL DALAM BIDANG *FAILURE PATTERN OF PREFABRICATED FOAM CONCRETE AS INFILL WALL UNDER IN-PLANE LATERAL LOADING*

disusun dan diajukan oleh :

MISWAR TUMPU


D013191003

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 05 Oktober 2021

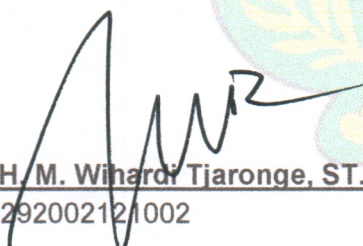
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Promotor,


Prof. Dr. Ing. Ir. Herman Parung, M.Eng
NIP. 196207291987031001

Co Promotor,


Co Promotor,



Prof. Dr. Ir. H. M. Winardi Tjaronge, ST., M.Eng
NIP. 196805292002121002


Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, ST., MT
NIP. 197912262005011001

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas Teknik,


Prof. Ir. S.A. Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D
NIP. 19640422 199303 1 001


Prof. Dr. Ir. Muh. Arsyad Thaha, M.T
NIP. 19601231 198609 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Miswar Tumpu
Nomor Mahasiswa : D013191003
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis berjudul

**Pola Kegagalan Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Dibawah
Pembebanan Lateral Dalam Bidang**

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, 05 Oktober 2021

Yang menyatakan



MISWAR TUMPU

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah kami panjatkan ke hadirat Allah yang Maha Kuasa yang atas izinnya sehingga penelitian dan penulisan ini yakni **“Pola Kegagalan Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Dibawah Pembebanan Lateral Dalam Bidang”** dapat terselesaikan. Dalam melaksanakan penelitian ini upaya dan perjuangan keras kami lakukan dalam menyelesaikannya.

Kami menyampaikan penghargaan yang sangat tinggi dan amat mendalam kepada :

1. Kedua orang tua, **Miseng Djaenal Daeng Tumpu, S.Pd** dan **(Almh.) Hj. Sitti Maryam Daeng Ngai** serta adik kami yaitu **dr. Nur’Afiahuddin Tumpu, S.Ked** atas supportnya serta kesabaran dalam menanti selesainya studi S3 Ilmu Teknik Sipil kami.
2. Rektor Universitas Hasanuddin, Ibu **Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA.**
3. Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Muhammad Arsyad Thaha, MT.**
4. Ketua Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak **Prof. Dr. Ir. M. Wihardi Tjaronge, ST. M.Eng.**
5. Ketua Program Studi S3 Ilmu Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Bapak **Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmata, MS., M.Eng.Sc., Ph.D.**

6. Bapak **Prof. Dr-Ing. Herman Parung, 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 **Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng** 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.
7. Bapak **H. Andi Idris Manggabarani, SE** selaku Komisaris IMB Group serta rekan-rekan IMB Group atas bantuan materil yang bersedia menyediakan beton busa prefabrikasi hingga pada pengujian pembebanan siklik lateral yang dilaksanakan di laboratorium.
8. Bapak/Ibu dosen Pascasarjana S3 Ilmu Teknik Sipil 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.
9. Teman seperjuangan di laboratorium, Saudara saya Bapak **Mansyur** dan Bapak **Yusran Londongsalu** yang dengan sabar berjuang bersama di laboratorium demi tercapainya gelar doktor kita bersama. Tak lupa juga ucapan Terimakasih diucapkan kepada teman angkatan S3 Teknik Sipil FT-UH (angkatan 2019).

10. Rekan-rekan Laboratorium Riset Eco Material dan Beton dan Laboratorium Riset Rekayasa Gempa Struktur, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

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, Oktober 2021
Wassalam

Miswar Tumpu

ABSTRAK

MISWAR TUMPU. Pola Kegagalan Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Dibawah Pembebanan Lateral Dalam Bidang (dibimbing oleh **Herman Parung, H. M. Wihardi Tjaronge** dan **A. Arwin Amiruddin**).

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. 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. Penelitian ini bertujuan untuk menemukan tingkat dan pola kegagalan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prefabrikasi dan rangka beton bertulang sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral (kekakuan). Penelitian ini berbentuk eksperimental di laboratorium. Tiga jenis benda uji yang dibuat yaitu rangka beton bertulang (SW 1), dinding pengisi dengan beton busa prefabrikasi tanpa dan dengan menggunakan serat (SW 2 dan SW 3). Beban yang diberikan adalah beban siklik lateral yang mewakili beban gempa, pengujian dengan metode *displacement control* yang ditingkatkan secara bertahap mengacu pada standar pengujian ASTM E2126-11. Hasil pengujian menunjukkan bahwa secara garis besar pola kegagalan yang terjadi pada sambungan (*bed joint*) antara bahan pengisi (panel pracetak beton busa) yaitu kurangnya efektifitas dan intersection antara bahan pengisi sehingga slip tidak terjadi antar bahan pengisi (panel pracetak beton busa). Tipe keruntuhan struktur adalah keruntuhan geser. Sedangkan retak yang terjadi pada dinding bata adalah retak diagonal dengan keruntuhan geser dan tipe keruntuhan berdasarkan gaya yang bekerja adalah keruntuhan *In-plane failure*.

Kata kunci : Pola kegagalan, Beton busa prefabrikasi, Dinding pengisi, Pembebanan lateral

ABSTRACT

MISWAR TUMPU. *Failure Pattern of Prefabricated Foam Concrete as Infill Wall Under In-Plane Lateral Loading* (supervised by **Herman Parung, H. M. Wihardi Tjaronge** and **A. Arwin Amiruddin**).

Many regions in Indonesia are situated right above earthquake faults, which make the regions have relatively high earthquake vulnerability. Occurrences of many shallow earthquakes are attributed to the faults. In Indonesia, masonry infill walls are used as exterior walls and interior partitions in the typical residential house. There are several types of residential house in Indonesia, such as a one-to-two story dwelling house in the rural and the urban residential area, or two-to-four-story mixed residential-commercial building in the urban commercial area. The aims of this research was to find the rate and pattern of failure of infill walls made with prefabricated foam concrete and reinforced concrete frames as a function of the lateral strength level (stiffness). This research was a laboratory experiment. Three specimens were made, namely bare RC frames (SW 1), prefabricated foam concrete without and with fibers as infill wall (SW 2 and SW 3). The load given was a cyclic load that represented the earthquake load, the test with the gradually increased displacement control method referred to the ASTM E2126-11 test standard. The test results showed that in general the failure pattern that occurred at the joint (bed connection) between the filler material (pre-cast foam concrete panel) was the effectiveness and the junction between the fillers so that there was no slippage between the fillers (foam concrete precast panel). The type of structural failure was shear failure. Meanwhile, the recovery that occurred in brick walls was diagonal collapse with shear failure and the type of collapse based on the working force was in-plane failure.

Keywords : Failure pattern, Prefabricated foam concrete, Infill wall, Lateral 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	7
C. Tujuan Penelitian	7
D. Batasan Masalah	8
E. Manfaat Penelitian	9
F. Sistematika Penulisan	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Isu Strategis Material Ringan Untuk Bangunan Tahan Gempa	11
B. Kerusakan Rumah Tinggal Akibat Gempa Bumi di Indonesia	14

C. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan Gedung Akibat Beban Siklik Lateral	18
D. Dinding Bukan Beton Bertulang (Untuk Rumah Tinggal)	25
E. Pola Kegagalan Dinding Rangka Beton Bertulang Dengan Berbagai Material Bahan Pengisi	33
F. Beton Busa	39
G. Karakteristik Fisik Beton Busa	42
H. Kerangka Pikir Penelitian	47
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
A. Lokasi dan Waktu Penelitian	49
B. Teknik Pengumpulan Data dan Kerangka Kerja Penelitian	50
C. Alat dan Bahan Penelitian	52
D. Matriks Benda Uji Panel Dinding Geser Beton Busa	58
E. Pengujian Material Beton Busa	66
F. Proses Pengecoran Beton Busa	69
G. Pengujian Siklik Lateral (Bolak-Balik) Dinding Bahan Pengisi Panel Pracetak Beton Busa	71
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
A. Karakteristik Material	79
B. Rancangan Campuran Beton Busa	87

C. Rancangan Campuran Beton Penyusun Sloof, Kolom dan Balok.....	88
D. Karakteristik Fisik dan Mekanik Beton Busa.....	89
E. Karakteristik Fisik dan Mekanik Beton Penyusun Sloof, Kolom dan Balok.....	92
F. Hubungan Beban dan Lendutan Panel Pracetak Beton Busa	96
G. Pengamatan Fisik Pola Kegagalan Beton Busa Prefabrikasi Dinding Pengisi	98
H. Interpretasi Pola Kegagalan Benda Uji Dinding	148
I. Kekuatan Dinding Dalam Bidang.....	155
J. Studi Komparasi Penelitian Terdahulu	174
K. Temuan Empirik	177
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
A. Kesimpulan.....	179
B. Saran	180
DAFTAR PUSTAKA.....	181

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Matriks Benda Uji Panel Dinding dengan Bahan Pengisi Panel Pracetak Beton Busa	59
2. Konfigurasi dan Fungsi LVDT	62
3. Konfigurasi dan Fungsi Strain Gauge Baja.....	64
4. Konfigurasi dan Fungsi Strain gauge Beton	65
5. Metode Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus	67
6. Karakteristik Semen Portland Komposit	68
7. Karakteristik Admixture	68
8. Karakteristik Fisik dan Metode Pengujian Beton Busa	69
9. Metode Pengujian B – Amplitude dari Siklus Terbalik	73
10. Karakteristik Fisik Semen Portland Komposit (PCC)	80
11. Karakteristik Kimia Semen PCC (Hasil Uji XRF)	80
12. Karakteristik Fisik Agregat Halus dan Agregat Kasar	82
13. Karakteristik Foam Agent Sika® Poro G-210	84
14. Karakteristik SikaFiber® Force PP-48/RAD-48s	85
15. Rancangan Campuran Beton Busa (1 m ³)	87
16. Rancangan Campuran Beton Untuk Sloof (1 m ³)	88
17. Rancangan Campuran Beton Untuk Kolom dan Balok (1 m ³)...	88
18. Berat Volume Beton Busa Tanpa dan Dengan Menggunakan Serat	90

19.	Kuat Tekan Beton Busa Tanpa dan Dengan Menggunakan Serat	91
20.	Kuat Tekan Beton Untuk Sloof	94
21.	Kuat Tekan Beton Untuk Kolom dan Balok	95
22.	Pola Kegagalan Benda Uji SW 1 Pada Masing-Masing Amplitudo, % Δ m	102
23.	Pola Kegagalan Benda Uji SW 2 Pada Masing-Masing Amplitudo, % Δ m	118
24.	Pola Kegagalan Benda Uji SW 3 Pada Masing-Masing Amplitudo, % Δ m	135
25.	Rekapitulasi Pola Kegagalan Benda Uji	147
26.	Tingkat Kerusakan Untuk Rangka Beton Bertulang Tanpa dan Dengan Menggunakan Serat	155
27.	Ringkasan Data Hasil Pengujian	156
28.	Perbandingan Tingkat Kekuatan Pada Semua Benda Uji	165
29.	Hasil Perhitungan Kekuatan Geser	168
30.	Hasil Perhitungan Modulus Geser Secant	170
31.	Hasil Komparasi Penelitian Terdahulu.....	174

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1.	Bangunan Rangka Beton Bertulang dengan Batu Bata dari Tanah Liat yang Dibakar Sebagai Dinding Pengisi Sangat Rentan Terhadap Beban Gempa 2
2.	Pola Kegagalan yang Diharapkan Pada Bahan Pengisi 4
3.	Contoh Kerusakan Ringan yang Terjadi Akibat Gempa Bumi... 15
4.	Contoh Kerusakan Sedang yang Terjadi Akibat Gempa Bumi . 16
5.	Contoh Kerusakan Berat yang Terjadi Akibat Gempa Bumi 17
6.	Parameter Kinerja Spesimen: (B) Titik Terakhir Pada $P_u = 0,8P_{peak}$ (Dilanjutkan) 22
7.	Contoh Kurva Histeresis Teramati dan Kurva Envelope Untuk Metode Pengujian B (Dilanjutkan) 23
8.	Contoh Rata-Rata Kurva Envelope 23
9.	Schedule Perpindahan Siklik Untuk Metode Uji B 24
10.	Set Up Pengujian Dinding Geser dari Kayu..... 29
11.	Set Up Pengujian Dinding Geser dengan Menggunakan <i>Shaking Table</i> (Meja Goyang)..... 30
12.	Pengujian Geser siklik Dinding Geser Batu Bata (<i>Masonry</i>) 33
13.	Pola Kerusakan dan Retak Untuk Dinding Pengisi dari Bata Tanah Liat dengan Partisi (a) dan Tanpa Partisi (b) 35
14.	Pola Kerusakan dan Retak Untuk Dinding Pengisi dari Adobe dengan Sekat (Tidak Ada Retakan) (a) dan Tanpa Sekat (b) ... 35

15.	Pola Retak dan Mode Kegagalan Dinding Uji.....	36
16.	Pola Kegagalan yang Diharapkan Pada Bahan Pengisi	37
17.	Pola Kegagalab Dinding Rangka Beton Bertulang	38
18.	Mekanisme Kegagalan Rangka Beton Bertulang yang Diisi	39
19.	Kurva Tegangan-Regangan Tipikal Beton.....	46
20.	Kurva Tegangan-Regangan Untuk Berbagai Kekuatan Beton..	47
21.	Kerangka Pikir Penelitian	48
22.	Diagram Alir Penelitian	52
23.	<i>Cyclic Actuator Lateral Load</i>	53
24.	<i>Switching Box Dan Data Logger</i>	53
25.	Alat UTM (<i>Universal Testing Machine</i>)	54
26.	LVDT dengan Bacaan Maksimum (a) 10 cm, (b) 5 cm, (c) 2,5 cm	55
27.	<i>Strain Gauge</i> Untuk Material Beton Tipe PL-60-11	55
28.	<i>Strain Gauge</i> Untuk Material Beton Tipe PFL-30-11	56
29.	Material Pembentuk Beton Busa	57
30.	Panel Pracetak Beton Busa.....	57
31.	Portal Rangka Beton Bertulang (Tanpa Menggunakan Bahan Pengisi) (SW 1).....	59
32.	Dinding dengan Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi dan Panel Tidak Menggunakan Serat (SW 2)	60
33.	Dinding dengan Menggunakan Beton Busa Prefabrikasi dan Panel Menggunakan Serat (SW 3).....	60

34.	Posisi Penempatan LVDT Untuk Mengukur <i>Displacement</i>	61
35.	Posisi Penempatan <i>Strain Gauge</i> Baja	63
36.	Posisi Penempatan <i>Strain Gauge</i> Beton	65
37.	Posisi Penempatan Angkur Pada Saat Pembuatan Benda Uji Dinding.....	66
38.	Proses Pengecoran Beton Busa.....	70
39.	<i>Setting Up</i> Pengujian Dinding Yang Menggunakan Bahan Pengisi	75
40.	<i>Setting Up</i> Pengujian Dinding Yang Tidak Menggunakan Bahan Pengisi	75
41.	Hasil <i>Setting Up</i> Pengujian.....	76
42.	Siklus Pembebanan Menurut ASTM E2126-02a	77
43.	Serat SikaFiber [®] Force PP-48/RAD-48s	85
44.	Hubungan Tegangan Regangan Baja D13.....	86
45.	(a). Beton Busa Tanpa Serat dan (b). Beton Busa dengan Serat	89
46.	Hasil Pengujian Slump Sloof	93
47.	Hasil Pengujian Slump Kolom dan Balok	93
48.	Hubungan Beban dan Lendutan Panel Pracetak Beton Busa Tanpa dan Dengan Menggunakan Serat.....	96
49.	Pola Retak Benda Uji SW 1	99
50.	Kegagalan yang Terjadi Pada Benda Uji SW 1	101
51.	Pola Retak Benda Uji SW 2	115

52.	Kegagalan yang Terjadi Pada Benda Uji SW 2	117
53.	Pola Retak Benda Uji SW 3	131
54.	Serat yang Timbul Pada Benda Uji SW 3.....	133
55.	Pemisahan Antara Bahan Pengisi dan Kolom.....	134
56.	CIF Untuk Rangka Beton Bertulang	150
57.	CIF Untuk Beton Busa Prefabrikasi.....	151
58.	Titik Kinerja dari Rangka Beton Bertulang (SW 1) dan Rangka Beton Bertulang dengan Menggunakan Bahan Pengisi Tanpa dan Dengan Menggunakan Serat (SW 2 dan SW 3).....	153
59.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji SW 1.....	158
60.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji SW 2.....	160
61.	Hubungan Beban dan Lendutan Benda Uji SW 3.....	162
62.	Perbandingan Hubungan Beban dan Lendutan Semua Benda Uji	164
63.	Perbandingan Kekuatan Benda Uji	166
64.	Modulus Geser Secant Benda Uji SW 1	170
65.	Modulus Geser Secant Benda Uji SW 2.....	171
66.	Modulus Geser Secant Benda Uji SW 3.....	171

DAFTAR NOTASI

K_e	= 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}
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

Di Indonesia, rumah tinggal umumnya menggunakan rangka beton bertulang untuk diaplikasikan sebagai dinding penutup dan dinding partisi interior. Meskipun sebagian besar bangunan menggunakan rangka beton bertulang, banyak rumah tinggal dan bangunan berlantai satu hingga dua yang dibangun tanpa mengacu pada kualitas konstruksi yang baik, detail yang benar, dan desain struktur yang tepat sehingga umumnya konstruksi tersebut dianggap sebagai bangunan non rekayasa (*non engineered building*).

Banyak daerah di Indonesia yang terletak di dekat patahan gempa sehingga hampir setiap tahun bencana gempa bumi terjadi di berbagai daerah di Indonesia. Sebagian besar bangunan di Indonesia termasuk rumah tinggal dengan satu sampai tiga lantai, gedung sekolah, gedung perkantoran dan lain-lain menggunakan batu bata yang terbuat dari tanah liat yang dibakar sebagai pengisi dari rangka beton bertulang. Menurut kejadian gempa bumi yang terjadi baru-baru ini di Indonesia seperti Gempa Palu (2019) dan Gempa Mamuju-Majene (2021), bangunan rangka beton

bertulang dengan menggunakan bahan pengisi batu bata dari tanah liat yang dibakar sebagai dinding pengisi sangat rentan terhadap beban seismik atau beban gempa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Dalam hal ini, sejumlah upaya ekstensif telah dilakukan untuk mengurangi penggunaan batu bata dari tanah liat yang dibakar sebagai dinding pengisi.



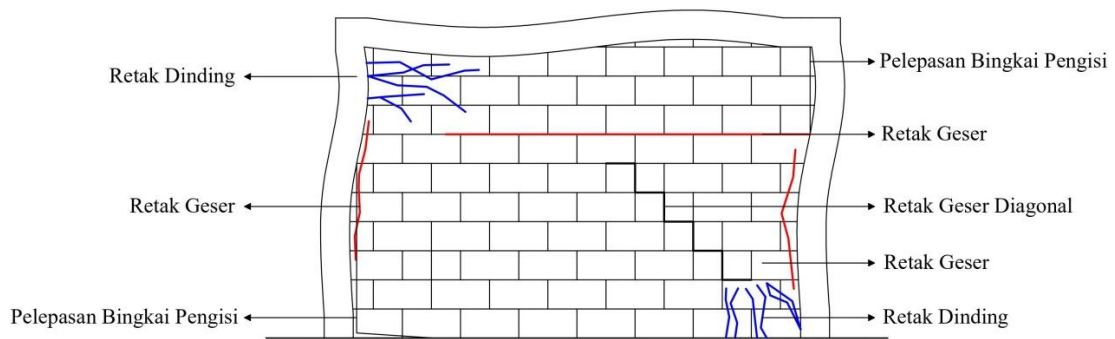
Gambar 1. Bangunan rangka beton bertulang dengan batu bata dari tanah liat yang dibakar sebagai dinding pengisi sangat rentan terhadap beban gempa

Dapat disimpulkan oleh banyak penelitian eksperimental yang ada bahwa pengaruh dinding dengan menggunakan bahan pengisi pada rangka

beton bertulang terhadap respon aksi seismik dan pola keruntuhan cukup sulit dan bergantung pada karakteristik konstitutif dari suatu pengisi sehubungan dengan sifat rangka beton bertulang (Singh P. B., dan Mehrabi A. B., 2002). Investigasi kejadian gempa bumi yang merusak yang dilakukan oleh Luca F. D. *et al.*, 2017 melaporkan bahwa sifat getas dari dinding pasangan bata tanpa tulangan yang umum digunakan menghasilkan beberapa defisiensi seismik dinding pengisi rangka beton bertulang. Sifat rapuh dan kekakuan dinding pengisi dapat menyebabkan ulet yang tidak memadai, mengurangi ketahanan beban seismik dan menimbulkan efek merugikan yang menyebabkan kerusakan seismik yang luas.

Salah satu parameter kunci untuk mengukur kinerja struktur bangunan eksisting termasuk rumah tinggal adalah pola kegagalan yang terjadi pada dinding pengisi dan rangka beton bertulang akibat gempa. Selain itu, hasil analisis studi eksperimental pola kegagalan yang terjadi pada benda uji rangka beton bertulang sangat berguna untuk mendukung desain dan dapat memberikan penilaian seismik atau beban gempa yang terjadi. Menurut Pantò B. dan Rossi, P. P. (2018), pola kegagalan dinding pengisi dapat disebut sebagai penghancuran, retakan geser-diagonal, kegagalan geser, dan retak tarik pasangan bata atau pelepasan bahan pengisi dari rangka beton bertulang. Alwashali, H. *et al.*, (2019) mendefinisikan kegagalan pada sejumlah pola dengan bentuk sebagai berikut; keretakan pada rangka beton bertulang dan pasangan bata pengisi karena tarikan dan dorong selama

pembebanan lateral siklik, spalling penutup mortar akibat tarikan dan dorong pembebanan lateral siklik, lubang dari pasangan bata pengisi. Selain itu, lokasi sambungan balok dan kolom atau hasil tulangan utama sebagai fungsi drift story yang dapat ditentukan. Gambar 2 menunjukkan kerusakan yang diharapkan terjadi pada bahan pengisi.



Gambar 2. Pola kegagalan yang diharapkan pada bahan pengisi (Pantò B. dan Rossi, P. P. (2019))

Dalam beberapa dekade terakhir, salah satu material yang menarik perhatian para ahli yang bekerja di bidang konstruksi bangunan adalah beton busa. Material yang digunakan dalam pembuatan beton busa adalah mortar berbahan dasar semen portland yang dipadukan dengan busa stabil yang dihasilkan dari foam agent dan air (Sunarno, Y., et al. 2020; Tumpu, M., et al. 2021; Mansyur et. al., 2021, Salu Y. L., et al., 2021; Kearsley dan Wainwright 2001a, b, 2002a, b; Jones dan McCarthy 2005a, b; Nambiar E. K. K dan Ramamurthy K. 2006a, b). Penggunaan beton busa mengurangi kebutuhan agregat kasar dalam pekerjaan konstruksi bangunan yang mengakibatkan

berkurangnya penambangan dan produksi agregat kasar yang mendukung pelestarian lingkungan.

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. Dalam penelitian ini menggunakan serat buatan/sintetik dengan jenis serat polyolefin.

Selain itu, salah satu penyebab kegagalan konstruksi dinding adalah terletak pada sambungan antara bahan pengisi yang mana menggunakan

spesi atau mortar sebagai bahan perekat. Mortar (sering disebut juga mortel atau spesi) adalah campuran yang terdiri dari pasir, bahan perekat (semen portland komposit) serta air dan diaduk sampai homogen. Salah satu kerusakan non-struktural adalah kerusakan pada dinding bangunan, kerusakan ini pada umumnya terjadi karena tidak adanya angkur antara kolom dan dinding. Angkur (stek) sebagai salah satu perkuatan hubungan antara dinding dengan kolom yang bekerja sebagai satu kesatuan dalam menahan beban yang diberikan.

Penelitian eksperimental ini merupakan bagian dari pekerjaan penelitian yang sedang berlangsung dalam lingkup luas, yang bertujuan untuk meningkatkan standar seismik atau standar gempa dan metode evaluasi untuk beton bertulang pada bangunan dan rumah tinggal di Indonesia, khususnya rangka beton bertulang yang diisi dengan beton busa prefabrikasi dan diperkuat dengan angkur (stek) sebagai perkuatan hubungan antara bahan pengisi dan kolom dalam menahan beban siklik lateral. Selain itu, penelitian ini juga dapat mengkorelasikan tingkat dan pola kegagalan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prafabrikasi dan rangka beton bertulang sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral (kekakuan). Berdasarkan latar belakang dan beberapa penelitian terdahulu yang telah dikemukakan, maka penelitian ini mengkaji sebuah disertasi yang berjudul **“Pola Kegagalan Beton Busa Prefabrikasi Sebagai Dinding Pengisi Dibawah Pembebanan Lateral Dalam Bidang”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian diatas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana mengkorelasikan tingkat dan pola kegagalan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prafabrikasi dan rangka beton bertulang sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral (kekakuan).
2. Bagaimana pengaruh beton busa prafabrikasi tanpa dan dengan menggunakan serat dalam mereduksi retak yang terjadi akibat beban lateral dalam bidang (*in-plane lateral loading*).
3. Bagaimana kekuatan geser dan modulus kekakuan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prafabrikasi dan rangka beton bertulang.

C. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menemukan tingkat dan pola kegagalan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prafabrikasi dan rangka beton bertulang sebagai fungsi dari tingkat kekuatan lateral (kekakuan).
2. Menemukan pengaruh beton busa prafabrikasi tanpa dan dengan menggunakan serat dalam mereduksi retak yang terjadi akibat beban lateral dalam bidang (*in-plane lateral loading*).

3. Menemukan kekuatan geser dan modulus kekakuan dinding pengisi yang dibuat dengan beton busa prefabrikasi dan rangka beton bertulang.

D. Batasan Masalah

Permasalahan pengujian pembebanan lateral (siklik) dinding geser dari material ringan sehingga perlu membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah sehingga fokus penelitian ini adalah :

1. Penelitian yang dilakukan adalah berbentuk uji eksperimen di laboratorium.
2. Beton busa diproduksi dengan menggunakan semen portland komposit (PCC) dari salah satu produsen semen PCC di Indonesia
3. Beton busa prefabrikasi yang dibuat berdasarkan hasil dari serangkaian uji coba campuran beton busa.
4. Proses curing yang dilakukan pada dinding dengan bahan pengisi beton busa prefabrikasi adalah curing udara.
5. Pengujian benda uji silinder (kuat tekan dan kuat tarik belah) ukuran 10 cm x 20 cm dan pembebanan siklik lateral dinding dengan bahan pengisi beton busa prefabrikasi ukuran (panjang; lebar dan tebal) yaitu 70 cm; 40 cm dan 8 cm dilakukan pada umur 28 hari.
6. 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 menghasilkan suatu inovasi pada teknologi beton busa yang memanfaatkan material yang ramah lingkungan campuran beton busa dengan menggunakan semen PCC. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan dan pengetahuan pembaca dalam bidang Teknik Sipil serta pengaplikasian dilapangan agar dapat memberikan solusi yang lebih efektif dan ekonomis bagi pelaksanaan konstruksi khususnya pembebanan secara siklik lateral dinding dengan bahan pengisi beton busa prefabrikasi dengan meninjau pada pola kegagalan yang terjadi.

F. Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah tulisan ini, 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

Dalam bab ini, memberikan gambaran tentang pentingnya masalah ini diangkat sebagai sebuah penelitian S3. Pokok-Pokok bahasan dalam BAB ini adalah latar belakang masalah, rumusan masalah,

batasan masalah, maksud dan tujuan dari penelitian ini, manfaat dari penelitian ini, dan sistematika penulisan.

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.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai uraian tentang metode, bahan, peralatan, cara penelitian serta uraian pelaksanaan penelitian dan juga serangkaian pengujian tentang dinding geser beton busa.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis perhitungan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian serta pembahasan dari hasil pengujian yang diperoleh.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Isu Strategis Material Ringan Untuk Bangunan Tahan Gempa

Secara umum, bangunan teknik sipil dapat dikelompokkan kedalam bangunan *non engineered building* dan *engineered building*. *Non engineered building* merupakan bangunan sederhana seperti rumah masyarakat yang tidak dilakukan perhitungan struktur sementara *engineered building* merupakan bangunan yang direncanakan dan dilakukan perhitungan struktur dengan baik oleh konsultan atau ahli struktur (Boen, T., 2003). Akibat gempa Sumatera Barat tahun 2009 dan Gempa Palu tahun 2018 beberapa tahun lalu, banyak bangunan yang rusak, baik *non engineered building* maupun *engineered building*.

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, termasuk pada struktur dinding. Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan khususnya di bidang konstruksi, maka material penyusun beton juga mengalami perkembangan. Salah satunya

adalah munculnya inovasi beton busa. Penggunaan beton busa dalam bangunan dapat mereduksi atau mengurangi besarnya beban mati dalam desain bangunan rumah tinggal pada elemen struktur dan termasuk dalam partisi non structural yang beratnya hanya 2200 kg/m^3 . Hal ini juga didukung dengan sering terjadinya gempa di wilayah Indonesia.

Beberapa tahun terakhir ini perencanaan struktur tahan gempa semakin ditingkatkan seiring dengan semakin seringnya terjadi gempa pada wilayah yang termasuk zona rawan gempa. Khusus pada bangunan rumah tinggal, bagian yang rawan jika terjadi gempa adalah bahan pengisi dari dinding yang terbuat dari rangka beton bertulang yang diikat oleh balok dan kolom. Pada panel pertemuan sambungan balok dan kolom karena sifat pemancaran energinya yang spesifik dan terjadinya gaya geser yang sangat besar terutama ketika timbulnya sendi plastis balok pada muka kolom. Gaya geser ini dapat mengakibatkan keruntuhan pada inti panel sambungan baik karena dilampauinya kapasitas geser atau karena hancurnya lekatan dari tulangan atau akibat dari keduanya.

Menurut Parung H. (2012), bahwa kerusakan yang terjadi pada struktur akibat gempa sangat bervariasi, mulai dari kerusakan non struktural sampai kerusakan struktural, dimana perbedaan kerusakan ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti magnitude gempa, kekakuan struktur, massa struktur, periode alami struktur dan kemampuan struktur dalam menyerap dan menyalurkan energi gempa. Selain itu, gempa bumi menyebabkan ribuan orang meninggal setiap tahun, baik secara langsung

ataupun tidak langsung. Selain itu, gempa bumi tidak hanya menyebabkan terjadinya kerusakan pada struktur, tetapi menyebabkan terjadinya ledakan gas, memicu kebakaran dan dalam beberapa tahun terakhir ini, gempa bumi telah mengakibatkan kehilangan banyak nyawa di Jepang, China dan Indonesia.

Menurut Bird P. (2003), bahwa Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Sedangkan menurut Milson J. et al. (1992), akibat interaksi yang terjadi antara lempeng-lempeng tektonik tersebut, menempatkan Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi, dimana hal ini terlihat dari tingginya aktivitas kegempaan yang terjadi, dimana terdapat lebih dari 14000 kejadian gempa dengan magnitudo lebih dari 5 skala Richter yang terjadi dalam rentang Tahun 1897 sampai 2009 (Irsyam M. et al., 2010). Hal yang tidak bisa dilupakan di Indonesia yaitu gempa bumi yang terjadi di Sumatera Barat dan Palu.

Sumatera Barat khususnya kota Padang, merupakan daerah yang memiliki potensi sangat besar terhadap gempa. Gempa 30 September 2009 lalu berkekuatan 7,5 Skala Richter yang berasal dari lepas pantai daerah Sumatera Barat merupakan kejadian yang menimbulkan banyak korban jiwa dan harta.

Gempa Palu terjadi pada Jumat sore, 28 September 2018, pukul 18:02:44 waktu setempat (Waktu Indonesia Tengah, WITA) dengan magnitudo Mw 7,4, berpusat di 26 km Utara Donggala, Sulawesi Tengah. Gempa ini menyebabkan guncangan yang kuat dan menghasilkan tsunami yang melanda kota Palu, yang berada di teluk Palu, serta likuifaksi besar-besaran terutama di daerah Petobo dan daerah Balaroa di kota Palu.

B. Kerusakan Rumah Tinggal Akibat Gempa Bumi di Indonesia

Kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi di Indonesia khususnya pada tembok rumah tinggal yang menggunakan batu bata di klasifikasikan oleh Pusat Penelitian Pengembangan Perumahan dan Permukiman yaitu kerusakan ringan, kerusakan sedang dan kerusakan berat.

1. Kerusakan Ringan

Kerusakan ringan yang terjadi akibat gempa ditandai dengan retak kecil (lebar celah antara 0,75 mm hingga 6 mm) pada dinding, plester berjatuh mencakup luas yang besar, kurang dari 30% komponen struktur utama mengalami kerusakan, kerusakan bagian-bagian non struktur seperti cerobong, lisplang, dsb. dan kemampuan struktur untuk memikul beban tidak banyak berkurang. Kerusakan ringan juga menunjukkan tidak adanya kerusakan/keretakan pada fondasi, kolom, balok dan rangka kuda-kuda. Selain itu, terjadi retak pada dinding namun tidak tembus dengan sebagian plesteran terkelupas. Gambar 3 memperlihatkan contoh kerusakan ringan yang terjadi akibat gempa bumi.



Gambar 3. Contoh kerusakan ringan yang terjadi akibat gempa bumi

2. Kerusakan Sedang

Kerusakan sedang yang terjadi akibat gempa bumi ditandai dengan retak besar pada dinding; retak menyebar luas di banyak tempat, seperti pada dinding pemikul beban dan kolom, kemampuan struktur untuk

memikul beban sudah sebagian berkurang, 30 sampai dengan 50% komponen struktur utama mengalami kerusakan dan retak dengan lebar celah lebih besar dari 6 mm. Gambar 4 memperlihatkan contoh kerusakan sedang yang terjadi akibat gempa bumi.



Gambar 4. Contoh kerusakan sedang yang terjadi akibat gempa bumi

3. Kerusakan Berat

Kerusakan berat yang terjadi akibat gempa bumi ditandai dengan dinding pemikul beban terbelah dan roboh, kegagalan komponen-komponen pengikat menyebabkan bangunan terpisah. Kira-kira lebih dari 50% komponen struktur utama mengalami kerusakan dan bangunan menjadi sangat berbahaya. Penanganan cepat yang perlu diberikan adalah bangunan perlu dikosongkan sedangkan penanganan jangka panjang yaitu dirobohkan atau restorasi dan diberi perkuatan. Kebanyakan kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi di Indonesia seperti di Padang dan Palu menyebabkan bangunan-bangunan rumah tinggal mengalami kerusakan yang berat. Gambar 5 memperlihatkan contoh kerusakan berat yang terjadi akibat gempa bumi.



Gambar 5. Contoh kerusakan berat yang terjadi akibat gempa bumi

C. Standar Pengujian Ketahanan Geser Untuk Elemen Struktur Pada Bangunan Gedung Akibat Beban Siklik Lateral

Beban siklik adalah beban yang diterima oleh suatu struktur berupa beban bolak-balik yang dapat disimulasikan di laboratorium. Kegagalan suatu 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 yang terjadi sehingga dapat menyebabkan kegagalan pada struktur tersebut. 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 T. 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 longitudinal 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 T. 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.

Donlan, J. D., and Madsen, B. (1992) melaporkan uji siklik statis dari dinding dengan tinggi ke panjang rasio 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)

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

H = Tinggi spesimen (m)

L = Panjang spesimen (m)

- c. Rasio daktilitas, cyclic (D), n — rasio ultimate perpindahan (Δu) dan perpindahan hasil (Δ 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 daktilitas berdasarkan 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 $\Delta_u^2 < \frac{2A}{K_e}$, diasumsikan $P_{yield} = 0,85 P_{peak}$

Dimana :

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

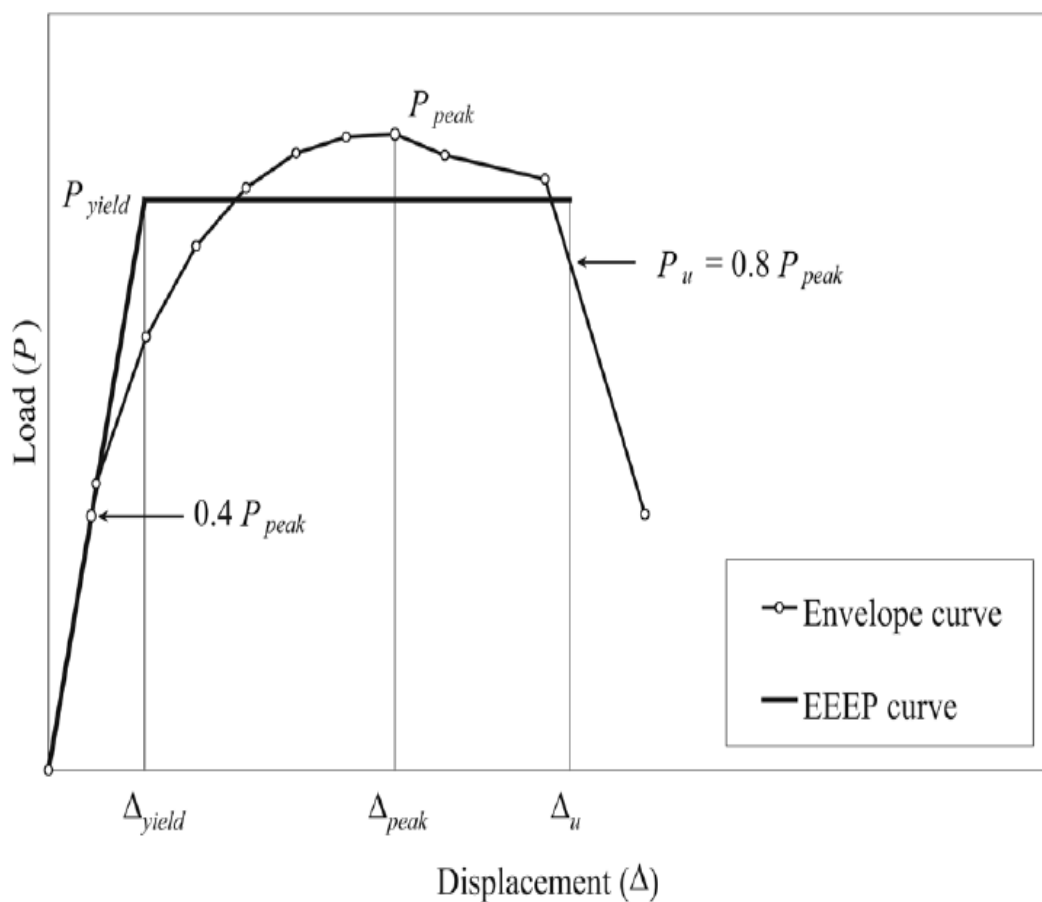
A = Area di bawah kurva envelope spesimen dari perpindahan nol ke puncak (Δu)

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

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

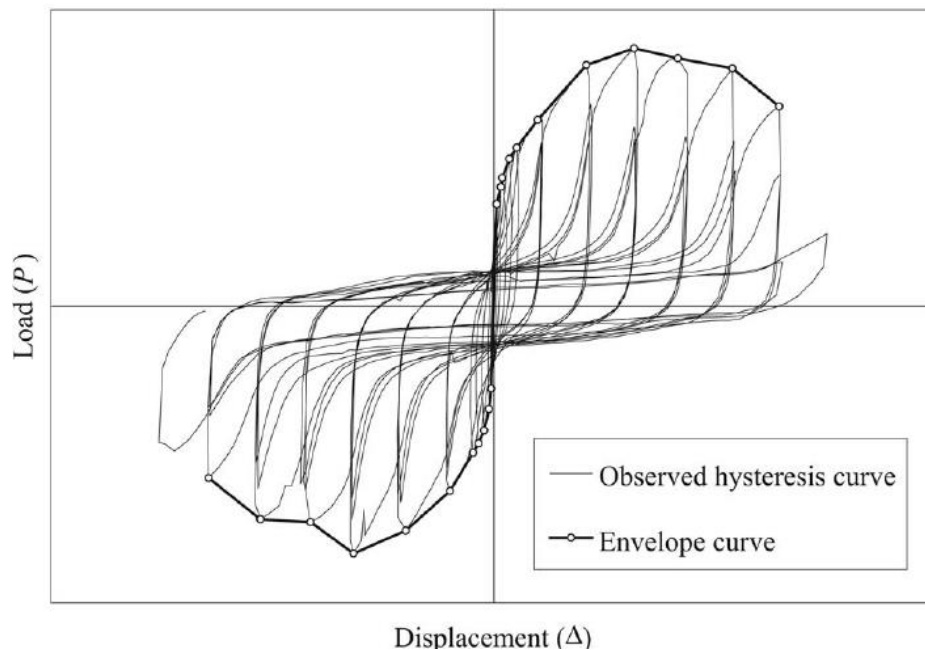
K_e = $0,4 P_{peak} / \Delta_e$

Kekakuan geser elastis, kekuatan geser dan daktilitas spesimen ditentukan dengan melakukan pengujian spesimen ke pembalikan penuh (bolak balik) beban geser secara siklik. 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 B = *ISO 16670 Protocol*). Gambar 6 memperlihatkan parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada $P_u = 0,8 P_{peak}$.

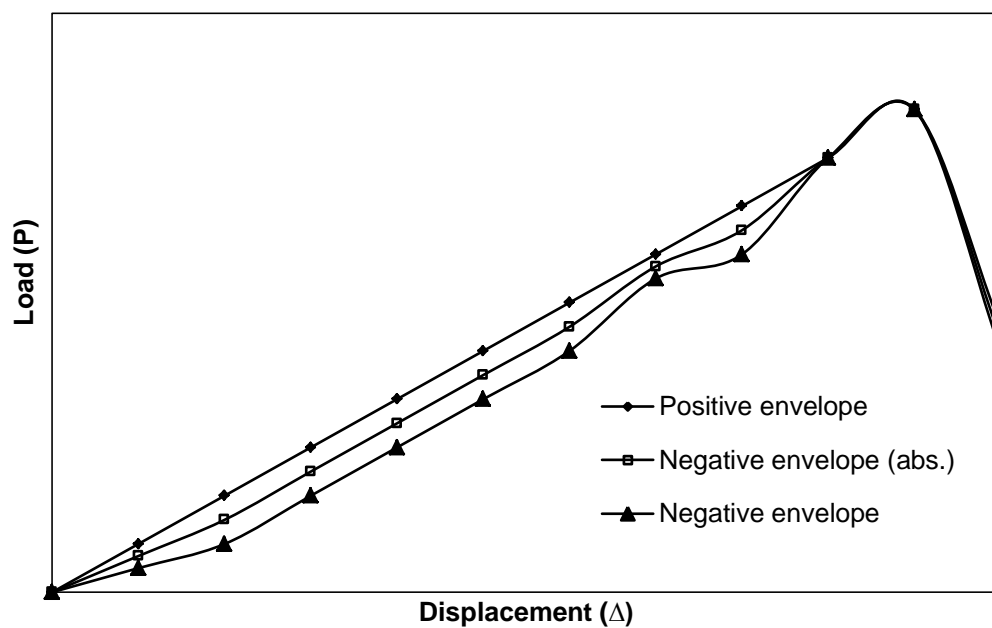


Gambar 6. Parameter kinerja spesimen: (B) titik terakhir pada $P_u = 0,8 P_{peak}$ (dilanjutkan)

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

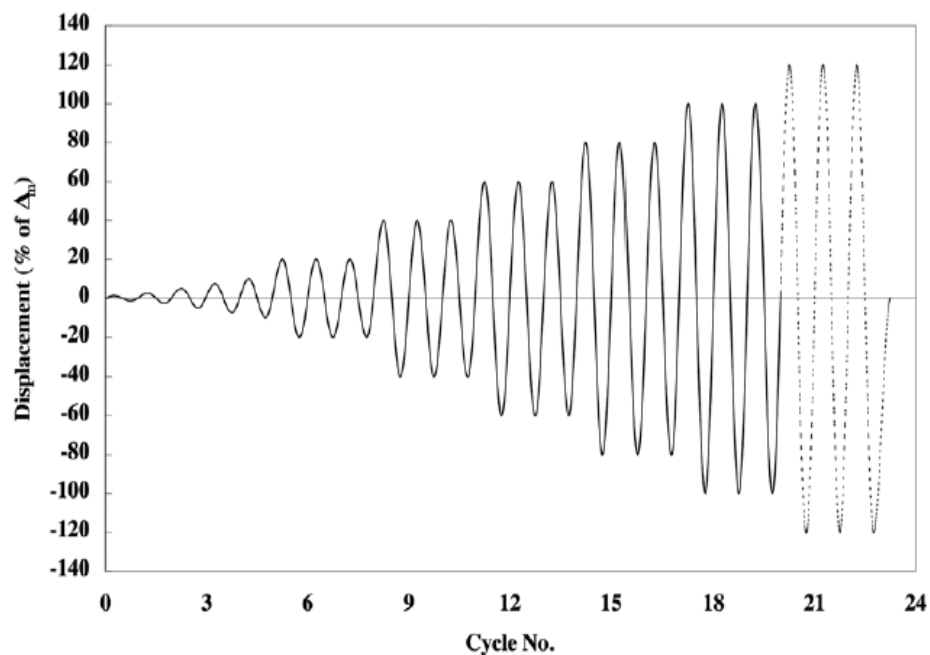


Gambar 7. Contoh kurva histeresis teramati dan kurva envelope untuk metode pengujian B (dilanjutkan)



Gambar 8. Contoh rata-rata kurva envelope

Benavent-Climent (2007) mengusulkan suatu model untuk mendekomposisikan kurva histerisis 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 9 memperlihatkan schedule perpindahan siklik untuk metode uji B.



Gambar 9. Schedule perpindahan siklik untuk metode uji B

D. Dinding Bukan Beton Bertulang (Untuk Rumah Tinggal)

Dinding merupakan salah satu elemen bangunan yang membatasi satu ruang dengan ruangan lainnya. Dinding memiliki fungsi sebagai pembatas ruang luar dengan ruang dalam, sebagai penahan cahaya, angin, hujan, debu dan lain-lain yang bersumber dari alam, sebagai pembatas ruang di dalam bangunan, pemisah ruang dan sebagai fungsi arsitektur tertentu. Dinding geser adalah rakitan struktural utama yang digunakan pada bangunan rendah konstruksi untuk menahan beban seismik atau angin. Terdapat tiga jenis dinding secara umum yang terbuat dari material-material ringan (konstruksi kayu, batu bata maupun beton ringan), yaitu (Li, M. dan Lam, F., 2009; Nelson E. L, Wheat D. L. dan Fowler D. W., 1985; Skaggs, T. D. dan Martin, Z. A., 2004; Varoglu E. et al., 2007; Wang, R., Xiao Y. dan Li Z., 2017):

a. Dinding Struktural

Dinding sebagai struktur bangunan (*bearing wall*). Dinding ini berperan untuk menopang atap dan sama sekali tidak menggunakan cor beton untuk kolom (besi beton). Bahan dinding struktural yang biasa digunakan pada suatu bangunan adalah batu bata.

b. Dinding non-struktural

Dinding ini adalah dinding yang tidak menopang beban, hanya sebagai pembatas, apabila dinding ini dirobohkan maka bangunan tetap berdiri. Beberapa material dinding non-struktural diantaranya seperti bata merah, batako, bata ringan, kayu dan kaca.

c. Dinding partisi atau penyekat

Dinding penyekat adalah batas vertikal yang ada di dalam ruangan (interior). Bahan-bahan yang digunakan untuk dinding partisi ini antar lain gypsum, papan kalsium, triplek dan kayu.

1. Dinding Dengan Rangka Kayu

Berbagai penelitian telah dilakukan berkenaan dengan dinding geser yang terbuat dari material ringan yaitu berbahan dasar kayu. Di Amerika Utara, sejumlah besar investigasi eksperimental telah dilakukan untuk mempelajari perilaku dinding rangka kayu. van de Lindt (2004) merangkum total 31 program eksperimental dari 1983 hingga 2001, yang mengevaluasi karakteristik teknik dinding rangka kayu dengan panjang berbeda, jenis selubung, konektor, dan memuat protokol. Sebagai bagian dari CUREE-Caltech Proyek Woodframe, Pardoen et al. (2003) menguji bangunan beberapa lantai yang dindingnya terbuat dari rangka kayu yang digunakan untuk membangun basis pengetahuan parameter sistem dinding secara umum, menghitung seismik tingkat kinerja permukaan dinding selesai, dan pelajari efeknya permukaan akhir pada kinerja seismik. Engineered Wood Association APA juga menguji total 59 dinding dengan rasio aspek yang berbeda untuk memverifikasi metodologi saat ini untuk memperkirakan defleksi dinding geser Skaggs dan Martin 2004.

Di Jepang, sejumlah besar proyek uji juga telah dilakukan dalam dua dekade terakhir, mempelajari perilaku dinding diagonal-bertulang dan berselubung panel, yang umumnya digunakan dalam bangunan kayu P

dan B pasca-dan-balok tradisional. Untuk mengevaluasi resistensi dinding, Sugiyama et al. 1988a melakukan uji coba pada 11 dinding kawat tunggal dan kawat ganda dengan panjang yang berbeda. Efek papan berpihak kalsium silikat pada kapasitas dinding juga dipelajari. Kawai, 1998 melakukan tes monotonik, siklik, dan pseudodinamik pada 12 jenis dinding, dilapisi dengan panel kayu lapis, papan gipsum GWB, atau papan pelapis dinding, dan enam dinding berpihak diagonal, untuk mengevaluasi kinerja dinding.

Pusat Kehidupan yang lebih baik di Jepang CBL 2001 melakukan tes siklik untuk membandingkan kinerja 24 dinding ganda-lapis, kayu lapis, dan selubung OSB dibangun dengan tiga spesies kayu dari Jepang, Kanada, dan Eropa. Okabe et al. 2002 menguji 11 dinding berselubung GWB untuk mengevaluasi kinerja dinding geser. Efek dari berbagai jenis GWB dan pengencang pada kinerja dinding juga diselidiki. Komatsu et al. 2004 melakukan serangkaian tes siklik untuk mempelajari kinerja lateral dari jenis dinding P dan B yang dilapisi dengan panel geser lumpur ukuran kecil yang dibuat di pabrik, yang mudah digunakan dalam konstruksi.

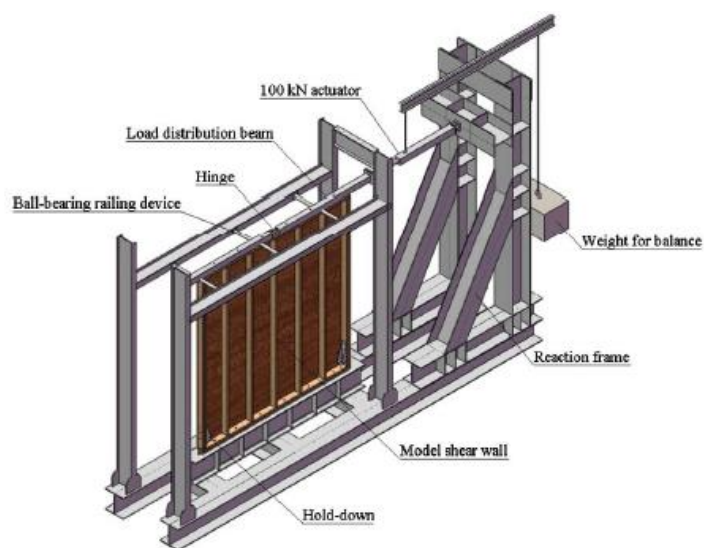
Tes meja goyang dilakukan oleh Yamada *et al.* 2004 untuk membandingkan kinerja seismik dari empat jenis dinding geser P dan B: hanya kerangka; plester yang terselubung, dua kawat pengikat, dan kayu lapis terselubung. Yasumura *et al.* 2006 melakukan uji pseudodynamic pada serangkaian panel kayu lapis satu dan dua lantai yang dilapisi

dinding P dan B. Hasil tes digunakan untuk memverifikasi model bangunan.

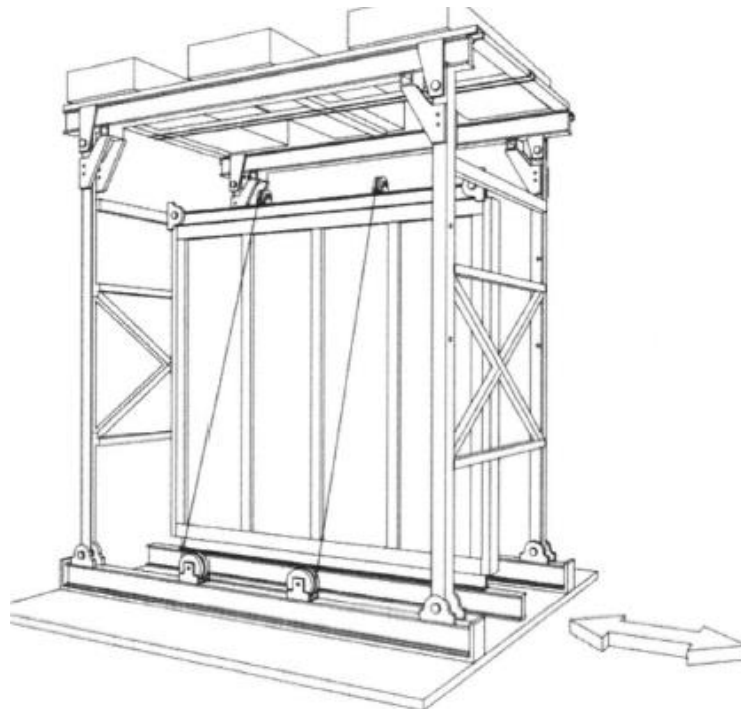
Para peneliti juga telah mengusulkan sejumlah besar model numerik dari berbagai kompleksitas, misalnya model elemen hingga untuk mempelajari perilaku dinding geser kayu. Van de Lindt 2004 menyebutkan serangkaian model kerangka kayu numerik yang diperkenalkan dari 1982 hingga 2001. Dalam model-model ini, representasi yang tepat dari perilaku sambungan selubung-ke-framing mendapat perhatian khusus, karena respons dinding geser global diatur oleh hubungan ini. Foschi, 1977 mengembangkan model diafragma kayu elemen terbatas, di mana panel selubung dimodelkan sebagai elemen pelat, anggota pembingkai dimodelkan sebagai elemen balok, dan sambungan paku dimodelkan sebagai pegas nonlinier dengan hubungan beban-slip yang eksponensial. Foschi, 2000a,b meningkatkan model sambungan kuku dengan mengembangkan model berbasis mekanika baru untuk mensimulasikan respons pengikat logam yang berinteraksi dengan media kayu di sekitarnya. Model ini kemudian diimplementasikan ke dalam model dinding P dan B elemen-terbatas tanpa memasukkan sambungan paku priori pegas Foschi, 2005.

Beberapa model histeresis derajat kebebasan tunggal juga telah diusulkan untuk mewakili perilaku beban global dari dinding geser kayu tertentu Stewart 1987; Sakamoto dan Ohashi 1988; Ceccotti dan Vignoli 1990; Kawai 1998; Folz dan Filiatrault 2004. Model-model ini, yang diwakili

oleh rumus-rumus matematika, adalah murni deskripsi berbasis fenomena karakteristik histeretik dari dinding geser. Rumus matematika, seperti persamaan linear satu demi satu atau persamaan eksponensial, dapat secara eksplisit didefinisikan dengan menyesuaikan kurva beban-drift dari uji dinding geser. Gambar 10 memperlihatkan set up pengujian dinding geser dari kayu dimana terdiri dari actuator untuk pemberian beban bolak balik dan balok beban distribusi. Gambar 11 memperlihatkan set up pengujian dinding geser dengan menggunakan *shaking table* (meja goyang).



Gambar 10. Set up pengujian dinding geser dari kayu



Gambar 11. Set up pengujian dinding geser dengan menggunakan *shaking table* (meja goyang)

Sebagai bagian dari program penelitian kolaboratif pada kinerja seismik bangunan P dan B Jepang antara University of British Columbia dan Building Research Center di Jepang, penelitian ini terutama berfokus pada kinerja lateral dinding kawat tunggal dengan panjang 0,91 m yang, tidak seperti dinding berselubung panel struktural, secara signifikan memiliki perilaku tidak simetris, tergantung pada apakah penahan diagonal berada di bawah tekanan atau kompresi. Tes monotonik dan siklik dilakukan untuk menyelidiki delapan dinding kawat tunggal, dengan dan tanpa selubung GWB tambahan. Model dinding geser yang baru dikembangkan diperkenalkan untuk memodelkan perilaku histeris dinding-dinding ini. Hasil uji shake table dari bangunan P dan B satu lantai yang disederhanakan digunakan untuk memverifikasi model dinding geser.

2. Dinding Dengan Bahan Pengisi Masonry (Batu Bata)

Investigasi eksperimental untuk mengukur kekuatan geser dalam dinding beton pasangan bata telah dilakukan selama 50 tahun terakhir, namun saat ini ada yang relatif kecil dan dari beberapa penelitian yang terfragmentasi dari hasil yang relevan. Hal ini memberikan informasi bahwa beberapa program eksperimental yang tidak mewakili konstruksi.

Saat ini, kode desain pasangan bata *Masonry Standards Joint Committee (MSJC) (2011)* dan *Canadian Standards Association (CSA) S304.1 (2004a)* mengadopsi perilaku untuk memperkirakan kekuatan geser pasangan bata yang berbasis pada hasil dari serangkaian program uji yang dilakukan selama akhir 1970-an dan 1980-an di Amerika Serikat dan Jepang. *The Joint U.S.-Japan Technical Coordinating Committee on Masonry Research (TCCMAR)* mencakup beberapa program penelitian yang bertujuan mengukur kekuatan geser pasangan bata bertulang (RM) dinding struktural dan dermaga. Dari data yang dikumpulkan melalui program TCCMAR, hanya empat program pengujian yang mempresentasikan hasil yang relevan dengan pengembangan kekuatan desain untuk kekuatan geser dari pasangan bata blok berlekuk penuh (Fattal dan Todd 1991). Dinding geser dari batu bata banyak digunakan pada bangunan-bangunan non engineering building.

Program pengujian yang menarik mencakup tiga seri dermaga batu yang dikenakan pada lengkungan ganda (Sveinsson et al. 1985; Okamoto et al. 1987; Matsumura 1987) dan satu seri pasangan bata dinding geser

pada kelengkungan tunggal (Shing et al. 1991). Berdasarkan pengujian yang dilakukan, karakteristik kekuatan geser empiris dapat dikembangkan (Matsumura 1988a; Shing et al. 1990; Anderson dan Priestley 1992) yang berfungsi sebagai dasar untuk dinding geser saat ini dengan ketentuan desain dari peraturan-peraturan yang ada.

Merujuk ke Fattal dan Todd (1991), Voon dan Ingham (2007), dan Davis (2008). Baru-baru ini, Voon dan Ingham (2006) menguji serangkaian enam dinding geser RM menuju pengembangan desain Selandia Baru kode (SANZ) 4230: 2004 (2004), dan El-Dakhkhni et al. (2013) melaporkan hasil percobaan dari serangkaian delapan RM dinding geser untuk mengevaluasi ekspresi desain CSA S304.1 (2004a) saat ini. Kedua studi tersebut menunjukkan bahwa kode Amerika Utara terlalu konservatif jika dibandingkan dengan kode Selandia Baru.

Selain itu, penelitian oleh El-Dakhkhni et al. (2013) menunjukkan bahwa, meskipun dikembangkan untuk beton bertulang (RC), prediksi kekuatan geser dinding pasangan bata yang lebih baik adalah dapat dicapai dengan langsung menerapkan kode desain beton Kanada CSA A23.3 (2004b) karakteristik kekuatan geser. CSA A23.3 (2004b) karakteristik kekuatan geser berasal dari metode yang dijelaskan oleh Bentz et al. (2006), yang juga diusulkan oleh Sarhat dan Sherwood (2011) sebagai prediktor geser yang lebih baik kekuatan balok RM. Gambar 12 memperlihatkan pengujian geser siklik pada dinding geser yang terbuat dari batu bata.



Gambar 12. Pengujian geser siklik dinding geser batu bata (*masonry*)

E. Pola Kegagalan Dinding Rangka Beton Bertulang Dengan Berbagai Material Bahan Pengisi

Pola kegagalan dinding rangka beton bertulang dengan berbagai material bahan pengisi telah dilaporkan oleh berbagai penelitian yang telah dilakukan yaitu :

1. Sagar S. Alit., et al. 2019

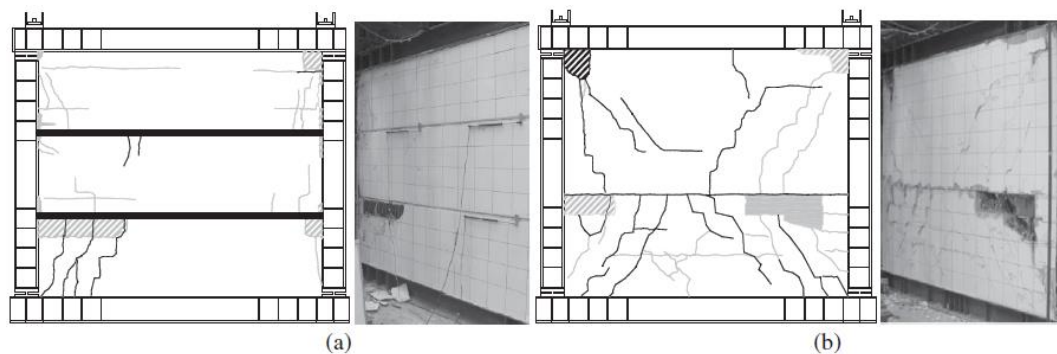
Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada 5 (lima) jenis bahan pengisi pada rangka beton bertulang yang diperkuat dengan berbagai konfigurasi diantaranya mode aplikasi perkuatan bahan pengisi, ankur yang digunakan dan jenis perkuatan bahan pengisi yang dilakukan dengan aplikasi langsung dan aplikasi tidak langsung. Pola kegagalan dapat diklasifikasikan yaitu :

- a. Perpisahan antara permukaan dinding-kolom (Separation at wall-column interface (S)).
- b. Retak geser pada kolom (Shear crack in column (S_c)).
- c. Retak geser gelincir pada bahan pengisi (Shear sliding crack in fill (S_s)).
- d. Tekuk pada besi tulangan longitudinal (Buckling of longitudinal rebar (B)).
- e. Kehancuran pada bahan pengisi (Crushing of infilled (Cb)).
- f. Keruntuhan guling pada panel bahan pengisi (Rockling of infilled panels (R)).
- g. Kerusakan sengkang lateral pada kolom (Fracture of lateral ties in column (F)).
- h. Kuat lentur/lekat pada bahan/serat (Rupture of fabric (R_f)).
- i. Sendi plastis pada ujung kolom (Plastic hinging at column ends (P_H)).
- j. Deformasi dalam bidang yang besar (Large in-of-plane deformations).

2. Pretti M., et al. 2014

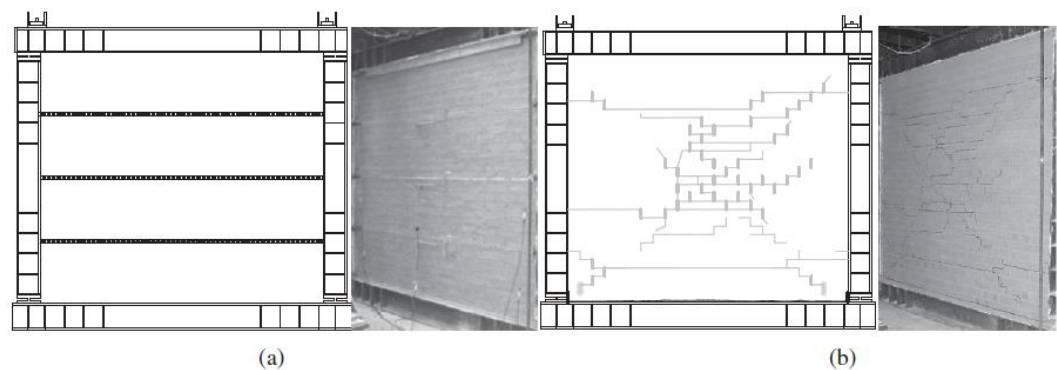
Penelitian yang telah dilakukan pada dinding dengan bahan pengisi yaitu masonri (batu bata). Pola kegagalan yang didapatkan yaitu :

- a. Pola kerusakan dan retak untuk dinding pengisi dari bata tanah liat dengan partisi (a) dan tanpa partisi (b). Pola kerusakan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Pola kerusakan dan retak untuk dinding pengisi dari bata tanah liat dengan partisi (a) dan tanpa partisi (b)

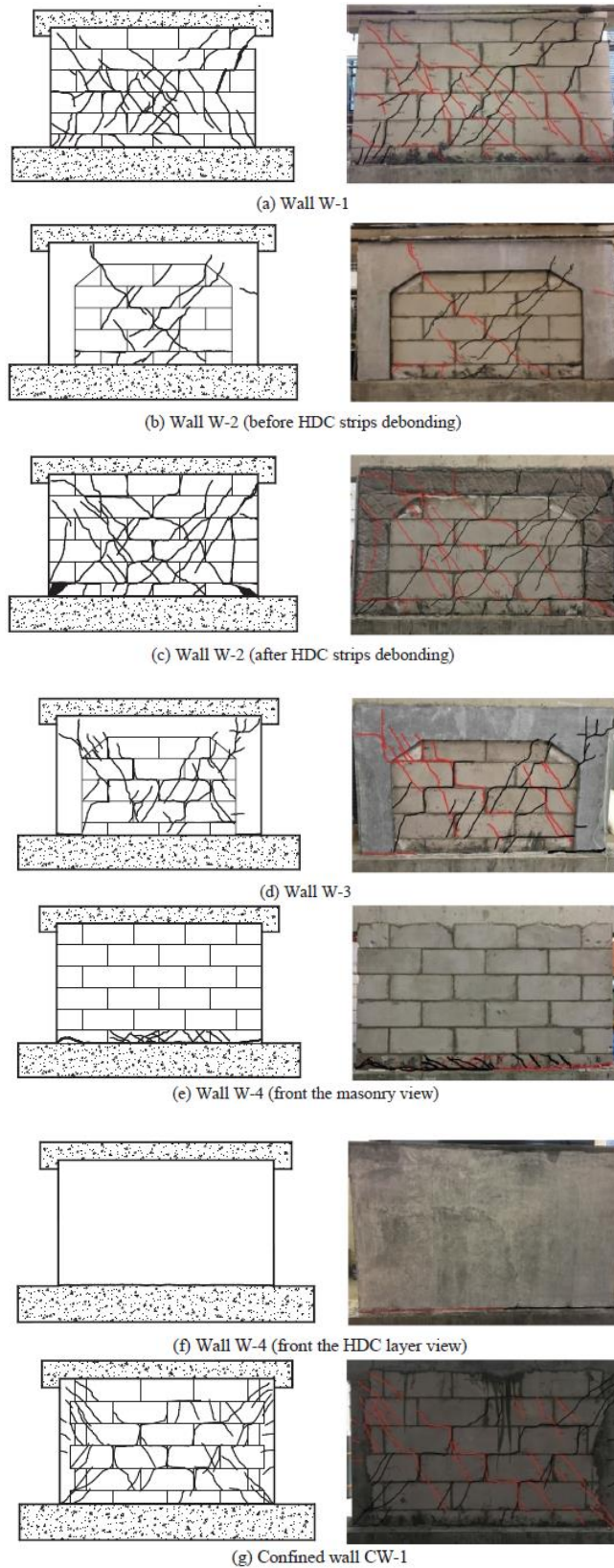
- b. Pola kerusakan dan retak untuk dinding pengisi dari adobe dengan sekat (tidak ada retakan) (a) dan tanpa sekat (b). Pola kerusakan yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Pola kerusakan dan retak untuk dinding pengisi dari adobe dengan sekat (tidak ada retakan) (a) dan tanpa sekat (b)

3. Deng, M., et al. 2020

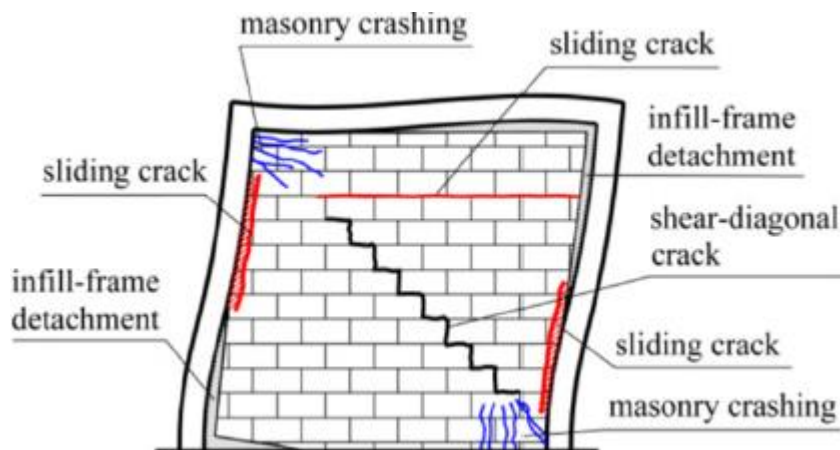
Penelitian yang telah dilakukan pada 7 (tujuh) jenis variasi benda uji dinding dengan menggunakan rangka beton bertulang pada berbagai material bahan pengisi. Pola kegagalan yang dihasilkan yaitu pola diagonal shear, sliding, rocking, and toe-crushing failure. Seperti yang diantisipasi, semua dinding, kecuali benda uji W-4, menunjukkan mode kegagalan geser diagonal, yaitu menunjukkan kerusakan utama.



Gambar 15. Pola retak dan mode kegagalan dinding uji

4. Panto B. and Rossi P. P., 2019

Gambar 16 memperlihatkan pola kegagalan yang dihasilkan pada dinding dengan bahan pengisi batu bata (masonry).

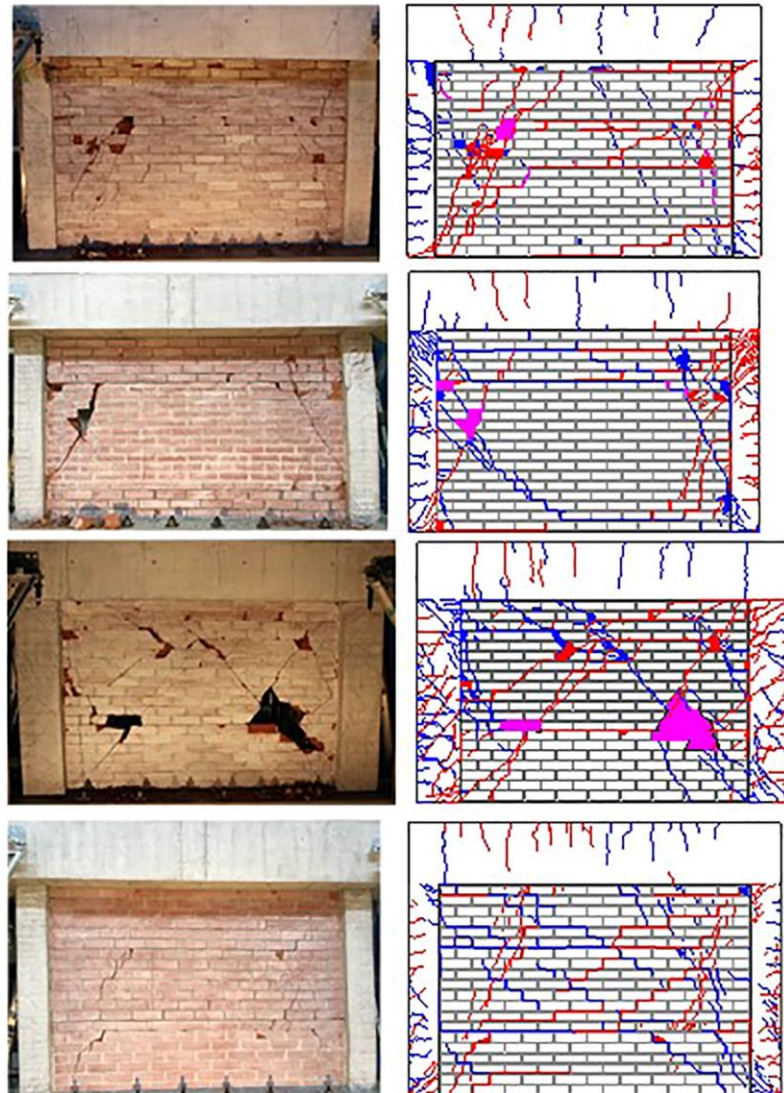


Gambar 16. Pola kegagalan yang diharapkan pada bahan pengisi

Berbagai studi penelitian telah membuktikan bahwa model numerik yang bertujuan untuk mengevaluasi secara akurat respons seismik bangunan berbingkai RC tidak dapat mengabaikan perilaku inelastis pengisi dan interaksi antara elemen pengisi dan elemen rangka.

5. Alwashali H., et al. 2019

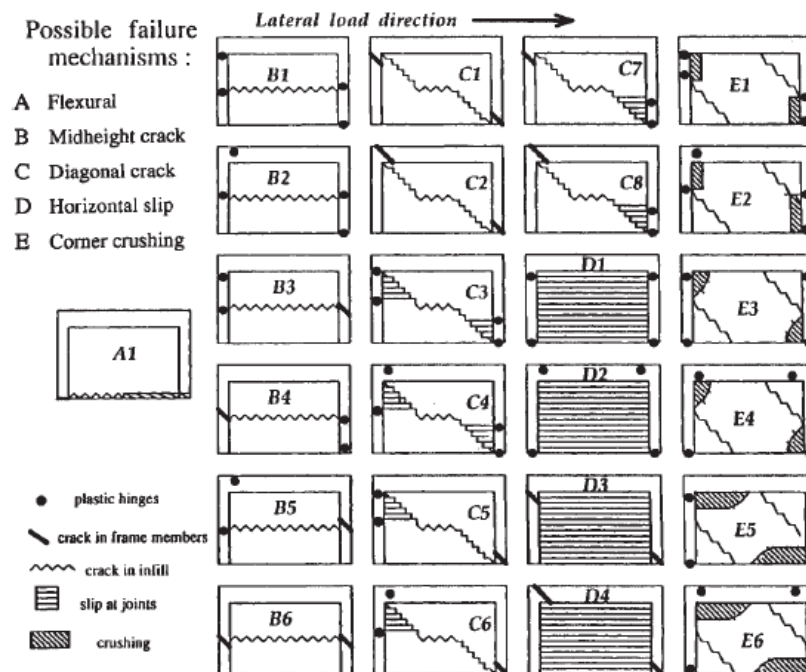
Studi yang mengkaji kapasitas seismik dalam bidang rangka beton bertulang satu lantai berskala tiga dengan dinding pengisi yang mengalami pembebanan lateral siklik secara statis. Tiga parameter utama diselidiki: kekuatan kolom beton bertulang (RC) sekitarnya, kekuatan balok beton bertulang, dan kekuatan mortar pengisi batu. Gambar 17 memperlihatkan pola kegagalan yang dialami oleh dinding rangka beton bertulang dengan menggunakan bahan pengisi.



Gambar 17. Pola kegagalan dinding rangka beton bertulang

6. Singh P. B., and Mehrabi A. B., 2002

Dinding pengisi dari batu sering digunakan sebagai partisi interior dan dinding eksterior pada bangunan. Biasanya diperlakukan sebagai elemen non-struktural, dan interaksinya dengan bingkai pembatas sering diabaikan dalam desain. Kinerja bangunan semacam itu selama gempa bumi telah menarik perhatian besar. Pola kegagalan diperlihatkan pada Gambar 18.



Gambar 18. Mekanisme kegagalan rangka beton bertulang yang diisi

F. Beton Busa

Beton busa adalah bahan konstruksi seluler ringan, yang memiliki kepadatan $400 - 1850 \text{ kg/m}^3$ (Y.H. Mugahed Amran, N. Farzadnia dan A.A. Abang Ali, 2015). 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 kg/m^3 . Bahan konstruksi yang ringan ini memberikan banyak keuntungan, seperti biaya rendah, kapasitas isolasi termal dan suara yang tinggi, dan ketahanan api yang tinggi, untuk industri konstruksi di atas beton konvensional (N. Narayanan dan K. Ramamurthy, 2000; M.A. Othuman dan Y.C. Wang, 2011). Beton busa secara khusus digunakan sebagai beton ekonomis dalam konstruksi anggota struktural, partisi,

tanggul jalan, dan kelas pengisian (K. Ramamurthy, E.K. Kunhanan dan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani, 2009).

Struktur bagian dari beton busa diproduksi melalui pengenalan gelembung kecil dalam tiga cara, termasuk penggunaan bahan pembuat pori atau busa, mineral agregat ringan dan agregat butir plastik berbasis polimer dalam beton (A. Kan dan R. Demirbog̃a, 2009; F. Koksall, O. Gencil dan M. Kaya, 2015). Pengenalan gelembung dalam struktur matriks semen dapat menghasilkan perpaduan dan keruntuhan struktur mikro beton (A. Hajimohammadi, T. Ngo dan P. Mendis, 2018).

Oleh karena itu, sifat yang diinginkan dari busa beton dapat menjadi tidak terjangkau. Busa sintetis dan berbasis protein adalah agen busa yang paling umum (Y.H. Mugahed Amran, N. Farzadnia dan A.A. Abang Ali, 2015). Beberapa penelitian menyelidiki sifat-sifat beton busa yang dibuat dengan sintetis (mis. I.S. Ranjani dan K. Ramamurthy, 2010; A. Ben Fraj, M. Kismi dan P. Mounanga, 2010; A. Shams *et al.*, 2015) atau agen busa berbasis protein (mis. A. Benazzouk, *et al.*, 2006; C. Bing, W. Zhen dan L. Ning, 2012; K. Jitchaiyaphum, T. Sinsiri dan P. Chindaprasirt, 2011; D.K. Panesar, 2013). Studi yang ada mengungkapkan bahwa, dibandingkan dengan agen busa sintetis, penggunaan agen busa berbasis protein dalam beton menghasilkan gelembung sel yang lebih tertutup dan struktur mikro yang lebih kuat, yang mengarah ke jaringan air-void yang lebih stabil dalam beton (P.J. Tikalsky, 2004).

Nambiar dan Ramamurthy, 2007 mengungkapkan bahwa beton busa dengan distribusi ukuran udara-lebih sempit menunjukkan kekuatan yang lebih tinggi. Kearsley dan Wainwright, 2001 melaporkan bahwa kepadatan dan porositas secara signifikan mempengaruhi kekuatan tekan beton busa. Sang G. et al. 2015 menunjukkan bahwa rasio air-ke-pengikat (w/b) adalah salah satu parameter yang paling berpengaruh pada porositas beton busa dan porositas beton busa meningkat dengan peningkatan w/b. Mugahed Amran et al. 2015 melaporkan bahwa jumlah zat busa yang berlebihan lebih dari 20% dari volume campuran beton menyebabkan berkurangnya stabilitas dan peningkatan pemisahan campuran. Neville, 1995 melaporkan bahwa kekuatan tekan beton busa dengan kepadatan 360-1.400 kg/m³ biasanya antara 1 dan 10 MPa. Jones *et al.* 2003 menunjukkan bahwa beton busa menunjukkan penyusutan 5-10 kali lebih tinggi daripada beton konvensional.

Tidak seperti beton berbobot normal, beton busa tidak dapat dikenai jenis pemadatan atau getaran apa pun yang akan memengaruhi kerapatan desainnya. Oleh karena itu, karakteristik baru yang penting dari beton busa adalah sifat mudah mengalir dan kompatibilitas.

Beton busa adalah pasta semen ataupun mortar, diklasifikasikan sebagai beton ringan, di mana rongga udara terperangkap dalam mortar oleh agen busa yang sesuai. Beton busa memiliki daya alir tinggi, bobot rendah, konsumsi agregat minimal, kekuatan rendah terkontrol, dan sifat insulasi termal yang sangat baik. Dengan kontrol yang tepat dalam dosis

busa, berbagai kepadatan ($1600-400 \text{ kg/m}^3$) beton berbusa dapat diperoleh untuk aplikasi struktural, partisi, isolasi dan nilai pengisian.. Meskipun bahan tersebut dipatenkan pertama kali pada tahun 1923.

G. Karakteristik Fisik Beton Busa

Sifat mekanis beton keras dapat diklasifikasikan sebagai (1) sifat jangka pendek atau sesaat dan (2) sifat jangka panjang. Sifat jangka pendek adalah (1) kekuatan tekan, tarik dan geser, dan (2) kekuatan yang diukur dengan modulus elastisitasnya. Sifat jangka panjang dapat diklasifikasikan dalam rangkai dan susut. Namun, pada penelitian ini hanya membahas kuat tekan beton saja. Beton baik dalam menahan tegangan tekan dari pada jenis tegangan yang lain dan umumnya pada perencanaan struktur beton memanfaatkan sifat ini.

a. Slump

Slump adalah penurunan ketinggian pada pusat permukaan atas beton yang diukur segera setelah cetakan uji *slump* diangkat. Pengujian *slump* merupakan suatu teknik untuk memantau homogenitas dan *workability* adukan beton segar dengan suatu kekentalan tertentu yang dinyatakan dengan satu nilai *slump*. Dalam kondisi laboratorium, dengan material beton yang terkendali secara ketat, nilai *slump* umumnya meningkat sebanding dengan nilai kadar air campuran beton, dengan demikian berbanding terbalik dengan kekuatan beton. Tetapi dalam pelaksanaan di lapangan harus hati-hati, karena banyak faktor yang

berpengaruh terhadap perubahan adukan beton pada pencapaian nilai *slump* yang ditentukan, sehingga hasil *slump* yang diperoleh di lapangan tidak sesuai dengan kekuatan beton yang diharapkan. (SNI 1972:2008).

b. Berat Volume Beton

Berat volume menurut SNI 1973:2016 adalah berat per satuan volume. Berdasarkan SNI 1973:2016 untuk menghitung berat volume (*density*) beton dalam kondisi segar dapat digunakan persamaan 4.

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

D = Densitas beton (kg/m³)

M_c = Massa wadah ukur yang diisi beton (kg)

M_m = Massa wadah ukur (kg)

V_c = Volume wadah ukur (m³)

Untuk menghitung berat volume (*density*) beton dalam kondisi bebas udara dapat digunakan persamaan 5.

$$D = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana :

D = Densitas beton dalam kondisi bebas udara (kg/m³)

M = Massa total dari semua material dalam campuran (kg)

V = Volume absolut total dari komponen material dalam campuran (m³)

c. Kuat Tekan

Kekuatan tekan dapat dicapai sampai 14000 psi atau lebih, bergantung pada jenis campuran, sifat-sifat agregat, serta lama dan kualitas perawatan. Kekuatan beton yang paling umum digunakan adalah sekitar 3000 psi (20.684 N/mm²) sampai 6000 psi (41.368 N/mm²), dan beton komersial dengan agregat biasa, kekuatannya sekitar 300 psi (2.068 N/mm²) sampai 10000 psi (68.947 N/mm²). Kekuatan tekan f'_c ditentukan dengan silinder standar (berukuran 6 in x 12 in) yang dirawat dibawah kondisi standar laboratorium pada kecepatan pembebanan tertentu, pada umur 28 hari. Spesifikasi standar yang dipakai di Amerika Serikat biasanya diambil dari ASTM C-39. Perlu dipahami bahwa kekuatan silinder karena perbedaan pepadatan dan kondisi perawatan. (Nawy, E. G. 1998).

Kuat tekan beban beton adalah besarnya beban per satuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya tekan tertentu, yang dihasilkan oleh mesin tekan. Berdasarkan SNI 1974:2011, kuat tekan beton dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima benda uji selama pengujian dengan luar penampang melintang.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

f'_c = Kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm^2)

Dalam penelitian ini, kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan maksimum f'_c dengan satuan N/mm^2 atau MPa (Mega Pascal). Besarnya kuat tekan beton dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a) Jenis semen dan kualitasnya, mempengaruhi kuat tekan rata-rata dan kuat batas beton.
 - b) Jenis dan tekstur bidang permukaan agregat.
 - c) Perawatan beton harus diperhatikan, sebab kehilangan kekuatan akibat pengeringan sebelum waktunya adalah sekitar 40%.
 - d) Suhu mempengaruhi kecepatan pengerasan.
 - e) Umur, pada keadaan normal kekuatan beton bertambah dengan umurnya.
- d. Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah beton ringan dilakukan pada umur 3 hari, 7 hari dan 28 hari dengan menggunakan silinder 100 mm x 200 mm masing-masing sebanyak 3 sampel. Pada pengujian tarik belah pada penelitian ini mengacu pada SNI 03-2491-2012. Kuat tarik belah dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$f'_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

f'_{ct} = Kuat tarik belah (N/mm^2)

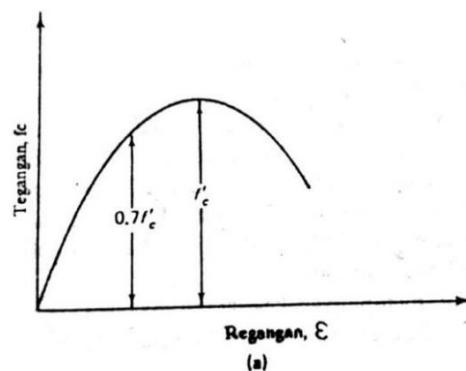
P = Beban maksimum (N)

L = Panjang benda uji silinder (mm)

D = Diameter benda uji silinder (mm)

e. Kurva Tegangan-Regangan

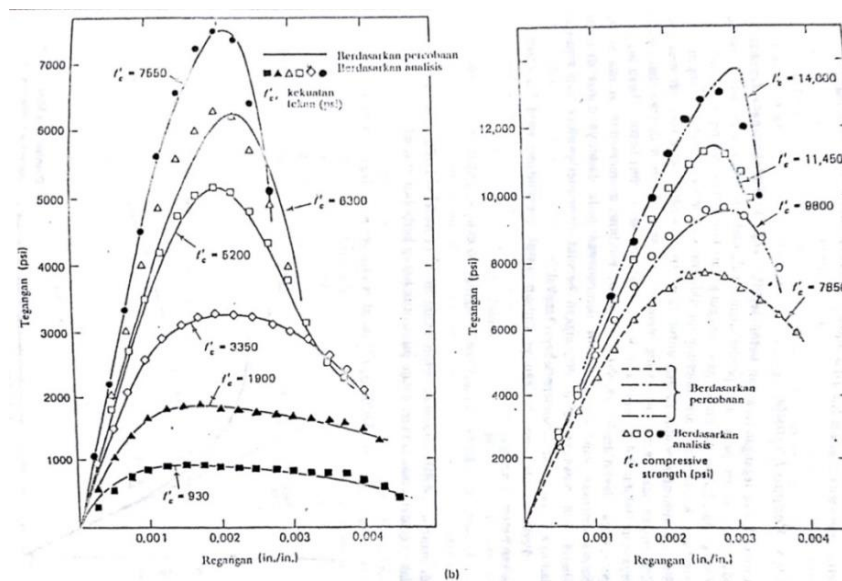
Hubungan tegangan regangan beton perlu diketahui untuk menurunkan persamaan-persamaan analisis dan desain juga prosedur-prosedur pada struktur beton. Gambar 19 memperlihatkan kurva tegangan regangan tipikal yang diperoleh dari percobaan dengan menggunakan benda uji silinder beton dan dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit.



Gambar 19. Kurva tegangan-regangan tipikal beton (Nawy, E. G. 1998)

Bagian pertama kurva ini (sampai sekitar 40% dari f'_c) pada umumnya untuk tujuan praktis dapat dianggap linear. Sesudah mendekati 70% tegangan hancur, materialnya banyak kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram. Pada beban batas, retak yang searah dengan arah beban menjadi sangat terlihat dan hampir semua silinder beton (kecuali yang kekuatannya sangat rendah) akan segera hancur. Gambar 20 memperlihatkan kurva tegangan regangan beton

untuk berbagai kekuatan yang diperoleh dari Portland cement Association. Terlihat jelas bahwa (1) semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan hancurnya, (2) semakin tinggi kekuatan tekan beton, panjang bagian linier pada kurva semakin bertambah; dan (3) ada reduksi daktalitas apabila kekuatan beton bertambah (Nawy, E. G. 1998).

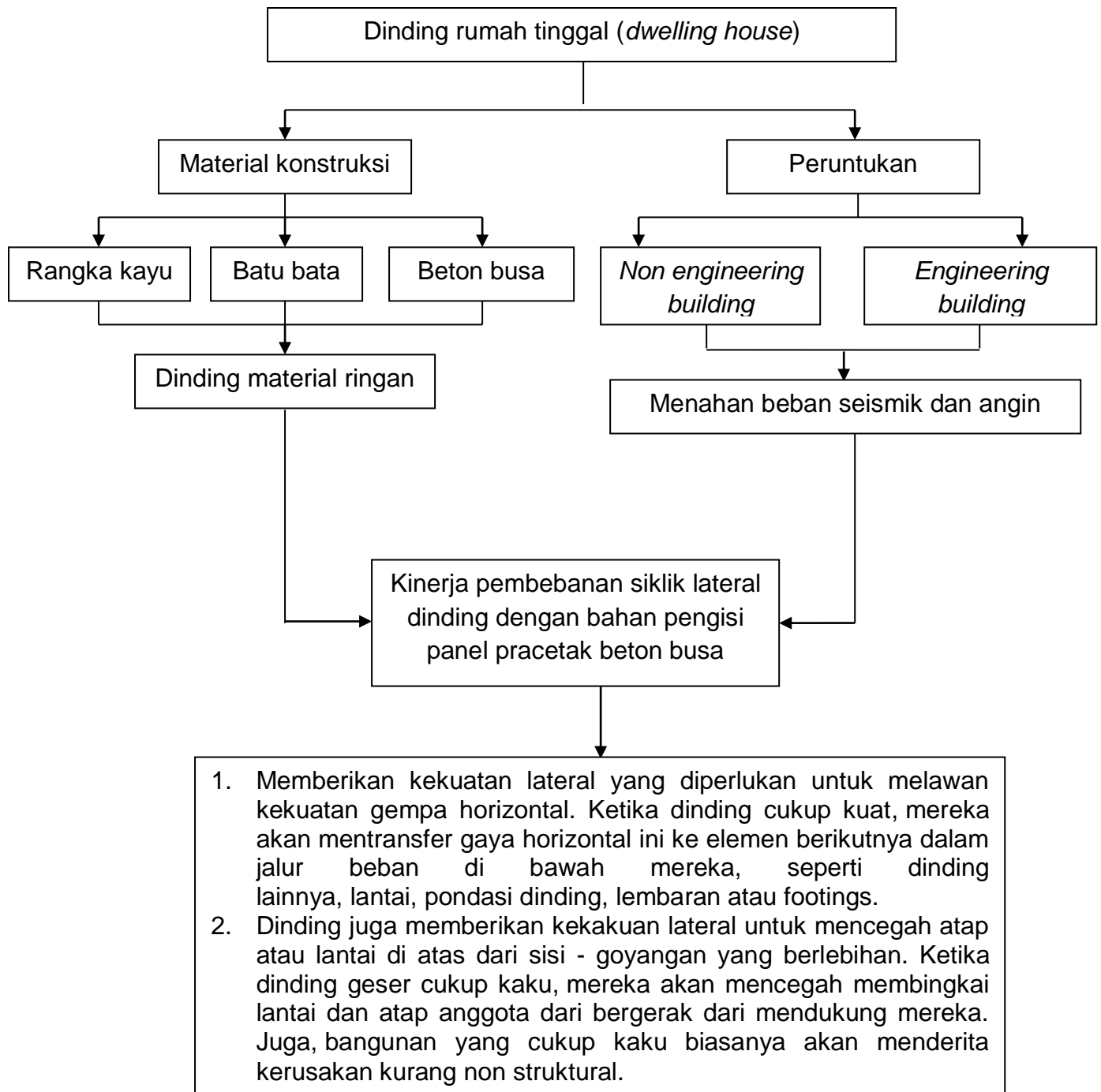


Gambar 20. Kurva tegangan-regangan untuk berbagai kekuatan beton (Nawy, E. G. 1998)

H. Kerangka Pikir Penelitian

Ide pokok dari penelitian ini adalah menggunakan campuran beton busa sebagai upaya untuk menurunkan berat material dinding dan mampu menahan gaya geser akibat gempa yang terjadi, di mana penggunaan material campuran beton busa yang dimaksudkan adalah untuk memanfaatkan sebagai material bahan pengisi berupa panel pracetak

beton busa. Beberapa kelebihan yang muncul akibat sifat yang ringan ini dapat terlihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Kerangka pikir penelitian