

ANALISIS POLA RETAK DAN MEKANISME KEGAGALAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN PERKUATAN LENTUR LEMBAR CFRP

I Made Suardana Kader dan I Made Jaya

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bali
Jalan Kampus Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Kabupaten Badung, Bali 80364
Telp. 0361 701981, Fax. 0361 701128

Abstrak: Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) sebagai material perkuatan pada balok, kolom, joint balok-kolom dan struktur lainnya seperti pasangan bata telah terbukti cukup mudah dan efektif untuk diterapkan. Penelitian ini dilakukan adalah untuk menganalisis perilaku balok beton bertulang dengan perkuatan CFRP dengan mutu beton (f'_c) dan jumlah lapis lembar CFRP yang berbeda terhadap kapasitas beban, deformasi, pola retak, tegangan pada baja, epoxy, beton dan CFRP serta mekanisme kegagalan. Mengingat pengujian laboratorium untuk mengetahui pengaruh beberapa parameter membutuhkan biaya yang relatif mahal, maka pemodelan dan analisis *finite element* dipilih dalam penelitian ini.

Balok-T standar Bina Marga dengan skala 1:4 dengan 4 titik beban yang sebelumnya ditest di Laboratorium Struktur, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Udayana, dipilih sebagai balok acuan dalam pemodelan dan analisis dengan program FEA LUSAS yang berbasis finite element. Model ini kemudian dikembangkan dengan memvariasikan jumlah lapis CFRP dan mutu beton sehingga menjadi 12 buah model. Semua model ini dibagi dalam tiga kelompok mutu beton yaitu $f'_c=14,5$ MPa, 21,7 MPa dan 31,2MPa. Pada setiap kelompok mutu beton terdiri atas 4 buah model balok-T yaitu satu buah balok-T tanpa perkuatan dan tiga buah balok-T dengan perkuatan 1, 2 dan 3 lapis lembar CFRP.

Balok-T dengan $f'_c = 14,5$ MPa yang diperkuat dengan 1 lapis dan 2 lapis CFRP mengalami kegagalan pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh pengelupasan CFRP pada tengah bentang, sedangkan pada mutu beton dengan $f'_c = 21,7$ dan $f'_c = 31,2$ MPa menunjukkan mekanisme kegagalan yang sama yaitu terjadi pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh kegagalan perekat (epoxy). Untuk balok-T tanpa perkuatan, seluruh mutu beton menunjukkan mekanisme kegagalan "*under reinforced*" yaitu kegagalan beton yang didahului dengan lelehnya baja tulangan.

Kata kunci: Balok beton bertulang, mutu beton, lembar CFRP.

Abstract: Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) as strengthening materials for beams, columns, and beam-column joints or other structures such as masonry walls were proven to be effective and easy to apply. This research is conducted to analyse behavior of beams strengthened with CFRP with concrete strength (f'_c) and number of CFRP layer differences to load capacity, deformation, crack patterns, stresses on rebars, epoxy, concrete and CFRP; and also failure mechanism of the beams. Considering the laboratory tests carried out to determine the effect of some parameters are more costly; therefore, finite element modeling and analysis were applied in this research.

A Bina Marga's T-beam standard with a scale of 1:4 with 4 point loadings that was tested previously in the Structural Laboratory, Civil Engineering Department, Udayana University is selected as a reference beam and to be modeled and analysed using LUSAS, a finite element analysis program. This model is then extended into 12 models by varying the number of CFRP layers and concrete strengths. All models are divided into three groups of concrete strength namely $f'_c = 14.5$ MPa, 21.7 MPa and 31.2 MPa. Each group consists of 4 models namely a T-beam without strengthening and three T-beams with 1, 2 and 3 layers of CFRP flexural strengthening sheets.

The T-beam with $f'_c = 14,5$ MPa strengthened with 1 and 2 layers of CFRP sheet experiences a debonding failure at the end of CFRP sheet that preceded by the de-bonding at the middle of CFRP sheet, while the concrete qualities of $f'_c = 21,7$ MPa and $f'_c = 31,2$ MPa show the same failure mechanism that is de-bonding occurs at the end of CFRP sheet preceded by the failure of adhesive (epoxy). For the T-beams without CFRP strengthening, all of concrete quality shows the failure mechanism of "*under reinforced*" that is the failure of the concrete preceded by yielding of steel reinforcement.

Keywords: Reinforced concrete beam, concrete quality, CFRP sheets.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Yang melatar belakangi alasan penelitian ini memilih simulasi pengujian laboratorium dengan pemodelan *finite element* adalah karena pengujian laboratorium untuk mengetahui perilaku struktur membutuhkan biaya yang relatif mahal dengan pelaksanaan yang cukup kompleks dan rumit, namun tetap diharapkan akan diperoleh hasil pengujian yang cukup akurat yang berkaitan dengan perilaku balok beton bertulang dengan perkuatan lentur lembar CFRP (Carbon Fibre Reinforced Polymer).

Seperti diketahui bahwa Fibre Reinforced Polymer (FRP) merupakan bahan yang ringan, kuat, anti magnetik dan tahan terhadap korosi. Bahan ini dapat digunakan sebagai pilihan untuk menggantikan material baja sebagai tulangan pada konstruksi beton bertulang atau sebagai material untuk menambah kekuatan konstruksi yang sudah ada.

FRP cukup mudah untuk ditempelkan pada beton bertulang dan dari beberapa penelitian terbukti ekonomis digunakan sebagai material untuk memperbaiki dan meningkatkan ketahanan struktur balok, kolom, pasangan bata, joint balok-kolom dan bagian struktur lainnya terhadap gempa bumi. FRP dapat berbentuk lembaran, selubung atau lapisan pada permukaan beton bertulang. FRP mempunyai kekuatan ultimit yang lebih tinggi dan bobot yang lebih rendah dibandingkan dengan baja sehingga penanganannya secara signifikan menjadi lebih mudah.

Beberapa perilaku yang berkaitan dengan prediksi kegagalan balok beton bertulang dengan perkuatan lentur menurut Simonelli, 2005 adalah:

1. "*Bond split*" yaitu lepasnya beton penutup baja tulangan pada bagian tarik dan akan terus menyebar sepanjang baja tulangan
2. "*Laminate peeling*" (pengelupasan) yaitu lepasnya perekat antara permukaan beton dan lembaran FRP.
3. Pengelupasan yang disebabkan retak geser.

Pengujian dan penelitian tentang balok beton bertulang dengan perkuatan lentur pernah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti Jumaat and Alam (2006), Raof and Zhang (1998), Alfano et.al. (2005), Garden et.al. (1997) dan yang lainnya serta hasilnya telah dipublikasikan.

Kemudahan untuk mendapatkan data geometri dan spesifikasi model adalah salah satu pertimbangan dipilihnya balok-T standar Bina Marga skala 1:4 dengan 4 titik beban sebagai model utama dalam penelitian ini. Model balok-T kemudian dikembangkan dengan menambahkan

perkuatan pada bagian lentur balok menggunakan lembar CFRP. Model balok-T dengan perkuatan lentur lembar CFRP dianggap sebagai balok komposit dan sebagai variabel adalah variasi mutu beton dan variasi jumlah lapis lembar CFRP.

Sebagai sarana untuk mengeksekusi model dipilih Program LUSAS yang berbasis finit elemen dengan pertimbangan bahwa program LUSAS cukup banyak digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya, kemudahan mendapatkan software dan kecukupan pemahaman penulis terhadap program tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang ingin dijawab pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana hubungan antara variasi jumlah lapis lembar CFRP sebagai perkuatan lentur balok-T beton bertulang dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan.
2. Bagaimana hubungan antara variasi mutu beton bertulang (f'_c) dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan.

1.3 Tujuan Analisis

Hasil akhir yang diharapkan dari Analisis Perilaku Balok Beton Bertulang dengan perkuatan lembar CFRP menggunakan metode finit elemen adalah untuk mengetahui:

1. Hubungan antara variasi jumlah lapis lembar CFRP sebagai perkuatan lentur balok beton-T bertulang dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan.
2. Hubungan antara variasi mutu beton bertulang (f'_c) dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan.

Manfaat yang diharapkan dari hasil Analisis ini adalah memberikan gambaran yang jelas mengenai hubungan antara variasi mutu beton dengan variasi jumlah lapis lembar CFRP pada masing-masing mutu beton terhadap kapasitas beban, deformasi, pola retak dan mekanisme kegagalan.

1.4 Batasan/Lingkup Penelitian

1.4.1 Geometri Balok

Untuk menghindari penyimpangan dari tujuan yang diharapkan, maka diambil batasan dan asumsi yang umum digunakan pada pemodelan FEA LUSAS. Balok beton diletakkan diatas dua tumpuan sendi dan rol. Penampang balok beton yang digunakan adalah penampang Balok-T standar Bina Marga dengan skala 1:4. Panjang total balok-T adalah 4050 mm, bentang diantara dua tumpuan 3750 mm. Spesimen balok-T didisain mengarah pada kekuatan model yang materialnya didisain menurut prototipe dan model struktur (Sabnis et.al., 1983 pada Sudarsana dan

Sukrawa, 2007). Spesimen balok-T mempunyai lebar sayap 425x50 mm², ukuran badan 112,5 x 212,5 mm². Tulangan tarik dan tulangan desak masing-masing adalah 5D10,6 mm dan 2D6,7 mm, sedangkan tulangan miring yang terpasang adalah 2D6,7 dengan jarak horisontal 215 mm dimulai pada jarak 365 mm dari ujung balok dan tulangan sengkang menggunakan 2D3,5 dengan jarak 140 mm.

1.4.2 Geometri Polymer dan FRP

Sebagai perekat, polymer dipasang dengan ketebalan 1,0 mm dengan lebar 80 mm. Ketebalan CFRP yang digunakan adalah 0,127 mm (SikaWrap® -231C) dengan lebar 80 mm.

1.4.3 Spesifikasi material

Rancangan spesifikasi material yang akan diteliti disajikan dalam Tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1
Rancangan spesifikasi material yang akan diteliti

Material	f'_c (MPa)	Modulus Young, E_c (MPa)	Poisson Ratio
Beton	a. 14.5	a. 17897.067	0,2
	b. 21.7	b. 21894.132	
	c. 31,2	c. 26252.771	
Baja	-	200000	0,3
CFRP	-	230000	0,2
Polymer	-	3800	0,3

Tensile Strength (MPa)	Strain at end softening curve	Initial uni axial yield stress (MPa)	Stress /Total Strain (MPa/mm/mm)
a. 2.285	0,0018	-	-
b. 2.795		-	-
c. 3.351		-	-
-	-	-	a. 366/ 0,0018
-	-	-	b. 368,34/ 0,003
-	-	-	3500/ 0,0152
-	-	30	-

II. METODE ANALISIS

2.1. Rancangan Penelitian

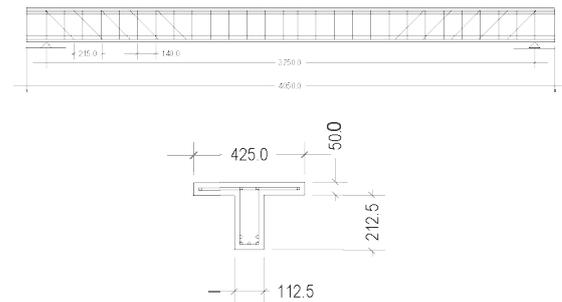
Analisis balok beton bertulang dengan perbedaan ketebalan perkuatan lentur Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) ini dilakukan dengan metode numerik menggunakan Program FEA LUSAS yang melibatkan hubungan antara variasi jumlah lapis lembar CFRP sebagai perkuatan lentur balok beton bertulang dengan variasi mutu beton (f'_c) terhadap beban, deformasi, pola retak dan mekanisme kegagalannya.

Analisis balok beton bertulang menggunakan program FEA LUSAS dengan empat titik lentur (dua beban titik dan dua

tumpuan sendi-rol) diharapkan dapat mewakili simpulan experimental dengan sebaik-baiknya, yang pada umumnya dapat diberikan oleh perilaku non linear balok beton bertulang.

2.3 Penetapan model

Penetapan model balok beton bertulang sebagai balok uji adalah balok-T standar Bina Marga skala 1:4 (Gambar 3.1) dengan empat titik beban diatas dua tumpuan sendi dan rol dengan panjang total 4050 mm, bentang diantara dua tumpuan 3750 mm. Ukuran penampang: tinggi total 262,5 mm, tinggi x tebal web 212,5 x 112,5 mm², tinggi x tebal flens 50,0 x 425,0 mm². Tulangan tarik dan tulangan desak masing-masing adalah 5D10,6 mm (3D10,6 pada lapis bawah, 2D10,6 pada lapis atas) dan 2D6,7 mm. Sedangkan tulangan miring yang terpasang adalah 2D6,7 dengan jarak horisontal 215 mm dimulai pada jarak 365 mm dari masing-masing ujung balok dan tulangan sengkang menggunakan 2D3,5 dengan jarak 140 mm. Tebal penutup beton adalah 20 mm.



Gambar 3.1
Geometri Balok-T

Sesuai dengan batasan penelitian ini, geometri balok yang sama kemudian divariasikan dengan tiga mutu beton yang berbeda yaitu $f'_c = 14,5$ MPa, $f'_c = 21,7$ MPa dan $f'_c = 31,2$ MPa dengan masing-masing balok diperkuat dengan lembar CFRP di bagian lentur dengan ketebalan 0.13 mm dengan lebar 80 mm. Ketebalan perekat (polymer) adalah 1,0 mm dengan lebar 80 mm. Masing- masing balok dengan mutu yang sama akan diperkuat berturut-turut dengan satu, dua dan tiga lapis CFRP.

3.2.1 Pengkodean Model

Untuk tiga balok-T tanpa perkuatan lembar CFRP dengan mutu beton yang berbeda diberi kode: BS-10 untuk mutu beton $f'_c=14,5$ MPa, BS-20 untuk mutu beton $f'_c=21,7$ dan BS-30 untuk mutu beton $f'_c=31,2$ MPa. Kemudian untuk masing-masing balok yang diperkuat dengan 1 lapis lembar CFRP diberi kode: BS-11, BS-21, BS-31, berturut-turut untuk 2 dan 3 lapis CFRP adalah BS-12, BS-22, BS-32; BS-13, BS-23, BS-

33. Jadi terdapat 12 (duabelas) balok yang akan diuji.

3.2.2 Pembebanan

Spesifikasi beban yang dikerjakan pada keseluruhan model balok-T adalah sama yaitu 2 (dua) beban titik simetris di tengah bentang balok dengan jarak 1000 mm dengan tahap pembebanan yang diinput pada program FEA LUSAS mulai dari 0,1 N sampai dengan beban pada saat balok mencapai lendutan 260 mm. Peningkatan setiap tahap pembebanan adalah 1000 N dengan inkrementasi otomatis (default FEA LUSAS) dan direncanakan 20 kali iterasi per inkremen.

Perilaku balok-T ditinjau pada beban yang mencapai retak awal dan beban layan yaitu beban yang mencapai lendutan ijin sebesar 12,5 mm ($1/300L$), pada beban 70 kN (kurang lebih 2 kali beban maksimum standar Bina Marga yang dikerjakan pada balok-T skala 1:4) dan pada beban yang mencapai lendutan 260 mm.

2.2 Analisis Data

Setelah keseluruhan proses terhadap data yang diinput pada program FEA LUSAS (runing program) selesai, selanjutnya untuk setiap model balok-T (BS-10; BS-11; BS-12; BS-13; BS-20; BS-21; BS-22; BS-23; BS-30; BS-31; BS-32 dan BS-33) akan diperoleh output yang sesuai dengan proses analisis terhadap data yang direncanakan yaitu hubungan antara variasi jumlah lapis lembar CFRP pada masing-masing variasi mutu beton (f'_c) dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan.

Hasil analisis akan ditampilkan dalam bentuk Tabel dan Gambar.

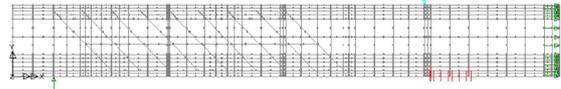
IV. Analisis, Hasil dan Pembahasan

4.1 Umum

Analisis dilakukan terhadap perilaku balok-T yang berkaitan dengan kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan. balok pada saat pembebanan pada balok-T mencapai retak awal, pada saat balok-T mencapai lendutan ijin 12,5 mm ($1/300 L$), pada saat balok-T dibebani sebesar 70 kN (kurang lebih sama dengan 2 kali beban kendaraan standar Bina Marga untuk model balok skala 1:4) dan saat balok-T mencapai batas lendutan 260 mm yaitu sampai pada saat dimana balok-T tanpa perkuatan lembar CFRP menunjukkan hubungan antara beban lendutan yang mendekati datar (kekakuan mendekati nol). Perilaku yang diamati adalah hubungan antara kapasitas beban, pola retak dan mekanisme kegagalan, sehubungan dengan variasi mutu beton dan jumlah lapis lembar CFRP. Hasil analisis akan ditampilkan dalam bentuk gambar

4.2 Pola retak, beban retak dan beban layan

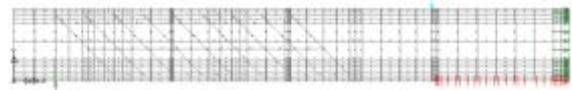
Beberapa pola retak balok-T pasca pembebanan yang mewakili pola-pola retak pada retak awal, retak pada beban layan (lendutan 12,5 mm), retak pada beban 70 kN, dan retak pada saat balok mencapai lendutan ijin 260 mm untuk variasi mutu beton dan jumlah lapis CFRP ditampilkan dalam Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.9.



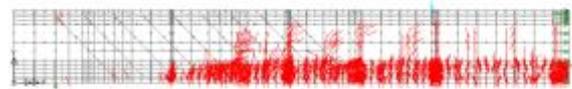
Gambar 4.1. BS-10 Pola retak awal pada beban $P = 8,06$ kN



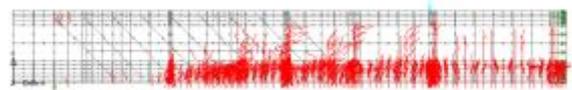
Gambar 4.2. BS-20 Pola retak awal pada beban $P = 9,53$ kN



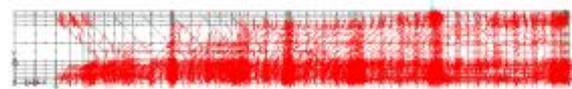
Gambar 4.3. BS-30 Pola retak awal pada beban $P = 10,91$ kN



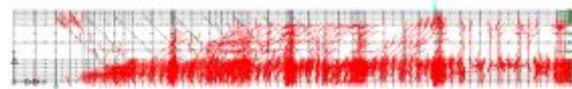
Gambar 4.4. BS-10 Pola retak pada beban layan $P = 39,22$ kN



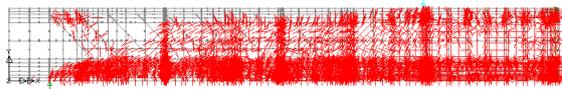
Gambar 4.5. BS-13 Pola retak pada beban layan $P = 42,82$ kN



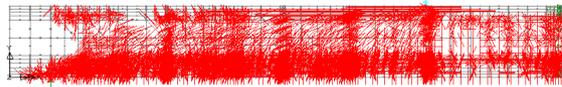
Gambar 4.6. BS-20 Pola retak pada beban $P = 70$ kN



Gambar 4.7. BS-23 Pola retak beban $P = 70$ kN



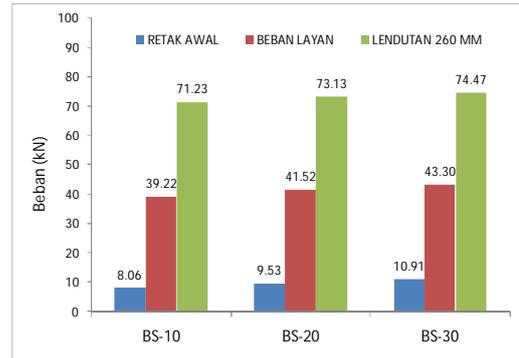
Gambar 4.8. BS-30 Pola retak pada beban P =79,5 kN (lendutan 260 mm)



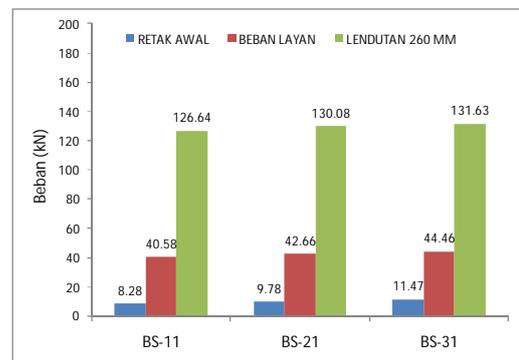
Gambar 4.9. BS-33 Pola retak pada beban P =162,1 kN (lendutan 260 mm)

Peningkatan mutu beton tanpa perkuatan, pola retak awal menunjukkan panjang retakan dan jumlah retak yang semakin besar, tetapi kemampuan balok-T memikul beban hingga mencapai retak awal akan semakin tinggi (Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.3). Proses penyebaran retak semakin cepat. Hal ini berhubungan dengan peningkatan kegetasan beton yang sebanding dengan peningkatan mutu beton. Pada beban layan, penambahan jumlah lapis tampaknya tidak memberikan pengaruh yang besar pada pola retak, kecuali peningkatan kemampuan balok dalam memikul beban. Lain halnya yang terjadi pada beban yang melampaui beban layan yaitu pada beban 70 kN, pola retak menunjukkan perbedaan yang khas sehubungan dengan penambahan jumlah lapis. Terlihat bahwa pada balok-T tanpa perkuatan (Gambar 4.6), retakan pada flens terjadi cukup panjang mulai dari tengah bentang melewati posisi beban. Namun dengan penambahan sejumlah lapis lembar CFRP pada sisi tarik beton dapat mengurangi retak yang terjadi pada flens dengan sangat baik (Gambar 4.7). Sedangkan pada beban yang mencapai lendutan 260 mm, meskipun balok mempunyai peningkatan kemampuan memikul beban sehubungan penambahan lapis lembar CFRP, namun pada flens akan terjadi retak geser yang cukup parah (Gambar 4.8 dan Gambar 4.9).

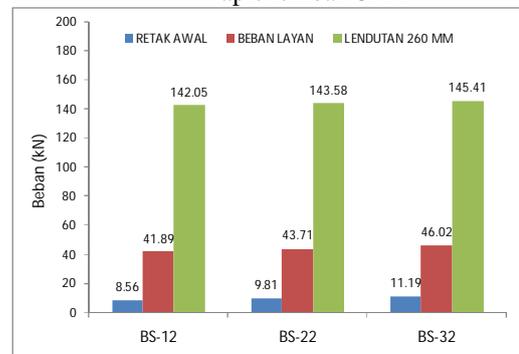
Gambar 4.10a menunjukkan peningkatan mutu beton tanpa perkuatan CFRP memberikan peningkatan beban secara signifikan pada retak awal, yang berkisar antara 18,24% sampai dengan 35,30% masing-masing untuk peningkatan mutu 49,66% (dari $f'_c = 14,5$ MPa menjadi $f'_c = 12,7$ MPa) dan 115,17% (dari $f'_c = 14,5$ MPa menjadi $f'_c = 31,2$ MPa). Sedangkan sampai pada beban layan, meskipun tidak sebesar yang dicapai pada retak awal, peningkatan mutu beton sebesar 49,66% memberikan peningkatan beban sebesar 5,87% dan 10,41% untuk peningkatan mutu beton sebesar 115,17%.



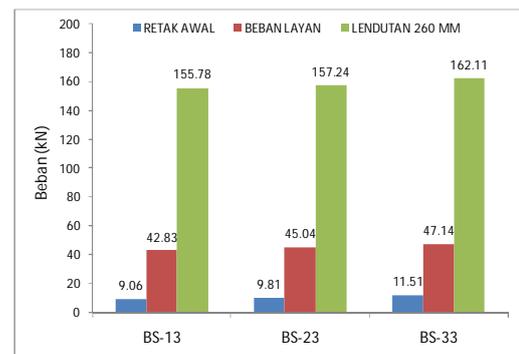
(a) Peningkatan beban pada variasi mutu beton balok-T tanpa perkuatan lembar CFRP



(b) Peningkatan beban pada variasi mutu beton balok-T dengan perkuatan 1 lapis lembar CFRP



(c) Peningkatan beban pada variasi mutu beton balok-T dengan perkuatan 2 lapis CFRP

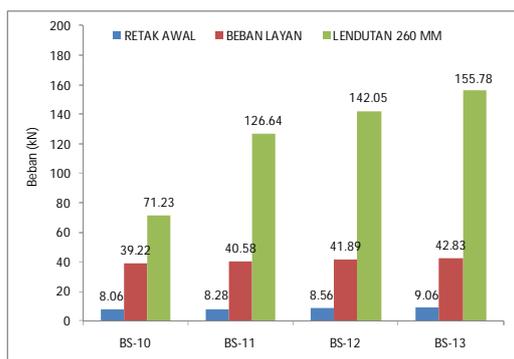


(d) Peningkatan beban pada variasi mutu beton balok-T dengan perkuatan 3 lapis CFRP

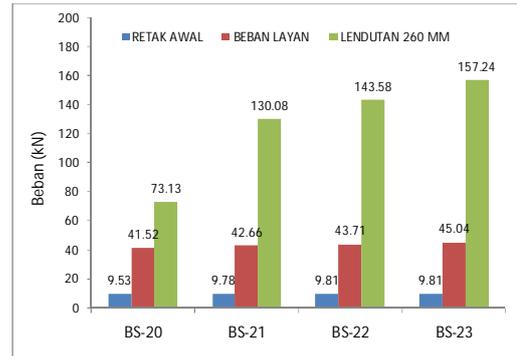
Gambar 4.10

Peningkatan beban vs peningkatan mutu beton pada kondisi retak awal, beban layan dan pada lendutan 260 mm pada variasi mutu beton dengan jumlah lapis lembar CFRP yang sama

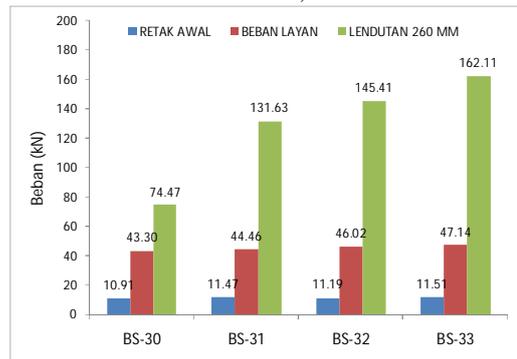
Gambar 4.10b sampai dengan Gambar 4.10d menunjukkan peningkatan beban pada retak awal, beban layan dan pada lendutan 260 mm yang terjadi pada mutu beton yang bervariasi dengan jumlah lapis CFRP yang sama. Peningkatan mutu beton dengan 1 lapis CFRP memperlihatkan peningkatan kemampuan balok memikul beban cukup baik pada beban yang mencapai retak awal, antara 18,11% sampai dengan 38,54% masing-masing untuk peningkatan mutu beton sebesar 49,66% dan peningkatan mutu beton sebesar 115,17%. Kemudian peningkatan mutu beton pada 2 lapis CFRP, peningkatan kemampuan balok memikul beban sampai dengan beban layan sedikit berkurang yaitu antara 14,6% sampai dengan 30,66%. Sedangkan pengaruh peningkatan mutu beton dengan 3 lapis CFRP, peningkatan kemampuan balok dalam memikul beban semakin kecil, hanya antara 8,28% sampai dengan 27,01%. Selanjutnya apabila beban yang bekerja pada balok-T semakin besar (melampaui beban layan), maka pengaruh peningkatan mutu beton terhadap peningkatan kemampuan balok dalam memikul beban semakin mengecil yaitu hanya 10,06% maksimum pada beban layan dan balok dengan perkuatan 3 lapis CFRP.



(a) Peningkatan beban pada variasi jumlah lapis lembar CFRP untuk mutu beton $f'_c = 14,5$ MPa



(b) Peningkatan beban pada variasi jumlah lapis lembar CFRP untuk mutu beton $f'_c = 21,7$ MPa



(c) Peningkatan beban pada variasi jumlah lapis lembar CFRP untuk mutu beton $f'_c = 31,2$ MPa

Gambar 4.11

Peningkatan jumlah lapis vs peningkatan beban pada kondisi retak awal, beban layan dan pada lendutan 260 mm pada variasi jumlah lapis dengan mutu beton yang sama

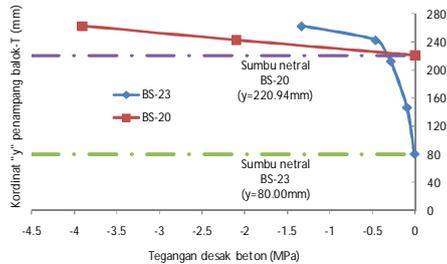
Gambar 4.11a sampai dengan Gambar 4.11c menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapis CFRP pada mutu beton yang sama, pada beban-beban yang lebih tinggi (beban yang melampaui beban layan) berpengaruh sangat baik terhadap peningkatan kemampuan balok dalam memikul beban. Pada lendutan 260 mm yang direncanakan, peningkatan beban bahkan mencapai 118,70% dibandingkan dengan balok-T tanpa perkuatan.

4.3 Mekanisme kegagalan

4.3.1 Pergeseran sumbu netral penampang

Gambar 4.22 menunjukkan salah satu contoh gambaran pergeseran sumbu netral penampang balok-T akibat penambahan perkuatan lentur lembar CFRP pada balok-T. Contoh yang digunakan untuk mewakili hal tersebut adalah dua balok-T dengan mutu beton $f'_c = 21,7$ MPa masing-masing tanpa perkuatan lembar CFRP dan dengan perkuatan 3 lapis lembar CFRP pada beban 12,19 kN. Penambahan

3 lapis perkuatan lembar CFRP untuk mutu beton $f'_c = 21.7$ MPa menggeser sumbu netral (N.A.) kebawah sejauh 140,94mm dan mengurangi tegangan desak beton maksimum sebesar 2,58 MPa (dari 3.91 MPa menjadi 1.33 MPa) atau sekitar 65,98%. Efektifitas penampang beton menjadi lebih baik dengan adanya perkuatan lentur pada balok-T.



Gambar 4.22

Salah satu contoh distribusi tegangan desak penampang balok-T dengan mutu $f'_c = 21.7$ MPa pada beban 12,19 kN

4.3.2 Mekanisme kegagalan balok-T akibat pembebanan

Tabel 4.4 sampai dengan Tabel 4.6 menyajikan analisis terhadap mekanisme kegagalan balok-T dengan membandingkan antara kemampuan maksimum masing-masing komponen balok-T (beton, baja tulangan, epoxy dan lapis lembar CFRP) dengan beban maksimum yang dicapai hingga masing-masing komponen balok tersebut mengalami kegagalan. Tabel 4.4 menunjukkan bahwa balok-T dengan $f'_c = 14,5$ MPa yang diperkuat 1 lapis dan 2 lapis CFRP saja yang mengalami kegagalan pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh pengelupasan CFRP pada tengah bentang yang terjadi pada beban 52,1 kN. Hal ini disebabkan oleh kemampuan menahan tegangan geser pada permukaan beton yang berhubungan dengan epoxy dengan mutu yang rendah relatif kecil dibandingkan dengan mutu beton yang mempunyai $f'_c = 21,7$ dan $f'_c = 31,2$ MPa. Sedangkan pada mutu beton yang lebih tinggi dengan $f'_c = 21,7$ dan $f'_c = 31,2$ MPa urutan mekanisme kegagalannya berbeda dengan mutu beton dibawahnya. Hampir semua tipe balok menunjukkan mekanisme kegagalan yang sama yaitu terjadi pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh kegagalan perekat (epoxy) pada beban terendah 69,4 N. Kemudian untuk balok-T tanpa perkuatan, seluruh mutu beton menunjukkan mekanisme kegagalan “*under reinforced*” yaitu kegagalan beton yang didahului dengan lelehnya baja tulangan. Kemudian untuk semua balok dengan berbagai kombinasi (mutu beton dan jumlah lapis CFRP)

menunjukkan bahwa CFRP baru terlihat bekerja cukup efektif setelah baja tulangan mengalami leleh pada beban antara 49 kN sampai dengan 57,2 kN.

Tabel 4.4

Beban batas (N) masing-masing komponen balok-T yang menyebabkan kegagalan pada mutu beton $f'_c = 14,5$ MPa

K O D E	BAJA $f_y = 366,0$ MPa	BETON				EPOXY $f_y = 30,0$ MPa	CFRP $f_y = 3500$ MPa	MEKANISME KEGAGALAN
		$\epsilon'_c =$	DEBONDING		C-L			
			UJUNG CFRP	C-L				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)			
BS-10	48958.36	60430.22					(1)-(2)	
BS-11	52076.51	78627.83	82847.97	75445.43	66949.01	86833.32	(1)-(5)-(4)-(2)-(3)-(6)	
BS-12	54503.06	87741.91	65363.50	100573.17	75680.89	100513.54	(1)-(3)-(5)-(2)-(6)	
BS-13	56886.92	90567.47	69756.72		81743.41	113413.21	(1)-(3)-(5)-(2)-(6)	

Tabel 4.5

Beban batas (N) masing-masing komponen balok-T yang menyebabkan kegagalan pada mutu beton $f'_c = 21,7$ MPa

K O D E	BAJA $f_y = 366,0$ MPa	BETON				EPOXY $f_y = 30,0$ MPa	CFRP $f_y = 3500$ MPa	MEKANISME KEGAGALAN
		$\epsilon'_c =$	DEBONDING		C-L			
			UJUNG CFRP	C-L				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)			
BS-20	51119.87	64050.85					(1)-(2)	
BS-21	52837.23	84739.79	75496.72		69366.10	87106.12	(1)-(5)-(3)-(2)-(6)	
BS-22	55573.76	91126.68	76607.12		76607.12	100757.79	(1)-(5)(3)-(2)-(6)	
BS-23	57214.61	98408.64	82528.42		82528.42	114219.85	(1)-(5)(3)-(2)-(6)	

Tabel 4.6

Beban batas (N) masing-masing komponen balok-T yang menyebabkan kegagalan pada mutu beton $f'_c = 31,2$ MPa

K O D E	BAJA $f_y = 366,0$ MPa	BETON				EPOXY $f_y = 30,0$ MPa	CFRP $f_y = 3500$ MPa	MEKANISME KEGAGALAN
		$\epsilon'_c =$	DEBONDING		C-L			
			UJUNG CFRP	C-L				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)			
BS-30	50251.66	66098.10					(1)-(2)	
BS-31	54363.40	91096.93	69643.39		69643.39	86771.27	(1)-(5)(3)-(2)-(6)	
BS-32	56796.16	99358.42	76808.21		76808.21	102884.62	(1)-(5)(3)-(2)-(6)	
BS-33	57485.69	185456.98	85310.78		85310.78	114892.36	(1)-(5)(3)-(2)-(6)	

V. Simpulan dan Saran

5.1 Simpulan

Pemaparan terhadap pola retak dan mekanisme kegagalan balok balok-T beton bertulang dengan perkuatan lentur lembar CFRP dengan variasi mutu beton dan jumlah lapis lembar CFRP yang dimodel dengan elemen dua dimensi (2-D) Finite Element Analysis LUSAS (FEA LUSAS) menghasilkan simpulan sebagai berikut:

1 Secara umum pola retak pada peningkatan mutu beton tanpa perkuatan lembar CFRP, menunjukkan panjang retakan dan jumlah retak

yang semakin besar, beban untuk mencapai retak awal semakin tinggi dan proses terjadinya retak semakin cepat, sedangkan penambahan jumlah lapis lembar CFRP pada berbagai variasi mutu beton bersifat mengurangi intensitas retakan.

2 Variasi jumlah lapis CFRP terhadap penurunan tegangan epoxy dan CFRP lebih berpengaruh dibandingkan dengan variasi mutu beton, sebab CFRP baru terlihat bekerja lebih efektif ketika beban melampaui beban layan.

3 Balok-T dengan yang diperkuat 1 lapis dan 2 lapis CFRP mengalami kegagalan pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh pengelupasan CFRP pada tengah bentang. Pada mutu beton yang lebih tinggi dengan $f'_c = 21,7$ dan $f'_c = 31,2$ MPa urutan mekanisme kegagalannya berbeda dengan mutu beton dengan $f'_c = 14,5$ MPa. Hampir semua tipe balok menunjukkan mekanisme kegagalan yang sama yaitu terjadi pengelupasan pada ujung CFRP yang didahului oleh kegagalan perekat (epoxy). Kemudian untuk balok-T tanpa perkuatan, seluruh mutu beton menunjukkan mekanisme kegagalan "under reinforced" yaitu kegagalan beton yang didahului dengan lelehnya baja tulangan.

3.1 Saran

Hasil dan penyajian penelitian ini kemungkinan mempunyai beberapa kekurangan. Untuk penyempurnaan dan sebagai hasil pembandingan penelitian ini, disarankan:

1. Untuk penelitian lebih lanjut, perlu dilakukan pemodelan menggunakan Analisis elemen 3-D sehingga secara visual dapat dilihat perilaku masing-masing komponen balok-T pada setiap tahap pembebanan dan mekanisme kegagalan masing-masing komponen balok pada saat mencapai beban yang menyebabkan keruntuhan, dimana pada pemodelan 2-D hal tersebut tidak dapat dilihat secara visual pada model balok yang dibuat.
2. Pemodelan balok sederhana dengan analisis elemen 2-D dapat digunakan untuk mengetahui perilaku lentur balok dengan waktu yang lebih singkat dan hasilnya cukup memadai.
3. Penelitian tentang hubungan antara variasi mutu beton dengan variasi jumlah layer mungkin dapat dilanjutkan dengan mengambil variasi persentase ketebalan layer CFRP dengan tinggi balok, sehingga didapat ketebalan layer CFRP yang paling efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. t.t. Lusas Modeller User Manual version 13.57.
- [2] Anonim. t.t. Lusas Theory Manual version 13.57.
- [3] Banthia N. *Fibre Reinforced Polymer in Concrete Construction and Advanced*

Repair Technologies. Departement of Civil Engeneering University of British Columbia, Internet. [download 3 Oktober 2007]. Diperoleh dari: <http://www.beamretrofitted.com>.

- [4] Chu-Kia Wang, Salmon C. G. alih bahasa Binsar Hariandja. 1986. *Disain Beton Bertulang*. Jakarta: Erlangga.
- [5] Cook R. D., Malkus D. S., Plesha M. E., 1989. *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, Canada: John Wiley and Sons Inc.
- [6] Garden H. N., Hollaway L.C. and Thorne A.M. 1997. *A preliminary evaluation of carbon reinforced polymer plates for strengthening reinforced concrete members*. Proc. Instn. Cin. Engrs. Structs & Bldgs. Mei.
- [7] Giulio A., Luciano R. and Simonelli G. 2005. *Modelling of Failure Mechanisms in RC Beams Retrofitted with FRP in Flexure*. Barcelona: Jurnal VIII International Conference on Computational Plasticity.
- [8] Lamana A. J., Bank L. C. and Scott D. W. 2001. *Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fastener and Fibre-Reinforced Polymer Strips*. ACI Structural Journal. Mei-Juni.
- [9] Li Changjie, An Xuchui and Lieping Ye. 2003. *Failure Simulation of FRP-Flexural-Strengthened RC Beams*. The Ninth East Asia-Pasific Conference on Structural Engineering and Construction.
- [10] Malek A. M., Saadatmanesh H., and Ehsani M. R. 1998. *Prediction of Failure Load R/C Beams Strengthened with RFP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End*. ACI Structural Journal. January-February.
- [11] Meisam Safari Gorji. 2009. *Analysis of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Using Energy Variation Method*. World Applied Sciences Journal. IDOSI Publications.
- [12] Raoof M. and Zang S. 1998. *An insight into the stuctural behavior of reinforced concrete beam with externally bonded plates*. 1997. Proc. Instn. Cin. Engrs. Structs & Bldgs. November.
- [13] Santhakumar R. and Chandrasekaran E., Dhanaraj R. 2004. *Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams using Carbon Fibre Composites*. Jurnal Electronic journal of Structural Engineering, 4.
- [14] Simonelli G. *Finite Element Analysis of RC beams retrofitted with Fibre Reinforced Polymer*, Internet, [download 3 Oktober

- 2007], Diperoleh dari : <http://www.beamretrofitted.com>.
- [15] SNI 7394:2008. 2008. *Tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton untuk konstruksi bangunan gedung dan perumahan*. Badan Standardisasi Nasional (BSN). ICS 91.010.20.
- [16] Sudarsana I K. and Sukrawa M. 2007. *Flexural Strengthening of T-Beam Bridge Girder Using External Laminate of CFRP Sheets*. Jurnal The 1st International Conference of European Asian Civil Engineering Forum. Indonesia: Universitas Pelita Harapan. 26-27 September.
- [17] Suhendro B. 2000. *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*. Yogyakarta.
- [18] Sukrawa M., Pringgana G., Sudarsana I K. 2006. *Behavior of RC T-Beam Strengthened With Steel Plate*. Jurnal 2nd Asian Concrete Federation Conference. Bali 20-21 November.
- [19] Suta W. I. N. 2008. *Pemodelan Protipe Balok-T Jembatan Standar Bina Marga dengan Pelat Baja sebagai Perkuatan Lentur* (tesis). Denpasar: Universitas Udayana.
- [20] Zamin J. M. and Ashraful A. Md. 2006. *Problem Associated with Plate Bonding Methods of Strengthening Reinforced Concrete Beams*. Journal of Applied Sciences Research. INSInet Publication.