

**PENGARUH PENGGUNAAN *BRACING* PADA DINDING
PASANGAN BATU BATA DENGAN *OPENING* TERHADAP
RESPON GEMPA**

TESIS

PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL

MINAT TEKNIK STRUKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



CLAUDIUS SUNAMI SANJOYO

NIM. 166060100111017

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

TESIS

PENGARUH PENGGUNAAN *BRACING* PADA DINDING PASANGAN BATU BATA DENGAN *OPENING* TERHADAP RESPON GEMPA

CLAUDIUS SUNAMI SANJOYO

166060100111017

telah dipertahankan di depan penguji
pada tanggal 25 Juli 2018
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, MS

NIP. 19511211 198103 2 001

Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT

NIP. 19751122 199903 1 003

Malang, Juli 2018

Universitas Brawijaya

Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil

Ketua Program Magister Teknik Sipil

Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

NIP. 19740619 200012 1 002

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

Mahasiswa,

Claudius Sunami Sanjoyo
166060100111017

JUDUL TESIS :

PENGARUH PENGGUNAAN *BRACING* PADA DINDING PASANGAN
BATU BATA DENGAN *OPENING* TERHADAP RESPON GEMPA

Nama Mahasiswa : Claudius Sunami Sanjoyo

NIM : 166060100111017

Program Studi : Magister Teknik Sipil

Minat : Teknik Struktur

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, MS

Anggota : Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Wisnumurti, MT

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Lilya Susanti, ST., MT

Tanggal Ujian : 25 Juli 2018

SK Penguji : 1576 Tahun 2018

Karya ilmiah ini kutujukan kepada

Bapa Paskalis Tukul Sugito dan Mama Thomasine Tigar Rensiana da Cunha,

Kedua Saudara dan Semua Keluarga,

Kekasih hati Maria Clemensia Nona Amsi

RIWAYAT HIDUP

Claudius Sunami Sanjoyo, 08 November 1992 anak dari Bapak Paskalis Tukul Sugito dan Ibu Thomasine Tigar Rensiana da Cunha, menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar sampai Sekolah Menengah Atas di kota Maumere, Flores, Nusa Tenggara Timur. Menamatkan SMA tahun 2010 di SMA Negeri 1 Maumere, lulus program Sarjana Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional Malang tahun 2015.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa atas segala berkat dan bimbingan-Nya.
2. Bapak Ari Wibowo, ST.,MT.,Ph.D selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, MS selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan motivasi, pengarahan dan pemikiran dalam menyelesaikan tesis ini.
4. Bapak Dr. Eng. Achfas Zacoeb, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan pengarahan, dan banyak bantuan dalam proses penyelesaian tesis ini.
5. Teman – teman Teknik Struktur angkatan 2016 yaitu, Benedito Amaral, Vega Aditama, Fachreza Akbar dan Bobby Asukmajaya Raharjo yang selalu memberikan bantuan pemikiran dan tenaga dalam proses penyelesaian penelitian ini.

Sujud dan terima kasih yang dalam penulis persembahkan kepada kedua orang tua Bapa Paskalis Tukul Sugito dan Mama Thomasine Tigar Rensiana da Cunha yang telah memberi doa, motivasi dan semangat bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini.

Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada kekasih hati tercinta Maria Clemensia Nona Amsi yang telah memberi doa dan semangat bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini.

Malang, Juli 2018

Penulis

PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan kasih dan rahmat-Nya sehingga dapat terselesaikannya penulisan tesis yang berjudul “**Pengaruh Penggunaan *Bracing* pada Dinding Pasangan Batu Bata dengan *Opening* Terhadap Respon Gempa**” ini dengan baik.

Adapun penulisan tesis ini adalah sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar magister teknik jurusan Teknik Sipil. Penulisan tesis ini terselesaikan berkat dukungan yang sangat berarti dari berbagai pihak.

Penulis menyadari dalam penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran dan kritik untuk membangun dari berbagai pihak sangat diperlukan. Penulis berharap semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat diterima dalam menambah wawasan serta pengetahuan bagi pembaca.

Malang, Juli 2018

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
RINGKASAN	xi
SUMMARY	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Tujuan Penelitian.....	3
1.6 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Material Penyusun Dinding.....	5
2.1.1 Batu bata.....	5
2.1.2 Mortar	6
2.2 Material Penyusun Bracing	8
2.2.1 Tulangan baja	8
2.2.2 Tulangan bambu	8
2.3 Perilaku Tegangan pada Dinding Pasangan Batu Bata	9
2.3.1 Kuat tekan.....	9
2.3.2 Pengujian kuat tekan prisma dengan metode ASTM C-1314 ...	11
2.3.3 Kuat geser.....	11
2.3.4 Pengujian kuat geser dinding dengan metode ASTM E-519	14
2.4 Deformasi Dinding dengan Metode Elemen Hingga	15
2.5 Dissipasi Energi Untuk Redaman Histerisis	15
2.6 Daktilitas Struktur	17
2.7 Pembebanan Geser dan Respon Dinding	17
2.8 Pengaruh Opening pada Dinding Pasangan Batu Bata	18
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN	
3.1 Kerangka Konsep Penelitian	21
3.2 Hipotesis Penelitian.....	23

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1	Tempat dan Waktu Penelitian	25
4.2	Alat dan Bahan Penelitian	25
4.3	Analisis Bahan	26
4.4	Rancangan Penelitian	26
4.5	Prosedur Penelitian	31
4.6	Tahapan Pembebanan	33
4.7	Variabel Penelitian	34
4.8	Diagram Alir Penelitian	35

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1	Bahan Penyusun Beton	39
5.1.1	Agregat halus	39
5.1.2	Agregat kasar	39
5.2	Perencanaan Campuran Beton	40
5.3	Kuat Tekan Beton	41
5.4	Material Spesi (Mortar)	42
5.5	Material Batu Bata	43
5.6	Tulangan Baja dan Bambu	45
5.7	Dinding Pasangan Batu Bata	46
5.7.1	Kuat tekan	46
5.7.2	Kuat geser	47
5.8	Respon Gempa Dinding Pasangan Batu Bata	48
5.8.1	Uji beban monotonik	48
5.8.2	Uji beban siklik (<i>quasi static</i>)	50
5.9	Daktilitas Struktur	57
5.10	Disipasi Energi	58
5.11	Analisis Teoritis	59
5.12	Pengaruh Opening pada Dinding Pasangan Batu Bata	63

BAB VI PENUTUP

6.1	Kesimpulan	67
6.2	Saran	68

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Ukuran batu bata menurut SNI 15-2094-2000	6
Tabel 2.2	Nilai kuat tekan batu bata menurut SNI 15-2094-2000.....	6
Tabel 2.3	Ketentuan gradasi pasir menurut ASTM C144-91	7
Tabel 2.4	Beberapa persamaan modulus elastisitas pasangan batu bata ...	10
Tabel 2.5	Faktor koreksi terhadap rasio ketebalan (h_p/t_p)	11
Tabel 4.1	Spesifikasi benda uji.....	31
Tabel 4.2	Jenis variabel penelitian	34
Tabel 5.1	Hasil uji agregat halus	39
Tabel 5.2	Hasil uji agregat kasar (kerikil)	40
Tabel 5.3	Formulir perencanaan campuran beton (<i>mix design</i>)	40
Tabel 5.4	Hasil uji kuat tekan beton	41
Tabel 5.5	Hasil uji kuat tekan mortar	43
Tabel 5.6	Hasil uji kuat tekan batu bata	44
Tabel 5.7	Hasil uji kuat tarik baja Ø 6 mm	45
Tabel 5.8	Hasil uji kuat tarik baja Ø 8 mm	45
Tabel 5.9	Hasil uji kuat tarik baja Ø 10 mm	46
Tabel 5.10	Hasil uji kuat tarik bambu 8 mm x 8 mm.....	46
Tabel 5.11	Hasil uji kuat tekan prisma	47
Tabel 5.12	Hasil uji kuat geser prisma	48
Tabel 5.13	Hasil uji monotonik dinding.....	49
Tabel 5.14	Hasil uji siklik dinding	56
Tabel 5.15	Hasil perhitungan daktilitas dinding.....	57
Tabel 5.16	Hasil perhitungan teoritis	60
Tabel 5.17	Nilai sifat mekanis bahan yang dimasukkan dalam analisa MEH	61
Tabel 5.18	Hasil perhitungan nilai deformasi MEH dan eksperimen	61
Tabel 5.19	Tegangan bahan.....	63
Tabel 5.20	Tegangan geser maksimum struktur dinding menggunakan <i>ABAQUS Software</i>	61

Tabel 5.21 Perbandingan nilai beban maksimum dan deformasi maksimum antara dinding tanpa <i>opening</i> (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011) dan dinding dengan <i>opening</i>	64
--	----

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Bata merah	5
Gambar 2.2	Durabilitas tulangan bambu dan baja pada sebuah elemen beton	9
Gambar 2.3	Perilaku tegangan-regangan pada dinding.....	10
Gambar 2.4	Mekanisme kegagalan pada dinding pasangan batu bata	10
Gambar 2.5	Sampel pengujian kuat tekan prisma ASTM C-1314.....	11
Gambar 2.6	Kurva interaksi kompresi geser	12
Gambar 2.7	Ekivalensi gaya bracing pada dinding	13
Gambar 2.8	Skema pengujian kuat geser prisma pasangan batu bata	14
Gambar 2.9	Bentuk kurva tipikal histeristik.....	16
Gambar 2.10	Perilaku kurva histeristik akibat retak geser diagonal	18
Gambar 2.11	Pengaruh dimensi opening pada dinding.....	19
Gambar 3.1	Diagram alir konsep penelitian.....	22
Gambar 4.1	Konfigurasi benda uji dengan model <i>knee bracing</i>	27
Gambar 4.2	Detailing penulangan benda uji dengan model <i>knee bracing</i>	28
Gambar 4.3	Konfigurasi benda uji dengan model <i>inverted V-bracing</i>	29
Gambar 4.4	Detailing penulangan benda uji dengan model <i>inverted V-bracing</i>	30
Gambar 4.5	Setting pengujian benda uji dan model pembebanan pada loading frame.....	33
Gambar 4.6	Diagram alir penelitian	35
Gambar 5.1	Uji kuat tekan silinder beton.....	41
Gambar 5.2	Uji kuat tekan spesi mortar	42
Gambar 5.3	Perbandingan ukuran bata normal dan bata terskala	43
Gambar 5.4	Uji kuat tekan batu bata	44

Gambar 5.5 Uji kuat tekan prisma	47
Gambar 5.6 Uji kuat geser prisma.....	48
Gambar 5.7 Hubungan beban-perpindahan uji monotonik dinding	49
Gambar 5.8 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding tanpa <i>bracing</i>	51
Gambar 5.9 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan <i>knee bracing</i> baja	52
Gambar 5.10 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> baja.....	53
Gambar 5.11 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan <i>knee bracing</i> bambu	54
Gambar 5.12 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> bambu	55
Gambar 5.13 Luas kurva selubung menggunakan program bantu <i>AutoCAD</i>	58
Gambar 5.14 Disipasi energi total.....	59
Gambar 5.15 Perbandingan beban geser teoritis dan eksperimen.....	60
Gambar 5.16 Perbandingan nilai deformasi MEH dan Eksperimen	61
Gambar 5.17 Hasil analisa menggunakan <i>ABAQUS Software</i>	62
Gambar 5.18 Perbandingan beban maksimum uji monotonik dan siklik.....	64
Gambar 5.19 Perbandingan deformasi maksimum uji monotonik dan siklik.....	65

DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Uji Bahan Penyusun Beton
Lampiran 2	Uji Sifat-sifat Mekanis
Lampiran 3	Uji Monotonik Dinding
Lampiran 4	Uji Siklik Dinding
Lampiran 5	Perhitungan Teoritis
Lampiran 6	Dokumentasi Penelitian

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RINGKASAN

Claudius Sunami Sanjoyo, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2018, *Pengaruh Penggunaan Bracing pada Dinding Pasangan Batu Bata dengan Opening Terhadap Respon Gempa*, Dosen Pembimbing : Sri Murni Dewi dan Achfas Zacoeb.

Indonesia merupakan negara rawan gempa bumi. Sifat dinding yang lemah terhadap lentur dan geser merupakan kelemahan utama sehingga seringkali mengalami kerusakan parah akibat gempa. Penambahan *bracing* pada dinding dapat meningkatkan kapasitas tahanan dinding terhadap gaya gempa. Pemakaian *bracing* diagonal terkadang sulit untuk diterapkan apabila adanya *opening* untuk pintu dan jendela. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan *bracing*, tipe *bracing* dan jenis tulangan *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa, deformasi, daktilitas dan disipasi energi pada dinding pasangan batu bata dengan *opening*.

Dalam penelitian ini digunakan dua model *bracing*, yaitu *knee bracing* dan *inverted v-bracing*. Model benda uji menggunakan dinding pasangan bata merah terkekang dengan dimensi dinding 120cm × 100cm, dimensi balok kolom praktis 7cm × 7cm dan dimensi *opening* 70cm × 30cm dimodelkan *single opening* pada tengah bentang. Material tulangan *bracing* menggunakan baja dan bambu.

Berdasarkan hasil penelitian untuk pengujian monotonik, model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 162% dan deformasi menurun sebesar 4%. Untuk model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 89% dan deformasi menurun sebesar 31%. Selain itu untuk model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 251% dan deformasi menurun sebesar 17%. Pada model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 132% dan deformasi menurun sebesar 49%. Selain itu untuk beban siklik, model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 187% dan deformasi meningkat sebesar 144%. Untuk model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 151% dan deformasi meningkat sebesar 42%. Pada model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 402% dan deformasi meningkat sebesar 29%. Untuk model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 187% dan deformasi meningkat sebesar 28%. Perbedaan model *bracing* dan jenis material tulangan *bracing* mempengaruhi penambahan kekuatan tahanan gempa dan penurunan deformasi. Model dinding dengan model *inverted v-bracing* memiliki kemampuan tahanan beban gempa yang paling besar untuk masing-masing jenis tulangan. Nilai daktilitas antara dinding *bracing* tulangan bambu dan tulangan baja menunjukkan perbedaan dimana material tulangan *bracing* bambu memiliki nilai daktilitas yang lebih kecil. Kemampuan disipasi energi yang terbesar terjadi pada dinding dengan *bracing* tulangan baja baik untuk model *knee* maupun *inverted v-bracing*. Jumlah energi total yang diserap kedua model *bracing* cenderung sama. Ini menunjukkan bahwa pengaruh model *bracing* tidak berpengaruh secara signifikan dalam kemampuan disipasi energi.

Kata kunci : *dinding dengan opening, bracing, kekuatan, beban siklik, respon gempa*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SUMMARY

Claudius Sunami Sanjoyo, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, July 2018, *The Effect of Bracing on Masonry Wall with Opening to Earthquake Response*, Academic Supervisor : Sri Murni Dewi and Achfas Zacoeb.

Indonesia is a country that prone to earthquakes. The weak wall properties toward flexural and shear force is the main weaknesses so often damaged heavily because of earthquake. The bracing addition at the wall able to increase the wall resistance strength in facing the earthquake. The diagonal bracing use often difficult to implement if there is opening for window and doors.

In the research, it is used two bracing model, that is knee bracing and inverted v-bracing. The specimen model is by using masonry wall constrained with wall dimension 120 cm × 100 cm, dimension of practical column beam 7 cm × 7 cm and opening dimension 70 cm × 30 cm is modeled single opening at the center of span. Bracing reinforcement material by using steel and bamboo.

Based on the results of the research for monotonic testing, the wall model with knee bracing from steel reinforcement the strength increased 162% and deformation decreased 4%. For the wall model with knee bracing from bamboo reinforcement the strength increased 89% and deformation decreased 31%. In addition to the wall model with inverted v-bracing from steel reinforcement the strength increased 251% and deformation decreased 17%. On the wall model with inverted v-bracing from bamboo reinforcement the strength increases 132% and deformation decreases 49%. In addition to cyclic loading, the wall model with knee bracing from the steel reinforcement the strength increase 187% and deformation increased 144%. The wall model with knee bracing from the bamboo reinforcement the strength increase 151% and deformation increased 42%. At the wall model with inverted v-bracing from the steel reinforcement the strength increase 402% and deformation increased 29%. For wall model with inverted v-bracing from bamboo reinforcement the strength increased 187% and deformation increased by 28%. The bracing model differences and the bracing reinforcement material type influence the earthquake resistance strength and deformation decrease. Wall models with inverted v-bracing models have the greatest ability of earthquake load resistance for each type of reinforcement. The ductility value between bracing walls of bamboo reinforcement and steel reinforcement shows the difference that bamboo bracing materials have a smaller ductility value. The greatest energy dissipation capability occurs on walls with steel reinforced bracing for both knee and inverted v-bracing models. The total amount of energy absorbed by both models of bracing tends to be the same. This shows that the influence of the bracing model has no significant effect on energy dissipation capability.

Keywords : Wall with opening, bracing, strength, cyclic load, earthquake response.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang terletak pada jalur pertemuan antara tiga lempeng besar dunia, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Pasifik dan Lempeng Australia, sehingga menjadikan Indonesia negara yang rawan terjadi gempa bumi. Berdasarkan data gempa yang dirilis oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika dalam periode satu tahun antara Juli 2016 sampai Juli 2017 tercatat telah terjadi 6056 kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia (BMKG, 2017). Ini menunjukkan aktifitas kegempaan di wilayah Indonesia sangat tinggi.

Peran perencanaan bangunan tahan gempa merupakan keharusan guna meminimalisir resiko kerusakan bangunan maupun korban jiwa akibat gempa bumi. Salah satu elemen yang paling rentan mengalami kerusakan yang parah akibat beban gempa adalah dinding. Penggunaan dinding pasangan batu bata di Indonesia telah dikenal sejak lama dan hampir digunakan pada setiap bangunan karena mudah dalam pelaksanaan dan biaya yang lebih terjangkau. Dinding merupakan material yang bersifat non-elastis, non-homogen dan anisotropis (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011).

Pada umumnya di Indonesia, dinding dianggap bukan merupakan elemen struktural namun berfungsi sebagai elemen pelengkap dan pemisah antarruang bangunan sehingga tidak adanya perencanaan struktur yang spesifik untuk dinding. Sifat dinding yang lemah terhadap lentur dan geser merupakan kelemahan utama dari dinding sehingga elemen dinding seringkali mengalami kerusakan yang parah akibat gaya gempa. Salah satu metode perkuatan pada dinding untuk menaikkan kekuatan dan kekakuan dinding yaitu dengan menggunakan *bracing*.

Penggunaan *bracing* masih belum umum di Indonesia padahal dengan adanya penambahan *bracing* pada dinding dapat meningkatkan kapasitas tahanan dinding terhadap gaya gempa. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011), penggunaan *bracing* diagonal menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dinding tanpa *bracing* dalam hal meningkatkan kekuatan dan kekakuan dinding terhadap respon gempa dan meningkatkan daktilitas dinding.

Pemakaian *bracing* diagonal terkadang sulit untuk diterapkan apabila adanya *opening* pada dinding untuk pemasangan pintu dan jendela. Ini menunjukkan sisi kelemahan dari *bracing* diagonal penuh, padahal dengan adanya *opening* pada dinding dapat menurunkan kekakuan dan kekuatan lateral pada dinding (Prasad, Rahman, & Chandradhara, 2012), (Voon & Ingham, 2008). Untuk mengatasi permasalahan tersebut digunakan dua model *bracing*, yaitu *knee bracing* dan *inverted v-bracing* sebagai pengaku dinding. *Knee bracing* dipasang dua arah pada joint balok-kolom searah diagonal dinding sedangkan untuk *inverted v-bracing* dipasang dua arah membentuk huruf V terbalik dari balok menuju tumpuan. Material tulangan *bracing* yang dipakai menggunakan material baja dan bambu. Material bambu dipilih sebagai bahan alternatif karena lebih mudah didapatkan dan dari segi biaya lebih murah dibandingkan baja namun memiliki kekuatan yang menyerupai baja. Maka dalam penelitian ini menggunakan dua material, yaitu material baja dan bambu sebagai tulangan *bracing* dan membandingkan pengaruh penggunaan *bracing* dari bahan baja dan bambu terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata dibandingkan dengan dinding tanpa menggunakan *bracing*.

1.2 Identifikasi Masalah

Saat ini dinding pasangan batu bata hanya dianggap sebagai elemen pelengkap bukan struktural sehingga tidak ada perencanaan struktur yang baik dalam pelaksanaan pekerjaan dinding pasangan batu bata. Padahal dinding merupakan elemen yang rentan mengalami kerusakan parah apabila terkena beban gempa. Penggunaan *bracing* diagonal penuh pada dinding sering terkendala apabila terdapatnya bukaan (*opening*) pada dinding, misalnya untuk pemasangan pintu dan jendela sehingga untuk kasus dinding dengan *opening* digunakan dua model *bracing*, yaitu *knee bracing* dan *inverted v-bracing* yang diharapkan mampu menaikkan kapasitas tahan dinding terhadap beban gempa.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah yang menjadi fokus dalam penelitian ini antara lain :

1. Seberapa besar pengaruh penggunaan *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata?
2. Seberapa besar pengaruh tipe *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata?

3. Seberapa besar pengaruh perbedaan penggunaan bahan baja dan bambu sebagai tulangan pada *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata?
4. Seberapa besar pengaruh penggunaan *bracing* terhadap daktilitas dan kemampuan disipasi energi dinding pasangan batu bata?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini antara lain :

1. Penelitian ini difokuskan pada dinding pasangan batu bata untuk rumah sederhana.
2. *Bracing* dipasang dua arah pada daerah joint balok-kolom searah diagonal dinding.
3. Bahan *bracing* menggunakan material baja dan bambu.
4. Pembebebanan gempa diasumsikan sebagai beban *cyclic* dengan mengabaikan faktor waktu.
5. Dinding dimodelkan dengan *single opening* di tengah dinding sebagai bukaan pintu dengan dimensi 0.7 m x 0.3 m.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini antara lain :

1. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata.
2. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh tipe *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata.
3. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perbedaan penggunaan bahan baja dan bambu sebagai tulangan pada *bracing* terhadap kapasitas tahanan beban gempa dan deformasi pada dinding pasangan batu bata.
4. Untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan *bracing* terhadap daktilitas dan kemampuan disipasi energi dinding pasangan batu bata.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang bisa diambil dari penelitian ini antara lain :

1. Dapat menambah ilmu dan wawasan bagi mahasiswa dan praktisi lapangan yang terjun langsung dalam dunia teknik sipil.
2. Dapat memberikan pemahaman mengenai pentingnya perkuatan pada dinding untuk mengurangi efek kerusakan yang ditimbulkan dari gempa.

3. Dapat memberikan alternatif pilihan pada masyarakat dalam pembuatan *bracing* pada dinding pasangan batu bata.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Material Penyusun Dinding

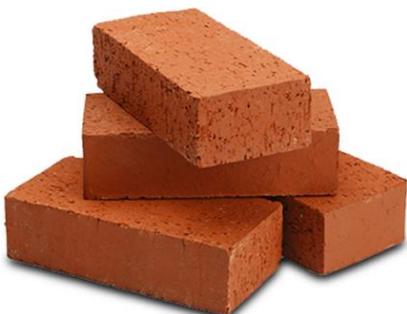
Dinding merupakan material komposit yang terdiri dari batu bata dan mortar sebagai perekat. Dinding adalah elemen penting pada bangunan yang berfungsi sebagai pengaku struktur sehingga meningkatkan kapasitas tahanan struktur terhadap gaya lateral. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh (Maidiawati, Tanjung, & Medriosa, 2017), menunjukkan bahwa penggunaan dinding bata sebagai pengisi pada struktur portal beton bertulang dapat meningkatkan kekuatan lateral struktur portal lebih dari dua kali lipat kekuatan lateral struktur portal tanpa dinding. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan dinding pasangan batu bata pada struktur portal beton bertulang dapat meningkatkan ketahanan lateral terhadap gaya gempa.

Berdasarkan kebutuhan pemakaian, material penyusun dinding dapat di kategorikan antara lain :

- a. Dinding batu alam atau batu kali
- b. Dinding batu-batuan : bata dan batako
- c. Dinding struktural : dinding geser, dinding penahan tanah
- d. Dinding kayu : papan kayu, batang kayu, dan sirap

2.1.1 Batu bata

Batu bata merupakan salah satu material penyusun dinding yang terbuat dari tanah liat yang dicetak berbentuk persegi panjang kemudian di bakar sampai berwarna kemerah-merahan. Batu bata merah yang baik adalah yang keras, tahan terhadap panas, tahan terhadap pelapukan dan memiliki nilai yang ekonomis sehingga bata merah menjadi pilihan utama dalam pembuatan dinding.



Gambar 2. 1 Bata merah

Berdasarkan SNI 15-2094-2000, sifat fisik dan mekanik dari batu bata antara lain :

a. Sifat Fisik

Batu bata harus berbentuk prisma segi empat panjang, mempunyai rusuk-rusuk yang tajam dan siku, bidang sisanya harus datar. Ukuran batu bata yang ditetapkan oleh SNI 15-2094-2000 adalah seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1

Ukuran batu bata menurut SNI 15-2094-2000

Modul	Tebal (mm)	Lebar (mm)	Panjang (mm)
M-5a	65±2	90±3	190±4
M-5b	65±2	100±3	190±4
M-6a	52±3	110±4	230±4
M-6b	55±3	110±6	230±5
M-6c	70±3	110±6	230±5
M-6d	80±3	110±6	230±5

Sumber : SNI 15-2094-2000

b. Sifat Mekanik

Adapun sifat mekanik batu bata menurut SNI 15-2094-2000 antara lain meliputi nilai kuat tekan rata-rata dan koefisien variasi yang diijinkan seperti bisa dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2

Nilai kuat tekan batu bata menurut SNI 15-2094-2000

Kelas	Kekuatan Tekan Rata-rata Batu Bata		Koefisien Variasi Ijin
	(kg/cm ²)	(N/mm ²)	
50	50	5,0	22%
100	100	10	15%
150	150	15	15%

Sumber : SNI 15-2094-2000

2.1.2 Mortar

Mortar (spesi) merupakan bahan material yang terdiri dari campuran pasir, semen dan air yang berfungsi sebagai perekat antara bata pada elemen dinding pasangan batu

bata. Campuran mortar untuk pasangan dinding batu bata umumnya dikerjakan secara manual atau disebut mortar konvensional. Tujuan lain dari penggunaan mortar ialah untuk menutupi ketidakseragaman antara unit batu bata, menambah ketahanan terhadap air, angin dan cahaya.

Menurut (Tjokrodimulyo, 1996) terdapat 4 kelompok mortar berdasarkan jenis bahan pengikatnya, antara lain :

- a. Mortar lumpur, yaitu mortar yang terbuat dari campuran pasir, tanah liat/lumpur dan air
- b. Mortar kapur, yaitu mortar yang terbuat dari campuran pasir, kapur dan air, mortar ini biasa dipakai untuk pembuatan tembok bata
- c. Mortar semen, yaitu mortar yang terbuat dari campuran pasir, semen portland dan air dalam perbandingan campuran yang tepat. Perbandingan antara volume semen dan volume pasir berkisar antara 1:2 dan 1:6 atau lebih besar. Mortar ini kekuatannya lebih besar dari pada mortar kapur dan lumpur, oleh karena itu biasa dipakai untuk tembok, pilar, kolom atau bagian lain yang menahan beban
- d. Mortar khusus, yaitu mortar yang dibuat dengan menambahkan bahan khusus pada mortar kapur dan mortar semen dengan tujuan tertentu.

Pada mortar semen, penggunaan semen portland dimaksudkan agar menjadikan mortar lebih kuat. Menurut ketentuan ASTM C150, semen portland yang digunakan untuk campuran mortar adalah semen tipe I atau II. Sedangkan untuk penggunaan pasir yang sesuai dengan ketentuan ASTM C144-91 adalah sebagai berikut :

Tabel 2. 3
Ketentuan gradasi pasir menurut ASTM C144-91

Ukuran Ayakan	Persen Lolos	
	Pasir Alam	Pasir Buatan
No. 4 (4.75 mm)	100	100
No. 8 (2.36 mm)	95 – 100	95 – 100
No. 16 (1.18 mm)	70 – 100	70 – 100
No. 30 (600 µm)	40 – 75	40 – 75
No. 50 (300 µm)	10 – 35	20 – 40
No. 100 (150 µm)	2 – 15	10 – 25
No. 200 (75 µm)	-	0 – 10

Sumber : (ASTM C-144-91, 1991)

2.2. Material Penyusun *Bracing*

Pengaku (*bracing*) merupakan elemen struktur yang dibuat untuk mencegah struktur mengalami deformasi yang besar pada arah horisontal dan membuat struktur menjadi lebih stabil. Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011), (Hadad, Metwally, & El-Betar, 2014) menunjukkan bahwa penggunaan *bracing* pada portal dinding mampu menaikkan ketahanan lateral dan meningkatkan kekakuan terhadap respon gempa.

2.2.1 Tulangan baja

Baja merupakan material yang memiliki kekuatan tarik yang cukup besar. Dinding merupakan material struktur yang lemah terhadap tarik sehingga untuk menaikkan tahanan tariknya dipasang tulangan baja. Disamping itu, dinding juga material yang lemah terhadap geser sebagai akibat dari gaya gempa.

Faktor ketidaksesuaian antara modulus elastisitas dinding dan tulangan ($n = E_s/E_m$) dan fakta bahwa tegangan baja mempunyai nilai yang jauh lebih besar dapat mengakibatkan retak yang tidak diinginkan pada dinding. Jadi tulangan baja dengan mutu tinggi sangat tidak disarankan (Schneider & Dickey, 1994).

2.2.2 Tulangan bambu

Bambu merupakan bahan konstruksi alami yang telah dikenal sejak lama. Penggunaan bambu sebagai salah satu unsur bahan bangunan selama ini masih bersifat sekunder, yaitu untuk kepentingan pembuatan perancah/ bekisting, reng atap dan terbatas pada keperluan furniture. Hal ini memang disebabkan oleh masih minimnya pengetahuan masyarakat tentang sifat-sifat mekanik bambu. Sementara, ketersediaan bambu cukup banyak, mudah didapat, selain harganya relatif murah, sehingga sangat dimungkinkan untuk menjadi bahan alternatif selain kayu dalam penggunaan material struktur bangunan.

Bambu memiliki berat struktur cukup ringan dengan kekuatan lentur cukup tinggi, sehingga mempunyai ketahanan cukup tinggi terhadap gempa (Handayani, 2007).

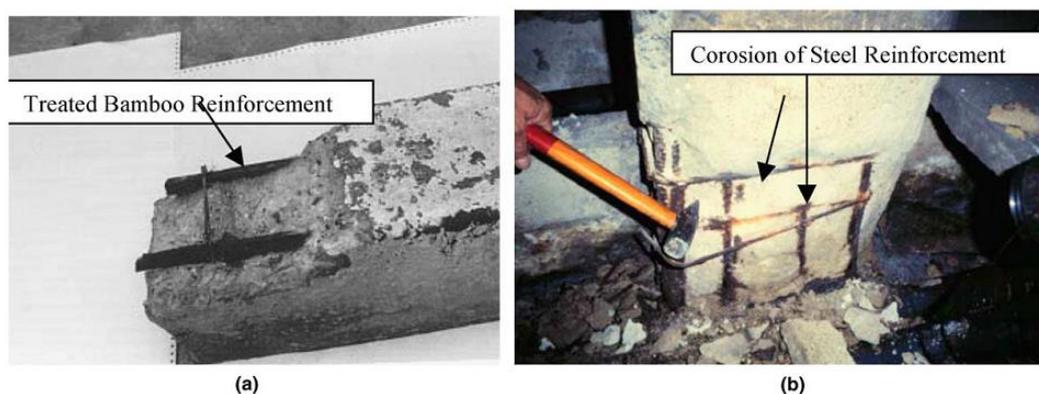
Menurut (Janssen, 1981) faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kekuatan bambu adalah:

- a. Kandungan air, kekuatan tarik bambu akan menurun dengan meningkatnya kandungan air.
- b. Bagian arah melintang bahan, kekuatan tarik maksimum bagian luar batang bambu paling besar dibandingkan dengan bagianbagian yang lain. Kekuatan tarik maksimum yang besar diiringi oleh prosentase serabut sklerenkim yang besar pula.
- c. Ada tidaknya nodia, di dalam inter-nodia sel-selnya berorientasi kearah sumbu aksial sedang di dalam nodia sel-selnya mengarah pada sumbu transversal. Oleh

karena itu, batang-batang yang bernodia mempunyai kekuatan yang lebih rendah daripada batang-batang yang tidak bernodia.

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya menunjukkan bahwa bambu yang ditempatkan pada lingkungan yang baik serta terawat memiliki durabilitas yang tidak kalah dibandingkan dengan baja sehingga dari hasil penelitian tersebut, bambu dapat digunakan sebagai pengganti tulangan baja.

Tulangan baja yang ditempatkan pada lingkungan yang buruk biasanya mengalami korosi setelah 10 tahun pemakaian, sedangkan tulangan bambu masih bisa bertahan setelah kurun waktu pemakaian selama 15 tahun dengan catatan struktur yang menggunakan tulangan bambu ditempatkan pada lingkungan yang baik dan terawat (Ghavami, 2005).



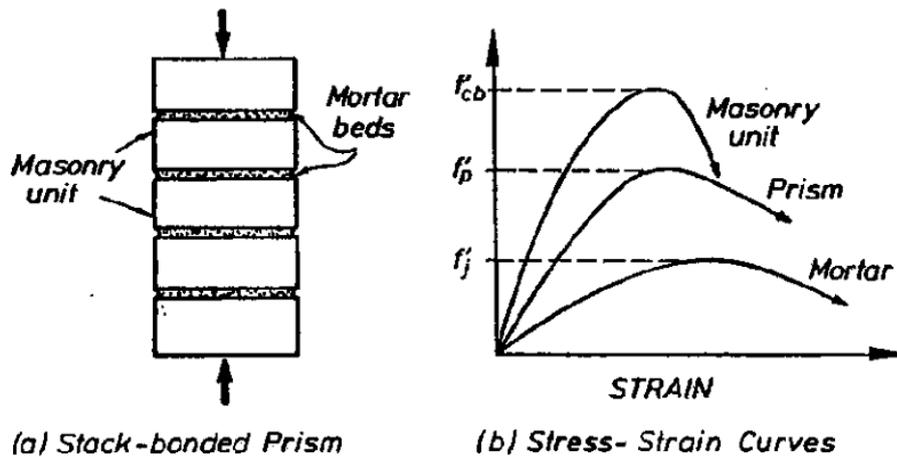
Gambar 2. 2 Durabilitas tulangan bambu dan baja pada sebuah elemen beton
Sumber : (Ghavami, 2005)

2.3. Perilaku Tegangan pada Dinding Pasangan Batu Bata

2.3.1 Kuat tekan

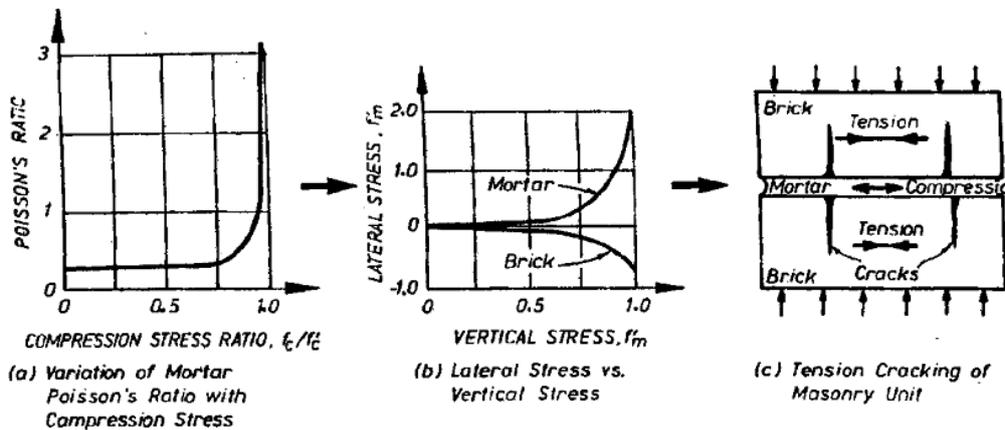
Kuat tekan suatu struktur tergantung dari material penyusunnya. Pada material dinding, kekuatan mortar dan pasta semen sulit untuk diprediksi. Sehingga sebagian besar peraturan desain dinding menggunakan nilai desain yang rendah untuk nilai tegangan tekan f'_m . Sedangkan kuat tekan batu bata mempunyai nilai yang lebih tinggi, namun kekerasan dan sifat batu bata membuat pengujian menjadi sulit dan mahal untuk dibuat, sehingga mayoritas perencana menggunakan rentang kekuatan yang rendah.

Berdasarkan referensi dari (Paulay & Priestley , 1992) kuat tekan dinding pasangan batu bata secara keseluruhan (f'_p) lebih kecil dibandingkan kuat tekan bata (f'_{cb}), akan tetapi masih lebih tinggi dari kekuatan mortarnya (f'_j), seperti yang tunjukkan pada Gambar 2.3. Hal ini berbeda bila dibandingkan dengan kondisi di Indonesia, dimana bata merah di Indonesia cenderung memiliki kekuatan yang lebih rendah daripada kekuatan mortarnya.



Gambar 2. 3 Perilaku tegangan-regangan pada dinding
 Sumber : (Paulay & Priestley , 1992)

Mekanisme kegagalan prisma pasangan batu bata seperti pada Gambar 2.4 sebetulnya hanya terjadi pada kondisi dimana kekuatan bata melebihi kekuatan mortar. Bila kekuatan mortar lebih tinggi dari batu batanya maka akan terjadi sebaliknya yaitu ketika lekatan antara mortar dan batanya tetap sempurna maka mortar yang akan mengalami tegangan tarik. Sehingga perilaku kerusakan pada dinding pasangan batu bata biasanya ditandai dengan lepasnya ikatan dan hancurnya mortar terlebih dahulu, kemudian diikuti dengan kehancuran pada unit batu batanya. Beberapa persamaan modulus elastisitas pasangan batu bata ditunjukkan pada Tabel 2.4.



Gambar 2. 4 Mekanisme kegagalan pada prisma pasangan batu bata
 Sumber : (Paulay & Priestley , 1992)

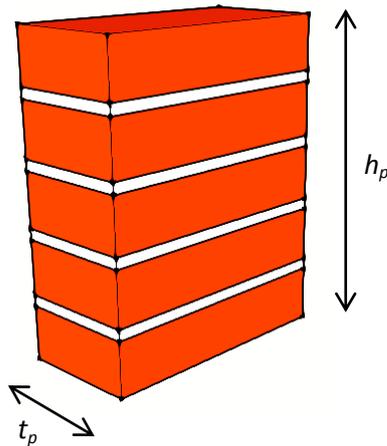
Tabel 2. 4 Beberapa persamaan modulus elastisitas pasangan batu bata

No.	Sumber	Persamaan modulus elastisitas kuat tekan pasangan batu bata
1	(Paulay & Priestley , 1992)	$E_m = 750 f'_m$
2	(FEMA 356, 2000)	$E_m = 550 f'_m$
3	(Kaushik, Rai, & Jain, 2007)	$E_m = 550 f'_m$

Dengan f'_m adalah tegangan tekan pasangan batu bata.

2.3.2 Pengujian kuat tekan prisma dengan metode ASTM C-1314

Nilai kuat tekan pasangan batu bata (f'_m) dapat didekati dengan melakukan uji kuat tekan prisma yang disyaratkan dalam (ASTM C-1314, 2012), yaitu dengan membuat lima lapis tumpukkan bata yang diikat dengan mortar dan diuji tekan menggunakan *Compression Machine Test* sampai mengalami keruntuhan. Dari hasil uji tekan prisma ini juga dapat diketahui pula nilai modulus elastisitas dari pasangan bata.



Gambar 2. 5 Sampel pengujian kuat tekan prisma ASTM C-1314

Dimensi sampel minimal panjang 4 in (100 mm) dan rasio tinggi terhadap tebal (h_p/t_p) diantara 1,3 – 5,0. Untuk mendapatkan nilai kuat tekan prisma pasangan bata merah (kg/cm^2), diambil nilai beban maksimum (kg) dari pengujian dibandingkan dengan luas permukaan sampel prisma pasangan bata merah (cm^2). Nilai kuat tekan yang diperoleh harus dikalikan dengan faktor koreksi (h_p/t_p) sesuai Tabel 2.5.

Tabel 2. 5

Faktor koreksi terhadap rasio ketebalan (h_p/t_p)

h_p/t_p	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Faktor koreksi	0,75	0,86	1,00	1,04	1,07	1,15	1,22

Sumber : (ASTM C-1314)

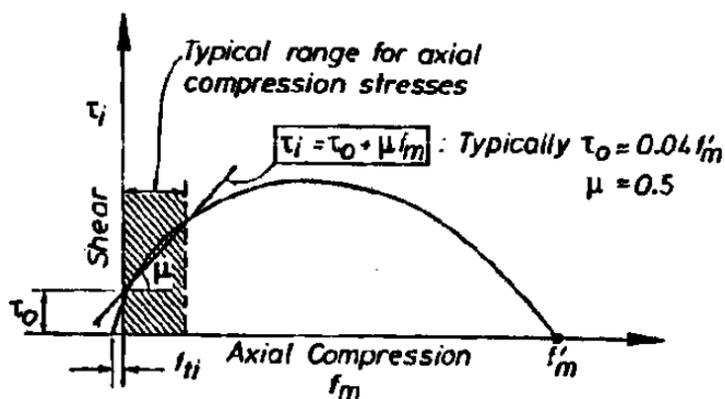
2.3.3 Kuat geser

Keruntuhan bangunan rumah tinggal sederhana yang dibuat dari dinding pasangan batu bata dapat terjadi pada kondisi beban aksial yang cukup rendah, hal ini berarti keruntuhan terjadi terutama akibat kecilnya kekuatan geser struktur dinding tersebut (Wisnumurti, 2013).

Kegagalan geser dapat dihubungkan sebagai retak yang tidak stabil yang terdapat pada bagian ekstrim dinding dalam bentuk retak diagonal. Pendekatan yang sesuai untuk

mengevaluasi kuat geser harus memperhitungkan kedua aspek tersebut (Calvi & Magenes, 1997).

Kuat geser dinding pasangan batu bata dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu arah beban (*out-plane* atau *in-plane*), kekuatan batu bata, tegangan normal sambungan (tegangan aksial akibat pra-pembebanan dan berat sendiri) dan kualitas mortar. Tidak ada metode yang dapat mempresentasikan dengan baik perilaku aktual dari dinding akibat beban gempa dimana kombinasi dari beban siklik bolak-balik pengaruh menjalarnya retak di sepanjang mortar akibat beban lentur dapat mengakibatkan terjadinya reduksi kuat geser aktual bila dibandingkan dengan uji monotonik sederhana dimana retak lentur tidak ada.



Gambar 2. 6 Kurva interaksi kompresi geser
Sumber : (Paulay & Priestley , 1992)

Perbedaan metode pengujian memberikan hasil kuat geser yang berbeda pula. Namun, semua menunjukkan adanya ketergantungan tegangan geser (τ_i) dan tegangan aksial (f_m) (Paulay & Priestley , 1992), (Hendry, Sinha, & Davies, 2004) sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 2.8 dan ditunjukkan pada Persamaan (2-1).

$$\tau = \tau_o + \mu f_m \dots\dots\dots (2-1)$$

dengan :

- τ = kuat geser saat keruntuhan lakatan geser,
- τ_o = kuat lekat geser saat tegangan normal nol,
- μ = koefisien geser antara mortar dan bata,
- f_m = tegangan aksial.

Persamaan di atas dapat merepresentasikan kuat geser pada dinding yang tidak mengalami retak. Namun setelah retak, tegangan tekan lokal akan meningkat mendekati nilai kuat tekan. Dalam kasus tersebut, Persamaan 2-1 tidak valid untuk digunakan. Nilai untuk konstanta τ_o dan μ disesuaikan dengan metode uji dan jenis pasangan bata. Rentang nilai yang biasa diambil untuk konstanta τ_o dan μ adalah $0,1 \leq \tau_o \leq 1,5$ MPa dan $0,3 \leq \mu \leq 1,2$ (Paulay & Priestley , 1992).

Kriteria kekuatan geser dinding yang disarankan SNI 2847:2013 adalah sebagai berikut :

- Tebal dinding bukan penumpu tidak boleh kurang dari 100 mm, atau kurang dari 1/30 jarak terpendek antara komponen-komponen struktur yang memberikan tumpuan lateral.
- Desain penampang yang dikenai geser harus didasarkan pada :

$$\phi V_n \geq V_u \dots\dots\dots (2-2)$$

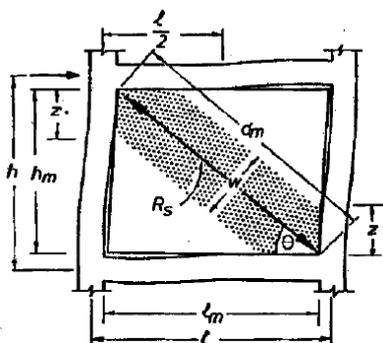
dimana V_u adalah gaya geser terfaktor pada penampang yang ditinjau dan V_n adalah kuat geser nominal yang dihitung dari :

$$V_n = V_c + V_s \dots\dots\dots (2-3)$$

dimana V_c adalah kuat geser nominal yang disediakan dinding dan V_s adalah kuat geser nominal yang disumbangkan tulangan geser.

- V_n pada semua penampang horisontal untuk geser dalam bidang dinding tidak boleh diambil lebih besar dari $0,83\sqrt{f'_c}hd$, dimana h adalah tebal dinding.
- Untuk desain gaya geser horisontal dalam bidang dinding, d harus diambil sama dengan $0,8l_w$. Nilai d yang lebih besar, sama dengan dengan jarak dari serat tekan terjauh ke pusat gaya semua tulangan yang tertarik, boleh digunakan bilamana ditentukan dengan analisis kompatibilitas regangan.

Akibat dari beban gempa pada ujung atas portal dinding dan terjadi kegagalan *sliding*, maka struktur kolom ikut menahan beban tersebut. Tergantung arah datangnya beban, setengah bagian atas kolom pada sisi datangnya beban dan setengah bagian bawah kolom pada sisi yang lain ikut menahan beban. Gaya tekan diagonal ekuivalen (R_s) yang bisa menghancurkan dinding besarnya ditentukan oleh kuat tekan dinding, sudut yang dibentuk garis diagonal dinding dan panjang arah diagonal dinding (Paulay & Priestley , 1992).



Gambar 2. 7 Ekuivalensi gaya *bracing* pada dinding
Sumber : (Paulay & Priestley , 1992)

$$R_s = \frac{0,03f'_m}{1-0,3(h/l)} d_m t \dots\dots\dots (2-4)$$

dengan :

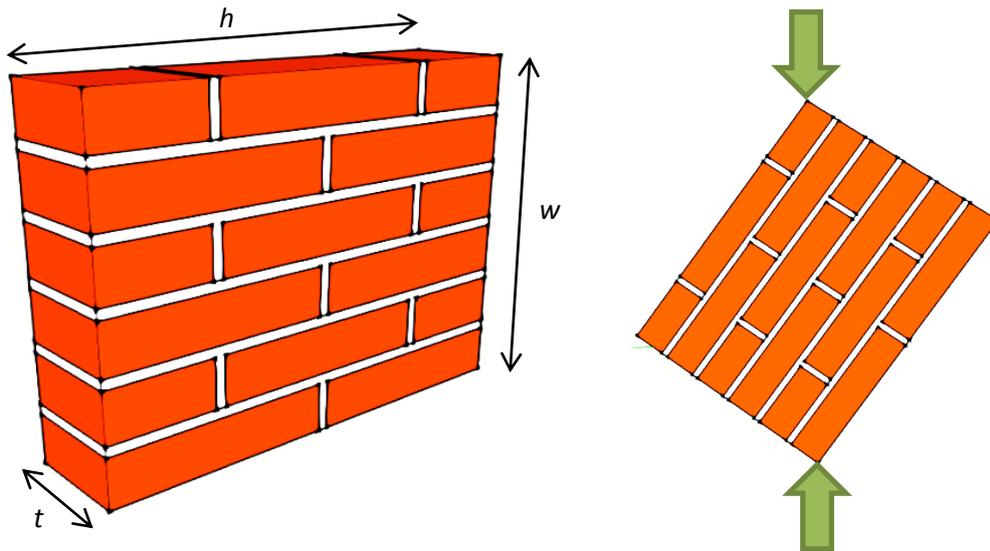
R_s = gaya tekan arah diagonal
 f'_m = kuat tekan dinding
 h = tinggi keseluruhan dinding
 l = lebar keseluruhan dinding
 d_m = panjang diagonal dinding
 t = tebal dinding

Sedangkan untuk lebar ekuivalen diagonal dinding (w) dihitung dengan Persamaan (2-5) :

$$w = 0,25 d_m \dots\dots\dots (2-5)$$

2.3.4 Pengujian kuat geser dinding dengan metode ASTM E-519

Dalam ASTM E-519, kuat geser dinding pasangan batu bata didekati dengan menggunakan pengujian tekan namun posisi sampel diatur secara diagonal. Sampel diberi beban terpusat pada sudut diagonal sampai mengalami keruntuhan. Skema pengujian kuat geser dinding pasangan batu bata bisa dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2. 8 Skema pengujian kuat geser prisma pasangan batu bata

Untuk menghitung kuat geser pada prisma pasangan bata digunakan Persamaan 2-6

$$S_s = \frac{0,707P}{A_n} \dots\dots\dots (2-6)$$

dengan :

S_s = tegangan geser
 P = beban maksimum
 A_n = luas netto prisma pasangan bata

$$A_n = \frac{(w+h)}{2} t_n \dots\dots\dots (2-7)$$

dengan :

w = lebar sampel

h = panjang sampel

t = tebal sampel

2.4. Deformasi Dinding dengan Metode Elemen Hingga

Portal dinding yang menggunakan *bracing* dapat disederhanakan analisis struktur menjadi struktur rangka batang. Diawali dengan merangkai matriks kekakuan elemen masing-masing batang, selanjutnya digabung menjadi matriks kekakuan global. Dengan memasukkan data beban, maka nilai deformasi dari masing-masing titik nodal dapat diketahui. Asumsi yang digunakan agar struktur rangka batang bisa diselesaikan dengan analisis *finite element method* adalah sebagai berikut :

- Tiap-tiap elemen memiliki luas permukaan (A), modulus elastisitas (E) dan panjang elemen (L) yang konstan.
- Derajat kebebasan tiap titik adalah deformasi lokal aksial (pengaruh perpindahan transversal diabaikan).
- Berlaku hukum Hooke, bahwa tegangan aksial σ_x dan regangan aksial ϵ_x dihubungkan dengan persamaan $\sigma_x = E \epsilon_x$

$$k = \left(\frac{AE}{L}\right) \begin{bmatrix} C^2 & CS & -C^2 & -CS \\ CS & S^2 & -CS & -S^2 \\ -C^2 & -CS & C^2 & CS \\ -CS & -S^2 & CS & S^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2-8)$$

sehingga:

$$F = k \times d \dots\dots\dots (2-9)$$

dengan :

$C = \cos \alpha$

$S = \sin \alpha$

F = gaya luar yang terjadi

k = matriks kekakuan global

d = deformasi struktur

α = sudut yang dibentuk

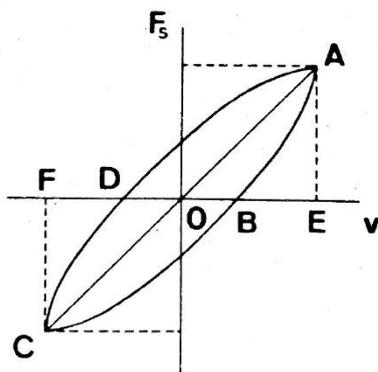
2.5. Disipasi Energi untuk Redaman Histerisis

Disipasi energi dapat didefinisikan sebagai redaman histeristik yang tidak terpengaruh oleh kecepatan struktur tetapi disipasi energi meningkat seiring dengan meningkatnya tingkat perpindahan (Wakabayashi, 1986). Pada Gambar 2.9 menggambarkan satu siklus putaran histerisis yang ditunjukkan dalam kaitannya dengan hubungan defleksi gaya. Masukan energi dari titik D ke titik A diberikan oleh daerah yang

didefinisikan oleh titik DAE. Ketika struktur berpindah dari titik A ke titik B, besarnya energi yang dilepaskan ditunjukkan oleh luasan BAE. Hal yang sama juga berlaku antara titik B dan C dan antara titik C dan D. Sehingga, luasan yang terbentuk dari grafik ABCD merupakan besarnya energi disipasi yang terjadi pada struktur pada satu siklus dari beban siklik bolak balik.

Untuk material yang berperilaku viskoelastis, perilaku histerisisnya juga merupakan faktor utama yang mempengaruhi redaman. Faktor ini adalah yang paling signifikan, khususnya untuk deformasi yang besar seperti yang diakibatkan oleh beban gempa.

Elemen struktur dapat mendisipasikan energi dalam berbagai macam bentuk, seperti viskositas, gesekan dan perilaku histerisis. Sementara itu redaman viskous akan selalu ada walaupun eksitasinya rendah dan biasanya diasumsikan sebesar 5% dari redaman kritis. Bahkan dalam perkiraan eksperimen biasanya mengindikasikan nilai yang lebih rendah, gesekan dan perilaku histerisis biasanya dihubungkan dengan proses kerusakan yang mengakibatkan deformasi permanen (Mangkoesoebroto, Goto, Amri, & Tambunan, 2005).



Gambar 2. 9 Bentuk kurva tipikal histeristik

Sumber : (Wakabayashi, 1986)

Area yang terbentuk dari grafik ABCD menunjukkan energi yang didisipasikan dalam setiap siklus pembebanan, dalam bentuk panas akibat perilaku plastis dari material. Sedangkan energi yang masuk merupakan jumlah dari energi disipasi dan energi elastis yang dapat disimpan. Secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk :

$$E_I = E_E + E_D \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

dengan :

E_I = jumlah energi total

E_E = jumlah energi yang dapat disimpan

E_D = jumlah energi yang didisipasikan

2.6. Daktilitas Struktur

Untuk meminimalisir kerusakan dan memastikan kemampuan struktur dalam menahan gaya lateral akibat gempa, struktur harus mampu mempertahankan kekuatan dan kekakuan sehingga struktur tetap berdiri meskipun mengalami deformasi besar yang melampaui batas elastis dan diambang keruntuhan. Kemampuan elemen struktur untuk bertahan selama fase inelastis merupakan istilah umum dari daktilitas. Secara umum daktilitas adalah perbandingan antara perpindahan total dengan perpindahan pada saat mengalami leleh $\mu = \Delta/\Delta_y > 1$ (Paulay & Priestley, 1992). Kapasitas daktilitas struktur dapat ditingkatkan dengan memasang tulangan pada dinding dimana memungkinkan terjadi sendi plastis. Pengekangan dapat dilakukan dengan mengekang plat pada sambungan mortar yang kritis di daerah sendi plastis (Paulay & Priestley, 1992).

$$\mu_{\Delta} = 1 + \frac{3}{2A_r} (\mu_{\phi} - 1) \left(1 - \frac{1}{4A_r}\right) \dots\dots\dots (2-11)$$

Dimana A_r (aspek rasio) = h_w/l_w dan faktor daktilitas kurvatur $\mu_{\phi} = \phi_u/\phi_y$

dengan :

h_w = tinggi dinding pasangan batu bata

l_w = lebar dinding pasangan batu bata

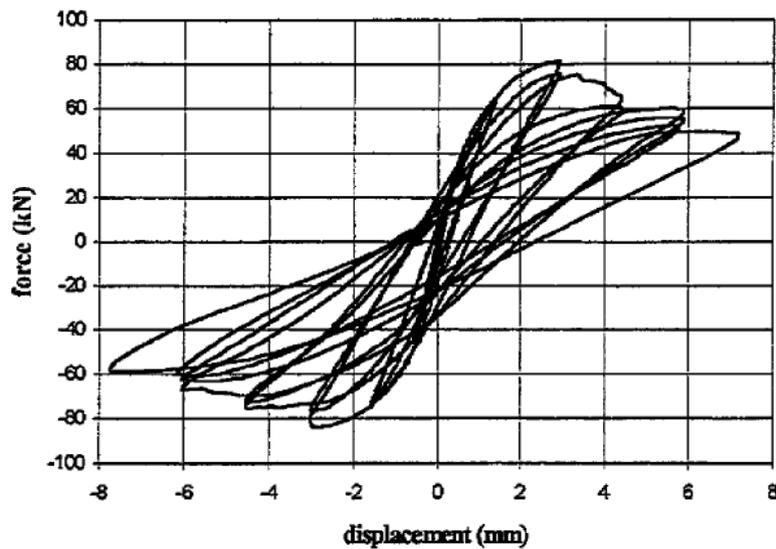
μ_{ϕ} = faktor daktilitas perpindahan

ϕ_u = perpindahan maksimum dinding

ϕ_y = perpindahan leleh, yaitu perpindahan pada saat regangan 0,002

2.7. Pembebanan Geser dan Respon Dinding

Perilaku sebelum retak ditunjukkan dengan bentuk kurva histerisis yang moderat dan mengabaikan faktor degradasi kekuatan maupun kekakuan. Terjadinya retak diagonal yang pertama adalah pada saat beban dikenakan 90% dari nilai beban puncak. Respon paska puncak ditunjukkan dengan disipasi histerisis yang lebih besar dan degradasi kekuatan yang lebih cepat.



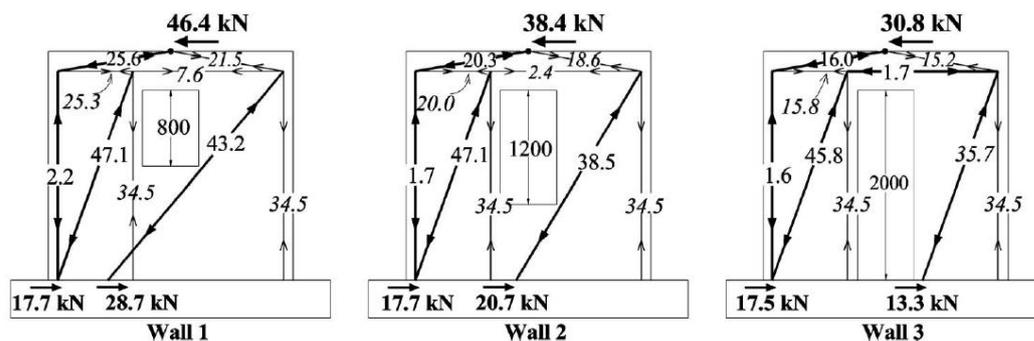
Gambar 2. 10 Perilaku kurva histeristik akibat retak geser diagonal
Sumber : (Calvi & Magenes, 1997)

Perpindahan ultimit didefinisikan sebagai perpindahan pada saat degradasi kekuatan 20% di bawah kekuatan ultimit V_u . Bila jumlah siklus perpindahan puncak tidak sama untuk semua tes, maka referensi dievaluasi dari perpindahan leleh δ_e dan kekakuan *initial* $K_{el} = V_u / \delta_e$. Sedangkan daktilitas adalah δ_u / δ_e . Dimana δ_u adalah perpindahan ultimit. Dari sini dapat diketahui bahwa kekuatan elastis initial adalah kekuatan pada saat retak mulai terjadi yang didominasi bagian tarik dari mortar pada bagian tekan. Disisi lain, perpindahan ultimit ditunjukkan dengan mekanisme geser dan kunci dalam menstabilkan retak dimana penambahan lebar retak berkurang. Ketika kondisi ultimit dicapai, parameter yang mendominasi adalah perpindahan ultimit, sedangkan kekakuan elastis initial hanya memegang peranan kecil (Calvi & Magenes, 1997).

2.8. Pengaruh *Opening* pada Dinding Pasangan Batu Bata

Bukaan (*opening*) merupakan kelemahan pada struktur dinding karena dapat mengurangi kekakuan dinding, mengurangi kemampuan struktur dinding untuk menerima beban dan mengurangi kapasitas beban runtuh jika dibandingkan dengan dinding tanpa *opening* (Popescu, Sas, Sabău, & Blanksvärd, 2016) (Narayana, 2016).

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan oleh (Voon & Ingham, 2008) menunjukkan korelasi antara reduksi kekuatan dinding dan meningkatnya tinggi *opening* pada dinding. Artinya semakin besar dimensi *opening* pada dinding maka semakin menurunkan kekuatan dan kekakuan dari dinding pasangan batu bata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Pengaruh dimensi *opening* pada dinding
 Sumber : (Voon & Ingham, 2008)

Dari Gambar 2.11 menunjukkan adanya reduksi kekuatan geser horisontal dinding pada dinding 2 dan 3 dibandingkan dengan dinding 1 karena arah diagonal gaya membentuk sudut yang lebih curam seiring dengan bertambahnya dimensi bukaan (*opening*) hal ini menyebabkan berkurangnya komponen geser yang dapat dilawan oleh *pier* kanan sehingga menyebabkan tereduksinya kekuatan lateral pada dinding 2 dan 3.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

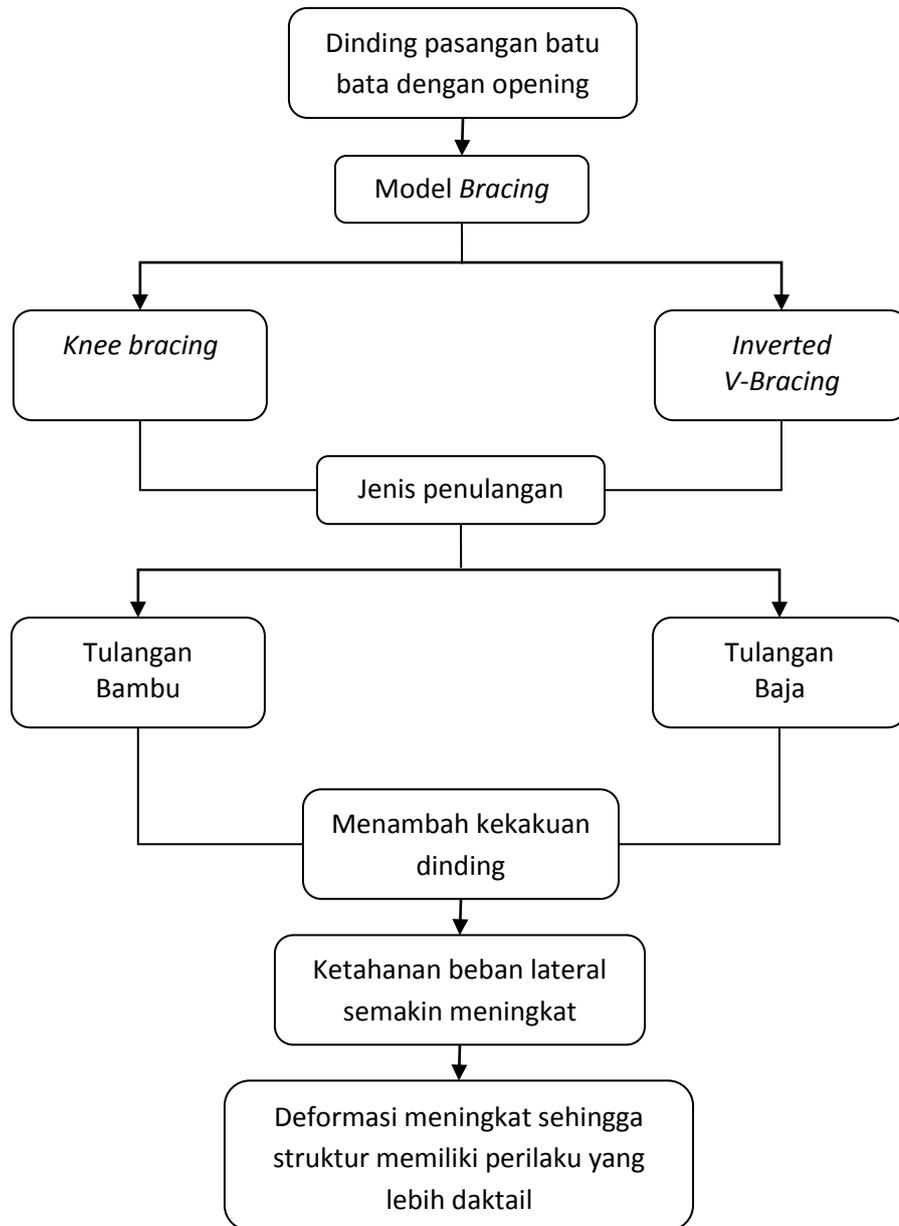
3.1 Kerangka Konsep Penelitian

Indonesia merupakan negara dengan tingkat kegempaan yang tinggi. Salah satu elemen yang paling rentan mengalami kerusakan yang parah akibat beban gempa adalah dinding. Sifat dinding yang lemah terhadap lentur dan geser merupakan kelemahan utama dari dinding sehingga elemen dinding seringkali mengalami kerusakan yang parah akibat gaya gempa.

Penggunaan *bracing* diagonal seringkali terkendala akibat adanya *opening* untuk pemasangan pintu dan jendela. Dengan adanya *opening* pada dinding dapat menurunkan kekakuan dan kekuatan lateral pada dinding (Prasad, Rahman, & Chandradhara, 2012), (Voon & Ingham, 2008). Untuk menaikkan kapasitas tahanan dan kekakuan dinding dengan *opening* terhadap gaya gempa maka dalam penelitian ini dimodelkan dinding menggunakan *knee bracing* dan *inverted v-bracing* sebagai pengaku dinding.

Penelitian ini juga membandingkan kemampuan kedua model *bracing* dalam memberikan pengaruh terhadap kemampuan dinding menahan gaya gempa. Dinding pasangan batu bata memiliki sifat yang hampir sama dengan beton yaitu lemah pada sisi tariknya sehingga kelemahan dinding dapat tertutupi dengan adanya *bracing* (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011).

Dalam pemodelan *bracing*, digunakan dua jenis penulangan pada *bracing*, yaitu tulangan baja dan bambu. Bambu dipilih karena faktor ekonomis, mudah didapatkan dan memiliki kekuatan tarik yang mendekati kekuatan tarik pada baja. Namun perlu analisa eksperimental untuk mengetahui apakah *bracing* dengan tulangan bambu memiliki ketahanan terhadap respon gempa yang sama dibandingkan dengan *bracing* tulangan baja.



Gambar 3. 1 Diagram alir konsep penelitian

3.2 Hipotesis Penelitian

Adapun hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dinding pasangan batu bata dengan *bracing* mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dinding pasangan batu bata tanpa menggunakan *bracing*, karena dengan adanya *bracing* meningkatkan kekakuan dinding sehingga kapasitas tahanan beban lateral semakin besar.
2. Dinding dengan *bracing* model *Knee bracing* akan menghasilkan ketahanan respon gempa yang berbeda dibandingkan dinding dengan *bracing* model *Inverted v-bracing*, karena *bracing* dengan model *Inverted v-bracing* memiliki kemampuan disipasi energi yang lebih besar dibandingkan dengan *bracing* model *Knee bracing*.
3. Dinding dengan *bracing* baja akan menghasilkan ketahanan respon gempa yang sama dibandingkan dinding dengan *bracing* bambu karena bambu menunjukkan kekuatan yang menyerupai dengan baja.
4. Dinding dengan *bracing* akan menghasilkan daktilitas yang lebih baik daripada dinding tanpa *bracing*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboraturium Bahan Konstruksi dan Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Maret 2018 sampai dengan Mei tahun 2018.

4.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Satu set ayakan agregat kasar dan halus untuk analisa agregat
- Cetakan silinder untuk pengujian kuat tekan beton
- Cetakan kubus untuk pengujian mortar
- Timbangan
- Alat uji kuat tekan beton
- Alat uji kuat tarik baja, *Universal Testing Machine* (UTM)
- Alat uji slump beton segar
- Cetakan bekisting
- *Concrete mixer* (mesin pencampur beton)
- *Loading Frame* untuk pengujian dinding
- *Hydraulic Jack* yang berfungsi untuk memberikan beban
- *LVDT* atau alat pembaca deformasi yang terjadi

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Semen Portland tipe I, seusai dengan SNI 2049:2015; ASTM C150/C150M-12
- Agregat kasar batu pecah dengan ukuran maksimum 25 mm sesuai dengan ASTM C33-03
- Agregat halus pasir yang umum dipasaran yang memenuhi ASTM C144-03.
- Air PDAM Kota Malang
- Batu bata sebagai bahan pengisi dinding
- Baja tulangan polos Ø 6 mm sebagai tulangan *bracing* dan tulangan kolom dan balok praktis

- Baja tulangan polos Ø 4 mm sebagai sengkang *bracing*, kolom dan balok praktis
- Bambu dengan dimensi 0,8 x 0,8 mm sebagai tulangan *bracing*

4.3 Analisis Bahan

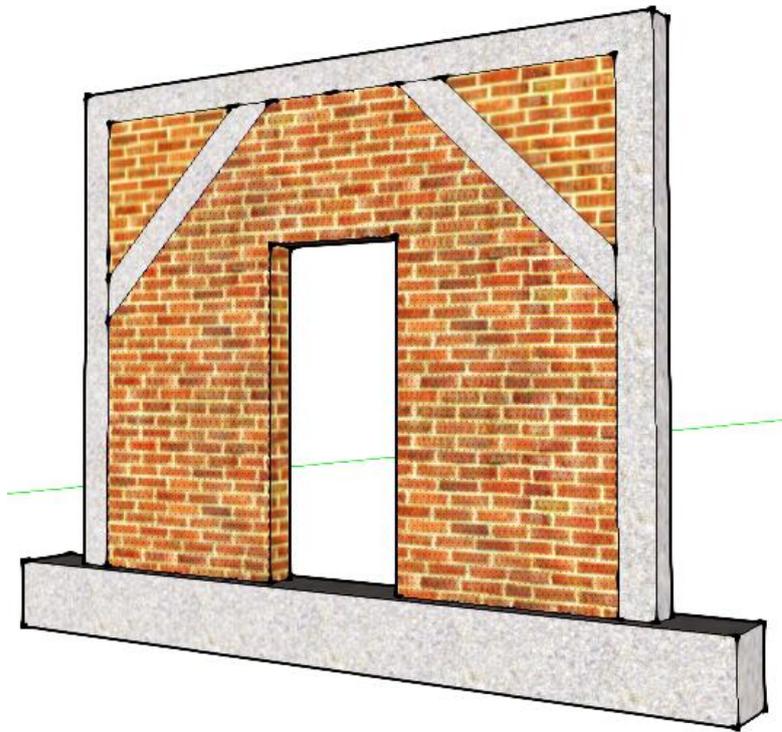
Analisis bahan untuk beton dan mortar yang akan digunakan dalam penelitian ini meliputi analisis berat volume, kadar lumpur, kadar air, *specific gravity*, penyerapan air (*water absorption*), dan analisa saringan yang dilakukan berdasarkan standar ASTM. Untuk bahan semen tidak dilaksanakan pengujian yang detail, hanya dilakukan pemeriksaan secara visual pada semen.

Untuk tulangan baja yang digunakan merupakan baja standar yang ditetapkan pada peraturan SNI 07-2052-2002. Pengujian tarik pada baja dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengetahui kuat tarik baja dan modulus elastisitas baja. Sedangkan untuk nilai kuat tarik bahan bambu digunakan hasil penelitian terdahulu.

4.4 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dibuat benda uji dinding pasangan batu bata dengan bukaan (*opening*) sebanyak 15 buah dengan dimensi 1,2 m x 1,0 m menggunakan 2 model perlakuan *bracing* yang berbeda, yaitu *Knee bracing* dan *Inverted V-bracing*. Untuk dimensi *opening* adalah 0,3 m x 0,7 m yang dimodelkan sebagai *opening* pintu. Berikut rincian masing-masing benda uji:

- a. 6 buah benda uji dinding dengan kolom dan balok praktis pada kedua sisinya menggunakan tulangan baja diameter 6 mm dan *bracing* tulangan baja 6 mm dengan sengkang diameter 4 mm dan jarak spasi 5 cm. Masing-masing 3 buah untuk model *Knee-bracing* dan *Inverted V-bracing*.
- b. 6 buah benda uji dinding dengan kolom dan balok praktis pada kedua sisinya menggunakan tulangan baja diameter 6 mm dan *bracing* tulangan bambu dimensi 8 mm x 8 mm dengan sengkang diameter 4 mm dan jarak spasi 5 cm. Masing-masing 3 buah untuk model *knee-bracing* dan *inverted V-bracing*.
- c. 3 buah benda uji dinding dengan *opening* tanpa penambahan *bracing*.

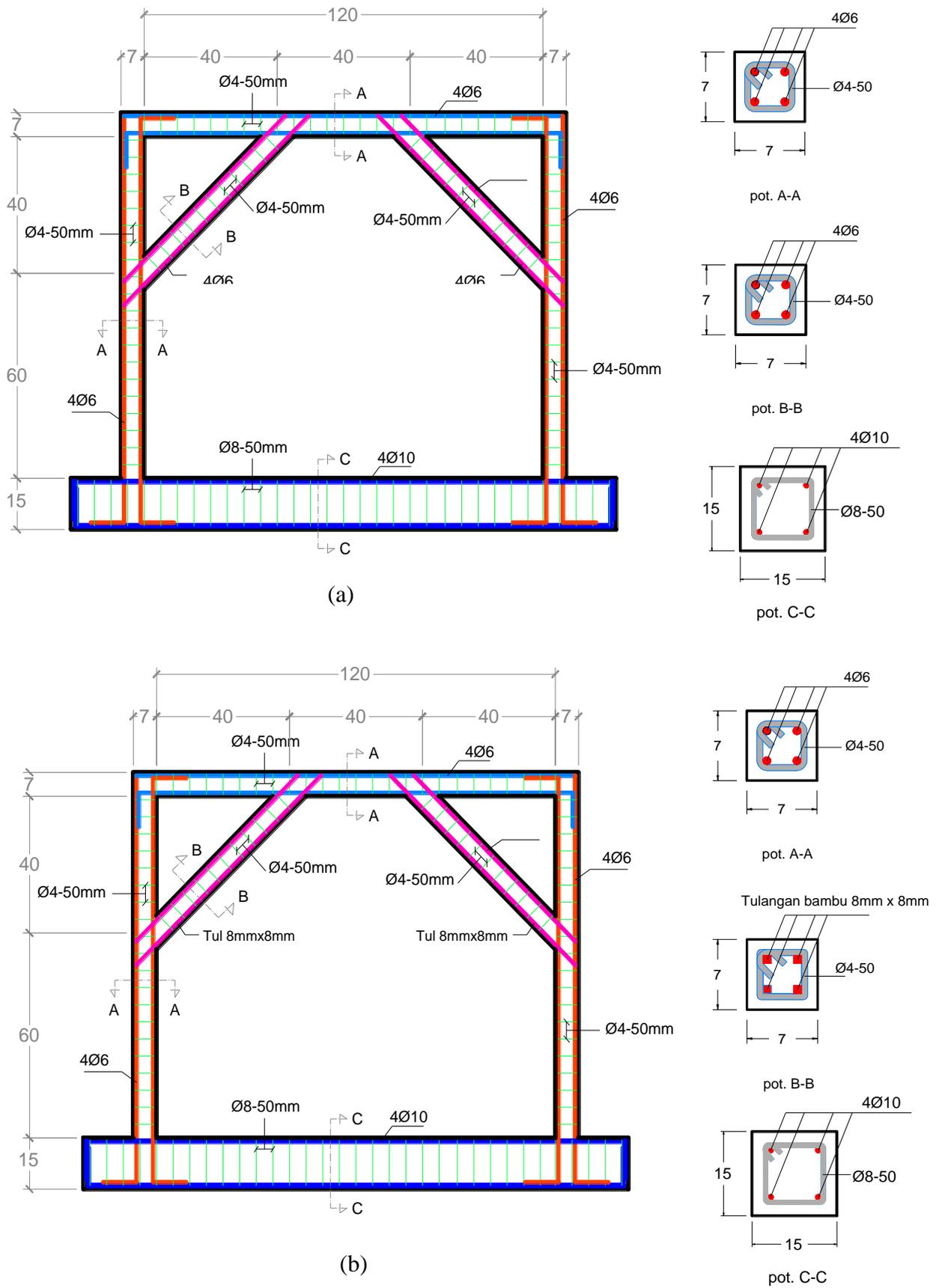


Tulangan baja \varnothing 6 mm
Sengkang baja \varnothing 4 mm
Tebal selimut beton 1 cm

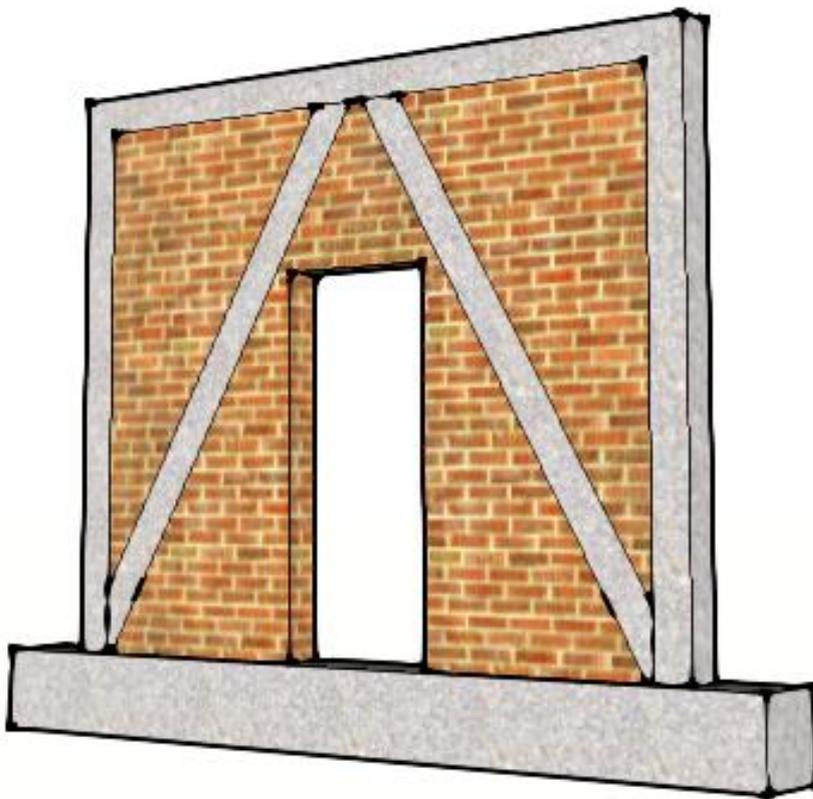


Tulangan bambu 8 mm x 8 mm
Sengkang baja \varnothing 4 mm
Tebal selimut beton 1 cm

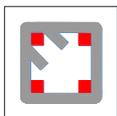
Gambar 4. 1 Konfigurasi benda uji dengan model *knee bracing*



Gambar 4. 2 Detailing penulangan benda uji dengan model *knee bracing* (a) menggunakan tulangan baja (b) menggunakan tulangan bambu

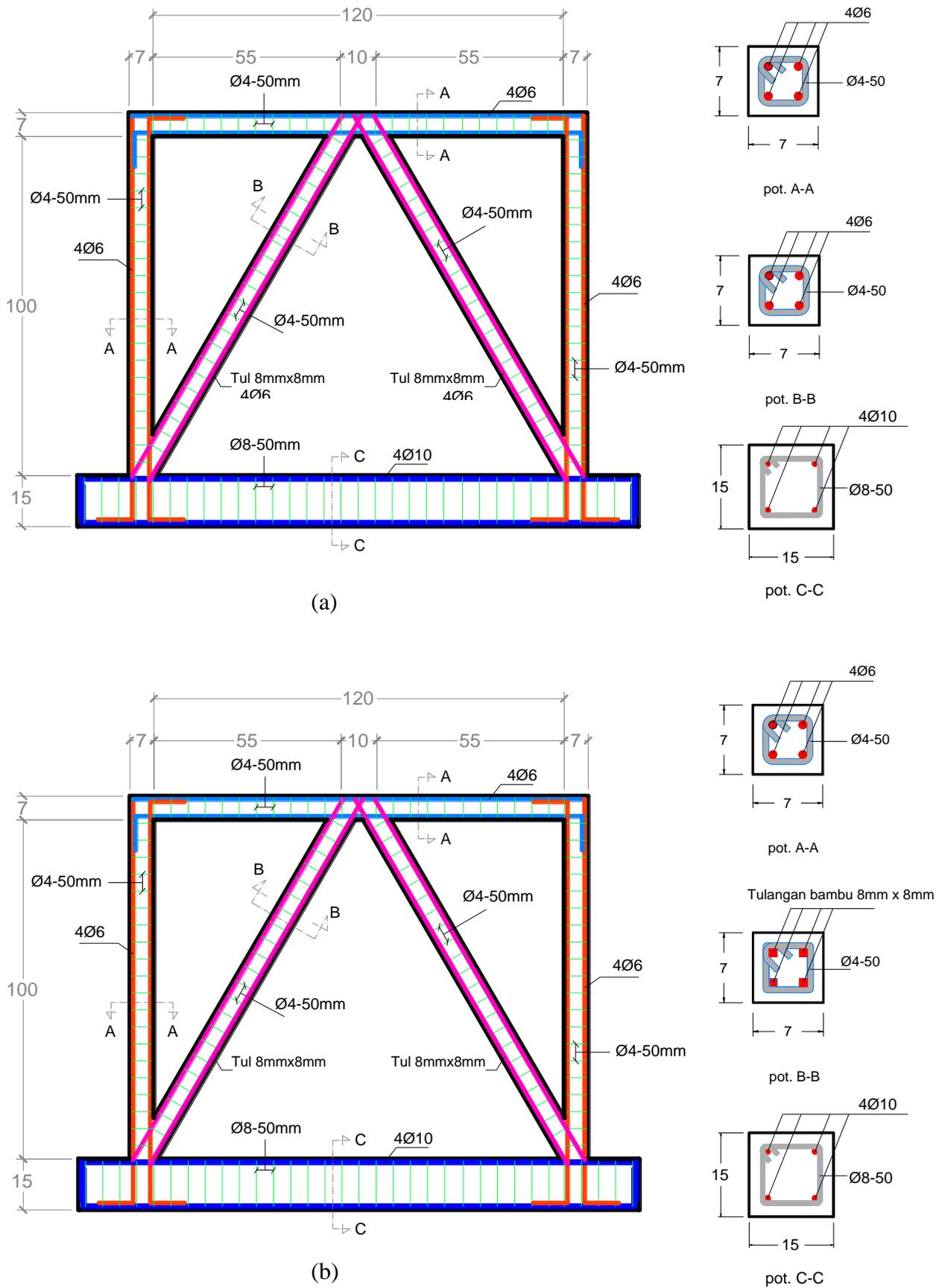


Tulangan baja \varnothing 6 mm
Sengkang baja \varnothing 4 mm
Tebal selimut beton 1 cm



Tulangan bambu 8 mm x 8 mm
Sengkang baja \varnothing 4 mm
Tebal selimut beton 1 cm

Gambar 4. 3 Konfigurasi benda uji dengan model *inverted V-bracing*



Gambar 4. 4 Detailing penulangan benda uji dengan model *inverted V-bracing* (a) menggunakan tulangan baja (b) menggunakan tulangan bambu

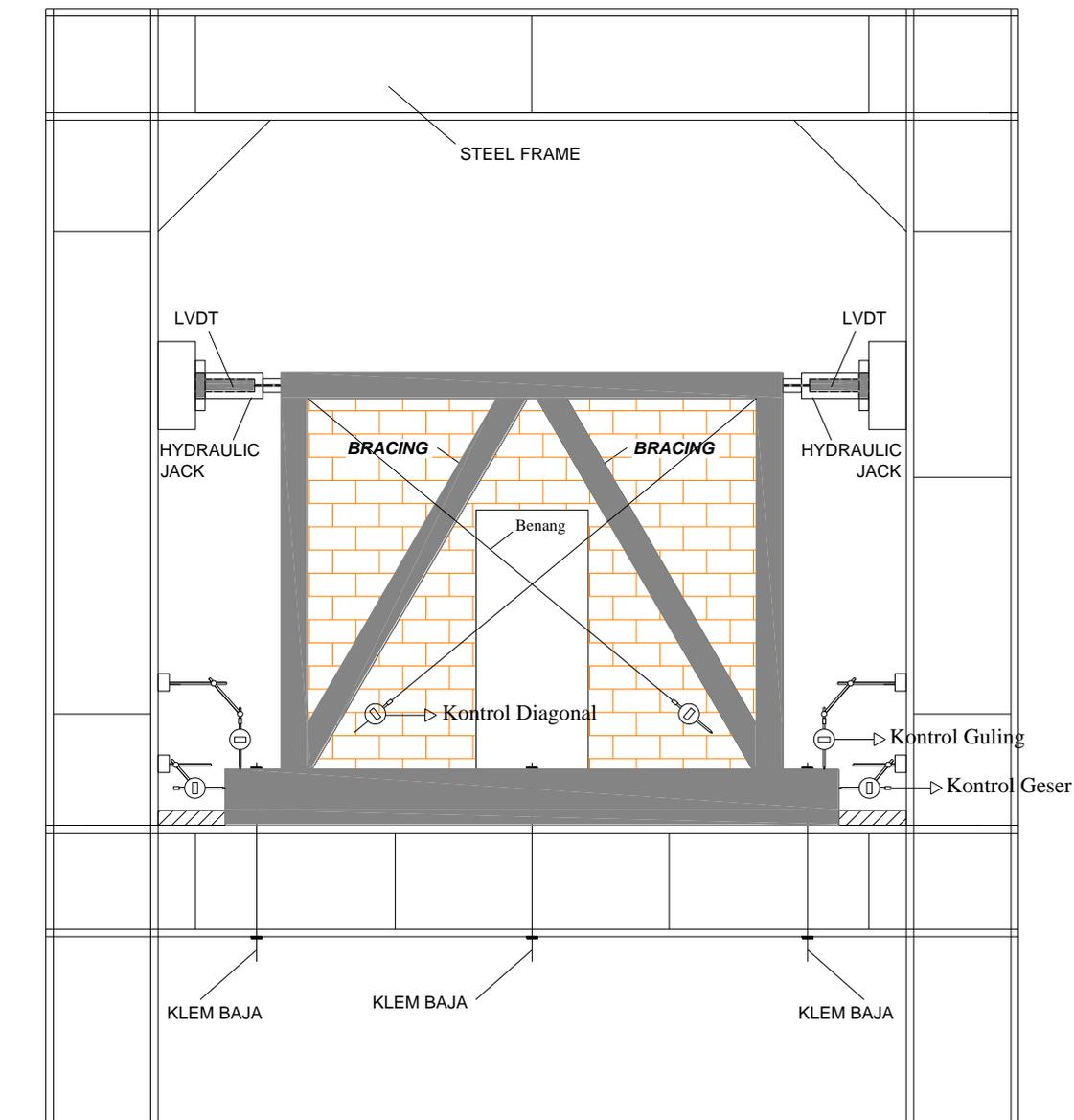
Tabel 4. 1
Spesifikasi benda uji

Kode	Tulangan				Model
	<i>Bracing</i>	Balok	Kolom	Sengkang	<i>Bracing</i>
D-0A(1)		Baja	Baja	Baja	
D-0A(2)	-	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 4 mm	-
D-0A(3)					
D-1A(1)	Baja	Baja	Baja	Baja	<i>Knee</i>
D-1A(2)	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 4 mm	<i>Bracing</i>
D-1A(3)					
D-2B(1)	Baja	Baja	Baja	Baja	<i>Inverted</i>
D-2B(2)	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 4 mm	<i>V-bracing</i>
D-2B(3)					
D-3C(1)	Bambu dimensi	Baja	Baja	Baja	<i>Knee</i>
D-3C(2)	8 mm x 8 mm	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 4 mm	<i>Bracing</i>
D-3C(3)					
D-4D(1)	Bambu dimensi	Baja	Baja	Baja	<i>Inverted</i>
D-4D(2)	8 mm x 8 mm	Ø 6 mm	Ø 6 mm	Ø 4 mm	<i>V-bracing</i>
D-4D(3)					

4.5 Prosedur Penelitian

1. Pemeriksaan agregat meliputi pemeriksaan secara visual, analisa gradasi, kadar air, analisa berat jenis dan penyerapan air.
2. Pembuatan bekisting dan perakitan tulangan kolom dan balok praktis serta *bracing* sesuai dengan yang direncanakan.
3. Perencanaan campuran beton (*mix design*) yang sesuai dengan peraturan pembuatan campuran beton normal. Dibuat 12 buah benda uji silinder untuk mengetahui kuat tekan beton (f'_c) dan 12 buah benda uji kubus dengan dimensi 5 cm x 5 cm x 5 cm untuk mengetahui kuat tekan mortar (f'_j) yang diuji pada umur 28 hari. Nilai kuat tekan beton yang direncanakan $f'_c = 15$ MPa, sedangkan nilai kuat tekan minimum mortar rencana $f'_j = 2$ MPa.
4. Pengujian kuat tarik baja dengan mengambil sampel masing-masing 3 buah tulangan baja diameter 10 mm, 8mm, 6 mm dengan menggunakan alat uji tarik baja (*Universal Testing Machine*) untuk mendapatkan nilai tegangan leleh (f_y) dari tulangan baja.

5. Pengujian kuat tarik bambu dengan mengambil sampel sebanyak 3 buah, diuji dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum (f_y) dari tulangan bambu.
6. Pembuatan benda uji dinding pasangan batu bata.
7. Pembuatan form pencatatan pembebanan dan form rencana pembebanan.
8. Pengujian benda uji silinder dan benda uji kubus setelah umur 28 yang telah melewati masa curing dengan menggunakan alat uji tekan beton untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton (f'_c) dan nilai kuat tekan mortar (f'_j).
9. Pengujian benda uji dinding pasangan batu bata yang telah dibuat setelah umur 28 hari dengan menggunakan *loading frame* yang disesuaikan dengan dimensi dinding yang akan diuji. Pengujian dilakukan dengan beban geser monotonik satu kali hingga dinding mengalami kegagalan pada tiga buah benda uji dinding untuk masing-masing jenis yang berbeda untuk mengetahui beban runtuhnya sehingga bisa direncanakan besar beban siklik dan siklus pembebanannya.
10. Pengujian beban siklik pada benda uji dinding dengan menggunakan beban lateral terpusat pada kedua ujung atas dinding secara bergantian dengan siklus beban yang sudah diperhitungkan sebelumnya. Selama proses pengujian benda uji, dilakukan pencatatan besar nilai beban dan nilai deformasi yang terjadi sampai dinding mengalami kegagalan.



Gambar 4. 5 Setting pengujian benda uji dan model pembebanan pada loading frame

4.6 Tahapan Pembebanan

Dalam penelitian ini, tahapan pembebanan yang direncanakan meliputi pembebanan monotonik untuk mendapatkan beban maksimum dan pembebanan siklik untuk mengetahui deformasi, daktilitas dan kapasitas dissipasi energi. Pengujian monotonik dilakukan dengan memberikan beban geser monotonik satu kali hingga dinding mengalami kegagalan pada lima buah benda uji dinding untuk masing-masing jenis yang berbeda untuk mengetahui beban runtuhnya sehingga bisa direncanakan besar beban siklik dan siklus pembebanannya. Setelah mendapatkan data beban maksimum dari pengujian monotonik, selanjutnya dari data beban monotonik tersebut dijadikan beban siklik dengan

membagi beban menjadi beberapa tahapan beban. Pada masing-masing tahap pembebanan terdiri dari dua siklus. Beban siklik tersebut diasumsikan berperilaku seperti beban gempa dengan mengabaikan pengaruh periode (waktu).

4.7 Variabel Penelitian

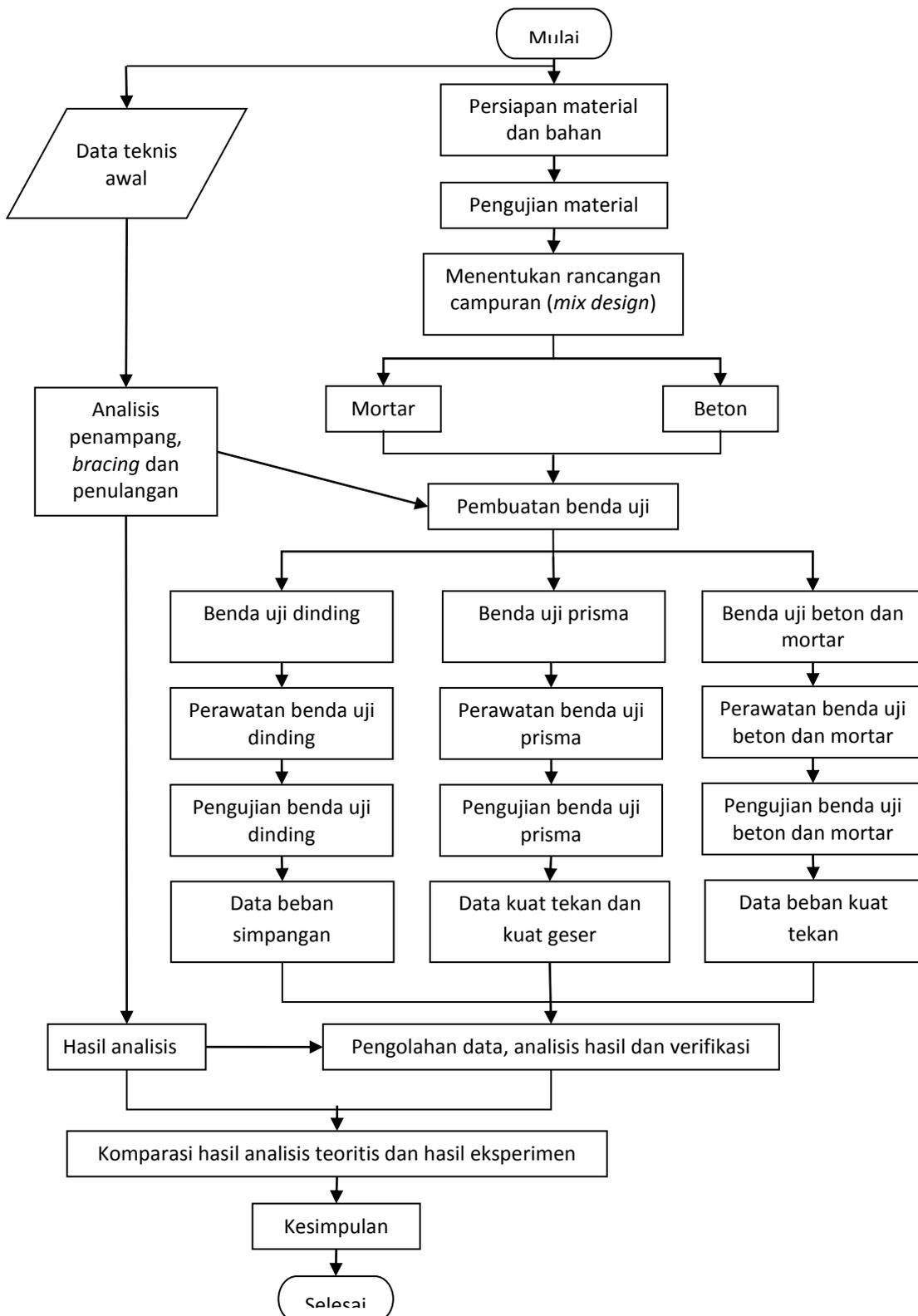
Variabel bebas diartikan sebagai variabel yang mempengaruhi atau menyebabkan terjadinya perubahan, dengan kata lain variabel bebas merupakan faktor – faktor yang dibuat dan dimanipulasi oleh peneliti untuk melihat keterkaitan suatu perilaku yang diteliti. Dalam penelitian ini variabel bebas yang dilakukan adalah model *bracing* yang digunakan yaitu model *knee Bracing* dan *inverted V-bracing* dan bahan *bracing* yang digunakan, yaitu *bracing* dengan menggunakan tulangan baja dan tulangan bambu.

Variabel terikat diartikan sebagai variabel tergantung, artinya merupakan faktor yang diamati oleh peneliti untuk mengetahui besarnya pengaruh dari variabel bebas. Dalam penelitian ini variabel terikat adalah deformasi akibat beban lateral.

Tabel 4. 2
Jenis variabel penelitian

Jenis Variabel		Jenis Perlakuan
Variabel bebas	Model <i>bracing</i>	Model <i>Knee Bracing</i> Model <i>Inverted V-bracing</i>
	Bahan <i>bracing</i>	<i>Bracing</i> dengan bahan baja <i>Bracing</i> dengan bahan bambu
Variabel terikat	Deformasi	Dicatat pada setiap tahap pembebanan

4.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 4. 6 Diagram alir penelitian

Berikut penjelasan dari diagram alir penelitian :

1. Penelitian diawali persiapan data teknis awal yang meliputi pematangan konsep penelitian, material dan bahan serta alat uji yang diperlukan. Setelah semua data teknis awal memenuhi kriteria yang direncanakan maka langkah berikutnya yaitu persiapan material dan bahan serta alat uji yang akan digunakan.
2. Setelah persiapan yang dilakukan, langkah berikutnya adalah pengujian material, meliputi pengujian agregat, uji tarik untuk tulangan baja dan bambu. Hal ini bertujuan agar memastikan material yang digunakan sesuai dengan standar penelitian yang telah ditetapkan.
3. Langkah berikutnya adalah melakukan *mix design* campuran beton dan mortar yang akan digunakan untuk benda uji. Selain itu, dari data teknis awal yang sudah memenuhi kriteria, dilakukan analisa penampang benda uji, dimensi *bracing* dan rencana penulangan yang direncanakan untuk mengetahui apakah modelisasi benda uji sudah sesuai bisa terapkan.
4. Setelah mendapatkan rencana *mix design* campuran dan analisa model benda uji, langkah berikutnya adalah menyiapkan bekisting dan tulangan yang diperlukan untuk benda uji. Setelah semua persiapan selesai dilakukan pembuatan benda uji dinding pasangan batu bata. Dinding didesain dengan dimensi 1,2 m x 1,0 m, dimensi kolom dan balok praktis persegi 7 cm x 7cm serta dinding direncanakan memiliki *opening* pintu sebesar 0.7 m x 0.3 m. Disamping itu, dibuat juga benda uji silinder beton dan benda uji kubus untuk mengetahui nilai kuat tekan beton dan kuat tekan mortar. Selain itu, untuk mendapatkan nilai kuat tekan dinding (f'_m) dan kuat geser dinding, dibuat benda uji prisma sesuai dengan standar ASTM C-1314 untuk kuat tekan prisma dan ASTM E-519 untuk kuat geser prisma.
5. Selanjutnya melakukan perawatan benda uji (*curing*) hingga berumur 28 hari.
6. Setelah berumur 28 hari, dilakukan pengujian monotonik untuk mendapatkan nilai karakteristik kekuatan dinding. Dari hasil pengujian ini didapatkan nilai kuat tekan, tegangan tekan dan beban runtuhnya sehingga dapat direncanakan besar beban siklik dan siklus pembebanannya untuk pengujian siklik. Selain itu, dilakukan pula pengujian untuk benda uji silinder dan kubus dengan menggunakan alat uji tekan untuk mendapatkan data kuat tekan beton dan mortar. Kemudian dilakukan pengujian benda uji prisma untuk mendapatkan nilai kuat tekan dinding dan kuat geser dinding dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM).

7. Pengujian selanjutnya adalah pengujian beban siklik pada benda uji dinding dengan menggunakan beban lateral terpusat pada kedua ujung atas dinding secara bergantian dengan siklus beban yang sudah diperhitungkan sebelumnya. Hasil dari pengujian ini didapatkan nilai beban dan nilai deformasi yang terjadi sampai dinding mengalami kegagalan.
8. Dari semua hasil pengujian yang dilakukan nantinya digunakan untuk perhitungan kekuatan dinding secara analisis teoritis.
9. Setelah mendapatkan nilai kekuatan dan deformasi dinding secara analisis teoritis dan eksperimen maka langkah selanjutnya membandingkan hasil nilai kekuatan dan deformasi antara hasil analisis teoritis dan eksperimen untuk masing-masing perlakuan benda uji.
10. Selanjutnya ditarik kesimpulan akhir dari semua hasil penelitian yang dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Bahan Penyusun Beton

Sebelum memulai pembuatan benda uji terlebih dahulu dilaksanakan pengujian awal material yang akan digunakan dalam penelitian ini yang meliputi pengujian agregat halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil). Untuk agregat kasar digunakan ukuran maksimal sebesar 10 mm.

5.1.1 Agregat halus

Dalam penelitian ini agregat halus yang digunakan dibagi menjadi 2 jenis, yaitu agregat halus yang digunakan untuk pengecoran dan agregat halus yang digunakan untuk pekerjaan pasangan dinding. Untuk pengecoran menggunakan jenis pasir hitam dari daerah Lumajang sedangkan untuk pekerjaan pasangan menggunakan jenis pasir pasang yang berasal dari daerah Wajak. Pengujian agregat halus digunakan untuk mengetahui karakteristik agregat halus yang akan digunakan, yaitu meliputi uji gradasi, modulus kehalusan, kadar air, berat jenis, berat isi dan tingkat absorpsi. Hasil uji untuk kedua jenis agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5. 1
Hasil uji agregat halus

Jenis pengujian	Pasir hitam Lumajang	Pasir Pasang Wajak	Satuan
Zona Ayakan	Zona 2	Zona 2	-
Modulus Kehalusan	2,122	1,764	-
Kadar Air	0,035	0,246	(%)
Berat Jenis	2,341	2,260	-
Berat Isi	1,667	1,397	(gr/cc)
Tingkat Absorpsi	0,806	0,563	(%)

5.1.2 Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini yaitu agregat kasar berjenis batu pecah dengan ukuran butir maksimum sebesar 10 mm. Uji agregat kasar yang dilakukan meliputi uji gradasi, modulus kehalusan, kadar air, berat jenis, berat isi dan tingkat absorpsi. Hasil uji untuk agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5. 2
Hasil uji agregat kasar (kerikil)

Jenis pengujian	Nilai	Satuan
Zona Ayakan	10	mm
Modulus Kehalusan	7,697	-
Kadar Air	0,025	(%)
Berat Jenis	2,478	-
Berat Isi	1,519	(gr/cc)
Tingkat Absorpsi	2,485	(%)

5.2 Perencanaan Campuran Beton

Untuk memperoleh kekuatan karakteristik beton yang direncanakan maka dilakukan perencanaan campuran beton (*Mix Design*) sesuai dengan peraturan SNI 03-2834-2002. Berikut hasil tabel perancangan beton normal sesuai dengan SNI 03-2834-2002 :

Tabel 5. 3
Formulir perencanaan campuran beton (*Mix Design*)

No	Uraian	Tabel / Grafik	Agregat Kerikil	Satuan
1	Kuat tekan yang disyaratkan (28 hari, 5%)	Ditetapkan	15	MPa
2	Deviasi standar	Diketahui	-	
3	Nilai Tambah (Margin)	(K=1,64) 1,64*(2)	12	MPa
4	Kuat tekan rata2 yg ditargetkan	(1) + (3)	27	MPa
5	Jenis Semen	Ditetapkan	Normal (Tipe I)	
6	Jenis Agregat Kasar	Ditetapkan	Batu Pecah	
	Jenis Agregat Halus	Ditetapkan	Pasir Lumajang	
7	Faktor Air semen Bebas	Tabel 2, Grafik 1/2	0,6	
8	Faktor air semen Maksimum	Ditetapkan	0,6	
9	Slump	Ditetapkan	60 - 180 mm	
10	Ukuran Agregat Maksimum	Ditetapkan	10	mm
11	Kadar Air Bebas	Tabel 3	250	kg/m ³
12	Kadar Semen	(11) : (7)	416,667	kg/m ³
13	Kadar Semen Maksimum	Ditetapkan	-	
14	Kadar Semen Minimum	Tabel 4,5,6	275	kg/m ³
15	FAS yg disesuaikan	-	-	
16	Gradasi agregat halus	Grafik 3 - 6	Zona 2	
17	Persen agregat halus	Grafik 13 - 15	0,49	
18	Berat jenis relatif agregat (SSD)	Diketahui	2,41	kg/m ³
19	Berat isi beton	Grafik 16	2175	kg/m ³
20	Kadar agregat gabungan	(19) - (11) - (12)	1508,333	kg/m ³
21	Kadar agregat halus	(17) * (20)	739,083	kg/m ³
22	Kadar agregat kasar	(20) - (21)	769,250	kg/m ³

5.3 Kuat Tekan Beton

Untuk uji kuat tekan beton digunakan sebanyak 12 benda uji silinder dengan umur masing-masing beda uji adalah 28 hari. Model pengujian kuat tekan silinder beton dapat dilihat pada Gambar 5.1. Hasil uji kuat tekan silinder beton dapat dilihat pada Tabel 5.4.



Gambar 5. 1 Uji kuat tekan silinder beton

Tabel 5. 4

Hasil uji kuat tekan beton

Kode	Berat (kg)	Umur (hari)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)
SS-1	12,10	28	272	15,400
SS-2	12,25	28	365	20,665
SS-3	12,40	28	343	19,420
SK-1	12,00	28	234	13,248
SK-2	12,75	28	279	15,796
SK-3	12,15	28	292	16,532
SB-1	11,60	28	157	8,889
SB-2	12,15	28	434	24,572
SB-3	12,05	28	443	25,081
SBR-1	11,75	28	299	16,929
SBR-2	12,20	28	173	9,795
SBR-3	12,00	28	333	18,854
Rata-rata	12,12	28,00	302,00	17,10
S-Dev	0,29	0,00	89,31	5,06
Koef-Var	2,41%	0,00%	29,57%	29,57%

Dari Tabel 5.4 didapatkan nilai rata-rata kuat tekan beton sebesar 17,098 MPa. Nilai ini melebihi mutu beton rencana yang disyaratkan yaitu 15 MPa. Ketidakteraturan nilai kuat tekan masing-masing silinder beton yang ditunjukkan dengan nilai standar deviasi

sebesar 5,057 dapat disebabkan karena faktor teknis pengujian dimana pemadatan pada benda uji yang kurang sempurna sehingga masih terdapat beberapa bagian yang keropos.

5.4 Material Spesi (Mortar)

Material agregat halus yang digunakan sebagai penyusun spesi adalah jenis pasir pasang yang berasal dari daerah Wajak. Hasil analisa agregat halus dapat dilihat pada Tabel 5.1. Untuk pengujian kuat tekan mortar dilakukan dengan metode uji kubus dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm sebanyak 12 benda uji kubus mortar yang diuji menggunakan alat *Compression Machine Test*. Model uji kuat tekan mortar dapat dilihat pada Gambar 5. 2. Hasil uji kuat tekan kubus spesi dengan perbandingan campuran 1 PC : 5 pasir dapat dilihat pada Tabel 5.5.



Gambar 5. 2 Uji kuat tekan spesi mortar

Tabel 5. 5
Hasil uji kuat tekan mortar

Kode	Berat (kg)	Umur (hari)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)
M-1	0,2242	28	7	2,8
M-2	0,2186	28	5	2
M-3	0,2168	28	7	2,8
M-4	0,2292	28	6	2,4
M-5	0,2192	28	6	2,4
M-6	0,2152	28	8	3,2
M-7	0,2240	28	8	3,2
M-8	0,2230	28	7	2,8
M-9	0,2220	28	8	3,2
M-10	0,2234	28	7	2,8
M-11	0,2174	28	8	3,2
M-12	0,2196	28	8	3,2
Rata-rata	0,2211	28	7,08	2,83
S-Dev	0,0040	0	1,00	0,40
Koef-Var	1,79%	0,00%	14,06%	14,06%

5.5 Material Batu Bata

Material batu bata yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah Gondanglegi. Batu bata dipotong sesuai dengan ukuran yang digunakan untuk penelitian ini yaitu panjang 14 cm, lebar 7 cm dan tebal 3 cm. Perbandingan ukuran bata normal dan bata terskala dapat dilihat pada Gambar 5.3.



Gambar 5. 3 Perbandingan ukuran bata normal dan bata terskala

Untuk mendapatkan nilai kuat tekan bata dilakukan dengan metode pengujian benda uji kubus, yaitu batu bata dipotong dengan ukuran yang disamakan dengan tebal batu bata sehingga menyerupai kubus yang diuji menggunakan alat *Compression Machine Test*, seperti pada Gambar 5.4.



Gambar 5. 4 Uji kuat tekan batu bata

Sampel yang diambil sebanyak 12 benda uji kubus batu bata. Hasil uji kuat tekan batu bata dengan menggunakan metode pengujian benda uji kubus dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5. 6
Hasil uji kuat tekan batu bata

Kode	Berat (kg)	Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tebal (cm)	Luas Penampang (cm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)
1	0,070	3,898	3,797	3,767	14,801	1,20	0,811
2	0,069	3,850	3,695	3,581	14,226	2,00	1,406
3	0,086	4,085	4,056	3,910	16,569	2,10	1,267
4	0,059	3,672	3,640	3,514	13,366	1,90	1,422
5	0,075	3,853	3,833	3,805	14,769	1,90	1,287
6	0,062	3,699	3,610	3,610	13,353	1,40	1,048
7	0,063	3,679	3,658	3,529	13,458	1,90	1,412
Rata-rata	0,069	3,819	3,756	3,674	14,363	1,77	1,236
S-Dev	0,009	0,150	0,156	0,153	1,160	0,34	0,229
Koef-Var	13,46%	3,92%	4,15%	4,17%	8,08%	18,92%	18,50%

Dari hasil uji benda uji kubus didapatkan nilai kuat tekan maksimum batu bata sebesar 1,422 MPa dan kuat tekan minimum sebesar 0,811 MPa.

5.6 Tulangan Baja dan Bambu

Pengujian kuat tarik baja dan bambu dilakukan untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik (f_y) sebenarnya dari material tulangan yang akan digunakan dalam penelitian ini. Tulangan baja yang dipakai dalam penelitian ini terdiri dari tulangan diameter 10 mm yang digunakan sebagai tulangan model sloof dengan tulangan diameter 8 mm sebagai sengkang, tulangan diameter 6 mm yang digunakan sebagai tulangan utama model kolom, balok dan *bracing* dengan tulangan diameter 4 mm sebagai sengkang. Untuk tulangan bambu digunakan untuk tulangan pada *bracing* saja dengan dimensi 8 mm x 8 mm. Masing-masing tulangan diambil 3 sampel benda uji. Hasil pengujian tarik baja dan bambu dapat dilihat pada Tabel 5.7, 5.8, 5.9, dan 5.10.

Tabel 5. 7

Hasil uji kuat tarik baja Ø 6 mm

Kode	Panjang (mm)	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Leleh (kN)	Beban Ultimit (kN)	Δ_L Leleh (mm)	Δ_L Ultimit (mm)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Ultimit (MPa)
BJ6-1	250	5,24	21,58	3,06	12,43	2,03	34	141,621	576,03
BJ6-2	250	5,30	22,07	3,06	12,43	2,05	34	138,476	563,24
BJ6-3	250	5,00	19,65	2,84	12,54	2,06	25	144,443	638,24
Rata-rata	250	5,18	21,10	2,98	12,47	2,04	31,20	141,51	592,50
S-Dev	0	0,16	1,28	0,13	0,06	0,02	5,35	2,99	40,12
Koef-Var	0,00%	3,06%	6,07%	4,22%	0,51%	0,77%	17,16%	2,11%	6,77%

Tabel 5. 8

Hasil uji kuat tarik baja Ø 8 mm

Kode	Panjang (mm)	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Leleh (kN)	Beban Ultimit (kN)	ΔL Leleh (mm)	ΔL Ultimit (mm)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Ultimit (MPa)
BJ8-1	250	7,31	41,99	16,00	24,50	2,5	35,0	381,08	583,53
BJ8-2	250	7,17	40,40	16,02	23,65	1,11	32	396,57	585,45
BJ8-3	250	7,35	42,45	16,00	23,50	3,75	35	376,95	553,64
Rata-rata	250	7,28	41,61	16,01	23,88	2,45	33,88	384,87	574,21
S-Dev	0	0,09	1,08	0,01	0,54	1,32	1,95	10,34	17,84
Koef-Var	0,00%	1,30%	2,58%	0,07%	2,26%	53,97%	5,75%	2,69%	3,11%

Tabel 5. 9
Hasil uji kuat tarik baja Ø 10 mm

Kode	Panjang (mm)	Diameter (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Leleh (kN)	Beban Ultimit (kN)	Δ_L Leleh (mm)	Δ_L Ultimit (mm)	Tegangan Leleh (MPa)	Tegangan Ultimit (MPa)
BJ10-1	250	8,10	51,55	17,50	27,00	2,25	43,5	339,47	523,76
BJ10-2	250	8,06	51,04	16,00	25,50	3,00	42,5	313,46	499,58
BJ10-3	250	8,15	52,19	17,50	26,00	2,00	45,0	335,32	498,19
Rata-rata	250	8,10	51,59	17,00	26,17	2,42	43,67	329,42	507,17
S-Dev	0	0,05	0,57	0,87	0,76	0,52	1,26	13,97	14,38
Koef- Var	0,00%	0,56%	1,11%	5,09%	2,92%	21,53%	2,88%	4,24%	2,83%

Tabel 5. 10
Hasil uji kuat tarik bambu 8 mm x 8 mm

Kode	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Tegangan Tarik (MPa)
BM-1	305	10	9,30	93,00	7,00	75,27
BM-2	305	9,6	9,00	86,40	6,00	69,44
BM-3	301	9,3	8,20	76,26	5,00	65,57
Rata-rata	304	9,63	8,83	89,70	6,00	70,09
S-Dev	2,31	0,35	0,57	4,67	1,00	4,88
Koef-Var	0,76%	3,65%	6,44%	5,20%	16,67%	5,88%

5.7 Dinding Pasangan Batu Bata

Untuk mendapatkan data kuat tekan dan kuat geser secara eksperimental maka dilakukan uji kuat tekan dan kuat geser dinding pasangan batu bata dengan membuat 3 benda uji untuk masing-masing pengujian. Hasil pengujian yang didapatkan digunakan untuk perhitungan analitis.

5.7.1 Kuat tekan

Untuk mendapatkan nilai kuat tekan dinding pasangan batu bata maka dilakukan pengujian kuat tekan prisma yang disyaratkan dalam (ASTM C-1314, 2012), yaitu dengan membuat lima lapis tumpukkan bata yang diikat dengan mortar. Pengujian menggunakan alat *Compression Machine Test* hingga benda uji hancur untuk mendapatkan nilai kuat tekan ultimit setelah benda uji mencapai umur 28 hari. Model pengujian kuat tekan prisma dapat dilihat pada Gambar 5.5. Hasil uji kuat tekan dinding prisma dapat dilihat pada Tabel 5.11.



Gambar 5. 5 Uji kuat tekan prisma

Tabel 5. 11
Hasil uji kuat tekan prisma

Kode	Berat (gr)	Dimensi			Luas Penampang (cm ²)	Beban Maks (kN)	Faktor Koreksi h_p/t_p	Kuat Tekan (MPa)	
		Panjang (cm)	Lebar (cm)	Tinggi (cm)					
P-1	3598,6	14,00	6,80	24,50	95,20	15,00	3,60	1,118	1,76
P-2	3853,6	15,00	7,10	26,00	106,50	11,00	3,66	1,123	1,16
P-3	3249,0	14,00	6,80	23,30	95,20	11,00	3,43	1,104	1,28
Rata-rata	3567,07	14,33	6,90	24,60	98,97	12,33	3,56	1,12	1,40
S-Dev	303,53	0,58	0,17	1,35	6,52	2,31	0,12	0,01	0,32
Koef-Var	8,51%	4,03%	2,51%	5,50%	6,59%	18,72%	3,44%	0,88%	22,83%

5.7.2 Kuat geser

Dalam ASTM E-519, kuat geser dinding pasangan batu bata didekati dengan menggunakan pengujian tekan namun posisi sampel diatur secara diagonal. Sampel diberi beban terpusat pada sudut diagonal sampai mengalami keruntuhan. Pengujian menggunakan alat *Universal Testing Machine* dengan pembacaan beban menggunakan *Load Cell*. Model uji kuat geser prima dapat dilihat pada Gambar 5. 6.



Gambar 5. 6 Uji kuat geser prisma

Pengujian dilaksanakan setelah benda uji mencapai umur 28 hari. Pengujian dilakukan sampai dinding mengalami hancur, sehingga didapatkan nilai beban ultimitnya. Hasil uji kuat geser dinding dapat dilihat pada Tabel 5.12.

Tabel 5. 12

Hasil uji kuat geser prisma

Kode	Berat (kg)	Dimensi			Luas Netto (cm ²)	Beban Maks (kg)	Kuat Geser (MPa)
		Panjang (<i>h</i>) (cm)	Lebar (<i>t</i>) (cm)	Tinggi (<i>w</i>) (cm)			
D-1	9,70	31,00	7,50	30,00	228,75	224,00	0,07
D-2	9,50	30,50	7,00	30,00	211,75	494,50	0,17
D-3	9,40	30,20	7,00	30,00	210,70	525,00	0,18
Rata-rata	9,53	30,57	7,17	30,00	217,07	414,50	0,14
S-Dev	0,15	0,40	0,29	0,00	10,13	165,68	0,06
Koef-Var	1,60%	1,32%	4,03%	0,00%	4,67%	39,97%	42,98%

5.8 Respon Gempa Dinding Pasangan Batu Bata

5.8.1 Uji beban monotonik

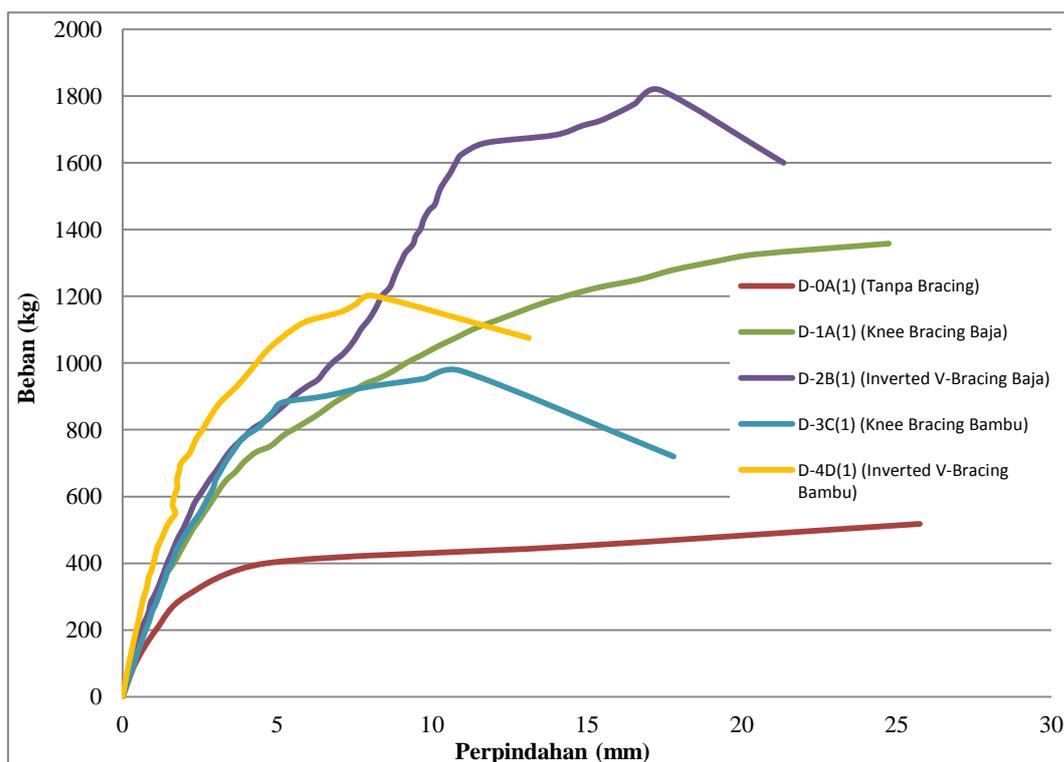
Pengujian yang dilakukan menggunakan beban lateral terpusat satu arah pada ujung atas dinding. Model yang diuji terdiri dari lima jenis dinding, yaitu model dinding tanpa *bracing*, model dinding *knee bracing* tulangan baja, model dinding *knee bracing* tulangan bambu, model dinding *inverted v-bracing* tulangan baja, model dinding *inverted v-bracing* tulangan bambu. Masing-masing model diambil satu benda uji kemudian dibandingkan hasil pengujian dari lima jenis dinding. Pengujian ini juga untuk mengetahui beban maksimum dari masing-masing model dinding yang nanti akan digunakan untuk

mendesain model pembeban siklik pada pengujian siklik dinding pasangan batu bata. Hasil uji monotonik dinding pasangan batu bata dapat dilihat pada Tabel 5.13 dan Gambar 5.7.

Tabel 5. 13

Hasil uji monotonik dinding

No	Benda Uji	Hasil	Satuan
1	Tanpa <i>Bracing</i>		
	Beban Maksimum	518	kg
	Deformasi Maksimum	25,75	mm
2	<i>Knee bracing</i> Baja		
	Beban Maksimum	1358	kg
	Deformasi Maksimum	24,75	mm
3	<i>Knee bracing</i> Bambu		
	Beban Maksimum	976,5	kg
	Deformasi Maksimum	17,795	mm
4	Inverted V <i>Bracing</i> Baja		
	Beban Maksimum	1818	kg
	Deformasi Maksimum	21,35	mm
5	Inverted V <i>Bracing</i> Bambu		
	Beban Maksimum	1202	kg
	Deformasi Maksimum	13,12	mm



Gambar 5. 7 Hubungan beban-perpindahan uji monotonik dinding

Berdasarkan tabel dan grafik uji beban monotonik menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan *bracing* mampu menambah kekuatan dan kekakuan dinding. Pada model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 162%

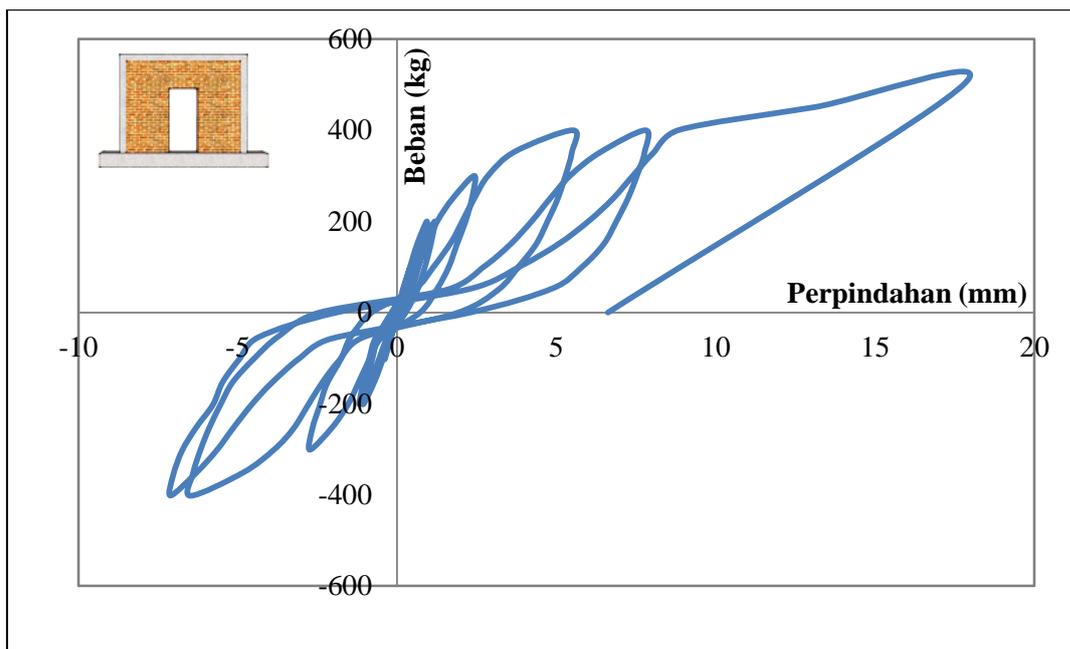
dan deformasi menurun sebesar 4%. Untuk model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 89% dan deformasi menurun sebesar 31%. Selain itu untuk model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 251% dan deformasi menurun sebesar 17%. Pada model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 132% dan deformasi menurun sebesar 49%. Dari perbandingan hasil diatas menunjukkan pemilihan model *bracing* dan jenis tulangan *bracing* mempengaruhi kekuatan dan kekakuan dinding. Dinding dengan model *inverted v-bracing* memiliki kekuatan paling tinggi hal ini dikarenakan model tersebut memiliki kekakuan yang lebih besar dibandingkan dengan model dinding yang lain. Dengan kekakuan yang meningkat menurunkan pula kemampuan deformasi dari dinding dikarenakan struktur dinding menjadi lebih getas. Disamping itu, penggunaan tulangan *bracing* dari bahan bambu cukup efektif manambah kekuatan dinding namun masih lebih kecil dari *bracing* dengan tulangan baja. Deformasi dinding dengan dengan tulangan bambu paling kecil dari model dinding dengan tulangan baja. Ini dikarenakan material tulangan baja pada *bracing* mampu menyediakan kemampuan deformasi yang lebih baik daripada material tulangan bambu, karena baja lebih bersifat daktail dan elastis dibandingkan material bambu.

5.8.2 Uji beban siklik (*quasi static*)

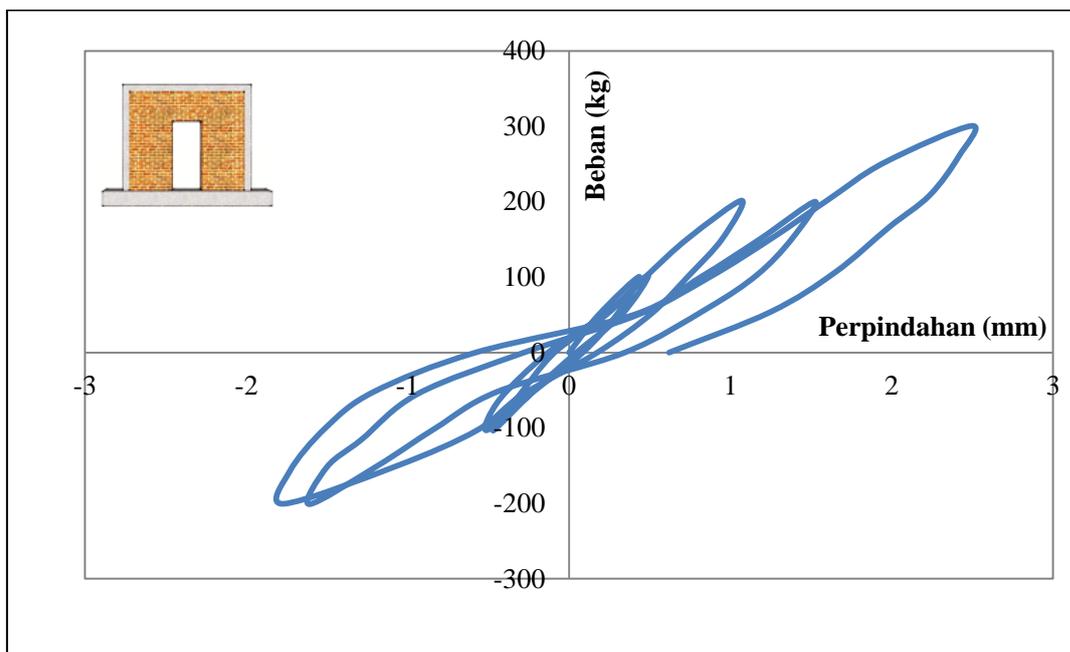
Setelah mendapatkan nilai beban maksimum masing-masing model dinding dari pengujian monotonik, selanjutnya dari data beban monotonik tersebut dijadikan beban siklik dengan membagi beban menjadi beberapa tahapan beban. Pada masing-masing tahap pembebanan terdiri dari dua siklus. Beban siklik tersebut diasumsikan berperilaku seperti beban gempa dengan mengabaikan pengaruh periode (waktu).

Pengujian beban siklik pada benda uji dinding dengan menggunakan beban lateral terpusat pada kedua ujung atas dinding secara bergantian dengan siklus beban yang sudah diperhitungkan sebelumnya. Selama proses pengujian benda uji, dilakukan pencatatan besar nilai beban dan nilai deformasi yang terjadi sampai dinding mengalami kegagalan.

Berdasarkan hasil uji siklik dinding pada Gambar 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, dan 5.12 maka penambahan *bracing* sebagai pengaku dinding mempengaruhi kekuatan tahanan terhadap beban gempa dan perubahan deformasi.

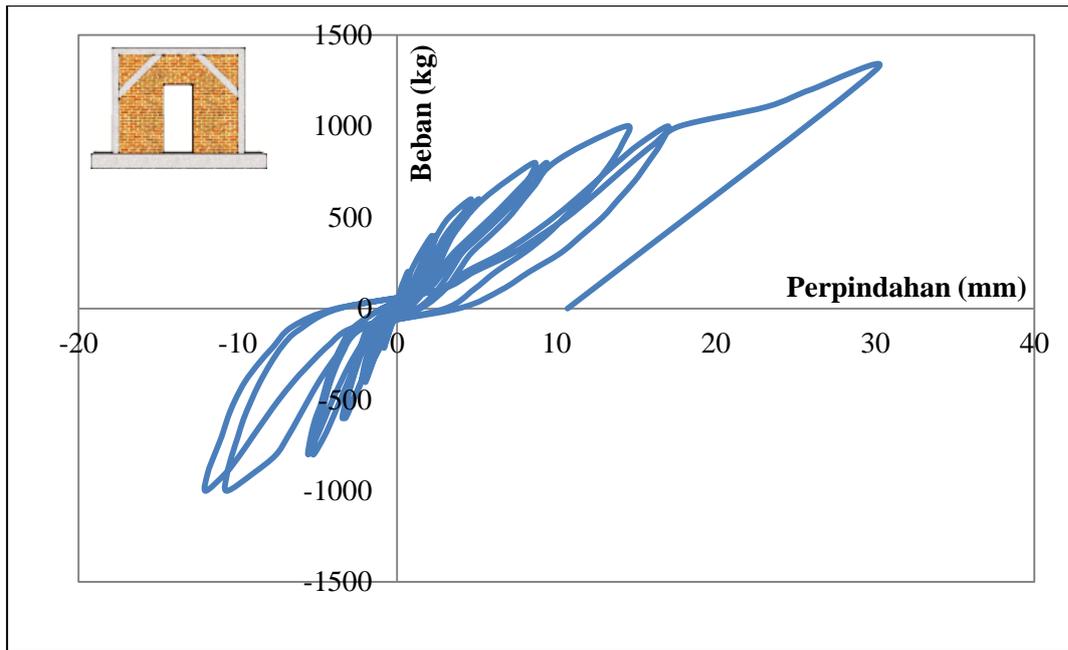


a) Benda uji D-0A(2)

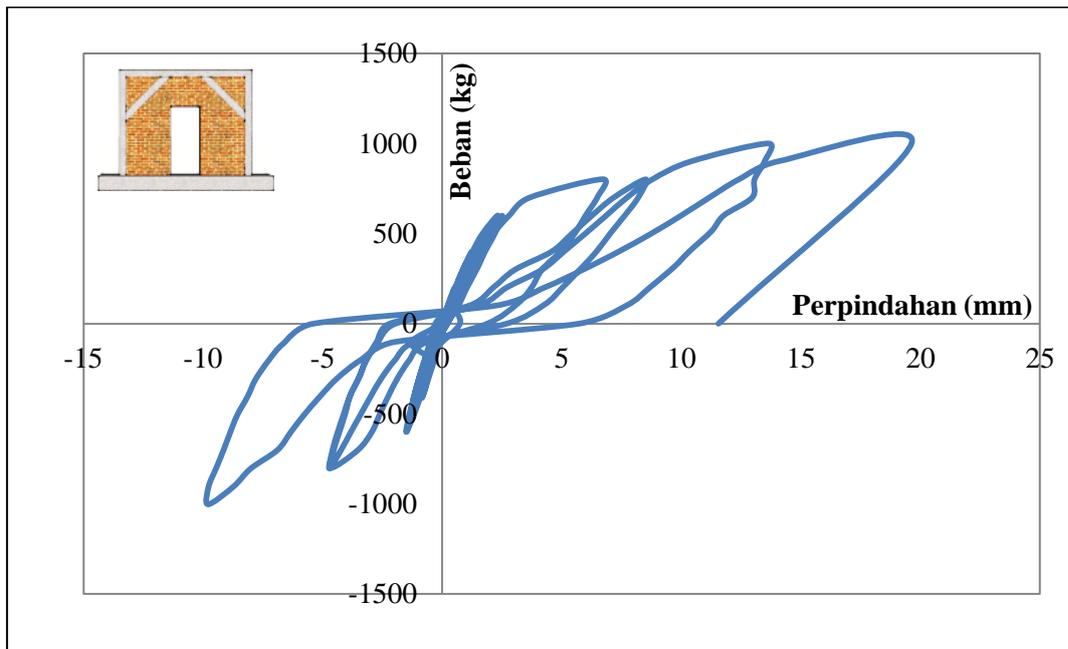


b) Benda uji D-0A(3)

Gambar 5. 8 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding tanpa bracing

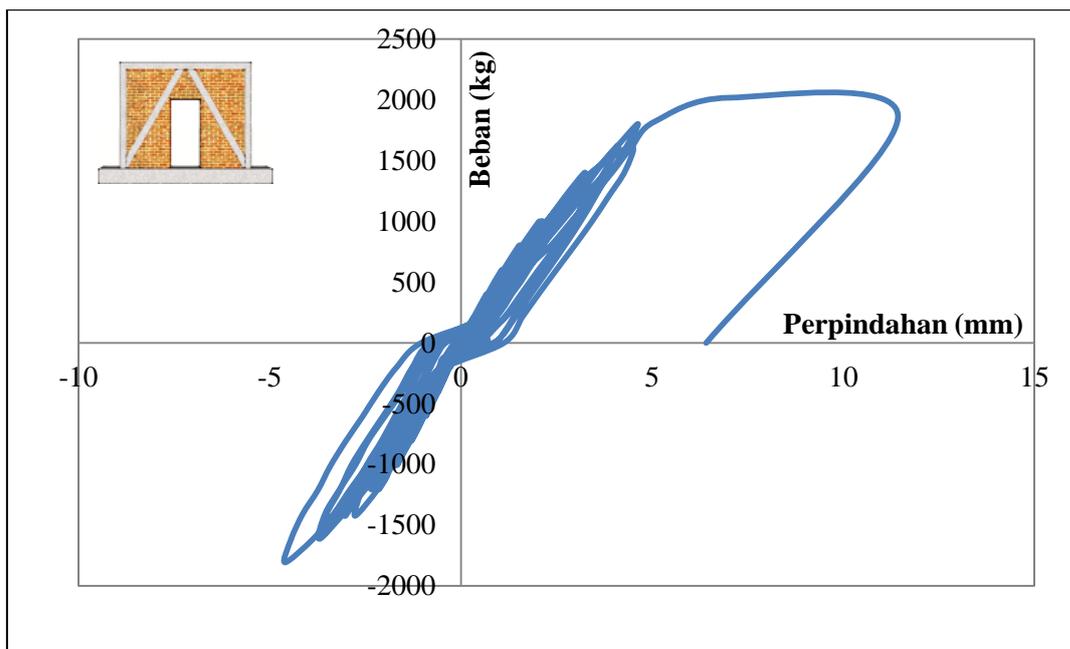


a) Benda uji D-1A(2)

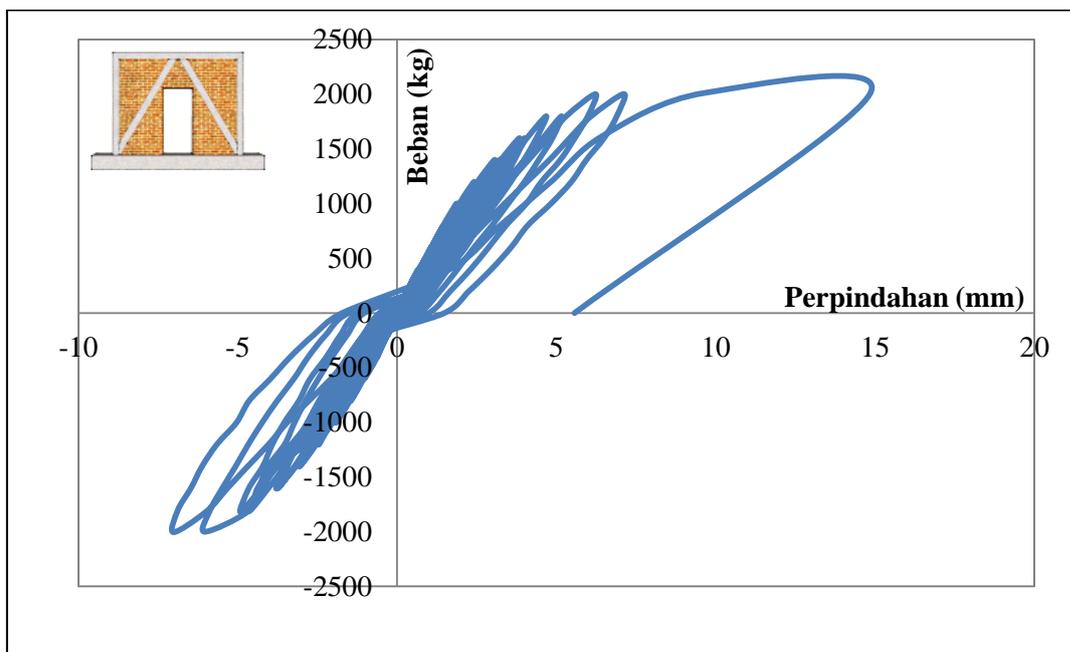


b) Benda uji D-1A(3)

Gambar 5. 9 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan *knee bracing* baja

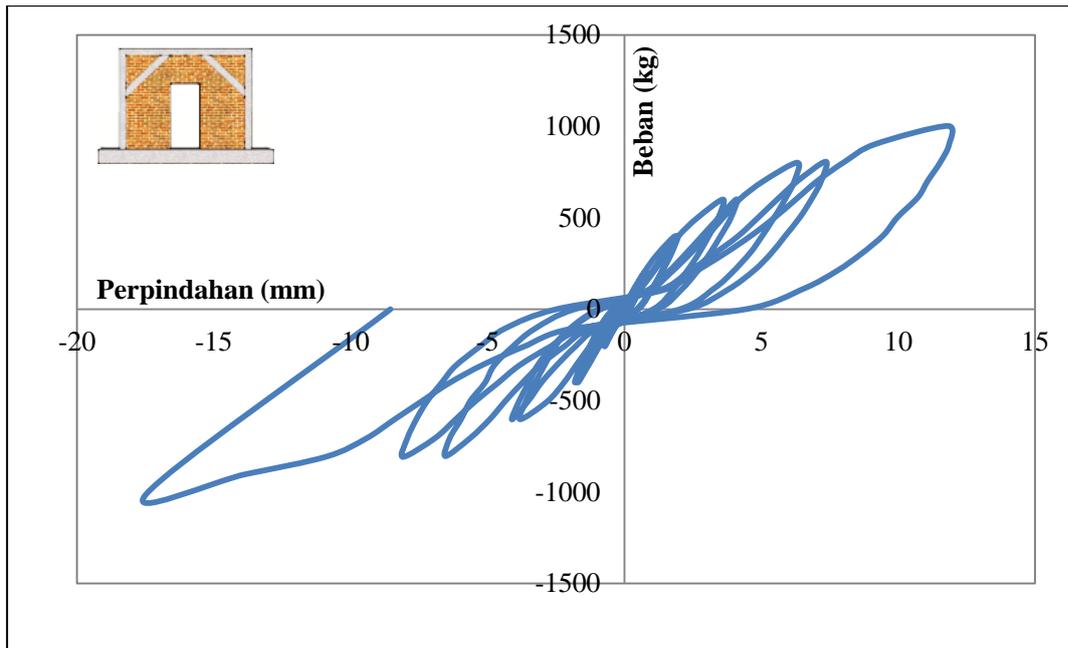


a) Benda uji D-2B(2)

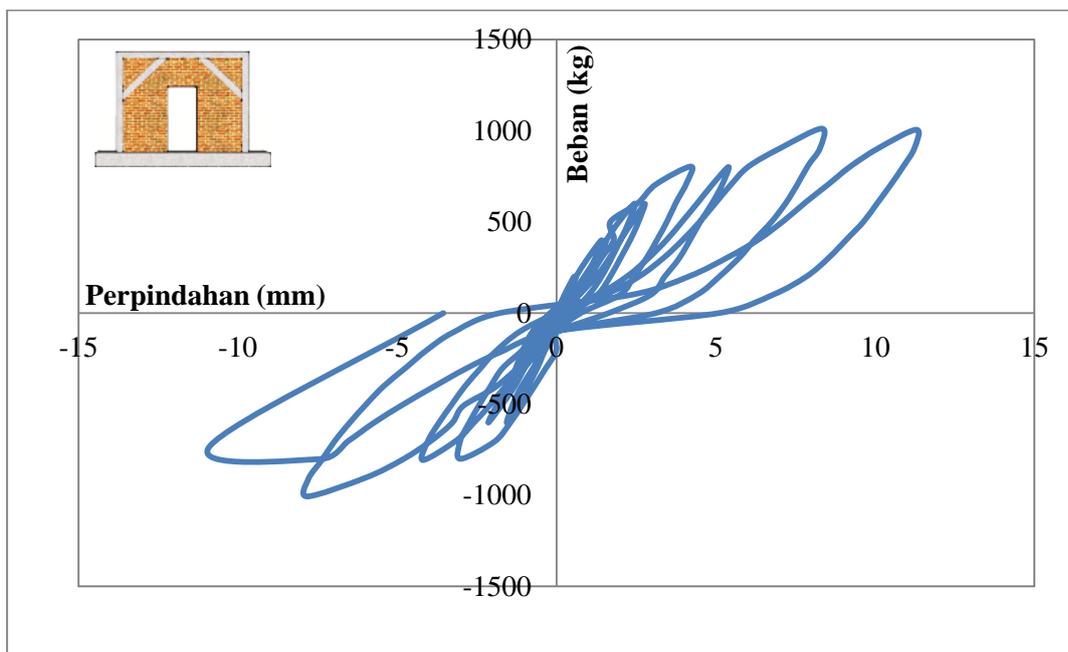


b) Benda uji D-2B(3)

Gambar 5. 10 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan *inverted v-bracing* baja

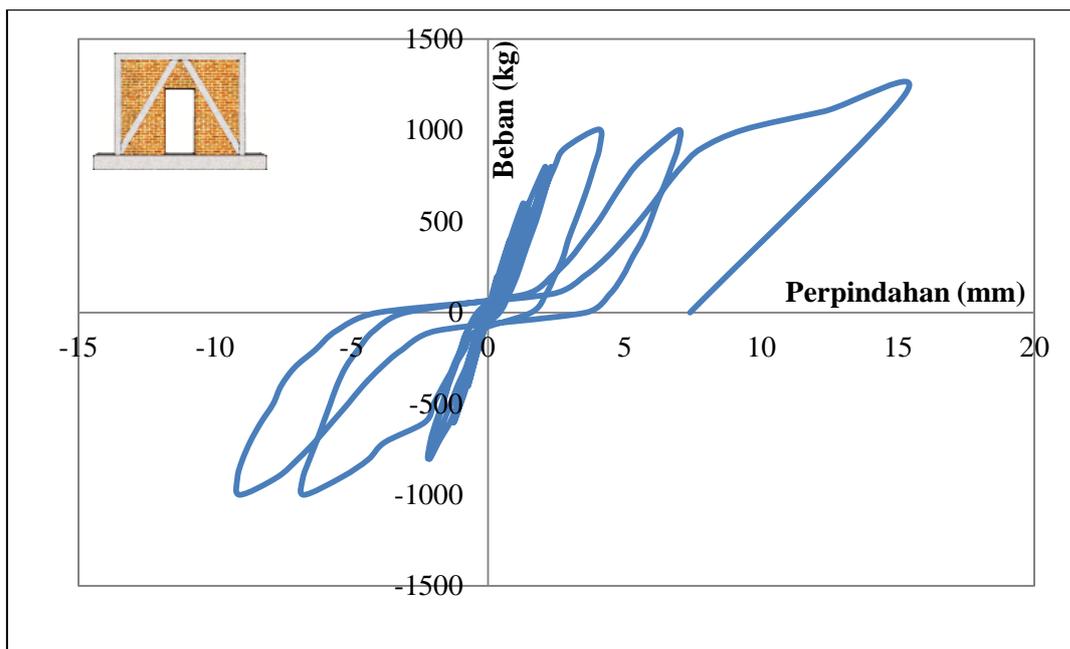


a) Benda uji D-3C(2)

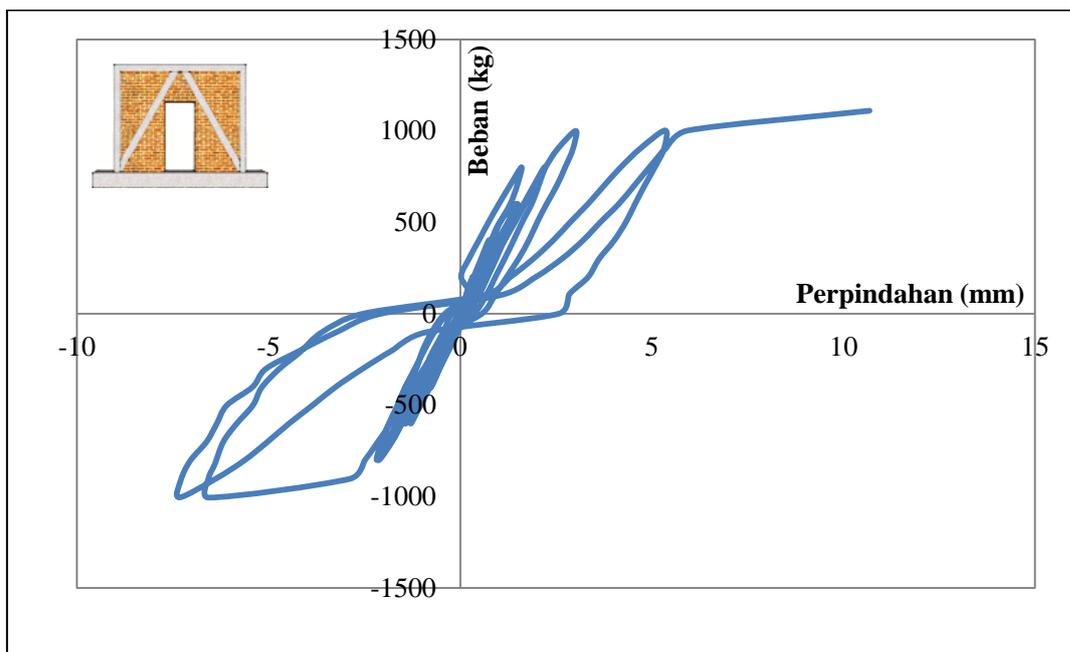


b) Benda uji D-3C(3)

Gambar 5. 11 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan *knee bracing* bambu



a) Benda uji D-4D(2)



a) Benda uji D-4D(3)

Gambar 5. 12 Hubungan beban-perpindahan uji siklik dinding dengan *inverted v-bracing* bambu

Rata-rata beban maksimum dan deformasi maksimum uji siklik dinding pasangan batu bata dapat dilihat pada Tabel 5.14. Dari hasil uji siklik yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan adanya penambahan *bracing* pada dinding mampu menaikkan tahanan beban lateral yang signifikan.

Tabel 5. 14
Hasil uji siklik dinding

No	Benda Uji	Hasil
1	Tanpa <i>Bracing</i>	
	Beban Maksimum rata-rata	401,75 kg
	Deformasi Maksimum rata-rata	10,155 mm
2	<i>Knee bracing</i> Baja	
	Beban Maksimum rata-rata	1154 kg
	Deformasi Maksimum rata-rata	24,810 mm
3	<i>Knee bracing</i> Bambu	
	Beban Maksimum rata-rata	1007,5 kg
	Deformasi Maksimum rata-rata	14,375 mm
4	<i>Inverted V Bracing</i> Baja	
	Beban Maksimum rata-rata	2015,5 kg
	Deformasi Maksimum rata-rata	13,130 mm
5	<i>Inverted V Bracing</i> Bambu	
	Beban Maksimum rata-rata	1155 kg
	Deformasi Maksimum rata-rata	12,978 mm

Pada model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 187% dan deformasi meningkat sebesar 144%. Untuk model dinding dengan *knee bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 151% dan deformasi meningkat sebesar 42%, ini dikarenakan sifat elastisitas bambu yang lebih kecil dari baja. Untuk model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan baja kekuatan meningkat sebesar 402% dan deformasi meningkat sebesar 29%. Hal ini menunjukkan model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan baja memiliki nilai kekakuan yang besar sehingga kekuatan tahanan beban lateral meningkat. Pada model dinding dengan *inverted v-bracing* dari tulangan bambu kekuatan meningkat sebesar 187% dan deformasi meningkat sebesar 28%. Dari hasil pengujian untuk masing-masing model dinding dengan *bracing* dari tulangan bambu menunjukkan hasil tahanan beban lateral dan kemampuan deformasi yang lebih kecil dari model dinding dengan *bracing* dari tulangan baja, hal ini disebabkan karena nilai elastisitas dari bahan bambu lebih kecil dibandingkan dari baja sehingga perilaku tegangan-regangan bambu dan baja berbeda. Bahan baja bersifat lebih daktail dan masih mempunyai ketahanan yang baik dalam menahan beban meskipun pada fase non

elastis. Sedangkan bambu bersifat getas, sehingga setelah melewati fase elastis kemampuan bambu untuk menahan beban telah jauh berkurang.

Hal ini menunjukkan bahwa dengan penggunaan *bracing* pada dinding dapat menambah kekakuan dari elemen dinding itu sendiri. Semakin kaku elemen dinding maka semakin tinggi kekuatan tetapi berbanding terbalik dengan kemampuan deformasinya.

5.9 Daktilitas Struktur

Berdasarkan SNI 03-1726-2003 terdapat dua macam daktilitas, yaitu daktilitas penuh dan daktilitas terbatas (parsial). Daktilitas penuh adalah suatu tingkat daktilitas struktur bangunan, dimana strukturnya mampu mengalami simpangan plastik yang besar, yaitu mencapai nilai faktor daktilitas sebesar 5,20. Sedangkan daktilitas parsial adalah seluruh tingkat daktilitas struktur dengan nilai faktor daktilitas diantara struktur elastik dan daktail penuh. Dengan menggunakan data beban dan deformasi dari pengujian monotonik dapat dihitung nilai daktilitas perpindahan dengan menggunakan persamaan umum daktilitas yaitu perbandingan perpindahan ultimit dengan perpindahan saat leleh, sedangkan daktilitas struktur dinding dengan menggunakan persamaan (2-11). Daktilitas kurvatur $\mu_\phi = \phi_u/\phi_y$ diasumsikan sebagai daktilitas perpindahan sehingga $\mu_\phi = \mu = \Delta_u/\Delta_y$. Hasil perhitungan daktilitas dinding dapat dilihat pada Tabel 5.15. Untuk langkah perhitungan dapat dilihat pada Lampiran5.

Tabel 5. 15
Hasil perhitungan daktilitas dinding

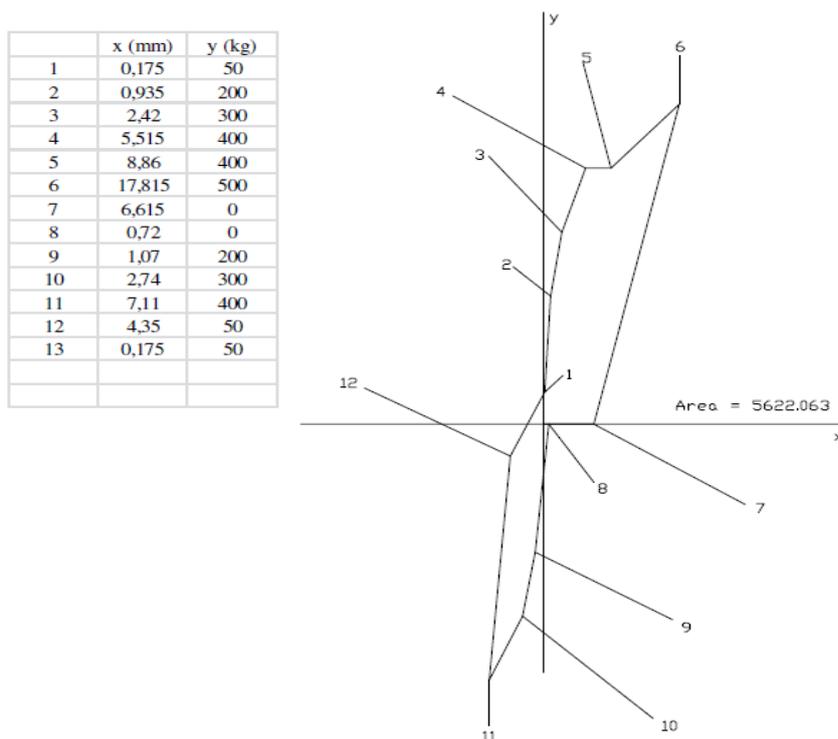
Model Dinding	Perpindahan leleh (cm)	Perpindahan maksimum (cm)	Daktilitas perpindahan $\mu = \Delta_u/\Delta_y$	Daktilitas struktur μ_Δ
Dinding tanpa <i>bracing</i>	0,471	2,575	5,467	6,629
Dinding dengan <i>knee bracing</i> baja	0,391	2,475	6,330	7,706
Dinding dengan <i>knee bracing</i> bambu	0,368	1,780	4,842	5,841
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> baja	0,391	2,135	5,460	6,620
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> bambu	0,258	1,312	5,085	6,147

Dari hasil perhitungan nilai daktilitas pada Tabel 5.15 menunjukkan bahwa semua model dinding berada dalam rentang daktilitas penuh. Nilai daktilitas antara dinding *bracing* tulangan bambu dan tulangan baja menunjukkan perbedaan dimana material tulangan *bracing* bambu memiliki nilai daktilitas yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan

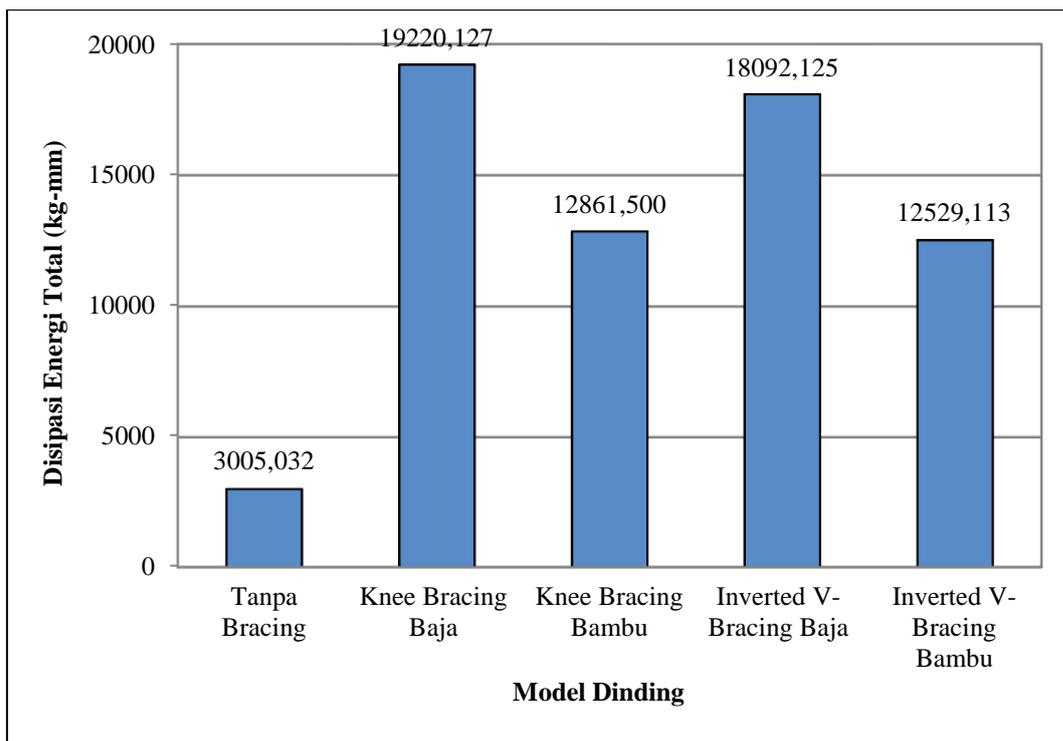
karena perbedaan perilaku tegangan-regangan dimana material baja memiliki sifat yang lebih daktail daripada bambu. Dinding tanpa *bracing* sebetulnya menunjukkan perilaku yang daktail, tetapi kemampuan tahanan bebannya lebih kecil dibandingkan dengan dinding dengan penambahan *bracing*.

5.10 Disipasi Energi

Disipasi energi dapat didefinisikan sebagai redaman histeristik yang tidak terpengaruh oleh kecepatan struktur tetapi disipasi energi meningkat seiring dengan meningkatnya tingkat perpindahan (Wakabayashi, 1986). Luas daerah yang diselubungi oleh kurva histeristik beban perpindahan merupakan energi total disipasi yang terjadi pada struktur. Perhitungan luasan selubung kurva histerisis dengan cara membagi daerah selubung menjadi beberapa segmen segitiga dan kotak untuk memudahkan perhitungan. Tetapi untuk alasan waktu dan ketelitian maka perhitungan luasan kurva selubung menggunakan program bantu *AutoCAD* seperti pada Gambar 5.13. Hasil perhitungan disipasi energi dapat dilihat pada Gambar 5.14.



Gambar 5. 13 Luas kurva selubung menggunakan program bantu *AutoCAD*



Gambar 5. 14 Disipasi energi total

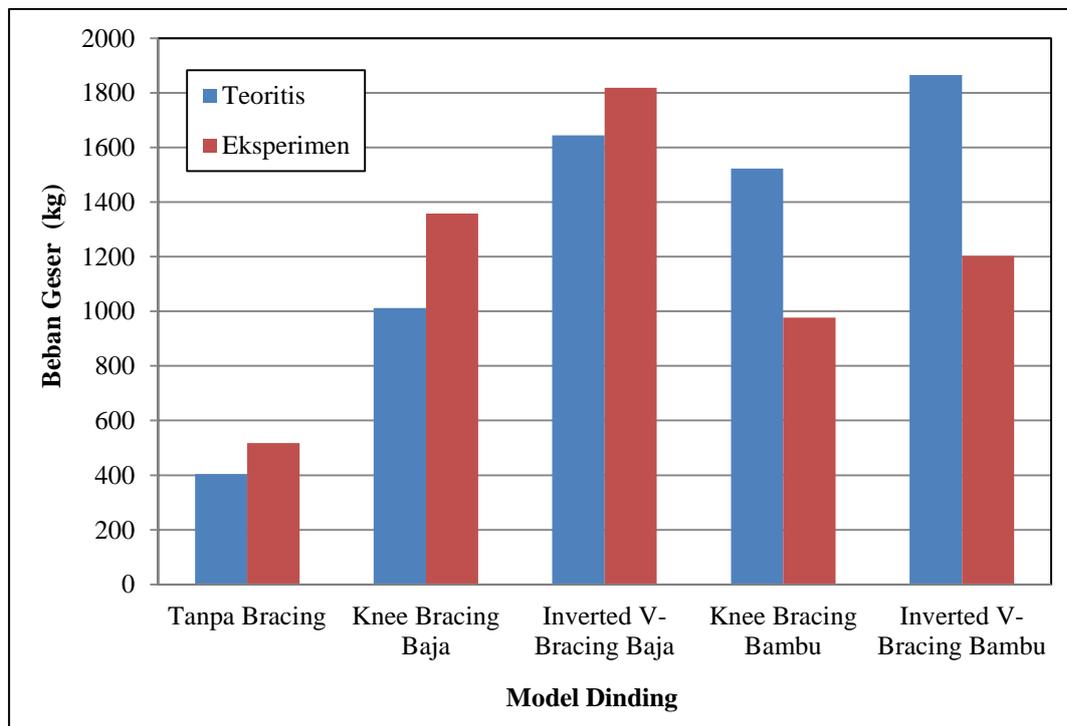
Dari grafik disipasi energi total menunjukkan perilaku berbeda antara dinding tanpa *bracing* dan dinding dengan penambahan *bracing*. Nilai disipasi energi yang terbesar terjadi pada dinding dengan *bracing* tulangan baja baik untuk model *knee* maupun *inverted v-bracing*. Jumlah energi total yang diserap kedua model *bracing* cenderung sama. Ini menunjukkan bahwa penambahan *bracing* pada dinding pasangan batu bata sangat efektif. Dengan jumlah energi yang diserap semakin besar maka waktu dinding mengalami keruntuhan semakin panjang. Ini sejalan dengan konsep desain bangunan tahan gempa dimana sebisa mungkin elemen struktur tidak mengalami keruntuhan ketika dilanda gempa bumi sehingga menyediakan waktu bagi penghuninya untuk menyelamatkan diri.

5.11 Analisis Teoritis

Dalam penelitian ini, analisis teoritis yang digunakan untuk menghitung besar beban geser dinding menggunakan rumus pendekatan dari (Paulay & Priestley, 1992) pada Persamaan (2-4). Sedangkan untuk perhitungan deformasi dinding menggunakan pendekatan Metode Elemen Hingga (MEH) dengan program bantu *ABAQUS Student Edition 2018* dengan memasukkan nilai elastisitas dan *poisson ratio* dari bahan yang digunakan seperti pada Tabel 5.17. Untuk perhitungan beban geser teoritis dapat dilihat pada Lampiran 5. Hasil perhitungan beban geser maksimum dapat dilihat pada Tabel 5.16.

Tabel 5. 16
Hasil perhitungan teoritis

Model Dinding	Beban geser maksimum teoritis (kg)	Beban geser maksimum eksperimen (kg)	Perbandingan Beban geser teoritis dan eksperimen
Dinding tanpa <i>bracing</i>	404,241	518	0,780
Dinding dengan <i>knee bracing</i> baja	1012,347	1358	0,745
Dinding dengan <i>knee bracing</i> bambu	1522,578	977	1,559
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> baja	1644,107	1818	0,904
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> bambu	1864,770	1202	1,551



Gambar 5. 15 Perbandingan beban geser teoritis dan eksperimen

Dari Tabel 5.16 dan Gambar 5.15 menunjukkan bahwa hasil beban geser maksimum antara perhitungan teoritis dan hasil eksperimen untuk model dinding tanpa *bracing* dan *bracing* dengan tulangan baja tidak terlalu jauh perbedaannya. Umumnya perbedaan-perbedaan kecil yang terjadi karena faktor ketelitian pembacaan alat pada saat pengujian. Hasil yang berbeda jauh terlihat pada model dinding dengan *bracing* dari tulangan bambu, dimana perbandingan yang besar antara hasil perhitungan teoritis dan eksperimen. Hal ini disebabkan karena persamaan yang digunakan masih sebatas pemodelan untuk dinding dengan penggunaan tulangan baja sehingga perbedaan nilai asumsi antara pengaruh tulangan baja dan bambu dianggap sama, misalnya nilai f_y pada baja adalah tegangan leleh, sedangkan pada bambu adalah tegangan putus karena bambu

tidak memiliki batas leleh akibat dari sifat material bambu yang lebih getas dari baja.

Tabel 5. 17

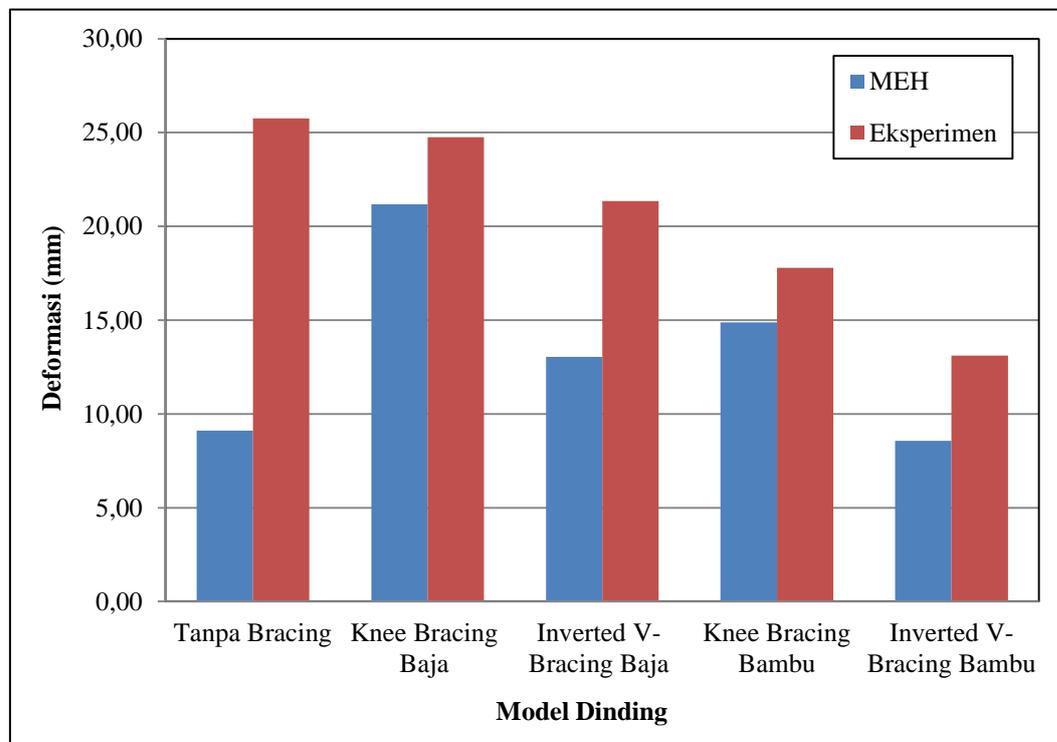
Nilai sifat mekanis bahan yang dimasukkan dalam analisa MEH

Bahan	Modulus Elastisitas (kg/cm ²)	<i>Poisson Ratio</i> (Wisnumurti, 2013)
Baja	2000000	0,3
Bambu	200000	0,2
Beton	194345,84	0,25
Dinding	7695,52 (550f' _m)	0,3

Tabel 5. 18

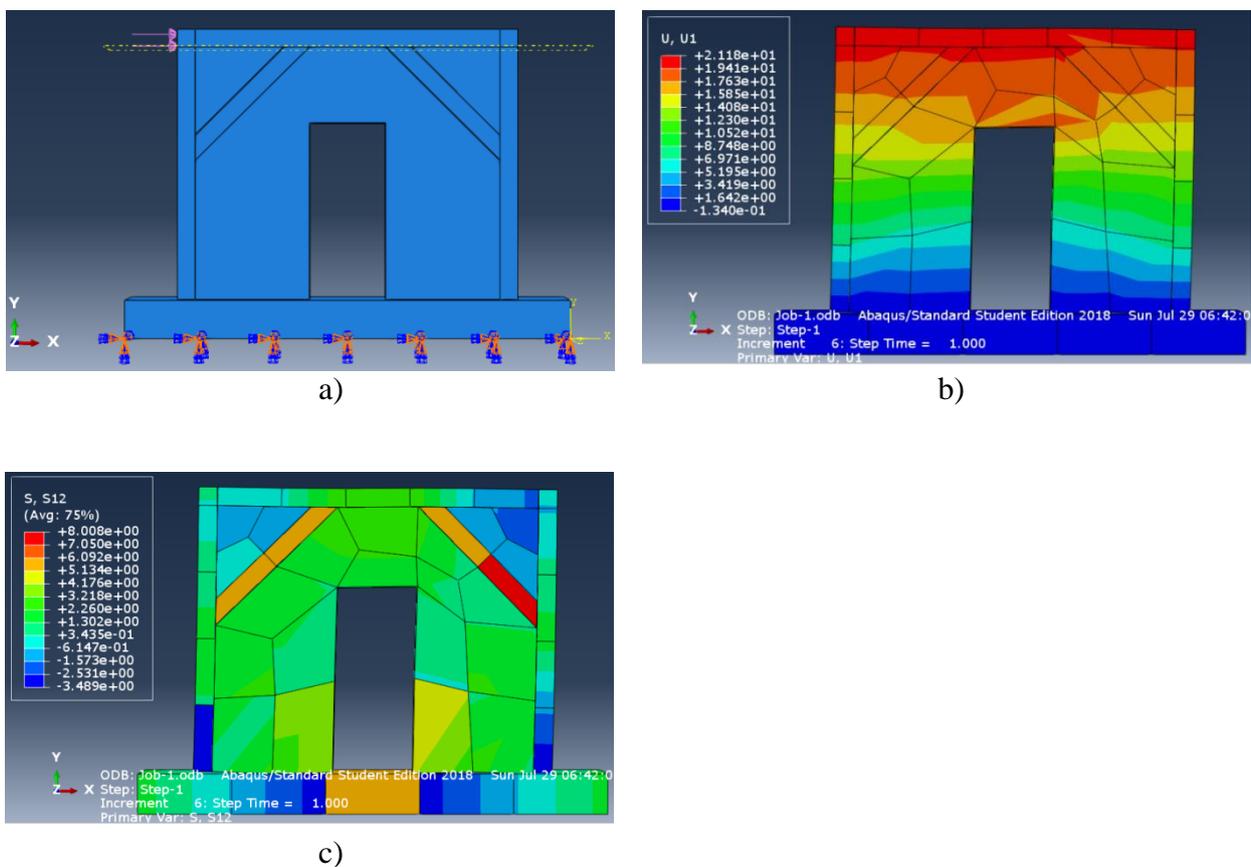
Hasil perhitungan nilai deformasi MEH dan Eksperimen

Model Dinding	Deformasi Maksimum MEH (mm)	Deformasi Maksimum Eksperimen (mm)	Perbandingan deformasi MEH dan Eksperimen
Dinding tanpa <i>bracing</i>	9,11	25,75	2,827
Dinding dengan <i>knee bracing</i> baja	21,18	24,75	1,169
Dinding dengan <i>knee bracing</i> bambu	14,89	17,80	1,195
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> baja	13,04	21,35	1,637
Dinding dengan <i>inverted v-bracing</i> bambu	8,56	13,12	1,533



Gambar 5. 16 Perbandingan nilai deformasi MEH dan Eksperimen

Berdasarkan Tabel 5.18 dan Gambar 5.16 menunjukkan bahwa hasil perhitungan antara metode elemen hingga dengan menggunakan program bantu *ABAQUS* dan hasil ekperimental di laboratorium memiliki perbedaan. Namun perbedaannya tidak terlalu signifikan antara keduanya. Dimana hasil deformasi *ABAQUS* cukup mendekati kondisi nyata. Hasil yang jauh berbeda terjadi pada dinding tanpa *bracing* dimana perbedaan antara ekperimen dan MEH mencapai 2,827 kali, hal ini dapat terjadi karena ketidakcocokan asumsi yang ada didalam *software* dengan kondisi *real* yang terjadi. Hasil analisa deformasi dengan menggunakan *software ABAQUS* dapat dilihat pada Gambar 5.17. Untuk hasil analisa selengkapnya dapat dilihat dalam Lampiran 5.



Gambar 5. 17 Hasil analisa menggunakan *software ABAQUS* : a) model dinding, b) deformasi maksimum, c) pola tegangan geser

Tabel 5. 19
Tegangan bahan

No	Jenis Uji	Tegangan rata-rata (MPa)
1	Kuat tekan bata	1,24
2	Kuat tekan mortar	2,83
3	Kuat tekan prisma	1,40
4	Kuat geser dinding	0,14

Tabel 5. 20
Tegangan geser maksimum struktur dinding dengan menggunakan *ABAQUS Software*

No	Model dinding	Tegangan geser maksimum (MPa)
1	Dinding tanpa <i>bracing</i>	2,46
2	Dinding <i>knee bracing</i> baja	4,18
3	Dinding <i>knee bracing</i> bambu	3,94
4	Dinding <i>inverted v-bracing</i> baja	3,56
5	Dinding <i>inverted v-bracing</i> bambu	3,41

Dengan membandingkan hasil antara uji bahan dan struktur, diperoleh bahwa ketika dijadikan menjadi satu kesatuan struktur dinding nilai tegangan geser dari dinding meningkat sebesar 17,57 kali untuk dinding tanpa *bracing* yang dikarenakan faktor kekangan daripada balok dan kolom ikat. Dari Tabel 5.20 menunjukkan efektifitas penggunaan *bracing* dalam meningkatkan tegangan geser yang mampu diterima oleh dinding karena fungsi utama dari penggunaan *bracing* adalah meningkatkan kekuatan tarik dan geser terbukti. Dengan tegangan geser yang lebih tinggi maka semakin meningkat kemampuan dinding dalam menerima beban geser akibat gempa. Dari Tabel 5.20 juga diketahui pengaruh model dan jenis tulangan berpengaruh terhadap peningkatan tegangan geser struktur dinding. dinding yang menggunakan model *knee bracing* mempunyai nilai tegangan geser yang lebih besar daripada model *inverted v-bracing*, hal ini dikarenakan kemampuan kemampuan daktilitas dan deformasi berpengaruh terhadap kemampuan geser dari dinding. Perbedaan pemilihan jenis tulangan juga berpengaruh terhadap kemampuan geser dari dinding dimana dinding dengan *bracing* tulangan bambu memiliki tegangan geser maksimum yang lebih kecil dikarenakan sifat dari material bambu yang memiliki modulus elastisitas yang lebih kecil dari baja dan bambu merupakan material yang lebih getas dari baja sehingga kemampuan menerima beban pada fase inelastisnya sangat jauh berkurang.

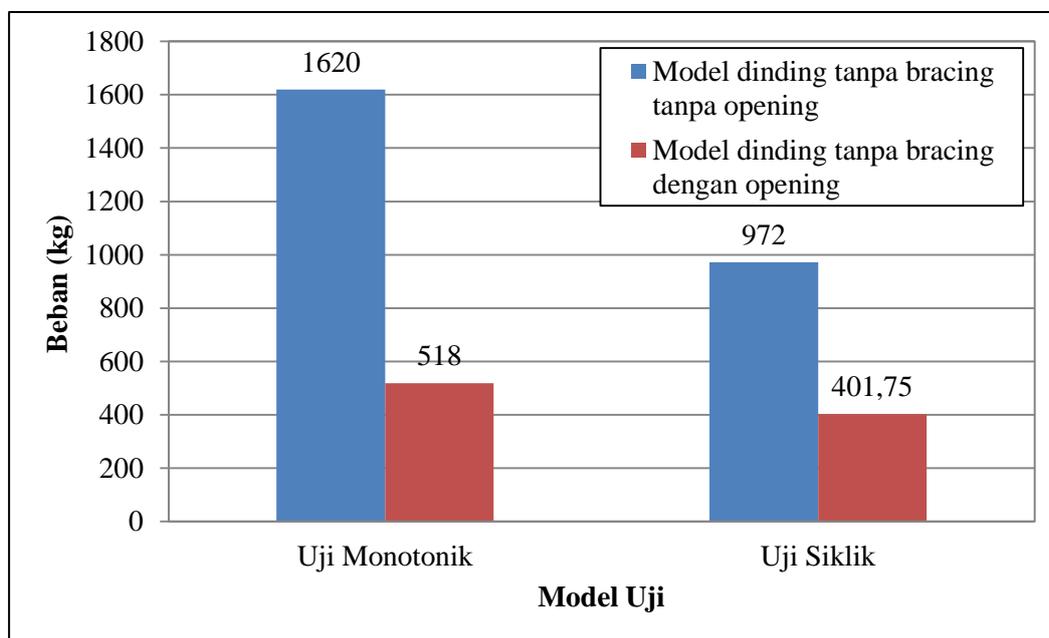
5.12 Pengaruh *Opening* pada Dinding Pasangan Batu Bata

Dengan adanya *opening* pada elemen dinding dapat menurunkan kekakuan, kapasitas tahanan beban dan kapasitas beban runtuh. Dalam hasil uji beban monotonik dan siklik yang dilakukan oleh (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011) didapatkan nilai beban maksimum dan deformasi maksimum dari dinding tanpa *bracing* seperti pada Tabel 5.19. Kemudian dari nilai tersebut dibandingkan dengan hasil penelitian yang dilakukan.

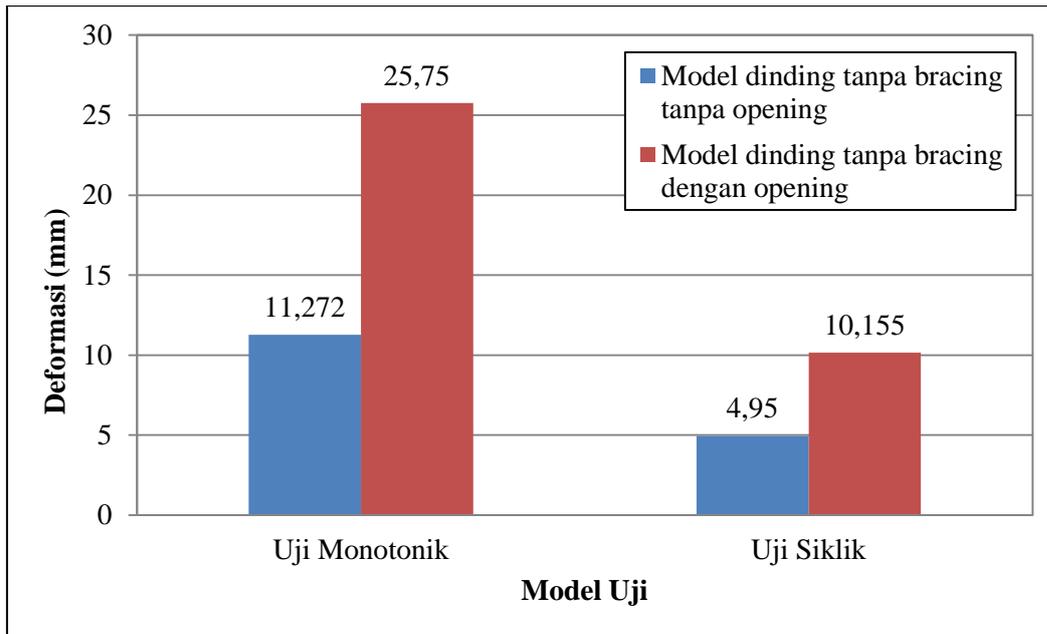
Tabel 5. 21

Perbandingan nilai beban maksimum dan deformasi maksimum antara dinding tanpa *opening* (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011) dan dinding dengan *opening*

Model Dinding	Beban Maksimum		Deformasi Maksimum	
	Uji Monotonik (kg)	Uji Siklik (kg)	Uji Monotonik (mm)	Uji Siklik (mm)
Model dinding tanpa <i>bracing</i> tanpa <i>opening</i> (Susanti, Dewi, & Nurlina, 2011)	1620	972	11,272	4,95
Model dinding tanpa <i>bracing</i> dengan <i>opening</i>	518	401,75	25,75	10,155



Gambar 5. 18 Perbandingan beban maksimum uji monotonik dan siklik



Gambar 5. 19 Perbandingan deformasi maksimum uji monotonik dan siklik

Dari hasil uji untuk kedua model dinding di atas menunjukkan bahwa dengan adanya *opening* menurunkan kekuatan tahan beban dari dinding pasangan batu bata baik uji monotonik maupun siklik. Akan tetapi deformasi dinding tanpa *opening* meningkat jika dibandingkan dengan dinding tanpa *opening*, ini disebabkan karena nilai kekakuan berpengaruh terhadap kemampuan berdeformasi dinding. Semakin tinggi nilai kekakuan maka semakin kecil nilai deformasi begitupun sebaliknya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Setelah melakukan penelitian, pengujian dan analisa hasil, berikut ini adalah kesimpulan akhir dari penelitian pengaruh penambahan *bracing* pada dinding pasangan batu bata terhadap respon gempa :

1. Penggunaan *bracing* pada dinding pasangan batu bata dengan *opening* sangat efektif dalam meningkatkan kekakuan dan kemampuan tahan beban gempa karena *bracing* memberikan sumbangan kekuatan dalam menahan gaya tarik akibat beban gempa. Dinding pasangan batu bata bersifat hampir sama dengan beton yaitu kekuatan tekannya jauh lebih tinggi daripada kuat tariknya. Kelemahan dinding ini dapat tertutupi dengan adanya *bracing*.
2. Pemilihan model *bracing* berpengaruh terhadap kemampuan tahanan beban gempa dan deformasinya. Model dinding dengan model *inverted v-bracing* memiliki kemampuan tahanan beban gempa yang paling besar untuk masing-masing jenis tulangan. Hal ini disebabkan model *inverted v-bracing* memiliki kekakuan yang besar, tetapi nilai deformasi menjadi menurun dikarenakan kekakuan yang meningkat.
3. Penggunaan tulangan bambu pada *bracing* cukup efektif untuk menggantikan tulangan baja apabila diaplikasikan pada wilayah gempa ringan sampai sedang, tetapi untuk wilayah gempa sedang sampai tinggi disarankan untuk menggunakan *bracing* dari tulangan baja karena *bracing* dengan tulangan baja memiliki tahan beban gempa yang lebih baik dan lebih dapat bertahan dalam fase non-elastis sedangkan bambu kekuatannya telah jauh berkurang.
4. Penggunaan *bracing* pada dinding dengan *opening* tidak berpengaruh signifikan karena sebetulnya dinding dengan *opening* memiliki daktilitas yang baik tetapi dari sisi kemampuan tahanan beban gempanya sangat kecil bila dibandingkan dinding dengan penambahan *bracing*. Jadi penambahan *bracing* sangat efektif menambah kekuatan dan menjaga kemampuan daktilitas dari dinding pasangan batu bata dengan *opening*. Dinding dengan kemampuan daktilitas yang paling baik adalah yang ditambahkan *knee bracing* tulangan baja. Penggunaan *bracing* pada dinding menunjukkan kemampuan disipasi energi yang sangat baik. Kemampuan disipasi

energi yang terbesar terjadi pada dinding dengan *bracing* tulangan baja baik untuk model knee maupun *inverted v-bracing*. Jumlah energi total yang diserap kedua model *bracing* cenderung sama. Ini menunjukkan bahwa pengaruh model *bracing* tidak berpengaruh secara signifikan dalam kemampuan disipasi energi tetapi penambahan dengan adanya *bracing* sebagai pengaku pada dinding pasangan batu bata sangat efektif dalam menyerap energi akibat beban gempa. Dengan jumlah energi yang diserap semakin besar maka waktu dinding mengalami keruntuhan semakin panjang. Ini sejalan dengan konsep desain bangunan tahan gempa dimana sebisa mungkin elemen struktur tidak mengalami keruntuhan ketika dilanda gempa bumi sehingga menyediakan waktu bagi penghuninya untuk menyelamatkan diri.

6.2 Saran

Agar penelitian selanjutnya dapat dilaksanakan lebih baik maka terdapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat perlu pengawasan dan ketelitian dalam pembuatan benda uji.
2. Penelitian dapat dikembangkan dengan membuat variasi letak bukaan (*opening*) dan pola keruntuhan yang terjadi pada dinding pasangan batu bata dengan *opening* ketika ditambahkan pengaku (*bracing*).
3. Perlunya kemampuan operasi program bantu yang baik karena sangat membantu dalam proses analisa.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C-1314. (2012). *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM C-144. (1991). *Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*. Philadelphia: ASTM International.
- ASTM E-519. (2010). *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. Philadelphia: ASTM International.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 15-2094-2000 : Bata Merah Pejal untuk Pasangan Dinding*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2003). *SNI 03-1726-2003 : Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- BMKG. (2017). *Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika*. Diakses Juli 12, 2017, dari http://repegempa.bmkg.go.id/proses_query2.php
- Calvi, G. M., & Magenes, G. (1997). Seismic Evaluation and Rehabilitation of Masonry Buildings. *Proceedings of the U.S.-Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit*, 123-142.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington D.C: Federal Emergency Management Agency.
- Ghavami, K. (2005). Bamboo as Reinforcement in Structural Concrete Elements. *Cement and Concrete Composites*, 27(6), 637-649.
- Hadad, H. S., Metwally, I. M., & El-Betar, S. (2014). Cyclic behavior of braced concrete frames: Experimental investigation and numerical simulation. *Housing and Building National Research Center Journal*, 13, 262–270.
- Handayani, S. (2007). Pengujian Sifat Mekanik Bambu (Metode Pengawetan Dengan Boraks). *Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan*, Volume 9, hal: 43 - 53.
- Hendry, A. W., Sinha, B. P., & Davies, S. R. (2004). *Design of Masonry Structures*. London: E & FN Spon.
- Janssen, J. J. (1981). *Bamboo in Building Structures*. Netherlands: Eindhoven University of Technology.
- Kaushik, H. B., Rai, D. C., & Jain, S. K. (2007). Uniaxial compressive stress–strain model for clay brick masonry. *Current Science*, Vol. 92(4), 497-501.

- Maidiawati, Tanjung, J., & Medriosa, H. (2017). Pengaruh Dinding Bata dengan Bukaannya (Lobang) terhadap Ketahanan Lateral Struktur Rangka Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, Vol. 24, 145-152.
- Mangkoesobroto, S. P., Goto, T., Amri, S., & Tambunan, S. (2005). Experimental and Numerical Study of Confined Masonry Wall Under Cyclic Loading. *ITB Central Library*.
- Narayana, J. (2016). Pengaruh Letak Bukaannya pada Beban Runtuh Dinding Bata Terkekang (Confined Masonry) yang Dibebani Secara Siklik Lateral. *Jurnal Jurusan Teknik Sipil*, 1-9.
- Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Popescu, C., Sas, G., Sabău, C., & Blanksvärd, T. (2016). Effect of Cut-Out Openings on the Axial Strength of Concrete Walls. *Journal of Structural Engineering*, 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001558, 1-17.
- Schneider, R. R., & Dickey, W. L. (1994). *Reinforced Masonry Design*. Michigan: Pearson.
- Susanti, L., Dewi, S. M., & Nurlina, S. (2011). Pengaruh Penggunaan Pengekang (Bracing) pada Dinding Pasangan Batu Bata Terhadap Respon Gempa. *Jurnal Rekayasa Sipil*, Volume 5, 1-10.
- Tizapa, S. S. (2010). *Theses : Experimental and Numerical Study of Confined Masonry Wall Under In-Plane Loads : Case : Guerrero State (Mexico)*. Mexico: HAL archives-ouvertes.
- Tjokrodimulyo, K. (1996). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Nafiri.
- Voon, K. C., & Ingham, J. M. (2008). Experimental In-Plane Strength Investigation of Reinforced Concrete Masonry Walls with Openings. *Journal of Structural Engineering*, 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:5(758), 758-768.
- Wakabayashi, M. (1986). *Design of Earthquake-Resistant Buildings*. New York: McGraw-Hill.
- Wisnumurti. (2013). *Disertasi : Struktur Dinding Pasangan Bata Merah Lokal Dengan Perkuatan Bilah Bambu di Daerah Rawan Gempa*. Malang: Program Doktor Teknik Sipil Universitas Brawijaya.