

SKRIPSI
ANALISIS NUMERIK PERKUATAN GESER PADA BALOK BETON
BERTULANG MENGGUNAKAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER*
(CFRP) BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

Diajukan untuk memenuhi persyaratan menempuh derajat Sarjana S1 pada
Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Lambung Mangkurat

Dibuat oleh:

Munawwaroh

NIM. 2110811320044

Dosen Pembimbing:

Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M. Eng.

NIP. 19790723 200501 2 005



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
FAKULTAS TEKNIK PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL
BANJARBARU

2025

LEMBAR PENGESAHAN

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL

**Analisis Numerik Perkuatan Geser Pada Balok Beton Bertulang
Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) Berbasis Metode
Elemen Hingga**

Oleh
Munawwaroh (2110811320044)

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji pada 03 Juli 2025 dan dinyatakan
LULUS

Komite Penguji :

Ketua : **Wiku Adhiwicaksana Krasna, S.T.,
M.Eng., Ph.D.**
NIP. 19860628 201212 1 002

Anggota 1 : **Ade Yuniati Pratiwi, S.T., M.Sc., Ph.D.**
NIP. 19900306 202203 2 010

Anggota 2 : **Dr. Rahmani Kadarningsih, S.T., M.T.**
NIP. 19780430 200604 2 001

**Pembimbing
Utama** : **Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng.**
NIP. 19790723 200501 2 005

Banjarbaru, 11 6 JULI 2025

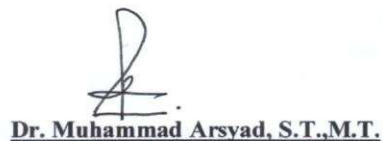
Diketahui dan disahkan oleh:

**Wakil Dekan Bidang Akademik
Fakultas Teknik ULM,**


Dr. Mahmud, S.T., M.T.

NIP. 19740107 199802 1 001

**Koordinator Program Studi
S-1 Teknik Sipil,**


Dr. Muhammad Arsyad, S.T., M.T.

NIP. 19720826 199802 1 001

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Munawwaroh

NIM : 2110811320044

Fakultas : Teknik

Program Studi : S-1 Teknik Sipil

Judul Skripsi : Analisis Numerik Perkuatan Geser Pada Balok Beton Bertulang
Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP)
Berbasis Metode Elemen Hingga

Pembimbing Utama : Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng.

Dengan ini menyatakan bahwa hasil penulisan Skripsi yang telah saya buat ini merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata di kemudian hari penulisan Skripsi ini merupakan hasil plagiat atau penjiplakan terhadap karya orang lain, maka saya bersedia mempertanggungjawabkan sekaligus bersedia menerima sanksi berdasarkan aturan tata tertib di Universitas Lambung Mangkurat.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.

Banjarbaru, 03 Juli 2025

Penulis,

Munawwaroh

NIM. 2110811320044

ABSTRAK

Beton bertulang merupakan komponen utama dalam struktur bangunan karena kemampuannya menahan beban tekan. Namun, secara alami beton memiliki kelemahan dalam menahan gaya tarik dan geser maka ditambahkan tulangan. Seiring berjalannya waktu, berbagai faktor seperti penambahan beban, perubahan fungsi bangunan, dan penurunan mutu material dapat menurunkan kapasitas struktural balok beton bertulang. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan. Salah satu metode yang kini banyak digunakan adalah perkuatan dengan material komposit seperti *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, yang dikenal ringan, kuat, dan tahan korosi.

Pada penelitian ini benda uji berupa balok beton bertulang yang sudah diuji secara eksperimental di laboratorium sebagai Balok Kontrol (BK). Kemudian dianalisis menggunakan metode elemen hingga di ABAQUS. Balok kontrol dimodifikasi agar mendapatkan keruntuhan geser. Kemudian diberikan perkuatan dengan variasi jumlah lapisan yaitu 1, 2, dan 3 lapis serta jarak strip CFRP yaitu 200 mm dan 250 mm. Total model yang diteliti adalah sebanyak 6 buah. Perkuatan CFRP diaplikasikan dengan pola *U-wrap* vertikal pada sisi samping balok, dan parameter yang diamati meliputi pola retak, kapasitas beban maksimum, serta daktilitas lendutan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan CFRP mampu meningkatkan kapasitas balok dan memberikan kontribusi terhadap daktilitas struktur. Penambahan lapisan dan pengaturan jarak strip CFRP berpengaruh terhadap pola keruntuhan dan deformasi balok. Balok dengan 3 lapis CFRP dan jarak *strip* 200 mm mengalami peningkatan kapasitas beban maksimum hingga 12,16% dibandingkan balok modifikasi. Selain itu, daktilitas lendutan maksimum pada balok dengan 1 lapis dan jarak 250 mm mencapai 1,82 kali lebih besar dibandingkan Balok Modifikasi, menunjukkan peningkatan kemampuan deformasi sebelum runtuh. Dengan demikian, CFRP terbukti efektif sebagai alternatif perkuatan struktural balok beton bertulang terutama dalam menahan gaya geser dan meningkatkan performa daktilitas.

Kata Kunci: Beton bertulang, perkuatan struktur, *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, daktilitas, metode elemen hingga, ABAQUS.

ABSTRACT

Reinforced concrete is a major component in building structures due to its ability to withstand compressive loads. However, concrete naturally has weaknesses in resisting tensile and shear forces, which can cause cracking or even collapse if not reinforced with reinforcement. Over time, various factors such as additional load, changes in building function, construction errors, and material deterioration can reduce the structural capacity of reinforced concrete beams. Therefore, reinforcement methods are required. One method that is now widely used is reinforcement with composite materials such as Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), which is known to be lightweight, strong, and corrosion resistant.

In this study, the test specimen is a reinforced concrete beam that has been experimentally tested in the laboratory as the Control Beam (CB). They were then analyzed using the finite element method in ABAQUS. The control beams were modified to induce shear failure. Reinforcement was applied with variations in the number of layers (1, 2, and 3 layers) and the spacing of CFRP strips (200 mm and 250 mm). A total of 6 models were studied. The CFRP reinforcement was applied using a vertical U-wrap pattern on the sides of the beams, and the observed parameters included crack patterns, maximum load capacity, and deflection ductility.

The simulation results showed that the use of CFRP could increase the beam capacity and contribute to the ductility of the structure. The addition of layers and the arrangement of CFRP strip spacing affected the failure pattern and deformation of the beam. The beam with 3 layers of CFRP and a strip spacing of 200 mm experienced an increase in maximum load capacity of up to 12.16% compared to the modified beam. Additionally, the maximum deflection ductility of the beam with 1 layer and a spacing of 250 mm was 1.68 times greater than that of the modified beam, indicating an improvement in deformation capacity before failure. Thus, CFRP has proven effective as an alternative structural reinforcement for reinforced concrete beams, particularly in resisting shear forces and enhancing ductility performance.

Keywords: Reinforced concrete, structural strengthening, Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), ductility, finite element method, ABAQUS.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim, Alhamdulillah segala puji syukur kehadiran Allah SWT. Atas berkah limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisa Numerik Perkuatan Geser Pada Balok Beton Bertulang Menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* Berbasis Metode Elemen Hingga”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan mencapai derajat sarjana S-1 pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat. Dalam proses penyusunan tugas akhir ini, saya menerima banyak bantuan dan bimbingan yang menjadi motivasi dan semangat dalam menyelesaikan kuliah dengan baik. Pada kesempatan kali ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah terlibat dalam memberikan motivasi maupun membantu dalam proses penyusunan tugas akhir ini, yaitu:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena semua rencana dan kehendak-Nya lah semua dapat terjadi pada penulis hingga detik ini.
2. Bapak Alfi Muhlisin dan Ibu Maisuroh selaku kedua Orang Tua saya yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan serta kasih sayang yang tidak terhingga dalam mengiringi langkah saya untuk menyelesaikan program studi ini.
3. Hayatun Afiza dan Muhammad Karim selaku adik-adik saya yang turut mendoakan dan memberikan dukungan juga semangat dalam proses penyusunan tugas akhir ini.
4. Seluruh anggota keluarga saya yang juga ikut membantu dan mendukung baik moril maupun materil dengan segala kasih sayang, do’a, dan motivasi.
5. Ibu Dr. Nursiah Chairunnisa, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing saya yang dengan sabar selalu memberikan arahan, petunjuk, dan masukan yang sangat berharga dalam proses penyusunan tugas akhir ini.
6. Bapak Wiku Adhiwicaksana Krasna, S.T., M.Eng., Ph.D., Ibu Ade Yuniati Pratiwi, S.T., M.Sc., Ph.D., dan Ibu Dr. Rahmani Kadarningsih, S.T., M.T. selaku dosen penguji atas masukan yang sangat berharga dalam menyempurnakan tugas akhir ini.

7. Segenap Dosen Pengajar di Program Studi S-1 Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang luar biasa untuk saya selama perkuliahan.
8. Teman seperjuangan tugas akhir saya yaitu Novia Ramadhani yang telah bersama-sama berjuang dari awal penyusunan dan selalu di samping saya serta banyak membantu saya selama penyelesaian tugas akhir ini.
9. Teman-teman Kating Ges yaitu Siti Lutfiyah N.J., Julecha Fitriyani, Novia Ramadhani dan Nur Ramadhayani yang memberikan motivasi serta semangat dari awal menempuh perkuliahan hingga saat ini.
10. Teman-teman seperjuangan (ECLIPSE) Teknik Sipil angkatan 2021 yang telah menemani dan membantu selama perkuliahan.
11. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah terlibat dalam penyusunan tugas akhir ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga dapat banyak manfaat dan pelajaran yang bisa didapat pembaca skripsi ini. Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan di dalam tugas akhir ini dikarenakan terbatasnya pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki penulis. Penulis memohon maaf atas segala kesalahan dan kekurangan yang ada dan mengucapkan terima kasih.

Banjarbaru,.....

Munawwaroh

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Beton Bertulang.....	6
2.2 Metode Perkuatan pada Beton Bertulang	6
2.3 <i>Fiber Reinforced Polymer (FRP)</i>	8
2.4 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>	11
2.5 Daktilitas	11
2.6 Kuat Geser Balok Beton Bertulang	14
2.7 Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan CFRP	17
2.8 Kuat Geser Balok Beton Bertulang dengan CFRP.....	19
2.9 Keruntuhan pada Balok	21
2.10 Pemodelan Elemen Hingga	23
2.11 Pemodelan Numerik Elemen Hingga	31
2.12 Penelitian Sebelumnya	33
BAB III METODE PENELITIAN	34

3.1	Diagram Alir Penelitian.....	34
3.2	Sistematika Penelitian	35
3.3	Model Rencana.....	35
3.4	Permodelan dengan <i>Abaqus CAE</i>	42
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		60
4.1	Pendahuluan	60
4.2	Perilaku keruntuhan balok benda uji perkuatan dengan permodelan <i>Abaqus 2020 CAE</i>	79
4.3	Kapasitas Beban	112
4.4	Daktilitas benda uji.....	118
BAB V PENUTUP.....		121
5.1	Kesimpulan.....	121
5.2	Saran.....	121
DAFTAR PUSTAKA		123

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>	9
Gambar 2. 2 <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>	10
Gambar 2. 3 <i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i>	10
Gambar 2. 4 Kurva Tegangan-Regangan Beton	12
Gambar 2. 5 Daktilitas Regangan	13
Gambar 2. 6 Daktilitas Kelengkungan	13
Gambar 2. 7 Daktilitas Perpindahan	13
Gambar 2. 8 Perlawanan terhadap Geser	16
Gambar 2. 9 Diagram Bidang Geser	17
Gambar 2. 10 Diagram regangan-tegangan balok dengan perkuatan CFRP	18
Gambar 2. 11 Ilustrasi variabel dimensi yang digunakan dalam perhitungan geser perkuatan FRP: (a) tampak samping; (b) pemasangan pola vertikal; (c) pemasangan pola diagonal.	21
Gambar 2. 12 Pola keruntuhan: (a) keruntuhan lentur; (b) keruntuhan tarik diagonal; (c) keruntuhan geser tekan	23
Gambar 2. 13 Macam-macam elemen yang sering digunakan	24
Gambar 2. 14 <i>Three-dimensional solid element</i>	25
Gambar 2. 15 <i>Truss Element</i>	26
Gambar 2. 16 Konsep <i>embedded element</i>	26
Gambar 2. 17 Model <i>Tie Function</i>	27
Gambar 2. 18 Model brick element 3D untuk beton.....	28
Gambar 2. 19 Model truss element 3D	28
Gambar 2. 20 Grafik Tegangan-Regangan pada Beton dengan Kerusakan Plastis	32
Gambar 2. 21 Grafik Tegangan-Regangan pada Beton dengan Kerusakan Plastis	32
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	35
Gambar 3. 2 Model Balok Kontrol	38
Gambar 3. 3 Model Balok Modifikasi	38
Gambar 3. 4 Model BPA-1L.....	39

Gambar 3. 5 Model BPA-2L.....	39
Gambar 3. 6 Model BPA-3L.....	40
Gambar 3. 7 Model BPB-1L.....	40
Gambar 3. 8 Model BPB-2L.....	41
Gambar 3. 9 Model BPB-3L.....	41
Gambar 3. 10 Tampilan Awal.....	42
Gambar 3. 11 <i>Create Part</i> Balok.....	43
Gambar 3. 12 Gambar Dimensi <i>Part</i> Balok.....	43
Gambar 3. 13 <i>Edit Base Extrusion</i> Balok.....	44
Gambar 3. 14 <i>Part</i> Balok.....	44
Gambar 3. 15 <i>Create Part</i> Tulangan Lentur.....	45
Gambar 3. 16 Gambar Dimensi <i>Part</i> Tulangan Lentur.....	45
Gambar 3. 17 <i>Part</i> Tulangan Lentur.....	46
Gambar 3. 18 <i>Create Part</i> Tulangan Sengkang.....	46
Gambar 3. 19 Gambar Dimensi <i>Part</i> Tulangan Sengkang.....	47
Gambar 3. 20 <i>Part</i> Tulangan Sengkang.....	47
Gambar 3. 21 <i>Create Part</i> CFRP.....	48
Gambar 3. 22 Gambar Dimensi <i>Part</i> CFRP.....	48
Gambar 3. 23 <i>Edit Base Extrusion</i> CFRP.....	49
Gambar 3. 24 <i>Part</i> CFRP.....	49
Gambar 3. 25 <i>Edit Section Assignment</i>	51
Gambar 3. 26 <i>Assign Property</i> Beton pada Balok.....	52
Gambar 3. 27 <i>Create Instance</i>	54
Gambar 3. 28 Tampilan Model yang telah Disusun.....	55
Gambar 3. 29 Menyesuaikan <i>setting</i> pada <i>Module Step</i>	56
Gambar 3. 30 <i>Edit</i> Beban pada U2.....	57
Gambar 3. 31 <i>Assign Element Type</i> untuk Balok dan Beban/Tumpuan.....	58
Gambar 3. 32 <i>Assign Element Type</i> untuk Tulangan.....	58
Gambar 3. 33 <i>Assign Element Type</i> untuk CFRP.....	59
Gambar 3. 34 <i>Create Job</i>	59

Gambar 4. 1 Detail penulangan dan dimensi penampang benda uji Balok Kontrol (Chairunnisa,2009).....	61
Gambar 4. 2 Set-up pengujian benda uji Balok Kontrol (Chairunnisa,2009).....	61
Gambar 4. 3 Hasil pengujian benda uji eksperimental (Chairunnisa, 2009)	61
Gambar 4. 4 Kondisi awal Balok Kontrol.....	68
Gambar 4. 5 (a) Kondisi retak awal (first crack) dan (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami first crack	69
Gambar 4. 6 (a) Kondisi retak saat benda uji mencapai leleh dan (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami leleh	70
Gambar 4. 7 (a) Kondisi retak saat ultimit (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami ultimit	71
Gambar 4. 8 Perbandingan perilaku keruntuhan Balok Kontrol (Chairunnisa, 2009) dengan benda uji menggunakan metode elemen hingga.....	72
Gambar 4. 9 Kondisi awal Balok Modifikasi.....	73
Gambar 4. 10 Kondisi retak awal (first crack) (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami first crack.....	74
Gambar 4. 11 Kondisi retak saat tulangan sengkang mencapai leleh	75
Gambar 4. 12 Tegangan Von Mises pada tulangan sengkang pada saat mengalami leleh	75
Gambar 4. 13 (a) Kondisi retak saat benda uji mencapai leleh dan (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami leleh	76
Gambar 4. 14 (a) Kondisi retak saat ultimit (b) Tegangan Von Mises pada tulangan saat mengalami ultimit	77
Gambar 4. 15 Detail benda uji BPA-1L.....	79
Gambar 4. 16 Model benda uji BPA-1L	80
Gambar 4. 17 Tampak CFRP BPA-1L terpasang pada benda uji.....	80
Gambar 4. 18 Kondisi retak awal benda uji BPA-1L	81
Gambar 4. 19 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat first crack benda uji BPA-1L	81

Gambar 4. 20 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPA-1L.....	81
Gambar 4. 21 Kondisi leleh benda uji BPA-1L	82
Gambar 4. 22 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat leleh pada benda uji BPA-1L	82
Gambar 4. 23 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat leleh pada benda uji BPA-1L	82
Gambar 4. 24 Pola retak saat kondisi ultimit benda uji BPA-1L.....	83
Gambar 4. 25 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat ultimit pada benda uji BPA- 1L	83
Gambar 4. 26 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat ultimit pada benda uji BPA-1L	83
Gambar 4. 27 Hubungan beban dan lendutan benda uji BM dan BPA-1L.....	84
Gambar 4. 28 Detail benda uji BPA-2L.....	85
Gambar 4. 29 Model benda uji BPA-2L	85
Gambar 4. 30 Tampak CFRP BPA-2L terpasang pada benda uji.....	85
Gambar 4. 31 Kondisi retak awal benda uji BPA-2L	86
Gambar 4. 32 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPA-2L.....	86
Gambar 4. 33 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPA-2L.....	86
Gambar 4. 34 Kondisi leleh benda uji BPA-2L	87
Gambar 4. 35 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat leleh benda uji BPA-2L	87
Gambar 4. 36 Tegangan leleh yang terjadi pada CFRP saat leleh pada benda uji BPA- 2L	87
Gambar 4. 37 Pola retak saat kondisi beban ultimit pada benda uji BPA-2L.....	88
Gambar 4. 38 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat ultimit benda uji BPA-2L..	88
Gambar 4. 39 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat ultimit pada benda uji BPA-2L	88
Gambar 4. 40 Grafik hubungan beban lendutan benda uji BM dan BPA-2L	89
Gambar 4. 41 Detail benda uji BPA-3L.....	90
Gambar 4. 42 Model benda uji BPA-3L	90
Gambar 4. 43 Tampak CFRP BPA-3L terpasang pada benda uji.....	90
Gambar 4. 44 Kondisi retak awal benda uji BPA-3L	91

Gambar 4. 45 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat first crack benda uji BPA-3L	91
Gambar 4. 46 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat first crack benda uji BPA-2L	91
Gambar 4. 47 Kondisi leleh benda uji BPA-3L	92
Gambar 4. 48 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat leleh benda uji BPA-3L	92
Gambar 4. 49 Tegangan leleh yang terjadi pada CFRP saat leleh pada benda uji BPA-3L	92
Gambar 4. 50 Pola retak saat kondisi beban ultimit pada benda uji BPA-3L.....	93
Gambar 4. 51 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat ultimit benda uji BPA-3L..	93
Gambar 4. 52 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat ultimit pada benda uji BPA-3L	93
Gambar 4. 53 Grafik hubungan beban lendutan benda uji BM dan BPA-3L.....	94
Gambar 4. 54 Detail benda uji BPB-1L.....	95
Gambar 4. 55 Model benda uji BPB-1L	95
Gambar 4. 56 Tampak CFRP BPB-1L terpasang pada benda uji.....	95
Gambar 4. 57 Kondisi retak awal benda uji BPB-1L.....	96
Gambar 4. 58 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPB-1L	96
Gambar 4. 59 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPB-1L	96
Gambar 4. 60 Kondisi leleh benda uji BPB-1L	97
Gambar 4. 61 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat kondisi leleh pada benda uji BPB-1L	97
Gambar 4. 62 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat kondisi leleh pada benda uji BPB-1L	97
Gambar 4. 63 Pola retak yang terjadi saat kondisi ultimit pada benda uji BPB-1L ...	98
Gambar 4. 64 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat kondisi ultimit pada benda uji BPB-1L	98
Gambar 4. 65 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat kondisi ultimit pada benda uji BPB-1L	98
Gambar 4. 66 Grafik hubungan beban lendutan benda uji BM dan BPB-1L	99
Gambar 4. 67 Detail benda uji BPB-2L.....	100

Gambar 4. 68 Model benda uji BPB-2L	100
Gambar 4. 69 Tampak CFRP BPB-2L terpasang pada benda uji	101
Gambar 4. 70 Kondisi retak awal benda uji BPB-2L.....	101
Gambar 4. 71 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPB-2L	101
Gambar 4. 72 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPB-2L	102
Gambar 4. 73 Kondisi leleh benda uji BPB-2L	102
Gambar 4. 74 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat leleh benda uji BPB-2L...	102
Gambar 4. 75 Tegangan leleh yang terjadi pada CFRP saat leleh pada benda uji BPB-2L	103
Gambar 4. 76 Pola retak saat kondisi beban ultimit pada benda uji BPB-2L.....	103
Gambar 4. 77 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat ultimit benda uji BPB-2L	104
Gambar 4. 78 Tegangan yang terjadi pada CFRP lapis 1 saat ultimit pada benda uji BPB-2L	104
Gambar 4. 79 Grafik hubungan beban lendutan benda uji BM dan BPB-2L	105
Gambar 4. 80 Detail benda uji BPB-3L	106
Gambar 4. 81 Model benda uji BPB-3L	106
Gambar 4. 82 Tampak CFRP BPB-3L terpasang pada benda uji	106
Gambar 4. 83 Kondisi retak awal benda uji BPB-3L.....	107
Gambar 4. 84 Tegangan yang terjadi pada saat first crack benda uji BPB-3L	107
Gambar 4. 85 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat first crack benda uji BPB-3L	108
Gambar 4. 86 Kondisi leleh benda uji BPB-3L	108
Gambar 4. 87 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat leleh benda uji BPB-3L...	109
Gambar 4. 88 Tegangan leleh yang terjadi pada CFRP saat leleh pada benda uji BPB-3L	109
Gambar 4. 89 Pola retak saat kondisi beban ultimit pada benda uji BPB-3L.....	110
Gambar 4. 90 Tegangan yang terjadi pada tulangan saat ultimit benda uji BPB-3L	110
Gambar 4. 91 Tegangan yang terjadi pada CFRP saat ultimit pada benda uji BPB-3L	111
Gambar 4. 92 Grafik hubungan beban lendutan benda uji BM dan BPB-3L	111

Gambar 4. 93 Grafik hubungan beban dan lendutan benda uji (BM, BPA-1L, BPA-2L, dan BPA-3L).....	115
Gambar 4. 94 Hubungan beban dan lendutan benda uji (BM, BPB-1L, BPB-2L, dan BPB-3L).....	115
Gambar 4. 95 Grafik hubungan beban lendutan benda uji.....	116
Gambar 4. 96 Peningkatan beban benda uji.....	116
Gambar 4. 97 Perbandingan nilai daktilitas benda uji	119

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik <i>Fiber</i>	10
Tabel 2. 2 Perbandingan Karakter Permukaan <i>tie formulation</i>	27
Tabel 2. 3 Parameter CDP untuk material beton dalam ABAQUS (Panduan pemodelan struktur beton bertulang dengan ABAQUS).....	31
Tabel 2. 4 Data Kuat Tekan CDP dalam ABAQUS (Panduan pemodelan struktur beton bertulang dengan ABAQUS)	31
Tabel 2. 5 Data Kuat Tarik CDP dalam ABAQUS (Panduan pemodelan struktur beton bertulang dengan ABAQUS)	32
Tabel 3. 1 <i>Material Properties</i> Beton.....	36
Tabel 3. 2 <i>Material Properties</i> Tulangan Baja	36
Tabel 3. 3 <i>Material Properties</i> CFRP.....	37
Tabel 3. 4 Spesifikasi Model.....	37
Tabel 3. 5 <i>Parameter Plasticity</i> Beton.....	50
Tabel 3. 6 <i>Parameter</i> CDP Kuat Tekan Beton	50
Tabel 3. 7 <i>Parameter</i> CDP Kuat Tarik Beton.....	51
Tabel 3. 8 <i>Plasticity Property</i> Tulangan Baja.....	52
Tabel 3. 9 <i>Elasticity Property</i> CFRP.....	53
Tabel 3. 10 <i>Hashin Damage Property</i> CFRP	53
Tabel 4. 1 Hasil eksperimental dan analitis (Chairunnisa, 2009).....	62
Tabel 4. 2 Perbandingan kapasitas beban hasil pengujian Balok Kontrol (BK).....	72
Tabel 4. 3 Perbandingan kapasitas beban hasil pengujian Balok Modifikasi	78
Tabel 4. 4 Data hasil analisis saat benda uji mengalami retak pertama.....	112
Tabel 4. 5 Data hasil analisis saat benda uji mengalami leleh	113
Tabel 4. 6 Data hasil analisis saat benda uji mengalami ultimit	113
Tabel 4. 7 Tegangan yang terjadi pada saat ultimit	114
Tabel 4. 8 Data hasil analisis saat beton mengalami keruntuhan.....	118
Tabel 4. 9 Persentase kenaikan daktilitas masing-masing benda uji	120