



**ANALISIS PERKUATAN SAMBUNGAN KERING BALOK
KOLOM PRACETAK DENGAN BAHAN FRP
(FIBER REINFORCED POLYMER)**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
MINAT TEKNIK STRUKTUR**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**EDO PRASETYA ADI
176060100111021**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK SIPIL
MALANG
2019**



LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS PERKUATAN SAMBUNGAN KERING BALOK
KOLOM PRACETAK DENGAN BAHAN FRP
(FIBER REINFORCED POLYMER)

TESIS

PROGRAM MAGISTER TEKNIK SIPIL
MINAT TEKNIK STRUKTUR

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



EDO PRASETYA ADI
NIM. 176060100111021

Tesis ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
Pada tanggal 28 Mei 2019

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono MD. MS.
NIP. 19560412 198303 1 005

Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D
NIP. 19740619 200012 1 002

Mengetahui
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, 22 Mei 2019
Mahasiswa,

Edo Prasetya Adi
NIM. 176060100111021

**IDENTITAS**

JUDUL TESIS :
ANALISIS PERKUATAN SAMBUNGAN KERING BALOK KOLOM
PRACETAK DENGAN BAHAN FRP (*FIBER REINFORCED POLYMER*)

Nama Mahasiswa : Edo Prasetya Adi
NIM : 176060100111021
Program Studi : Magister Teknik Sipil
Minat : Rekayasa Struktur

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono MD. MS.
Anggota : Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Dr.Eng. Devi Nuralinah, ST., MT.
Dosen Penguji 2 : Dr.Eng. Ming Narto Wijaya, ST., MT, M.Sc

TESIS INI TELAH DIUJIKAN PADA

Seminar Proposal : 13 Desember 2018
Seminar Hasil : 29 April 2019
Ujian Tertutup : 22 Mei 2019

[illegible]

Repository Universitas Brawijaya

Karya ilmiah ini aku persembahkan kepada
Ayahanda, Ibunda dan Kakak tercinta
Terima kasih atas segala bantuan, doa
serta dukungan yang telah diberikan selama ini



RIWAYAT HIDUP

Edo Prasetya Adi lahir di Lumajang, pada tanggal 13 mei 1994. Merupakan anak ke-2 dari 2 bersaudara dari pasangan Bapak Siswoyo dan Ibu Yayuk Ariwati. Memiliki kakak perempuan bernama Vina Agustin Sisworini. Penulis berkebangsaan Indonesia dan beragama islam. Kini penulis beralamat di Dsn. II Sumberejo RT/RW.01/09 Kecamatan Senduro Kabupaten Lumajang Jawa Timur. Pendidikan dasarnya ditempuh di SDN Senduro 01 dan tamat pada tahun 2006. Kemudian melanjutkan pendidikan ke Pondok Pesantren, Mts. Wali Songo Ngabar Siman Ponorogo tamat pada tahun 2009. Kemudian menetap hingga ke jenjang Madrasah Aliyah (MA) dengan jurusan IPA dan tamat pada tahun 2012. Lulus program sarjana teknik sipil di Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang tahun 2016. Pengalaman kerja sebagai karyawan di Konsultan Perencana di Malang selama enam bulan selanjutnya melanjutkan studi di Program Magister Teknik minat struktur di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 2017 hingga 2019. Motto hidup “Hidup Sekali Hiduplah yang Berarti”

Malang, Mei 2019

Penulis



PUBLIKASI ILMIAH

Adi, Edo P., Wibowo, A. and Soehardjono A. (2019). "Evaluation Of Model Strengthening On Dry Joint In Precast Beam And Column Using CFRP Material (Carbon Fiber Reinforced Polymer)", *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, Vol. 04, No. 02, Mei 2019.



PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga Tesis yang berjudul “Analisis Perkuatan Sambungan Kering Balok Kolom Pracetak dengan Bahan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)” sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

Tidak lupa penulis mengucapkan banyak-banyak terima kasih kepada pihak – pihak yang telah membantu untuk dapat menyelesaikan proposal skripsi ini dengan baik. Ucapan terima kasih selayaknya diberikan kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono M.DJ, MT. selaku pembimbing I yang selalu meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan arahan selama penyusunan tesis.
2. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing II yang telah banyak memberikan bantuan, bimbingan, masukan dan arahan selama proses penyusunan tesis ini.
3. Bapak Dr. Eng. Devi Nuralinah, ST., MT selaku ketua tim penguji tesis ini dan Bapak Dr. Eng. Ming Narto Wijaya, ST., M.T. M.Sc selaku anggota tim penguji tesis yang sangat banyak memberikan masukan dan saran – saran yang baik untuk tesis ini.
4. Bapak Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT selaku ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
5. Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, MT selaku kepala Laboratorium Struktur Universitas Brawijaya beserta Staff laboran.
6. Bapak (Siswoyo, S.Pd), Ibu (Yayuk Ariwati S.Pd) dan Mbak Vina Agustina S. selaku keluarga yang senantiasa memberikan doa, motivasi dan dukungan.
7. Rekan seperjuangan dan rekan mahasiswa S2 yang telah membantu dan meluangkan waktunya dalam penelitian hingga tesis ini dapat terselesaikan.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tesis ini baik secara langsung dan secara tidak langsung yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.



9. Oci (Yosi Ayu Wiryan Pertiwi) atas segala upaya dalam mendampingi setiap proses dalam studi ini.

Penulis menyadari dengan segala keterbatasan yang dimiliki baik kemampuan, tenaga, waktu dan biaya, dalam tulisan ini pastilah masih banyak terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar tulisan ini bisa memberikan manfaat yang lebih bagi kita semua, khususnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Malang, Mei 2019

Penulis



DAFTAR ISI

Halaman

PENGANTAR i

DAFTAR ISI iii

DAFTAR TABEL vi

DAFTAR GAMBAR viii

DAFTAR LAMPIRAN xi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Identifikasi Masalah 2

1.3 Rumusan Masalah 3

1.4 Tujuan Penelitian 3

1.5 Batasan Masalah 3

1.6 Manfaat Penelitian 4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

2.1 Tinjauan Umum 5

2.2 Beton Pracetak (*Precast Concrete*) 5

2.2.1 Kelebihan dan kekurangan beton pracetak 6

2.2.2 Sambungan komponen beton pracetak 6

2.3 Struktur Sambungan Balok Kolom 8

2.4 Beban Siklik 11

2.5 Mekanisme Keruntuhan 12

2.6 Kekakuan (*Stiffness*) 16

2.7 Daktilitas 17

2.8 Perkuatan Komponen Struktur (*Retrofitting*) 19

2.8.1 FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) 20

2.8.2 CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) 21

2.8.3 Lem Perekat (*Epoxy*) 23



2.9 Studi Penelitian Terdahulu	25
--------------------------------------	----

BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN..... 31

3.1 Kerangka Penelitian	31
3.2 Model Koseptual Berpikir Secara Umum	32
3.3 Hipotesis	33

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN..... 35

4.1. Model Penelitian	35
4.2. Tempat Penelitian	36
4.3. Bahan dan Alat Pengujian	36
4.3.1 Bahan	36
4.3.2 Alat	37
4.4. Benda Uji Eksisting	38
4.5. Variasi Benda Uji	40
4.6. Prosedur Penelitian	43
4.6.1 Prosedur perawatan benda uji	43
4.6.2 Prosedur pembuatan lem perekat (<i>Epoxy</i>).....	44
4.6.3 Prosedur pemasangan FRP.....	44
4.6.4 Prosedur pengujian benda uji	46
4.7. Tahapan Penelitian	48
4.8. Diagram Alir Penelitian	49

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN..... 51

5.1 Analisis Hasil Benda Uji Eksisting	51
5.1.1 Kapasitas maksimum	51
5.1.2 Daktilitas eksisting	52
5.1.3 Kekakuan eksisting	56
5.2 Analisis Hasil Perkuatan Benda Uji	57
5.2.1 Analisa kapasias maksimum <i>retrofitting</i>	58
5.2.2 Analisa daktilitas <i>retrofitting</i>	69
5.2.2.1 Daktilitas disaat P titik ujung	69



5.2.2.2	Daktilitas disaat P lengkung pertama	73
5.2.3	Analisa kekakuan <i>retrofitting</i>	76
5.3	Perbandingan Hasil Pengujian Eksisting dan <i>Retrofitting</i>	78
5.3.1	Perbandingan kapasitas maksimum teoritis dan eksperimentl	78
5.3.2	Perbandingan kapasitas maksimum	79
5.3.3	Perbandingan nilai daktilitas	87
5.3.4	Perbandingan nilai kekakuan	89
5.4	Mekanisme Keruntuhan dan Pola Retak Benda Uji	92
BAB VI PENUTUP		95
6.1	Kesimpulan	95
6.2	Saran	97
DAFTAR PUSTAKA		99
LAMPIRAN-LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Pengaruh Kelangsingan Balok Terhadap Ragam Keruntuhan	15
2.2 Densitas Lembaran FRP	21
2.3 Faktor Reduksi FRP Pengaruh Lingkungan	21
2.4 Detail Properties CFRP <i>Sheet/Warp</i>	22
2.5 Detail Properties CFRP <i>Plate</i>	22
2.6 Informasi Sikadur 30 (A) dan 330 (B) lem perekat (<i>epoxy</i>)	24
2.7 Hasil Pengujian	26
2.8 Hasil Pengujian	27
4.1 Perincian Benda Uji Perkuatan Sambungan	40
4.2 Siklus Pembebanan	48
5.1 Nilai Kapasitas Maksimum Uji Eksisting	51
5.2 Nilai Daktilitas Tangensial saat P Puncak (<i>Peak</i>)	53
5.3 Nilai Daktilitas Secant saat P Puncak (<i>Peak</i>)	54
5.4 Nilai Daktilitas Tangensial saat P turun 5% dari <i>Peak</i>	54
5.5 Nilai Daktilitas Secant saat P turun 5% dari <i>Peak</i>	54
5.6 Nilai Daktilitas Tangensial saat P di ujung	55
5.7 Nilai Daktilitas Secant saat P di ujung	55
5.8 Detail dan Jumlah Benda Uji <i>Retrofitting</i>	57
5.9 Hasil Pengujian Benda Uji RA4	59
5.10 Hasil Pengujian Benda Uji RB4	61
5.11 Hasil Pengujian Benda Uji RA2 Dan RB2	63
5.12 Hasil Penelitian Terdahulu	68
5.13 Nilai Daktilitas Secant <i>retrofitting</i> titik ujung	69
5.14 Nilai Daktilitas Tangensial <i>retrofitting</i> titik ujung	71
5.15 Daktilitas Secant <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	73
5.16 Daktilitas Tangensial <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	74
5.17 Ringkasan Perbandingan hasil Teoritis dan Eksperimental	78
5.18 Pebandingan Nilai Kapasitas Maksimum A4-2 Dan RA4	79
5.19 Pebandingan Nilai Kapasitas Maksimum A4-1 Dan RB4	81



5.20 Nilai Kapasitas Maksimum A2-1,A2-2 Dan RA2,RB2	83
5.21 Rangkuman Nilai Kapasitas Maksimum	83
5.22 Rangkuman Nilai Daktilitas Secant Eksisting dan <i>Retrofitting</i>	86
5.23 Rangkuman Nilai Daktilitas Secant Eksisting dan <i>Retrofitting</i>	88
5.24 Rangkuman Nilai Daktilitas Tangensial Eksisting dan <i>Retrofitting</i>	88
5.25 Rangkuman Nilai Kekakuan Awal dan Akhir	89



DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Model pengangkuran beton pracetak	7
2.2 Spesifikasi tipe sambungan balok kolom	10
2.3 Detail lokasi penempatan sambungan	10
2.4 Contoh pola pembebanan ACI 374.1-05	12
2.5 Ragam keruntuhan dari kelangsingan balok (a) keruntuhan lentur, (b) keruntuhan tarik diagonal, (c) keruntuhan tekan geser	14
2.6 Hubungan kuat geser dan daktilitas perpindahan	15
2.7 Kekakuan <i>Secant</i> (<i>Peak to Peak Stiffness</i>)	16
2.8 Hubungan beban – lendutan	17
2.9 Alternatif penentuan titik leleh (<i>yield point</i>)	18
2.10 Definisi daktilitas kelengkungan	19
2.11 (A) CFRP <i>Warp/Sheet</i> , (B) CFRP <i>Plate</i>	22
2.12 (A) <i>epoxy</i> SikaDur 30, (B) <i>epoxy</i> SikaDur 330	23
2.13 Metode pemasangan CFRP	25
2.14 Pemodelan kekuatan benda uji	26
2.15 Pola kerusakan benda uji (a & b) benda uji control, (c & d) benda uji kekuatan FRP dan (e) kekuatan dengan plat baja	27
2.16 (a) Keruntuhan tipe J, (b) Keruntuhan tipe AJ, (c) Keruntuhan tipe BJ, (d) Keuntuhan tipe SJ	28
2.17 (a) Lepasnya FRP dari permukaan beton (<i>debonding</i>), (b) Terjadinya retakan/rusaknya FRP	29
2.18 Model pemasangan CFRP	30
3.1 Kerangka konsep penelitian	31
4.1 (A). Benda uji eksisting 4 angkur, (B). Benda uji eksisting 2 angkur.	39
4.2 (A) Benda uji model RA4	41
4.3 (A) Benda uji model RA2	41
4.4 (A) Benda uji model RB4	42
4.5 (A) Benda uji model RB2	42
4.6 Alur kekuatan sambungan balok kolom pracetak	43



4.7 (a) Proses pengambilan pecahan beton, (b) Proses <i>grouting</i>	43
4.8 (a) Epoxy tipe A, (b) Epoxy tipe B dan (c) Campuran epoxy A dan B	44
4.9 (a) Prose penghalusan, (b) Prosen pemasangan CFRP <i>plate</i> (c) Pemasnagan CFRP <i>sheet</i> dan (d) <i>Finishing</i>	45
4.10 Model pengujian beban <i>quasi</i> -siklik	46
4.11 <i>Setting</i> alat dan benda uji beban <i>quasi</i> -siklik	47
4.8 Pola pembebanan	48
4.9 Diagram alir penelitian	49
5.1 Benda uji eksisting	51
5.2 Kurva <i>backbone</i> pada pengujian 5 benda uji eksisting	52
5.3 Menentukan nilai leleh metode tangensial dan metode secant	53
5.4 Diagram batang hasil nilai daktilitas P <i>peak</i>	54
5.5 Diagram batang hasil nilai daktilitas P turun 5% dari <i>peak</i>	55
5.6 Diagram batang hasil nilai daktilitas P ujung	56
5.7 Kurva kekauan benda uji eksisting	56
5.8 Benda uji <i>retrofitting</i>	58
5.9 Kurva histeresis RA4	60
5.10 Kurva <i>backbone</i> RA4	60
5.11 Kurva histeresis RB4	62
5.12 Kurva <i>backbone</i> RB4	62
5.13 (atas) Kurva histeresis RA2, (bawah) Kurva <i>backbone</i> RA2	65
5.14 (atas) Kurva histeresis RB2, (bawah) Kurva <i>backbone</i> RB2	66
5.15 Kurva <i>backbone</i> hasil benda uji	67
5.16 Kondisi benda uji saat kapasitas maksimum	68
5.17 Kurva daktilitas secant RA4 <i>retrofitting</i> titik ujung	69
5.18 Kurva daktilitas secant RB4, RA2 dan RB2 <i>retrofitting</i> titik ujung	70
5.19 Kurva daktilitas tangensial RA4 dan RB4 <i>retrofitting</i> titik ujung	71
5.20 Kurva daktilitas tangensial RA2 dan RB2 <i>retrofitting</i> titik ujung	72
5.21 Kurva daktilitas secant RA4 dan RB4 <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	73



5.22 Kurva daktilitas tangensial RA2 dan RB2 <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	74
5.23 Kurva daktilitas secant RA4, RB4 dan RA2 <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	75
5.24 Kurva daktilitas secant RB2 <i>retrofitting</i> lengkungan pertama	76
5.25 Kurva kekakuan benda uji <i>retrofit</i> (%)	77
5.26 Kurva kekakuan benda uji <i>retrofit</i> (kg/mm)	77
5.27 Perbandingan kurva histeresis RA4 dan A4-2	80
5.28 Perbandingan kurva histeresis RB4 dan A4-1	82
5.29 Perbandingan kurva histeresis RB2 dan A2-1	85
5.30 Perbandingan kurva histeresis RA2 dan A2-2	85
5.31 Kurva <i>backbone</i> perbandingan sebelum dan sesudah <i>retrofitting</i> ..	87
5.32 Perbandingan nilai kekakaun RA4 dan A4-2	89
5.33 Perbandingan nilai kekakaun RB4 dan A4-1	90
5.34 Perbandingan nilai kekakaun RA2 dan A2-2	90
5.35 Perbandingan nilai kekakaun RB2 dan A2-1	91
5.36 Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji	92
5.37 Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji	93

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. Perhitungan kebutuhan CFRP
2. Hasil pengujian *retrofitting*
3. Dokumentasi pengujian
4. Katalog bahan CFRP

RINGKASAN

ADI, EDO PRASETYA. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, April 2019. Analisis Perkuatan Sambungan Kering Balok Kolom Pracetak Dengan Bahan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono M.DJ, MT. dan Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

Banyaknya bencana gempa yang terjadi di Indonesia berdampak terhadap keruntuhan dan kerusakan suatu struktur bangunan, sehingga perbaikan dan perkuatan menjadi hal yang sering dijumpai. Terutama dalam komponen struktur beton yang sering mengalami penurunan kekuatan ataupun kegagalan fungsi pasca terjadinya bencana, sehingga tidak mampu lagi menahan beban suatu bangunan.

Banyaknya metode perkuatan yang digunakan di dalam pekerjaan rekonstruksi struktur diperlukan adanya evaluasi studi yang dapat memberikan kesimpulan hasil untuk membantu mengembangkan model dalam perkuatan struktur. Oleh sebab itu, peneliti akan melakukan evaluasi pembahasan tentang perkuatan sambungan kering balok kolom pracetak dengan menggunakan bahan FRP yang telah mengalami runtuh (*collapase*) akibat perilaku beban *quasi*-siklik.

Variasi benda uji eksisting dibedakan mejadi 2 macam yaitu: A4-1 dan A4-2 untuk 4 buah angkur dan A2-1 dan A2-2 untuk benda uji 2 buah angkur. Bahan perkuatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah FRP dengan jenis tipe bahan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) yang dilekatkan ke permukaan beton dengan bantuan lem perekat (*epoxy*) dengan merk SikaDur 30 dan SikaDur 330 tipe A dan tipe B. Variasi perkuatan penelitian ini dibagi menjadi 4 model yaitu (a) RA4 (4 angkur= *steel plate*+CFRP *Sheet*), (b) RB4 (4 angkur= CFRP *plate*+CFRP *Sheet*), (c) RA2 (2 angkur= *steel plate*+CFRP *Sheet*), dan (d) RB2 (2 angkur= CFRP *plate*+CFRP *Sheet*).

Hasil penelitian menunjukkan untuk kapasitas maksimum benda uji A4-2 menjadi RA4 memiliki persentase kenaikan sebesar 22,86%, untuk benda uji A4-1 menjadi RB4 memiliki persentase kenaikan sebesar 12,70%, A2-2 menjadi RA2 memiliki persentase kenaikan sebesar 23,54% dan untuk A2-1 menjadi RA1 memiliki persentase kenaikan sebesar 20,71%. Untuk hasil pengujian daktilitas dengan metode secant dan tangensial, secara keseluruhan nilai daktilitas yang telah diperkuat mengalami peningkatan, namun, nilai daktilitas dalam pengujian tidak dapat dijadikan penilaian akhir dikarenakan disaat akhir pemberhentian pengujian beban belum mengalami penurunan atau disimpulkan kondisi beton masih mampu memberikan kapasitas layan beban. Sedangkan, untuk nilai kekakuan dari keseluruhan benda uji mengalami peningkatan dari benda uji eksisting kecuali untuk benda uji RB4 yang mengalami nilai penurunan sebesar -26,52% dan untuk RB2 dengan bahan yang sama memiliki kenaikan sebesar 65,29%. Namun, untuk nilai RA4 dan RA2 dengan bahan perkuatan yang berbeda memiliki kenaikan sebesar 25,60% dan 47,08%.

Dari keseluruhan benda uji dapat disimpulkan bahwa perkuatan dengan penambahan lembaran *steel plate* + CFRP *Sheet* memiliki kapasitas maksimum, daktilitas dan kekakuan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkuatan dengan menggunakan CFRP *plate* + CFRP *Sheet*.

Kata kunci: Perkuatan (*strengthening*), *Steel plate*, CFRP *plate*, CFRP *Sheet*.

SUMMARY

ADI, EDO PRASETYA. Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, April 2019. The Analysis of Strengthening on Dry Joint in Precast Column and Beam Using FRP Material (*Fiber Reinforced Polymer*)

Supervisor:

Prof. Dr. Ir. Agoes Soehardjono M.DJ, MT. and Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

Along with the massive number of earthquake disasters that occurred in Indonesia which have impacted the building structure to be collapsed and damaged, causing repairs and strengthenings to be a common thing especially on concrete structural components which often experience a decrease in strength or even malfunction after a disaster that causing the structure to unable to withstand the load.

The various number of strengthening methods used in structural reconstruction work requires an evaluation from studies that can provide conclusions to help the models development in structural strengthening. Therefore, researcher have conducted an evaluation on the strengthening on dry joints in precast column and beam using FRP materials that have collapsed due to quasi-cyclic load behavior.

Variations of existing specimens are divided into 2 types, namely: A4-1 and A4-2 for 4 anchors and A2-1 and A2-2 for 2 anchors as specimens. The strengthening material used in this research is FRP with the type of CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) which is attached to the concrete surface with the help of adhesive glue (*Epoxy*) named SikaDur 30 and SikaDur 330 type A and type B. The reinforcing variations of this research are divided into 4 models, namely (a) RA4 (4 anchors = steel plate + CFRP sheet), (b) RB4 (4 anchors = CFRP plate + CFRP sheet), (c) RA2 (2 anchors = steel plate + CFRP sheet), and (d) RB2 (2 anchors = CFRP plate + CFRP sheet).

The results of this study showed that, for maximum capacity, A4-2 to RA4 has 22.86% in percentage increase, A4-1 to RB4 has 12.70% in percentage increase, A2-2 to RA2 has a percentage increase of 23.54% and for A2-1 to RA1 has a percentage increase of 20.71%. For the results of ductility testing with secant and tangential methods, the overall value of ductility that has been strengthened has increased, however, the ductility value in the test cannot be used as a final assessment because at the end of the test the load has not decreased or it is concluded that the concrete condition is still able to provide load service capacity. Meanwhile, the stiffness value of the entire test object has increased from the existing specimen, except for the RB4 value which experiences a decrease of -26.52% and RB2, with the same material, has an increase of 65.29%. However, the values of RA4 and RA2 with different reinforcing materials have an increase of 25.60% and 47.08%.

From the overall test, it can be concluded that strengthening with the addition of steel plate + CFRP sheets has a higher maximum capacity, ductility and stiffness compared to strengthening using CFRP plate + CFRP sheet

Keywords: *Strengthening, Steel plate, CFRP plate, CFRP sheet,*



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan beton pracetak (*precast*) di dalam pekerjaan konstruksi sudah banyak dimanfaatkan, hal ini dikarenakan pemakaian beton pracetak memiliki beberapa keunggulan dalam metode pelaksanaan yang relatif lebih mudah serta dapat mempercepat pekerjaan. Keunggulan tersebut jelas sangat berbeda dengan penggunaan beton bertulang konvensional yang memerlukan waktu relatif lama dalam pelaksanaannya. Namun, selain memiliki keunggulan penggunaan beton pracetak pastinya juga memiliki kekurangan, salah satu dari kekurangan penggunaan beton pracetak ialah perlu adanya perhatian yang khusus terhadap sambungan-sambungannya terutama untuk bangunan yang di desain khusus untuk bangunan tahan gempa.

Seiring dengan banyaknya bencana gempa yang terjadi di Indonesia yang berdampak pada runtuh dan rusaknya suatu struktur bangunan membuat perbaikan dan perkuatan menjadi hal yang sering dijumpai di lapangan. Terutama dalam komponen struktur beton yang sering mengalami penurunan kekuatan ataupun kegagalan fungsi pasca terjadi bencana, sehingga tidak mampu lagi menahan beban suatu bangunan. Untuk itu perkuatan suatu struktur menjadi salah satu solusi untuk kenyamanan dan keamanan bagi para penghuninya.

Keruntuhan struktur beton yang sering terjadi akibat gaya gempa dapat ditentukan dengan melihat kualitas sambungannya, supaya mendapatkan bangunan dengan performa yang memuaskan disaat menerima gaya gempa, maka hendaklah memperhatikan kualitas dalam perencanaan dan pekerjaan sambungan balok-kolom serta mengacu kedalam beberapa peraturan SNI 2847-2013 tentang Standart Persyaratan Beton Struktural untuk Gedung dan SNI 7833:2012 tentang Tata Cara Perancangan Beton Pracetak Dan Beton Prategang Untuk Bangunan Gedung.

Sambungan balok-kolom dalam sebuah struktur merupakan komponen yang memiliki peranan yang sangat penting dan kritis, terutama yang dirancang untuk desain bangunan tahan gempa. Hal ini dikarenakan sambungan balok-kolom

memiliki peranan yang berfungsi sebagai penyalur suatu gaya yang diterima bangunan ke seluruh element struktur. Sambungan beton balok-kolom dapat dikategorikan menjadi 2 macam diantaranya ialah sambungan kering dan sambungan basah. Sambungan kering ialah sambungan yang biasa diaplikasikan untuk beton pracetak, sambungan ini biasa dihubungkan dengan menggunakan plat baja, las dan baut. Sedangkan sambungan basah ialah sambungan yang terhubung dengan menggunakan tulangan dari dalam beton yang dicor langsung ditempat.

Berbagai macam metode untuk perkuatan (*strengthening*) beton telah dikembangkan, dari segi perkuatan internal maupun perkuatan eksternal. Perkuatan dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa variasi bahan dan metode dalam pelaksanaannya, misalkan metode jacketing beton, penambahan plat baja atau dengan penambahan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) yang dilatkatkan dengan lem epoxy dan ditempatkan pada area yang mengalami kerusakan atau keruntuhan dan berbagai macam metode lainnya. Pertimbangan utama dalam perkuatan bertujuan untuk memudahkan dalam perbaikan suatu struktur dan tidak harus dengan memperbaharuihnya, namun semua itu perlu adanya kajian-kajian tertentu dalam pelaksanaan dan pengaplikasiannya.

1.2 Identifikasi Masalah

Sesuai dengan penulisan latar belakang diatas, banyaknya metode perkuatan yang digunakan di dalam pekerjaan rekonstruksi struktur diperlukan adanya evaluasi studi yang dapat memberikan kesimpulan hasil untuk membantu mengembangkan model dalam perkuatan struktur. Oleh sebab itu, peneliti akan melakukan evaluasi pembahasan tentang perkuatan sambungan kering balok kolom pracetak dengan menggunakan bahan FRP. Pembahasan ini sangat penting dilakukan guna mengetahui perilaku perkuatan struktur yang menggunakan FRP, terutama sambungan kering balok kolom pracetak yang telah mengalami runtuh (*collapase*) akibat perilaku beban *quasi*-siklik.

Adapun permasalahan yang ingin dibahas adalah untuk menganalisis perbandingan beban ultimit sambungan kering balok kolom pracetak sebelum kondisi runtuh dan setelah diperkuat menggunakan FRP, mekanisme keruntuhan,

pola retak yang terjadi setelah perkuatan, perilaku sambungan yang meliputi daltilitas, kekakuan dan perilaku akibat beban *quasi*-siklik terhadap sambungan kering balok kolom pracetak yang diperkuat FRP dengan menampilkan kurva histeretik. Sehingga dalam penelitian ini penulis ingin mengajukan judul penelitian yaitu **“Analisis Perkuatan Sambungan Kering Balok Kolom Pracetak dengan Bahan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)”**.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dirumuskan masalah sebagai berikut.

1. Berapa besar pengaruh perbandingan beban ultimit sambungan balok-kolom pracetak sebelum diperkuat dan setelah diperkuat dengan FRP ?
2. Bagaimana mekanisme keruntuhan dan pola retak sambungan kering balok kolom pracetak setelah diperkuat ?
3. Bagaimanakah efektifitas perilaku permodelan perkuatan sambungan kering balok-kolom pracetak menggunakan bahan FRP dengan pembebanan *quasi*-siklik?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui perbandingan kapistas ultimit sambungan balok-kolom pracetak sebelum dan setelah diperkuat.
2. Memperoleh mekanisme keruntuhan dan pola retak sambungan kering balok kolom pracetak setelah diperkuat.
3. Mendapatkan efektifitas perilaku model perkuatan sambungan kering balok-kolom pracetak menggunakan bahan FRP dengan pembebanan *quasi*-siklik.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan permasalahan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Struktur sambungan menggunakan tipe sambungan kering (*dry-joint*).
2. Mutu beton yang direncanakan dalam penelitian ini adalah $f_c' = 25$ MPa.
3. Material bahan yang digunakan antara lain:

- a. Tulangan sengkang $\varnothing 8$, $f_y = 289$ Mpa.
- b. Tulangan memanjang $\varnothing 12$, $f_y = 367$ Mpa.
- c. Angkur M16, $f_y = 464$ Mpa.
- d. Angkur M19, $f_y = 532$ Mpa.

4. Perkuatan menggunakan bahan dari FRP (*fiber reinforced polymer*) dengan tipe CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dengan merk SikaWarp 231C dan SikaCarboDur S512.
5. Perekat FRP menggunakan lem *epoxy* dengan merk Sikadur 30 dan Sikadur 330.
6. Perkuatan struktur dalam pengujian ini menggunakan dua tipe bahan tambahan yang berbeda dalam perkuatan benda uji.
7. Dalam penelitian ini meninjau tentang kapasitas beban lateral, daktilitas, kekakuan, kurva histeretik, mekanisme keruntuhan dan pola retak sambungan kering balok kolom pracetak setelah diperkuat dengan FRP serta meninjau model dan efektifitas bahan yang digunakan dalam sistem perkuatan struktur.

1.6 Manfaat Penelitian

Setiap penelitian diharapkan memberikan beberapa manfaat baik secara umum maupun secara khusus, adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Manfaat Secara Umum

Sebagai bahan informasi dan referensi kepada masyarakat perihal metode perkuatan struktur bangunan terutama sambungan kering balok kolom pracetak dengan menggunakan bahan FRP (*fiber reinforced polymer*).

2. Manfaat Secara Khusus

Menambahkan informasi yang diharapkan mampu memberikan pemahaman tentang metode perkuatan struktur sambungan kering balok kolom pracetak menggunakan bahan FRP (*fiber reinforced polymer*). Baik dari segi kekuatan dan efektivitas penggunaan metode perkuatan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Struktur utama bangunan merupakan bagian-bagian penting dalam sebuah bangunan yang sangat perlu diperhatikan disaat merencanakan bangunan tahan gempa. Kerusakan yang memberikan dampak retakan struktural pasca terjadinya gempa, dapat mengakibatkan melemahnya kekuatan struktur bangunan serta akan mengganggu kenyamanan bagi para penghuninya. Perkuatan (*strengthening*) struktur bangunan merupakan salah satu cara untuk mengembalikan fungsi dan kekuatan struktur bangunan yang telah mengalami penurunan kekuatan pasca terjadinya gempa.

Dalam bab ini akan penulis akan membahas mengenai kajian-kajian dari penelitian terdahulu yang membahas akan perkuatan struktur bangunan terutama sambungan balok kolom, beton pracetak, metode sambungan beton pracetak, sambungan struktur balok kolom, mekanisme keruntuhan, perkuatan komponen struktur, FRP (*Fiber Reinforced Concrete*) dan lem perekat (*epoxy*).

2.2 Beton Pracetak (*Precast Concrete*)

Beton pracetak merupakan sebuah metode pembuatan beton struktur dengan proses pembuatannya dikerjakan/dicetak di lokasi lain seperti pabrik ataupun *workshop* dengan kontrol mutu yang terjaga dengan baik. Penggunaan beton pracetak merupakan salah satu inovasi dari perkembangan suatu teknologi akan bahan struktur yang mampu menggantikan peran beton konvensional.

Perkembangan dan pemanfaatan konstruksi beton pracetak telah tumbuh secara pesat dalam kurun waktu yang sangat cepat baik di Indonesia sendiri maupun di dunia. Hal demikian ini tidaklah mengherankan dikarenakan pemakaian struktur beton pracetak mampu memberikan efisiensi waktu, efisiensi energi serta ramah terhadap lingkungan (Nurjannah, 234:2011)

2.2.1 Kelebihan dan kekurangan beton pracetak

Keunggulan dalam penggunaan beton pracetak jika dibandingkan dengan menggunakan beton konvensional dapat dibedakan sebagaimana berikut ini :

1. Konstruksi beton pracetak membutuhkan waktu yang lebih singkat jika dibandingkan dengan beton konvensional
2. Kualitas beton pracetak lebih terjamin, dikarenakan dibuat dalam kontrol mutu yang bagus dalam pabrik.
3. Ekonomis dalam biaya pekerjaannya dengan meminimalisir pekerja lapangan.
4. Tepat untuk pembangunan dengan lahan yang terbatas.
5. Pekerjaan *finishing* beton pracetak lebih mudah, karena tidak terpengaruh dengan cuaca.
6. Ramah terhadap lingkungan.

Namun, selain memiliki keunggulan dalam pemakaian dan pelaksanaan, struktur elemen beton pracetak juga memiliki kelemahan, antara lain :

1. Perlunya ketelitian dan pekerja yang ahli dalam proses perencanaannya.
2. Ukuran dan Jenis komponen pracetak terbatas karena disesuaikan dengan jumlah dan kapasitas peralatan yang ada.
3. Kurang ekonomis untuk pembangunan dengan nilai konstruksi yang kecil.
4. Perlunya perhatian khusus untuk sambungan beton pracetak, terutama di daerah rawan terjadi gempa.
5. Perlunya sarana dan prasarana yang mampu mendukung dalam perencanaan dan pemasangan beton pracetak.
6. Memerlukan lahan yang cukup besar untuk tempat pabrikasi dan penimbunan beton pracetak.

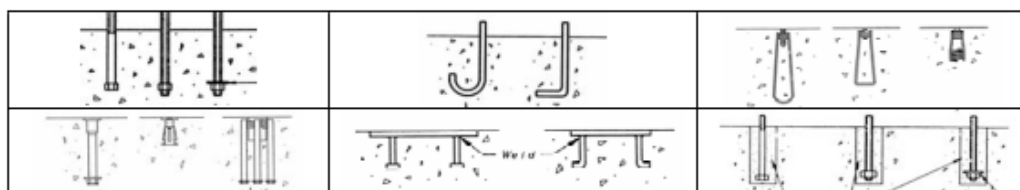
2.2.2 Sambungan komponen beton pracetak

Untuk mendesain sambungan beton pracetak hendaknya mengetahui dan memahami terlebih dahulu tentang jenis-jenis sambungan komponen

beton pracetak yang akan direncanakan, sebab fungsi dari sambungan selain untuk menyalurkan gaya antara struktur lainnya, sambungan juga berfungsi untuk menyatukan bagian-bagian daripada komponen beton pracetak menjadi suatu struktur yang kokoh. Selain itu kelemahan untuk konstruksi pracetak terletak didalam sambungan antara pracetak satu dengan elemen pracetak lainnya (Wahyudi, dkk 2010:II-20). Dalam hal ini jenis sambungan pracetak dapat dibagi menjadi dua antara lain sambungan kering (*dry-joint*) dan sambungan basah (*wet-joint*) berikut penjelasannya:

1. Sambungan Kering (*Dry-joint*)

Sambungan kering merupakan sambungan yang biasa digunakan dalam penyambungan antar komponen beton pracetak, sambungan kering adalah sambungan antar komphen beton yang menggunakan bantuan plat baja yang ditempatkan disalah satu ataupun kedua komponen struktur beton, dengan menghubungkannya menggunakan las ataupun



baut/angkur.

Gambar 2.1 Model pengangkur beton pracetak

Sumber: ACI Comittee 355 dalam Wibowo, 2006

2. Sambungan Basah (*Wet-joint*)

Sambungan basah adalah sambungan yang terhubung dengan menggunakan tulangan dari dalam beton pracetak yang menjorok keluar di bagian ujungnya, kemudian dihubungkan dengan komponen yang sama dan dicor langsung ditempat. Pemakaian sambungan basah ini sangat disarankan untuk desain bangunan yang berada didaerah rawan gempa, selain itu jenis sambungan ini juga dapat menjadikan setiap komponen strukturnya menjadi komponen beton yang monolit.

Pada penelitian ini memilih cara sambungan kering yaitu menggunakan bantuan angkur, mur dan plat. Penggunaan angkur

dilakukan untuk menggabungkan ke dua bagian komponen balok dan kolom, kemudian dikunci menggunakan mur dengan plat sebagai penguatnya.

Adapun, untuk Prinsip dalam merencanakan sambungan beton *precast* atau beton pracetak, dalam (SNI 03-2847-2013) dapat dikategorikan menjadi dua diantaranya :

1. Sambungan kuat (*strong connection*), Sambungan yang tetap elastis sementara komponen struktur lainnya yang terhubung terhadap sambungan mengalami pelelehan sebagai akibat daripada perpindahan desain gempa.
2. Sambungan daktil (*Ductile connection*), Sambungan yang telah mengalami pelelehan sebagai akibat daripada perpindahan desain gempa.

2.3 Struktur Sambungan Balok Kolom

Dalam perencanaan dan pembangunan sebuah struktur bangunan ataupun gedung bertingkat, beberapa bagian dari komponen utama struktur akan kita jumpai dan salah satu dari komponen tersebut ialah struktur sambungan balok dan kolom. Sambungan adalah daerah yang berguna untuk menghubungkan dua atau lebih komponen struktur (SNI 03-2847-2013). Daerah sambungan balok kolom merupakan daerah yang perlu diperhatikan kualitasnya dalam struktur rangka beton, yang membutuhkan desain khusus untuk menerima gaya gempa.

Dalam (Paulay dan Priestley, 251:1992) kriteria untuk kinerja sambungan yang diharapkan untuk struktur yang didesain secara daktil dalam menahan gaya gempa dapat dirumuskan sebagaimana berikut:

1. Kekuatan sambungan tidak boleh kurang dari gaya yang telah ditetapkan, dikarenakan dapat menimbulkan sendi plastis untuk kerangka beton. Hal ini dapat menghilangkan kebutuhan untuk perbaikan di daerah yang relative tidak dapat untuk dijangkau dan dapat terjadinya disipasi energi oleh mekanisme sambungan, yang akan mengalami penurunan kekuatan dan kekakuan ketika mendapatkan beban siklik di daerah inelastis.

2. Kapasitas kekuatan kolom tidak boleh mengalami penurunan disaat terjadi degradasi kekuatan dari panel sambungan balok-kolom.
3. Disaat terjadi distribusi seismik (gempa) sedang, sambungan sebaiknya dapat merespon dengan memberikan perilaku elastis.
4. Deformasi yang terjadi di area sambungan seharusnya tidak meningkatkan simpangan antar lantai (*story drift*) secara signifikan.
5. Keperluan penguatan sambungan yang digunakan untuk memperoleh kinerja yang memuaskan seharusnya tidak menyebabkan kesulitan dalam konstruksi yang tidak diperlukan/tidak semestinya.

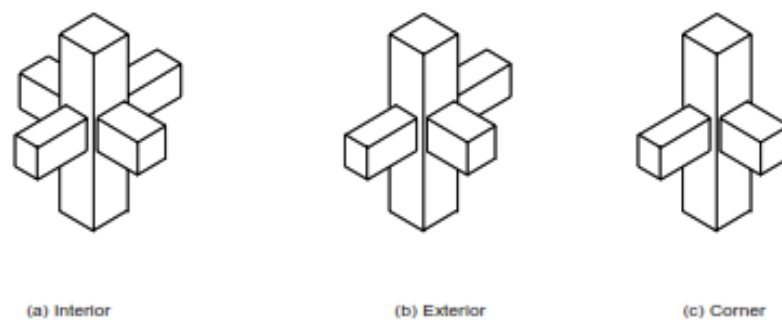
Untuk menentukan kokoh atau tidaknya bangunan yang didesain untuk tahan terhadap gempa, maka dapat ditentukan dengan melihat struktur sambungannya. Terutama untuk sambungan balok kolom yang merupakan bagian paling lemah dan rawan terhadap keruntuhan atau kegagalan, hal ini terjadi akibat besarnya momen yang diterima oleh sambungan balok kolom saat terjadi gempa merupakan penyebab tingginya resiko keruntuhan bangunan. Namun, semua itu dapat diantisipasi dan dicegah apabila dalam proses perencanaan dan pembangunan menganut dan mengikuti ketentuan-ketentuan umum standart peraturan yang telah ditetapkan dalam SNI (Standart Nasional Indonesia), seperti Tata Cara Perhitungan untuk Struktur Tahan Gempa (SNI 03-1726-2012) dan Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2013).

Adapun persyaratan yang penting untuk sebuah kinerja yang memuaskan dari sambungan dalam struktur beton menurut (Park dan Pauly 1975) dapat di definisikan sebagai berikut :

1. Sambungan harusnya memberikan kualitas kerja yang sama dengan bagian yang terhubung, seperti balok dan kolom.
2. Sambungan harusnya memiliki kekuatan yang minimal sama dengan kombinasi beban yang paling kritis, yang pada umumnya mampu di pikul oleh struktur yang terhubung.
3. Kekuatan sambungan seharusnya tidak mempengaruhi kekuatan struktur misalnya saat terjadi degradasi.

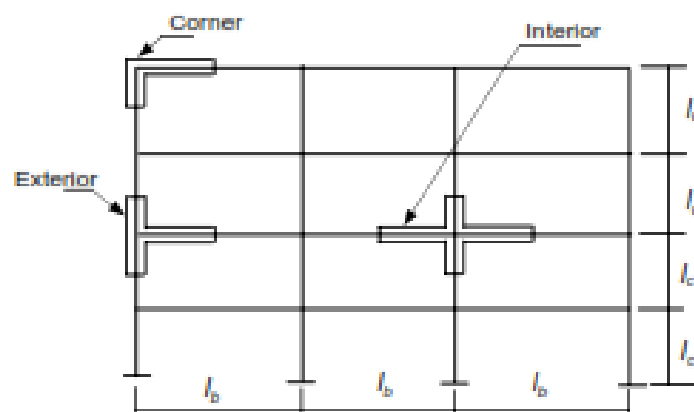
4. Mudah dalam konstruksinya, baik saat pengecoran dan pemadatan. Bagian tersebut merupakan masalah utama lainnya saat mendesain sambungan.

Spesifikasi sambungan menurut (Uma, S. dan Prasad, 2005) sambungan balok kolom yang ditemui dilapangan dapat dibedakan menjadi tiga macam model sambungan antara lain: sambungan interior, sambungan ekterior dan sambungan sudut. Sambungan interior adalah sambungan yang berada di dalam atau ditengah bangunan yang pada umumnya memiliki satu kolom dan empat balok, untuk balok ekterior terletak di luar atau di tepi bangunan yang menopang satu kolom tiga balok dan adapun sambungan sudut adalah sambungan yang membentuk sudut dari dua balok.



Gambar 2.2 Spesifikasi tipe sambungan balok kolom

Sumber: Uma, S. dan Prasad, 2005



Gambar 2.3 Detail lokasi penempatan sambungan

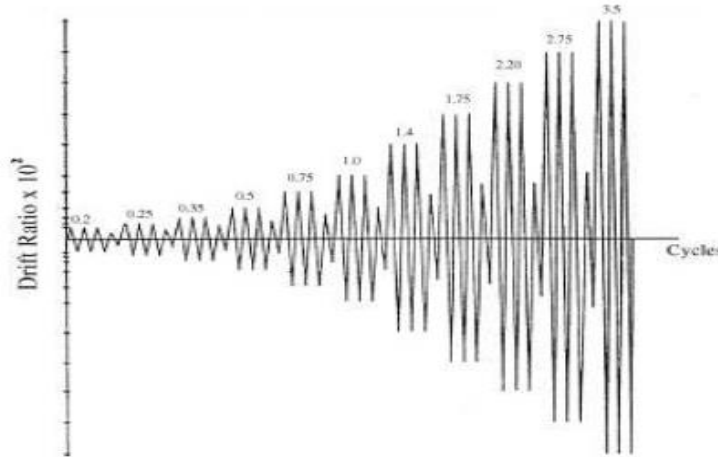
Sumber: Uma, S. dan Prasad, 2005

2.4 Beban siklik

Dalam skala laboratorium ada beberapa macam cara pembebanan pada benda uji, namun yang sudah familiar dan sering digunakan antara lain adalah beban statik monotonik dan pembebanan siklik. Pembebanan statik monotonik adalah pembebanan satu arah yang diberikan secara bertahap hingga mencapai tegangan maksimum. Sedangkan beban siklik dapat diartikan sebagai beban yang diterapkan secara bolak balik dan berulang kali hingga mencapai tegangan maksimum. Model pembebanan siklik ini merupakan penerapan beban gempa yang diterima struktur secara khusus pada bagian sambungan balok kolom. Karena penelitian ini berlandaskan pada beban gempa sehingga memakai beban siklik pada pengujian di laboratorium. Beban ini diaplikasikan pada percobaan percobaan di laboratorium untuk mengetahui perilaku struktur beton bertulang.

Untuk Prosedur pengujian benda uji dengan beban lateral siklik yang dicontohkan dalam ACI 374.1-05 mencakup hal berikut ini:

1. Pembebanan yang diberikan untuk benda uji harus melalui serangkaian urutan *displacement-controlled cycles* untuk memodelkan gerakan daripada proses gempa bumi.
2. Pembebanan lateral siklik diberikan dalam tiga gerakan disetiap nilai *drift ratio*.
3. Rasio penyimpangan selanjutnya adalah nilai-nilai yang tidak kurang dari 1,25 kali dan tidak melebihi dari 1,5 kali simpangan awal yang sebelumnya.
4. Pengujian dilanjutkan secara meningkat hingga simpangan mencapai target yang telah ditetapkan. Adapun contoh simpangan ini ditampilkan dalam gambar berikut ini :



Gambar 2.4 Contoh Pola Pembebanan ACI 374.1-05

Sumber : ACI 374.1-05

2.5 Mekanisme Keruntuhan

Struktur beton bertulang merupakan struktur yang komposit dan pada dasarnya beton memiliki suatu batasan maksimum untuk menerima suatu beban tertentu, timbulnya suatu retakan pada beton merupakan suatu awal proses dari keruntuhan suatu struktur. Terjadinya retakan awal (*first crack*) pada struktur beton yaitu disaat beton sudah melampaui regangan tarik maksimumnya akibat adanya pembebanan pada komponen. Setelah terjadinya retak awal, kuat tarik beton maupun kuat geser beton akan bernilai nol, sehingga tulangan longitudinal maupun tulangan sengkang akan mengambil alih tugas beton untuk menahan gaya tarik maupun gaya geser (Widyawati 288:2009).

Ada tiga kemungkinan keruntuhan yang terjadi pada perencanaan lentur penampang beton bertulang menurut (Nawy, 87:2010) sebagaimana berikut ini:

1. Penampang *under-reinforced* : Keruntuhan ini ditandai dengan terjadinya leleh pada tulangan baja.

$$\rho_t \leq 0,75 \cdot \rho_b$$

$$\rho_t \leq 0,75 \cdot \rho_1 \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right] \quad (2.1)$$

2. Penampang *balanced* : Pada type keruntuhan ini tulangan tarik mulai leleh tepat pada saat beton mencapai regangan batasnya dan akan hancur karena tekan.

$$\rho_t = \rho_b$$

$$\rho_t = \beta_1 \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right] \quad (2.2)$$

3. Penampang *over-reinforced* : Dalam keruntuhan ini ditandai dengan hancurnya beton yang tertekan, disaat awal keruntuhan regangan baja yang terjadi masih lebih kecil daripada regangan lelehnya.

$$\rho_t > 0,75 \cdot \rho_b$$

$$\rho_t > 0,75 \cdot \beta_1 \cdot \left[\frac{0,85 \cdot f_c'}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \right] \quad (2.3)$$

Namun, proses keruntuhan elemen beton umumnya dapat diakibatkan oleh beberapa penyebab, diantara penyebab keruntuhan beton ialah proses pembebanan yang meliputi beban grafitasi, beban kerja, beban susut, beban lateral dan lain sebagainya.

Sambungan balok kolom merupakan komponen struktur yang menghubungkan antara struktur balok dan kolom, dimana masing-masing komponen struktur yang terhubung memiliki mekanisme keruntuhan sendiri. Seperti kelangsingan balok yang dapat menentukan ragam keruntuhan balok, kelangsingan yang dimaksudkan yaitu perbandingan antara bentang bersih dan tinggi balok. Pada dasarnya dapat terjadi tiga ragam keruntuhan yang dapat terjadi pada balok menurut (Nawy, 1992:2010) yaitu:

1. Keruntuhan Lentur

Retakan lentur terjadi dikarenakan tegangan geser yang sangat kecil namun tegangan lentur sangat dominan yang besarnya hampir mendekati tegangan utama.

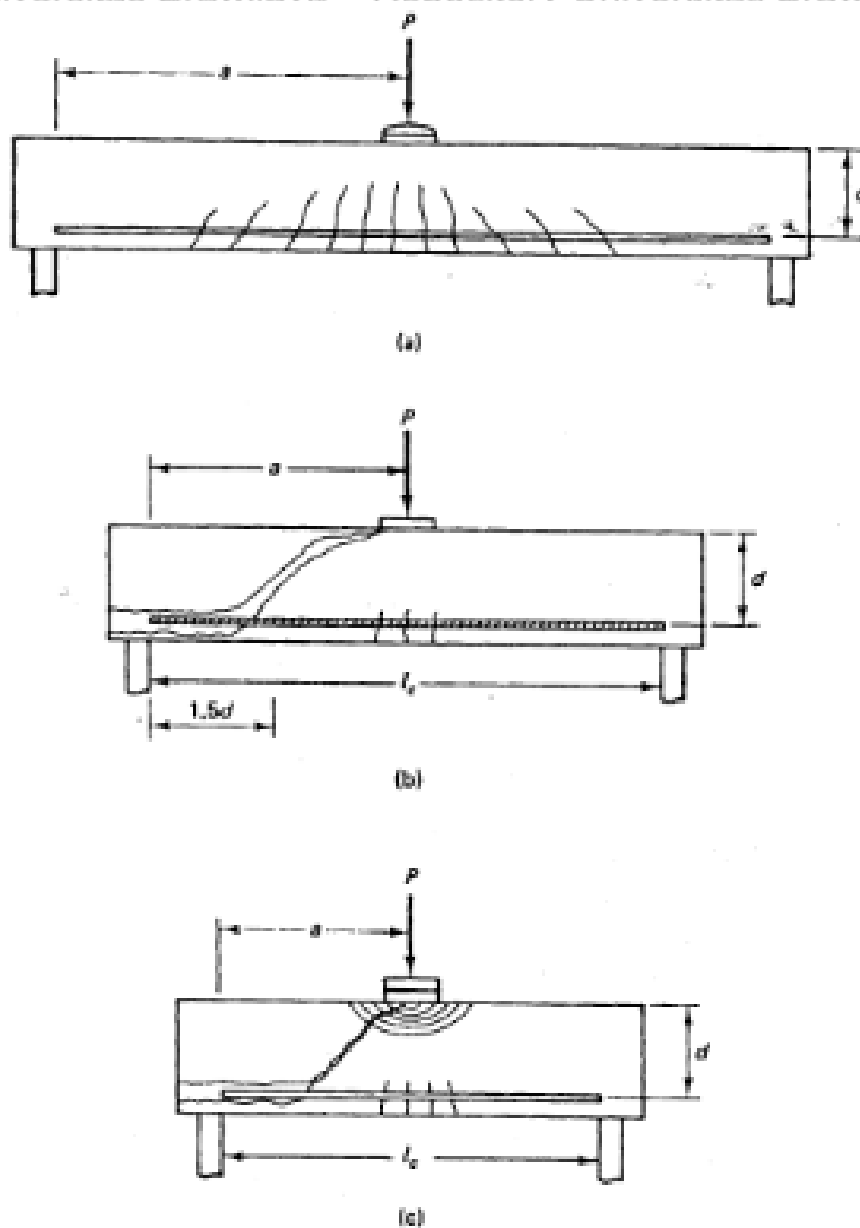
2. Keruntuhan Tarik Diagonal

Keruntuhan ini dimulai dengan retak tarik yang mulai terjadi ditengah bentang, berarah vertikal, berupa retakan-retakan halus dan disebabkan oleh lentur. Dalam retakan ini diikuti oleh rusaknya lekatan antara tulangan dan beton disekitarnya.

3. Keruntuhan Tekan Geser

Keruntuhan ini diawali seperti runtuh tarik diagonal dengan timbulnya retakan-retakan halus vertikal di tengah bentang namun tidak terus menjalar, karena hilangnya lekatan tulangan dan beton disekitarnya. Setelahnya diikuti

retakan miring yang lebih dalam daripada retakan tarik diagonal dan terus menjalar hingga sumbu netral.



Gambar 2.5 Ragam keruntuhan dari kelangsingan balok a) keruntuhan lentur, b) keruntuhan tarik diagonal dan c) keruntuhan tekan geser

Sumber: Nawy, 2010

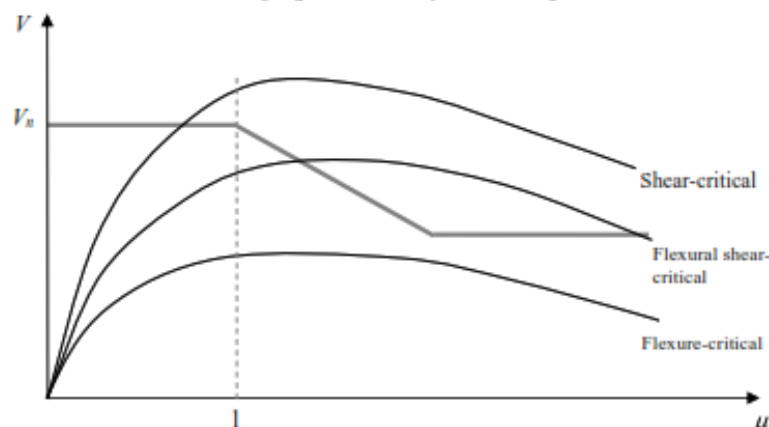
Untuk lebih ringkasnya mengenai pengaruh angka kelangsingan pada balok dapat dilihat dalam table berikut ini :

Tabel 2.1 Pengaruh Kelangsingan Balok Terhadap Ragam Keruntuhan

kategori Balok	Ragam Keruntuhan	Perbandingan bentang geser dengan tinggi sebagai ukuran dari kelangsingan	
		Beban Terpusat, a/d	Beban Terdistribusi, l_c/d
Langsing	Lentur (F)	$> 5,5$	> 16
Sedang	Tarik Diagonal (DT)	$2,5 - 5,5$	$11 - 16$
Tinggi	Tekan Geser (SC)	$1 - 2,5$	$1 - 5$

(Sumber : Nawy,2010)

Adapun, mekanisme keruntuhan untuk kolom yang terdampak oleh beban lateral dalam ASCE dibedakan menjadi tiga keruntuhan yaitu keruntuhan lentur (*flexural critical*), keruntuhan lentur geser (*flexure-shear critical*) dan keruntuhan geser (*shear critical*). Hal ini dapat dilihat dalam grafik berikut :

**Gambar 2.6** Hubungan kuat geser dan daktilitas perpindahan

Sumber: Wibowo, A., 2012

Keruntuhan lentur (*flexural-critical*) merupakan keruntuhan kolom yang memiliki kapasitas kuat geser yang cukup untuk menghasilkan kuat lentur, keruntuhan geser (*shear-critical*) merupakan suatu kolom yang mengalami keruntuhan geser dengan kapasitas momen yang secara signifikan lebih kecil daripada kapasitas momen yang dibutuhkan dan keruntuhan lentur-geser (*flexural-share*) merupakan keruntuhan kolom yang mengalami

kegagalan lentur sebelum kegagalan geser dalam tingkat daktilitas yang tinggi (Wibowo, 39:2012).

2.6 Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan dalam suatu struktur merupakan salah satu unsur yang sangat perlu untuk dipertimbangkan dalam mendesain sebuah bangunan yang khususnya untuk bangunan tahan gempa, hal ini merupakan salah satu persyaratan dasar yang harus dimiliki oleh bangunan gedung dalam menahan gaya lateral maupun vertikal yang lengkap. Kekakuan merupakan hubungan perbandingan antara beban nominal dan lendutan (*displacement*) suatu element struktur. Adapun kekakuan untuk beban satu arah pembebanan (*monotonic*) dapat digunakan rumus kekakuan sebagai berikut :

$$K = \frac{P_y}{\Delta_y} \quad (2.4)$$

dengan,

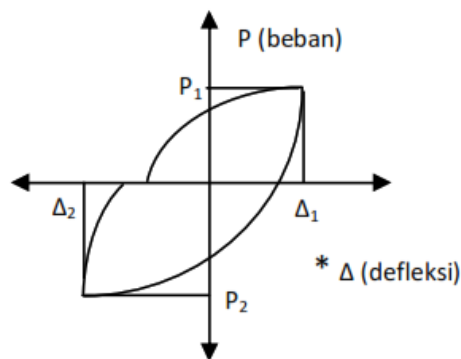
K = Kekakuan (kN/mm)

P_y = Beban (kN)

Δ_y = Lendutan (mm)

Adapun untuk kekakuan sambungan balok – kolom dapat didefinisikan sebagai *peak to peak stiffness*, dimana kemiringan garis yang menghubungkan titik puncak positif dan titik negatif, kekakuan ini biasa disebut dengan kekakuan secant (Said, A., 2004). Berikut gambaran untuk perhitungan kekakuan secant/kekakuan akibat beban siklik :

$$K = \frac{P_1 + P_2}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (2.5)$$



Gambar 2.7 Kekakuan secant (*Peak to peak Stiffness*)

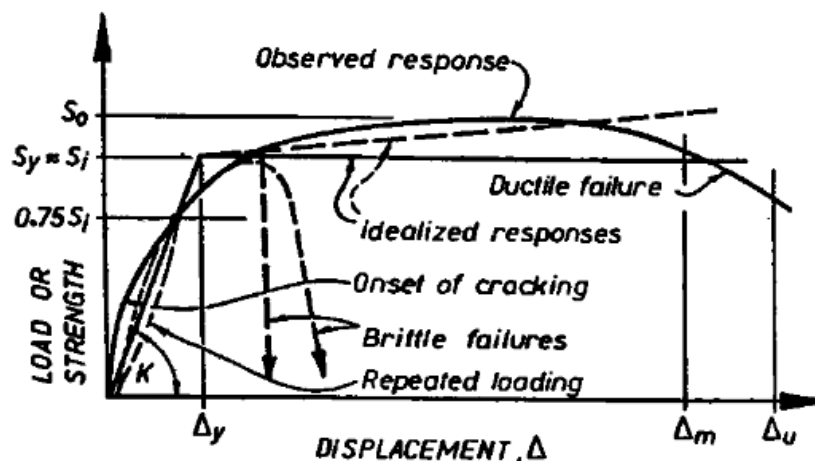
Sumber: Soebandono, B., 2011

2.7 Daktilitas

Selain kekuatan dan kekakuan, daktilitas juga merupakan salah satu aspek yang sangat penting didalam mendesain struktur bangunan. Daktilitas merupakan kemampuan suatu bahan atau elemen struktur untuk mampu mengalami deformasi tanpa mengalami kehancuran di masa inelastik. Menurut (Park & Paulay, 7:1975) Daktilitas adalah kemampuan struktur untuk tidak runtuh dalam model getas tanpa adanya peringatan, tetapi akan mampu untuk berdeformasi dalam kapasitas beban maksimum. Perilaku defleksi yang besar saat beban maksimum dapat memberikan peringatan sebelum keruntuhan, mempertahankan daya dukung beban, mencegah keruntuhan total dan meminimalisir korban jiwa. Sifat daktilitas mampu membatasi besarnya gaya yang ditimbulkan oleh gempa, semakin besar sifat daktilitas yang dimiliki struktur maka semakin besar tingkatan disipasi energi yang dimiliki oleh struktur tersebut.

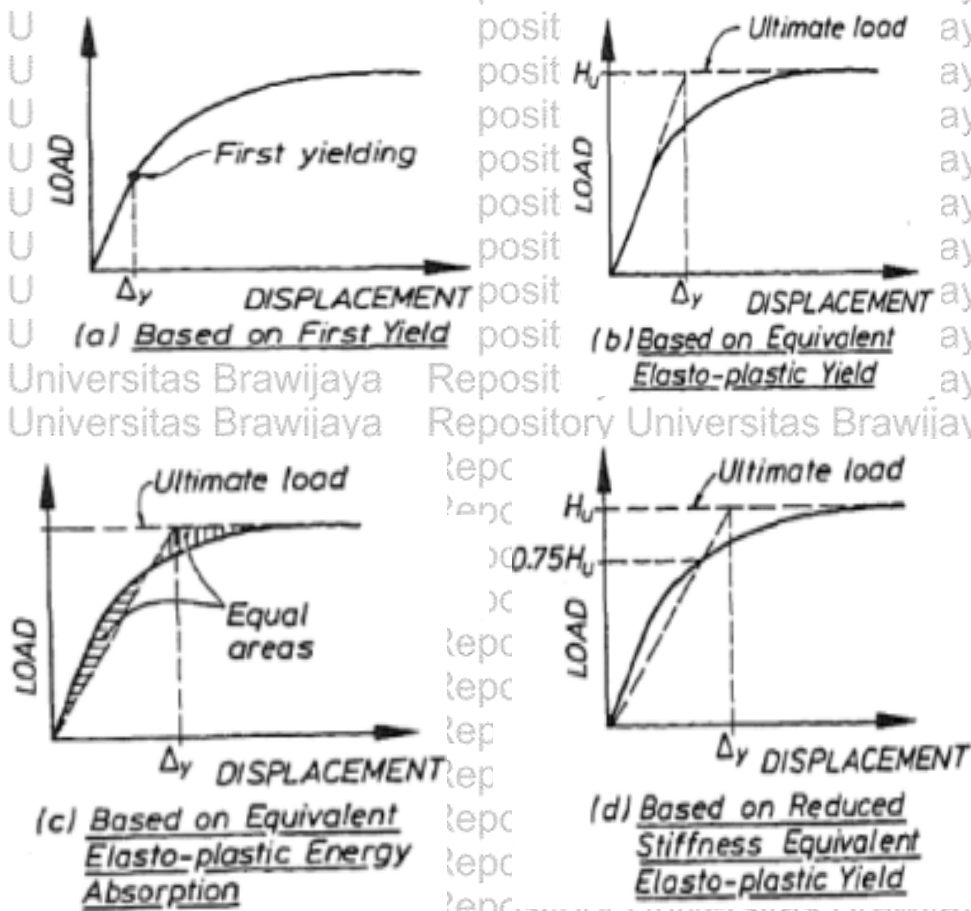
Daktilitas (μ) dapat didefinisikan sebagai nilai perbandingan anatar rasio total pemindahan/ deformasi maksimum (Δ_u) dengan permulaan saat terjadinya leleh (Δ_y); (Paulay & Priestley, 12:1992). Detail dari rumusan diatas disajikan dalam gambar 2.8 sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.6)$$



Gambar 2.8 Hubungan beban-lendutan

Sumber: Paulay & Priestley, 1992



Gambar 2.9 Alternatif penentuan titik leleh (yield point)

Sumber : Park, 1988

Pada dasarnya daktilitas dibagi ke dalam beberapa jenis, hal ini dikarenakan adanya beberapa pengertian tentang yang timbul tentang daktilitas. Pengertian daripada daktilitas dapat ditinjau dari beberapa segi klasifikasi, diantaranya adalah daktilitas regangan (*strain ductility*), daktilitas kelengkungan (*curvature ductility*) dan daktilitas lendutan (*displacement ductility*); (Paulay & Priestley, 136:1992).

a. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Daktilitas regangan merupakan kemampuan bahan penyusun/material untuk mempertahankan regangan plastis tanpa mengurangi tekanan secara signifikan.

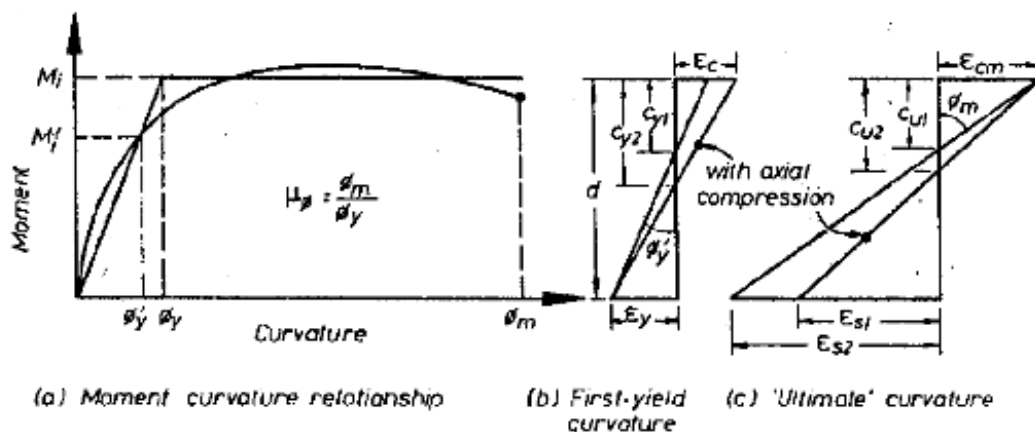
$$\mu_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_y} \quad (2.7)$$

b. **Daktilitas Kelengkungan (Curvature Ductility)**

Sumber deformasi yang paling umum dan paling berpengaruh untuk struktural inelastis adalah potensi terjadinya rotasi pada sendi plastis.

Hal ini sangat berguna untuk menghubungkan rotasi per unit Panjang (*curvature*) dengan momen bending di ujung.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_m}{\phi_y} \quad (2.8)$$



Gambar 2.10 Definisi daktilitas kelengkungan

Sumber: Paulay & Priestley, 1992

c. **Daktilitas Perpindahan (Displacement Ductility)**

Daktilitas perpindahan merupakan perbandingan perpindahan maksimum struktur pada arah lateral disaat kondisi *post-elastic* terhadap perpindahan struktur saat leleh pertama terjadi.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (2.9)$$

2.8 Perkuatan Komponen Struktur (Strengthening)

Banyak faktor yang mempengaruhi keruntuhan terhadap struktur bangunan, seperti kesalahan dalam mendesain struktur bangunan, kurangnya perawatan yang memadai, memberikan beban berlebihan atau mengalih fungsikan suatu bangunan dan bencana alam yang terjadi seperti gempa bumi. Dari berbagai faktor inilah yang menimbulkan pemikiran untuk memperkuat suatu struktur tanpa harus membongkar dan memperbaiki struktur bangunannya, dengan memberikan

perkuatan suatu struktur diharapkan mampu mengembalikan fungsi dan kekuatan struktur yang telah direncanakan.

Perkembangan untuk mempertahankan dan memperkuat suatu struktur sudah dikembangkan dan diteliti sejak lama, sehingga sudah banyak metode perkuatan yang dapat digunakan dalam memperkuat sebuah struktur misalnya dengan metode jacketing beton, memperkuat dengan metode mengikat beton dengan FRP, metode penambahan plat baja dan lain sebagainya. Dalam hal ini perkuatan menggunakan CFRP akan menjadi bahasan dalam penelitian ini.

2.8.1 FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)

Pemakaian FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) dalam proses perkuatan struktur telah banyak digunakan mulai dari perkuatan balok, kolom, pelat, dinding dan juga untuk sambungan beton. FRP pada umumnya mempunyai tiga jenis model antara lain CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*), dan AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*). FRP sendiri merupakan cetakan dalam betuk lembaran tipis yang terdiri dari matriks polymer yang diperkuat dengan serat, sehingga sangat elastis dan dapat dengan mudah dalam pemasangannya.

Dalam pengaplikasian FRP mempunyai kuat tarik yang lebih besar daripada pelat baja dan mempunyai kekakuan yang tinggi, mempunyai bahan yang lebih ringan, mudah dalam pemasangannya dan memiliki ketahanan terhadap korosi (Tarigan, J., dkk. 2018). Bahan ini dapat digunakan sebagai pilihan yang tepat untuk menggantikan material baja sebagai tulangan pada konstruksi beton bertulang atau sebagai material untuk menambah kekuatan konstruksi yang sudah ada.

Semua tipikal atau karakterisitik tentang FRP dan metodenya telah dicantumkan dalam ACI 440.2r-08, seperti desnitasi FRP, perhitungan perkuatan lentur dan geser, faktor reduksi dan lain sebagainya. Contoh faktor reduksi FRP pengaruh ligkungan dalam ACI 440.2r-08 sebagaimana berikut:

Tabel 2.2 Densitas Lembaran FRP lb/ft³ (g/cm³)

Steel	GFRP	CFRP	AFRP
490 (7,9)	75 to 130 (1,2 to 2,1)	90 to 100 (1,5 to 1,6)	75 to 90 (1,2 to 1,5)

(Sumber: ACI 440.2r-08)

Tabel 2.3 Faktor Reduksi FRP Pengaruh Lingkungan

Exposure condition	Fiber Type	Environmental reduction factor C_E
Interior exposure	Cabon	0.95
	Glass	0.75
	Armaid	0.85
Exterior exposure (bridges, piers and unclosed parking garage)	Cabon	0.85
	Glass	0.65
	Armaid	0.75
Aggressive environmental (chemical plants and wastewater treatment plants)	Cabon	0.85
	Glass	0.50
	Armaid	0.70

(Sumber: ACI 440.2r-08)

2.8.2 CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*)

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, CFRP merupakan salah jenis model dari FRP. CFRP adalah material komposit yang terdiri dari matriks polimer yang diperkuat dengan serat halus yang terbuat dari karbon. Teknik perkuatan menggunakan CFRP diharapkan dapat dibuat efisien dan tidak menyebabkan karat seperti plat baja eksternal. Fungsi untuk dilakukan perkuatan dengan bahan CFRP adalah untuk meningkatkan kapasitas lentur, geser, axial, daktilitas dan lain sebagainya.

Keunggulan perkuatan menggunakan CFRP mempunyai ketahanan terhadap korosi, mempunyai kuat tarik yang relatif tinggi, memiliki sifat daktilitas yang tinggi, memiliki densitas yang sangat ringan sehingga tidak memerlukan alat berat untuk pengerjaan dan mudah dalam instalasinya. Dalam penelitian ini akan digunakan material CFRP dengan dua tipe model yaitu *Sheet/Sheet* CFRP dan CFRP *Plate* dengan merk SikaWarp 231C dan SikaCarboDur S512 seperti yang ditunjukkan dalam gambar berikut ini:



(A)



(B)

Gambar 2.11 (A) Sheet/Sheet CFRP, (B) CFRP Plate

Sumber: Katalog Sika

Pemakaian dua tipe model CFRP difungsikan untuk memperkuat sambungan balok kolom yang menerima efek dari beban lentur (*flexure load*) dan beban geser (*shear load*) dari pembebanan siklik dalam penelitian ini. Adapun, detail properties untuk dua tipe model CFRP dijelaskan sebagaimana berikut ini :

Tabel 2.4 Detail Properties CFRP Sheet/Sheet

Modulus of elasticity	230 kN/mm ²
Tensile strength	4900 N/mm ²
Weight of C fiber (main direction)	235 g/m ²
Density	1.8 g/cm ³
ε Ultimate %	1.7
Thicknes for static design weight / density	0.129 mm

(sumber:Katalog Sika Indonesia)

Tabel 2.5 Detail Properties CFRP Plate

Typical tensile strenght	2900 MPa
Typical tensile modulus	165000 MPa
Elongation at break %	1,8
Fiber content %	> 68
Inter Laminate Shear Strength	50 MPa
Thermal Expansion m/m/°C	>100°C

(sumber:Katalog Sika Indonesia)

2.8.3 Lem Perekat (*Epoxy*)

Dalam pekerjaan perkuatan suatu struktur yang menggunakan bahan seperti CFRP, GFRP, AFRP dan semacamnya memerlukan adanya bahan perekat komponen untuk melekatkan lapisannya ke permukaan beton ataupun baja, adapun bahan perekat itu adalah *epoxy*. Lem perekat (*epoxy*) memiliki kandungan yang dapat diserap oleh FRP sehingga memberikan efek ikat yang sangat kuat. Semua metode dan pengaplikasian *epoxy* dirangkum dalam ACI 503R-93.

Adapun senyawa *epoxy* pada umumnya dibagi dalam dua dan bahkan lebih bagian. Bagian A adalah bagian yang mengandung senyawa resin *epoxy* dan bagian B adalah sistem dari bahan pengerasnya (ACI 503R-93). Metode pencampuran antara komponen A dan komponen B dapat dibagi dalam dua cara yaitu dengan perbandingan volume *epoxy* atau dengan perbandingan berat *epoxy*, perbandingan campuran inipun bergantung dari setiap merk yang digunakan dalam pelaksanaannya. Seperti contoh *epoxy* A dan B dengan merk Sikadur 30 dan 330 dimana, perbandingan campuran untuk pemakaian telah dirangkumkan dalam kemasan produknya, serta beberapa syarat yang perlu diperhatikan dalam pengaplikasiannya yaitu permukaan harus rata, bersih, bebas dari lumpur atau bahan lain yang akan merusak adhesi.



Gambar 2.12 (A) *epoxy* Sikadur 30 dan (B) *epoxy* Sikadur 330

Mixing Ratio	Component A : Component B = 3 : 1 by weight or volume When using bulk material the exact mixing ratio must be safeguarded by accurately weighing and dosing each component.		
Layer Thickness	30 mm max.		
Sag Flow	On vertical surfaces it is non-sag up to 3 – (FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte) 5 mm thickness at 35 °C		
Squeezability	4 000 mm ² at +15 °C at 15 kg (FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte)		
Product Temperature	Sikadur®-30 must be applied at temperatures between +8 °C and +35 °C.		
Ambient Air Temperature	+8 °C min. / +35 °C max.		
Dew Point	Beware of condensation. Substrate temperature during application must be at least 3 °C above dew point.		
Substrate Temperature	+8 °C min. / +35 °C max.		
Substrate Moisture Content	Max. 4 % pbw When applied to mat damp concrete, brush the adhesive well into the substrate.		
Pot Life	Temperature	Potlife	Open Time (FIP: Fédération Internationale de la Précontrainte)
	+8 °C	~120 minutes	~150 minutes
	+20 °C	~90 minutes	~110 minutes
	+35 °C	~20 minutes	~50 minutes
The potlife begins when the resin and hardener are mixed. It is shorter at high temperatures and longer at low temperatures. The greater the quantity mixed, the shorter the potlife. To obtain longer workability at high temperatures, the mixed adhesive may be divided into portions. Another method is to chill components A+B before mixing them (not below +5 °C).			

Tabel 2.6 Informasi Sikadur 30 (A) dan 330 (B) lem perekat (*epoxy*)

SYSTEM INFORMATION

System Structure	Substrate primer - Sikadur®-330. Impregnating / laminating resin - Sikadur®-330. Structural strengthening fabric - SikaWrap® type to suit requirements.
-------------------------	---

APPLICATION INFORMATION

Mixing ratio	Component A : component B = 4 : 1 by weight When using bulk material the exact mixing ratio must be safeguarded by accurately weighing and dosing each component.		
Consumption	See the "Method Statement for SikaWrap® manual dry application" Ref 850 41 02. Guide: 0.7 - 1.5 kg/m ²		
Ambient Air Temperature	+10 °C min. / +35 °C max.		
Dew Point	Beware of condensation. Substrate temperature during application must be at least 3 °C above dew point.		
Substrate Temperature	+10 °C min. / +35 °C max.		
Substrate Moisture Content	< 4 % pbw		
Pot Life	Temperature	Pot life	Open time (EN ISO 9514)
	+10 °C	~90 min (5 kg)	~90 min
	+23 °C	~60 min (5 kg)	~60 min
	+35 °C	~30 min (5 kg)	~30 min
The pot life begins when the resin and hardener are mixed. It is shorter at high temperatures and longer at low temperatures. The greater the quantity mixed, the shorter the pot life. To obtain longer workability at high temperatures, the mixed adhesive may be divided into portions. Another method is to chill components A+B before mixing them (not below +5 °C).			

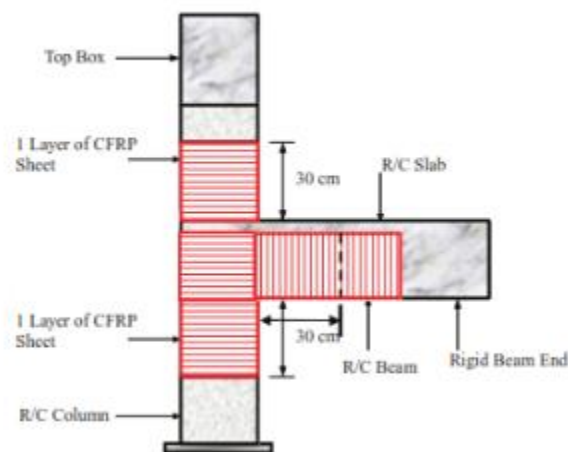
Sumber : Katalog Sika Indonesia

Ada beberapa alasan kenapa epoxy menjadi bahan perekat yang sangat bagus untuk pekerjaan perkuatan beton, berikut keuntungan dalam pemakaian epoxy sebagai perekat:

1. Memiliki bahan yang sangat ramah terhadap bahan konstruksi lainnya,
2. Tidak ada penguapan selama proses pengeringan,
3. Rendahnya penyusutan selama proses pengeringan,
4. Ketahanan yang baik terhadap bahan kimia,
5. Memiliki kuat tarik dan kuat tekan yang tinggi,
6. Memiliki sifat adhesi yang baik terhadap berbagai macam pengisi, serat dan substrat lainnya.

2.9 Studi / Penelitian Terdahulu

Al-Salloum Y.A., et al. 2010. melakukan penelitian pada perilaku seismik sambungan balok-kolom eksterior yang diperkuat dengan FRP. Dengan pokok permasalahannya adalah kegagalan geser sambungan eksterior balok kolom yang diidentifikasi sebagai penyebab utama runtuhnya bangunan rangka yang menahan momen selama gempa bumi, dalam penelitian ini benda uji dibedakan menjadi 3 macam benda uji, antara lain : EC) Benda uji control, ER) Benda uji yang diperkuat dengan CFRP, dan ES) Benda uji yang hanya di grouting.



Gambar 2.13 Metode pemasangan CFRP
Sumber : Al-Salloum Y.A., et al., 2010

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dengan pembebanan siklik menyatakan bahwa lembaran CFRP memberikan efektivitas dalam memperbaiki kerusakan sambungan balok kolom eksterior serta dapat meningkatkan ketahanan terhadap geser dan daktilitas sambungan balok kolom eksterior dan menunda degradasi kekakuan sambungan.

Tabel 2.7 Hasil pengujian

Specimen	Average peak load kN	Disp. at first yield of steel, Δ_y (mm)	Disp. at 20% drop of peak load, Δ_{20} (mm)	Ductility factor Δ_{20}/Δ_y
EC	47.08	18.67	30.00	1.61
ER	81.71	18.67*	40.7	2.24
ES	62.34	15.02	32.5	2.16

* Taken same as control value.

Sumber : Al-Salloum Y.A., et al., 2010

Balasubramanian, K., et al. 2012. Penelitian ini membahas tentang evaluasi kinerja perkuatan (*strengthening*) beton sambungan balok kolom dengan desain untuk pembebanan siklik. Dengan menggunakan empat model cara pemasangannya diantaranya (1) Laminasi CFRP, (2) Laminasi CFRP dan diselimuti lembaran CFRP, (3) Perkuatan dengan plat baja 50 mm, dan (4) perkuatan dengan besi yang tertanam dalam sambungan kemudian diselimuti dengan lembaran CFRP eksternal.



Gambar 2.14 Pemodelan perkuatan benda uji

Sumber: Balasubramanian, K., et al. 2012

Dari hasil yang di dapatkan, dapat diambil beberapa kesimpulan diantaranya: keempat model perkuatan digunakan untuk meningkatkan kinerja desain seismik, model pengujian ini diusulkan oleh Ibarra dengan menggabungkan parameter deteriorasi berbasis energi yang mengontrol mode beban siklik. Adapun perkuatan dengan model nomer 3 dan 4 memiliki control kekuatan paling tinggi jika dibandingkan dengan model lainnya.

Faella, Ciro. et al. 2012. Membahas sambungan balok kolom yang diperkuat dengan 2 tipe perkuatan a). Perkuatan menggunakan FRP dan b) perkuatan menggunakan plat baja, dengan tujuan penelitian untuk menganalisis kinerja desain seismik sambungan balok kolom RC yang diperkuat dengan FRP dan sistem baja, agar dapat meningkatkan perilaku desain seismik. Dari hasil eksperimen yang telah dilakukan penguji mengambil tiga variabel data, dimana sambungan yang tidak diperkuat dijadikan pembanding antara dua variabel yang diperkuat, dengan hasil yang disimpulkan bahwa perkuatan yang dilakukan dengan menggunakan FRP mengalami perkuatan yang buruk karena lepasnya ikatan FRP dari beton (debonding) atau lepasnya rekatan FRP dari permukaan beton namun berbeda dengan perkuatan yang dilakukan dengan perkuatan baja.

Tabel 2.8 Hasil pengujian

Test	f_{cm} (MPa)	ν	F^+_{max} (KN)	F^-_{max} (KN)	Δ^+ (mm)	Δ^- (mm)	$\Delta^+_{85\%}$ (mm)	$\Delta^-_{85\%}$ (mm)	Failure mode
J-01	16.4	0.20	62.5	-66.1	16	-10	25.9	-21.1	Joint shear failure
J-02	19.5	0.17	67.6	-80.7	18	-14	27.7	-24.2	FRP delamination followed by joint shear failure
J-03	15.7	0.21	118.8	-90.3	30	-30	49.2	-45.5	Flexural beam failure

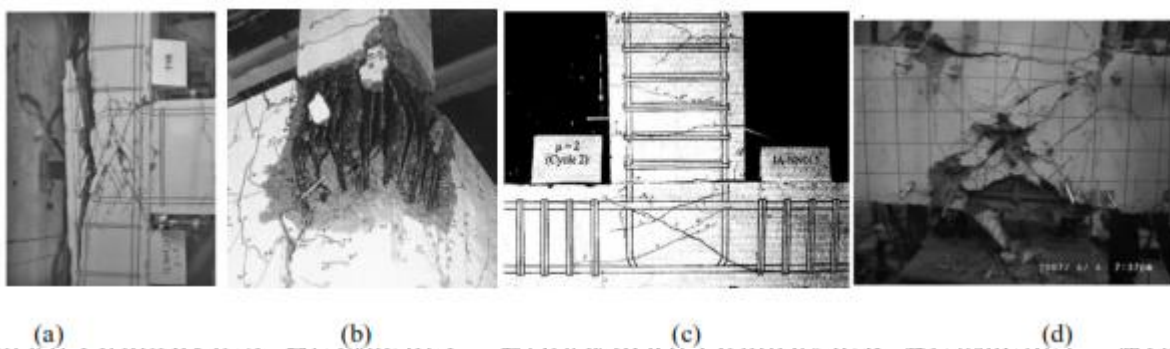
Sumber: Faella, Ciro. et al. 2012



Gambar 2.15 Pola Kerusakan benda uji (a & b) benda uji control, (c & d) benda uji perkuatan FRP dan (e) perkuatan dengan plat baja

Sumber: Balasubramanian, K., et al. 2012

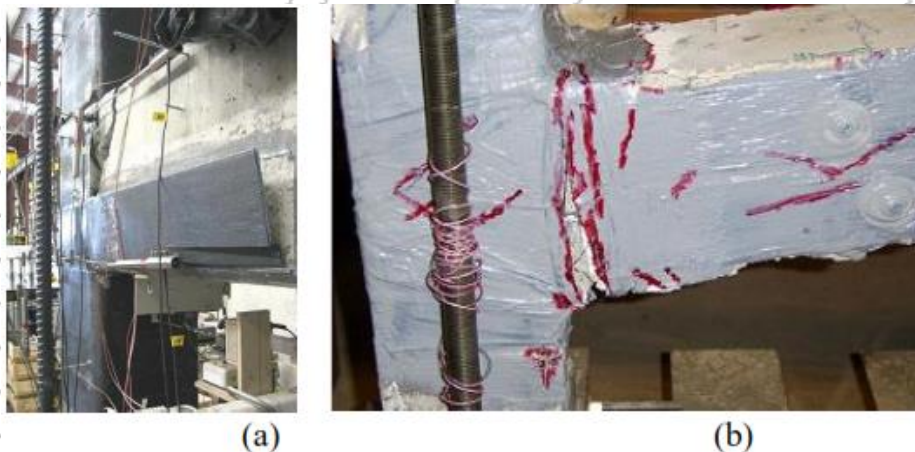
Ilki, A., 2013. Sambungan balok kolom eksterior dan sudut merupakan salah satu bagian terlemah dari beton bertulang dalam hal ketahanan seismik, performa yang buruk inilah yang dapat menyebabkan keruntuhan total struktur rangkai beton bertulang. Dalam penelitian ini dikenalkan beberapa macam pola keruntuhan yang terjadi di area sambungan balok kolom diantaranya (1). “J” = panel sambungan mencapai batas kuat geser, (2) “AJ” = Tulangan longitudinal pada kolom mengalami tekuk di posisi panel sambungan, (3). “BJ” = Segera setelah tulangan longitudinal balok mengalami leleh, sambungan balok kolom mencapai kapasitas geser. (4) “CJ” segera setelah tulangan longitudinal kolom mencapai titik leleh, maka sambungan balok kolom akan mencapai kapasitas geser, (5) “BCJ” Keruntuhan ini adalah kombinasi dari nomer 3 dan 4, (6) “SJ” Yang pertama tulangan longitudinal balok mengalami *bond slip*.



Gambar 2.16 (a) Keruntuhan tipe J, (b) Keruntuhan tipe AJ, (c) Keruntuhan tipe BJ, (d) Keruntuhan tipe SJ

Sumber: Ilki, A., 2013

Setelahnya terjadi deformasi yang besar, kapasitas geser di daerah sambungan balok kolom akan berkurang dan akan mempengaruhi perilaku sambungan, dan di sisi lain juga terdapat model kegagalan seperti berikut ini: “B” dan “C” Tidak terjadi kegagalan di area sambungan, kapasitas balok dan kolom telah tercapai. Adapun, untuk masalah keruntuhan yang terjadi terhadap perilaku perkuatan FRP sebagaimana berikut ini : “FD” Lepasnya FRP dari permukaan beton, “FR” Terjadinya retakan/kerusakan FRP.



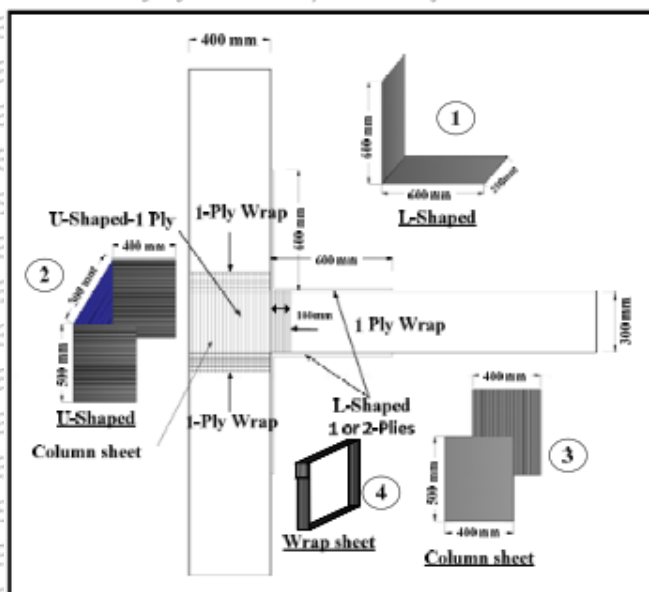
Gambar 2.17 (a) Lepasnya FRP dari permukaan beton (*debonding*),
(b) Terjadinya retakan/rusaknya FRP

Sumber: Ilki, A., 2013

Setelah memahami beberapa mode tipikal kegagalan yang terjadi oleh sambungan balok kolom eksterior selanjutnya sudut perilaku sambungan *retrofit* akan ditinjau dan didiskusikan, begitu pula dengan skema *retrofit* yang paling umum dan kontribusi FRP untuk perkuatan sambungan balok kolom. Dari hasil yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa FRP dapat berkontribusi secara signifikan terhadap sambungan beton yang memiliki berbagai kekurangan dari segi mekanisnya.

Beydokhty, E. and Shariatmadar, H. 2016. Melakukan penelitian eksperimental tentang perilaku sambungan balok kolom yang terkena dampak dari beban siklik. Dengan desain sambungan yang hanya untuk beban gravitasi. Dalam desain benda uji, sambungan balok-kolom tidak memiliki tulangan melintang dan sengkang khusus di dalam zona kritis balok dan kolom (*Non-Seismically designed*). Dalam penelitian ini terdiri dari 8 benda uji dengan 2 tahap pengujian antara lain: tahap pertama benda uji (NS) dihancurkan dengan tingkatan drifts yang berbeda-beda, dan pada tahap kedua sambungan yang telah rusak diperkuat menggunakan lembaran-lembaran polimer yang diperkuat dengan serat karbon (CFRP). Dari uji ekperimental benda uji dapat disimpulkan teknik *retrofitting* ikatan eksternal menggunakan lembaran CFRP sesuai untuk memperbaiki kapasitas seismik sambungan. Teknik ini memiliki peningkatan yang signifikan dalam disipasi energi dan level performa serta hasilnya mengarah pada peningkatan perbandingan kerusakan dibandingkan saat pembebanan awal.

Singkatnya pemakaian lembaran CFRP dalam praktek memberikan dampak yang signifikan. Metode pemasangan CFRP dilakukan seperti gambar 2.17. Untuk perkuatan lentur balok dipasangkan model L CFRP Sheet dalam satu dan dua bagian balok seperti yang disarankan ACI440.2R-08. Adapun, untuk perkuatan geser digunakan CFRP sheet dengan panjang 500 mm dipasangkan pada kedua sisi kolom dengan sudut 90° searah balok. untuk sisi lainnya dengan panjang 500 mm, sehingga membentuk model U dari lembaran CFRP.



Gambar 2.18 Model pemasangan CFRP

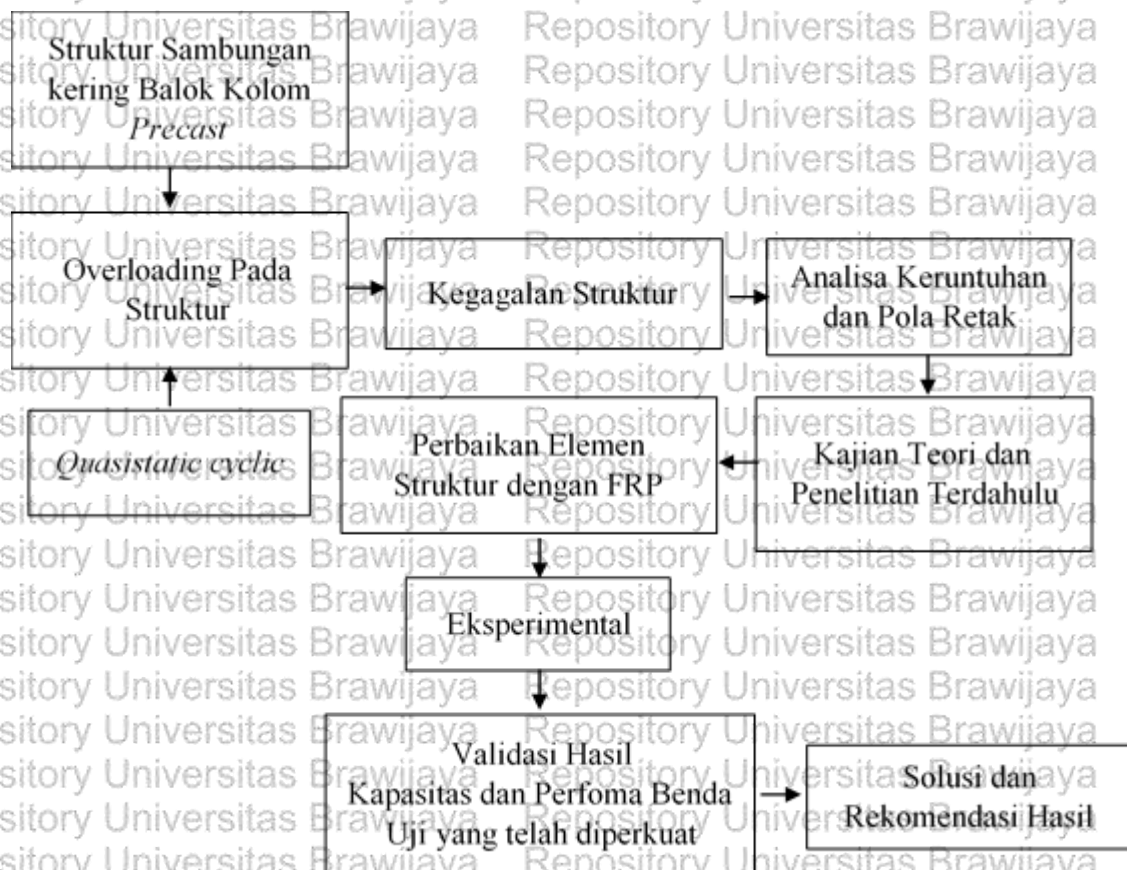
Sumber: Beydokhty, E. and Shariatmadar, H. 2016.

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Pada tinjauan pustaka telah dipaparkan bahwa Sambungan balok kolom merupakan salah satu bagian terlemah dari beton bertulang dalam hal ketahanan seismik (Ilki, A., dkk, 2013). Banyaknya respon gaya yang diterima oleh sambungan balok kolom akibat gaya gempa, membuat perkuatan (*retrofitting*) untuk komponen struktur sambungan balok kolom menjadi salah satu solusi metode yang mampu mengatasi permasalahan yang ada dilapangan guna memberikan keamanan dan keselamatan bagi pengguna bangunan. Dalam hal ini perlu adanya gambaran suatu kerangka konsep penelitian yang dapat mempermudah dalam pemahaman konsep. Berikut gambaran kerangka konsep yang ada dalam penelitian ini:



Gambar 3.1 Kerangka konsep penelitian

Dari diagram alur konsep berfikir yang telah dijabarkan diatas, secara umum untuk lebih memahami pola berfikir dalam penelitian ini perlu adanya penjelasan yang lebih detail sebagaimana berikut:

1. Memiliki proses yang cepat dalam pelaksanaannya, membuat penggunaan beton pracetak menjadi sebuah solusi untuk desain pembangunan gedung bertingkat yang membutuhkan kecepatan dalam pengerjaannya. Salah satunya adalah proses sambungan kering pada struktur pracetak yang dapat mendukung kecepatan dan kemudahan dalam proses pembanguan.
2. Namun, banyaknya momen yang diterima dan sering rusak atau runtuhnya komponen sambungan balok kolom pracetak pasca terjadi gempa membuat metode perkuatan struktur menjadi hal yang sangat diperlukan, untuk mengembalikan fungsi dan memperbaiki komponen sambungan balok kolom.
3. Berbagai macam metode untuk perkuatan (*retrofitting*) beton telah dikembangkan, dari segi perkuatan internal maupun perkuatan eksternal. Perkuatan dapat di lakukan dengan menggunakan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) yang di lekatkan dengan bantuan lem epoxy dan ditempatkan pada area yang mengalami kerusakan atau keruntuhan.
4. Pertimbangan daripada perkuatan menggunakan bahan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) salah satunya adalah karena pelaksanaannya yang cukup praktis serta memiliki kelebihan dalam segi bahan yang elastis dan memiliki kuat tarik yang tinggi.
5. Dalam penelitian ini akan dilakukan uji eksperimental dengan mengambil studi literatur dan kajian pustaka dari peneliti terdahulu, dengan melakukan analisis sambungan kering balok kolom pracetak dengan perkuatan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) yang menerima perilaku beban siklik.
6. Dari studi eksperimental ini diharapkan dapat mengontrol kekuatan sambungan sebelum dan sesudah perkuatan, perilaku beban siklik terhadap sambungan balok kolom yang diperkuat FRP, mekanisme keruntuhan dan pola retak sambungan kering balok kolom *precast* yang telah diperkuat.

7. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan suatu referensi untuk perkuatan dan perbaikan komponen beton bertulang terutama untuk sambungan kering balok kolom pracetak pasca terjadinya gempa.

3.2 Hipotesis Penelitian

Dari tinjauan pustaka dan kajian-kajian teori yang ada dalam penelitian, dapat diambil sebuah dugaan awal atau hipotesis mengenai analisis perilaku beban siklik sambungan kering balok kolom *precast* yang telah diperkuat FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Adapun hipotesis dalam penelitian ini sebagaimana berikut:

1. Perkuatan dengan menambahkan bahan CFRP akan memberikan hasil yang efektif terhadap upaya untuk menaikkan nilai kapasitas maksimum, daktiltas dan kekakuan sambungan kering balok kolom pracetak.
2. Model keruntuhan dan pola retak yang terjadi untuk perkuatan sambungan kering balok kolom berada diantara sambungan balok dan kolom dan diatas lapisan perkuatan CFRP.
3. Perbedaan model perkuatan struktur untuk sambungan kering balok kolom pracetak dapat memberikan pengaruh terhadap performa dari masing-masing model perkuatan.

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Model Penelitian

Penelitian ini melanjutkan penelitian sebelumnya yang membahas tentang analisis sambungan balok kolom pracetak dengan metode sambungan kering yang mendapatkan perilaku pembebanan *quasi*-siklik hingga mencapai penurunan 20% setelah mencapai nilai puncak (*peak*), mekanisme pembebanan dalam penelitian ini telah direncanakan sebelumnya. Penggunaan metode sambungan yang dipilih dalam penelitian balok kolom pracetak adalah metode sambungan kering yang menggunakan angkur dan mur dengan menambahkan plat baja.

Jenis penelitian yang dimaksudkan dalam penelitian ini bersifat eksperimental dengan perkuatan (*retrofitting*) sambungan eksisting balok kolom pracetak yang mendapatkan perilaku pembebanan siklik. Bahan perkuatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah FRP dengan jenis tipe bahan CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) yang dilekatkan ke permukaan beton dengan bantuan lem perekat (*epoxy*) dengan merk SikaDur 30 dan SikaDur 330 tipe A dan tipe B.

Pemakaian CFRP dalam perkuatan sambungan balok kolom pracetak menggunakan 2 tipe bahan antara lain: CFRP *Plate* dan CFRP *Warp/sheet* yang telah dijelaskan perbedaan fungsinya. Adapun, proses perkuatan benda uji dilakukan dengan dua metode, dimana metode pertama yaitu dengan melekatkan lembaran CFRP *Plate* terlebih dahulu dan membungkusnya dengan CFRP *warp/sheet*, dan metode yang kedua yaitu mengganti lembaran CFRP *Plate* dengan pelat baja strip yang dilekatkan dengan metode yang sama seperti CFRP *Plate* dan membungkusnya dengan CFRP *warp/sheet*. Kemudian dilanjutkan dengan melakukan perawatan selama tujuh hari agar CFRP menempel secara sempurna ke permukaan beton. Sedangkan untuk dimensi benda uji, metode sambungan dan tulangan yang digunakan disesuaikan dengan penelitian sebelumnya, dimana detail kasusnya akan dibahas dibawah.

Dalam bab ini peneliti akan memaparkan tahapan-tahapan dari proses awal penelitian hingga tahapan akhir penelitian, adapun point dari pembahasan dalam bab ini berupa tempat penelitian, alat dan bahan, benda uji eksisting, prosedur penelitian, tahapan penelitian, dan diagram alir penelitian.

4.2 Tempat Penelitian

Adapun tempat penelitian yang dilakukan dalam hal pembuatan dan pengujian benda uji dilaksanakan di laboratorium, berikut detailnya:

1. Pengujian silinder beton dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan Beton Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang.
2. Pengujian Tarik dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan Beton Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang.
3. Pembuatan dan perawatan benda uji eksisting sambungan balok kolom dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan Beton Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang.
4. Pengujian benda uji eksisting dengan beban siklik sambungan balok-kolom beton pracetak dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.
5. Perawatan dan perkuatan FRP dengan benda uji eksisting sambungan balok kolom dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan Beton Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang.
6. Pengujian benda uji eksisting yang diperkuat dengan FRP menggunakan beban siklik sambungan balok-kolom beton pracetak dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.

4.3 Bahan dan Alat Pengujian

4.3.1 Bahan

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

1. Semen PPC dengan merk Semen Gersik
2. Pasir Lumajang dan batu pecah dengan diameter 2 cm

3. Tulangan baja diameter 12 mm berlabel SNI yang digunakan sebagai tulangan longitudinal pada benda uji balok dan kolom *precast*
4. Tulangan baja diameter 8 mm berlabel SNI yang digunakan sebagai tulangan sengkang pada benda uji balok dan kolom *precast*
5. Sika-grout untuk perawatan beton.
6. Model FRP yang digunakan dalam penelitian ini adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dengan dua model yaitu:
 - a. CFRP *Warp/Sheet* merk SikaWarp 231C yaitu CFRP dalam bentuk lembaran untuk menahan gaya geser.
 - b. CFRP *Plate* merk SikaCarboDur S512 yaitu CFRP dalam bentuk lembaran strip yang berfungsi untuk menahan gaya lentur.
7. Lem Perekat (*Epoxy*) dengan dua tipe yaitu epoxy part A dan part B dengan merk SikaDur 30 dan SikaDur 330.

4.3.2 Alat

Adapun alat-alat yang digunakan yang akan dipakai untuk mendukung penelitian ini meliputi:

1. *Loading Frame* untuk menempatkan benda uji disaat pengujian pembebanan dengan kapasitas beban 9 ton.
2. *Hydraulic jack* dan *Pump Hidrolis* adalah alat bantu untuk memberikan pembebanan benda uji, dengan kapasitasn 50 ton.
3. *Load Cell* kapasitas 10 ton
4. *Load Indicator*, type digital dengan ketelitian 5 kg
5. *Dial Gauge*, maksimal pembacaan 30 mm, ketelitian 0,01 mm.
6. LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) untuk mengukur deformasi yang dibaca langsung dengan pembacaan digital.
7. *Data logger*
8. Alat ini digunakan untuk membaca data yang dihasilkandari reaksi yang didapatkan dari Electrical Strain Gauge.
9. Alat-alat lainnya yang dapat membantu dan memudahkan dalam proses pengujian.

4.4 Benda Uji Eksisting

Dalam pelaksanaan perkuatan sambungan balok kolom pracetak, benda uji eksisting telah di rencanakan dan melewati tahap pengujian hingga mencapai kekuatan *ultimate*, adapun detail benda uji eksisting tersebut sebagaimana berikut ini:

1. Data balok pracetak eksisting

- F_c' = 25 MPa
- F_y = 366,94 MPa
- Lebar (b) = 150 mm
- Tinggi (h) = 200 mm
- Panjang (L) = 1000 mm
- $\varnothing$ Tulangan = 12 mm
- $\varnothing$ Sengkang = 8 mm

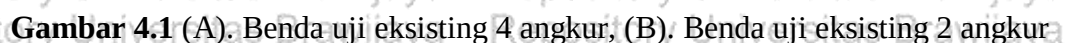
2. Data kolom pracetak eksisting

- F_c' = 25 MPa
- F_y = 366,94 MPa
- Lebar (b) = 200 mm
- Tinggi (h) = 200 mm
- Panjang (L) = 800 mm
- $\varnothing$ Tulangan = 12 mm
- $\varnothing$ Sengkang = 8 mm

3. Sambungan balok kolom pracetak menggunakan dua varian angkur yaitu $\varnothing$ 16 mm dan $\varnothing$ 19 mm. Dengan penggunaan plat baja dengan tebal 9 mm sebagai penahan angkur.

4. Tegangan baja tulangan polos sesuai dengan pengujian tarik tulangan.

5. Beban rencana dalam penelitian diberikan berdasarkan pada perhitungan teoritis.



4.5 Variasi Benda Uji

Detail perkuatan benda uji sambungan kering balok kolom pracetak dirangkum dalam tabel 4.1 dimana varian model perkuatan dijelaskan sebagaimana berikut :

Tabel 4.1 Perincian Benda Uji Pekuatan Sambungan

Benda Uji	Kode Benda Uji	Jumlah Angkur (Buah)	Jumlah Benda Uji (Buah)
Eksisting	A4	4	2
	A2	2	2
Retrofit-A	RA4	4	1
	RA2	2	1
Retrofit-B	RB4	4	1
	RB2	2	1

a. Model benda uji RA4

Model perkuatan yang digunakan dalam model ini yaitu dengan meletakkan lapisan plate baja 5x50 dengan lem perekat (*epoxy*) SikaDur 30 terlebih dahulu kemudian dibungkus menggunakan CFRP *warp/sheet* dengan perekat *epoxy* SikaDur 330. Metode penempelan plat ini pernah dikerjakan sebelumnya oleh (Widyawati,2012) dengan menggunakan SikaDur31 sebagai perkuatan balok. model ini dijelaskan dalam betuk gambar 4.1.

b. Model benda uji RA2

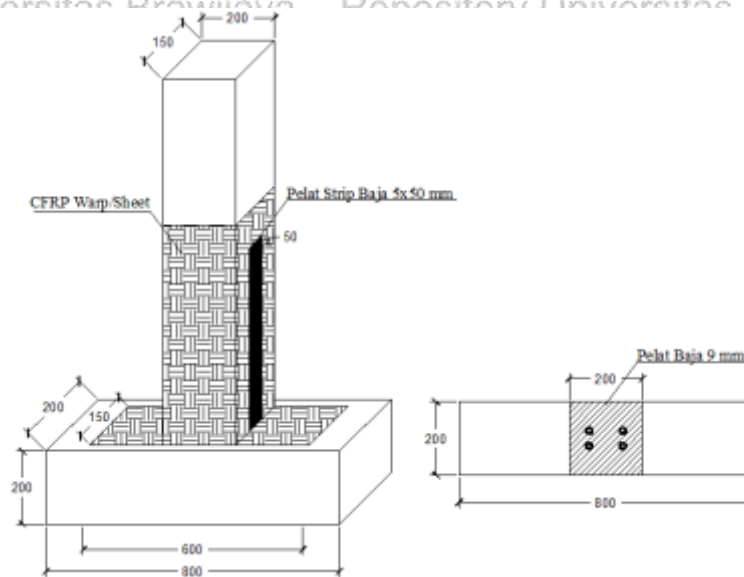
Metode perkuatan yang digunakan dalam model ini sama dengan metode yang diterapkan dalam benda uji RA4, hanya memiliki perbedaan dalam jumlah angkur yang digunakan untuk sambungan balok kolom. Adapun, permodelan perkuatan yang dijelaskan sebelumnya dapat dilihat dalam gambar 4.2.

c. Model benda uji RB4

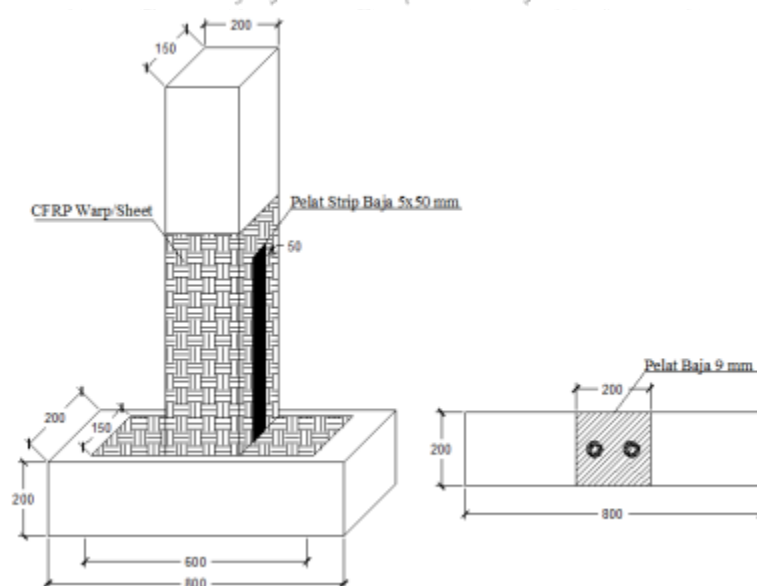
Model perkuatan yang digunakan dalam benda uji ini yaitu dengan mengganti lembaran plat baja 5x50 yang digunakan dalam model RA4 dengan bahan CFRP *Plate*. Kemudian, dibungkus dengan metode yang sama dengan RA4, detail gambar dipaprkan dalam gambar 4.4.

d. Model benda uji RB2

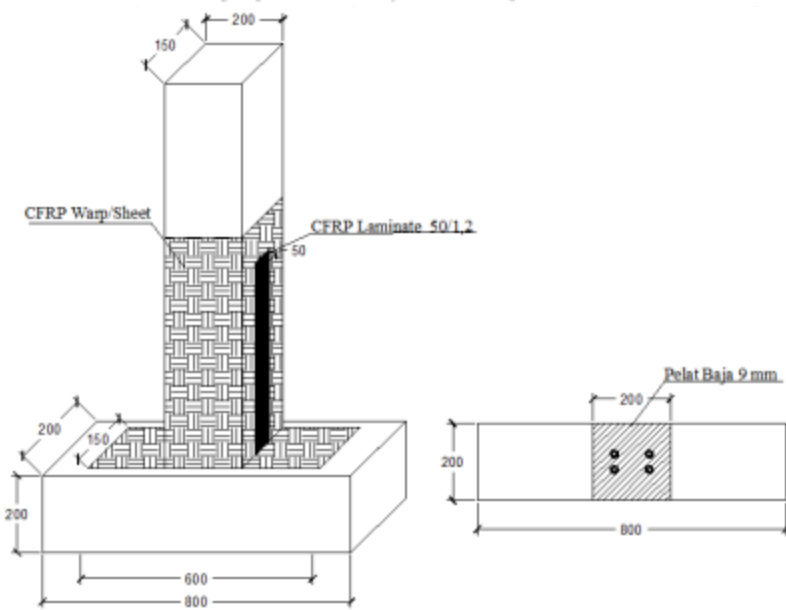
Pemodelan untuk benda uji yaitu menggunakan metode perkuatan yang sama dengan RB4, namun benda uji yang digunakan sama seperti benda uji RA2 yaitu dengan menggunakan sambungan 2 angkur. Adapun, detail gambar dapat dilihat dalam gambar 4.5 dan untuk alur pemasangan digambarkan dalam detail 4.6.



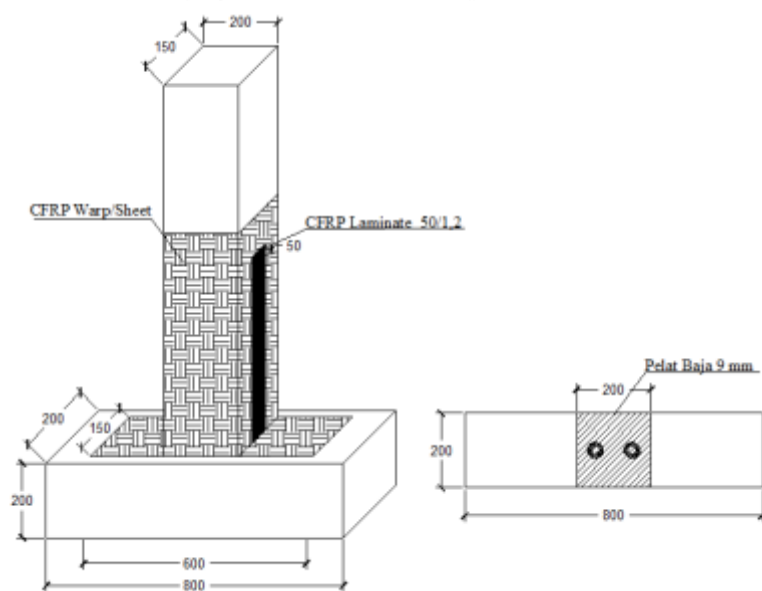
Gambar 4.2 Benda uji model RA4



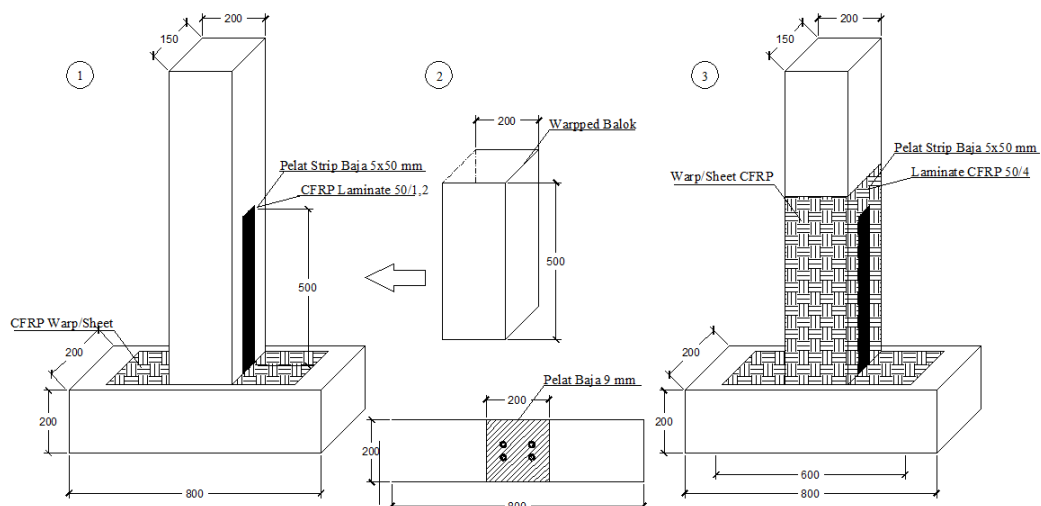
Gambar 4.3 Benda uji model RA2



Gambar 4.4 Benda uji model RB4



Gambar 4.5 Benda uji model RB2



Gambar 4.6 Alur perkuatan sambungan balok kolom pracetak

4.6 Prosedur Penelitian

4.6.1 Prosedur perawatan benda uji

Setelah benda uji eksisting mencapai batasan maksimum dan terjadi retakan pada benda uji sambungan balok kolom, proses perawatan perlu dilakukan sebelum proses perkuatan. Perawatan yang dimaksudkan disini adalah mengambil pecahan beton akibat retakan dan mengelupas selimut beton (*debonding*) yang tidak menempel akibat kerusakan dari benda uji eksisting.

Setelah mengambil pecahan beton yang telah retak, langkah selanjutnya menutup kembali retakan-retakan yang terjadi dengan memperisapkan cetakan (*bekisting*) dan sika *grout*, cetak kembali atau tambal beton yang telah dipisahkan dan yang retak menggunakan sika *grout*. Kemudian didiamkan guna dilakukan perawatan penuh hingga waktu 7 hari.



(a)

(b)

Gambar 4.7 (a) Proses pengambilan pecahan beton, (b) Proses *grouting*

4.6.2 Prosedur pembuatan lem perekat (Epoxy)

Perekat yang digunakan untuk merekatkan bahan perkuatan yaitu FRP adalah SikaDur 30 dan SikaDur 330 yang masing-masing memiliki fungsi untuk melekatkan CFRP *Warp* dan CFRP *Plate*, dalam hal ini *epoxy* terdiri dari dua komponen, yaitu komponen A (dasar) dan komponen B (*hardener*). Perbandingan campuran untuk pembuatan perekat SikaDur 30 antara komponen A dan B adalah 3:1, sedangkan untuk campuran SikaDur 330 adalah 4:1. Adapun, takaran ini dicantumkan dari brosur *company* dan tentunya memiliki takaran campuran yang berbeda-beda sesuai dengan merknya.



Gambar 4.8 (a) Epoxy tipe A, (b) Epoxy tipe B dan (c) Campuran epoxy A dan B

4.6.3 Prosedur pemasangan FRP

Prosedur untuk pemasangan FRP pada benda uji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan benda uji yang telah melalui proses perawatan, letakkan benda uji ditempat yang datar dan leluasa untuk memasang FRP.
2. Meratakan dan membersihkan permukaan benda uji yang akan diperkuat menggunakan FRP dan pastikan permukaan beton dalam keadaan kering agar *epoxy resin* melekat dengan baik.
3. Campurkan *epoxy* tipe A dan tipe B dengan perbandingan volume

yang ditetapkan dengan satuan berat lalu aduk campuran yang telah ditakar, dengan catatan proses pengadukan tidak boleh berlebihan hingga menghasilkan busa dan gelembung yang bisa terperangkap sebagai rongga udara dalam perekat.

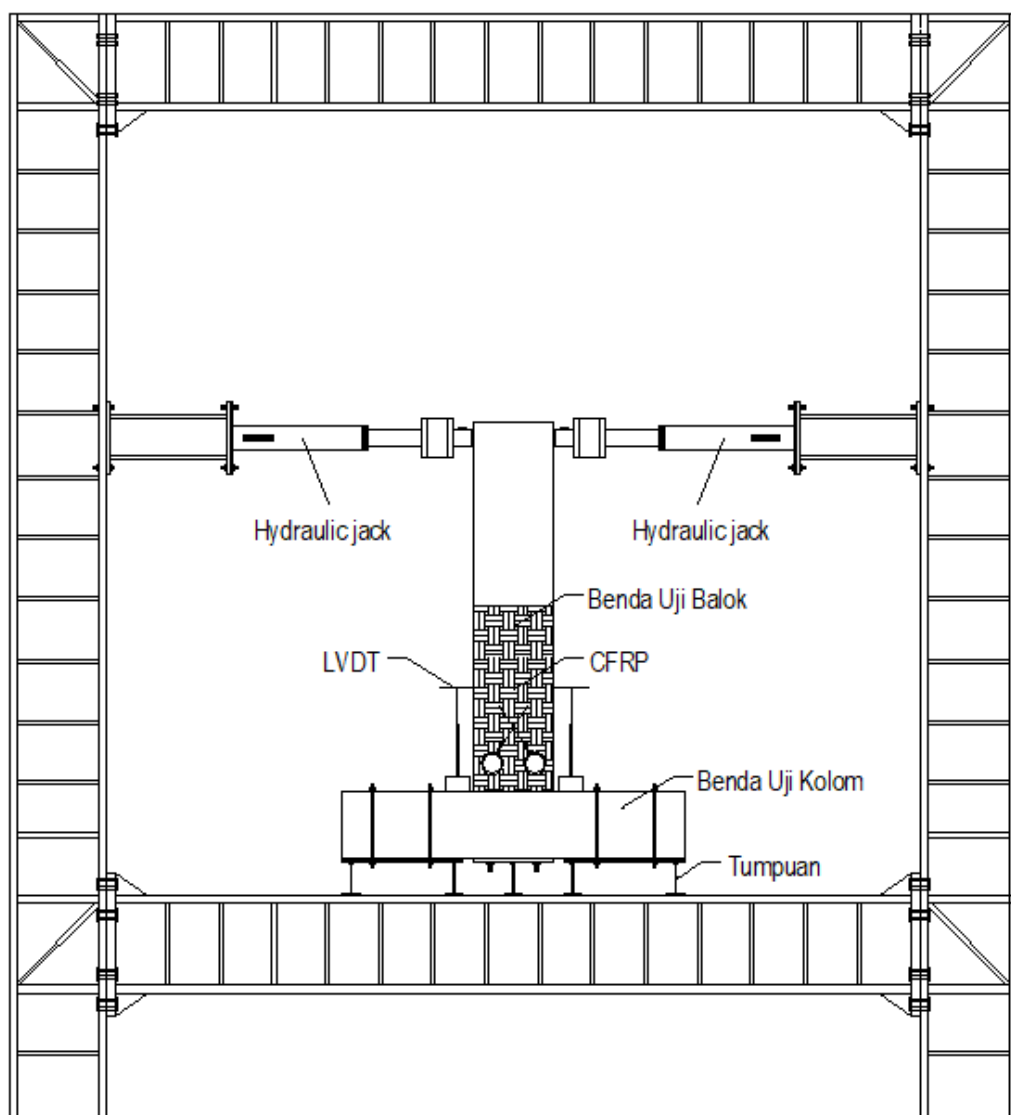
4. Oleskan lapisan pertama *epoxy* diatas permukaan beton dengan menggunakan kuas atau *roller*.
5. Persiapkan CFRP *Plate* dan letakkan searah dengan posisi retakan lentur benda uji, tekan dengan perlahan agar *epoxy* masuk ke dalam serat CFRP.
6. Diamkan benda uji selama satu minggu agar serat CFRP melekat secara maksimal pada permukaan beton.
7. Lanjutkan dengan mengoleskan kembali lapisan kedua *epoxy* setelah CFRP *Plate* terpasang dan melekat sempurna diatas permukaan beton.
8. Potong CFRP *sheet* menjadi beberapa bagian sesuai dengan kebutuhan pada benda uji yang akan di retrofit.
9. Pasang lapisan CFRP *sheet* sesuai gambar rencana, dan selimutkan diatas permukaan yang telah dilapisi CFRP *Plate*.
10. Oleskan kembali lapisan ketiga *epoxy* setelah CFRP *sheet* terpasang dan melekat secara keseluruhan diatas permukaan beton yang mengalami keruntuhan geser.
11. Diamkan kembali benda uji untuk proses perekatan maksimal selama 7 hari sebelum dilakukan pengujian.



Gambar 4.9 (a) Prose penghalusan, (b) Prosen pemasangan CFRP *plate*
(c) Pemasnagan CFRP *sheet* dan (d) *Finishing*

4.6.4 Prosedur pengujian benda uji

Pengujian perkuatan sambungan eksisting balok-kolom kering ini bertujuan untuk mendapatkan perbandingan kekuatan sambungan balok kolom sebelum dan setelah diperkuat, sehingga peneliti mengambil beberapa parameter perilaku yang meliputi: hubungan antara beban-lendutan, daktilitas kurva histeretik, mekanisme keruntuhan dan pola retak yang terjadi pada sambungan eksisting balok-kolom pracetak setelah diperkuat FRP dengan pembebanan siklik serta melihat efektifitas pemakaian bahan yang digunakan untuk perkuatan benda uji.



Gambar 4.10 Model pengujian beban *quasi*-siklik



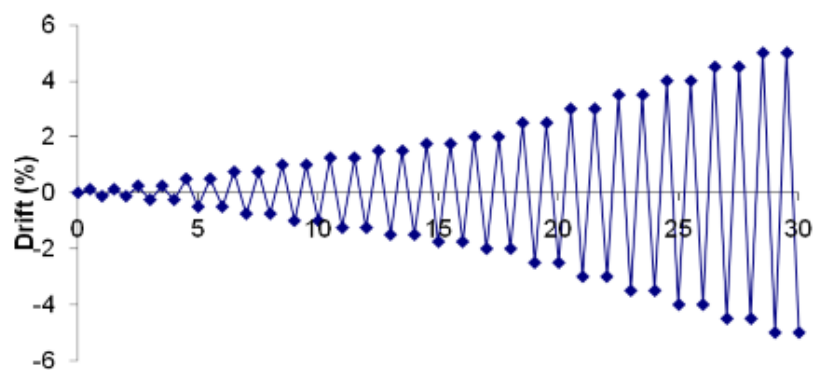
Gambar 4.11 Setting alat dan benda uji beban *quasi-siklik*

Untuk pembebanan yang diberikan dalam pengujian sambungan eksisting yang diperkuat dengan FRP berdasarkan beban yang telah diperhitungkan dalam pengujian yang telah dilakukan sebelum sambungan balok kolom mengalami keruntuhan. Metode pembebanan dalam penelitian ini adalah dengan memberikan beban siklik secara perlahan atau secara *interval* terhadap benda uji eksisting guna memudahkan untuk mengontrol perilaku benda uji eksisting yang diperkuat dengan FRP dan dapat mengidentifikasi serta melihat pola retak yang terjadi terhadap benda uji.

Sesuai contoh yang telah diberikan oleh ACI 374.1-05 dimana dengan rasio drift D/L ($\times 10^2$) dalam landasan teori, penelitian ini pengujian lateral siklik menggunakan metode yang telah dilakukan oleh Wibowo, A. 92:2012 dimana pengontrolan *displacement* dilakukan dengan menaikkan drift sebesar 0.25% hingga sampai drift 2%, setelah itu dinaikkan sebesar 0.5% hingga mencapai runtuh. Adapun untuk detail contoh siklus pembebanan sebagaimana berikut :

Tabel 4.2 Siklus Pembebanan

Drift Ratio (%)	Simpangan (mm)		Siklus
	(+)	(-)	
0,00%	0,00	0,00	1
0,125%	1,13	1,13	2
0,25%	2,25	2,25	3
0,50%	4,50	4,50	4
0,75%	6,75	6,75	5
1,00%	9,00	9,00	6
1,50%	13,50	13,50	7
2,00%	18,00	18,00	8
2,50%	22,50	22,50	9
3,00%	27,00	27,00	10
4,00%	36,00	36,00	11
5,00%	45,00	45,00	12
6,00%	54,00	54,00	13
7,00%	63,00	63,00	14

**Gambar 4.12 Pola Pembebanan**

Sumber: Wibowo, A. 2012

4.7 Tahapan Penelitian

Untuk mempermudah dalam pelaksanaan, penelitian ini akan dilakukan dengan beberapa tahapan. Adapun tahapan-tahapan penelitian ini sebagaimana berikut ini:

1. Tahap I

Dalam tahapan awal yang dilakukan dalam penelitian ini dimulai dengan proses perawatan benda uji yang telah mencapai keadaan *ultimate* beton

atau runtuh setelah serangkaian proses pengujian menggunakan baban siklik, adapun prosedur perawatan benda uji telah dijelaskan sebelumnya.

2. Tahap II

Tahapan selanjutnya yang dalam penelitian ini dilakukan proses perkuatan menggunakan bahan FRP, dimana dalam proses perkuatan dilakukan dua proses tahapan yang meliputi: proses pembuatan lem *epoxy* dan proses perekatan CFRP ke permukaan beton yang telah di lapisi lem *epoxy*.

3. Tahap III

Untuk tahapan yang ke III dilaksanakan proses pengujian benda uji dengan pembebanan siklik. Selama proses pembebanan yang berlangsung, dilakukan pengontrolan terhadap lendutan, daktilitas, mekanisme keruntuhan dan pola retak yang terjadi.

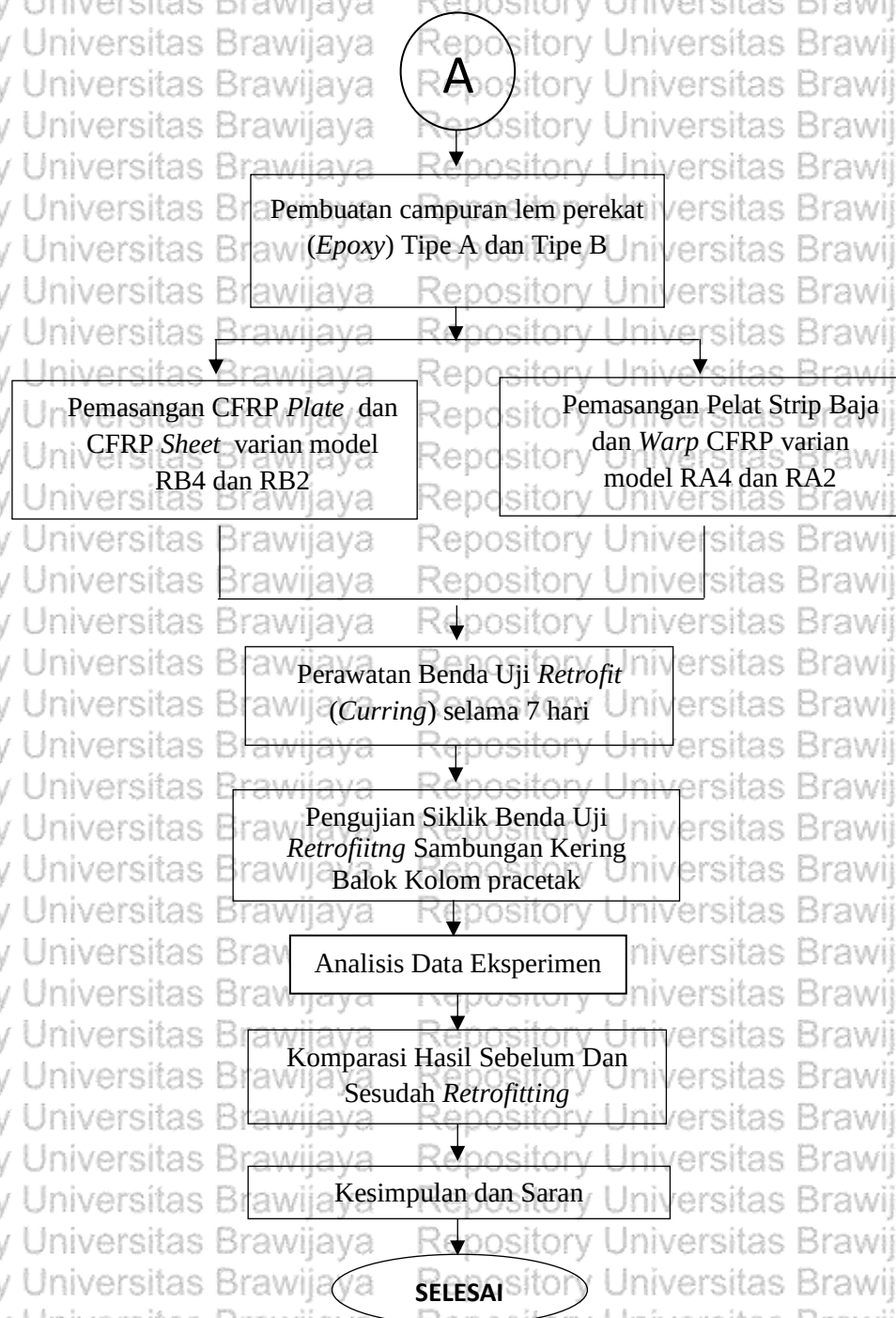
4. Tahap IV

Untuk tahapan yang terakhir merupakan bagian dari pengolahan dan analisis data yang diperoleh dari proses penelitian, hasil dari proses analisis data tentang perkuatan dibandingkan dengan hasil pengujian benda uji eksisting. Setelah analisis dan validasi data dilanjutkan pada tahap penarikan kesimpulan hasil.

4.8 Diagram Alir Penelitian

Rangkaian dan tahapan dalam penelitian ini akan didetailkan dalam diagram alir penelitian yang akan digambarkan dibawah ini :





Gambar 4.13 Diagram Alir Penelitian

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Analisis Hasil Benda Uji Eksisting

Seperti yang telah dipaparkan sebelumnya, bahwa penelitian ini bertujuan untuk melanjutkan penelitian yang membahas tentang analisis sambungan balok kolom pracetak dengan metode sambungan kering dengan mendapatkan perilaku pembebanan berupa *quasi*-siklik hingga balok mencapai kekuatan maksimumnya (*ultimate*).



Gambar 5.1 Benda uji eksisting

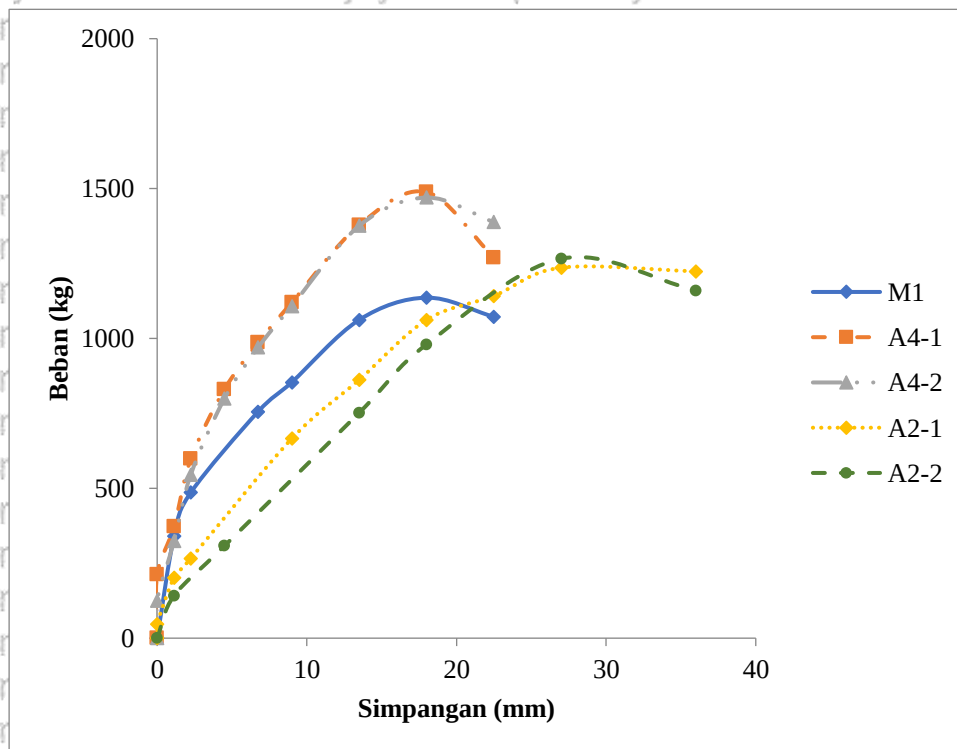
Adapun, data yang telah diperoleh dari hasil penelitian benda uji eksisting meliputi kapasitas maksimum (*peak*), daktilitas dan kekakuan benda uji. Berikut rangkuman hasil dari penelitian benda uji eksisting yang telah dilakukan pengujian sebelumnya dan dirangkum dalam tabel 5.1:

5.1.1 Kapasitas maksimum

Tabel 5.1 Nilai Kapasitas Maksimum Uji Eksisting

Benda uji	M1	A4-1	A4-2	A2-1	A2-2
Beban Maksimum (kg)	1136	1488	1470	1236	1266

Dari analisa hasil yang ditampilkan dalam bentuk tabel diatas dapat dilihat untuk perbandingan kapasitas maksimum (*peak*) dari lima benda uji eksisting. Dilihat dari nilai kapasitas maksimum secara keseluruhan, benda uji dengan jumlah 4 buah angkur memiliki nilai kapasitas maksimum yang tinggi dengan nilai A4-1 dan A4-2 sebesar 1488 dan 1470 lebih tinggi dari benda uji monolit yang memiliki nilai sebesar 1136 kg. Namun, berbeda dengan benda uji dengan 2 buah angkur yang memiliki nilai dibawah benda uji 4 buah angkur dengan nilai kapasitas maksimum A2-1 dan A2-2 sebesar 1236 kg dan 1266 kg. Sehingga dapat disimpulkan nilai kapasitas 4 buah angkur lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji eksisting dan benda uji dengan 2 buah angkur. Dari hasil pengujian tersebut dirangkum dalam sebuah gambar kurva seperti dibawah ini:

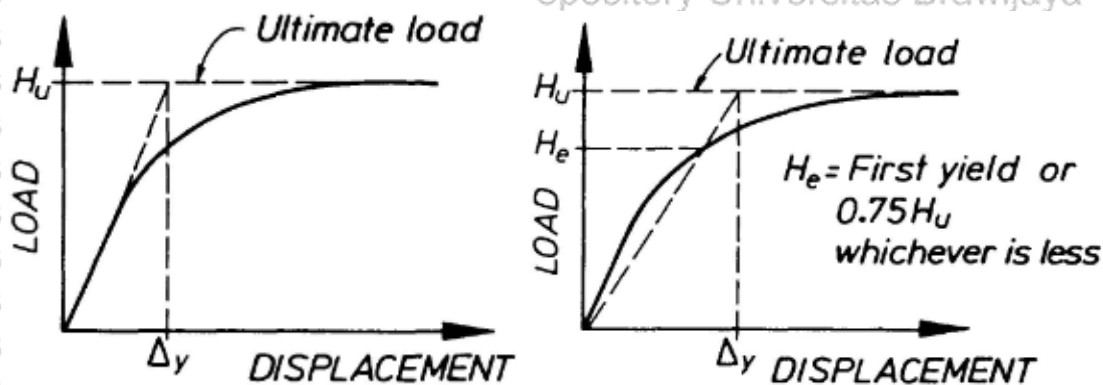


Gambar 5.2 Kurva *backbone* pada pengujian 5 benda uji eksisting

5.1.2 Daktilitas eksisting

Dikarenakan dalam proses penelitian ini, peneliti tidak menempatkan atau menggunakan *strain gauge* untuk mengkontrol nilai leleh tulangan dan angkur. Sehingga, dalam hal ini guna mendapatkan titik leleh yang digunakan untuk menentukan nilai daktilitas benda uji digunakan suatu metode yang telah

dipaparkan sebelumnya oleh (Park,1988), dimana metode yang digunakan dalam pembahasan ini hanya menggunakan 2 metode antara lain: (a) Metode tangensial dan (b) Metode secant, yang digambarkan seperti gambar dibawah ini:



Gambar 5.3 Menentukan nilai leleh (kiri) metode tangensial (kanan) metode secant

Sumber : Park,1988

Metode tangensial merupakan metode pendekatan perilaku leleh terhadap struktur ketika kondisi beton masih bagus. Sedangkan metode secant merupakan metode pendekatan terhadap perilaku leleh beton yang lebih aktual (Patricia L.2017). Untuk mencari nilai daktilitas benda uji eksisting dengan metode yang telah dijelaskan diatas, nilai beban (P) dibagi dalam 3 bagian yaitu disaat nilai beban berada di puncak (*peak*) kurva, disaat nilai beban mengalami penurunan sebesar 5% dari titik puncak dan disaat nilai beban berada di ujung kurva. Adapun untuk hasil dari pemakaian metode diatas dirangkumkan dalam pembahasan berikut ini:

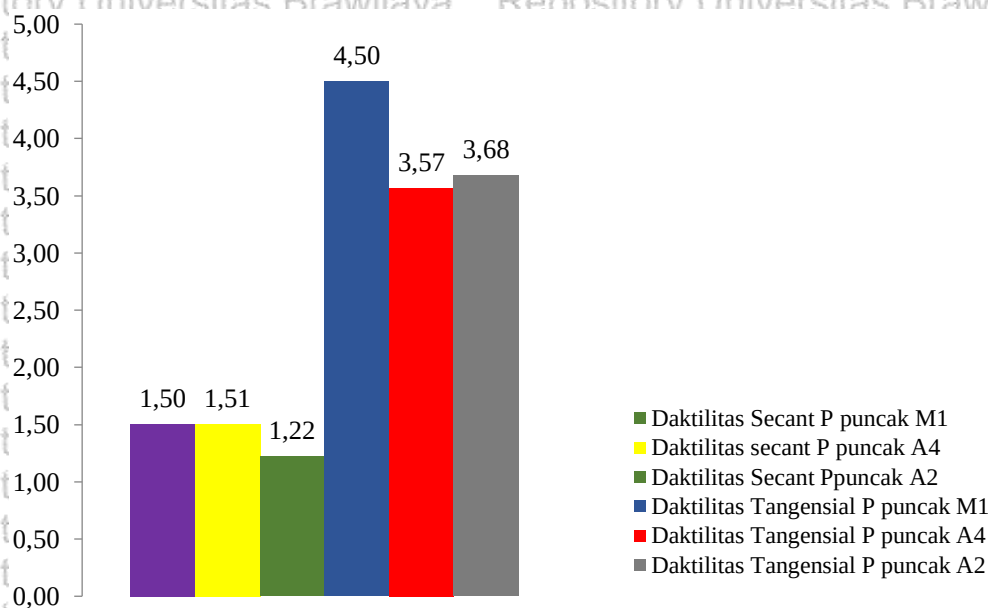
1. Daktilitas saat P *peak*

Tabel 5.2 Nilai Daktilitas Tangensial saat P Puncak (*Peak*)

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1136	18,00	4,00	4,50
A4-1	1488	18,00	4,90	3,67
A4-2	1470	18,00	5,20	3,46
A2-1	1236	27,00	6,20	4,35
A2-2	1266	27,00	9,00	3,00

Tabel 5.3 Nilai Daktilitas Secant saat P Puncak (*Peak*)

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1136	18,00	11,97	1,50
A4-1	1488	18,00	11,96	1,51
A4-2	1470	18,00	11,94	1,51
A2-1	1236	27,00	20,95	1,29
A2-2	1266	27,00	23,25	1,16

**Gambar 5.4** Diagram batang hasil nilai daktilitas P *peak*

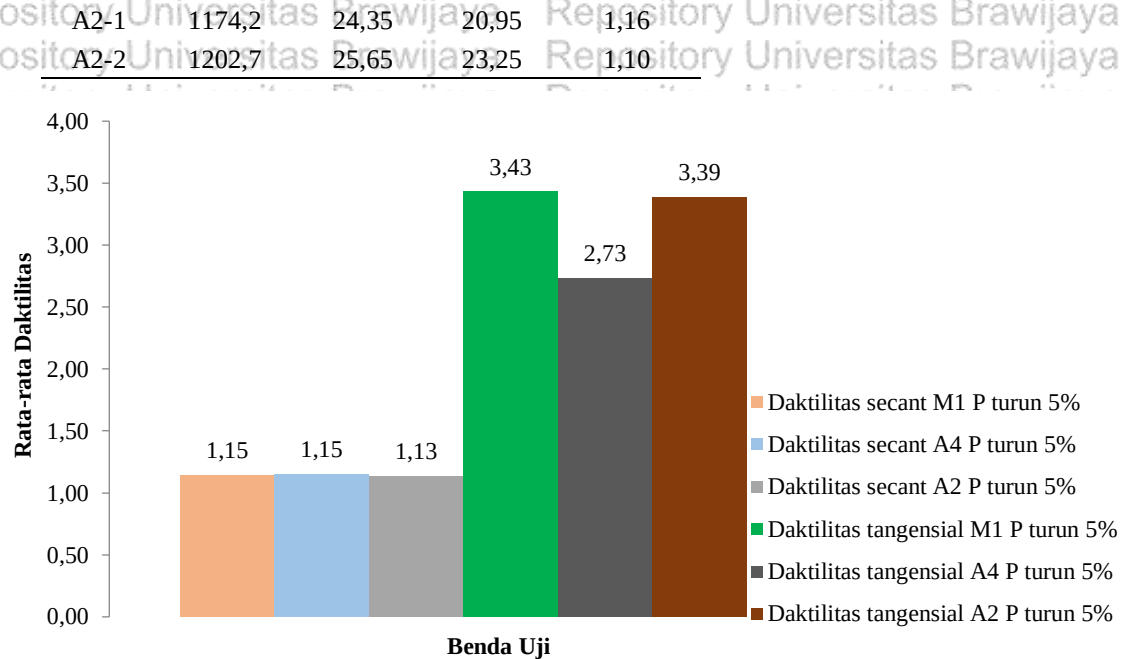
2. Daktilitas saat P turun 5% dari *peak*

Tabel 5.4 Nilai Daktilitas Tangensial saat P turun 5% dari *Peak*

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1079,2	13,72	4,00	3,43
A4-1	1413,6	13,85	4,90	2,83
A4-2	1396,5	13,70	5,20	2,63
A2-1	1174,2	24,35	6,20	3,93
A2-2	1202,7	25,65	9,00	2,85

Tabel 5.5 Nilai Daktilitas Secant saat P turun 5% dari *Peak*

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1079,2	13,72	11,97	1,15
A4-1	1413,6	13,85	11,96	1,16
A4-2	1396,5	13,70	11,94	1,15



Gambar 5.5 Diagram batang hasil nilai daktilitas P turun 5% dari *peak*

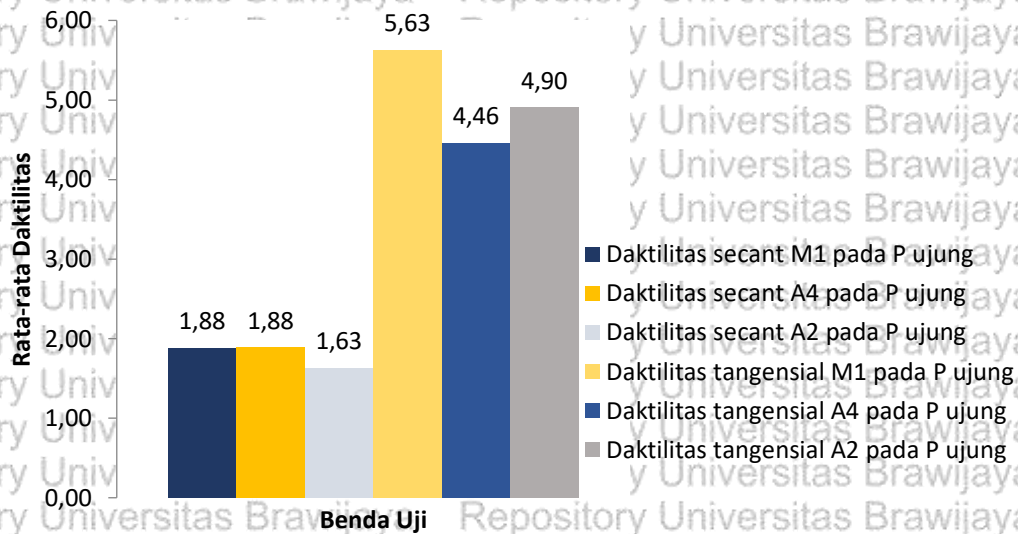
3. Daktilitas saat P di ujung

Tabel 5.6 Nilai Daktilitas Tangensial saat P di ujung

Benda Uji	Pu (kg)	Py (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1072	852	22,50	4,00	5,63
A4-1	1270	952,5	22,50	4,90	4,59
A4-2	1388	1041	22,50	5,20	4,33
A2-1	1224	918	36,00	6,20	5,81
A2-2	1160	870	36,00	9,00	4,00

Tabel 5.7 Nilai Daktilitas Secant saat P di ujung

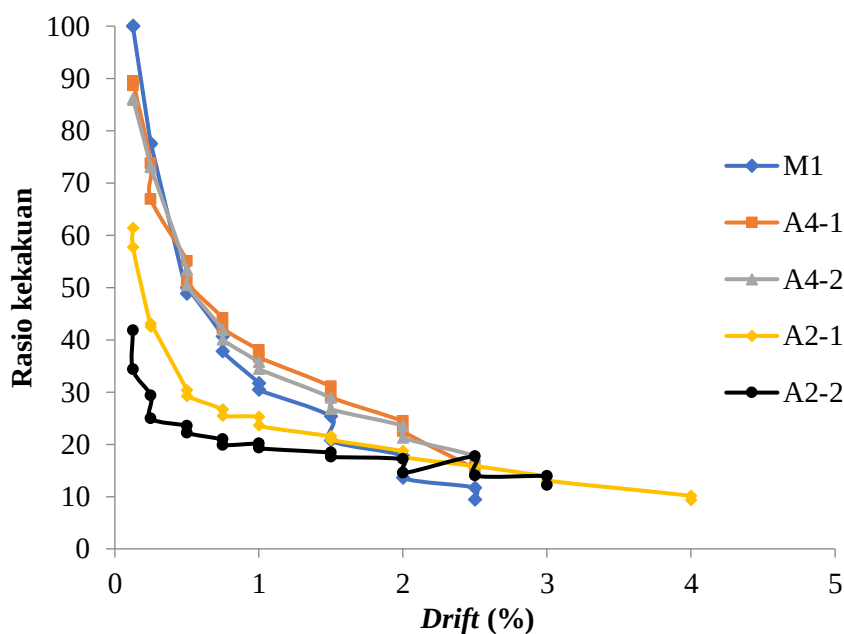
Benda Uji	Pu (kg)	Py (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
M1	1072	852	22,50	11,97	1,88
A4-1	1270	1116	22,50	11,96	1,88
A4-2	1388	1102,5	22,50	11,94	1,88
A2-1	1224	927	36,00	20,95	1,72
A2-2	1160	949,5	36,00	23,25	1,55



Gambar 5.6 Diagram batang hasil nilai daktililitas P ujung

Dari hasil rangkuman tabel dan diagram batang diatas dapat disimpulkan, bahwa nilai daktililitas dengan pendekatan nilai titik leleh menggunakan metode tangensial memiliki rata-rata nilai daktililitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode secant, tidak terkecuali dari beberapa titik beban yang ditinjau dalam pengujian benda uji eksisting.

5.1.3 Kekakuan Eksisting



Gambar 5.7 Kurva kekakuan benda uji eksisting

Hasil dari perhitungan nilai kekakuan ditampilkan dalam bentuk kurva yang ada dalam gambar 5.7, dirangkumkan secara keseluruhan kekakuan yang dimiliki benda uji monolit memiliki nilai kekakuan yang tinggi diawal pembebanan dan berangsur turun seiring bertambahnya beban dan untuk benda uji dengan jumlah 4 buah angkur memiliki nilai kekakuan yang tinggi jika dibandingkan dengan benda uji dengan jumlah 2 buah angkur.

Dari keseluruhan hasil dari pengujian eksisting dapat disimpulkan bahwa benda uji dengan jumlah 4 buah angkur cenderung lebih dan mendekati benda uji kontrol dari beberapa faktor seperti nilai kapasitas maksimum, nilai daktilitas dan kekakuan jika dibandingkan dengan benda 2 buah angkur.

5.2 Analisis Hasil Perkuatan Benda Uji

Pengujian perkuatan sambungan kering balok kolom pracetak telah dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya, pengujian ini digunakan untuk mengetahui perbandingan kapasitas sambungan kering balok kolom pracetak antara sebelum dan sesudah diperkuat dengan variasi benda uji yang sama dengan benda uji eksisting yaitu 4 buah dan 2 buah angkur. Perkuatan yang dimaksudkan disini telah dibahas sebelumnya yaitu dengan memberikan bahan tambahan CFRP *plate* 50/1,2 dan *steel plate* 5x50 kemudian dibungkus dengan CFRP *Sheet*.

Pengambilan data dari penelitian ini memiliki kesamaan dengan benda uji eksisting yang berupa kapasitas maksimum (*peak*), nilai daktilitas dan kekakuan benda uji. Detail dan jumlah utuk benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP digolongkan dalam tabel 5.8 yang ditampilkan sebagaimana berikut :

Tabel 5.8 Detail dan Jumlah Benda Uji *Retrofitting*

Benda Uji	Kode Benda Uji	Jumlah Angkur (Buah)	Jumlah Benda Uji (Buah)	Jenis Perkuatan
Retrofit-A	RA4	4	1	Steel Plate + CFRP Sheet
	RA2	2	1	Steel Plate + CFRP Sheet
Retrofit-B	RB4	4	1	CFRP Plate + CRFP Sheet
	RB2	2	1	CFRP Plate + CRFP Sheet



Gambar 5.8 Benda uji *retrofitting*

5.2.1 Analisa kapasitas maksimum *retrofitting*

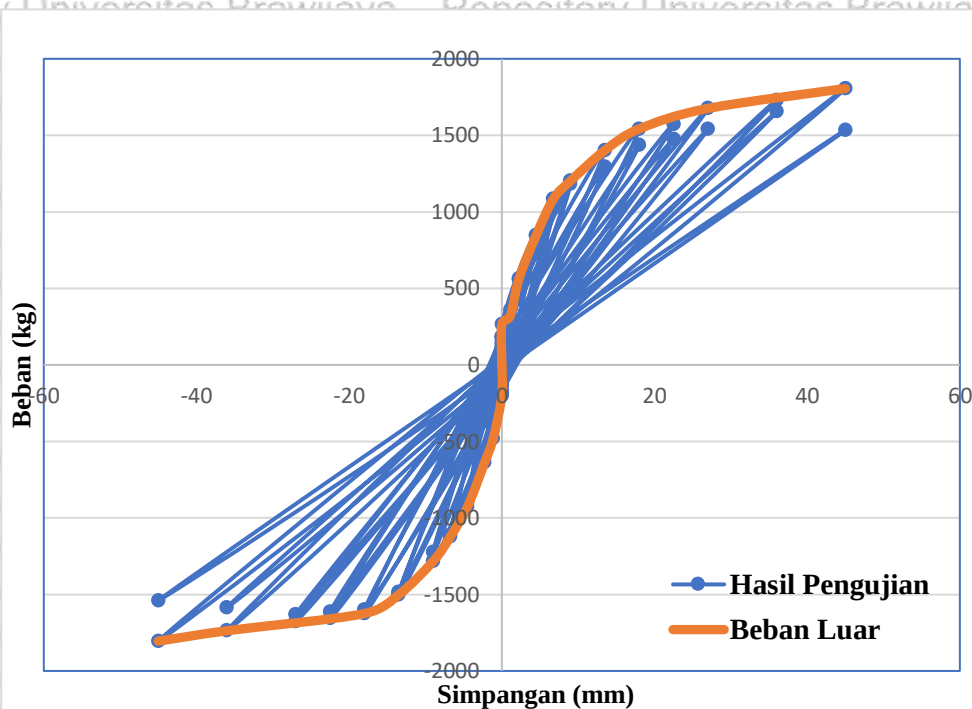
Pengambilan nilai kapasitas maksimum diambil dari hasil pengujian benda uji *retrofit* dengan metode pembebanan *quasi*-siklik, sesuai dengan benda uji yang telah dirangkumkan sebelumnya. Metode pembebanan yang dilakukan sama halnya dengan pengujian benda uji eksisting yang telah dibahas diawal. Dari hasil pengujian benda uji tersebut didapatkan suatu nilai yang tergambar dalam bentuk kurva histeresis, dari kurva inilah kapasitas maksimum benda uji *retrofitting* dapat digolongkan dari sebagaimana berikut:

a. Benda Uji RA4 (4 angkur: *Steel Plate* + CFRP Sheet)

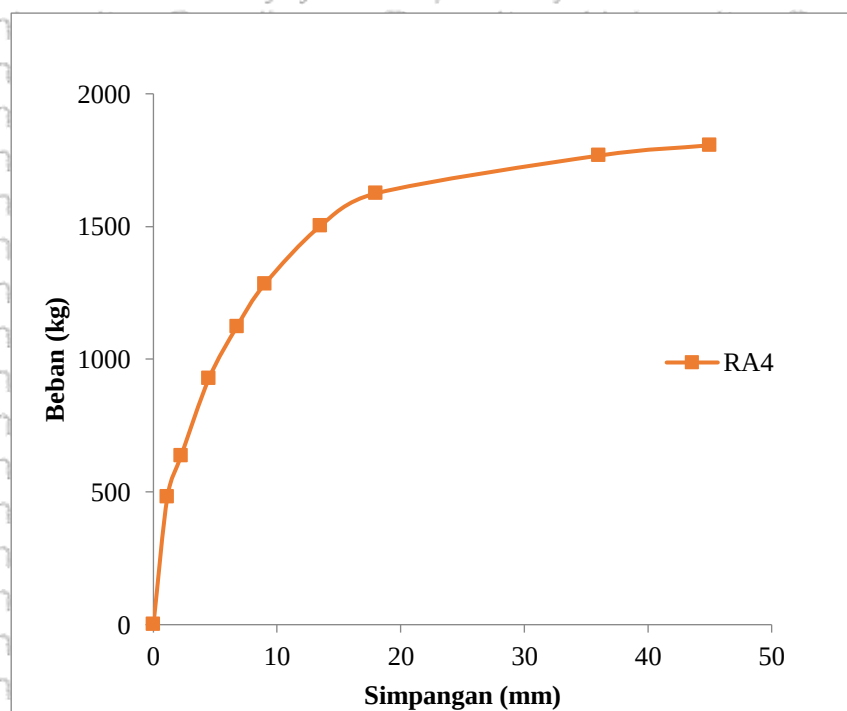
Tabel 5.9 Hasil Pengujian Benda Uji RA4

Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
	0,00	0,00
	0,00	264,00
	1,13	322,00
	2,25	564,00
	4,50	846,00
RA4	6,75	1084,00
	9,00	1202,00
	13,50	1402,00
	18,00	1542,00
	27,00	1676,00
	45,00	1806,00

Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
	0,00	0,00
	0,00	201,00
	1,13	481,00
	2,25	637,00
	4,50	928,00
RA4	6,75	1122,50
	9,00	1283,00
	13,5	1502,00
	18,00	1625,00
	36,00	1737,00
	45,00	1805,00



Gambar 5.9 Kurva histeresis RA4



Gambar 5.10 Kurva backbone RA4

Dari tabel hasil pengujian pada benda uji RA4 perkuatan sambungan mampu menghasilkan kapasitas maksimum hingga mencapai simpangan 45 disaat *drift-ratio* berada diangka 5%, didalam kondisi tertekan benda uji mampu menerima

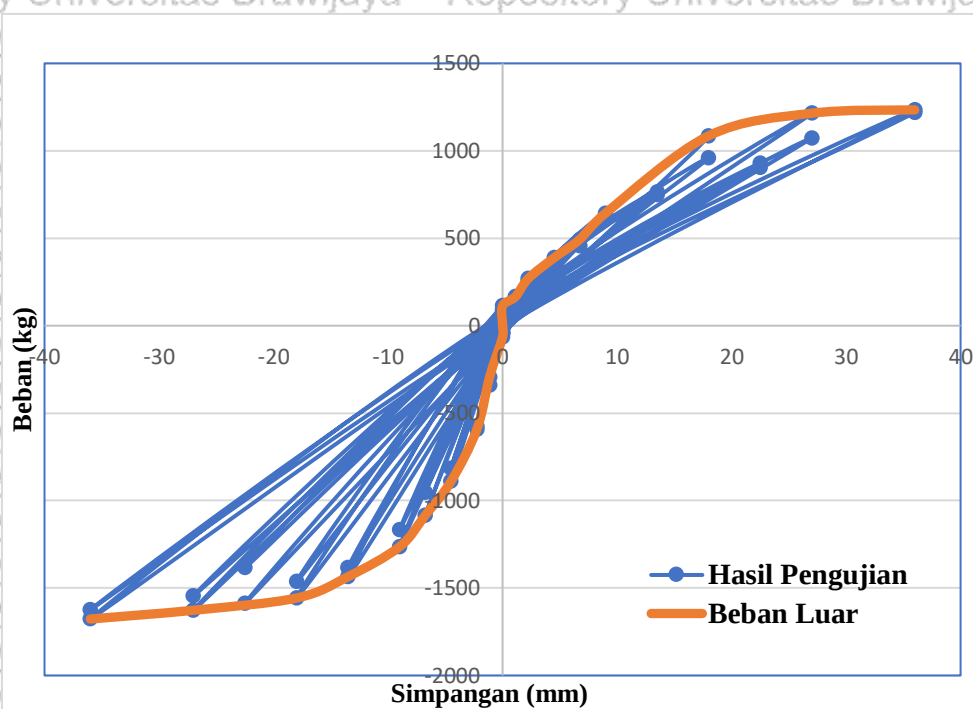
beban sebesar 1806 kg, sedangkan dalam kondisi tarik kapasitas maksimum dapat menerima beban sebesar 1805.

b. Benda Uji RB4 (4 angkur: CFRP *Plate* + CFRP *Sheet*)

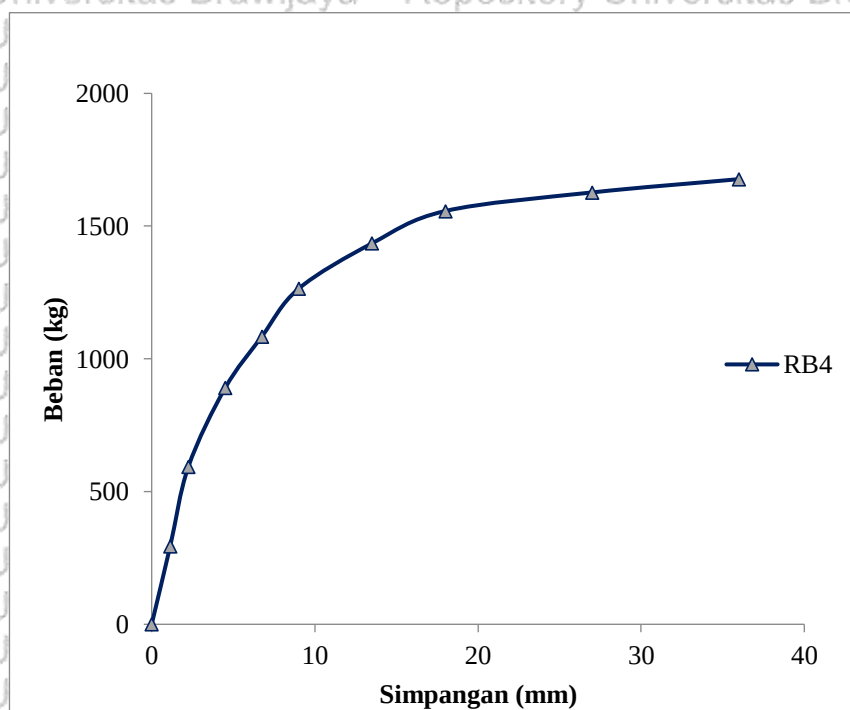
Tabel 5.10 Hasil Pengujian Benda Uji RB4

Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
	0,00	0,00
	0,00	114,00
	1,13	166,00
	2,25	270,00
	4,50	388,00
RB4	6,75	494,00
	9,00	644,00
	18,00	1086,00
	27,00	1215,00
	36,00	1234,00

Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
	0,00	0,00
	0,00	64,50
	1,13	293,00
	2,25	594,00
	4,50	890,00
RB4	6,75	1084,00
	9,00	1264,00
	13,50	1435,00
	18,00	1557,00
	27,00	1627,00
	36,00	1677,00



Gambar 5.11 Kurva histeresis RB4



Gambar 5.12 Kurva backbone RB4

Berbeda dari hasil RA4, perkuatan sambungan benda uji RB4 hanya mampu menghasilkan kapasitas maksimum hingga mencapai simpangan 36 disaat *drift-ratio* berada diangka 4%, benda uji dalam kondisi tertekan mampu menerima

beban sebesar 1234 kg, sedangkan dalam kondisi tarik kapasitas maksimum dapat menerima beban sebesar 1677.

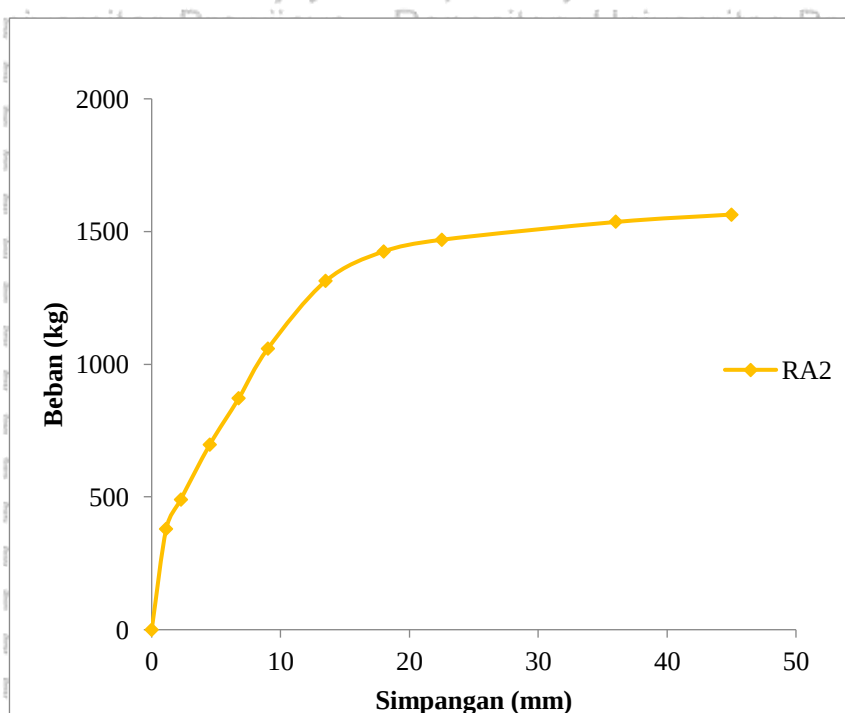
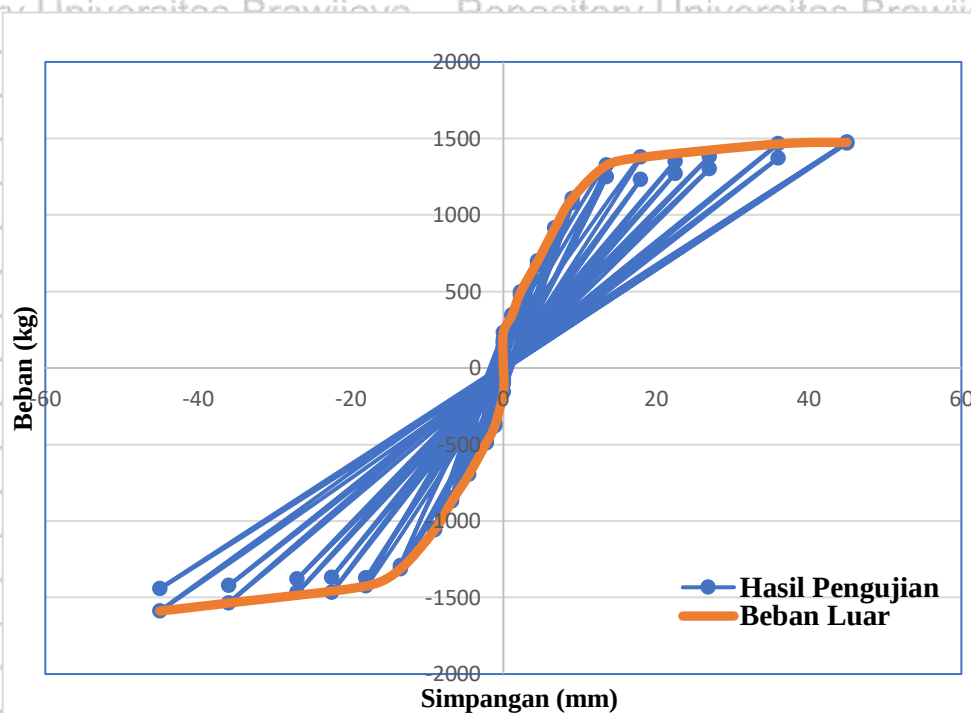
c. Benda Uji RA2 dan RB 2 (2 angkur: *Steel Plate* dan *CFRP Plate* + *CFRP Sheet*)

Tabel 5.11 Hasil Pengujian Benda Uji RA2 Dan RB2

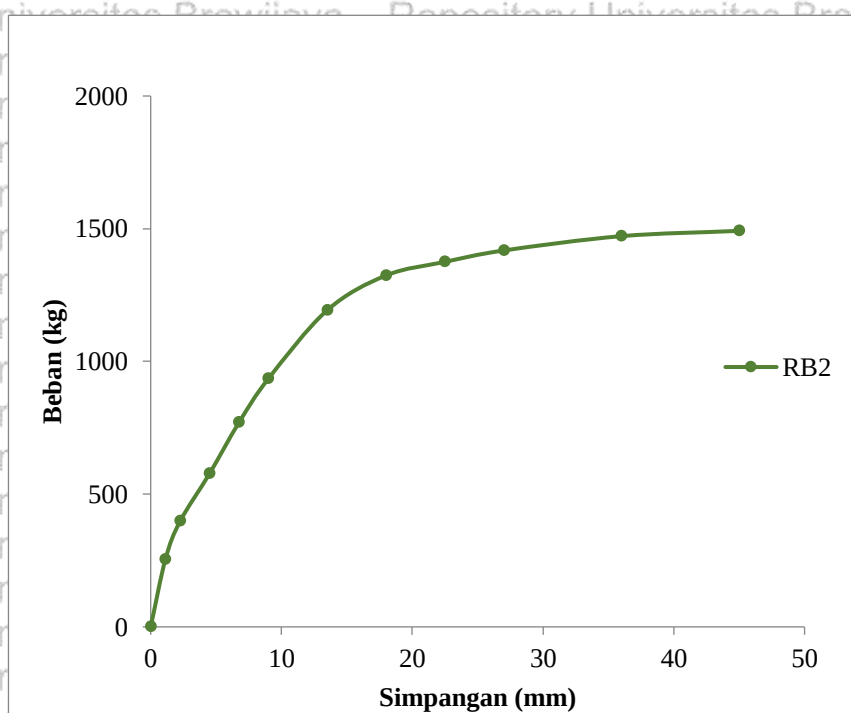
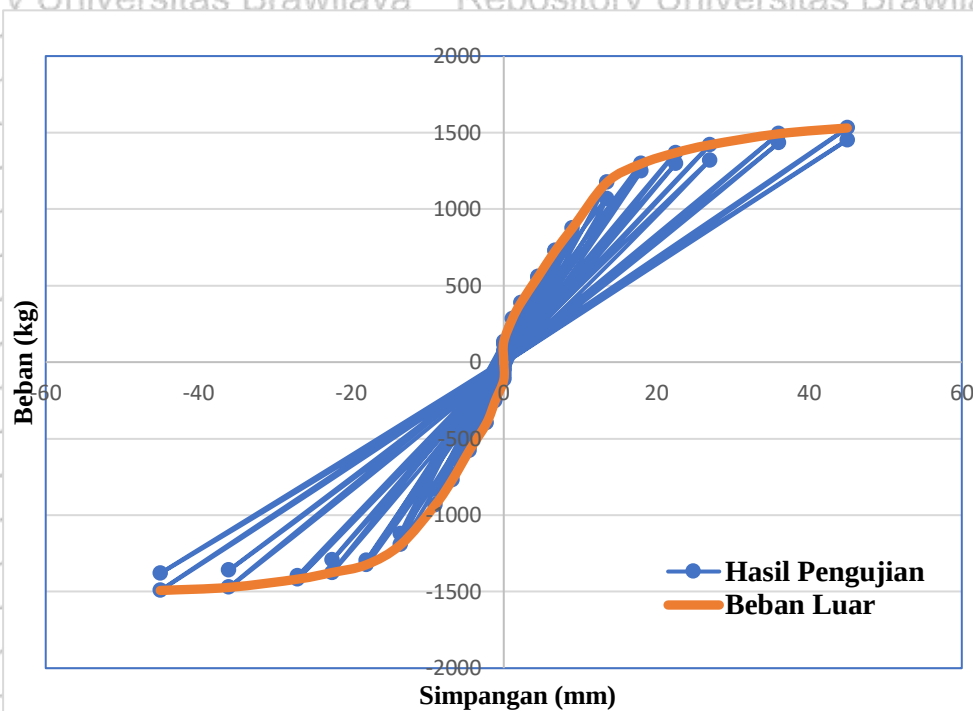
Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
RA2	0,00	0,00
	0,00	230,00
	1,13	344,00
	2,25	494,00
	4,50	698,00
	6,75	914,00
	9,00	1106,00
	13,5	1324,00
	18,00	1376,00
	36,00	1464,00
	45,00	1474,00
Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
RB2	0,00	0,00
	0,00	132,00
	1,13	282,00
	2,25	388,00
	4,50	558,00
	6,75	728,00
	9,00	876,00
	13,5	1174,00
	18,00	1296,00
	22,50	1368,00
	27,00	1420,00
	36,00	1492,00
	45,00	1530,00

Tabel 5.11 Hasil Pengujian Benda Uji RA2 Dan RB2 (Lanjutan)

Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
RA2	0,00	0,00
	0,00	158,00
	1,13	380,00
	2,25	490,00
	4,50	696,50
	6,75	871,00
	9,00	1058,00
	13,50	1313,50
	18,00	1425,00
	36,00	1536,00
	45,00	1588,00
Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
RB2	0,00	0,00
	0,00	116,00
	1,13	255,20
	2,25	398,00
	4,50	577,50
	6,75	770,00
	9,00	935,00
	13,50	1193,00
	18,00	1324,00
	22,50	1375,00
	27,00	1418,00
	36,00	1472,00
	45,00	1492,00



Gambar 5.13 (atas) Kurva histeresis RA2, (bawah) Kurva *backbone* RA2

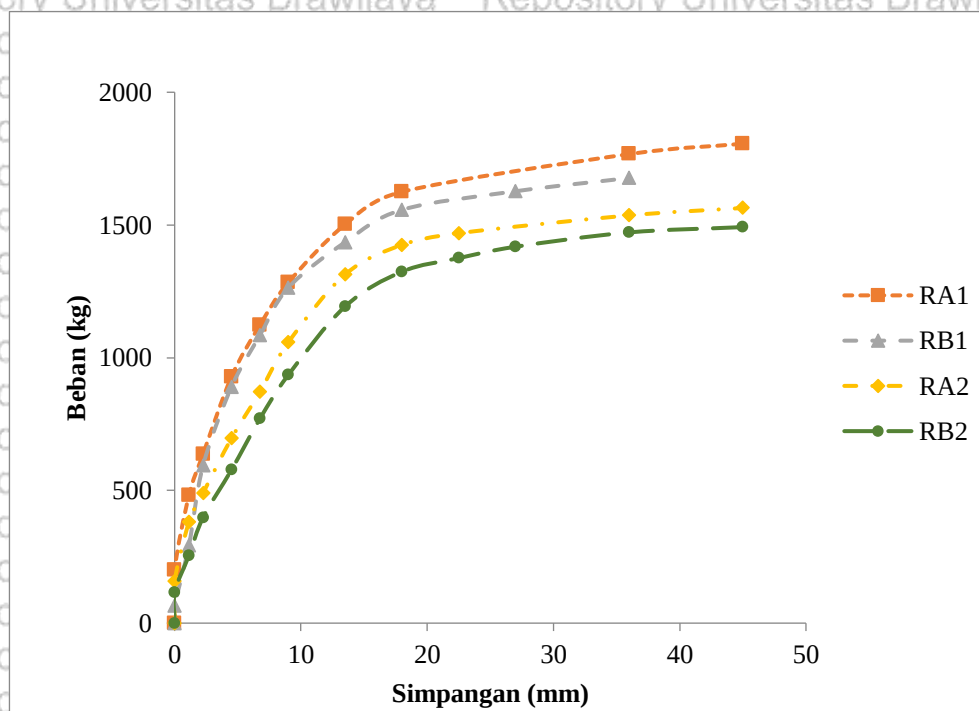


Gambar 5.14 (atas) Kurva histeresis RB2, (bawah) Kurva *backbone* RB2

Dari plot kurva yang ditampilkan diatas dan dari tabel hasil menunjukkan bahwa hasil pengujian untuk perkuatan benda uji sama-sama menghasilkan kapasitas maksimum hingga mencapai simpangan 45 mm disaat *drift-ratio* berada

diangka 5%, benda uji dalam kondisi tertekan mampu masing-masing mampu menerima beban sebesar 1474 kg dan 1530 kg, sedangkan dalam kondisi tarik kapasitas maksimum dapat menerima beban sebesar 1588 dan 1492.

Dari keseluruhan hasil yang didapatkan benda uji dapat disimpulkan bahwa perkuatan dengan penambahan lembaran *steel plate* memiliki nilai kapasitas maksimum yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkuatan dengan menggunakan *plate* CFRP.



Gambar 5.15 Kurva *backbone* hasil benda uji *retrofitting*

Namun, perbedaan hasil yang didapatkan tidak terlalu signifikan dan dapat dipertimbangkan dalam hal perkuatan suatu struktur sesuai dengan kebutuhan dan fungsinya. Penelitian ini juga memiliki hasil yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh **Balasubramania, K., et al. 2012** dengan hasil dimana ID benda uji method 1 diperkuat dengan CFRP *plate* dan untuk method 3 diperkuat dengan *steel plate*, untuk lebih detailnya dapat dilihat sebagaimana berikut:

Tabel 5.12 Hasil Penelitian Terdahulu

ID	Yield load, kN	Peak load, kN
Control	30.0	35.1
Method 1	30.9	36.3
Method 2	38.8	50.0
Method 3	37.1	39.4
Method 4	37.1	42.3

Sumber: Balasubramania, K., et al. 2012

Namun, hasil pengujian yang ditampilkan dalam bentuk kurva histeresis diatas tidak menunjukkan adanya penurunan beban dan dapat dikatakan benda uji masih mampu menambah kapasitas beban yang ada. Hal ini terjadi, begitu juga dengan kondisi balok yang sudah mengalami kemiringan sudut yang sangat besar dikarenakan posisi baut untuk penahan sambungan yang mulai kendor dan hilangnya kekakuan diarea sambungan sehingga kecilnya disipasi energi yang terjadi disepanjang area sambungan balok kolom. Berikut gambar disaat pengambilan data mencapai kapasitas maksimum :



Gambar 5.16 Kondisi benda uji saat kapasitas maksimum

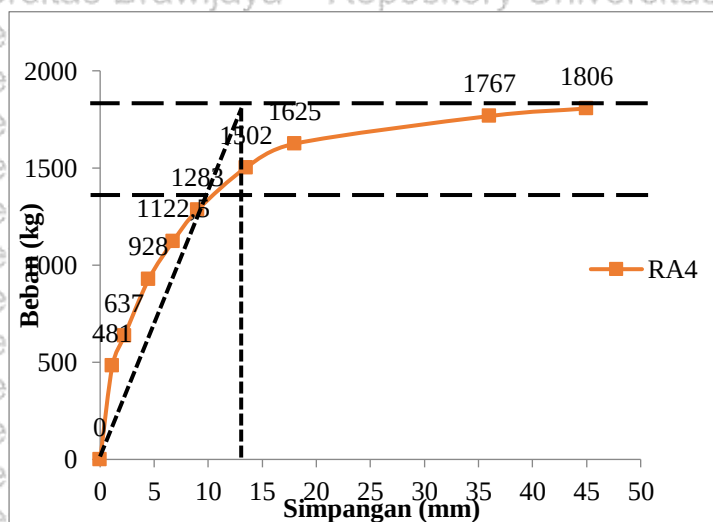
5.2.2 Analisa daktilitas *retrofitting*

Dengan menggunakan metode pencarian nilai daktilitas benda uji eksisting yang telah dibahas sebelumnya, metode untuk analisa daktilitas *retrofitting* juga menggunakan metode yang sama dengan sebelumnya, hanya saja untuk nilai beban yang digunakan untuk analisa daktilitas *retrofitting* dibagi menjadi 2 bagian saja yang meliputi: (a) disaat nilai beban (P) berada di ujung kurva *backbone* dan (b) disaat nilai beban berada dititik lengkungan pertama kurva *backbone*. Untuk detail hasil dari analisa daktilitas *retrofitting* akan dibahas berikut ini:

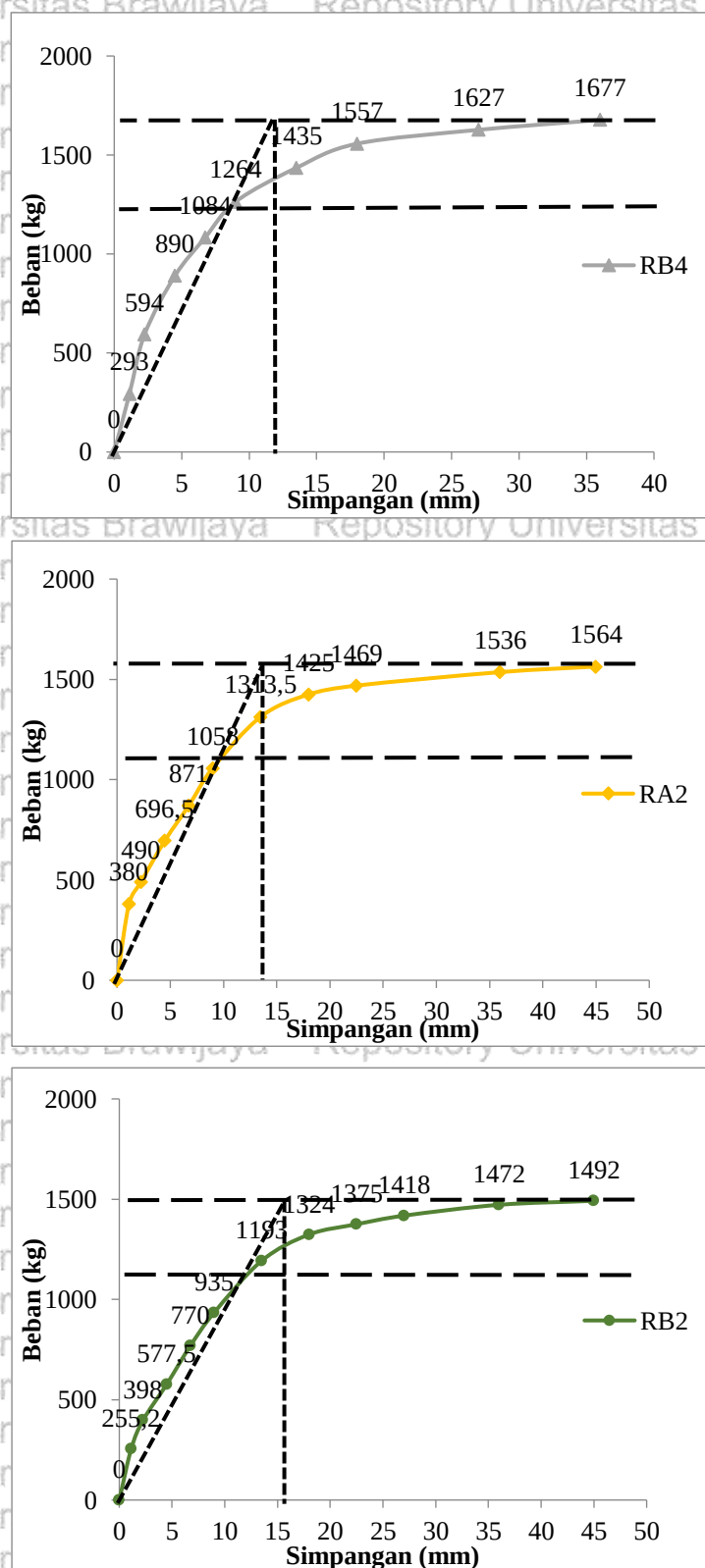
5.2.2.1 Daktilitas disaat P titik ujung

Tabel 5.13 Nilai Daktilitas Secant *retrofitting* titik ujung

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
RA4	1806,00	45,00	12,67	3,55
RB4	1677,00	36,00	11,94	3,01
RA2	1564,00	45,00	13,30	3,38
RB2	1492,00	45,00	16,88	2,67



Gambar 5.17 Kurva daktilitas secant RA4 *retrofitting* titik ujung

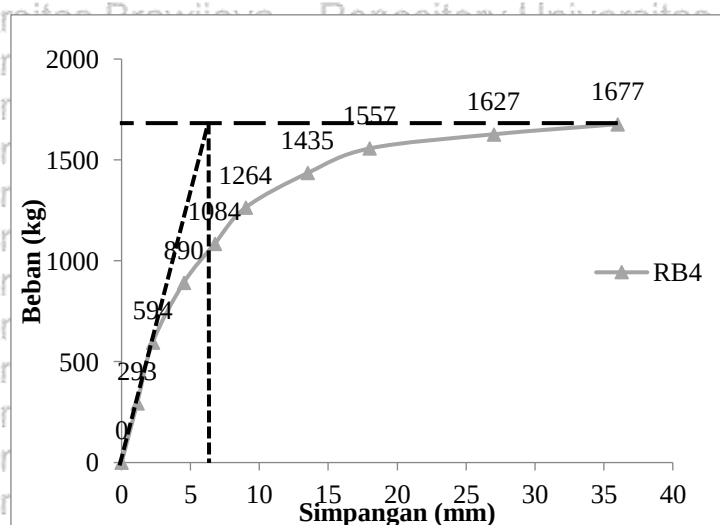
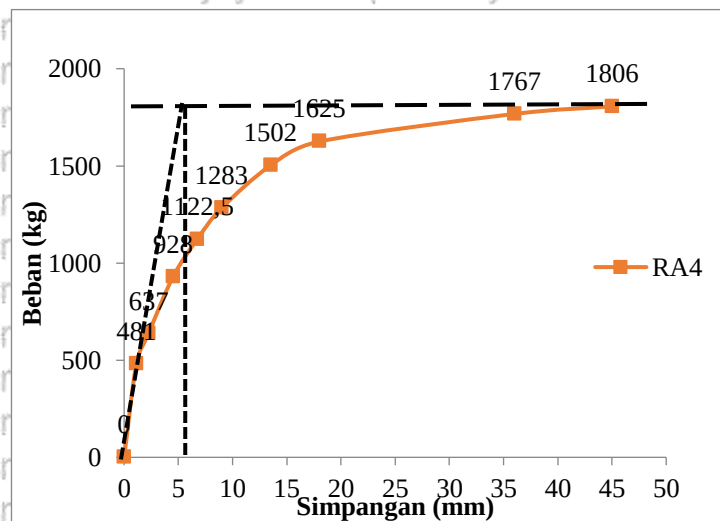


Gambar 5.18 Kurva daktilitas secant RB4, RA2 dan RB2 retrofitting titik ujung

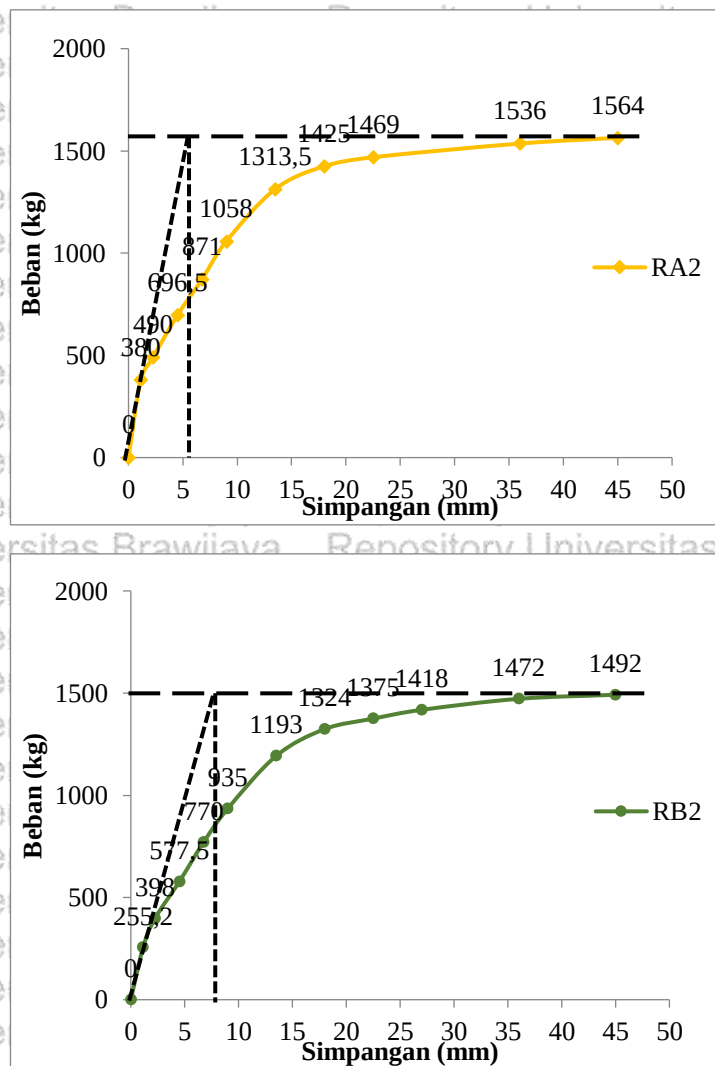
Berdasarkan hasil uji daktilitas dengan metode secant, hasil yang ditunjukkan untuk nilai benda uji yang diperkuat *steel plate* + CFRP *sheet* dengan jumlah 4 (RA4) dan 2 (RB2) buah angkur memiliki nilai daktilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkuatan yang menggunakan bahan CFRP *plate* + CFRP *sheet* dengan Id benda uji RB4 dan RB2.

Tabel 5.14 Nilai Daktilitas Tangensial *retrofitting* titik ujung

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
RA4	1806,00	45,00	5,30	8,18
RB4	1677,00	36,00	6,10	5,90
RA2	1564,00	45,00	5,45	8,26
RB2	1492,00	45,00	7,60	5,92



Gambar 5.19 Kurva daktilitas tangensial RA4 dan RB4 *retrofitting* titik ujung



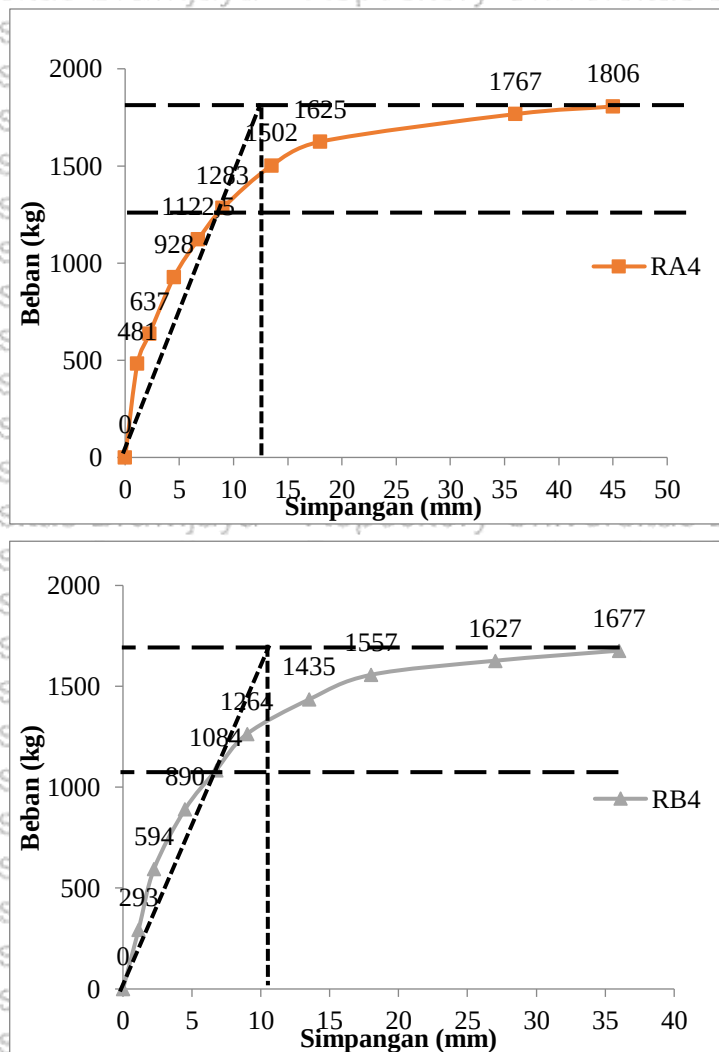
Gambar 5.20 Kurva daktilitas tangensial RA2 dan RB2 *retrofitting* titik ujung

Hampir berbanding sama dengan metode secant, hasil yang didapatkan dengan metode tangensial memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasilnya. Namun, nilai untuk daktilitas *retrofitting* memiliki keserasian dengan hasil yang ditunjukkan dengan metode secant, yaitu untuk nilai RA4 dan RA2 dengan perkuatan *steel plate* + CFRP sheet memiliki nilai daktilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan nilai daktilitas RB4 dan RB2.

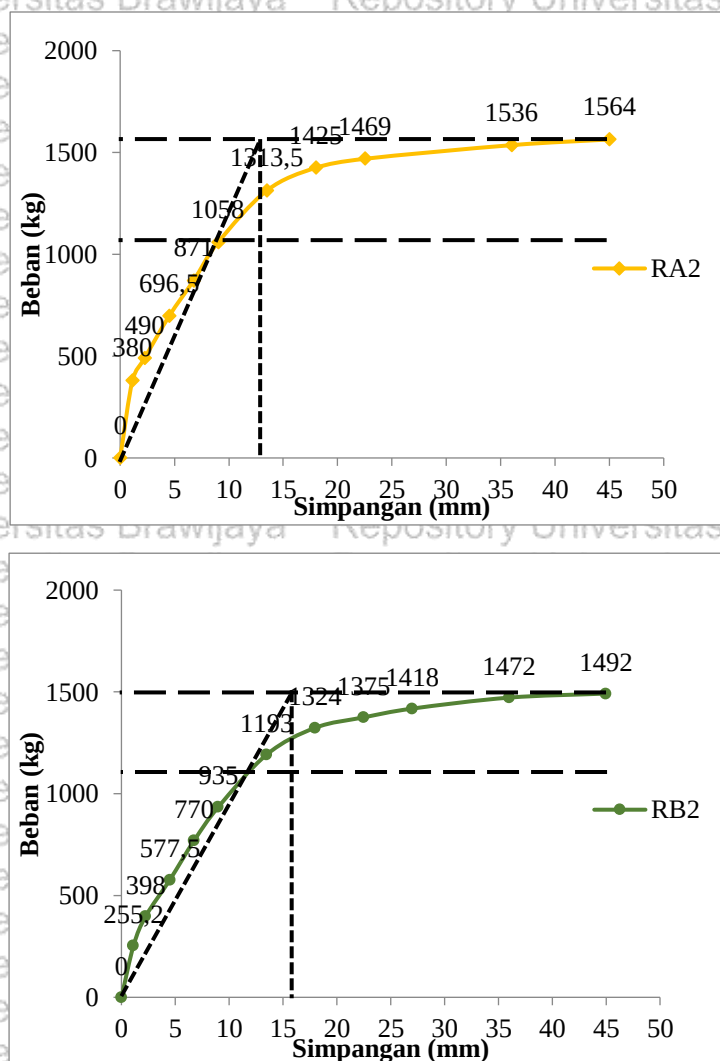
5.2.2.2 Daktilitas disaat P lengkungan pertama

Tabel 5.15 Nilai Daktilitas Secant *retrofitting* lengkungan pertama

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
RA4	1625,00	18,00	12,67	1,42
RB4	1435,00	13,50	11,94	1,13
RA2	1425,00	18,00	13,30	1,35
RB2	1324,00	18,00	16,88	1,07



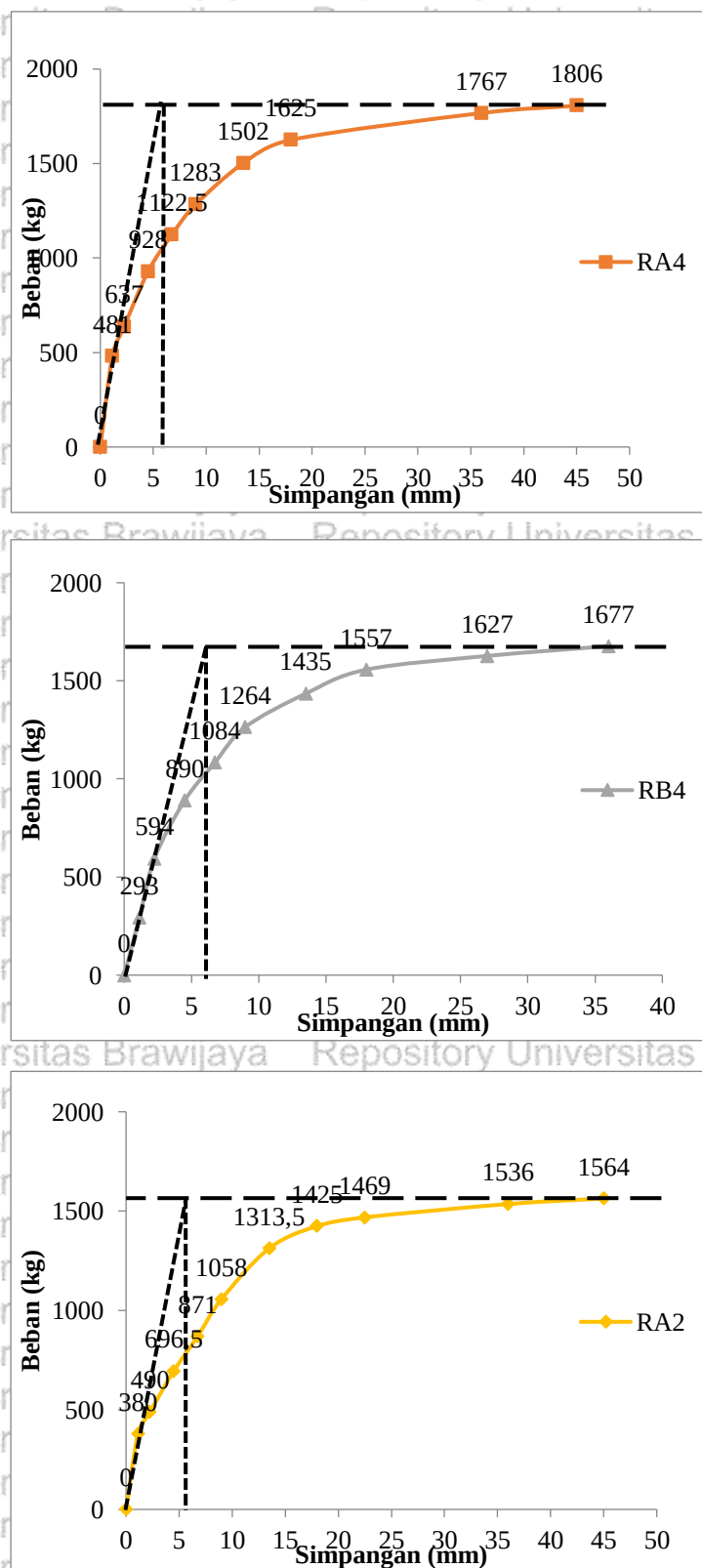
Gambar 5.21 Kurva daktilitas secant RA4 dan RB4 *retrofitting* lengkungan pertama



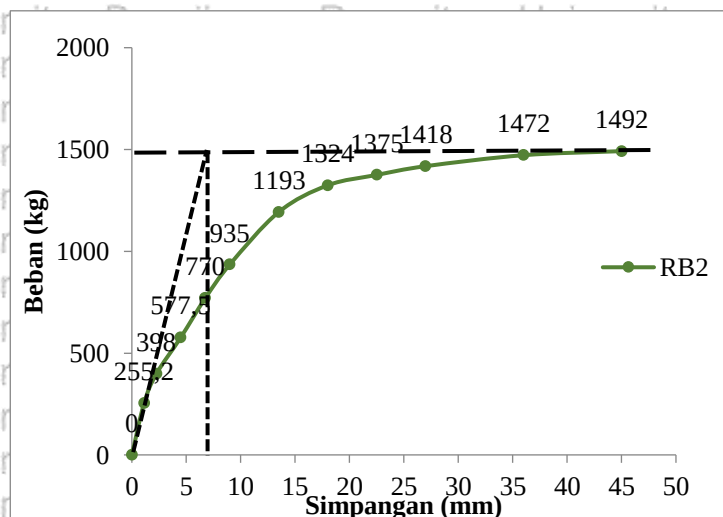
Gambar 5.22 Kurva daktilitas tangensial RA2 dan RB2 *retrofitting* lengkungan pertama

Tabel 5.16 Nilai Daktilitas Tangensial *retrofitting* lengkungan pertama

Benda Uji	Pu (kg)	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)
RA4	1625,00	18,00	4,30	4,19
RB4	1435,00	13,50	6,10	2,21
RA2	1425,00	18,00	4,10	4,39
RB2	1324,00	18,00	7,60	2,37



Gambar 5.23 Kurva daktilitas secant RA4, RB4 dan RA2 retrofitting lengkungan pertama

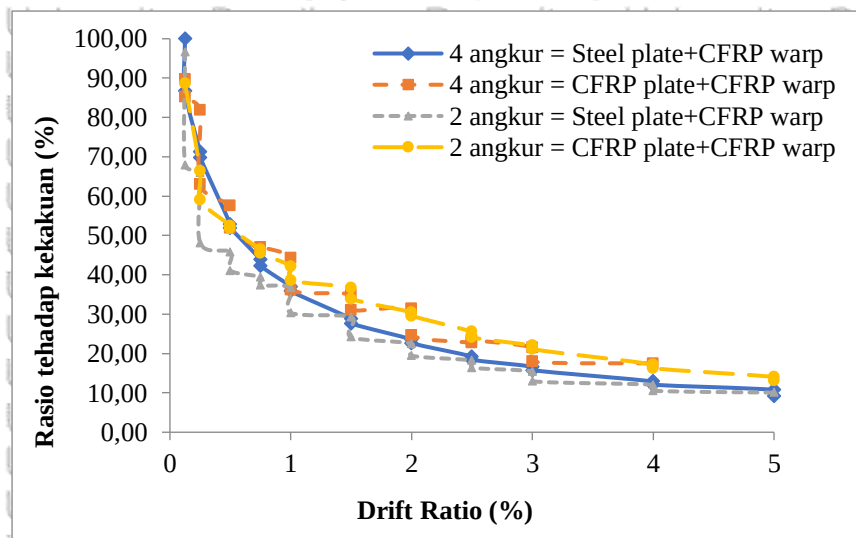


Gambar 5.24 Kurva daktilitas secant RB2 *retrofitting* lengkungan pertama

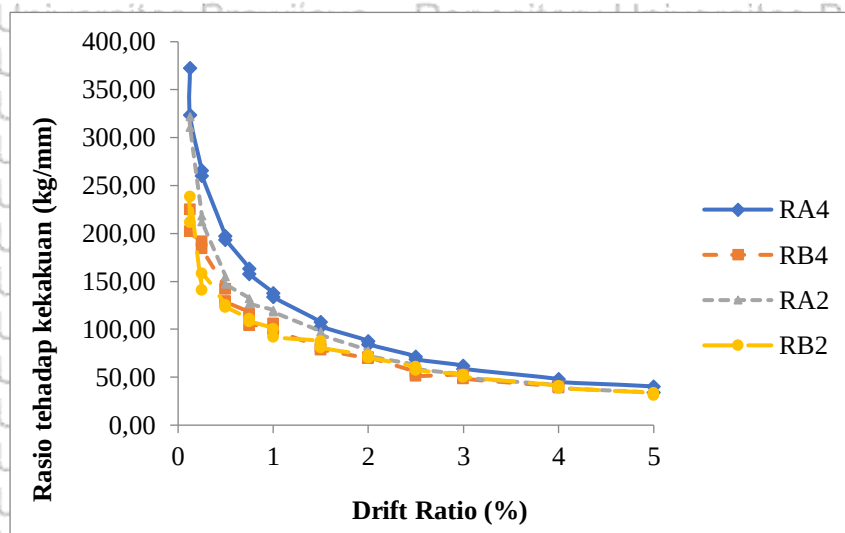
Tidak berbeda dengan hasil yang diperoleh dari analisis daktilitas disaat nilai beban (P) berada diujung, nilai daktilitas disaat P lengkungan awal juga memiliki hasil yang hampir sama. Kesamaan yang dimiliki secara keseluruhan pendekatan titik leleh dengan metode tangensial memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan metode secant, begitupun dengan perkuatan yang menggunakan bahan tambah *steel plate* + CFRP *sheet* dengan ID benda uji RA4 dan RA2 memiliki nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan CFRP *plate* + CFRP *sheet*, tidak terkecuali dalam metode secant dan metode tangensial.

5.2.3 Analisa kekakuan *retrofitting*

Analisa hasil kekakuan benda uji dapat dihitung menggunakan metode kekakuan *secant* yang telah dijelaskan sebelumnya dalam pembahasan studi literatur, hasil dari kekakuan dicantumkan dalam lampiran hasil pengujian. Tidak berbeda dengan perhitungan nilai yang lainnya, perhitungan kekakuan juga diambilkan dari data yang diplotkan dalam kurva *backbone*. Hasil perhitungan yang telah dianalisa dengan menggunakan kekakuan *secant* dapat dilihat dalam tampilan gambar berikut:



Gambar 5.25 Kurva kekakuan benda uji *retrofit* (%)



Gambar 5.26 Kurva kekakuan benda uji *retrofit* (kg/mm)

Dilihat dari kurva kekakuan diatas dapat disimpulkan dengan nilai pengujian sebelumnya, dimana perkuatan dengan penambahan *steel plate* memiliki nilai kekakuan yang cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkuatan dengan menggunakan *CFRP plate*, hasil dari kurva diatas benda uji RA4 (4 angkur: *Steel plate* + *CFRP Sheet*) memiliki nilai kekakuan paling tinggi dengan nilai 372,89 kg/mm dan berturut dengan perkuatan *steel plate* RA2 (2 angkur: *Steel plate* + *CFRP Sheet*) memiliki kekakuan yang hampir mendekati nilai RA4 yaitu 321,78 kg/mm dengan persamaan *drift* yaitu 0,125%. Selanjutnya, benda uji dengan perkuatan *CFRP plate* hampir tidak memiliki perbedaan yang signifikan walaupun dari perbedaan jumlah angkur, dimana nilai kekakuan RB4 (4

angkur: CFRP *Plate* + CFRP *Sheet*) dan RB 2 (2 angkur: CFRP *Plate* + CFRP *Sheet*) dengan nilai kekakuan berturut-turut adalah 225,33 kg/mm dan 211, 56 kg/mm dengan posisi *ratio* berada di nilai 0,125%.

5.3 Perbandingan Hasil Pengujian Eksisting dan *Retrofitting*

Sesuai dengan tujuan penelitian yang dipaparkan dalam BAB 1, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan nilai hasil dari penelitian antara benda uji sebelum perkuatan (*retrofit*) dan setelah dilakukan perkuatan bahan-bahan yang juga telah dibahas sebelumnya. Dari data hasil yang dibahas diatas, dibuatlah suatu perbandingan yang meliputi kapasitas maksimum sambungan balok kolom sebelum dan setelah diperkuat, perilaku sambungan balok kolom yang meliputi nilai daktilitas dan nilai kekakuan sambungan kering balok kolom sebelum dan setelah dilakukan perkuatan. Berikut ini merupakan hasil dari perbandingan hasil antara benda uji eksisting dan benda uji yang telah di perkuat dengan CFRP.

5.3.1 Perbandingan kapasitas maksimum eksperimental dan teoritis

Peninjauan hasil perbandingan secara eksperimental dan secara teoritis dalam pengujian ini dilakukan untuk memverifikasi hasil yang didapatkan dari benda uji eksistinda dan juga *retrofitting* dalam proses penelitian yang berlangsung. Adapun rangkuman dari hasil penelitian tersebut dapat dilihat dalam tabel berikut :

Tabel 5.17 Ringkasan Perbandingan hasil Teoritis dan Eksperimental

	Benda Uji	Eksperimental		Teoritis	
Eksisting	A4-1	1,48	Ton	3,11	Ton
	A4-2	1,47	Ton	3,11	Ton
	A2-1	1,23	Ton	2,84	Ton
	A2-2	1,26	Ton	2,84	Ton
Retrofitting	RA4	1,81	Ton	2,88	Ton
	RA2	1,56	Ton	2,95	Ton
	RB4	1,67	Ton	2,79	Ton
	RB2	1,49	Ton	2,88	Ton

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa hasil secara eksperimental memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan hasil secara teoritis. Dari hasil eksisting dan *retrofitting* yang memiliki nilai teoritis yang lebih besar disebabkan karena:

- a. Dalam perencanaan terotitis perhitungan balok didasarkan dengan perhitungan rencana beton monolit yang digabungkan dengan menambahkan jumlah angkur yang telah direncanakan.
- b. Dalam perencanaannya nilai kapasitas baja dan angkur diasumsikan dalam keadaan leleh, namun bisa jadi disaat uji eksperimental keadaan angkur belum mengalami leleh dan hanya tulangan utama saja. Sehingga kegagalan struktur yang terjadi disaat eksperimen didominasi dengan kegagalan lentur.
- c. Dalam hasil teoritis *retrofitting* perencanaan lentur yang diatur dalam ACI 440.2r-08 hanya memperhitungkan perkuatan dengan menggunakan bahan CFRP *plate* dan *steel plate*. Sehingga dapat dilihat dalam tabel benda uji dengan 4 buah angkur untuk kuat lenturnya tidak mampu lebih besar jika dibandingkan dengan benda uji eksisting, namun berbeda dengan perkuatan lentur untuk benda uji 2 angkur. Sedangkan disaat eksperimen perkuatan yang digunakan menggabungkan anatara *plate* dan CFRP *sheet*.

5.3.2 Perbandingan kapasitas maksimum

Berdasarkan hasil pengujian yang digambarkan dan dijabarkan dalam bentuk kurva histeresis dan tabel hasil, maka dibuatlah perbandingan nilai kapasitas maksimum yang digunakan untuk menyimpulkan hasil dari benda uji eksisting dan benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP. Berikut hasil perbandingan nilai yang dirangkum sebagaimana berikut:

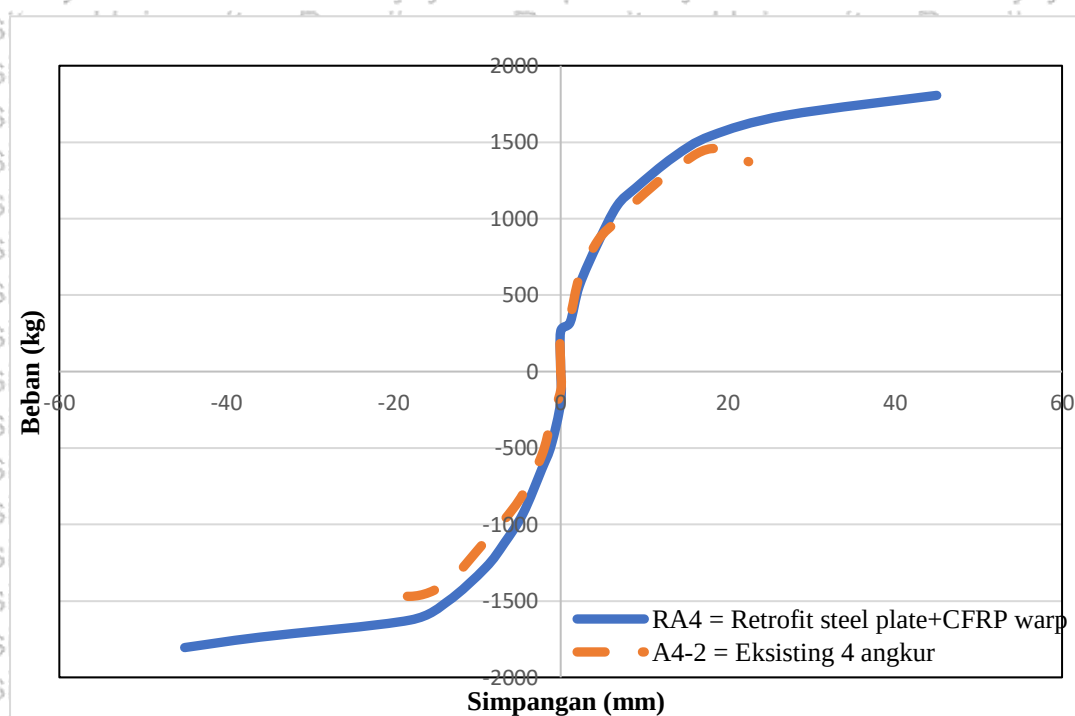
- a. Benda Uji A4-2 dan RA4 (4 angkur = *Steel plate* + CFRP *Sheet*)

Tabel 5.18 Pebandingan Nilai Kapasitas Maksimum A4-2 Dan RA4

Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)	Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
A4-2	0,00	0,00	RA4	0,00	0,00
	0,00	261,00		0,00	264,00
	1,13	362,00		1,13	322,00
	2,25	619,00		2,25	564,00
	4,50	861,00		4,50	846,00
	6,75	987,00		6,75	1084,00
	9,00	1115,00		9,00	1202,00
	13,50	1321,00		13,50	1402,00
	18,00	1457,50		18,00	1542,00
	22,50	1372,00		27,00	1676,00
				45,00	1806,00

Tabel 5.18 Pebandingan Nilai Kapasitas Maksimum A4-2 Dan RA4 (lanjutan)

Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)	Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
A4-2	0,00	0,00	RA4	0,00	0,00
	0,00	125,00		0,00	201,00
	1,13	324,00		1,13	481,00
	2,25	546,00		2,25	637,00
	4,50	800,00		4,50	928,00
	6,75	970,00		6,75	1122,50
	9,00	1108,00		9,00	1283,00
	13,50	1376,00		13,50	1502,00
	18,00	1470,00		18,00	1625,00
	22,50	1388,00		27,00	1737,00
				45,00	1805,00

**Gambar 5.27** Perbandingan kurva histeresis RA4 dan A4-2

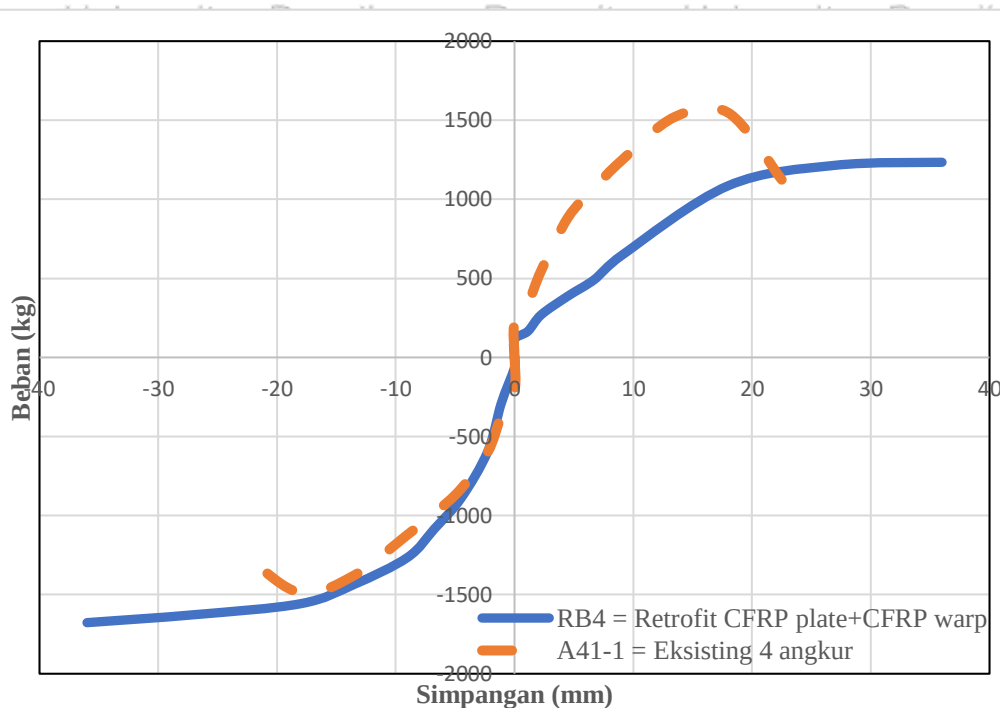
Dari tabel hasil pengujian yang ditampilkan diatas, dapat disimpulkan perbandingan benda uji eksisting A4-2 dan benda uji RA4 perkuatan sambungan menunjukkan, benda uji yang telah diperkuat menggunakan bahan *steel plate*+*CFRP sheet* mampu mengembalikan dan meningkatkan kapasitas maksimum benda uji eksisting. Dimana, nilai awal kapasitas maksimum benda uji

menunjukkan nilai tekan sebesar 1457,5 dan tarik 1470 kemudian meningkat setelah diperkuat dengan CFRP hingga melebihi kapasitas maksimum awal, dimana nilai tekan sebesar 1806 dan tarik 1805, memiliki prosentase kenaikan sebesar 22,86%.

b. Benda Uji A4-1 dan RB4 (4 angkur = CFRP Plate + CFRP Sheet)

Tabel 5.19 Pebandingan Nilai Kapasitas Maksimum A4-1 Dan RB4

Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)	Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
	0,00	0,00		0,00	0,00
	0,00	218,00		0,00	114,00
	1,13	340,00		1,13	166,00
	2,25	550,00		2,25	270,00
A4-1	4,50	884,50	RB4	4,50	388,00
	6,75	1073,50		6,75	494,00
	9,00	1244,50		9,00	644,00
	18,00	1521,00		18,00	1086,00
	22,50	1124,00		27,00	1215,00
				36,00	1234,00
Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)	Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
	0,00	0,00		0,00	0,00
	0,00	212,00		0,00	64,50
	1,13	372,00		1,13	293,00
	2,25	598,00		2,25	594,00
A4-1	4,50	830,00	RB4	4,50	890,00
	6,75	986,00		6,75	1084,00
	9,00	1120,00		9,00	1264,00
	13,50	1378,00		13,50	1435,00
	18,00	1488,00		18,00	1557,00
	22,50	1270,00		27,00	1627,00
				36,00	1677,00



Gambar 5.28 Perbandingan kurva histeresis RB4 dan A4-1

Tidak jauh berbeda dengan benda uji RA4 dan A4-2, benda uji RB4 dan A4-1 juga mampu mengembalikan dan meningkatkan nilai kapasitas maksimum. Namun, untuk nilai tekan RB4 tidak mampu menyerupai dengan hasil-hasil kapasitas maksimum yang dihasilkan oleh benda uji lainnya, dimana nilai tekan untuk benda uji RB4 tidak mampu mengembalikan kekuatan benda uji eksisting, permasalahan berikut dapat dilihat dalam gambar kurva 5.28. Hal ini terjadi dikarenakan kurang nya pengontrolan bahan secara menyeluruh sebelum dilakukan perkuatan, seperti yang terlihat untuk nilai tekan benda uji yang telah diperkuat menunjukkan nilai 1234,00 lebih kecil daripada nilai tekan benda uji eksisting dengan nilai 1521,00. Namun berbeda untuk nilai tariknya, yang justru mengalami peningkatan dari benda uji eksisting hal ini dapat dilihat dalam tabel 5.17, dimana nilai tarik berturut-turut untuk benda uji eksisting adalah 1488 dan setelah diperkuat menjadi 1677, meningkat sebesar 12,70% prosentase kenaikan. Hal yang sama juga terjadi dalam nilai *drift ratio* benda uji, yang mencapai simpangan hingga 45 mm dalam *drift ratio* 5%.

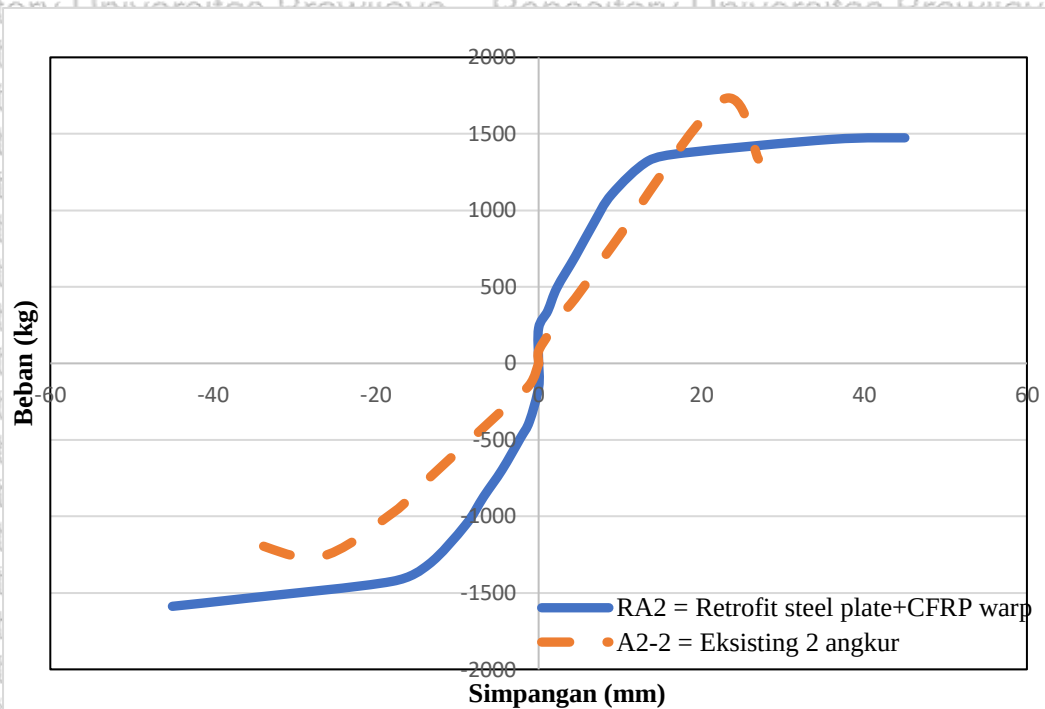
c. Benda Uji A2-1,A2-2 dan RA2, RB2 (Benda uji 2 ankur)

Tabel 5.20 Nilai Kapasitas Maksimum A2-1,A2-2 Dan RA2,RB2

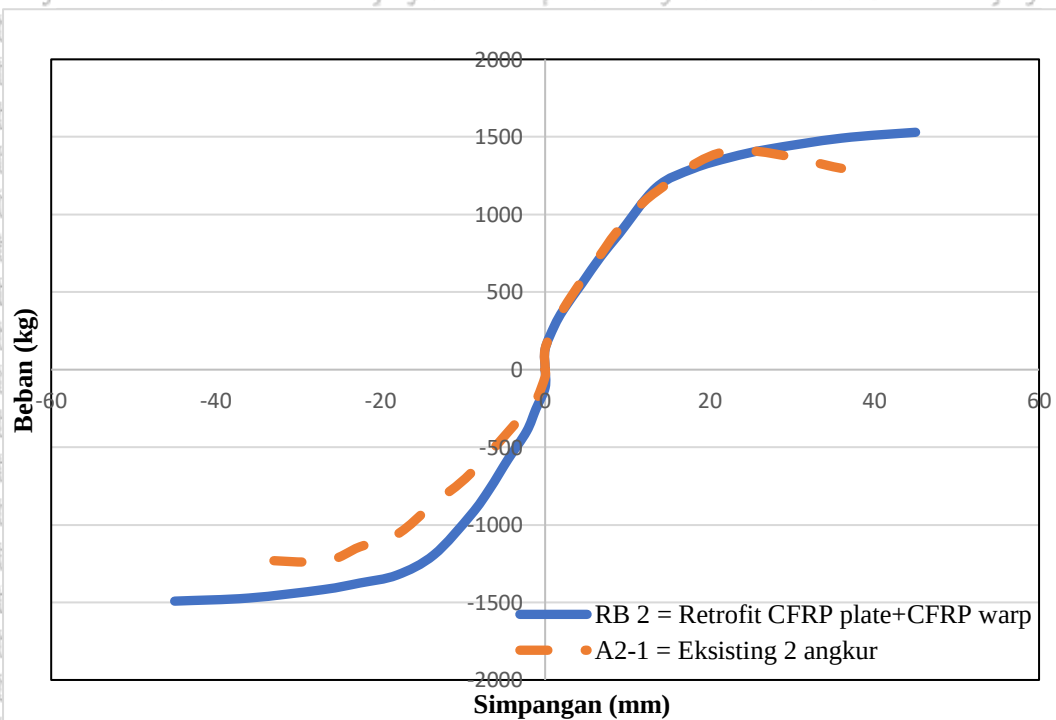
Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)	Benda Uji	Simpangan (+)	Beban (+)
A2-1	0,00	0,00	RB2	0,00	0,00
	0,00	135,50		0,00	132,00
	1,13	276,00		1,13	282,00
	2,25	395,00		2,25	388,00
	4,50	577,00		4,50	558,00
	6,75	743,00		6,75	728,00
	9,00	905,50		9,00	876,00
	13,50	1146,50		13,50	1174,00
	22,50	1411,50		18,00	1296,00
A2-2	36,00	1297,50	RA2	22,50	1368,00
				27,00	1420,00
				36,00	1492,00
				45,00	1530,00
	0,00	0,00		0,00	0,00
	0,00	81,00		0,00	230,00
	1,13	183,00		1,13	344,00
	2,25	282,00		2,25	494,00
	4,50	424,50		4,50	698,00
A2-2	6,75	592,00	RA2	6,75	914,00
	9,00	763,50		9,00	1106,00
	22,50	1720,50		13,50	1324,00
	27,00	1335,50		18,00	1376,00
				36,00	1464,00
				45,00	1474,00

Tabel 5.20 Nilai Kapasitas Maksimum A2-1,A2-2 Dan RA2,RB2 (Lanjutan)

Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)	Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
	0,00	0,00		0,00	0,00
	0,00	46,00		0,00	116,00
	1,13	202,00		1,13	255,20
	2,25	266,00		2,25	398,00
	9,00	666,00		4,50	577,50
	13,50	862,00		6,75	770,00
A2-1	18,00	1062,00	RB2	9,00	935,00
	22,50	1142,00		13,50	1193,00
	27,00	1236,00		18,00	1324,00
	36,00	1224,00		22,50	1375,00
				27,00	1418,00
				36,00	1472,00
				45,00	1492,00
Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)	Benda Uji	Simpangan (-)	Beban (-)
	0,00	0,00		0,00	0,00
	1,13	142,00		0,00	158,00
	4,50	308,00		1,13	380,00
	13,50	752,00		2,25	490,00
	18,00	980,00		4,50	696,50
A2-2	27,00	1266,00	RA2	6,75	871,00
	36,00	1160,00		9,00	1058,00
				13,50	1313,50
				18,00	1425,00
				36,00	1536,00
				45,00	1588,00



Gambar 5.29 Perbandingan kurva histeresis RB2 dan A2-1



Gambar 5.30 Perbandingan kurva histeresis RA2 dan A2-2

Memiliki kesamaan metode yang digunakan untuk perkuatan benda uji eksisting 4 angkur, Benda uji eksisting dengan jumlah 2 buah angkur juga mengalami peningkatan kapasitas maksimum setelah dilakukan perkuatan

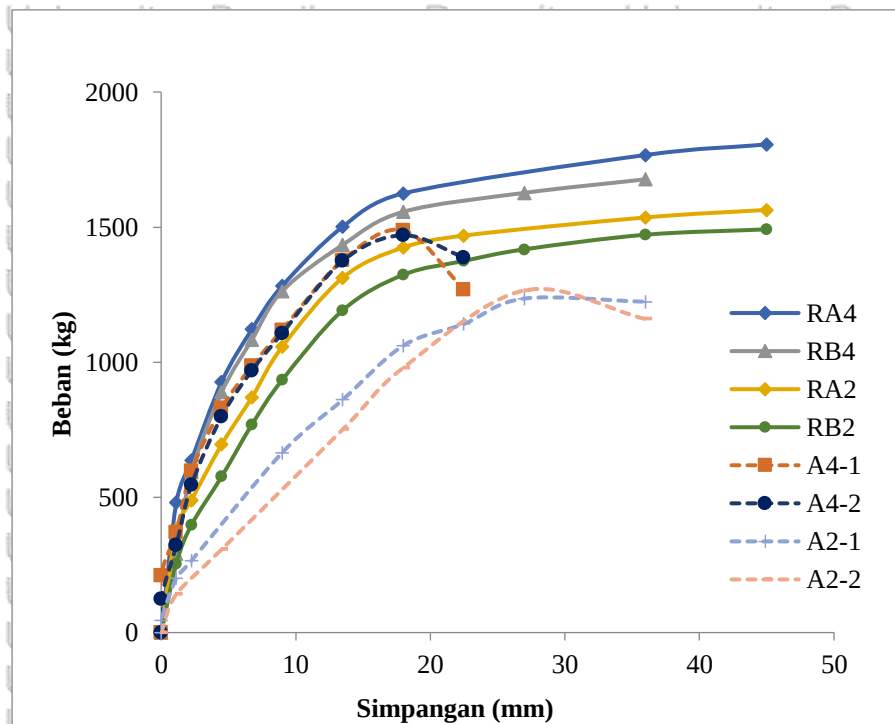
menggunakan bahan CFRP. Hasil perbandingan pengujian yang dilakukan pada benda uji RB2 dan A2-1, pada kondisi tekan dan tarik berturut-turut sebelum benda uji diperkuat mampu menerima beban maksimum sebesar 1411,5 kg dan 1236 kg berada pada simpangan 22,5 mm dan 27 mm, sedangkan benda uji yang telah diperkuat hasil tekan dan tarik berturut-turut adalah 1530 kg dan 1492 kg, dan masing-masing berada pada simpangan 45 mm, tepatnya pada drift 5%.

Sedangkan untuk benda uji RA2 dan A2-2, benda uji sebelum benda uji diperkuat mampu menerima beban tekan dan tarik berturut-turut sebesar 1720,5 kg dan 1266 kg, serta masing-masing berada dalam simpangan yang sama yaitu 22,5 mm dan 27 mm. Sedangkan untuk benda uji yang telah diperkuat nilai tekan dan tarik berturut-turut adalah 1474 kg dan 1588 kg, dan berada di simpangan sama yaitu 45 mm dalam *drift* 5%.

Seperti yang dibahas sebelumnya bahwa keseluruhan nilai dari benda uji yang telah diperkuat dengan bahan CFRP belum mencapai batas maksimumnya, sehingga kapasitas maksimum masih dapat bertambah begitu juga dengan tingkatan *drift-ratio* nya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa keseluruhan benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP mampu mengembalikan dan menambahkan kapasitas beban yang diterima benda uji. Hal ini juga sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Mahmoud. Et al. (2014) Pada umumnya pemakaian CFRP sebagai bahan penguat dapat meningkatkan nilai kapasitas maksimum jika dibandingkan dengan benda uji yang tidak diperkuat. Hasil ini dapat dirangkumkan dalam bentuk tabel sebagaimana berikut:

Tabel 5.22 Rangkuman perbandingan nilai kapasitas maksimum

Benda Uji						
Benda Uji Eksisting			Benda Uji Retrofit			Prosentase kenaikan (%)
ID	Pu (kg)	Py (kg)	ID	Pu (kg)	Py (kg)	
M1	1136,00	852,00	-	-	-	-
A4-2	1470,00	1102,50	RA4	1806,00	1354,50	22,86
A4-1	1488,00	1116,00	RB4	1677,00	1257,75	12,70
A2-2	1266,00	949,50	RA2	1564,00	1173,00	23,54
A2-1	1236,00	927,00	RB2	1492,00	1119,00	20,71



Gambar 5.31 Kurva *backbone* perbandingan sebelum dan sesudah *retrofitting*

5.3.3 Perbandingan nilai daktilitas

Setelah didapatkan nilai daktilitas yang dilakukan dengan metode-metode yang dibahas sebelumnya, dalam pembahasan perbandingan nilai daktilitas yang akan dibahas hanya membandingkan nilai daktilitas benda uji eksisting saat P berada di puncak (*peak*) dan nilai daktilitas *retrofitting* saat P berada di ujung. Perbandingan ini didasarkan atas permasalahan yang dijelaskan sebelumnya bahwa pengujian benda uji perkuatan yang telah dilakukan tidak mencapai kapasitas *ultimate* atau titik runtuh benda uji, sehingga nilai puncak (*peak*) diambil dari nilai kapasitas maksimum disaat pengujian diberhentikan. Jadi nilai dari daktilitas *retrofitting* dalam pengujian ini tidak dapat dijadikan penilaian akhir dikarenakan disaat akhir pemberhentian pengujian beban belum mengalami penurunan atau disimpulkan kondisi beton masih mampu memberikan kapasitas layan beban. Berikut tabel perbandingan nilai daktilitas dengan metode secant dan tangesial dari benda uji eksisting dan *retrofitting*:

Tabel 5.23 Rangkuman Nilai Daktilitas Secant Eksisting dan *Retrofitting*

Metode Secant								
Benda Uji Eksisting				Benda Uji Retrofit				Prosentase Kenaikan %
Benda Uji	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)	Benda Uji	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)	
M1	18,00	11,97	1,50	-	-	-	-	-
A4-1	18,00	11,96	1,51	RB4	36,00	11,94	3,01	100,28
A4-2	18,00	11,94	1,51	RA4	45,00	12,67	3,55	135,63
A2-1	27,00	20,95	1,29	RB2	45,00	16,88	2,67	106,80
A2-2	27,00	23,25	1,16	RA2	45,00	13,30	3,38	191,30

Tabel 5.24 Rangkuman Nilai Daktilitas Tangensial Eksisting dan *Retrofitting*

Metode Tangensial								
Benda Uji Eksisting				Benda Uji Retrofit				Prosentase Kenaikan %
Benda Uji	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)	Benda Uji	Δu (mm)	Δy (mm)	Daktilitas (μ)	
M1	18,00	4,00	4,50	-	-	-	-	-
A4-1	18,00	4,90	3,67	RB4	36,00	6,10	5,90	60,66
A4-2	18,00	5,20	3,46	RA4	45,00	5,50	8,26	138,62
A2-1	27,00	6,20	4,35	RB2	45,00	7,60	5,92	35,96
A2-2	27,00	9,00	3,00	RA2	45,00	5,45	8,18	172,67

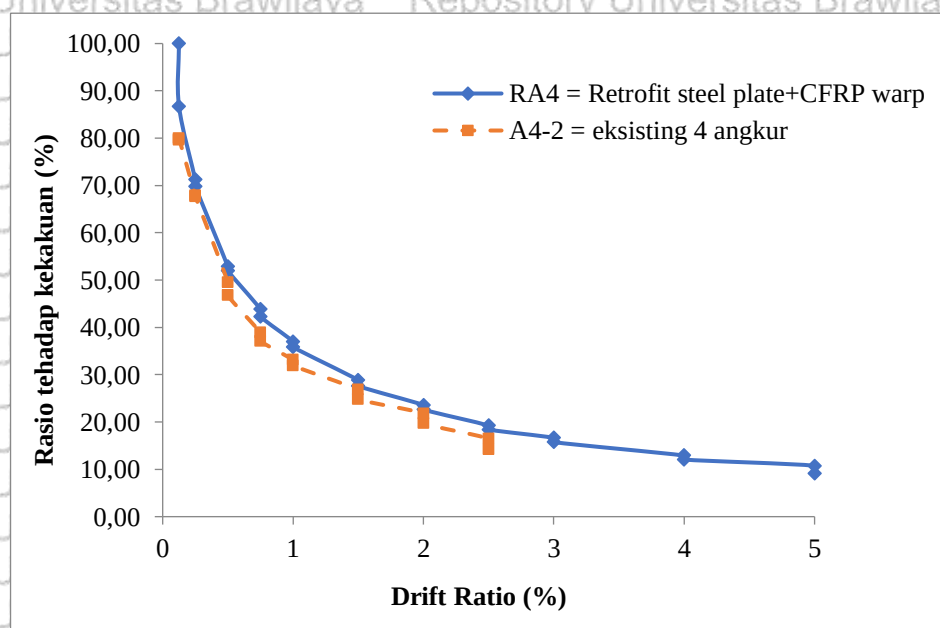
Dari tabel perbandingan yang ditampilkan diatas, dapat disimpulkan setelah dilakukan perkuatan dengan menggunakan CFRP yang ditambahkan *steel plate* dan CFRP *plate* untuk metode secant dengan nilai beban berada dipuncak (*peak*), mampu memberikan nilai daktilitas yang lebih besar dua kali lipat dari nilai daktilitas awal benda uji eksisting. Namun, untuk nilai daktilitas dengan metode tangensial, benda uji perkuatan dengan menambahkan CFRP *plate* memiliki nilai prosentase kenaikan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan perkuatan dengan menambahkan *steel plate*. Sehingga dapat disimpulkan untuk nilai daktilitas dengan benda uji yang diperkuat dengan menambahkan *steel plate* 5x50 memiliki nilai daktilitas yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai daktilitas dengan benda uji yang diperkuat dengan menambahkan CFRP *plate*, tidak terkecuali untuk metode secant maupun metode tangensial.

5.3.4 Perbandingan nilai kekauan

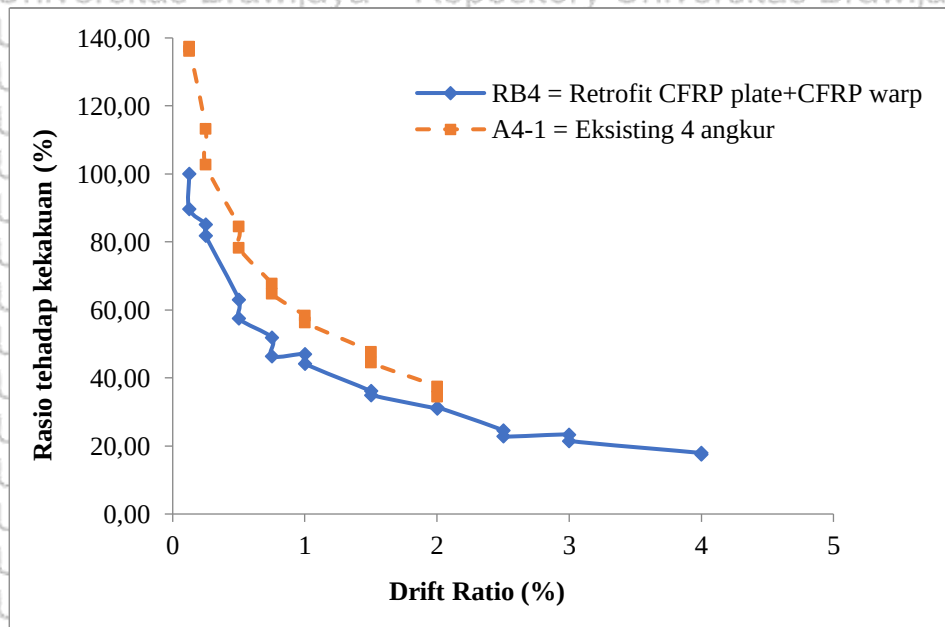
Nilai kekauan merupakan salah satu faktor bagian terpenting dalam merencanakan suatu struktur yang mana diantaranya juga termasuk daktilitas dan kekuatan (Nurlina, 2016), berdasarkan kurva yang telah dirangkum diatas, membandingkan nilai kekakuan benda uji eksisting dengan benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP juga menjadi salah satu tujuan dalam penelitian ini. Berikut rangkuman tabel prosentase kenaikan nilai kekakuan dan tampilan kurva perbandingan nilai kekakuan antara benda uji eksisting dengan benda uji yang telah diperkuat, adapun untuk detail hasil kekakuan dapat dilihat dalam lampiran hasil pengujian :

Tabel 5.25 Rangkuman Nilai Kekakuan Awal dan Akhir

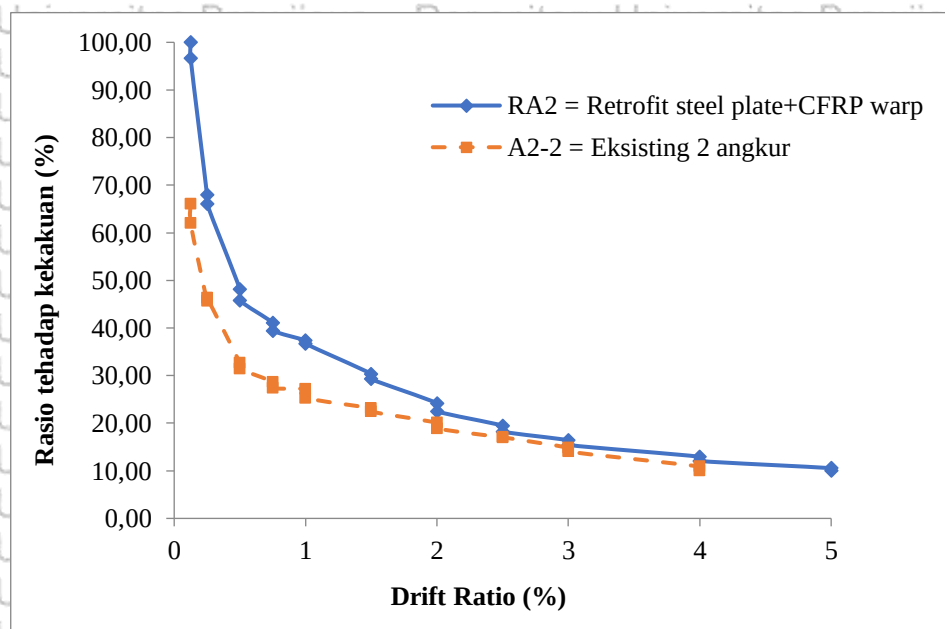
Benda Uji	Kekakuan awal (eksisting) kg/mm	Kekakuan akhir (retrofit) kg/mm	prosentase kenaikan %
A4-2 - RA4	296,89	372,89	25,60
A4-1 - RB4	306,67	225,33	-26,52
A2-2 - RA2	144,44	212,44	47,08
A2-1 - RB2	144,44	238,76	65,29



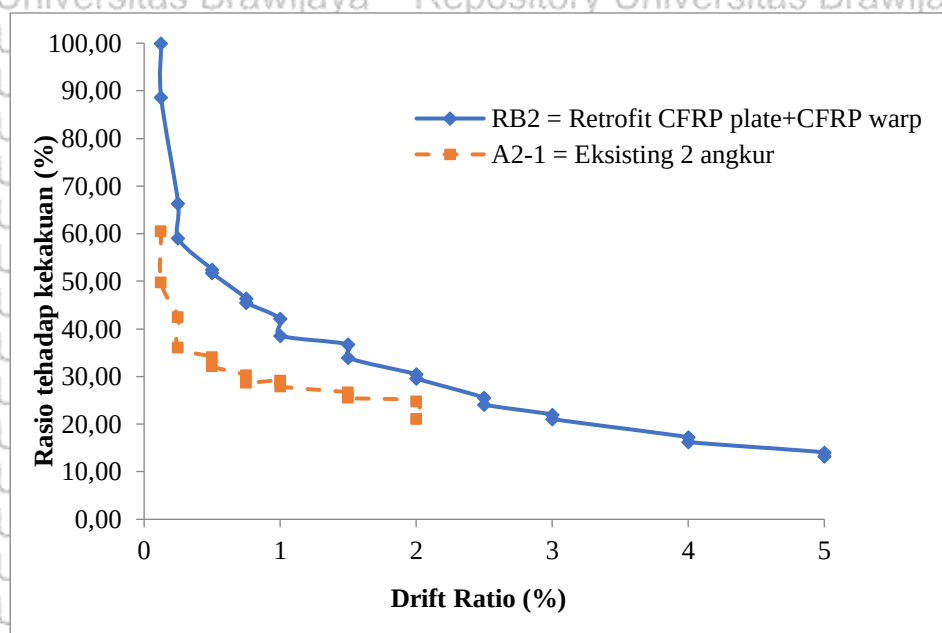
Gambar 5.32 Perbandingan nilai kekakuan RA4 dan A4-2



Gambar 5.33 Perbandingan nilai kekakaun RB4 dan A4-1



Gambar 5.34 Perbandingan nilai kekakaun RA2 dan A2-2



Gambar 5.35 Perbandingan nilai kekakuan RB2 dan A2-2

Dari beberapa kurva hasil perbandingan nilai kekakuan diatas menunjukkan adanya peningkatan nilai kekakuan akhir benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP. Dimulai dengan benda uji A4-2 yang memiliki nilai kekakuan awal sebesar 296,89 kg/mm kemudian diperkuat menjadi benda uji RA4 dan memiliki peningkatan nilai menjadi 372,89 kg/mm yang masing-masing berada dalam drift 0,125 % mengalami kenaikan sebesar 25,60 %. Berbeda dengan benda uji yang sama-sama menggunakan 4 buah angkur hasil perkuatan yang dilakukan terhadap benda uji A4-1 yang mengalami penurunan nilai kekakuan sebesar 26,52, dimana untuk nilai kekakuan awal mencapai nilai 306,67 kg/mm setelah dilakukan perkuatan yang menjadi benda uji RB4 dengan nilai kekakuan akhir 225,33 kg/mm dengan drift yang sama yaitu 0,125%. Hal ini terjadi mungkin, dikarenakan tidak adanya suatu control kapasitas bahan sebelum dilakukan perkuatan.

Sedangkan pada benda uji yang sama dengan 2 buah angkur, benda uji A2-2 memiliki nilai kekakuan awal sebesar 144,44 kg/mm kemudian mengalami peningkatan nilai kekakuan setelah dilakukan perkuatan menjadi benda uji RA2 dengan nilai kekakuan akhir menjadi 212,44 kg/mm dengan prosentase kenaikan sebesar 51,46. Sedangkan, benda uji A2-1 yang memiliki kenaikan 62,29%

dengan nilai kekakuan awal sebesar 144,44 kg/mm, kemudian diperkuat menjadi benda uji RB2 memiliki nilai kekakuan akhir sebesar 238,76 kg/mm, dimana masing-masing nilai kekakuan berada dalam drift yang sama yaitu 0,125%.

Dari keseluruhan benda uji yang telah dilakukan perkuatan dapat disimpulkan bahwa, adanya peningkatan kekakuan yang dialami keseluruhan benda uji kecuali benda uji A4-1 yang diperkuat menjadi RB4 dikarenakan hal yang telah dijelaskan sebelumnya. Pernyataan ini berbeda dengan penelitian yang telah dilakukan oleh (Mulyadi, 2018) dimana untuk penambahan CFRP dapat menurunkan nilai kekakuan awal maupun kekakuan retak. Adapun, secara keseluruhan benda uji yang diperkuat dengan menambahkan pelat memiliki kekakuan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan perkuatan yang menambahkan CFRP *plate*.

5.4 Mekanisme Keruntuhan dan Pola Retak Benda Uji

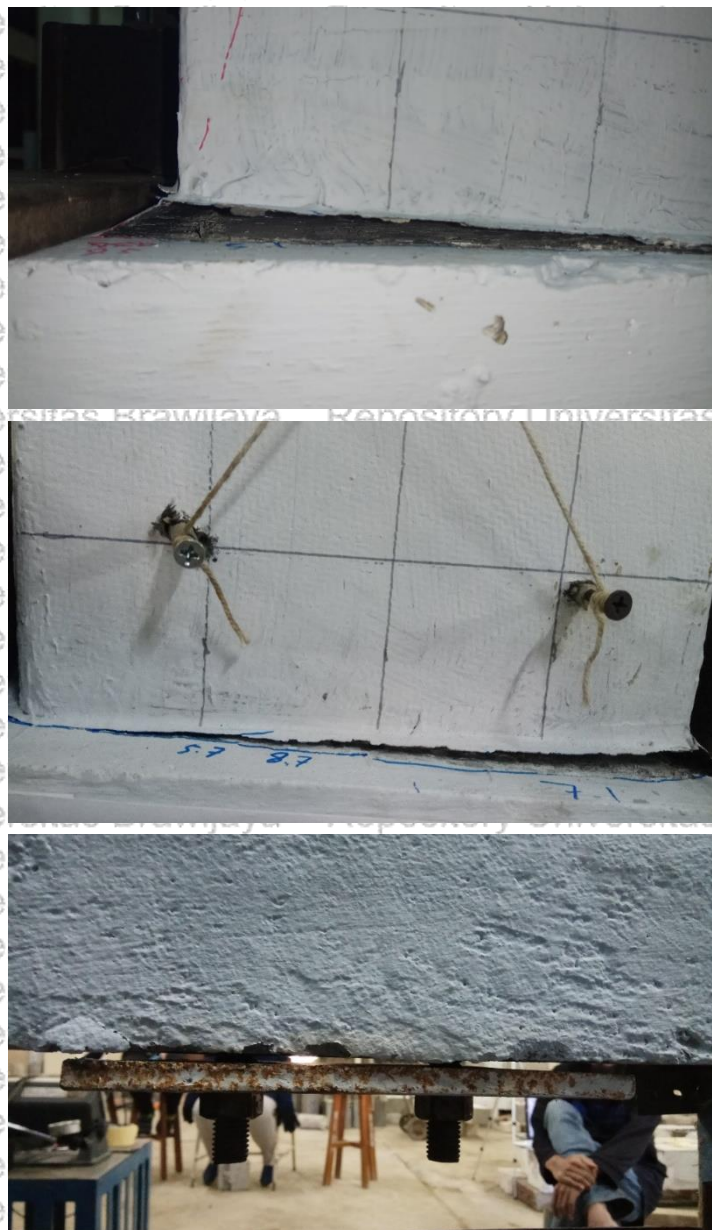
a. Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji 4 buah angkur



Gambar 5.36 Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji

Dari gambar diatas terlihat untuk benda uji dengan 4 angkur yang telah diperkuat dengan CFRP, mengalami suatu retakan balok yang diakibatkan oleh retakan lentur yang terjadi diatas perkuatan lembaran CFRP sheet, pola retakan yang terjadi diatas perkuatan dan adanya pembukaan celah (*gap opening*) yang terjadi di area permukaan sambungan balok kolom dimulai di saat simpangan mencapai 18 mm dan berada dalam siklus 7 disaat *drift* 2%.

b. Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji 2 buah angkur



Gambar 5.37 Mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji

Berbeda dengan benda uji 4 buah angkur mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji dengan 2 buah angkur yang telah diperkuat dengan CFRP, mekanisme keruntuhan benda uji terjadi dikarenakan retakan dan terkelupasnya CFRP sheet yang terjadi diantara permukaan sambungan balok dan kolom. Terjadinya retakan dipermukaan bermula di dalam siklus 5 pengujian didalam *drift* 1% dengan simpangan 9 mm dan terus berlanjut hingga benda uji dihentikan. Disaat memasuki siklus ke 7 pengujian dimana *drift* berada di 2% dan simpangan mencapai 18 mm, CFRP sheet sudah mulai terkelupas dan baut penahan sambungan sudah mulai longgar dikarenakan adanya beban tekan dan tarik secara terus menerus yang diterima benda uji selama pengujian berlangsung.

Sehingga dapat di simpulkan dari keseluruhan pengujian benda uji yang telah diperkuat dengan bahan CFRP, mengalami mekanisme keruntuhan dan pola retak yang terjadi diantara permukaan sambungan balok dan kolom atau terjadinya pembukaan celah (*gap opening*), tak terkecuali benda uji dengan 4 buah angkur maupun 2 buah angkur. Namun, sedikit perbedaan dimana untuk 4 buah angkur retakan lentur juga terjadi diatas perkuatan CFRP Sheet.

BAB VI PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari pengujian dan penelitian yang telah dipaparkan dalam bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan untuk menjawab rumusan masalah seperti berikut ini:

1. Perkuatan struktur sambungan kering balok kolom pracetak dengan menambahkan bahan *Steel plate* dan *CFRP plate* menunjukkan mampu menambah dan mengembalikan nilai kapasitas maksimum benda uji eksisting dengan metode pengujian *quasi*-siklik, untuk benda uji dengan sambungan 4 dan 2 angkur yang diperkuat dengan bahan *Steel plate* + *CFRP sheet* mampu meningkatkan nilai kapasitas maksimum yang lebih besar menjadi 22,86% dan 23,54%, jika dibandingkan dengan benda uji yang diperkuat dengan bahan *CFRP plate* + *CFRP sheet* yang mampu menaikkan nilai kapasitas maksimum sebesar 12,70% untuk sambungan 4 angkur dan 20,71% untuk sambungan 2 angkur.
2. Hasil dari perilaku perkuatan sambungan balok kolom kering pracetak yang meliputi nilai daktilitas, kekakuan dan pola retak disimpulkan seperti berikut ini:
 - a. Metode perkuatan dengan menggunakan CFRP yang ditambahkan *steel plate* dan *CFRP plate* untuk metode secant dengan nilai beban berada dipuncak (*peak*), mampu memberikan nilai daktilitas yang lebih besar dua kali lipat dari nilai daktilitas awal benda uji eksisting. Namun, untuk nilai daktilitas dengan metode tangensial, benda uji perkuatan dengan menambahkan *CFRP plate* memiliki nilai prosentase kenaikan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan perkuatan dengan menambahkan *steel plate*. Namun, dikarenakan pengujian yang telah dilakukan tidak mencapai nilai kontrol dari target kapasitas *ultimate* benda uji, nilai P_u (*peak*) diambil dari nilai kapasitas maksimum disaat pengujian diberhentikan. Sehingga, nilai daktilitas dalam pengujian tidak dapat dijadikan penilaian akhir dikarenakan disaat akhir pemberhentian

pengujian beban belum mengalami penurunan atau disimpulkan kondisi beton masih mampu memberikan kapasitas layan beban.

- b. Dari hasil perkuatan dengan menggunakan metode yang berbeda, secara menyeluruh nilai kekakuan dari semua benda uji mengalami peningkatan kecuali benda uji dengan sambungan 4 angkur yang diperkuat dengan CFRP *plate* + CFRP *sheet* yang mengalami penurunan nilai kekakuan sebesar 26,52%, hal ini mungkin terjadi dikarenakan tidak adanya suatu kontrol kapasitas bahan sebelum dilakukan proses perkuatan. Selain dari itu benda uji eksisting dengan sambungan yang sama dan diperkuat dengan *Steel plate* + CFRP *sheet* memiliki prosentase kenaikan sebesar 25,60%. Sedangkan pada benda uji eksisting dengan 2 buah angkur dengan metode perkuatan yang sama memiliki prosentase kenaikan sebesar 51,46%, dan dengan perkuatan CFRP *plate* + CFRP *sheet* memiliki prosentase kenaikan sebesar 46,46%.

- c. Untuk keseluruhan mekanisme keruntuhan dan pola retak benda uji yang telah diperkuat dengan CFRP *plate*+CFRP *sheet* dan *Steel plate*+CFRP *sheet* , mengalami mekanisme keruntuhan dan pola retak yang terjadi diantara permukaan sambungan balok dan kolom atau disebut *gap opening*, tak terkecuali benda uji dengan 4 buah angkur maupun 2 buah angkur. Namun, sedikit perbedaan dimana untuk 4 buah angkur retakan juga terjadi diatas perkuatan CFRP *Sheet*.

3. Dilihat dari efektifitas perilaku permodelan perkuatan sambungan kering balok kolom pracetak menggunakan bahan CFRP dengan pembebanan *quasi*-siklik, dari keseluruhan hasil yang didapatkan dapat disimpulkan bahwa perkuatan dengan penambahan *plate* baja memiliki sifat yang dominan dari keseluruhan nilai yang diujikan dalam pengujian ini, jika dibandingkan hasilnya dengan perkuatan yang menggunakan bahan CFRP *plate*. Namun, secara keseluruhan hasil yang didapatkan dalam penelitian ini belum mencapai nilai kontrol yang telah ditetapkan sebelumnya, dikarenakan adanya faktor kapasitas kontrol yang tidak mencukupi.

6.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang diharapkan dapat untuk lebih menyempurnakan hasil dari penelitian ini dan dapat digunakan untuk dikembangkan lebih lanjut. Adapun saran tersebut antara lain sebagai berikut:

1. Perlu adanya suatu pertimbangan didalam perkuatan yang ditujukan untuk area sambungan balok kolom dan juga pertimbangan untuk pemasangan perkuatan sambungan kering di area baut dan angkur agar tidak terjadi *pinching* atau kecilnya disipasi energi yang terjadi disepanjang sambungan balok kolom, sehingga dapat menghindari suatu peristiwa yang disebut dengan *rocking movement*.
2. Dalam penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan kontrol bahan seperti salah satunya dengan memasang *strain gauge* terhadap tulangan ataupun angkur guna mengetahui kapasitas sisa dari tulangan dan angkur sebelum dilakukan perencanaan suatu perkuatan.

DAFTAR PUSTAKA

ACI COMMITTEE 355 “*State-Of-The-Art Report On Anchorage To Concrete*”

ACI COMMITTEE 440.2R-08 “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”

ACI COMMITTEE 503 “*Use Of Epoxy Compounds With Concrete*”

ACI COMMITTEE 374.1-05 “*Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*”

ASCE/SEI 41-06 (2007) “*Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*”, ASCE, USA.

Al-Salloum, Y.A., Alsayed, S.H., Almusallam T.H. & Siddiqui, N.A., 2010, “*Seismic behavior of FRP-upgraded exterior RC beam-column joints*”, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II* – Alexander et al (eds) © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3

Balasubramanian, K., Lakshmanan, N., Jeyasehar, C. Antony, Ramesh, G. and Bharatkumar, B.H., 2012, “*Evaluation Of Performance Of Retrofitted Reinforced Concrete Beam Column Joints– A Simplified Model*” *Asian Journal Of Civil Engineering (Building And Housing)* Vol. 13, No. 6 (2012) Pages 783-803

Beydokhty, E. dan Shariatmadar, H. 2016, “*Behavior of Damaged Exterior RC Beam-Column Joints Strengthened by CFRP Composite*” *Latin American Journal of Solids and Structure*. www.lajss.org.

Faella, C., LIMA, C., NAPOLI, A., REALFONZO, A., and RUIZ PINILLA, J.G., 2012, “*Beam-Column Joints Strengthened With Frp Systems*” See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/257651822>.

Ilki A., Demir C., and Comert M., 2013. “*RETROFIT OF RC JOINTS WITH FRP COMPOSITES*” See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/259364431>.

Mulyadi. 2018. “*Pengaruh Penggunaan Carbon Fibre Sheet Terhadap Kekakuan Pada Balok Beton Bertulang*” ISSN: 2301-6671 Volume IX no.1 Januari 2018.

Mahmoud, Mohamed H., Afefy, Hamdy M., Kassem, Nesreen M., and Fawzy, Tarek M. 2014. "Strengthening of defected beam-column joints using CFRP" Cairo University Journal of Advanced Research 2014.

Nawy Edward G. Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar [Book]. - Diterjemahkan oleh: Bambang Suryoatmono. Bandung : PT Refika Aditama, 2010. - Vol. IV.

Nurjannah, S.A., 2011. "*Perkembangan Sistem Struktur Beton Pracetak Sebagai Alternatif Pada Teknologi Konstruksi Indonesia Yang Mendukung Efisiensi Energi Serta Ramah Lingkungan*" Prosiding Seminar Nasional AVoER ke-3 Palembang, 26-27 Oktober 201 ISBN : 979-587-395-4

Nurlina, Siti., Suseno, Hendro., Hidayat, M. Taufik., dan Pratama, I Made Yana. 2016. "Perbandingan Daktilitas Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Perkuatan CFRP Dan GFRP" REKAYASA SIPIL/ VOLUME 10, No.1 – 2016 ISSN 1978 - 5658

Park R and T. Paulay Reinforced Concrete Structure [Book]. - Christchurch : John Wiley & Sons, 1974.

Park, R., 1988. "*Ductility Evaluation From Laboratory and Analytical Testing*" Proceedings of ninth world conference on earthquake engineering 1988.

Patricia, L. 2017. <http://repository.ub.ac.id/2263/>. Diakses pada tanggal 24 April 2019.

Paulay, T. and Priestley, M.J.N. 1992. "*Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*" Copyright by John Wiley & Sons, Inc.

Said, Aly M. and Nehdi, L. 2004. "*Behaviour Of Beam-Column Joints Cast Using Selfconsolidating Concrete Under Reversed Cyclic Loading*" 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada. August 1-6, 2004, Paper No. 1686.

Soebandono, B., Triwiyono, A, dan Muslikh. 2011. "Perbaikan Balok Beton Bertulang dengan Metode Jacketing dengan Bahan" Jurnal Ilmiah Semesta Teknik, Vol. 14, No. 2, 166-176, November 2011.

SNI 03-2847-2002, Standar Nasional Indonesia, "*Tata Cara Perhitungan Beton Untuk Bangunan Gedung*"

SNI 03-2847-2013, Standar Nasional Indonesia, "*Persyaratan beton structural untuk bangunan Gedung*"



Tarigan, J., Patra, F.M., and Sitorus, T. 2018. "*Flexural strength using Steel Plate, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) on reinforced concrete beam in building technology*" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 126 (2018) 012025 doi:10.1088/1755-1315/126/1/012025

Uma, S.R., and Prasad, A. Meher, 2005. "*Seismic Behaviour Of Beam Column Joints In Reinforced Concrete Moment Resisting Frames - A Review*" Document No. : IITK-GSDMA-EQ31-V1.

Wahyudi, dkk. 2010. Perencanaan Struktur Gedung BPS Provinsi Jawa Tengah Menggunakan Struktur Beton Pracetak (Design of Structure of BPS Building Central Jaya Province Using Precast Concrete). Tesis tidak dipublikasikan. Semarang: Universitas Diponegoro.

Wibowo, A., 2012. "*Seismic Performance Ofinsitu And Precast Softstorey Buildings*" Thesis. Faculty of Engineering and Industrial Sciences Swinburne University of Technology

Wibowo, A., 2012. "*Seismic Performance of Insitu and Precast Soft Storey Buildings*" [Report]. -Swinburne : THESIS : Tidak Dipublish, 2012.

Widyawati, Ratna. 2009. "Keruntuhan Lentur Balok Pada Struktur Joint Balok-Kolom Beton Bertulang Eksterior Akibat Beban Siklik" Jurnal Rekayasa Vo. 13 No. 3, Desember 2009.

Wibowo, N., 2006. "Sambungan Pada Rangka Batang Beton Pracetak" Jurnal Teknik Sipil Volume 7 No. 1, Oktober 2006 : 80 – 96.



