

TESIS

**STUDI NUMERIK PERILAKU BALOK T “HIGH VOLUME
FLY ASH SELF COMPACTING CONCRETE” DENGAN
“CARBON FIBER REINFORCED POLYMER”
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**



KURNIAWAN MEGA MAHARDIKA

No. Mhs.: 225119180/PS/MTS

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
2026**



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

PERSETUJUAN TESIS

Nama : Kurniawan Mega Mahardika
Nomor Mahasiswa : 225119180/PS/MTS
Konsentrasi : Struktur
Judul Tesis : Studi Numerik Perilaku Balok T "High Volume Fly Ash
Self Compacting Concrete" dengan "Carbon Fiber
Reinforced Polymer" Menggunakan Metode Elemen
Hingga

Dosen Pembimbing

Tanggal

Tanda Tangan

1. Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono,
M.Eng., IPU, ASEAN Eng.

30 Maret 2026



FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

PENGESAHAN TESIS

Nama : Kurniawan Mega Mahardika
Nomor Mahasiswa : 225119180/PS/MTS
Konsentrasi : Struktur
Judul Tesis : Studi Numerik Perilaku Balok T "High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete" dengan "Carbon Fiber Reinforced Polymer" Menggunakan Metode Elemen Hingga

Dosen Penguji

1. Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono,
M.Eng., IPU, ASEAN Eng.
2. Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng.,
Ph.D.
3. Dr. Ir. Johanes Januar Sudjati, S.T.,
M.T.

Tanggal

30/03/2026

26/03/2026

27/3-26

Tanda Tangan

Mengetahui,
Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil



FAKULTAS
TEKNIK
UNIVERSITAS ATMA JAYA YOGYAKARTA

Dr. Ir. Nectaria Putri Pramesti, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng.

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tesis dengan judul:

**STUDI NUMERIK PERILAKU BALOK T “HIGH VOLUME FLY ASH
SELF COMPACTING CONCRETE” DENGAN “CARBON FIBER
REINFORCED POLYMER” MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

Benar-benar merupakan hasil karya pendalaman akademik sendiri dan bukan merupakan hasil plagiasi dari karya orang lain. Ide, data, hasil penelitian, maupun kutipan baik langsung maupun tidak langsung yang bersumber dari tulisan atau ide orang lain dinyatakan secara tertulis dalam Tesis ini. Apabila terbukti di kemudian hari bahwa Tesis ini merupakan hasil plagiasi, maka ijazah yang saya peroleh dinyatakan batal dan akan saya kembalikan kepada Rektor Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Yogyakarta, Maret 2026

Yang membuat pernyataan



Kurniawan Mega Mahardika

INTISARI

Infrastruktur di Indonesia pada saat ini telah mengalami perkembangan yang sangat masif dan pesat. Pada pelaksanaannya, jenis material yang paling umum digunakan merupakan material beton konvensional. Proses produksi semen sebagai bahan ikat beton konvensional tersebut ternyata menghasilkan emisi CO₂ yang dapat mencemari lingkungan. Mitigasi dalam rangka pengurangan emisi gas CO₂ pada industri semen dapat dilakukan dengan mencari bahan pengganti semen yang lebih ramah lingkungan seperti abu terbang atau *fly ash*. Selain itu, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi kinerja dari struktur beton bertulang. Beberapa faktor tersebut diantaranya adalah umur bangunan, efek dari kebakaran bangunan, adanya korosi pada baja tulangan, dan lain. Salah satu langkah yang dapat diambil adalah melakukan perkuatan struktur beton dengan material *Carbon Fiber Reinforced Polymer*

Pada penelitian ini dilakukan studi numerik pada balok T beton *High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete*. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program aplikasi 3D Non-Linier Finite Element Analysis (3D NLFEA). Balok beton dimodelkan sebagai balok tertumpu sederhana dengan 2 titik pembebanan dengan jarak 1000 mm antar titik pembebanan. Pemodelan menggunakan 4 benda uji balok T dengan ukuran lebar badan 120 mm, lebar sayap 440 mm, tebal pelat sayap 80 mm, dan panjang balok 3000 mm. Perkuatan yang digunakan adalah perkuatan lentur dengan CFRP lebar 50 mm, perkuatan lentur dengan CFRP lebar 100 mm, perkuatan geser dengan CFRP lebar 250 mm jarak spasi 300 mm, dan perkuatan geser dengan CFRP lebar 100 mm jarak spasi 150 mm.

Hasil dari penelitian ini didapatkan perkuatan lentur dengan CFRP lebar 50 mm meningkatkan kapasitas balok sebesar 2,21%. Perkuatan lentur CFRP lebar 100 mm meningkatkan kapasitas balok sebesar 2,66%. Sementara itu pada perkuatan geser didapatkan bahwa kapasitas geser balok meningkat sebesar 1,57% untuk perkuatan geser dengan CFRP lebar 250 mm jarak 300 mm. Peningkatan kapasitas geser balok sebesar 1,55% juga terjadi untuk perkuatan geser dengan CFRP lebar 100 mm lebar 150 mm.

Kata kunci : *High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete*, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*, Metode Elemen Hingga, 3D-NLFEA

ABSTRACT

Infrastructure in Indonesia has currently undergone massive and rapid development. In its implementation, the most commonly used material is conventional concrete. The production process of cement as a binding material for conventional concrete produces CO₂ emissions that can pollute the environment. Mitigation in the context of reducing CO₂ emissions in the cement industry can be done by finding more environmentally friendly cement substitutes such as fly ash. In addition, there are several factors that can affect the performance of reinforced concrete structures. Some of these factors include the age of the building, the effects of building fires, corrosion of steel reinforcement, and others. One step that can be taken is to reinforce concrete structures with Carbon Fiber Reinforced Polymer materials.

This study conducted a numerical study on High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete T-beams. The analysis was performed using the finite element method with the help of the 3D Non-Linear Finite Element Analysis (3D NLFEA) application program. The concrete beam was modeled as a simple supported beam with two loading points with a spacing of 1000 mm between both loading points. Modeling uses 4 T-beam test specimens with web width of 120 mm, flange width of 440 mm, flange plate thickness of 80 mm, and beam span of 3000 mm. The strengthening used are flexural strengthening with a CFRP width of 50 mm, flexural strengthening with a width of 100 mm, shear strengthening with a CFRP width of 250 mm and spacing of 300 mm, and shear strengthening with a CFRP width of 100 mm and spacing of 150 mm.

The results of this study show that flexural reinforcement with 50 mm wide CFRP increases the beam capacity by 2,21%. Flexural reinforcement with 100 mm wide CFRP increases the beam capacity by 2,66%. Meanwhile, in shear reinforcement, it was found that the shear capacity of the beam increased by 1,57% for shear reinforcement with 250 mm wide CFRP at a distance of 300 mm. An increase in the shear capacity of the beam by 1,55% also occurred for shear reinforcement with 100 mm wide CFRP at a width of 150 mm.

Keywords : High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete, Carbon Fiber Reinforced Polymer, Finite Element Method, 3D-NLFEA

KATA HANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul Studi Numerik Perilaku Balok T “High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete” Dengan Perkuatan “Carbon Fiber Reinforced Polymer” Menggunakan Metode Elemen Hingga. Tesis ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat pascasarjana di Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tesis ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tesis ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. AM. Ade Lisantono, M.Eng., IPU, ASEAN Eng. selaku dosen pembimbing Tesis, yang telah memberikan banyak ilmu, pengarahan dan dukungan demi terselesaikannya penyusunan Tesis ini ini.
2. Bapak Prof. Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D. dan Bapak Dr. Ir. Johanes Januar Sudjati, S.T., M.T. selaku dosen penguji Tesis, yang telah memberikan banyak masukan, kritik maupun saran, dan memberikan evaluasi agar lebih baik di kemudian hari.
3. Ibu Dr. Ir. Nectaria Putri Pramesti, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.

4. Bapak Bambang Pisceca, S.T., M.T., Ph.D. yang telah memberikan izin untuk penggunaan program aplikasi 3D Non-Linier Finite Element Analysis (3D NLFEA).
5. Keluarga penulis yang senantiasa memberikan dukungan, motivasi, doa, serta semangat selama penyusunan Laporan Tesis ini.
6. Dan seluruh pihak yang telah mendukung terselesaikannya Tesis ini.

Akhirnya penulis berharap agar Tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis serta berbagai pihak yang membacanya.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
PERSETUJUAN TESIS.....	ii
PENGESAHAN TESIS	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
INTISARI.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA HANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Tinjauan Umum	9
2.2 Tinjauan Pustaka	9

2.2.1 <i>Stress-Strain Response of High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA-SCC) Under Uniaxial Loading and Its Effect on the Reinforced HVFA-SCC Nominal Strength</i>	9
2.2.2 Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang HVFA Memadat Sendiri dengan Kadar <i>Fly Ash</i> 60% Terhadap Beton Normal.....	10
2.2.3 <i>Numerical Investigation of Geopolymer Reinforced Concrete Beams Under Flexural Loading Using Finite Element Analysis</i>	11
2.2.4 <i>Finite Element Modeling of Circular Reinforced Concrete Column Confined with CFRP under Eccentric Loading</i>	12
2.2.5 <i>Flexural Behavior of Reinforced Concrete (RC) Beams Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer (CRFP) and ECC</i>	13
2.2.6 <i>Shear Strengthening of Reinforced Concrete T-Beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Anchored with CFRP Spikes</i>	13
2.2.7 Pengaruh <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)</i> Terhadap Balok Beton Bertulang.....	14
BAB III LANDASAN TEORI.....	15
3.1 Umum.....	15
3.2 Balok Beton Bertulang.....	16
3.2.1 Karakteristik Lentur Balok Beton.....	16
3.2.2 Karakteristik Geser Balok Beton	20
3.3 <i>High Volume Fly Ash Concrete Self Compacting Concrete</i>	22
3.3.1 Kuat Lentur Balok HVFA-SCC.....	23
3.3.2 Kuat Geser Balok HVFA-SCC	24

3.3.3 Kuat Tekan Beton HVFA-SCC	25
3.3.4 Kuat Tarik Beton HVFA-SCC	27
3.3.5 Modulus Elastisitas Beton HVFA-SCC	28
3.3.6 Perilaku <i>Stres-Strain</i> Beton HVFA-SCC	29
3.3.7 Perilaku <i>Fracture</i> Beton HVFA-SCC	32
3.4 <i>Fiber Reinforced Polymer</i> (FRP)	32
3.4.1 <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (CFRP)	33
3.4.2 <i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (GFRP)	34
3.4.3 <i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i> (AFRP)	35
3.5 Permodelan dengan 3D-NLFEA <i>Package</i>	36
3.5.1 Model Konstitutif Beton pada Program 3D-NLFEA	38
3.5.1.1 Tegangan Puncak	39
3.5.1.2 <i>Hardening Function</i>	40
3.5.1.3 <i>Softening Function</i>	41
3.6 Permodelan Sifat Material Baja Tulangan	42
BAB IV METODE PENELITIAN	45
4.1 Umum	45
4.2 Metode Pengumpulan Data	45
4.3 Tahapan Penelitian	45
4.4 Benda Uji	46
4.4.1 Model Benda Uji Lentur	46
4.4.2 Model Benda Uji Geser	48
4.5 Permodelan Benda Uji	51

4.5.1 Permodelan Benda Uji Lentur.....	51
4.5.2 Permodelan Benda Uji Geser.....	53
4.6 Data Properties Material	55
4.6.1 Material Beton	55
4.6.2 Baja Tulangan	56
4.6.3 Material CFRP	56
4.7 Input Material pada Program 3D-NLFEA	56
4.8 Diagram Alir Penelitian	58
BAB V PEMBAHASAN	59
5.1 Hasil Pengujian Eksperimental Balok T Beton HVFA-SCC.....	59
5.1.1 Perkuatan Lentur.....	59
5.1.2 Perkuatan Geser	62
5.2 Perkuatan Lentur Balok T Beton HVFA-SCC Numerikal dengan Prorgam 3D-NLFEA.....	65
5.2.1 Grafik Pembebanan	65
5.2.1.1 Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm pada Balok T Beton HVFA	65
5.2.1.2 Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm pada Balok T Beton HVFA.....	66
5.2.1.3 Perbandingan Grafik Pembebanan Numerikal dengan Eksperimental	67
5.2.2 Pola Kegagalan Beton	70

5.2.2.1 Pola Kegagalan Beton Pada Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP	
Lebar 50 mm pada Balok T Beton HVFA.....	70
5.2.2.2 Pola Kegagalan Beton Pada Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP	
Lebar 100 mm pada Balok T Beton HVFA.....	71
5.2.2.3 Perbandingan Pola Kegagalan Beton Secara Numerikal dan	
Ekperimental.....	71
5.2.3 Pola Perpindahan Vertikal (<i>Displacement</i>).....	74
5.2.4 Pola Tegangan Baja Tulangan	75
5.2.5 Pola Tegangan Material CFRP	77
5.3 Perkuatan Geser Balok T Beton HVFA-SCC Numerikal dengan Program	
3D-NLFEA.....	78
5.3.1 Grafik Pembebanan	78
5.3.1.1 Perkuatan Geser CFRP Lebar 250 mm dan jarak 300 mm pada	
Balok T Beton HVFA	78
5.3.1.2 Perkuatan Geser CFRP Lebar 100 mm dan jarak 150 mm pada	
Balok T Beton HVFA.....	79
5.3.1.3 Perbandingan Grafik Pembebanan Numerikal dengan	
Eksperimental	80
5.3.2 Pola Kegagalan Beton.....	83
5.3.2.1 Pola Kegagalan Beton Pada Benda Uji Perkuatan Geser CFRP	
Lebar 250 mm Jarak 300 mm pada Balok T Beton HVFA	83
5.3.2.2 Pola Kegagalan Beton Pada Benda Uji Perkuatan Geser CFRP	
Lebar 100 mm Jarak 150 mm pada Balok T Beton HVFA	84

5.3.2.3 Perbandingan Pola Kegagalan Beton Secara Numerikal dan Ekperimental.....	85
5.3.3 Pola Perpindahan Vertikal (<i>Displacement</i>).....	90
5.3.4 Pola Tegangan Baja Tulangan	92
5.3.5 Pola Tegangan Material CFRP	93
5.3.6 Perbandingan Gaya Geser Numerikal dan Eksperimental	94
BAB VI KESIMPULAN.....	97
6.1 Kesimpulan	97
6.2 Saran.....	99
DAFTAR PUSTAKA	101

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Parameter yang Digunakan pada Program 3D-NLFEA.....	57
Tabel 5.1 Perhitungan Kapasitas Geser Balok Uji Eksperimental.....	94
Tabel 5.2 Perhitungan Kapasitas Geser Balok Uji Numerikal.....	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Tahapan Terjadinya Tegangan Ultimit	17
Gambar 3.2 Tahapan Terjadinya Tegangan Ultimit	17
Gambar 3.3 Tegangan pada Balok Penampang Persegi dan T	18
Gambar 3.4 Diagram Tegangan-Regangan Balok Penampang T	19
Gambar 3.5 Diagram Tegangan-Regangan Balok Penampang Persegi.....	19
Gambar 3.6 Distribusi Tegangan Geser pada Balok Penampang Persegi	21
Gambar 3.7 Distribusi Tegangan Geser pada Balok Penampang T.....	21
Gambar 3.8 Contoh Penggunaan CFRP untuk Perkuatan Struktur.....	34
Gambar 3.9 Contoh Penggunaan GFRP untuk Perkuatan Struktur	35
Gambar 3.10 Contoh Penggunaan AFRP untuk Perkuatan Struktur	36
Gambar 3.11 Ilustrasi Element 8-Node <i>Hexahedral</i>	37
Gambar 3.12 Prediksi Tegangan Puncak	39
Gambar 3.13 Kurva Tegangan-Regangan Baja	43
Gambar 4.1 Ilustrasi Penampang Memanjang Benda Uji Balok Lentur 1.....	47
Gambar 4.2 Ilustrasi Penampang Melintang Benda Uji Balok Lentur 1	47
Gambar 4.3 Ilustrasi Penampang Memanjang Benda Uji Balok Lentur 2.....	48
Gambar 4.4 Ilustrasi Penampang Melintang Benda Uji Balok Lentur 2	48
Gambar 4.5 Ilustrasi Penampang Memanjang Benda Uji Geser 1.....	49

Gambar 4.6 Ilustrasi Penulangan pada Benda Uji Geser 1	49
Gambar 4.7 Ilustrasi Penampang Melintang Benda Uji Balok Geser 1	49
Gambar 4.8 Ilustrasi Penampang Memanjang Benda Uji Geser 2.....	50
Gambar 4.9 Ilustrasi Penulangan pada Benda Uji Geser 2	50
Gambar 4.10 Ilustrasi Penampang Melintang Benda Uji Balok Geser 2.....	50
Gambar 4.11 Permodelan Balok Beton T Benda Uji Lentur 1	51
Gambar 4.12 Permodelan Tulangan Balok Beton T Benda Uji Lentur 1	51
Gambar 4.13 Permodelan <i>Meshing</i> Balok Beton T Benda Uji Lentur 1	52
Gambar 4.14 Permodelan Balok Beton T Benda Uji Lentur 2	52
Gambar 4.15 Permodelan Tulangan Balok Beton T Benda Uji Lentur 2	52
Gambar 4.16 Permodelan <i>Meshing</i> Balok Beton T Benda Uji Lentur 2	53
Gambar 4.17 Permodelan Balok Beton T Benda Uji Geser 1.....	53
Gambar 4.18 Permodelan Tulangan Balok Beton T Benda Uji Geser 1	54
Gambar 4.19 Permodelan <i>Meshing</i> Balok Beton T Benda Uji Geser 1.....	54
Gambar 4.20 Permodelan Balok Beton T Benda Uji Geser 2.....	54
Gambar 4.21 Permodelan Tulangan Balok Beton T Benda Uji Geser 2	55
Gambar 4.22 Permodelan <i>Meshing</i> Balok Beton T Benda Uji Geser 2.....	55
Gambar 4.23 Input Material Beton pada Program 3D-NLFEA.....	57
Gambar 4.24 Input Material Besi Tulangan pada Program 3D-NLFEA	57
Gambar 4.25 Input Material FRP pada Program 3D-NLFEA	57
Gambar 4.26 Diagram Alir Penelitian	58
Gambar 5.1 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC Tanpa Perkuatan Lentur Uji Eksperimental	60

Gambar 5.2 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm Uji Eksperimental.....	60
Gambar 5.3 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm Uji Eksperimental.....	61
Gambar 5.4 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Masing-Masing Benda Uji	
Perkuatan Lentur Eksperimental	62
Gambar 5.5 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Tanpa Perkuatan Geser Uji Eksperimental	63
Gambar 5.6 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Geser CFRP Lebar 250 mm dan Jarak 300 mm Uji	
Eksperimental.....	64
Gambar 5.7 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Geser CFRP Lebar 100 mm dan Jarak 150 mm Uji	
Eksperimental.....	64
Gambar 5.8 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
untuk Seluruh Tipe Perkuatan Geser Uji Eksperimental.....	65
Gambar 5.9 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm Secara Numerikal	66
Gambar 5.10 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm Secara Numerikal	67
Gambar 5.11 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Lentur Secara Numerikal dan Eksperimental.....	68
Gambar 5.12 Pola Retak Benda Uji Lentur CFRP Lebar 50 mm dengan Analisis	

Numerikal.....	70
Gambar 5.13 Pola Retak Benda Uji Lentur CFRP Lebar 100 mm dengan Analisis Numerikal.....	71
Gambar 5.14 Pola Retak Benda Uji 1 Lentur CFRP Lebar 50 mm Uji Eksperimental.....	72
Gambar 5.15 Pola Retak Benda Uji 2 Lentur CFRP Lebar 50 mm Uji Eksperimental.....	72
Gambar 5.16 Pola Retak Benda Uji 1 Lentur CFRP Lebar 100 mm Uji Eksperimental.....	73
Gambar 5.17 Pola Retak Benda Uji 2 Lentur CFRP Lebar 100 mm Uji Eksperimental.....	73
Gambar 5.18 Pola Perpindahan Vertikal Arah Z untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm.....	74
Gambar 5.19 Pola Perpindahan Vertikal Arah Z untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm.....	75
Gambar 5.20 Pola Tegangan Baja Tulangan untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm.....	76
Gambar 5.21 Pola Tegangan Baja Tulangan untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm.....	76
Gambar 5.22 Pola Tegangan Material CFRP untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 50 mm.....	77
Gambar 5.23 Pola Tegangan Material CFRP untuk Benda Uji Perkuatan Lentur CFRP Lebar 100 mm.....	77

Gambar 5.24 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Geser CFRP Lebar 250 mm Jarak 300 mm Secara	
Numerikal.....	79
Gambar 5.25 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Geser CFRP Lebar 100 mm Jarak 150 mm Secara	
Numerikal.....	80
Gambar 5.26 Grafik Pembebanan Vs Lendutan Untuk Balok T Beton HVFA-SCC	
Perkuatan Geser Secara Numerikal dan Eksperimental	81
Gambar 5.27 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak	
300 mm Analisis Numerikal	83
Gambar 5.28 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	
250 mm Analisis Numerikal	84
Gambar 5.29 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	
150 mm Uji Eksperimental	85
Gambar 5.30 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	
150 mm Uji Eksperimental di Daerah Tengah Bentang	86
Gambar 5.31 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	
150 mm Uji Eksperimental di Daerah Tepi Kanan	86
Gambar 5.32 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	
150 mm Uji Eksperimental di Daerah Tepi Kiri	87
Gambar 5.33 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak	
300 mm Uji Eksperimental	87
Gambar 5.34 Pola Retak Benda Uji Geser CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak	

150 mm Uji Eksperimental di Daerah Tengah Bentang	88
Gambar 5.35 Pola Retak Benda Uji 2 Geser CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak	
300 mm Uji Eksperimental di Daerah Tepi Kanan	88
Gambar 5.36 Pola Retak Benda Uji 2 Geser CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak	
300 mm Uji Eksperimental di Daerah Tepi Kiri	89
Gambar 5.37 Ilustrasi Pola Retak Benda Uji 1 Geser CFRP Lebar 100 mm dengan	
Jarak 150 mm Uji Eksperimental	89
Gambar 5.38 Ilustrasi Pola Retak Benda Uji 1 Geser CFRP Lebar 250 mm dengan	
Jarak 300 mm Uji Eksperimental	90
Gambar 5.39 Pola Perpindahan Vertikal Arah Z untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 250 mm Jarak 300 mm	91
Gambar 5.40 Pola Perpindahan Vertikal Arah Z untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 100 mm Jarak 150 mm	91
Gambar 5.41 Pola Tegangan Baja Tulangan untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak 300 mm	92
Gambar 5.42 Pola Tegangan Baja Tulangan untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak 150 mm	92
Gambar 5.43 Pola Tegangan Material CFRP untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 250 mm dengan Jarak 300 mm	93
Gambar 5.44 Pola Tegangan Material CFRP untuk Benda Uji Perkuatan Geser	
CFRP Lebar 100 mm dengan Jarak 150 mm	93
Gambar 5.44 Kapasitas Geser Analisis Numerikal dan Uji Eksperimental	95