

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN.....	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
INTISARI	xvi
<i>ABSTRACT</i>	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Penelitian	2
1.6 Manfaat Penelitian	2
1.7 Keaslian Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 <i>An experimental study to the influence of fiber reinforced polymer (FRP) confinement on beams subjected to bending and shear</i>	4
2.2 Perilaku Pengaruh Penambahan Perkuatan CFRP Terhadap Kekuatan Lentur Balok-T.....	6
2.3 <i>Numerical Analysis of Beams Strengthened with CFRP– A Study of Anchorage Lengths</i>	10
2.4 <i>Numerical Modeling of Concrete–FRP Debonding Using a Crack Band Approach</i>	12
2.5 <i>Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beam Patch Repaired and Strengthened with Fiber–Reinforced Polymers</i>	14
2.6 Analisis Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate pada Kapasitas Lentur Beton Bertulang dengan Metode Elemen Hingga.....	16
BAB III LANDASAN TEORI	18
3.1 Balok-T.....	18

3.2	<i>Finite Element</i> dan Idealisasi Elemen	20
3.2.1	Koergensi <i>Mesh</i>	21
3.2.2	Idealisasi <i>Element</i>	22
3.2.3	<i>Finite Element</i> Analisis <i>Linear</i> Elastis dalam Mekanika <i>Solid</i> dan <i>Struktural</i>	24
3.2.4	<i>Finite Element</i> Analisis <i>Nonlinear Material</i> dalam Mekanika <i>Solid</i> dan <i>Struktural</i>	29
3.2.5	Skema Algoritma Metode Newton– Raphson	30
3.3	Model Material Baja tulangan.....	31
3.4	Perilaku Mekanika Beton “ <i>Concrete Damage Plasticity</i> ” (<i>CDP</i>)	32
3.5	Model Hubungan Tegangan– Regangan Beton	34
3.6	Model Kuat Tarik Beton	35
3.7	Model Material Konstitutif <i>CFRP</i>	36
3.8	Interaksi antara Beton dengan <i>CFRP</i>	42
3.9	<i>Moment– Curvature Relationship</i>	44
3.10	Daktilitas	45
3.11	Kekakuan Lentur.....	46
3.12	Disipasi Energi.....	48
BAB IV METODE PENELITIAN		49
4.1	Analisis dalam Penelitian.....	49
4.2	Sifat Material.....	49
4.2.1	Beton.....	49
4.2.2	Baja Tulangan.....	53
4.2.3	<i>CFRP</i>	55
4.2.4	Epoksi	57
4.3	Model Benda Uji	58
4.4	Skenario Pembebanan Benda Uji.....	60
4.5	Tahapan Penelitian	61
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		64
5.1	Hasil Uji Konvergensi.....	64
5.2	Verifikasi <i>Software</i>	65
5.3	Hasil Simulasi Numerik (Tudjono, 2015).....	69

5.3.1	Kurva <i>Load– Displacement</i>	69
5.3.2	Pola Retak dan Keruntuhan	72
5.4	Hasil Simulasi Numerik (Mulyanto, 2020).....	75
5.4.1	Penentuan Mutu Baja Tulangan	75
5.4.2	Kurva <i>Load– Displacement</i>	76
5.4.3	Daktilitas.....	81
5.4.4	Kekakuan Lentur	82
5.4.5	Pola Retak dan Keruntuhan	84
5.4.6	Disipasi Energi	92
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		94
6.1	Kesimpulan	94
6.2	Saran	94
DAFTAR PUSTAKA		95

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hasil pengujian eksperimental (Tudjono, 2015).....	6
Tabel 2.2	Hasil pengujian eksperimental (Mulyanto, 2020).....	8
Tabel 2.3	Nilai kekakuan sebelum dan sesudah penambahan <i>CFRP</i> serta kekakuan ekivalen (Mulyanto, 2020).....	8
Tabel 2.4	Data material dan geometri untuk <i>CFRP</i> (Lundqvist, 2005).....	11
Tabel 2.5	Parameter material epoksi (Lundqvist, 2005).....	11
Tabel 2.6	Hasil dan perbandingan kegagalan runtuh (Lundqvist, 2005).....	12
Tabel 2.7	Sifat mekanik material umum (Coronado, 2010)	13
Tabel 2.8	Sifat material pada analisis numerik balok seri A (Coronado, 2010).....	13
Tabel 2.9	Sifat material pada analisis numerik balok seri B dan C (Coronado, 2010)	14
Tabel 2.10	Hasil pengujian SL (Coronado, 2010)	14
Tabel 2.11	Hasil Pengujian BB (sumber: Coronado, 2010)	14
Tabel 2.12	Hasil perbandingan perhitungan antara <i>FEM</i> dan ACI (Salathiel, 2016)....	16
Tabel 4.1	Parameter <i>plasticity</i> beton.....	53
Tabel 4.2	Parameter baja tulangan Tudjono, dkk (2015).....	54
Tabel 4.3	Parameter baja tulangan Mulyanto, Tri dkk, (2020).....	54
Tabel 4.4	<i>Input material CFRP</i> pada ABAQUS Tudjono, dkk (2015) (Eamon, 2014 dan He, 2014).....	55
Tabel 4.5	Parameter material <i>CFRP</i> (brosur sikadur 231C).....	56
Tabel 4.6	<i>Input material CFRP</i> pada ABAQUS Mulyanto, dkk (2020) (Chaht, 2019)	56
Tabel 4.7	Sifat mekanik epoksi (Product data sheet Sikadur 330, 2016)	57
Tabel 4.8	Sifat mekanik epoksi (Roman, 2005).....	57
Tabel 5.1	Perhitungan <i>error</i> pada konvergensi <i>mesh</i>	64
Tabel 5.2	Perbandingan hasil <i>moment</i> tiap <i>software</i>	69
Tabel 5.3	Perbandingan beban maksimum variasi kuat beton dan eksperimental.....	71
Tabel 5.4	Perbandingan hasil numerik dan eksperimental Tudjono, dkk (2015)	72
Tabel 5.5	Perbandingan hasil beban <i>yield</i> dan ultimit balok B dan variasi interaksi serta <i>composite layup</i>	79



Tabel 5.6	Perbandingan hasil beban <i>yield</i> dan ultimit	80
Tabel 5.7	Nilai daktilitas dari balok-T	82
Tabel 5.8	Hasil kekakuan sebelum pembebanan berulang	83
Tabel 5.9	Hasil kekakuan sesudah pembebanan berulang	83
Tabel 5.10	Hasil kekakuan sebelum dan sesudah pembebanan berulang.....	84
Tabel 5.11	Hasil kekakuan ekuivalen pada setiap model	84
Tabel 5.12	Perbandingan hasil disipasi energi dengan dua metode.....	93
Tabel 5.13	Perbandingan perilaku hasil disipasi energi ABAQUS dan eksperimental .	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Data geometri benda uji (Tudjono, 2015)	4
Gambar 2.2	<i>Setting up</i> pengujian (Tudjono, 2015).....	5
Gambar 2.3	Mode keruntuhan dan retak pada balok–T (Tudjono, 2015).....	5
Gambar 2.4	Grafik kurva beban– lendutan (Tudjono, 2015).....	5
Gambar 2.5	Data geometri balok–T (Mulyanto, 2020)	7
Gambar 2.6	<i>Setting up</i> pengujian (Mulyanto, 2020).....	7
Gambar 2.7	Kurva beban– lendutan (Mulyanto, 2020)	8
Gambar 2.8	Pola retak dan keruntuhan: (a) BC (b) BFR1, dan (c) BFR2 (Mulyanto, 2020)	9
Gambar 2.9	Skema pengujian <i>four–point bending test</i> (Lundqvist, 2005).....	10
Gambar 2.10	Gambar 2.10 Model elemen hingga tipikal untuk tiga teknik perkuatan (Lundqvist, 2005)	12
Gambar 2.11	Skema pembebanan dan benda uji (Coronado, 2010).....	13
Gambar 2.12	Model balok benda uji (Salathiel, 2016)	15
Gambar 2.13	Bentuk elemen balok (Salathiel, 2016)	16
Gambar 2.14	Model balok (Purmawinata, 2020).....	17
Gambar 2.15	Kurva beban– lendutan (Purmawinata, 2020).....	17
Gambar 3.1	Balok–T dengan blok tekan di dalam sayap (Mulyanto, 2020)	19
Gambar 3.2	Balok–T dengan blok tekan di badan balok (Mulyanto, 2020).....	19
Gambar 3.3	Proses metode elemen hingga (Bathe, 2014)	20
Gambar 3.4	Contoh konvergensi: (a) <i>mesh</i> 100, (b) <i>mesh</i> 50, dan (c) <i>mesh</i> 25	21
Gambar 3.5	Arah dan permukaan elemen terkait serta posisi variabel keluaran titik integrasi elemen di bidang lapisan (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2003) ...	22
Gambar 3.6	(a) <i>number of ordering on elements</i> (b) <i>number of integration points for output</i> (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2003)	23
Gambar 3.7	Model <i>stress/displacement analysis</i> (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2003). 24	
Gambar 3.8	<i>General three– dimensional body with an eight node three– dimensional element</i> (Bathe, 2014)	25
Gambar 3.9	Ilustrasi proses solusi ketika digunakan untuk satu derajat kebebasan (Bathe, 2014).....	31

Gambar 3.10	Model hubungan tegangan– regangan baja (Park dan Paulay, 1975 dalam Tavio, 2009)	32
Gambar 3.11	Respon beton terhadap pembebanan uniaksial pada tarik dan tekan (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011).....	33
Gambar 3.12	Model tegangan– regangan tekan beton (Mander, 1988).....	35
Gambar 3.13	Kurva tegangan– regangan pasca kegagalan (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011)	36
Gambar 3.14	Kurva tegangan– <i>displacement</i> pasca kegagalan (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011)	36
Gambar 3.15	Skema lamina searah (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011).....	37
Gambar 3.16	Kuat tarik, tekan dan geser <i>CFRP</i>	39
Gambar 3.17	Hubungan tegangan– <i>displacement</i> (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011) .	41
Gambar 3.18	Respon pemisahan traksi (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011).....	42
Gambar 3.19	Langkah– langkah mode campuran berdasarkan traksi (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011)	42
Gambar 3.20	Evolusi kerusakan linear (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011)	43
Gambar 3.21	Ilustrasi respon mode campuran pada interaksi kohesif (ABAQUS <i>User’s Manual</i> , 2011)	43
Gambar 3.22	Rotasi antar ujung elemen balok (Park dan Paulay, 1975)	44
Gambar 3.23	Idealisasi hubungan beban–lendutan (Park dan Paulay, 1975).....	45
Gambar 3.24	Definisi kurva rasio daktilitas (El Tawil dan Deierlein, 1999)	46
Gambar 3.25	Balok dibebani lentur murni (Mulyanto, Tri dkk, 2020)	46
Gambar 3.26	Grafik pendekatan kekakuan (Timoshenko,1987 di dalam Mulyanto, 2020)	47
Gambar 3.27	Metode trapesium banyak pias (Sudjati, 2007).....	48
Gambar 4.1	Perilaku beton dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan Tudjono, dkk (2015): (a) kuat tekan beton dan (b) <i>concrete compression damage</i>	50
Gambar 4.2	Perilaku beton dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan Tudjono, dkk (2015): (a) kuat tarik beton dan (b) <i>concrete tension damage</i>	51
Gambar 4.3	Perilaku beton dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan Mulyanto, Tri dkk, (2020): (a) kuat tekan beton dan (b) <i>concrete compression damage</i>	52

Gambar 4.4	Perilaku beton dari pengujian eksperimental yang telah dilakukan Mulyanto, Tri dkk, (2020): (a) kuat tarik beton dan (b) <i>concrete tension damage</i>	53
Gambar 4.5	Perilaku baja tulangan Tudjono, dkk (2015).....	54
Gambar 4.6	Perilaku baja tulangan Mulyanto, Tri dkk, (2020).....	55
Gambar 4.7	Model benda uji (Mulyanto, 2020)	58
Gambar 4.8	Model benda uji Tudjono dkk. (2015)	58
Gambar 4.9	Model benda uji: (a) Variasi <i>CFRP</i> panjang L, (b) Variasi <i>CFRP</i> panjang 0,5L (Mulyanto, 2020)	59
Gambar 4.10	Model elemen hingga benda uji: (a) tampak samping, (b) tampak depan, (c) tampak 3D, dan (d) balok–T terbalik.....	59
Gambar 4.11	Model elemen hingga benda uji <i>CFRP</i> : (a) lentur dan (b) geser	60
Gambar 4.12	Skema pembebanan <i>three– point bending</i> : (a) balok kontrol dan (b) balok yang diperkuat <i>CFRP</i>	60
Gambar 4.13	Skema pembebanan <i>four– point bending</i> : (a) pembebanan awal hingga <i>firstcrack</i> , (b) pembebanan <i>firstcrack</i> hingga beban berulang, dan (c) pembebanan berulang hingga balok mengalami keruntuhan	61
Gambar 4.14	Tahapan penelitian	63
Gambar 5.1	Hasil uji konvergensi.....	64
Gambar 5.2	Pemodelan ketiga <i>software</i> : (a) RESPONSE2000, (b) SAP2000, dan (c) ABAQUS	66
Gambar 5.3	Perbandingan <i>input</i> material kuat tekan beton	67
Gambar 5.4	Perbandingan <i>input</i> material kuat tarik beton: (a) RESPONSE2000, (b) SAP2000, dan (c) ABAQUS	67
Gambar 5.5	Perbandingan <i>input</i> material kuat tarik baja: (a) SAP2000 dan ABAQUS serta (b) RESPONSE2000.....	68
Gambar 5.6	Kurva <i>moment– curvature</i> tiap <i>software</i>	68
Gambar 5.7	Kurva <i>load– displacement</i> : (a) $f'_c = 36.4$ MPa, (b) $f'_c = 28$ MPa, dan (c) $f'_c = 25$ MPa	70
Gambar 5.8	Kurva <i>load– displacement</i> perbandingan numerik dengan eksperimental	71
Gambar 5.9	Pola retak balok kontrol: (a) eksperimental, (b) numerik tampak 3D, dan (c) numerik tampak samping.....	73

Gambar 5.10	Pola retak balok yang diperkuat <i>CFRP</i> : (a) eksperimental, (b) numerik tampak 3D, dan (c) numerik tampak samping dan <i>CFRP</i> dilepas	74
Gambar 5.11	Perbandingan hasil analisis plastis dan uji eksperimental kurva beban–lendutan	75
Gambar 5.12	Perbandingan hasil simulasi numerik dan uji eksperimental kurva beban–lendutan	76
Gambar 5.13	Kurva beban– lendutan beban berulang simulasi numerik dan eksperimental: (a) balok kode A, (b) balok kode B1, dan (c) balok kode B2	77
Gambar 5.14	Kurva beban– lendutan balok kontrol	78
Gambar 5.15	Kurva beban– lendutan balok B1 dengan variasi <i>composite lay up</i> dan interaksi balok dengan <i>CFRP</i>	78
Gambar 5.16	Kurva beban lendutan simulasi numerik dan eksperimental: (a) balok kode B2 dan (b) gabungan	80
Gambar 5.17	Penentuan daktilitas: (a) balok kode A, (b) balok kode B1, dan (c) balok kode B2	81
Gambar 5.18	Penentuan nilai kekakuan awal dan nilai kekakuan <i>equivalent</i> : (a) balok kode A, (b) balok kode B1, dan (c) balok kode B2.....	83
Gambar 5.19	Perbandingan pola retak dan keruntuhan antara balok A dengan eksperimental	85
Gambar 5.20	Klasifikasi pola retak balok A.....	85
Gambar 5.21	Perbandingan pola retak dan keruntuhan antara balok B1 dengan eksperimental	86
Gambar 5.22	Klasifikasi pola retak balok B1	86
Gambar 5.23	Perbandingan pola retak dan keruntuhan antara balok kode A dan B1: (a) tampak samping, (b) tampak bawah, dan (c) <i>CFRP</i> pada balok B....	88
Gambar 5.24	Perbandingan pola retak dan keruntuhan antara balok B2 dengan eksperimental	89
Gambar 5.25	Klasifikasi pola retak balok B2	89
Gambar 5.26	Perbandingan pola retak dan keruntuhan antara balok kode A dan B1: (a) tampak samping, (b) tampak bawah, dan (c) <i>CFRP</i> pada balok B2..	92
Gambar 5.27	Kurva energi– <i>time</i> ABAQUS: (a) kode A, (b) kode B1, (c) kode B2, dan (d) gabungan.....	93