



**TESIS RC2501**

**PERILAKU KOLOM BETON PERSEGI DENGAN  
*RETROFITTING E-GLASS FIBER REINFORCED  
POLYMER (E-GFRP) STRAP* TERHADAP BEBAN  
AKSIAL TEKAN**

**DINIS PINTO  
03111450020004**

**Dosen Pembimbing :**  
**Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D.**  
**Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA.**

**Departemen Teknik Sipil  
Fakultas Teknik Sipil Perencanaan Dan Kebumihan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
2020**

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (M.T.)**  
di  
**Institut Tehnologi Sepuluh Nopember**

Oleh :  
Dinis Pinto  
NRP: 03111450020004

Tanggal Ujian : 12 Juni 2017  
Periode Wisuda : Maret 2020

Disetujui oleh:  
Pembimbing :

1. Prof. Tavio, S.T. M.T. Ph.D  
NIP. 1970032719970201001

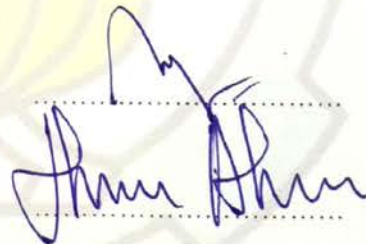
2. Prof. Dr. Ir. Gusti Putu Raka, DEA  
NIP. 19500403197603100



Penguji :

1. Ir. Faimun, M.Sc. Ph.D  
NIP. 196306051989031004

2. Harun Al Rasyid, ST, MT, PhD  
NIP. 198308082008121005



**Kepala Departemen Teknik Sipil**  
**Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan Dan Kebumihan (FTSPK)**



**Dr. Fachrudin** Lasminto, ST., M.Sc.  
NIP. 197212021998021001

**PERILAKU KOLOM BETON PERSEGI  
DENGAN *RETROFITTING*  
*E-GLASS FIBER REINFORCED POLYMER*  
(*E-GFRP*) STRAP TERHADAP BEBAN AKSIAL TEKAN**

**Nama** : Dinis Pinto  
**NRP** : 03111450020004  
Pembimbing : Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D.  
Ko Pembimbing : Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA.

**ABSTRAK**

Struktur beton yang sering kita jumpai banyak yang mengalami kerusakan. disebabkan oleh kualitas bahan yang tidak memenuhi spesifikasi, pembebanan yang berlebih, kriteria perencanaannya yang tidak sesuai dengan standar, perubahan fungsi bangunan ataupun disebabkan oleh bencana alam seperti gempa bumi.

Salah satu upaya yang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan suatu struktur beton bertulang dalam memikul beban adalah dengan meningkatkan kekuatan dan daktilitas struktur tersebut dengan menggunakan metode *E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP) Jacketing*. Metode *Jacketing E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP)* penuh (*full wrap*) merupakan suatu metode perkuatan yang mampu memberikan kekuatan tambahan guna meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom.

Pemakaian metode *jacketing E-GFRP* penuh (*full wrap*) telah banyak dikenal dalam perkuatan kolom beton, namun demikian, pemakaian dengan membungkus secara penuh (*full wrap*) bisa jadi terlalu berlebihan dibandingkan dengan kebutuhannya. Oleh karena itu tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh *E-GFRP straps* sebagai eksternal dalam perilaku aksial tekan kolom beton persegi perkuatan dengan meningkatkan spasi *strap* yang bervariasi.

Kata kunci: Kolom beton, pengekang, gempa bumi, retrofit eksternal, *E-GFRP strap*.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **AXIAL BEHAVIOR OF SQUARE CONCRETE COLUMNS RETROFITTED BY E-GFRP STRAPS**

**Name** : Dinis Pinto  
**Registration No.** : 03111450020004  
**Supervisor** : Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D.  
**Co Supervisor** : Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA.

### **ABSTRACT**

Concrete structures are very vulnerable to seismic hazard. Damages to these structures could be caused by the poor quality of materials used that do not meet the specifications, or due to excessive overloading, lack of planning criteria which do not conform with the standards, changes in the function of the building or caused by natural disasters such as earthquakes. One of the efforts made to improve the capability of a reinforced concrete structure is to increase the strength and ductility of the members using Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Jacketing. The use of full-wrapped GFRP jacketing as an alternative of retrofitting methods could be uneconomical in some cases. Hence the aim of the study is to investigate the effects of GFRP straps as external retrofit in improving the axial behavior of square concrete columns. The variation studied includes the number of layers, width, and spacing of the straps.

**Keywords:** Concrete columns, confinement, earthquakes, external retrofit, GFRP, straps, seismic.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan karuniaNya sehingga, penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul "***Perilaku Kolom Beton Persegi Dengan Retrofitting E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP) Strap Terhadap Beban Aksial Tekan***".

Penulisan Tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat kelulusan bagi mahasiswa Strata Dua (S2) Jurusan Sipil, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, Dan Kebumihan (FTSLK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Pengerjaan tesis ini tentu tak luput dari sejumlah kesalahan dan masih jauh dari kesempurnaan, namun penulis telah berusaha semaksimal mungkin untuk dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini dengan sebaik-baiknya atas bantuan, petunjuk dan kerja sama dari berbagai pihak yang terlibat langsung, sehingga penulis perlu menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Tavio, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing utama yang telah bersedia untuk membantu, membimbing, mengarahkan, dan memotivasi penulis untuk bangkit kembali menyelesaikan tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. I Gusti Putu Raka, DEA. Selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan saran, kritik dan arahan dengan ketelitian selama saya menyusun dan menyelesaikan tesis ini.
3. Laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian eksperimental benda uji silinder dan pengujian.
4. P.T. Bhirawa Steel yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian eksperimental pengujian benda uji kolom beton E-GFRP dilaboratorium.
5. Teknisi dan Laboran P.T. Bhirawa Steel yang telah membantu dan meluangkan waktu selama persiapan pengujian dan laporan hasil pengujian.

6. P.T. MSI sebagai perwakilan dari TYFO yang bersedia membantu menyediakan material *E-GFRP*.
7. Teknisi dan laboran P.T. MSI yang telah membantu pemasangan *E-GFRP* strap pada benda uji kolom beton.

Untuk itu diharapkan saran dan masukan untuk kesempurnaan Tesis nantinya. Penulis senantiasa terbuka untuk menerima masukan dan saran. Akhir kata, penulis berharap semoga Tesis ini bermanfaat bagi semua pihak dan semoga amal baik yang telah di berikan kepada penulis mendapat balasan dari Tuhan Yang Maha Esa.

Surabaya, 30 Januari 2020

Penulis



## UCAPAN TERIMA KASIH

Selama menyelesaikan penyusunan Tesis ini penulis banyak mendapat masukan dari berbagai pihak, baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak yang turut membantu :

1. Kedua orang tua, dan segenap keluarga besar penulis yang selalu memberikan kasih sayang, doa serta dorongan moril maupun materil yang tak terhingga.
2. Istriku tercinta Silvia P. C. do Carmo Viera dan semua kakak-kakakku atas doa dan dukungannya serta kesetiaannya selama proses perkuliahan dan penyusunan Tesis ini sehingga dapat menyelesaikan studi.
3. Dan semua teman-teman atau pihak-pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan dukungan, motivasi dan bantuan kepada penulis ketika dalam menghadapi kesulitan- kesulitan.

Akhir kata penulis ucapkan, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan Rahmat dan karuniaNya untuk segala kebaikan yang telah dibrikan.

Surabaya, 30 Januari 2020

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

|  |     |
|--|-----|
| LEMBAR PENGESAHAN .....  | i   |
| ABSTRAK .....  | iii |
| ABSTRACT .....   | v   |
| KATA PENGANTAR .....   | vii |
| UCAPAN TERIMA KASIH.....   | ix  |
| DAFTAR ISI.....  | xi  |
| DAFTAR GAMBAR .....  | xv  |
| DAFTAR TABEL.....  | xix |
| DAFTAR NOTASI.....   | xxi |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....  | 1   |
| 1.1 Latar Belakang .....   | 1   |
| 1.2 Perumusan Masalah.....   | 3   |
| 1.3 Pembatasan Masalah .....   | 3   |
| 1.4 Tujuan.....  | 4   |
| 1.5 Manfaat.....   | 4   |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....   | 5   |
| 2.1 Umum.....  | 5   |
| 2.2 Kolom.....   | 5   |
| 2.3 Perilaku Kolom Akibat Beban Aksial.....  | 6   |
| 2.4 Model Tegangan-Regangan Beton Normal.....  | 6   |
| 2.4.1 Model Hubungan Tegangan-Regangan Beton Menurut<br>Hognestad (1951) .....                     | 7   |
| 2.4.2 Model Hubungan Tegangan-Regangan ( $f_c-\varepsilon_c$ ) Beton Kent and<br>Park (1971) ..... | 8   |
| 2.4.3 Model Hubungan Tegangan-Regangan Mander, et.,al<br>(1988) .....                              | 10  |
| 2.4.4 Model Hubungan Tegangan-Regangan Menurut Pelegrino<br>dan Modena (2010) .....                | 11  |
| 2.4.5 Pengekangan Beton dengan FRP .....   | 13  |
| 2.4.4.1 Fardis dan Khalili (1982) .....  | 14  |
| 2.4.4.2 Saadatmanesh, dkk ( 1994) .....  | 17  |
| 2.4.6 Material Fiber Reinforced (FRP) Komposit.....  | 17  |
| 2.4.6 E-Glass Fiber Reinforced ( E-GFRP).....  | 21  |
| 2.4.7 Pengekang Beton .....  | 22  |
| 2.4.8 Metode Pengekang Beton.....  | 22  |
| 2.4.8.1 Full Wrapping.....   | 22  |
| BAB 3 PERSIAPAN DAN PENGUJIAN EKSPERIMENTAL .....  | 25  |
| 3.1 Umum.....  | 25  |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2     | Parameter Penelitian .....  | 25 |
| 3.3     | Kode Benda Uji Kolom .....  | 26 |
| 3.4     | Benda Uji kolom Beton E-GFRP strap dengan variasi lebar, spasi dan Lapis..... | 27 |
| 3.5     | Desain Benda Uji Di Laboratorium.....   | 36 |
| 3.5.1   | Beton.....  | 36 |
| 3.5.2   | Material E-Glass Fiber Reinforced Polymer ( E-GFRP).....                      | 38 |
| 3.5.2.1 | Test set up .....   | 41 |
| 3.5.3   | Benda Uji Silinder Beton.....   | 43 |
| 3.5.4   | Benda Uji Kolom Beton.....  | 45 |
| 3.6     | Pengujian Di Laboratorium .....   | 47 |
| 3.6.1   | Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton .....                                     | 47 |
| 3.6.2   | Pengujian Benda Uji Kolom Beton Persegi .....                                 | 49 |
| 3.7     | Diagram Alir Penelitian.....  | 51 |

#### BAB 4 ANALISA HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.1     | Umum .....   | 53 |
| 4.2     | Hasil Eksperimental Benda Uji Kolom Beton.....   | 53 |
| 4.3     | Pengamatan Hasil Pengujian Benda Uji Kolom Beton Tanpa E-GFRP.....   | 54 |
| 4.3.1   | Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton dengan variasi lebar C1-W2-S6-11, C2-W3-S6-1L dan C3-W4-S6-1L.....                     | 54 |
| 4.3.2   | Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton dengan variasi lebar C4-W2-S6-2L,C5-W3-S6-2L dan C6-W4-S6-2L.....                      | 57 |
| 4.3.3   | Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton dengan variasi lebar C7-W2-S6-3L,C8-W3-S6-3L dan C9-W4-S6-3L.....                      | 60 |
| 4.3.4   | Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Spasi .....   | 63 |
| 4.3.5   | Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Lapis.....  | 66 |
| 4.3.6   | Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Full Wrap.....   | 69 |
| 4.3.7   | Hasil Pengujian eksperimental laboratorium di kelompokan berdasarkan tiga parameter yaitu pengaruh spasi , lebar, dan jumlah lapisan ..... | 70 |
| 4.3.7.1 | Pengaruh Lebar E-GFRP .....  | 70 |
| 4.3.7.2 | Pengaruh Spasi E-GFRP .....  | 72 |
| 4.3.7.3 | Pengaruh layer E-GFRP.....   | 75 |

|   |    |
|---|----|
| BAB 5 ANALISIS PEMBAHASAN PERUMUSAN USULAN TEGANGAN<br>REGANGAN.....  | 77 |
| 5.1 Analisa perhitungan diagram tegangan regangan benda uji kolom<br>beton yang dikekang E-GFRP menurut Pelegrino dan Modena (2010).. | 77 |
| 5.2 Analisa perhitungan diagram tegangan regangan benda uji kolom<br>beton yang dikekang E-GFRP menurut usulan model .....            | 70 |
| <br>  |    |
| BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN.....   | 89 |
| 5.3 Kesimpulan.....   | 89 |
| 5.4 Saran.....  | 90 |
| <br>  |    |
| DAFTAR PUSTAKA .....  | 91 |
| LAMPIRAN .....  | 93 |

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Gambar 2.1  | Kurva Hubungan Tegangan Regangan Beton (Karasin, dkk 2014).....   | 7  |
| Gambar 2.2  | Model Hognestad 1951 (Ka.....   | 7  |
| Gambar 2.3  | Hubungan Tegangan-Regangan Beton Menurut Kent dan Park (1971) .....                                       | 8  |
| Gambar 2.4. | Hubungan Tegangan-Regangan Beton Menurut Mander, et.,al (1988).....                                       | 10 |
| Gambar 2.5  | Hubungan Tegangan-Regangan FRP Strap (saadatmanesh, dkk 1992).....  | 17 |
| Gambar 2.6  | Material ARFP, CFRP dan GFRP .....  | 19 |
| Gambar 2.7  | Tegangan Regangan Aksial Beton Terkerkang dan tidak Terkekang Spoelstra dan Monti, 1999 ( Cui 2009) ..... | 19 |
| Gambar 2.8  | Full Wrap, Strip (Karaghool, 2013) .....  | 23 |
| Gambar 3.1  | Benda Uji Kolom E-GFRP strap dengan variasi lebar C1-W2-S6-1L, C2-W3-S6-1L, C3-W4-S6-1L.....              | 28 |
| Gambar 3.2  | Benda Uji Kolom E-GFRP strap dengan variasi lebar C4-W2-S6-2L, C5-W3-S6-2L, C6-W4-S6-2L.....              | 30 |
| Gambar 3.3  | Benda Uji Kolom E-GFRP strap dengan variasi lebar C7-W2-S6-3L, C8-W3-S6-3L, C9-W4-S6-3L.....              | 31 |
| Gambar 3.4  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP dengan variasi spasi.....  | 32 |
| Gambar 3.5  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP dengan variasi spasi (lanjutan).....   | 33 |
| Gambar 3.6  | Benda Uji Kolom E-GFRP full wrap .....  | 34 |
| Gambar 3.5  | Benda Uji Kolom E-GFRP full wrap (lanjutan).....  | 35 |
| Gambar 3.6  | Benda Uji Kolom Beton Polos .....   | 36 |
| Gambar 3.7  | Peralatan dan Pembulatan kolom beton .....  | 39 |
| Gambar 3.8  | Persiapan dan Pemasangan E-GFRP Strap Pada Benda Uji Kolom .....  | 40 |
| Gambar 3.9  | Persiapan dan Pemasangan E-GFRP Strap Pada Benda Uji Kolom(lanjutan dari Gambar 3.8.....                  | 40 |
| Gambar 3.10 | Pemasangan E-GFRP wrap .....  | 41 |
| Gambar 3.11 | Test set up.....  | 42 |
| Gambar 3.11 | Test set up (lanjutan) .....  | 43 |
| Gambar 3.12 | Analisa Material Beton.....   | 44 |
| Gambar 3.13 | Persiapan dan pengecoran benda uji silinder beton .....   | 45 |
| Gambar 3.14 | Persiapan dan pengecoran benda uji silinder beton (lanjutan dari gambar 3.13).....                        | 46 |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Gambar 3.14  | Persiapan dan Pengecoran Benda Uji Silinder Beton<br>(lanjutan).....                                | 47 |
| Gambar 3.15  | Persiapan sebelum pengujian benda uji silinder beton .....  | 48 |
| Gambar 3.16  | Skema Percobaan Tekan Monotonik.....  | 49 |
| Gambar 3.16  | Skema Percobaan Tekan Monotonik (lanjutan) .....  | 50 |
| Gambar 3.17  | Diagram Alir Penelitian .....   | 51 |
| Gambar 4.1   | Benda Uji Kolom Dikekang E-GFRP strap dengan variasi<br>lebar setelah mengalami kegagalan.....      | 55 |
| Gambar 4.2   | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dengan<br>Variasi Lebar (W) .....                      | 57 |
| Gambar 4.3   | Benda Uji Kolom Dikekang E-GFRP Bervariasi .....  | 58 |
| Gambar 4.4   | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom dan Variasi<br>Lebar (W) .....                               | 60 |
| Gambar 4.5   | Benda Uji Kolom Dikekang E-GFRP bervariasi .....  | 61 |
| Gambar 4.6   | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi Lebar (W) .....                         | 63 |
| Gambar 4.7 a | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi Spasi dengan satu lapis .....           | 64 |
| Gambar 4.7 b | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi Spasi dengan dua lapis .....            | 65 |
| Gambar 4.7 c | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi Spasi dengan tiga lapis .....           | 65 |
| Gambar 4.8 a | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi lapis .....                             | 67 |
| Gambar 4.8 b | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi lapis .....                             | 67 |
| Gambar 4.8 c | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi lapis .....                             | 68 |
| Gambar 4.8 d | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi lapis .....                             | 68 |
| Gambar 4.8 e | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom Beton dan<br>Variasi lapis .....                             | 69 |
| Gambar 4.9   | Kurva Tegangan Regangan Spesimen Kolom full wrap.....   | 70 |
| Gambar 4.10  | Pengaruh Lebar Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP pada<br>saat Tegangan- Regangan Puncak 100% .....    | 71 |
| Gambar 4.11  | Pengaruh Lebar Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP<br>terhadap Regangan pada saat tegangan Puncak ..... | 71 |



|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.12 | Pengaruh Lebar Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Regangan pada saat tegangan turun hingga 80% dari Tegangan Puncak .....        | 72 |
| Gambar 4.13 | Pengaruh Spasi Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Model Sengkang tegangan Puncak 100% .....                                      | 73 |
| Gambar 4.14 | Pengaruh Spasi Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Regangan pada saat tegangan Puncak .....                                       | 73 |
| Gambar 4.15 | Pengaruh Spasi Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Regangan pada saat tegangan turun hingga 80% dari Tegangan Puncak .....        | 74 |
| Gambar 4.16 | Pengaruh Layer Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Model Sengkang pada saat tegangan Puncak 100% .....                            | 75 |
| Gambar 4.17 | Pengaruh Layer Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Regangan pada saat tegangan Puncak 100% .....                                  | 76 |
| Gambar 4.18 | Pengaruh Layer Benda Uji Beton Dikekang E-GFRP terhadap Regangan pada saat tegangan turun Hingga 80% dari Tegangan Puncak .....        | 76 |
| Gambar 5.1  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C1 ..... | 80 |
| Gambar 5.2  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C2 ..... | 80 |
| Gambar 5.3  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C3 ..... | 81 |
| Gambar 5.4  | Kurva diagram tegangan regangan menurut Pelegrino dan Modenna 2010, dan hasil eksperimental dan usulan kolom C4 .....                  | 81 |
| Gambar 5.5  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C5 ..... | 82 |
| Gambar 5.6  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C6 ..... | 82 |
| Gambar 5.7  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C7 ..... | 83 |
| Gambar 5.8  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan                              |    |

|             |  |    |
|-------------|--|----|
|             | Modena (2010) kolom C8.....  | 83 |
| Gambar 5.9  | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C9.....  | 84 |
| Gambar 5.10 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C10..... | 84 |
| Gambar 5.11 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C11..... | 85 |
| Gambar 5.12 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C12..... | 85 |
| Gambar 5.13 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C13..... | 86 |
| Gambar 5.14 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C14..... | 86 |
| Gambar 5.15 | Perbandingan kurva tegangan regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen dan Pelegrino dan Modena (2010) kolom C15..... | 87 |

## DAFTAR TABEL

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabel 2.1  | Typical Matrix Properties (Cui, 2009) .....   | 20 |
| Tabel 2.2  | Tipe Properti Serat (Cui, 2009) .....   | 20 |
| Tabel 2.3  | Typical Dry Fiber Properties (Fyfy Co. LLC, 2018) .....   | 21 |
| Tabel 2.4  | Composite Gross Laminate Properties (Fyfy Co. LLC, 2018) .....                                      | 21 |
| Tabel 2.5  | Epoxy Material Properties (Fyfy Co. LLC, 2018) .....  | 22 |
| Tabel 3.1  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP strap dengan variasi lebar,<br>spasi dan lapis .....                   | 26 |
| Tabel 3.2  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP strap dengan variasi lebar,<br>Dan satu lapis .....                    | 27 |
| Tabel 3.3  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP strap dengan variasi lebar,<br>Dan dua lapis .....                     | 29 |
| Tabel 3.4  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP strap dengan variasi lebar,<br>Dan tiga lapis .....                    | 30 |
| Tabel 3.5  | Benda Uji Kolom Beton E-GFRP dengan variasi spasi.....  | 32 |
| Tabel 3.6  | Benda Uji Kolom E-GFRP full wrap .....  | 34 |
| Tabel 3.7  | Benda Uji Kolom tanpa E-GFRP .....  | 35 |
| Tabel 3.8  | Komposisi Campuran Beton Normal Mutu 20 MPa.....  | 37 |
| Tabel 3.9  | Tabel Variasi Pemasangan E-GFRP Pada Benda Uji Kolom Beton  | 38 |
| Tabel 3.10 | Hasil Perhitungan Kekuatan Tekan Silinder Tiap-tiap<br>Benda Uji Kolom Beton .....                  | 48 |
| Tabel 3.11 | Hasil Perhitungan Kekuatan Tekan Silinder Tiap-tiap<br>Benda Uji Kolom Beton .....                  | 50 |
| Tabel 4.1  | Hasil Uji Eksperimental Benda Uji Beton Terkekang E- GFRP<br>(Full Wrap , Strap, Tanpa E-GFRP)..... | 54 |
| Tabel 4.2  | Pola Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Lebar...                                       | 56 |
| Tabel 4.3  | Hasil Pengujian Benda Uji Kolom E-GFRP Strip dengan<br>variasi Lebar Strap (w).....                 | 56 |
| Tabel 4.4  | Pola Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton .....   | 59 |
| Tabel 4.5  | Hasil Pengujian Tegangan Regangan Benda Uji Kolom E-GFRP<br>Strap .....                             | 60 |
| Tabel 4.6  | Model Keruntuhan Benda Uji Kolom .....  | 62 |
| Tabel 4.7  | Hasil Pengujian Tegangan Regangan Benda Uji Kolom E-GFRP<br>Strap .....                             | 63 |
| Tabel 4.8  | Perilaku Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan<br>Variasi Spasi.....                        | 64 |
| Tabel 4.9  | Perilaku Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan<br>Variasi Lapis .....                       | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Tabel 4.10 Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton<br>Full Wrap .....          | 69 |
| Tabel 4.11 Benda Uji Kolom Beton Dikekang E-FGRP Strap<br>berdasarkan parameter Lebar..... | 70 |
| Tabel 4.12 Benda Uji Kolom Beton Dikekang E-FGRP Strip Dengan<br>Variasi Spasi .....       | 72 |
| Tabel 4.13 Pengaruh Variasi Lebar, Spasi, Full Wrap Dan Jumlah Layer.....                  | 75 |

## DAFTAR NOTASI

$C_i$  :

- Huruf C menunjukkan Column
- Huruf i menunjukkan benda uji kolom ke-i (i = 1 sampai n)
- Huruf n menunjukkan jumlah benda uji kolom

$F_{1L,2L,3L}$  :

- Huruf F menunjukkan full lapis E-GFRP
- Angka 1, 2, 3 menunjukkan jumlah full lapis E-GFRP

$S_{3,6,9}$  :

- Huruf S menunjukkan spasi antar E-GFRP *strap*
- Angka 3, 6,9 menunjukkan jarak antar E-GFRP

$W_{2,3,4}$  :

- Huruf W menunjukkan lebar E-GFRP *strap*
- Angka 2, 3, 4 menunjukkan lebar E-GFRP *strap*

$1L,2L,3L$  :

- Huruf L menunjukkan lapis GFRP *strap*
- Angka 1, 2,3 menunjukkan jumlah lapis E-GFRP *strap*

$B$  = *Breadth of the concrete slab*

$d$  = *Diameter of the concrete column*

$E_2$  = *Transverse Young's modulus*

$E_1$  = *Longitudinal Young's modulus*

$E_c$  = *Young's modulus of concrete*

$E_{frp}$  = *Modulus of the FRP compositi*

$f_{cc}$  = *Unconfined concrete strength*

$f_{frp}$  = *Hoop tensile strength of FRP composite*

$f_l$  = *Confining pressure*

$f_r$  = *Modulus of Rupture of concrete/ ultimate tensile strength of concrete*

$G_{12}$  = *In plane shear modulus*

$h$  = *Height of the column*

$L$  = *Length of the concrete slab*

$t$  = *Thickness of the FRP com*

$\epsilon_{cc}$  = *Ultimate concrete strain*

$\nu_{12}$  = *Major Poisson's ratio*

$\nu_c$  = *Poisson's ratio of concrete*

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Struktur beton yang sering kita jumpai banyak yang mengalami kerusakan yang disebabkan oleh beberapa faktor yaitu penurunan kemampuan struktur akibat umur bangunan, perubahan pembebanan, kriteria desain awal yang tidak sesuai dengan standar, perubahan fungsi bangunan dan kejadian–kejadian alam seperti gempa bumi. Kebanyakan struktur yang rusak akan langsung di bongkar tanpa mempertimbangan kemungkinan perbaikan atau perkuatan (Pinto,dkk, 2019). Pembongkaran dan pembangunan kembali akan memerlukan biaya yang sangat tinggi. Oleh karena itu perkuatan (*retrofit*) struktur beton akan menjadi jawaban untuk menjadikan struktur lebih kuat dan memenuhi persyaratan keamanan serta kekuatan. Komponen yang paling penting dalam struktur beton adalah kolom, karena kolom yang utama menerima beban seluruh elemen struktur maka perlu adanya penguatan (*retrofitting*) bilamana sebuah kolom dianggap kurang memiliki kekuatan tekan beton rendah, karena memperkuat kolom berarti meningkatkan kekuatan aksial dan daktilitasnya yaitu menahan lebih banyak beban aksial dan deformasi (Al-Khafaji, 2016).

Kekuatan aksial dan peningkatan daktilitas kolom beton diperlukan bilamana ada perbaikan dan penguatan struktur kolom tersebut, akibat beban eksternal yang berlebihan atau karena korosi akibat lingkungan maka diperlukan daya dukung beban tambahan eksternal sebagai penguatan. Ada beberapa metode perkuatan struktur diantaranya spiral dan *circular reinforcements, concrete jacket, steel jacket dan Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. Salah satu material yang paling banyak digunakan dalam perkuatan struktur saat ini adalah *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang dapat digunakan ada tiga macam yaitu :

- 1 *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*,
- 2 *Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)* dan
- 3 *E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP)*.

Penggunaan bahan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* sebagai pengekang (*confinement*) telah menjadi solusi penguatan dan konstruksi kolom. Metode ini dianggap lebih unggul dari metode beton konvensional dan baja dalam hal kekuatan, daktilitas, ketahanan terhadap korosi dan kemudahan dalam aplikasi dilokasi (Au, 2001).

Penggunaan *jacket Fiber Reinforced Polymer (FRP)* juga dapat diterapkan dalam bentuk yang berbeda mulai dari kolom yang dibungkus seluruhnya (*full wrap*) atau dibungkus sebagian dengan *strap* karena kolom yang dibungkus sepenuhnya oleh *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* menunjukkan adanya peningkatan daktilitas, momen dan kapasitas beban tekan maximum dan penerapan energi dibanding dengan kolom yang dibungkus dengan *strap* (Ghanem, 2016).

Material *fiber reinforced polymer (FRP)* sering digunakan dalam bentuk batangan, *strap* atau lembaran untuk perkuatan atau penguatan elemen beton bertulang yang terutama dikenakan pada gaya aksial atau lentur dan geser. Dalam kasus kolom, penggunaan bahan ini berdasarkan pada Pembungkus eksternal dengan lapisan fleksibel lembar *FRP*. Sambungan lembar *FRP* ke elemen beton bertulang terbukti efektif dengan resin epoksi sebagai perekat. Teknik penguat ini dapat menentukan penambahan kekuatan dan kapasitas regangan karena pengekangan lateral (efek kurungan) yang dilakukan oleh *FRP* (Campione, Miraglia dan Papia, 2004).

Pada penelitian ini digunakan *E-Glass fiber reinforced polymer (E-GFRP) sheet* untuk perbaikan (*retrofit*) kekuatan dan daktilitas struktur karena harganya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* dan *Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP)*. *E-GFRP sheet* semakin banyak digunakan dalam perbaikan dan perkuatan struktur beton sebagai alternatif pengganti baja dalam beton dengan mempunyai kekuatan yang tinggi dan kemudahan dalam aplikasi di lokasi. *E-GFRP sheet* terdiri dari beberapa jenis yaitu *E-glass, S-2 glass, AR-glass, A-glass, C-glass, D-glass*, tergantung dari sifat komposisi kimianya dan dari berbagai jenis serat kaca ini, hanya (*E-GFRP*) yang banyak digunakan sebagai perkuatan karena memiliki kekuatan tinggi dan ketahanan suhu dan juga harganya lebih murah (Mukherjee dan Arwihar, 2007).



Pada penelitian ini yang membedakan penelitian terdahulu adalah penggunaan *E-GFRP sheet strap* dengan variasi jumlah lapisan, lebar dan jarak strap. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan dan daktilitas kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet wrap* dengan kolom beton persegi tanpa *retrofitting*, Mencari perilaku hubungan tegangan regangan kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet strap* terhadap beban aksial dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas.

## 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan diatas maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

- a. Bagaimana perilaku kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet full wrap, strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan terhadap beban aksial dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas.
- b. Bagaimana peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet full wrap* satu lapis dua lapis dan tiga lapis dengan kolom beton persegi tanpa *retrofitting*.
- c. Bagaimana peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Beberapa pembatasan masalah yang dilakukan pada penelitian ini adalah :

- a. Kolom akan didesain sebagai :
  - Kolom tak langsing (pendek).
  - Mutu beton normal yang direncanakan sebesar  $f'_c = 20\text{MPa}$
- b. Pengujian kuat tekan beton dengan silinder  $150 \times 300$  mm.
- c. Kolom beton persegi sebagai benda uji dikekang dengan material *E-GFRP sheet full wrap* dan *strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan.
- d. Pembebanan benda uji kolom beton persegi dengan pembebanan aksial saja.

- e. Hasil analisa tegangan dan regangan pada benda uji kolom beton persegi saja.
- f. Dilakukan pengamatan visual dan pencatatan tegangan dan regangan tiap segmen pembebanan.

#### **1.4 Tujuan**

Untuk mengetahui kekuatan kolom beton persegi yang menggunakan material *E-GFRP sheet* sebagai pengekang yaitu :

- a. Mencari perilaku hubungan tegangan regangan kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet full wrap, strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan terhadap beban aksial dalam meningkatkan kekuatan dan daktilitas
- b. Membandingkan peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton persegi dengan *retrofitting material E-GFRP sheet full wrap* satu lapis, dua lapis dan tiga lapis dengan kolom beton persegi tanpa *retrofitting*.
- c. Membandingkan peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton persegi dengan *retrofitting E-GFRP sheet strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan.

#### **1.5 Manfaat**

Dengan mengetahui karakteristik hubungan tegangan regangan pada kolom beton persegi dengan *retrofitting (E-GFRP) strap* dan tanpa *retrofitting* dalam penelitian ini, akan didapatkan manfaat secara ilmu pengetahuan maupun praktek yaitu :

- a. Metode ini dapat menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya pada bidang teknik sipil struktur pada elemen kolom beton dengan *retrofitting E-GFRP sheet strap* , sifat yang ekonomis, praktis, dan efektif.
- b. Untuk para perencana struktur, yang awal perencanaan tidak memperhitungkan kriteria perencanaannya yang tidak sesuai dengan standar, dapat memanfaatkan penggunaan *E-GFRP sheet strap* sehingga dapat mengurangi resiko yang terjadi.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Umum**

Perkembangan penelitian tentang *Fiber Reinforced Polymer (FRP) jacketing* sebagai metode *retrofitting* untuk merehabilitasi dan memperkuat struktur kolom beton bertulang yang ada merupakan suatu metode *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang paling populer dan berkembang sangat pesat saat ini. Material ini merupakan pilihan yang sangat baik untuk digunakan sebagai perkuatan eksternal karena berat yang ringan, tahan korosi dan kekuatan yang tinggi (Megalooikonomou, 2007).

#### **2.2 Kolom**

Kolom adalah elemen struktur beton yang sangat penting yang berfungsi menerima beban dari elemen struktur lainnya. Kegagalan kolom akan berakibat runtuhnya elemen struktur lainnya pada konstruksi bangunan. Penguatan dan perkuatan kolom sangat penting untuk meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom (Raval dan Dave, 2013). Oleh karena itu perkuatan (*retrofit*) struktur beton akan menjadi jawaban untuk menjadikan struktur lebih kuat dan memenuhi persyaratan keamanan serta kekuatan. Komponen yang paling penting dalam struktur beton adalah kolom, karena kolom yang utama menerima beban seluruh elemen struktur maka perlu adanya penguatan (*retrofitting*) bilamana sebuah kolom dianggap kurang memiliki kekuatan tekan beton rendah, karena memperkuat kolom berarti meningkatkan kekuatan aksial dan daktilitasnya yaitu menahan lebih banyak beban aksial dan deformasi (Al-Khafaji, 2016).

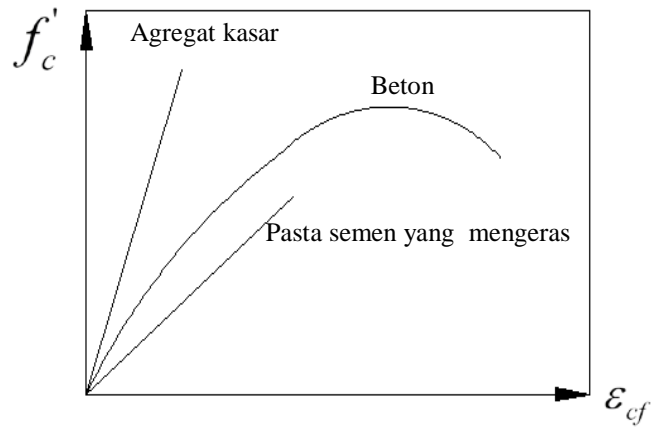
Daktilitas merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan suatu elemen struktur disamping aspek kekuatan dan kekakuan. Pada saat terjadi gempa, elemen-elemen struktur yang mempunyai daktilitas besar akan menyerap energi lebih banyak dibandingkan dengan elemen-elemen struktur dengan daktilitas kecil atau getas.

### **2.3 Perilaku Kolom Akibat Beban Aksial**

Kolom beton murni dapat mendukung beban sangat kecil, tetapi kapasitas daya dukung bebannya akan meningkat cukup besar jika ditambahkan tulangan longitudinal. Peningkatan kekuatan yang lebih besar dapat dibuat dengan memberikan kekangan lateral pada tulangan longitudinal ini. Akibat beban tekan aksial, kolom cenderung tidak hanya memendek dalam arah memanjang tetapi juga mengembang dalam arah lateral karena pengaruh efek Poisson. Kapasitas kolom semacam ini dapat meningkat tinggi dengan memberikan kekangan lateral dalam bentuk sengkang persegi dengan jarak yang berdekatan atau spiral yang membungkus tulangan longitudinal (McCormac, 2004). Untuk kolom pendek keruntuhan kolom ditandai dengan kegagalan unsur bahannya yaitu : hancurnya beton pada peristiwa runtuh tekan atau lelehnya baja tulangan pada runtuh tarik. Sedangkan pada kolom langsing keruntuhan kolom disamping ditandai dengan hancurnya beton dan lelehnya baja tulangan juga akan ditandai oleh fenomena tekuk.

### **2.4 Model Tegangan – Regangan Beton Normal**

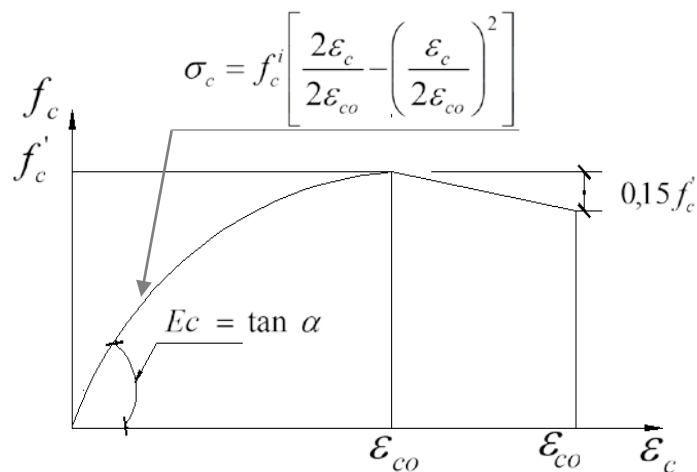
Beton adalah bahan komposit yang terdiri dari pasta semen dan agregat. Pasta terdiri dari semen Portland dan air, melapisi permukaan pasir halus (pasir) dan agregat kasar (kerikil) Karena reaksi kimia yang disebut hidrasi, pasta semen mengeras dan menguat untuk membentuk massa seperti batu . Banyak model hubungan tegangan – regangan beton yang telah diusulkan seperti Hognestad (1951), Kent dan Park, (1971), Sheikh dan Üzümeri, (1982) dan Mander, dkk, (1988) yang disajikan dalam **Gambar 2.1** :



**Gambar 2.1** Kurva Hubungan Tegangan Regangan Beton  
(Karasin, dkk (2014).

#### 2.4.1 Model Hubungan Tegangan–Regangan Beton Menurut Hognestad (1951).

Model pada **Gambar 2.2** banyak digunakan sebagai kurva hubungan tegangan - regangan untuk perilaku kekuatan beton tak terkekang. Model Kurva hubungan tegangan regangan garis lengkung (parabola) sampai bagian puncak di asumsikan sebagai parabola orde kedua dan bagian dari puncak sampai penurunan diasumsikan linier. Tegangan maksimum kolom biasanya diambil 85% dari kekuatan silinder beton ( $f'_c = 0,85 f'_c$ ) dan tegangan tekan maksimum dengan regangan diambil sebesar 0,002



**Gambar 2.2** Model Hognestad 1951 (Karasin, dkk, 2014)

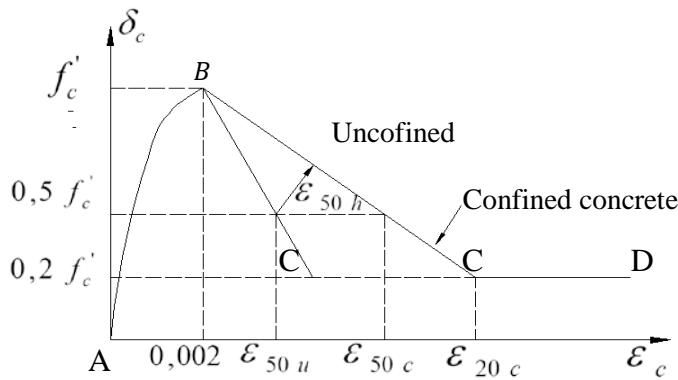
Persamaan modul elastisitas ( $E_c$ ) :  $E_c = \tan \alpha = 126800 + 460f'_c$  ( $kgf/cm^2$ )

dan kurva bagian puncak adalah  $\sigma_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{2\varepsilon_{c0}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{2\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right]$  ..... (2.1)

untuk regangan tekan ultimit dapat diambil 0,0038 dengan  $0,85 f'_c$ .

**2.4.2 Model Hubungan Tegangan – Regangan ( $f'_c - \varepsilon_c$ ) Beton Kent and Park (1971)**

Kent and Park, (1971) mengusulkan persamaan kurva hubungan tegangan regangan untuk beton terkekang dan tidak terkekang yang disajikan dalam **Gambar 2.3**



**Gambar 2.3** Kurva Hubungan Tegangan – Regangan Beton Terkekang dan Tak Terkekang (Kent and Park, 1971).

Usulan Kent dan Park (1971) mengenai hubungan tegangan-regangan untuk beton yang terkekang terbagi menjadi 3 bagian seperti **Gambar 2.3**. Bagian yang naik (A-B) membentang dari regangan tekan  $\varepsilon_c = 0$  hingga  $\varepsilon_c = 0,002$ . Pengekangan tidak mempengaruhi bagian ini (Ghanem, 2016).

$$f_c = f'_c \left[ \frac{2 \cdot \varepsilon_c}{0,002} - \left( \frac{\varepsilon_c}{0,002} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

$f_c$  = tegangan pada beton

$f'_c$  = tegangan puncak beton yang tak terkekang

$\varepsilon_c$  = regangan aksial pada beton

Bagian yang kedua (B-C) adalah bagian kurva linier untuk beton yang tak terkekang dari  $\epsilon_c = 0,002$  dan memanjang hingga titik dimana kurva tersebut berpotongan secara horizontal dengan tegangan  $f'_c = 0,2f'_c$  dimana  $f'_c$  adalah kekuatan tekan beton tak terkekang pada 28 hari setelah pengecoran. Berikut di bawah ini adalah persamaan untuk kurva B-C:

$$f'_c = f'_c \cdot [1 - Z(\epsilon_c - 0,002)] \dots \dots \dots (2.3)$$

dimana Z adalah kemiringan dari kurva turun B-C dan dinyatakan sebagai :

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0,002} \dots \dots \dots (2.4)$$

dimana,

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0,002f'_c}{f'_c - 1000} \dots \dots \dots (2.5)$$

$$\epsilon_{50h} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan :

$\epsilon_{50u}$  = regangan ketika tegangan beton tak terkekang turun mencapai 50% dari tegangan puncak ( $f'_c$ )

$\epsilon_{50h}$  = kenaikan regangan akibat efek kekangan pada beton ketika tegangan beton tak terkekang turun mencapai 50% dari tegangan puncak ( $f'_c$ )

$\rho_s$  = rasio dari tulangan geser dibandingkan dengan volume inti beton

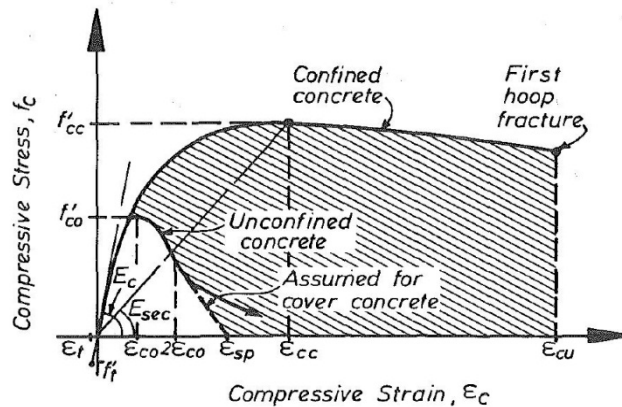
$b''$  = lebar dari inti beton yang terkekang

$s$  = spasi atau jarak antar tulangan geser

Bagian ketiga (B-C-D) adalah kurva linier turun untuk beton terkekang mulai dari  $\epsilon_c = 0,002$  hingga mencapai titik yang berpotongan secara horizontal dengan tegangan  $0,2f'_c$  dan konstan pada tegangan  $f'_c = 0,2f'_c$  hingga mencapai titik D.

### 2.4.3 Model Hubungan Tegangan – Regangan Mander, dkk, (1988)

Mander, dkk, (1988) mengusulkan hubungan tegangan-regangan beton seperti pada **Gambar 2.4**. Pada model ini, selain peningkatan daktilitas, peningkatan kekuatan juga terjadi. Hal ini terlihat pada **Gambar 2.4** yang menunjukkan bahwa beton yang dikekang mempunyai tegangan ultimit dan regangan leleh pertama yang jauh lebih besar daripada beton yang tidak dikekang. Parameter utama yang mempengaruhi bentuk kurva adalah kuat beton tak terkekang, modulus elastisitas beton, serta regangan beton tak terkekang pada saat tegangan maksimum terjadi.



Gambar 2.4 Hubungan Tegangan - Regangan menurut Mander, dkk, 1988

Hubungan tegangan-regangan dinyatakan pada persamaan (2.7) :

$$f_c' = f_{cc}' \left[ \frac{\left(\frac{E_c}{\varepsilon_{ccu}}\right) r_s}{r_s - 1 + \left(\frac{E_c}{\varepsilon_{ccu}}\right) r_s} \right] \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana,

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_c' \left[ 1 + 5 \left( \frac{f_{cc}'}{f_c'} - 1 \right) \right] \dots\dots\dots(2.8)$$

$$r_s = \frac{E_c}{\left(E_c - \frac{f_{cc}'}{\varepsilon_{ccu}}\right)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dengan :

$E_c$  = modulus elastisitas beton

$r_s$  = regangan beton tak terkekang yang dapat diasumsikan 0,002



$\varepsilon_{ccu}$  = regangan puncak beton terkekang pada saat tegangan puncak beton terkekang  $f_{cc}'$

Tegangan puncak beton terkekang ( $f_{cc}'$ ) usulan Mander, dkk (1988) didapat dari lima kriteria kegagalan parameter usulan dari William dan Warnke (1975), dan data tes triaxial Schickert dan Winkler, (1977) yang dinyatakan sebagai berikut :

$$f_{cc}' = f_c' \left[ 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{l,s,max}}{f_c}} - 2 \frac{f_{l,s,max}}{f_c} - 1.254 \right] \dots \dots (2.11)$$

dimana  $f_{l,s,max}$  = tekanan pengekangan lateral efektif akibat tulangan geser

$$\text{dan } f_{l,s,max} = k_{e,s} f_{l,s,max} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dengan :

$k_{e,s}$  = koefisien efektivitas kekangan dan

$f_{l,s,max}$  = tekanan pengekangan maksimum akibat tulangan geser

#### 2.4. Model Hubungan Tegangan – Regangan menurut Pelegrino dan Modena (2010)

Hubungan tegangan-regangan dinyatakan pada persamaan (2.13)

$$\sigma = \frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{\left[1 + \left(\frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{f_{il}}\right)^n\right]^{1/n}} + E_1\varepsilon \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \dots \dots \dots 2.13$$

$$\rho_f = 2 * n_f t_f \frac{(b+h)}{bh} \dots \dots \dots 2.14$$

$$Kh = 1 - (b - 2r^2) + (h - 2r^2) \dots \dots \dots 2.15$$

$$Kv = \frac{(1 - \rho_f)}{2d_{min}^2} \dots \dots \dots 2.16$$

$$Kf = K_\alpha K_v K_h \dots \dots \dots 2.17$$

$$\varepsilon_{feff} = K_\varepsilon \varepsilon_{fu} \dots \dots \dots 2.18$$

$$f_{lf} = 0.5K_f \rho_f E_f \varepsilon_{eff} \dots \dots \dots 2.19$$

$$E_0 = 4700(f'_c)^2 \dots \dots \dots 2.20$$

$$PU = f_{lf} \dots \dots \dots 2.21$$

$$k_r = 1 \quad \text{for } -2\frac{r}{b} \leq$$

$$k_r = 1 - 2.5\left(0.3 - 2\frac{r}{b}\right) \quad \text{for } -2\frac{r}{b} < 0.3 \dots \dots \dots 2.22$$

$$KA = 2.25 \left(\frac{PU}{f_{co}}\right)^{0.15}$$

$$K1 = K_r KA \dots \dots \dots 2.23$$

$$f_{cc} = 1 + \left(K1 \frac{PU}{f_{co}}\right) f_{co} \dots \dots \dots 2.24$$

$$\varepsilon_{cu} = 2 + 23 \left(\frac{PU}{f_{co}}\right) \varepsilon_{co} \dots \dots \dots 2.25$$

$$\frac{E_{co}}{E_c} = \left(\frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}}\right) \dots \dots \dots 2.26$$

$$E_1 = \frac{(f_{cc} - f_{co})}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \dots \dots \dots 2.27$$

$$E_{sec} = \frac{(f'_{cc} - f'_c)}{(\varepsilon_c - 100)} \dots \dots \dots 2.28$$

$$r = \frac{(E)}{(E - E_{sec})} \dots \dots \dots 2.29$$

$$f_{il} = E_1 \varepsilon_{cu} \dots \dots \dots 2.30$$

$$n = 1 + 1 \frac{E_0}{E_{co}} f_{co} \dots \dots \dots 2.31$$

$$E_{sec} = \frac{(f'_{cc} - f'_c)}{(\varepsilon_c - 100)} \dots \dots \dots 2.32$$

$$r = \frac{(E)}{(E - E_{sec})} \dots \dots \dots 2.33$$

$$\chi = \frac{(\varepsilon_{cc} \cdot sbx)}{(\varepsilon_c)} \dots \dots \dots 2.34$$

## 2.5 Pengekangan Beton dengan *FRP*

Pengekangan beton dengan *FRP* memberikan efek pengekangan pasif. Pada kolom yang dibebani beban aksial konsentris sebesar  $P$ , dan  $P$  dinaikkan mulai dari 0 hingga  $P_n$  dimana  $P_n$  adalah kapasitas beban normal pada kolom, beton mulai retak dan mengembang secara lateral hingga runtuh. Pengembangan lateral kolom ini sebagian ditahan oleh *FRP* yang kemudian berujung pada beton dalam kondisi tegangan tiga arah, yang kemudian meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton.

Beton yang dikekang oleh *FRP* menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan pengekangan oleh tulangan baja. Hal ini disebabkan oleh sifat *FRP* yang mempunyai hubungan tegangan-regangan linier hingga runtuh. Akibatnya, tekanan pengekang yang diberikan oleh *FRP* bertambah seiring dengan regangan lateral hingga *FRP* putus (Lam dan Teng, 2003).

Umumnya *FRP* mulai bekerja sebagai pengekang setelah beton yang tak terkekang mencapai tegangan puncak  $f_c'$ . Dibandingkan dengan tulangan baja, material *FRP* umumnya memiliki kekuatan yang lebih besar daripada tegangan leleh baja dan regangan yang lebih rendah ketika gagal. Tekanan pengekangan yang diberikan oleh *FRP* rata sesuai dengan keliling dari kolom silinder.

Model-model analisa awal yang dikembangkan dalam memprediksi perilaku beton yang terkekang dengan *FRP* diturunkan dari model analisa dari beton yang dikekang oleh tulangan baja. Studi awal dilakukan oleh Fardis dan Khalili, (1982). Model dari Fardis dan Khalili, (1982) ini diturunkan dari model usulan Richart, dkk, (1929). Saadatmanesh, dkk (1994) kemudian mengembangkan model dari usulan Mander, dkk (1988) untuk kolom yang dikekang sebagian dengan menggunakan *FRP Strap*. Namun dalam perkembangannya, diketahui bahwa model analisa pengekangan dengan tulangan baja tidak dapat diaplikasikan pada model pengekangan dengan *FRP*. Hal ini disebabkan baja dan *FRP* memiliki perilaku yang berbeda saat diberi beban aksial. *FRP* tidak memiliki tegangan leleh dan memiliki perilaku linier hingga putus, oleh karena itu pengekangan dengan *FRP* selalu memberikan tekanan pengekangan yang terus menerus meningkat pada inti beton. Mirmiran dan Shahawy, (1997)

telah membuktikan implementasi yang tidak tepat dari penggunaan model analisa pengekanan dengan tulangan baja pada pengekanan dengan FRP.

Model hubungan tegangan-regangan untuk pengekanan eksternal dengan FRP pada kolom dapat dibagi menjadi 2 kategori (Teng dan Lam, 2004), yaitu *analysis oriented models* (Mirmiran dan Shahawy, 1997, Fam dan Rizkalla 2001, Teng et al 2007), dan *design oriented models* (Fardis dan Khalili, 1982, Xiao dan Wu, 2000, Lam dan Teng, 2003).

Pada *analysis oriented models*, kurva hubungan tegangan-regangan beton yang dikekang FRP didapat dari prosedur analisa numerikal yang memperhitungkan interaksi FRP wrap dengan inti beton. Pada model ini lebih cocok diterapkan pada simulasi analisa numerikal di computer seperti analisa nonlinier *finite element*.

Pada *design oriented models*, persamaan tegangan-regangan dan persamaan kondisi puncak diturunkan langsung dari interpretasi hasil eksperimental. Bentuk yang sederhana dari *design oriented models* membuat model ini mudah untuk digunakan.

### 2.5.1 Fardis dan Khalili (1982)

Fardis dan Khalili, (1982) melakukan pengujian terhadap 46 silinder benda uji dengan variasi ukuran, mutu beton, dan FRP. Pada pengujian didapatkan bahwa pengekanan yang diberikan oleh FRP meningkatkan kekuatan tekan dan daktilitas beton. Mereka mengusulkan suatu model hubungan tegangan-regangan dengan tiga parameter.

$$f'_c = \frac{E_c \epsilon_c}{1 + \epsilon_c \left( \frac{E_c}{f_{cu}} - \frac{1}{\epsilon_{cu}} \right)} \dots\dots\dots(2.13)$$

dimana

$E_c$  = modulus tangent beton yang tak terkekang

$f_{cu}$  = kekuatan puncak beton yang terkekang, yang ditentukan oleh satu dari dua persamaan di bawah ini:

$$f_{cu} = f_c + 4,1 x \left( \frac{2f_j t_j}{D_c} \right) \text{ (Richart, dkk 1929) } \dots\dots\dots(2.14)$$

$$f_{cu} = f_c + 3,7(f_c) \left( \frac{2f_j t_j}{D_c f_c} \right)^{0,86} \text{ (Newman \& Newman).....(2.15)}$$

$\epsilon_{cu}$  = regangan aksial puncak ketika kekuatan beton mencapai puncak ( $f_{cu}$ )

$$\epsilon_{cu} = 0,002 + 0,001 \times \frac{E_j t_j}{D_c f_c} \text{ .....(2.16)}$$

Dimana :

$f_j$  = kekuatan tarik *FRP*

$E_j$  = modulus elastisitas *FRP*

$t_j$  = ketebalan dari *FRP*

$D_c$  = diameter dari spesimen beton

Perbedaan utama dari model ini dibandingkan dengan model konvensional beton adalah tidak adanya bagian yang menurun pada hubungan tegangan-regangan dari beton yang dikekang oleh *FRP*. Kegagalan pada beton baru akan tercapai ketika *FRP wrap* putus dikarenakan kehancuran beton karena regangan lateral ditahan oleh kekangan *FRP wrap*.

beton mulai retak dan mengembang secara lateral hingga runtuh. Pengembangan lateral kolom ini sebagian ditahan oleh *FRP* yang kemudian berujung pada beton dalam kondisi tegangan tiga arah, yang kemudian meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton.

Beton yang dikekang oleh *FRP* menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan pengekanan oleh tulangan baja. Hal ini disebabkan oleh sifat *FRP* yang mempunyai hubungan tegangan-regangan linier hingga runtuh. Akibatnya, tekanan pengekanan yang diberikan oleh *FRP* bertambah seiring dengan regangan lateral hingga *FRP* putus (Lam dan Teng, 2003).

Umumnya *FRP* mulai bekerja sebagai pengekanan setelah beton yang tak terkekang mencapai tegangan puncak  $f'_c$ . Dibandingkan dengan tulangan baja, material *FRP* umumnya memiliki kekuatan yang lebih besar daripada tegangan leleh baja dan regangan yang lebih rendah ketika gagal. Tekanan pengekanan yang diberikan oleh *FRP* rata sesuai dengan keliling dari kolom silinder.

Model-model analisa awal yang dikembangkan dalam memprediksi perilaku beton yang terkekang dengan *FRP* diturunkan dari model analisa dari beton yang dikekang oleh tulangan baja. Studi awal dilakukan oleh Fardis dan Khalili (1982). Model dari Fardis dan Khalili, (1982) ini diturunkan dari model usulan Richart, dkk, (1929). Saadatmanesh, dkk (1994) kemudian mengembangkan model dari usulan Mander, dkk (1988) untuk kolom yang dikekang sebagian dengan menggunakan *FRP Strap*. Namun dalam perkembangannya, diketahui bahwa model analisa pengekangan dengan tulangan baja tidak dapat diaplikasikan pada model pengekangan dengan *FRP*. Hal ini disebabkan baja dan *FRP* memiliki perilaku yang berbeda saat diberi beban aksial. *FRP* tidak memiliki tegangan leleh dan memiliki perilaku linier hingga putus, oleh karena itu pengekangan dengan *FRP* selalu memberikan tekanan pengekangan yang terus menerus meningkat pada inti beton. Mirmiran dan Shahawy, (1997) telah membuktikan implementasi yang tidak tepat dari penggunaan model analisa pengekangan dengan tulangan baja pada pengekangan dengan *FRP*.

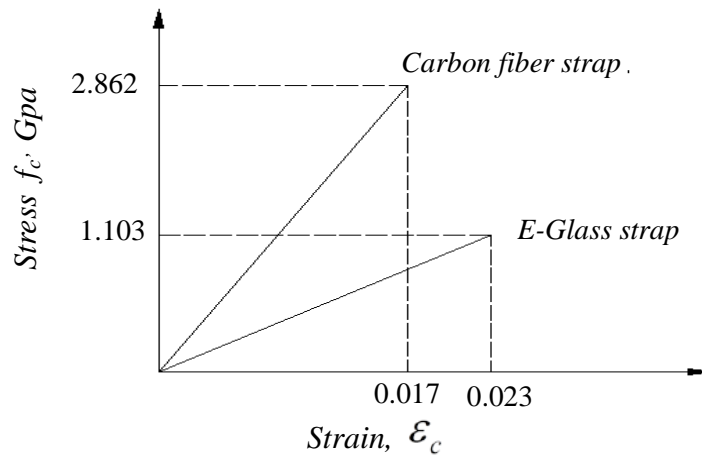
Model hubungan tegangan-regangan untuk pengekangan eksternal dengan *FRP* pada kolom dapat dibagi menjadi 2 kategori (Teng dan Lam, 2004), yaitu *analysis oriented models* (Mirmiran dan Shahawy, 1997, Fam dan Rizkalla 2001, Teng, dkk, (2007), dan *design oriented models* (Fardis dan Khalili, 1982, Xiao dan Wu, 2000, Lam dan Teng, (2003).

Pada *analysis oriented models*, kurva hubungan tegangan-regangan beton yang dikekang *FRP* didapat dari prosedur analisa numerikal yang memperhitungkan interaksi *FRP wrap* dengan inti beton. Pada model ini lebih cocok diterapkan pada simulasi analisa numerikal di computer seperti analisa nonlinier *finite element*.

Pada *design oriented models*, persamaan tegangan-regangan dan persamaan kondisi puncak diturunkan langsung dari interpretasi hasil eksperimental. Bentuk yang sederhana dari *design oriented models* membuat model ini mudah untuk digunakan.

### 2.5.2 Saadatmanesh, dkk, (1994)

Saadatmanesh, dkk (1994) melakukan pengujian dengan kolom yang diberi pengekang eksternal *E-GFRP Strap* dan *CFRP Strap* dengan variasi mutu beton, tiga macam ketebalan *strap*, dan tiga macam spasi atau jarak pemasangan *strap*. Hubungan tegangan-regangan untuk *strap* yang digunakan pada **Gambar 2.5**:



**Gambar 2.5** Hubungan tegangan-regangan *FRP Strap* (Saadatmanesh, dkk 1992)

Pada penelitian ini digunakan model hubungan tegangan-regangan Mander, dkk (1988) meskipun sebetulnya model Mander, dkk (1988) dikembangkan untuk beton yang dikekang tulangan lateral baja. Hasil penelitian menunjukkan kekuatan tekan dan daktilitas kolom beton dapat ditingkatkan secara signifikan dengan menggunakan pengekang eksternal *FRP Strap* pada kolom. Namun pada penelitian ini tidak diteliti lebih lanjut pengaruh daripada spasi *strap* dan ketebalan *strap*.

### 2.5.3 Material *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* Komposit

*Fiber Reinforced Polymer (FRP)* adalah bahan komposit yang terbuat dari polimer matriks diperkuat dengan serat. Serat biasanya berupa serat kaca (*fiber glass*), *Carbon*, *aramid* atau *basalt*, meskipun serat seperti kertas atau kayu atau asbes telah kadang-kadang digunakan. *FRP* dapat diterapkan untuk memperkuat balok, kolom, dan lempengan bangunan dan jembatan. Hal ini dimungkinkan untuk meningkatkan kekuatan struktural bahkan setelah rusak

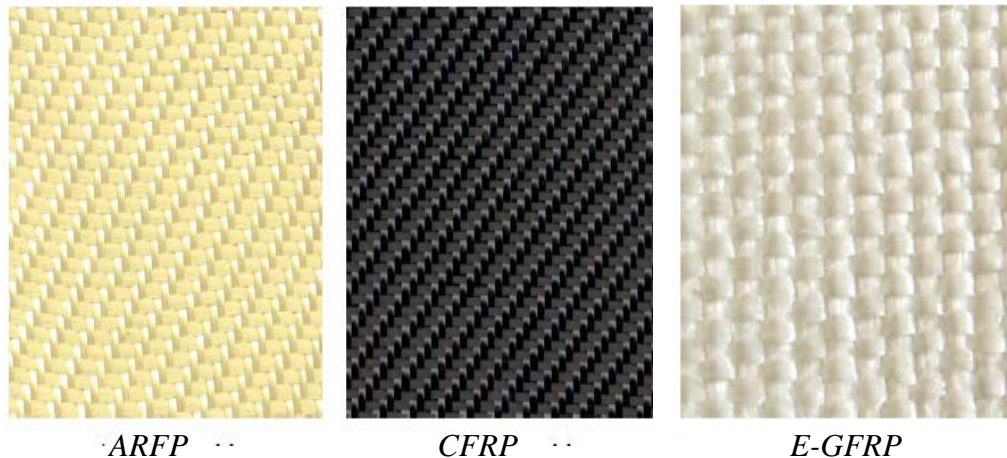
parah akibat kondisi pembebanan. Dalam kasus beton bertulang yang rusak, pertama akan memerlukan perbaikan dengan membuang puing-puing dan mengisi rongga dan yang retak dengan mortar. Setelah diperbaiki, penguatan dapat dicapai dengan lembaran fiber glass dioles dengan resin epoksi kemudian ditempelkan pada bagian permukaan yang telah dibersihkan dan dipersiapkan dari bagian yang rusak (Jaffry, 2001).

Material *fiber reinforced polymer (FRP)* sering digunakan dalam bentuk batangan, strip atau lembaran untuk perkuatan atau penguatan elemen beton bertulang yang terutama dikenakan pada gaya aksial atau lentur dan geser. Dalam kasus kolom, penggunaan bahan ini berdasarkan pada Pembungkus eksternal dengan lapisan fleksibel lembar *FRP*. Sambungan lembar *FRP* ke elemen beton bertulang terbukti efektif dengan resin epoksi sebagai perekat. Teknik penguat ini dapat menentukan penambahan kekuatan dan kapasitas regangan karena pengekanan lateral (efek kurungan) yang dilakukan oleh *FRP* (Campione, Miraglia dan Papia, 2004). Ada beberapa metode perkuatan struktur diantaranya *spiral* dan *circular reinforcements, concrete jacket, steel jacket* dan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. Salah satu material yang paling banyak digunakan dalam perkuatan struktur saat ini adalah *Fiber Reinforced Polymer (FRP)*. *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang dapat digunakan ada tiga macam yaitu pada

#### **Gambar 2.6**

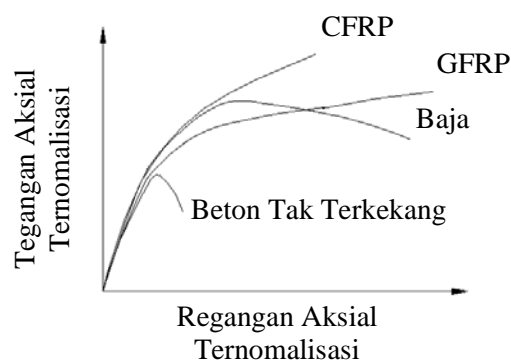
1. *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP),*
2. *Aramid Fiber Reinforced Polymer (AFRP) dan*
3. *E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP).*





**Gambar 2.6** Material ARFP, CFRP dan E-GFRP

Penggunaan bahan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* sebagai pengekang (*confinement*) telah menjadi solusi penguatan dan konstruksi kolom. Metode ini dianggap lebih unggul dari metode beton konvensional dan baja dalam hal kekuatan, daktilitas, ketahanan terhadap korosi dan kemudahan dalam aplikasi dilokasi (AU, 2001). Perbedaan kualitatif antara pengekang baja dan *fiber reinforced polymer (FRP)* dapat diilustrasikan pada **Gambar 2.7**



**Gambar 2.7** Tegangan-Regangan Aksial Beton Terkekang dan Tidak Terkekang Spoelstra dan Monti, 1999 ( Cui, 2009).

*Tipe fiber Reinforced Polymer (FRP)* yang paling umum digunakan dalam aplikasi teknik sipil adalah serat kaca Polimer bertulang (*GFRP*), polimer bertulang serat karbon (*CFRP*), dan polimer bertulang aramid (*AFRP*). Serat dan matriks digabungkan sedemikian rupa sehingga material komposit yang dihasilkan menunjukkan sifat yang sesuai dengan unsur penyusunnya. Sifat-sifat

ini terutama bergantung pada volume serat, sifat mekanik konstituen, dan prosedur yang digunakan untuk membuat komposit. Sifat dari matriks yang umum digunakan disajikan pada **Tabel 2.1** dan **2.2**

**Tabel 2.1** Tipe properti matrix (Cui, 2009 )

| Material            | Massa jenis       | Modulus elastisitas dalam tegangan $E_t$ | Kekuatan tarik $f_t$ | Kekuatan tekan $f'_c$ | Rasio poisson | Effisiensi termal $\alpha$ |
|---------------------|-------------------|--|----------------------|-----------------------|---------------|----------------------------|
|                     | Kg/m <sup>3</sup> | MPa                                      | MPa                  | MPa                   | $\nu$         | 10 <sup>6</sup> /°C        |
| <i>Poliester</i>    | 1200-1400         | 2500-4000                                | 49-90                | 100-250               | 0.37-0.40     | 100-120                    |
| <i>Epoksi</i>       | 1100-1350         | 3000-5500                                | 40-100               | 100-250               | 0.38-0.40     | 45-65                      |
| <i>P.V.C</i>        | 1400              | 2800                                     | 58                   | -                     | -             | 50                         |
| <i>Nilon</i>        | 1140              | 2800                                     | 70                   | -                     | -             | 100                        |
| <i>Polyethylene</i> | 960               | 1200                                     | 32                   | -                     | -             | 120                        |

**Tabel 2.2** Tipe properti serat (Cui, 2009 )

| Material                    | Massa jenis       | Modulus elastisitas E | Kuat tarik $f_t$ | Regangan tarik $\epsilon_c$ |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|------------------|-----------------------------|
|                             | Kg/m <sup>3</sup> | MPa                   | MPa              | %                           |
| <i>E-glass</i>              | 2500              | 70000                 | 1500-2500        | 1.8-3.0                     |
| <i>S-glass</i>              | 2500              | 86000                 | 4800             | -                           |
| <i>High-modulus carbon</i>  | 1950              | 380000                | 2000             | 0.5                         |
| <i>High-strength carbon</i> | 1720              | 240000                | 2800             | 1.0                         |
| <i>Carbon</i>               | 1400              | 190000                | 1700             | -                           |
| <i>Boron</i>                | 2570              | 400000                | 3400             | -                           |
| <i>Graphite</i>             | 1400              | 250000                | 1700             | -                           |
| <i>Kevlar49</i>             | 1450              | 120000                | 2700-3500        | 2.0-2.7                     |
| <i>Kevlar</i>               | 1450              | 60000-130000          | 2900             | -                           |

#### 2.5.4 E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP)

*E-Glass fiber reinforced polymer (E-GFRP) sheet* semakin banyak digunakan dalam perbaikan dan perkuatan struktur beton sebagai alternatif pengganti baja dan dimanfaatkan sebagai tulangan yang dapat menerima gaya tarik pada elemen struktur beton dengan mempunyai kekuatan yang tinggi, ekonomis, dan kemudahan dalam aplikasi di lokasi. *Glass fiber reinforced polymer (GFRP) sheet* terdiri dari beberapa jenis yaitu *E-glass, S-2 glass, AR-glass, A-glass, C-glass, D-glass*, tergantung dari sifat komposisi kimianya dan dari berbagai jenis serat kaca ini, hanya *E-GFRP* yang banyak digunakan sebagai perkuatan karena memiliki kekuatan tinggi dan ketahanan suhu dan juga harganya lebih murah (Mukherjee dan Arwikar, 2007). Sifat mekanis dari *Glass fiber reinforced polymer (GFRP) sheet* disajikan dalam **Tabel 2.3, 2.4 dan 2.5**

**Tabel 2.3 Typical Dry Fiber Properties (Fyfy Co. LLC, 2018)**

| <i>Typical dry fiber properties</i> |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Tensile strength</i>             | 470,000psi ( 3.24 Gpa )              |
| <i>Tensile modulus</i>              | 10.5x10 <sup>6</sup> psi ( 72.4 GPa) |
| <i>Ultimate Elongation</i>          | 4.5%                                 |
| <i>Weigth per sq.yd</i>             | 14.9 oz ( 505 g/m2)                  |

**Tabel 2.4 Composite Gross Laminate Properties (Fyfy Co. LLC, 2018)**

| <i>Composite Gross Laminate Properties</i>                        |                    |   |  |
|---|--------------------|---|--|
| <i>Property</i>   | <i>ASTM Method</i> | <i>Typical Test Value</i>                     | <i>Design Vale</i>                             |
| <i>Ultimate tensile strength in primary fiber direction, psi</i>  | D-3039             | 75,625 psi<br>( 521 MPa)<br>(1.5kip/in.width) | 60.500psi<br>( 417 MPa )<br>(1.2 kip/in.width) |
| <i>Elogation break</i>  | D-3039             | 2.0 %   | 1.76%  |
| <i>Tensile Modulus, psi</i>                                       | D-3039             | 3.79 x 10 <sup>6</sup> psi<br>( 26.1 GPa )    | 3.303x10 <sup>6</sup> psi<br>( 20.9 GPa)       |
| <i>Ultimate tensile strength 90 degrees to primary fiber, psi</i> | D-3039             | 3.750 psi<br>( 25.8 MPa )                     | 3,000 psi<br>( 20.7 MPa)                       |
| <i>Laminate thickness</i>   |                    | 0.025 in.<br>( 0.635 mm )                     | 0.025 in<br>( 0.635 mm )                       |

**Tabel 2.5** Epoxy Material Properties (Fyfy Co. LLC, 2018)

| <i>Epoxy Material Properties</i>  |                          |   |
|---|--------------------------|---|
| <i>Curing Schedule 72 hours post cure at 140<sup>0</sup> F ( 60<sup>0</sup> C )</i> |                          |   |
| <i>Property</i>   | <i>ASTM Method</i>       | <i>Typical Test value</i>                     |
| <i>Tg 140<sup>0</sup> F ( 60<sup>0</sup> C )<br/>Post cure ( 24 hours )</i>         | <i>ASTM D -4065</i>      | <i>180<sup>0</sup> F ( 82<sup>0</sup> C )</i> |
| <i>Tensile Strength, psi</i>  | <i>ASTM D-638 type 1</i> | <i>10,500 psi ( 72.4 Mpa)</i>                 |
| <i>Tensile Modulus, psi</i>   | <i>ASTM D-638 Type 1</i> | <i>461, 0 psi ( 3.18GPa)</i>                  |
| <i>Elongation percent</i>   | <i>ASTM D-638 Type 1</i> | <i>5.0%</i>                                   |

Material ini memiliki kekuatan tarik hingga 3.24 GPa dan berat hanya 505 gram/m<sup>2</sup> dalam keadaan kering (**Tabel 2.3**). Setelah diaplikasikan, material ini kekuatan tarik ultimit 417 MPa (**Tabel 2.4**) pada arah serat utamanya dan kekuatan tarik ultimit 20.7 MPa (**Tabel 2.5**) pada arah serat tegak lurus 90 derajat terhadap serat utamanya. Sedangkan *epoxy fiber* memiliki kekuatan tarik hingga 72.4 MPa dan kekuatan lentur hingga 123.4 MPa.

### 2.5.5 Pengekang Beton

Memperkuat kolom adalah aplikasi *FRP* yang paling umum karena meningkatkan daya dukung, daktilitas, dan regangan transversal. Selain itu, kurungan lateral meningkatkan kekuatan aksial dan daktilitas. Di sisi lain, perubahan regangan transversal menurun seiring dengan meningkatnya kurungan lateral. Sampai tahun 1990an, ada dua metode yang digunakan untuk membatasi kolom Jacket baja lebih efektif dari pada caging karena memberikan peningkatan luas penampang melintang dan berat struktur. Namun, kedua metode tersebut membutuhkan kerja intensif dan sulit dipasang. Selanjutnya, baik jaket dan jaket baja terbuat dari baja yang berarti sangat rentan terhadap korosi karena rendahnya perlawanan terhadap serangan cuaca (Karaghool, 2013).

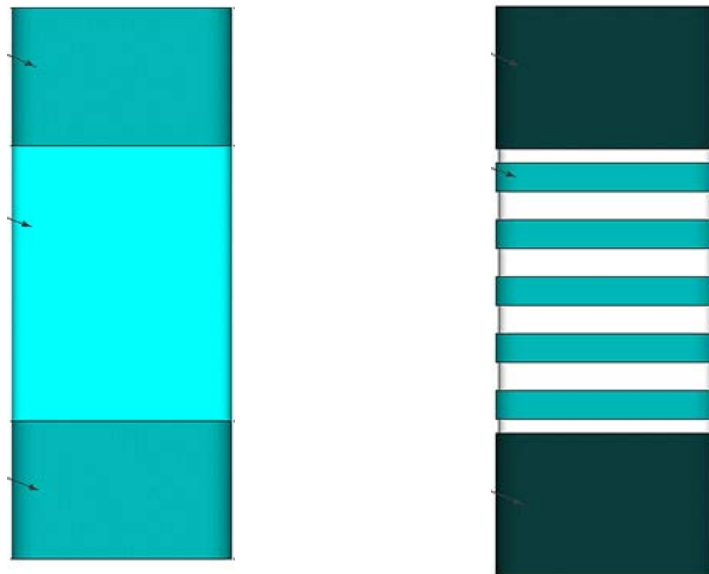
### 2.5.6 Metode Pengekang Beton

Metode pengekang yang digunakan pada beton adalah *full wrap*, *strap*

#### 2.5.6.1 Full Wrapping

*Jacketing FRP* dianggap sebagai metode yang paling umum untuk memperkuat kolom dengan komposit *FRP*. Metode ini, yang dikenal sebagai

metode *lay-up* basah, melibatkan pembungkus *FRP* unidirectional yang sepenuhnya terendam dalam epoksi. Arah bungkus tegak lurus terhadap sumbu kolom. Metode pembungkusnya berbeda satu sama lain. Kolom dapat dibungkus sepenuhnya dengan komposit *FRP* dalam satu atau beberapa lapisan. Hal ini juga dapat terbungkus sebagian menggunakan cincin diskrit dari satu atau beberapa lapisan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8**



**Gambar 2.8** *Full Wrap, Strip, Spiral*

(Karaghoool, 2013)

*Fiber Reinforced Polymer (FRP)* merupakan bahan yang ringan, kuat, anti magnetik dan tahan terhadap korosi, bahan ini digunakan sebagai pilihan untuk menggantikan material baja sebagai tulangan pada konstruksi beton bertulang atau sebagai material untuk menambahkan kekuatan konstruksi yang sudah ada. *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* cukup mudah untuk ditempelkan pada beton bertulang dan terbukti ekonomis digunakan sebagai material untuk memperbaiki dan meningkatkan ketahanan struktur balok, kolom, joint balok kolom dan bagian struktur lainnya terhadap gempa bumi. Perkuatan (*strengthening*) pada struktur bangunan adalah suatu tindakan modifikasi struktur yang sudah ataupun belum mengalami kerusakan, dengan tujuan untuk menaikkan kekuatan atau daktilitas struktur. Elemen struktur beton yang dapat diperkuat dengan *FRP*

adalah balok, pelat, dan kolom beton bertulang. Suatu kolom beton bertulang yang menerima beban aksial tekan secara konsentris, maka akan menderita tegangan tekan dan regangan yang sama besarnya pada seluruh penampang kolom. Beton dan baja tulangan longitudinal bekerjasama dalam menahan tegangan ini. Jika kolom tersebut diberi perkuatan lembaran *FRP* (*FRP Wrap*) yang dipasang mengelilingi penampang kolom, maka beban aksial pada kolom akan dipikul bersama-sama antara beton, tulangan longitudinal, dan *FRP*.

## **BAB 3**

### **PERSIAPAN DAN PENGUJIAN EKSPERIMENTAL**

#### 3.1 Umum

Analisis teoritis yang dilakukan dengan menggunakan parameter-parameter yang relevan untuk memprediksikan perilaku benda uji yang berupa kolom beton persegi dengan penampang  $180 \times 180$  mm dan tinggi 600 mm sebanyak 20 buah. Pengujian dilakukan dengan cara membebani kolom tersebut mulai dari nol sampai mencapai kekuatan ultimit sehingga akan diperoleh kurva hubungan tegangan regangan, dan juga dilakukan analisa terhadap kontribusi *E-glass fiber reinforced polymer (E-GFRP) sheet full wrap* dan *strap* terhadap kekuatan kolom dalam menahan gaya tekan sehingga juga akan diperoleh hubungan tegangan-regangan secara teoritis. Hasil teoritis ini kemudian dipakai sebagai pembanding hasil eksperimen di laboratorium.

#### 3.2 Parameter Penelitian

Parameter yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a. Bentuk dan ukuran benda uji kolom.  
Semua benda uji kolom persegi dengan penampang  $180 \times 180$  mm dan tinggi 600 mm
- b. Kurva hubungan tegangan regangan benda uji kolom beton yang dikekang *E-GFRP* tipe *wrap* dengan :
  - Ukuran Spasi dan jumlah lapisan sama, dengan lebar *E-GFRP* beda
  - Ukuran lebar *E-GFRP* dan jumlah lapisan sama, dengan spasi beda
  - Ukuran lebar *E-GFRP* dan spasi sama dengan jumlah lapisan beda.
- c. Kurva hubungan tegangan regangan benda uji kolom beton yang dikekang *E-GFRP full wrap* satu lapis, dua lapis dan tiga lapis.

### 3.3 Kode Benda Uji Kolom

Sebelum dilakukan pengujian benda uji kolom beton, harus dilakukan pemberian kode atau nama pada benda ujian kolom tersebut agar dapat mempermudah dalam identifikasi benda uji kolom pada **Tabel 3.1**

**Tabel 3.1** Benda Uji Kolom Beton *E-GFRP strap* dengan variasi lebar, spasi dan lapis

| No. | Kode benda uji | Diameter (mm) | Tinggi kolom (mm) |
|-----|----------------|---------------|-------------------|
| 1   | C1-W2-S6-1L    | 180 x 180     | 600               |
| 2   | C2-W3-S6-1L    | 180 x 180     | 600               |
| 3   | C3-W4-S6-1L    | 180 x 180     | 600               |
| 4   | C4-W2-S6-2L    | 180 x 180     | 600               |
| 5   | C5-W3-S6-2L    | 180 x 180     | 600               |
| 6   | C6-W4-S6-2L    | 180 x 180     | 600               |
| 7   | C7-W2-S6-3L    | 180 x 180     | 600               |
| 8   | C8-W3-S6-3L    | 180 x 180     | 600               |
| 9   | C9-W4-S6-3L    | 180 x 180     | 600               |
| 10  | C10-W2-S3-1L   | 180 x 180     | 600               |
| 11  | C11-W2-S9-1L   | 180 x 180     | 600               |
| 12  | C12-W2-S3-2L   | 180 x 180     | 600               |
| 13  | C13-W2-S9-2L   | 180 x 180     | 600               |
| 14  | C14-W2-S3-3L   | 180 x 180     | 600               |
| 15  | C15-W2-S9-3L   | 180 x 180     | 600               |
| 16  | C16-F-1L       | 180 x 180     | 600               |
| 17  | C17-F-2L       | 180 x 180     | 600               |
| 18  | C18-F-3L       | 180 x 180     | 600               |
| 19  | C19- NO Layer  | 180 x 180     | 600               |
| 20  | C20- NO Layer  | 180 x 180     | 600               |

Keterangan :

C :

- Huruf C menunjukkan Column

F 1L,2L,3L :

- Huruf F menunjukkan full lapis E-GFRP

- Angka 1, 2, 3 menunjukkan jumlah full lapis E-GFRP

S3,6,9 :

- Huruf S menunjukkan spasi antar E-GFRP strap

- Angka 3, 6,9 menunjukkan jarak antar E-GFRP

W2,3,4 :

- Huruf W menunjukkan lebar E-GFRP strap

- Angka 2, 3, 4 menunjukkan lebar E-GFRP strap



1L,2L,3L :

- Huruf L menunjukkan lapis E-GFRP strap
- Angka 1, 2,3 menunjukkan jumlah lapis E-GFRP strap
- Angka 1, 2, 3 menunjukkan jumlah full lapis E-GFRP

3.4 Benda uji kolom Beton E-GFRP *strap* dengan variasi lebar, spasi dan lapis.

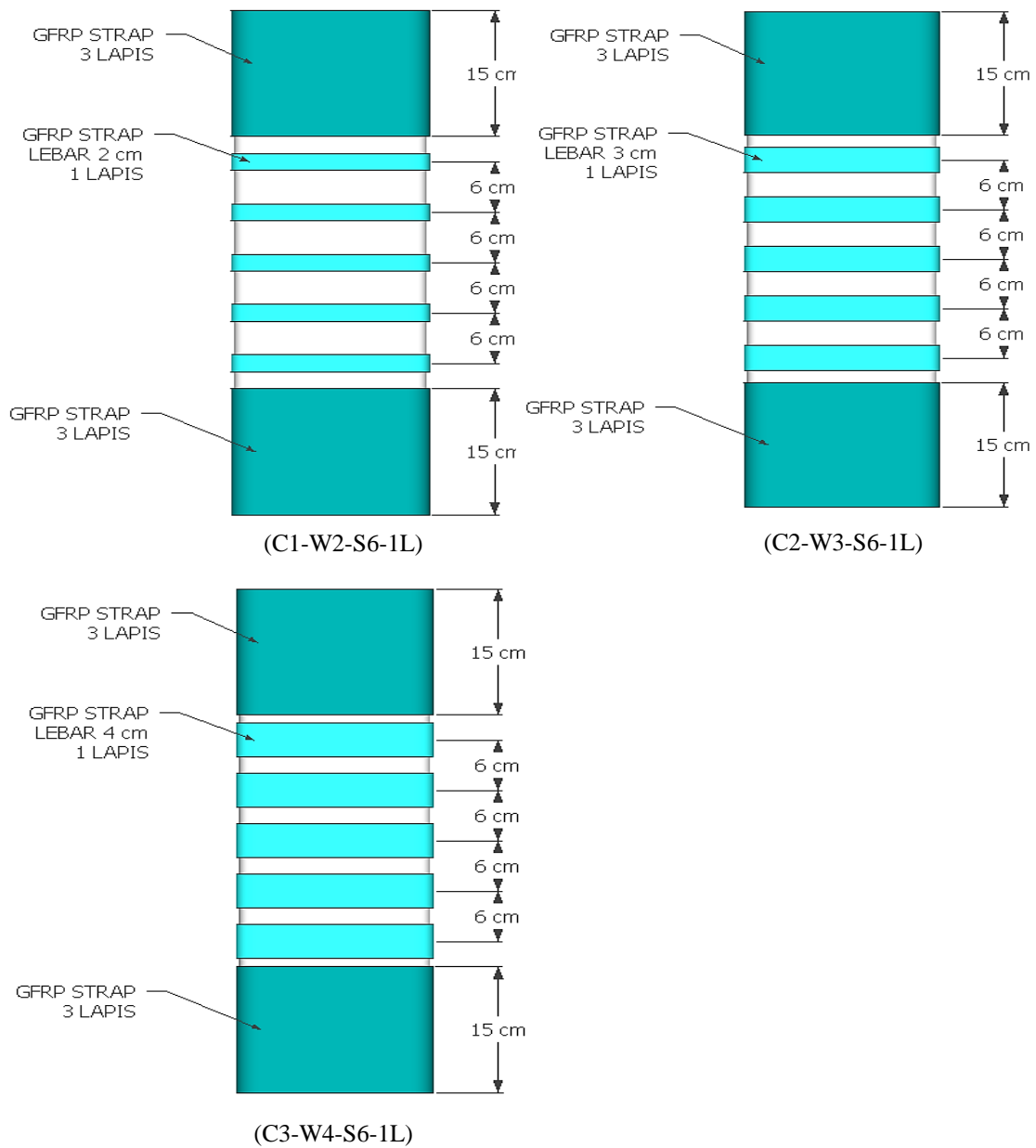
Benda uji kolom beton persegi yang dikekang E-GFRP *sheet* sebanyak 20 buah dikelompokan menjadi tiga bagian yaitu :

- Benda uji kolom tanpa *E-GFRP*
- Benda uji kolom dikekang *E-GFRP sheet full wrap*
- Benda uji kolom dikekang *E-GFRP sheet* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan. pada Tabel 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, dan 3.7 :

Tabel 3.2 Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi lebar dan satu lapis

| No | Kode specimen | Benda uji silinder |
|----|---------------|--------------------|
| 1  | C1-W2-S6-1L   | 180x180x60mm       |
| 2  | C2-W3-S6-1L   |                    |
| 3  | C3-W4-S6-1L   |                    |

Tabel 3.2 disajikan kolom (1, 2, 3) variasi lebar dengan spasi dan layar yang sama.



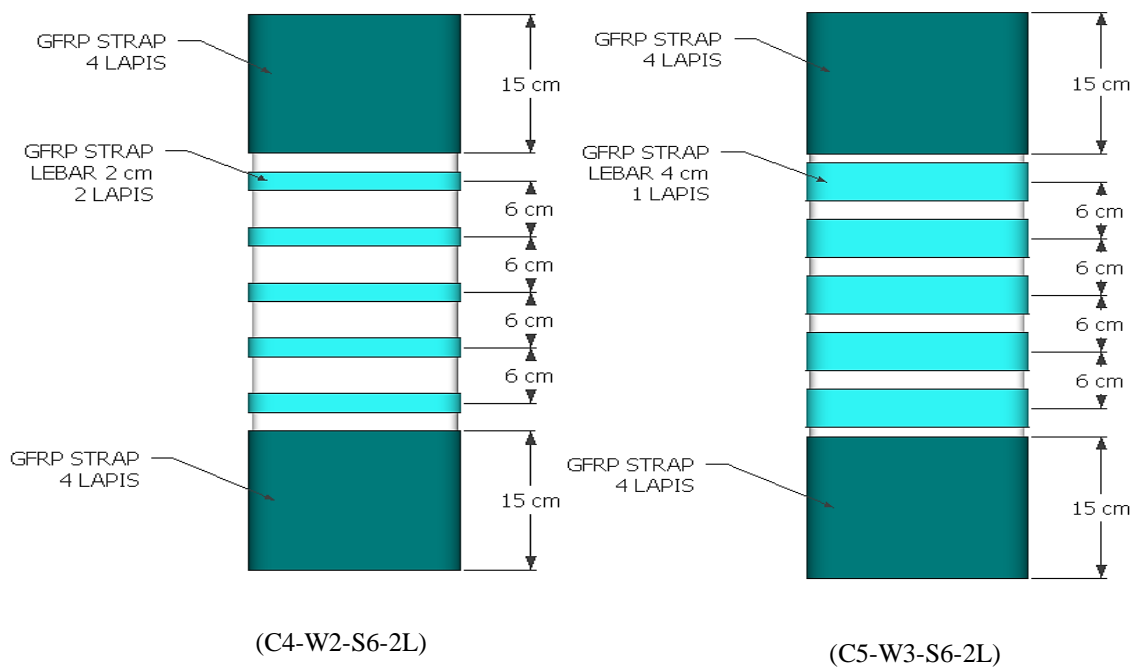
**Gambar 3.1** Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi lebar C1-W2-S6-1L, C2-W3-S6-1L, C3-W4-S6-1L

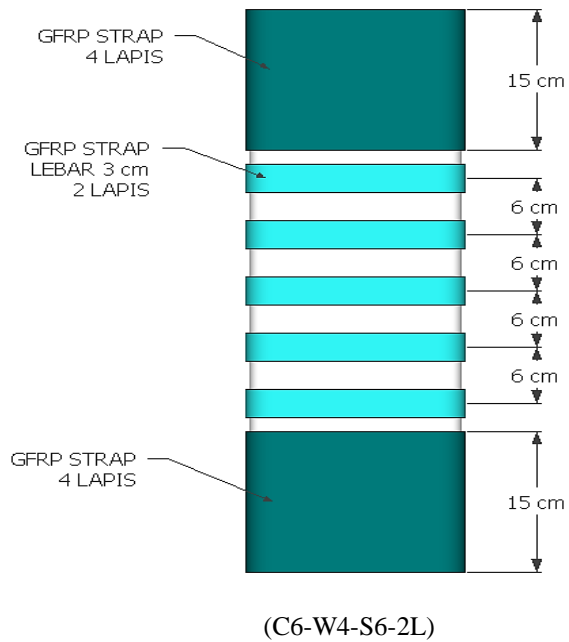
Pada model spesimen **Gambar 3.1**, pemasangan strap pertama dimulai dari as tengah benda uji kolom beton lalu dari as strap diukur sejauh 60 mm ke as strap berikutnya dengan variasi lebar 20 mm, 30 mm dan 40 mm.

Tabel 3.3 Benda uji kolom **E-GFRP strap** dengan variasi lebar dan dua lapis

| No | Kode specimen | Benda uji silinder |
|----|---------------|--------------------|
| 1  | C4-W2-S6-2L   | 180x180x60mm       |
| 2  | C5-W3-S6-2L   |                    |
| 3  | C6-W4-S6-2L   |                    |

Tabel 3.3 disajikan kolom (4, 5, 6) variasi lebar dengan spasi dan layar yang sama





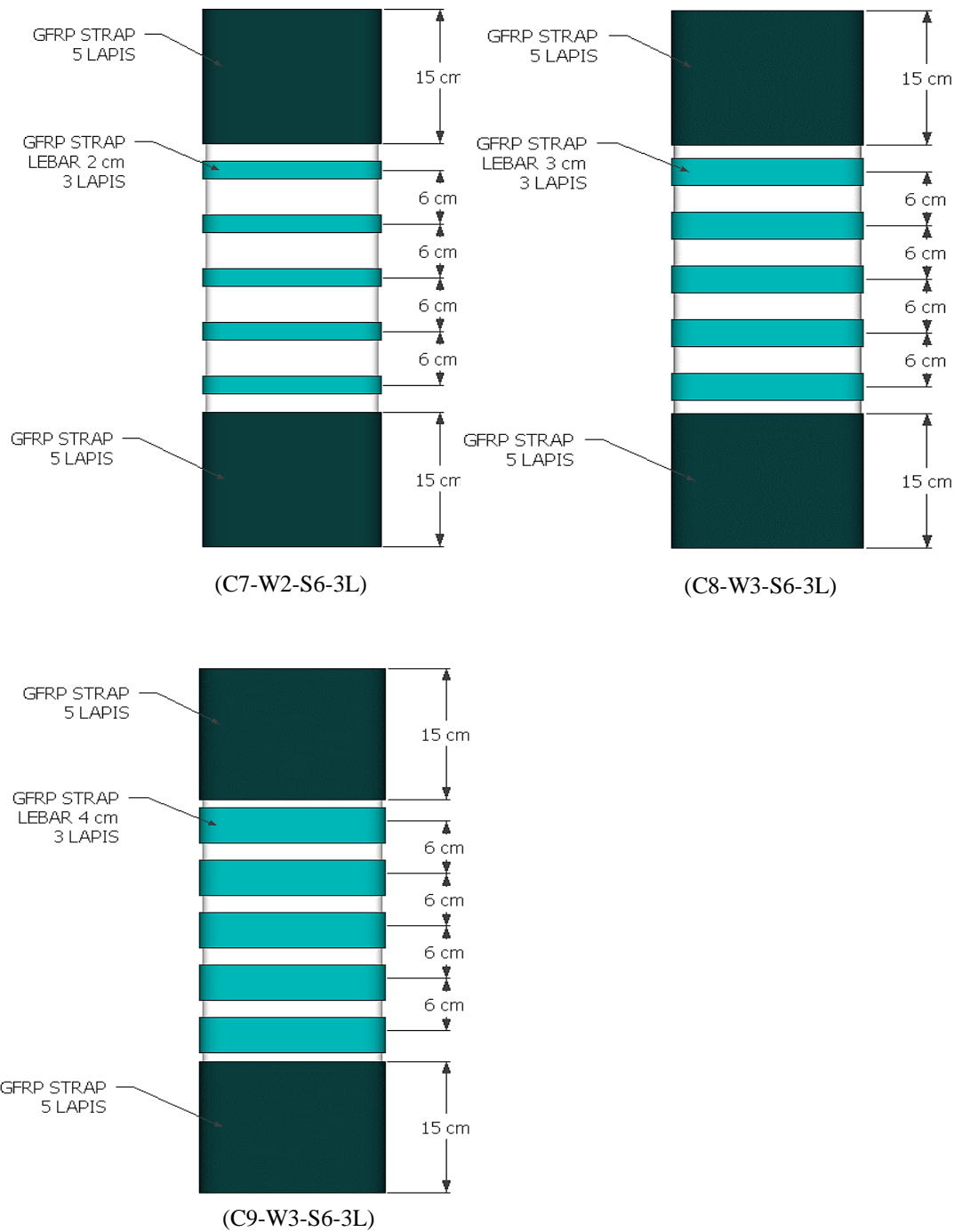
**Gambar 3.2** Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi lebar C4-W2-S6-2L, C5-W3-S6-2L, C6-W4-S6-2L (Lanjutan)

Pada model specimen **Gambar 3.2**, pemasangan strap pertama dimulai dari as tengah benda uji kolom beton lalu dari as strap diukur sejauh 60 mm ke as strap berikutnya dengan variasi lebar 20 mm, 30 mm dan 40 mm dan 2 layer.

Tabel 3.4 Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi lebar dan tiga lapis

| No | Kode specimen | Benda uji silinder |
|----|---------------|--------------------|
| 1  | C7-W2-S6-3L   | 180x180x60mm       |
| 2  | C8-W3-S6-3L   |                    |
| 3  | C9-W4-S6-3L   |                    |

Tabel 3.4 disajikan kolom (7, 8, 9) variasi lebar dengan spasi dan layar yang sama



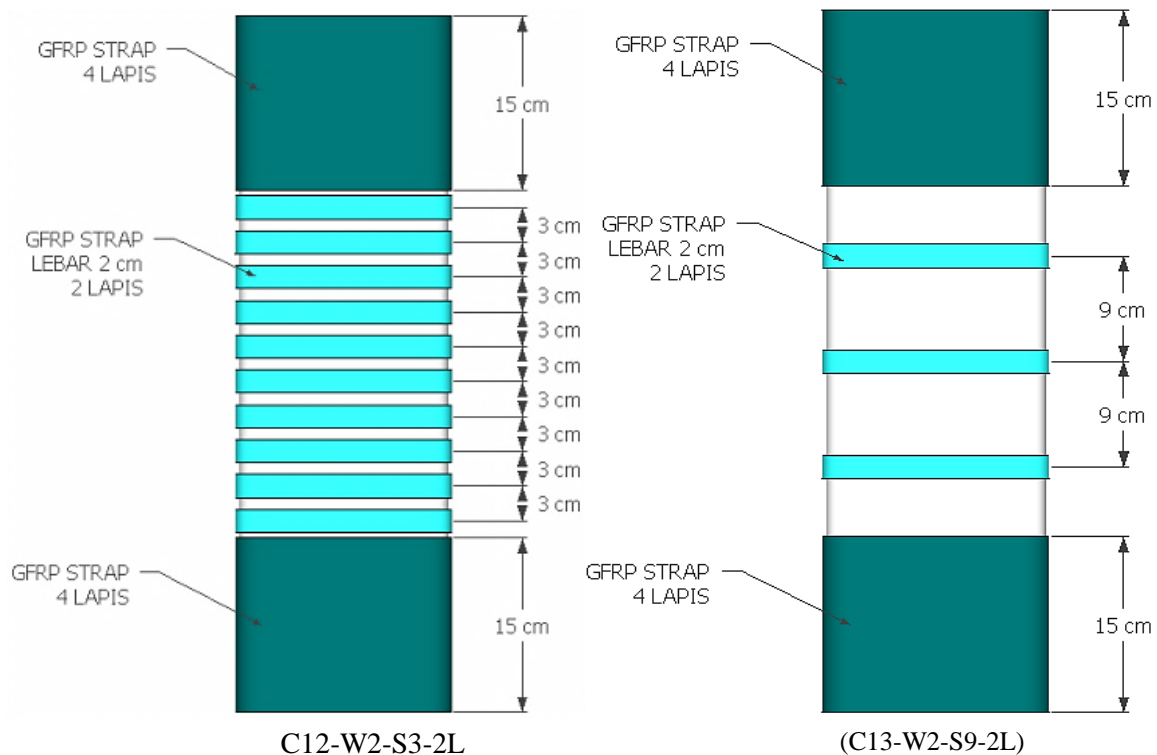
**Gambar 3.3** Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi lebar C7-W2-S6-3L, C8-W3-S6-3L, C93-S6-3L

Pada model specimen **Gambar 3.3**, pemasangan strap pertama dimulai dari as tengah benda uji kolom beton lalu dari as strap diukur sejauh 60 mm ke as strap berikutnya dengan variasi lebar 20 mm, 30 mm dan 40 mm dan 3 layer.

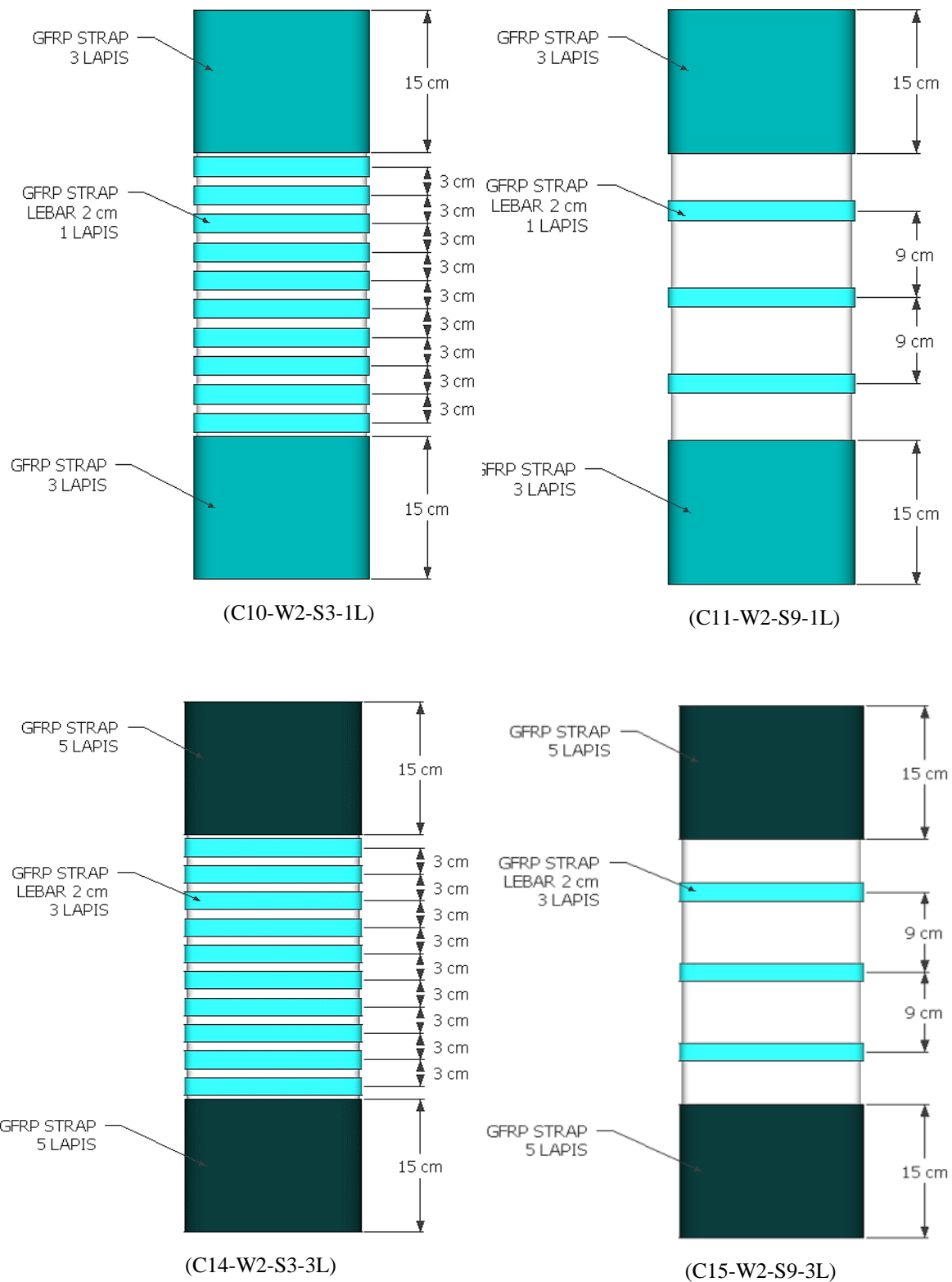
Tabel 3.5 Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi spasi

| No | Kode specimen | Benda uji silinder |
|----|---------------|--------------------|
| 1  | C10-W2-S3-1L  | 180x180x60mm       |
| 2  | C11-W2-S9-1L  |                    |
| 3  | C12-W2-S3-2L  |                    |
| 4  | C13-W2-S9-2L  |                    |
| 5  | C14- W2-S3-3L |                    |
| 6  | C15- W2-S9-3L |                    |

Tabel 3.5 disajikan kolom (10, 11, 12, 13, 14, 15) variasi spasi, layer dengan lebar yang sama



**Gambar 3.4** Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi spasi



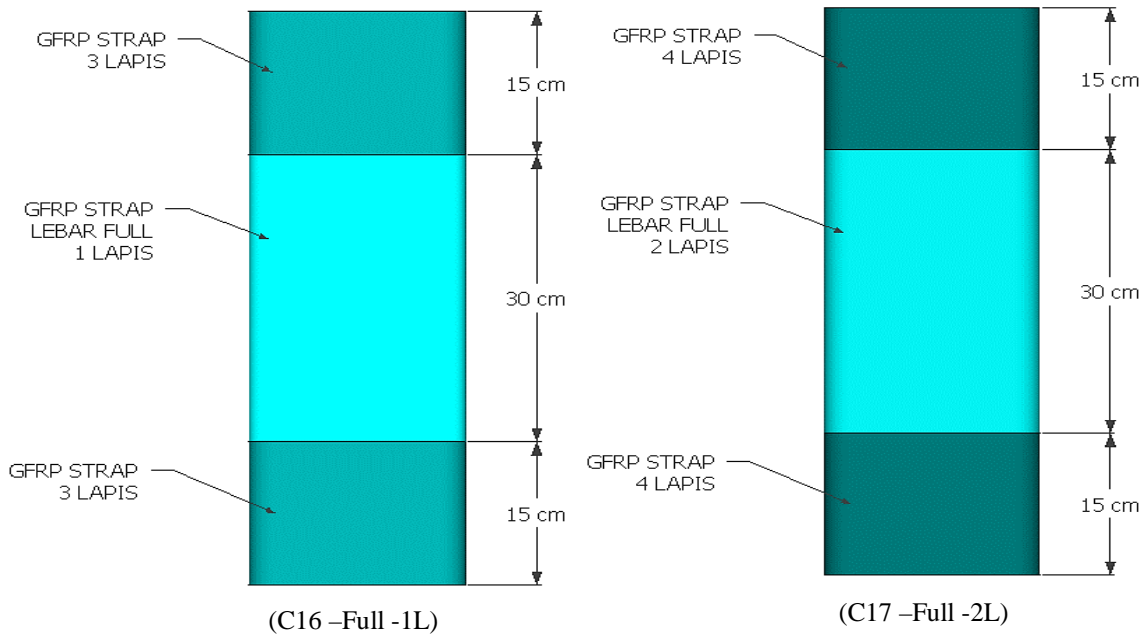
**Gambar 3.4** Benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan variasi spasi (Lanjutan)

Pada model specimen **Gambar 3.4**, pemasangan strap pertama dimulai dari as tengah benda uji kolom beton lalu dari as strap diukur sejauh sesuai dengan variasi lebar dan layer.

Tabel 3.6 Benda uji kolom *E-GFRP full wrap*

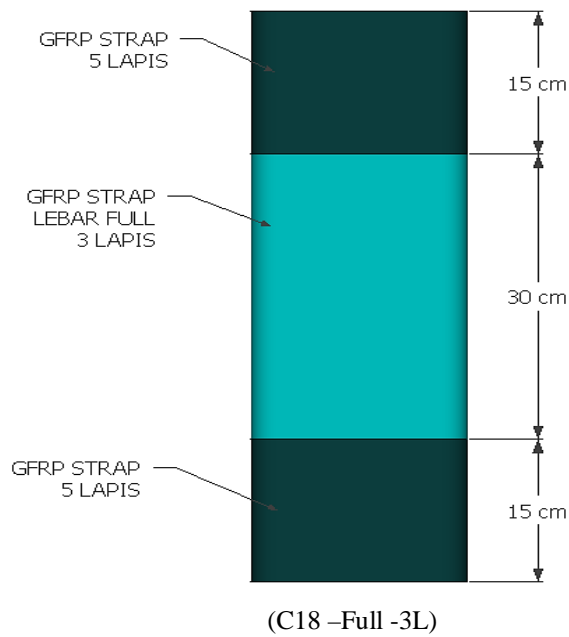
|   |          |              |
|---|----------|--------------|
| 1 | C16-F-1L | 180x180x60mm |
| 2 | C17-F-2L |              |
| 3 | C18-F-3L |              |

Tabel 3.6 disajikan kolom (16, 17, 18) full wrap



**Gambar 3.5** Benda uji kolom *E-GFRP full wrap*





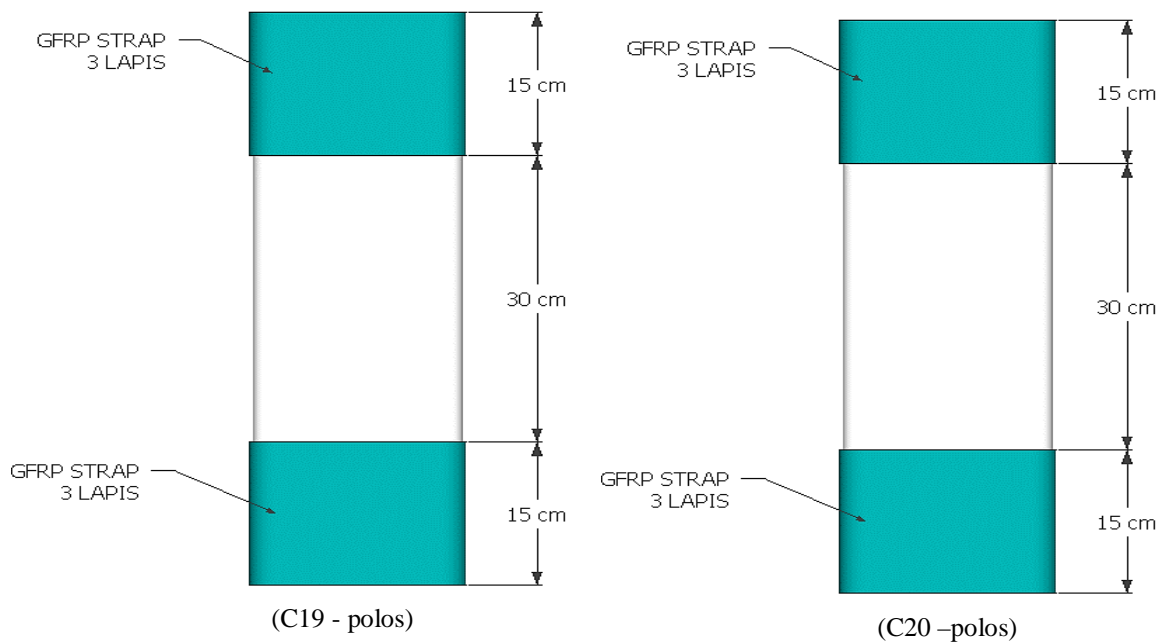
**Gambar 3.5** Benda uji kolom *E-GFRP full wrap* (lanjutan)

Pada model spesimen di **Gambar 3.5** spesimen dibungkus secara penuh atau *full wrap* sebanyak 1, 2 dan 3 lapis atau *layer*.

Tabel 3.7 Benda uji kolom tanpa *E-GFRP*

|    |     |              |
|----|-----|--------------|
| 19 | C19 | 180x180x60mm |
| 20 | C20 |              |

Tabel 3.7 disajikan kolom beton polos tanpa E-GFRP



**Gambar 3.6** Benda uji kolom Beton Polos

Pada model spesimen di **Gambar 3.6** spesimen yang akan digunakan sebagai pembandingan mutu beton

### 3.5 Desain Benda Uji Di Laboratorium

#### 3.5.1 Beton

Beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton normal dengan kekuatan tekan beton  $f_c' = 20$  MPa dan Perancangan campuran beton (*mix design*) dibuat dengan menggunakan molen, berdasarkan standar tata cara pembuatan rencana campuran beton normal SKSNI-T15-1991-03 yang dilakukan di laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Mix desain beton normal dengan mutu 20 MPa yang dihasilkan dengan proporsi campuran disajikan dalam bentuk Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Komposisi Campuran Beton Normal Mutu 20 MPa.

| No. | Uraian  | Tabel/grafik/<br>perhitungan                 | Nilai            | Satuan             |
|-----|---|--|------------------|--------------------|
| 1   | Kuat tekan yang disyaratkan ( Benda uji silinder/ kubus | Ditetapkan                                   | 20               | MPa                |
| 2   | Deviasi standar   | Butir (4.3.2.1.1)(2) table 1                 | 2.5              | MPa                |
| 3   | Nilai tambah(margin)                                    | Butir 4.2.3.1.2)                             | 4.1              | MPa                |
| 4   | Kekuatan rata-rata yang ditargetkan                     | Butir 4.2.3.1.3)                             | 24.1             | MPa                |
| 5   | Jenis semen   | ditetapkan                                   | Portland cement  |                    |
| 6   | Jenis agregat – kasar -halus                            |  | Batu pecah Alami |                    |
| 7   | Faktor air semen bebas                                  | Tabel 2 grafik 1 atau 2                      | 0.65             |                    |
| 8   | Faktor air semen maksimum                               | Butir 4.2.3.2                                | -                |                    |
| 9   | Slump   | ditetapkan                                   | 100              | mm                 |
| 10  | Ukuran agregat maksimum                                 | Ditetapkan butir 4.2.3.4                     | 20               | mm                 |
| 11  | Kadar air bebas   | Tabel 3<br>Butir 4.2.3.5                     | $190/0.65 = 292$ | Kg/cm <sup>2</sup> |
| 12  | Jumlah semen  | 11: 8 atau 7                                 |                  |                    |
| 13  | Jumlah semen maksimum                                   | Ditetapkan                                   |                  |                    |
| 14  | Jumlah semen minimum                                    | Ditetapkan<br>Butir 4.2.1.2<br>Tabel 4,5,6   |                  |                    |
| 15  | Faktor air semen yang disesuaikan                       | -  |                  |                    |
| 16  | Susunan besar butir agregat halus                       | Grafik 3 s/d 6                               |                  |                    |
| 17  | Susunan agregat kasar atau gabungan                     | Grafik 7,8,9 atau tabel 7<br>Grafik 10,11,12 |                  |                    |
| 18  | Persen agregat halus                                    | Grafik 13 s/d 15 atau perhitungan            | 40               | %                  |
| 19  | Berat jenis relative, agregat ( kering permukaan)       | Diketahui/dianggap                           |                  |                    |
| 20  | Berat isi beton   | Grafik 16                                    | 2390             | Kg/cm <sup>3</sup> |
| 21  | Kadar agregat gabungan                                  | 20-(12+11)                                   | 1908             | Kg/cm <sup>3</sup> |
| 22  | Kadar agregat halus                                     | 18x21  | 763.2            | Kg/cm <sup>3</sup> |
| 23  | Kadar agregat kasar                                     | 21-22  | 1144.8           | Kg/cm <sup>3</sup> |
| 24  | Proporsi campuran :                                     |  |                  |                    |
|     | -Semen :  |  | 292              | kg                 |
|     | -Air:   |  | 190              | kg/lt              |
|     | Agregat kondisi jenuh kering permukaan                  |  |                  |                    |
|     | -Halus:   |  | <b>763.2</b>     | kg                 |
|     | -Kasar:   |  | <b>1144.8</b>    | kg                 |

### 3.5.2 Material *E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP)*

Karena benda uji *E-GFRP* berupa lembaran maka terlebih dahulu harus di potong sesuai dengan ukuran yang dibutuhkan untuk dipakai sebagai pengekang benda uji kolom dengan *full wrap*, *strap* dengan variasi lebar , spasi dan jumlah lapisan berdasarkan Tabel 3.9

3.9 Tabel Variasi Pemasangan *E-GFRP* Pada Benda Uji Kolom Beton

| No                    | <i>E-GFRP</i>       |            | <i>Layer E-GFRP</i> | Jumlah benda uji | Type <i>wrap</i> |
|-----------------------|---------------------|------------|---------------------|------------------|------------------|
|                       | Ukuran lebar (cm)   | Spasi (cm) |                     |                  |                  |
| 1                     | 2,3 dan 4           | 6          | 1                   | 3                | <i>Strap</i>     |
| 2                     | 2,3 dan 4           | 6          | 2                   | 3                | <i>Strap</i>     |
| 3                     | 2,3 dan 4           | 6          | 3                   | 3                | <i>Strap</i>     |
| 4                     | 2                   | 3 dan 9    | 1                   | 2                | <i>Strap</i>     |
| 5                     | 2                   | 3 dan 9    | 2                   | 2                | <i>Strap</i>     |
| 6                     | 2                   | 3 dan 9    | 3                   | 2                | <i>Strap</i>     |
| 7                     | <i>Full</i>         | -          | 1                   | 1                | <i>Full</i>      |
| 8                     | <i>Full</i>         | -          | 2                   | 1                | <i>Full</i>      |
| 9                     | <i>Full</i>         | -          | 3                   | 1                | <i>Full</i>      |
| 10                    | Tanpa <i>E-GFRP</i> | -          | <i>No layer</i>     | 2                | <i>No wrap</i>   |
| Total benda uji kolom |                     |            |                     | 20               |                  |

Langkah kerja pemasangan lapis *E-GFRP* :

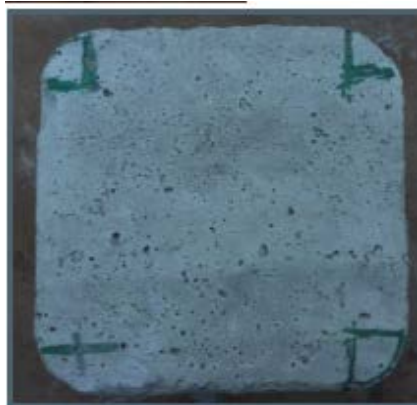
- a) Untuk setiap kolom permukaan harus diratakan dan pembulatan keempat sudut kolom. Sudut masing – masing kolom dibulatkan dengan radius sudut 0.75" yang akan dilapisi dengan *E-GFRP* dengan gerinda kasar dan halus



(a)  
Pembulatan sudut  
benda uji kolom



(b)  
Perataan  
benda uji kolom



(c)  
Pengukuran sudut  
benda uji kolom



(d)  
Peralatan pembulatan  
sudut benda uji kolom

(Gambar 3.7 Peralatan dan pembulatan kolom beton)

- b) Setelah permukaan rata, lalu dibersihkan dengan menggunakan amplas dan sikat kawat untuk menghilangkan butiran – butiran lepas yang masih tersisa pada permukaan beton, lalu di lap dengan kain bersih.
- c) Pencampuran resin epoxy merek TYFO S A dan B dengan rasio campuran 1000 ml : 420 ml (TYFO S A : TYFO S B).



(a)  
Resin epoxy (TYFO S)



(b)  
*E-GFRP sheet* (TYFO SH25)

**Gambar 3.8** Persiapan dan Pemasangan *E-GFRP Strap* Pada Benda Uji Kolom

- d) Setelah kedua resin epoxy dicampur lalu dioleskan pada permukaan benda uji kolom beton dan *E-GFRP* dengan *resin epoxy* dengan menggunakan kuas sampai rata dan dibiarkan beberapa menit sebelum dipasang *E-GFRP*.



(a)  
Penerapan resin epoxy pada *E-GFRP*



(b)  
Campuran resin epoxy

**Gambar 3.9** Persiapan dan Pemasangan *E-GFRP Strap* Pada Benda Uji Kolom

e) Pemasangan *E-FGRP Wrap*

Pengukuran dan pemotongan *E-GFRP strap* dengan gunting sesuai dengan dimensi yang sudah ditentukan. Material *E-GFRP* dengan serat memanjang dipasang tegak lurus terhadap benda uji kolom beton dan serat melintang secara horizontal dan berfungsi hanya sebagai pemegang, dengan panjang sambungan (*overlapping*) yang sudah ditentukan 150 mm, kemudian dijenuhkan dengan menggunakan roller.



(a)

Pemasangan *E-GFRP strap*  
pada benda uji kolom



(b)

benda uji kolom beton  
*E-GFRP strap*

**Gambar 3.10** Pemasangan *E-FGRP Wrap*

3.5.2.1 *Test set up* (set up pengujian)

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a) Silinder beton 150 x 300 mm
- b) Bekisting (cetakan) benda uji kolom  
Bentuk dan ukuran benda uji kolom beton persegi dengan penampang 180 × 180 mm dan tinggi 600 mm.
- c) Alat pencampur beton kapasitas 0.05 m<sup>3</sup> (*concrete mixer*) laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
- d) Alat uji tekan silinder beton merk ELE buatan inggris kapasitas 200 ton di laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
- e) Alat uji tekan benda uji kolom Universal Testing Machine HT

2101 series, Hung Ta instrument Co.Ltd kapasitas 300 ton di laboratorium Bhirawa Steel.



(a)  
Silinder 150 x 300 mm



(b)  
Concrete mixer kapasitas  $0.05m^3$



(c)  
Bekisting benda uji kolom



(d)  
Mesin penguji tekan silinder beton

**Gambar 3.11** Test set up





(e)

Concrete compression test machine

**Gambar 3.11** Test set up (Lanjutan)

### 3.5.3 Benda Uji Silinder Beton

#### 3.5.3.1 Persiapan dan pembuatan benda uji

- a) Benda uji silinder beton digunakan untuk menentukan kekuatan tekan beton ( $f_c'$ ) dengan ukuran  $15 \times 30$  cm. Pengecoran dilakukan hanya satu kali dengan menggunakan alat pencampur beton (*Concrete mixer*) karena jumlah benda uji silinder beton hanya sebanyak 6 buah dan pengecoran ini dilakukan di laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.
- b) Analisis material beton yaitu: agregat halus, agregat kasar, pasir, semen, dan air
- c) Mix desain beton untuk menentukan volume campuran beton tentang agregat halus, agregat kasar, pasir, semen, dan air.
- d) Perawatan dapat dilakukan setelah 24 jam pengecoran dan dibuka bekistingnya, lalu dimasukkan kedalam bak perawatan selama 28 hari dan setelah itu baru dilakukan pengujian kuat tekan beton ( $f_c'$ ).



(a)  
Analisa agregat halus



(b)  
Timbang agregat halus



(c)  
Analisa dan timbang  
agregat kasar



(d)  
Agregat halus dan  
kasar di oven

**Gambar 3.12** Analisa Material beton



(a)  
Pesiapan silinder  
untuk pengecoran



(b)  
Concrete mix



(c)  
Benda uji silinder beton



(d)  
Perawatan benda uji silinder

**Gambar 3.13** Persiapan dan Pengecoran Benda Uji Silinder Beton

#### 3.5.4 Benda Uji Kolom Beton

- a) Bentuk dan ukuran Benda uji kolom beton persegi dengan penampang  $180 \times 180$  mm dengan tinggi 600 mm sebanyak 20 buah. Benda uji kolom beton persegi ini dapat di buat setelah pengujian benda uji silinder beton.
- b) Pengecoran dapat dilakukan secara bertahap setiap 4 buah benda uji mengingat kapasitas alat pencampur (*concrete mixer*) yang ada di laboratorium Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Setelah masa perawatan umur 28 hari benda uji kolom harus

disimpan dalam ruangan tertutup dengan aman setelah selama 14 hari sampai pemasangan *E-GFRP* siap dilakukan.

- c) Bentuk benda uji kolom persegi harus dibulatkan sudutnya dengan radius sekitar 0.75" untuk meminimalkan tegangan yang berkonsentrasi disudut kolom saat dibungkus dengan *E-GFRP*



(a)

Pesiapan bekisting benda uji kolom



(b)

Persiapan material



(c)

Beton segar



(d)

Benda uji kolom beton

**Gambar 3.14** Persiapan dan Pengecoran Benda Uji kolom Beton



(e)

Pembongkaran bekisting kolom

**Gambar 3.14** Persiapan dan Pengecoran Benda Uji kolom Beton (Lanjutan)

### **3.6 Pengujian Di Laboratorium**

#### **3.6.1 Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton**

- a) Untuk mengetahui mutu beton digunakan benda uji silinder beton ukuran  $150 \times 300$  mm sebanyak 6 buah dengan menggunakan alat penguji tekan silinder beton merk ELE buatan Inggris kapasitas 200 ton di laboratorium Institut Tehnologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya..
- b) Sebelum dilakukan pengujian, permukaan benda uji silinder harus rata dan tegak lurus dengan menggunakan belerang dengan cara tuangkan belerang kedalam cetakan lalu letakkan permukaan benda uji kedalam cetakan tersebut.
- c) Pengujian benda uji dapat dilakukan setelah benda uji silinder beton mencapai umur 28 hari.

Tabel 3.11 Hasil Perhitungan Kekuatan Tekan Silinder Tiap-Tiap Benda Uji Kolom Beton

| No.                                       | Kode silinder | Umur Pengujian ( hari ) | Diameter ( cm ) | Gaya tekan tes ( ton ) | Kekuatan tekan silinder ( MPa ) |
|---|---------------|-------------------------|-----------------|------------------------|---------------------------------|
| 1   | S-1           | 28                      | 176.625         | 37.4                   | 21.174                          |
| 2   | S-2           | 28                      | 176.625         | 36.2                   | 20.495                          |
| 3   | S-3           | 28                      | 176.625         | 35,4                   | 20.042                          |
| 4   | S-4           | 28                      | 176.625         | 43,8                   | 24.798                          |
| 5   | S-5           | 28                      | 176.625         | 37,4                   | 21.175                          |
| 6   | S-6           | 28                      | 176.625         | 35,8                   | 20.042                          |
| Kuat tekan rata – rata benda uji silinder |               |                         |                 |                        | 21.288                          |



(a)  
Benda uji silinder beton



(b)  
Cetakan capping benda uji silinder



(c)  
Pengujian benda uji silinder beton



(d)  
Hasil test benda uji silinder

**Gambar 3.15** Persiapan sebelum pengujian benda uji silinder beton

### 3.6.2 Pengujian Benda Uji Kolom Beton Persegi

a) Pemasangan *E-GFRP* pada benda uji kolom.

Sebelum dilakukan pengujian benda uji kolom beton persegi harus dilakukan pemasangan *E-GFRP full wrap, strap* dengan variasi lebar, spasi, layer pada benda uji kolom setelah umur mencapai 28 hari dan disimpan dalam ruangan selama 14 hari.

b) Permukaan benda uji kolom harus rata dan tegak lurus dengan perataan belerang yang dituangkan ke permukaan benda uji kolom.

c) Mempersiapkan kamera digital dan video untuk mengambil gambar dan video pada saat pengujian benda uji kolom untuk dokumentasi.

d) Mempersiapkan kode benda uji kolom

e) Semua benda uji kolom diuji dengan menggunakan mesin kuat tekan beton kapasitas 300 ton di laboratorium Bhirawa Steel. Pada mesin pengujian telah dilengkapi alat pengukur longitudinal strain yang terjadi yang terhubung dengan data logger. Skema pemasangan dan percobaan digambarkan seperti dibawah ini



(a)

Mesin benda uji kolom  
Hung ta 2101 series



(b)

Set up mesin benda uji kolom

**Gambar 3.16** Skema Percobaan Tekan Monotonik



(c)

Benda uji kolom beton E-GFRP

**Gambar 3.16** Skema Percobaan Tekan Monotonik (Lanjutan)

Pada sekeliling alat pengujian diberi plastik agar debu dan serpihan hasil pengujian tidak sampai keluar mengotori ruangan lab atas permintaan P.T. Bhirawa Steel. Spesimen kemudian diletakkan di alat pengujian seperti pada Gambar 3.13. Pengujian menggunakan metode *displacement control*, dimana kecepatan pengujian menggunakan patokan regangan/menit. Metode ini dipilih agar dapat menggambarkan pola tegangan-regangan setelah tegangan mencapai puncak. Kecepatan pengujian yang direncanakan pada Tabel 3.12:

Tabel 3.12 Perhitungan kecepatan pengujian berdasarkan *displacement control*

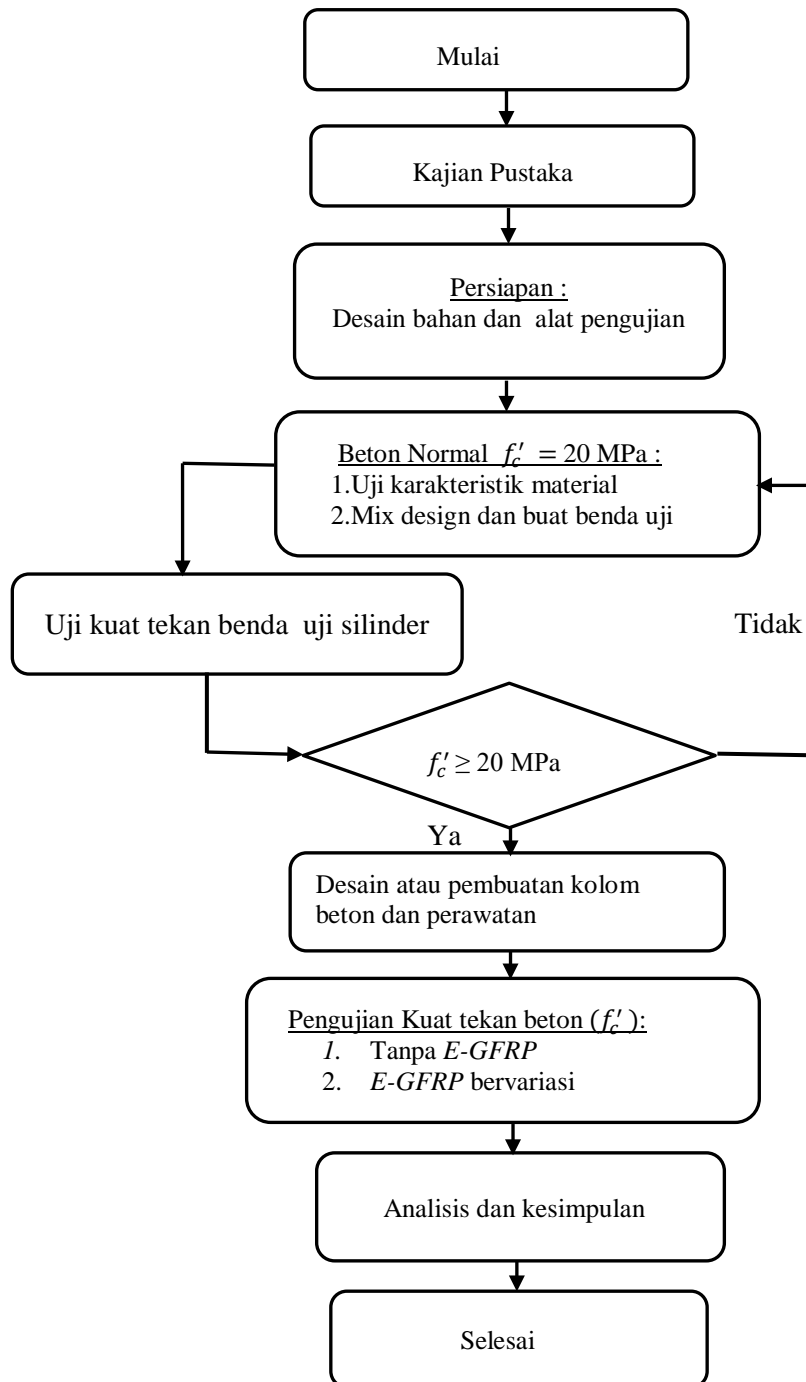
|                               |   |            |        |
|-------------------------------|---|------------|--------|
| $f_c$                         | = | 20         | MPa    |
| $\epsilon_c$                  | = | 21019.039  | MPa    |
| Stress loading rate (ASTM)    | = | 0.3        | MPa/s  |
| Strain rate (ASTM)            | = | 1.4273E-05 | /s     |
| Strain rate (ASTM) $\epsilon$ | = | 0.00085637 | /min   |
| Displacementrate (ASTM)       | = | 0.25690994 | mm/min |

Kecepatan pengujian awal yang dipakai adalah 0.2569 mm/menit. Namun dikarenakan keterbatasan waktu penggunaan laboratorium, kecepatan pengujian dinaikkan menjadi 0.771 mm/menit pada pengujian kesepuluh hingga kedua belas. Setelah mengamati waktu pengujian pada tiga spesimen tersebut, diputuskan untuk menurunkan kecepatan pengujian menjadi 0.6425 mm/menit .



### 3.7 Diagram Alir Penelitian

Untuk mencapai tujuan penelitian dengan baik, rancangan atau tahapan penelitian ini mengikuti metodologi seperti yang terlihat pada diagram alir pada **Gambar 3-17** :



**Gambar 3.17** Diagram Alir Penelitian

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 4**

### **ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Umum**

Pada Bab ini, akan menyajikan hasil pengamatan dari pengujian benda uji kolom beton persegi yang dikekang dengan *E-Glass Fiber Reinforced Polymer (E-GFRP)* sheet dengan penampang  $180 \times 180$  mm dengan tinggi 600 mm sebanyak 20 buah. Specimen kolom beton dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu :

1. Benda uji kolom tanpa *E-GFRP* (Kolom beton polos)
2. Benda uji kolom dibungkus penuh (*full wrap*) dengan *E-GFRP*
3. Benda uji kolom dengan *E-GFRP strap* dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan.

Hasil uji eksperimental berupa data hubungan tegangan-regangan aksial tekan dan model kegagalan spesimen / benda uji kolom beton persegi yang dikekang dengan *E-GFRP* penuh (*full wrap*), atau dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan serta specimen kolom tanpa pengekangan *E-GFRP* (kolom beton polos).

#### **4.2 Hasil Uji Eksperimental Benda Uji Kolom Beton**

Hasil uji eksperimental diperoleh dari pengujian benda uji kolom sebanyak 20 buah. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas beban pada benda uji kolom yang dikekang dengan *E-GFRP* penuh (*full wrap*) dan *strap* dengan variasi lebar, spasi, dan jumlah lapisan. Hasil eksperimental benda uji kolom beton yang dirangkum dalam Tabel 4.1 untuk beban aksial maksimum, tegangan aksial maksimum, regangan aksial maksimum, regangan pada saat tegangan pasca puncak sebesar 80% dan 50% dari tegangan aksial puncak (maksimum).

Tabel 4.1 Hasil Uji Eksperimental Benda Uji Kolom Beton Terkekang *E-GFRP*  
(*Full Wrap, Strap, Tanpa E-GFRP*)

| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       | Beban (N) |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |           |
| 1  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79         | 13.62         | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  | 882.4     |
| 2  | C2-W3-S6-1L        | 29.75                       | 23.80         | 14.87         | 0.88                             | 1.85                   | 1.53                  | 963.9     |
| 3  | C3-W4-S6-1L        | 30.81                       | 24.65         | 15.40         | 0.84                             | 1.16                   | 1.24                  | 998.1     |
| 4  | C4-W2-S6-2L        | 30.81                       | 24.75         | 15.47         | 0.80                             | 1.12                   | 1.17                  | 1002.4    |
| 5  | C5-W3-S6-2L        | 31.34                       | 25.07         | 15.67         | 0.61                             | 0.92                   | 1.02                  | 1015.3    |
| 6  | C6-W4-S6-2L        | 31.76                       | 25.41         | 15.88         | 0.74                             | 1.30                   | 1.35                  | 1029.2    |
| 7  | C7-W2-S6-3L        | 32.57                       | 26.05         | 16.28         | 1.31                             | 1.48                   | 1.63                  | 1055.2    |
| 8  | C8-W3-S6-3L        | 31.98                       | 25.58         | 15.99         | 0.81                             | 1.50                   | 1.68                  | 1036.1    |
| 9  | C9-W4-S6-3L        | 32.24                       | 25.79         | 16.12         | 0.83                             | 1.15                   | 1.28                  | 1044.7    |
| 10 | C10-W2-S3-1L       | 26.94                       | 21.55         | 13.47         | 0.79                             | 1.28                   | 1.42                  | 872.7     |
| 11 | C11-W2-S9-1L       | 22.38                       | 17.90         | 11.19         | 0.92                             | 1.20                   | 1.50                  | 725.1     |
| 12 | C12-W2-S3-2L       | 24.37                       | 19.50         | 12.19         | 0.58                             | 0.98                   | 1.06                  | 789.6     |
| 13 | C13-W2-S9-2L       | 24.46                       | 19.57         | 12.23         | 0.65                             | 1.06                   | 1.29                  | 792.6     |
| 14 | C14- W2-S3-3L      | 32.77                       | 26.21         | 16.38         | 1.01                             | 1.09                   | 1.33                  | 1061.7    |
| 15 | C15- W2-S9-3L      | 32.23                       | 25.78         | 16.11         | 0.88                             | 1.12                   | 1.26                  | 1044.2    |
| 16 | C16-F-1L           | 35.29                       | 28.23         | 17.65         | 1.23                             | 1.54                   | 1.60                  | 1143.5    |
| 17 | C17-F-2L           | 36.76                       | 29.41         | 18.38         | 1.62                             | 1.85                   | 1.94                  | 1191.1    |
| 18 | C18-F-3L           | 39.46                       | 31.57         | 19.73         | 1.19                             | 1.64                   | 1.80                  | 1278.4    |
| 19 | C19 NL             | 30.02                       | 24.02         | 15.01         | 0.60                             | 0.63                   | 0.83                  | 972.8     |
| 20 | C20 NL             | 28.51                       | 22.81         | 14.25         | 0.67                             | 0.75                   | 0.89                  | 923.7     |

#### 4.3 Pengamatan Hasil Pengujian Benda Uji Kolom Beton

##### 4.3.1 Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton dengan variasi lebar C1-W2-S6-1L, C2-W3-S6-1L dan C3-W4-S6-1L .

Pada Gambar 4.1 untuk spesimen kolom beton C1-W2-S6-1L, C2-W3-S6-1L, C3-W4-S6-1L, model keruntuhan diawali dengan retak halus pada kolom dan beberapa saat sebelum *E-GFRP strap* putus secara mendadak (meledak) yang dimulai di sekitar pojok-pojok kolom, karena adanya konsentrasi tegangan tinggi dilokasi pojok tersebut



(a)

Spesimen C1-W2-S6-1L  
Setelah mengalami  
keruntuhan



(b)

Spesimen C2-W3-S6-1L  
Setelah mengalami  
keruntuhan



(c)

Spesimen C3-W4-S6-1L  
Setelah Mengalami  
Keruntuhan

Gambar 4.1 Benda Uji Kolom Dikekang *E-GFRP strap* dengan variasi lebar setelah mengalami kegagalan

. Pola dan penyebab keruntuhan/kegagalan spesimen kolom beton yang dikekang dengan E-GFRP strap yang diamati dan dicatat selama pengujian diringkas dalam Tabel 4.2

#### 4.2 Pola Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Lebar

| No. | Identitas spesimen | Regangan $\epsilon_{cc}$ (%) | Model kerusakan pada 4 sisi benda uji kolom (beton retak, <i>E-GFRP</i> putus) |          |                               |                          |
|-----|--------------------|------------------------------|--|----------|-------------------------------|--------------------------|
|     |                    |                              | Depan  | Belakang | Kiri                          | Kanan                    |
| 1   | C1-W2-S6-1L        | 0.110                        | Beton retak  |          |                               |                          |
|     |                    | 0.111 , 0.112                |  |          | E-GFRP putus di ujung atas    |                          |
|     |                    | 0.128                        |  |          | GFRP putus di tengah - tengah |                          |
| 2   | C2-W3-S6-1L        | 0.106                        |  |          |                               | Beton retak bergelombang |
|     |                    | 0.121                        |  |          |                               | E-GFRP putus ditengah    |
|     |                    | 0.121                        | E-GFRP putus di tengah   |          |                               |                          |
|     |                    | 0.111                        | E-GFRP putus di ujung bawah  |          |                               |                          |
| 3   | C3-W4-S6-1L        | 0.087                        | Beton retak  |          |                               |                          |
|     |                    | 0.104                        | E-GFRP putus tengah  |          |                               |                          |
|     |                    | 0.106                        | E-GFRP putus di ujung bawah  |          |                               |                          |

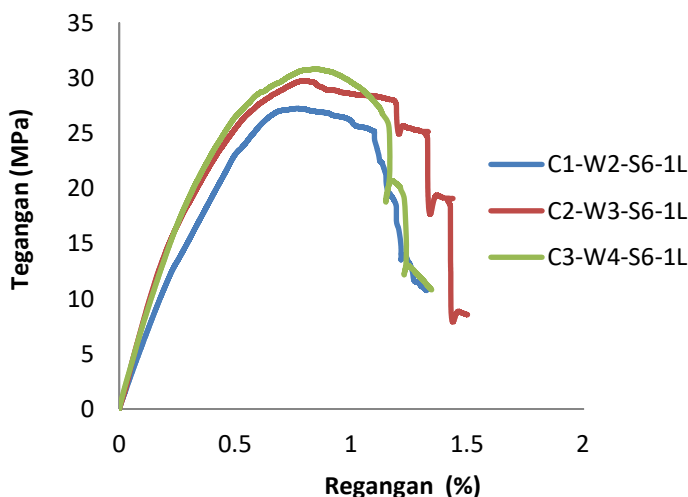
Tabel 4.3 Menyajikan benda uji kolom yang dikekang oleh *E-GFRP strap* dengan variasi lebar ( $W$ ) = 20, 30, dan 40 mm dengan spasi 60 mm dan satu lapis, dimana kekuatan tekan tegangan ( $f_{cc}'$ ) dan regangan/deformasinya mengalami peningkatan, namun untuk specimen kolom C3-W4-S6-1L dengan lebar *strap* 40 mm tidak mengalami peningkatan daktilitas yang berarti.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Benda Uji Kolom *E-GFRP Strap* Dengan Variasi Lebar *Strap* ( $w$ )

| No. | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (MPa) |              |              | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       | Beban (N) |
|-----|--------------------|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
|     |                    | $f_{cc}'$                   | $0.8f_{cc}'$ | $0.5f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |           |
| 1   | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79        | 13.62        | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  | 882.4     |
| 2   | C2-W3-S6-1L        | 29.75                       | 23.80        | 14.87        | 0.88                             | 1.85                   | 1.53                  | 944.622   |
| 3   | C3-W4-S6-1L        | 30.81                       | 24.65        | 15.40        | 0.84                             | 1.16                   | 1.24                  | 998.1     |

Gambar 4.2 menunjukkan kekuatan/tegangan tekan benda uji kolom dengan *E-GFRP strap* lebar 40 mm lebih besar dari kekuatan/tegangan tekan

spesimen kolom beton dengan *E-GFRP strap* lebar 20 dan 30 mm namun daktilitasnya/deformasinya tidak menunjukkan peningkatan yang berarti.



Gambar 4.2 Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom beton Dengan Variasi Lebar (W)

#### 4.3.2 Perilaku dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Lebar C4-W2-S6-2L, C5-W3-S6- 2L dan C6-W4-S6-2L

Kegagalan pada pengujian specimen/benda uji kolom beton dalam Gambar 4.3 disebabkan oleh mengembangnya beton ke arah lateral akibat adanya tekanan aksial secara terus- menerus. Pada saat spesimen ditekan oleh alat penguji, mengembangnya beton ke 3arah lateral ditahan oleh kekangan *EGFRP Strap*, sampai mencapai tegangan puncak atau maksimum dan sesudahnya saat memasuki fase turun (*descending branch*), *EGFRP Strap* masih terus menahan proses pengembangan beton ke arah lateral. Pada saat mendekati tegangan puncak, kolom beton mulai mengalami kehancuran yang ditunjukkan dengan kerusakan awal *E-GFRP* dan peningkatan kekuatan yang semakin kecil, hingga *E-GFRP Strap* mencapai regangan putus, dan spesimen kolom beton mengalami kehancuran yang masif.



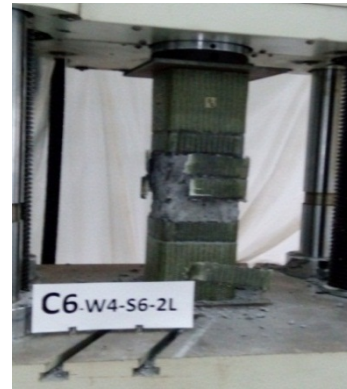
(a)

Spesimen C4-W2-S6-2L  
Setelah Mengalami  
Keruntuhan



(b)

Spesimen C5-W3-S6-2L  
Setelah Mengalami  
Keruntuhan



(c)

Spesimen C6-W4-S6-2L  
Setelah Mengalami  
Keruntuhan

Gambar 4.3 Benda Uji Kolom Dikekang E-GFRP Bervariasi

Pola dan penyebab keruntuhan/kegagalan spesimen kolom beton yang dikekang dengan E-GFRP strap yang diamati dan dicatat selama pengujian diringkas dalam Tabel 4.4



Tabel 4.4 Pola Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton

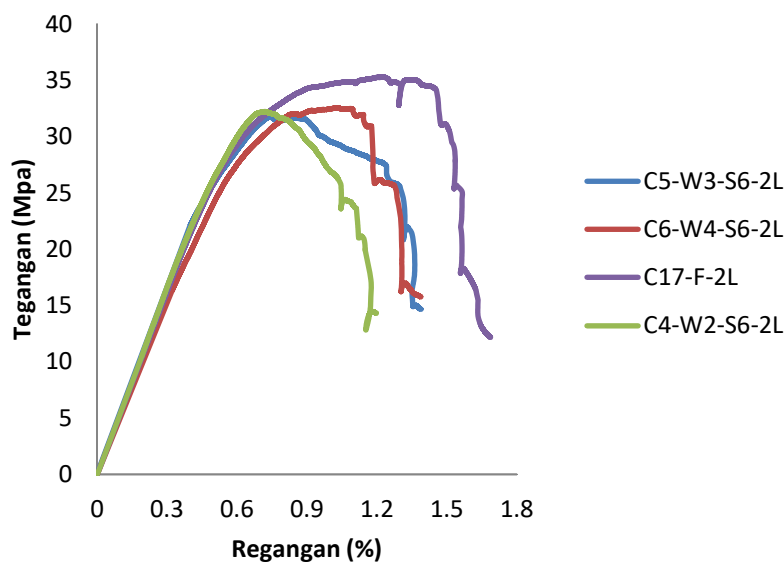
| No | Identitas spesimen | Waktu yang dibutuhkan ( s ) | Model kerusakan pada 4 sisi benda uji kolom (beton retak, E-GFRP putus) |          |      |                              |
|----|--------------------|-----------------------------|---|----------|------|------------------------------|
|    |                    |                             | Depan   | Belakang | Kiri | Kanan                        |
| 1  | C4-W2-S6-2L        | 464                         | Beton retak   |          |      |                              |
|    |                    | 575                         |   |          |      | E-GFRP putus diujung atas    |
|    |                    | 622                         | E-GFRP putus diujung bawah  |          |      |                              |
|    |                    | 664                         | E-FGRP putus ditengah-tengah  |          |      |                              |
| 2  | C5-W3-S6-2L        | 439                         |   |          |      | Beton retak bergelombang     |
|    |                    | 462                         |   |          |      | E-GFRP putus ditengah-tengah |
|    |                    | 581                         |   |          |      | E-GFRP putus diujung dibawah |
| 3  | C6-W4-S6-2L        | 434                         | Beton retak   |          |      |                              |
|    |                    | 709                         | E-GFRP putus diujung atas   |          |      |                              |

Dalam Tabel 4.5 dan Gambar 4.4 disajikan benda uji kolom yang dikekang oleh *E-GFRP strap* dengan variasi lebar ( $W$ ) = 40 mm dengan spasi 60 mm dan dua lapis, dimana kekuatan tekan tegangan ( $f_{cc}$ ) mengalami peningkatan, namun regangan/deformasinya lebih kecil dibanding dengan lebar 20 mm,

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tegangan Regangan Benda Uji Kolom

*E-GFRP Strap*

| No. | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (MPa) |              |              | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                          |                          | Beban (N) |
|-----|--------------------|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------|
|     |                    | $f_{cc}'$                   | $0.8f_{cc}'$ | $0.5f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon$ 0.8 $f_{cc}'$ | $\epsilon$ 0.5 $f_{cc}'$ |           |
| 1   | C4-W2-S6-2L        | 30.81                       | 24.75        | 15.47        | 0.80                             | 1.12                     | 1.17                     | 1002.4    |
| 2   | C5-W3-S6-2L        | 31.34                       | 25.07        | 15.67        | 0.61                             | 0.92                     | 1.02                     | 1015.3    |
| 3   | C6-W4-S6-2L        | 31.76                       | 25.41        | 15.88        | 0.74                             | 1.30                     | 1.35                     | 1029.2    |



Gambar 4.4 Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Dan Variasi Lebar (w)

4.3.3 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Lebar C7-W2-S6-3L, C8-W3-S6- 3L dan C9-W4-S6-3L.

Dalam Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa kemampuan spesimen beton *E-GFRP* mengalami retak dan runtuh dengan lebar *strap* 20 mm, lebih besar dibanding dengan lebar *strap* 30 dan 40 mm, tetapi kemampuan runtuhnya lebar *strap* 40 mm lebih tinggi dari pada lebar *strap* 20 dan 30 mm. dikarenakan lebar *strap* 40 mm mutu beton dibawah standar mutu beton yang direncanakan yaitu 20 MPa



(a)

Spesimen C7-W2-S6-3L  
setelah mengalami  
keruntuhan



(b)

Spesimen C 8-W3-S6-3L  
setelah mengalami  
keruntuhan



(c)

Spesimen C9-W4-S6-3L  
setelah mengalami  
keruntuhan

Gambar 4.5 Benda Uji Kolom Dikekang E-GFRP Variasi

Pola dan penyebab keruntuhan/kegagalan spesimen kolom beton yang dikekang dengan E-GFRP strap yang diamati dan dicatat selama pengujian diringkas dalam Tabel 4.6

Tabel 4.6 Model Keruntuhan Benda Uji Kolom

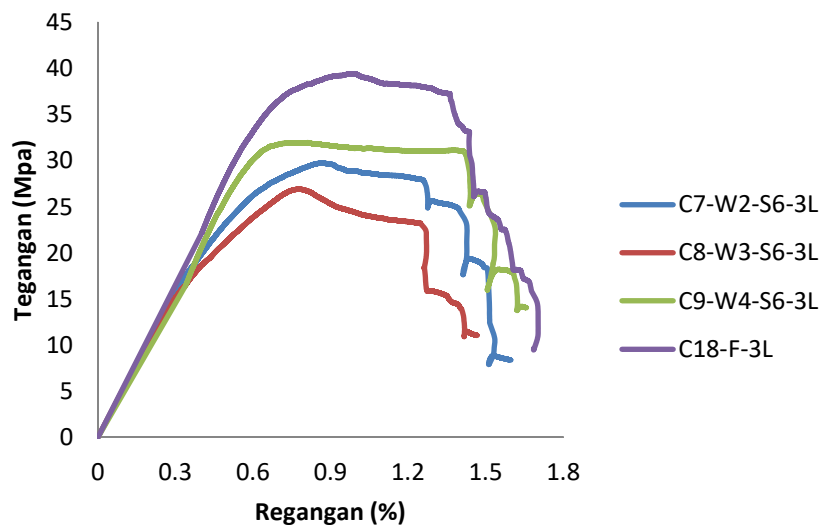
| No. | Identitas spesimen | Waktu yang dibutuhkan (s) | Model kerusakan pada 4 sisi benda uji kolom (beton retak, E-GFRP putus) |                          |                              |       |
|-----|--------------------|---------------------------|---|--------------------------|------------------------------|-------|
|     |                    |                           | Depan   | Belakang                 | Kiri                         | Kanan |
| 1   | C7-W2-S6-3L        | 750                       |   | Beton retak              |                              |       |
|     |                    | 816                       |   |                          | E-GFRP putus ditengah-tengah |       |
|     |                    | 891                       |   |                          | E-GFRP putus diujung bawah   |       |
| 2   | C8-W3-S6-3L        | 563                       |   | Beton retak bergelombang |                              |       |
|     |                    | 850                       | E-GFRP putus ditengah-tengah  |                          |                              |       |
|     |                    | 885                       | E-GFRP putus diujung bawah  |                          |                              |       |
|     | C9-W4-S6-3L        | 485                       | Beton retak   |                          |                              |       |
|     |                    | 750                       |   | Putus diujung bawah      |                              |       |
|     |                    | 821                       |   |                          | Putus ditengah-tengah        |       |

Dalam Tabel 4.7 dan Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa kekuatan/tegangan tekan untuk benda uji kolom *E-GFRP strap* dengan lebar 20 mm lebih besar dari pada kekuatan/tegangan spesimen kolom beton dengan *E-GFRP strap* dengan lebar 40 dan 30 mm disebabkan mutu beton specimen tidak sesuai mutu beton specimen yang direncanakan yaitu 20 MPa, namun daktilitsnya/defomasinya menunjukkan peningkatan yang berarti.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Tegangan Regangan Benda Uji Kolom

*E-GFRP Strap*

| No. | Identitas Specimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |              |              | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                        | Beban (N) |
|-----|--------------------|-----------------------------|--------------|--------------|----------------------------------|------------------------|------------------------|-----------|
|     |                    | $f_{cc}'$                   | $0.8f_{cc}'$ | $0.5f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5 f_{cc}'$ |           |
| 1   | C7-W2-S6-3L        | 32.57                       | 26.05        | 16.28        | 1.31                             | 1.48                   | 1.63                   | 1055.2    |
| 2   | C8-W3-S6-3L        | 31.98                       | 25.58        | 15.99        | 0.81                             | 1.50                   | 1.68                   | 1036.1    |
| 3   | C9-W4-S6-3L        | 32.24                       | 25.79        | 16.12        | 0.83                             | 1.15                   | 1.28                   | 1044.7    |



Gambar 4.6 Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom beton Dan Variasi Lebar (w)

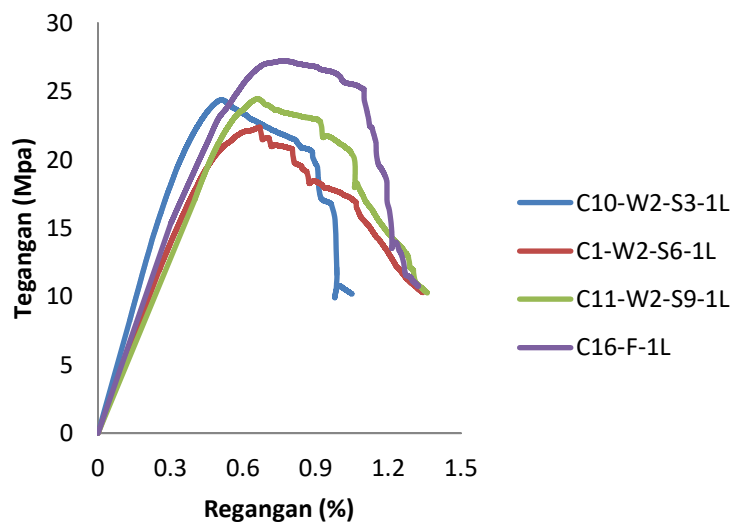
5.3.3 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi Spasi.

Pada Tabel 4.8 hasil tegangan – regangan berdasarkan variasi spasi, maka dibuat grafik pada gambar 4.7 untuk mengetahui tegangan tekan maksimum.

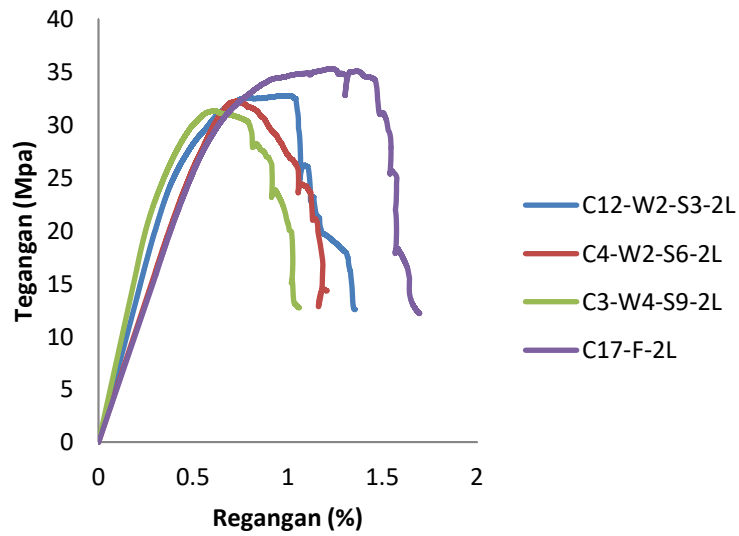
Tabel 4.8 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton  
Dengan Variasi Spasi

| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       | Beban (N) |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |           |
| 1  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79         | 13.62         | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  | 882.4     |
| 2  | C10-W2-S3-1L       | 26.94                       | 21.55         | 13.47         | 0.79                             | 1.28                   | 1.42                  | 872.7     |
| 3  | C11-W2-S9-1L       | 22.38                       | 17.90         | 11.19         | 0.92                             | 1.20                   | 1.50                  | 725.1     |

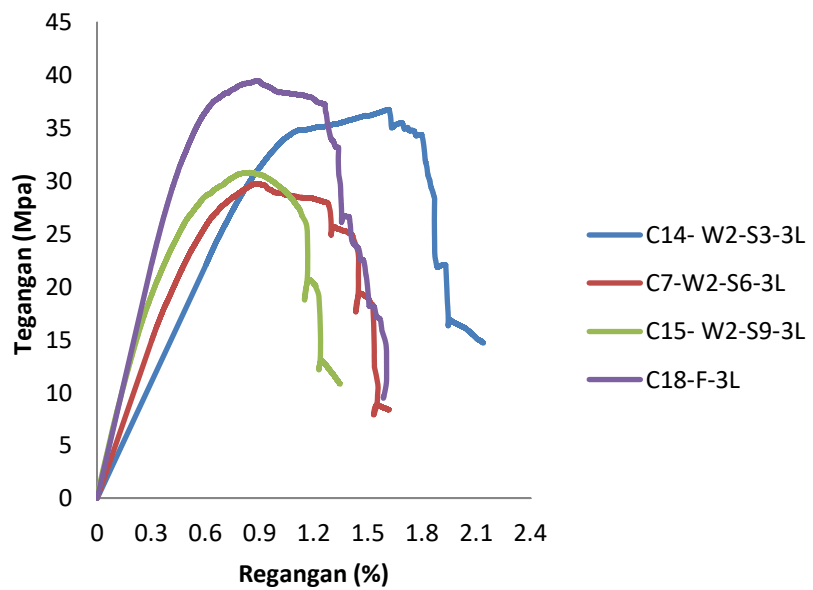
Pada Gambar 4.7a dan 4.7.c untuk benda uji kolom beton variasi spasi 30 mm satu lapis lebih tinggi kekuatan tegangan tekan dibanding dengan spasi 60 mm dan 90 mm, namun pada spasi 60mm lebih rendah dari spasi 90 mm , namun pada gambar 4.7.b benda uji kolom beton untuk spasi 30mm lebih tinggi kekuatan tegangan dari 60mm dan 90mm.



Gambar 4.7.a Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi Spasi (S) dengan satu lapis



Gambar 4.7.b Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi Spasi (S) dengan dua lapis



Gambar 4.7.c Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi Spasi (S) dengan tiga lapis

### 5.3.4 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi lapis

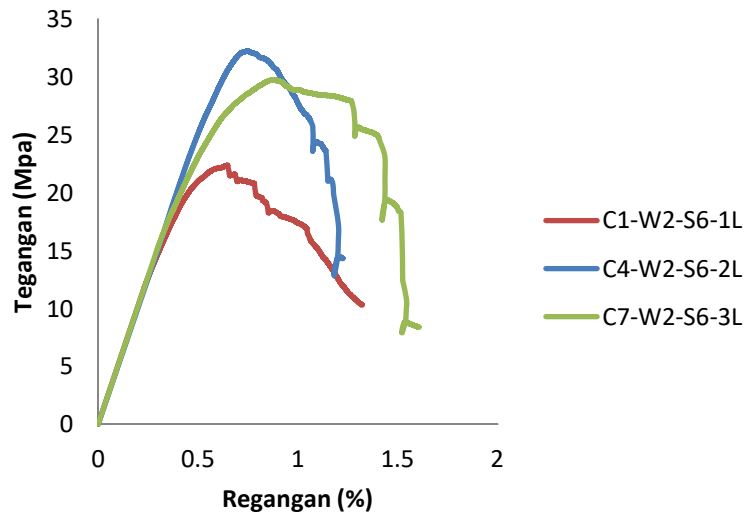
Berdasarkan Tabel 4.9 variasi lapis maka akan dibuat grafik untuk mengetahui kekuatan tegangan tekan dan daktilitas.

Tabel 4.9 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton Dengan Variasi lapis

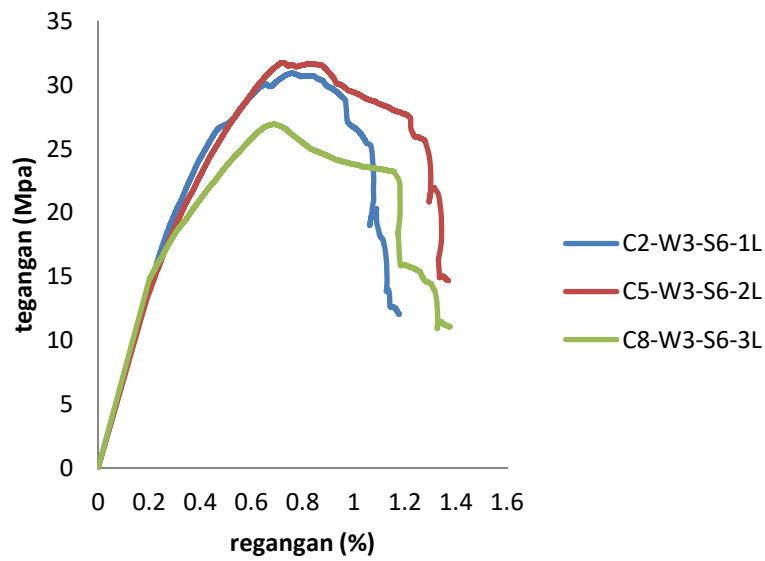
| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       | Beban (N) |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |           |
| 1  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79         | 13.62         | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  | 882.4     |
| 2  | C2-W3-S6-1L        | 29.75                       | 23.80         | 14.87         | 0.88                             | 1.85                   | 1.53                  | 963.9     |
| 3  | C3-W4-S6-1L        | 30.81                       | 24.65         | 15.40         | 0.84                             | 1.16                   | 1.24                  | 998.1     |
| 4  | C4-W2-S6-2L        | 30.81                       | 24.75         | 15.47         | 0.80                             | 1.12                   | 1.17                  | 1002.4    |
| 5  | C5-W3-S6-2L        | 31.34                       | 25.07         | 15.67         | 0.61                             | 0.92                   | 1.02                  | 1015.3    |
| 6  | C6-W4-S6-2L        | 31.76                       | 25.41         | 15.88         | 0.74                             | 1.30                   | 1.35                  | 1029.2    |
| 7  | C7-W2-S6-3L        | 32.57                       | 26.05         | 16.28         | 1.31                             | 1.48                   | 1.63                  | 1055.2    |
| 8  | C8-W3-S6-3L        | 31.98                       | 25.58         | 15.99         | 0.81                             | 1.50                   | 1.68                  | 1036.1    |
| 9  | C9-W4-S6-3L        | 32.24                       | 25.79         | 16.12         | 0.83                             | 1.15                   | 1.28                  | 1044.7    |
| 10 | C10-W2-S3-1L       | 26.94                       | 21.55         | 13.47         | 0.79                             | 1.28                   | 1.42                  | 872.7     |
| 11 | C11-W2-S9-1L       | 22.38                       | 17.90         | 11.19         | 0.92                             | 1.20                   | 1.50                  | 725.1     |
| 12 | C12-W2-S3-2L       | 24.37                       | 19.50         | 12.19         | 0.58                             | 0.98                   | 1.06                  | 789.6     |
| 13 | C13-W2-S9-2L       | 24.46                       | 19.57         | 12.23         | 0.65                             | 1.06                   | 1.29                  | 792.6     |
| 14 | C14- W2-S3-3L      | 32.77                       | 26.21         | 16.38         | 1.01                             | 1.09                   | 1.33                  | 1061.7    |
| 15 | C15- W2-S9-3L      | 32.23                       | 25.78         | 16.11         | 0.88                             | 1.12                   | 1.26                  | 1044.2    |

Dari Gambar 4.9.a , 4.9.b, 4.9.c dan 4.9.e benda uji kolom beton dengan variasi 2 lapis kekuatan tegangan tekan lebih tinggi dari 3 dan 1 lapis namun variasi 3 lapis daktilitasnya lebih tinggi. Pada Gambar 4.9.d variasi 3 lapis lebih tinggi kekuatan tegangan tekan dan daktilitasnya dibanding dengan 1,2 lapis.

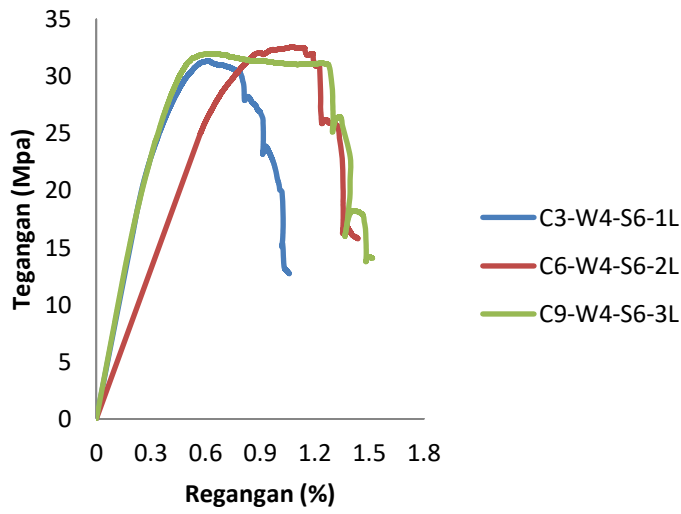




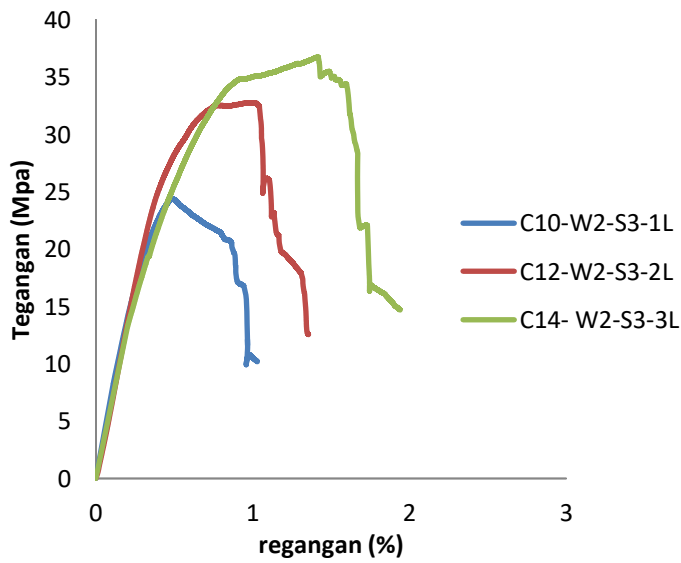
Gambar 4.8.a Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi lapis



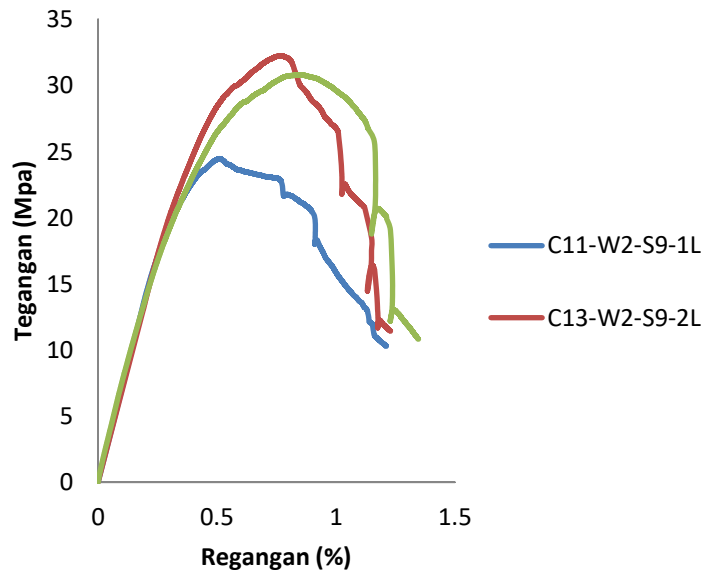
Gambar 4.8.b Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi lapis



Gambar 4.8.c Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi lapis



Gambar 4.8.d Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi lapis



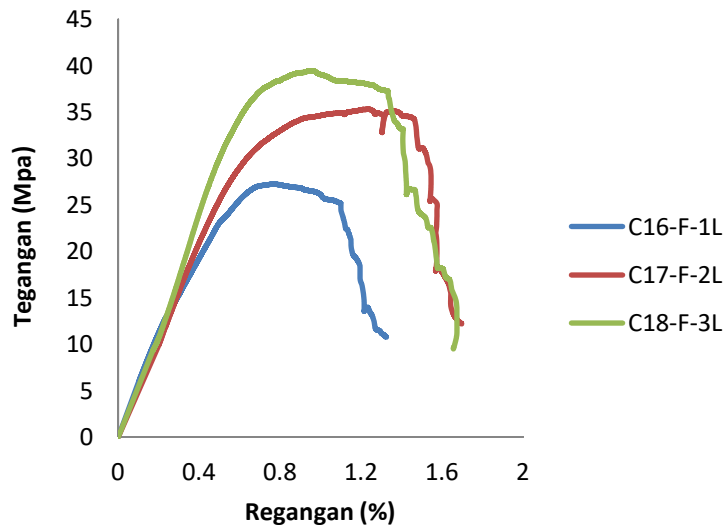
Gambar 4.8.e Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom Beton Dan Variasi lapis

5.3.5 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton *Full Wrap*

Tabel 4.10 Perilaku Dan Model Keruntuhan Benda Uji Kolom Beton *Full Wrap*

| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |              | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                       |                        | Beban (N) |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|--------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0.8 f_{cc}'$ | $0.5f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5 f_{cc}'$ |           |
| 1  | C16-F-1L           | 35.29                       | 28.23         | 17.65        | 1.23                             | 1.54                  | 1.60                   | 1143.5    |
| 2  | C17-F-2L           | 36.76                       | 29.41         | 18.38        | 1.62                             | 1.85                  | 1.94                   | 1191.1    |
| 3  | C18-F-3L           | 39.46                       | 31.57         | 19.73        | 1.19                             | 1.64                  | 1.80                   | 1278.4    |

Pada Gambar 4.8 untuk benda uji beton yang dibungkus total satu lapis, dua lapis, dan tiga lapis terjadi peningkatan kekuatan tegangan, namun untuk dua lapis daktilitasnya lebih tinggi dari pada tiga lapis.



Gambar 4.9 Kurva Tegangan-Regangan Spesimen Kolom *full wrap*

4.3.6 Hasil pengujian eksperimental laboratorium dikelompokkan berdasarkan tiga parameter yaitu pengaruh spasi, lebar, dan jumlah lapisan .

4.3.6.1 Pengaruh lebar *E-GFRP*

Hasil pengujian berdasarkan lebar ditampilkan pada Tabel 4.10

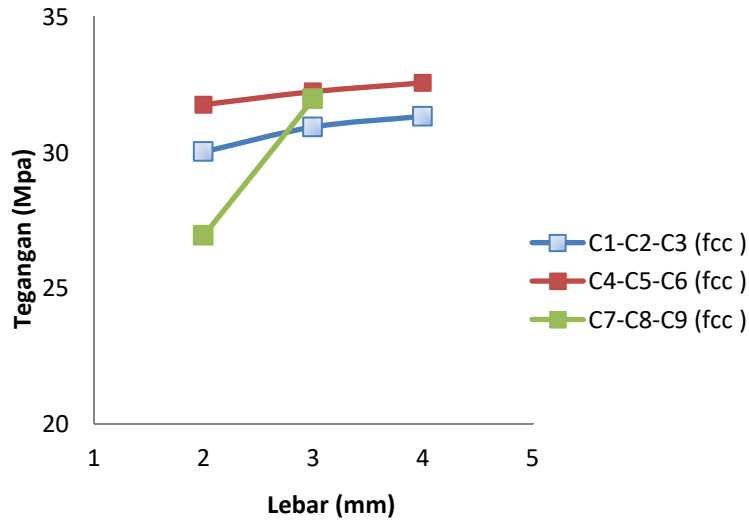
Tabel 4.11 Benda Uji Kolom Beton Dikekang *E-FGRP Strap* Berdasarkan Parameter Lebar

| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |
| 1  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79         | 13.62         | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  |
| 2  | C2-W3-S6-1L        | 29.75                       | 23.80         | 14.87         | 0.88                             | 1.85                   | 1.53                  |
| 3  | C3-W4-S6-1L        | 30.81                       | 24.65         | 15.40         | 0.84                             | 1.16                   | 1.24                  |
| 4  | C4-W2-S6-2L        | 30.81                       | 24.75         | 15.47         | 0.80                             | 1.12                   | 1.17                  |
| 5  | C5-W3-S6-2L        | 31.34                       | 25.07         | 15.67         | 0.61                             | 0.92                   | 1.02                  |
| 6  | C6-W4-S6-2L        | 31.76                       | 25.41         | 15.88         | 0.74                             | 1.30                   | 1.35                  |
| 7  | C7-W2-S6-3L        | 32.57                       | 26.05         | 16.28         | 1.31                             | 1.48                   | 1.63                  |
| 8  | C8-W3-S6-3L        | 31.98                       | 25.58         | 15.99         | 0.81                             | 1.50                   | 1.68                  |
| 9  | C9-W4-S6-3L        | 32.24                       | 25.79         | 16.12         | 0.83                             | 1.15                   | 1.28                  |

Keterangan:  $f_{cc}'$  = tegangan puncak beton terkekang (MPa),

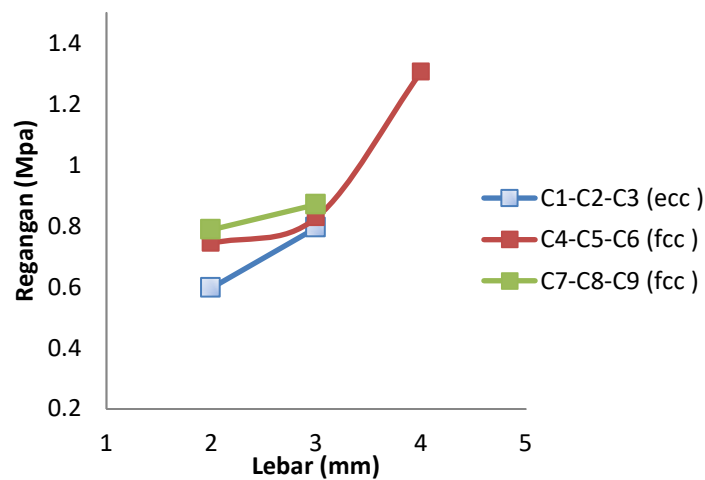
$\epsilon_c$  = regangan beton terkekang (%)

$\epsilon_{cc}$  = regangan pada saat  $f'_{cc}$  (%)



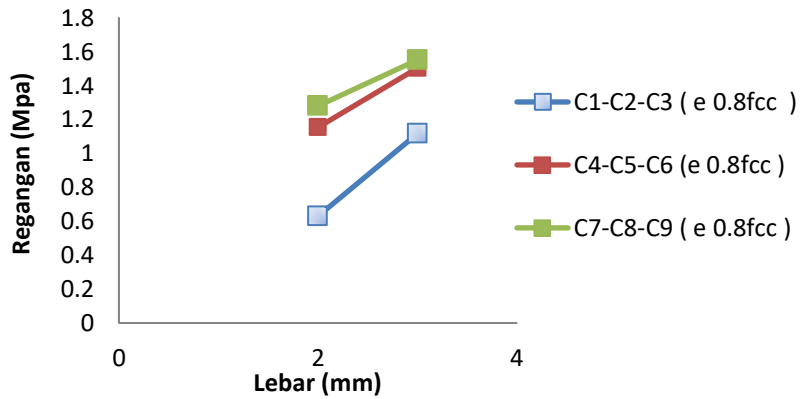
Gambar 4.10 Pengaruh Lebar Benda Uji Beton diKekang *E-GFRP* Pada Saat Tegangan-Regangan Puncak ( $f'_{cc}$ ) 100 %,

Pada Grafik 4.10 diatas mempunyai 3 garis, namun specimen beton *E-GFRP* dengan lebar strap 20, 30, dan 40 mm dengan 3 lapis menunjukkan kekuatan lebar strap 20 mm lebih kecil dibanding dengan satu dan dua lapis, sehingga tidak dianalisis dan dibahas untuk grafik selanjutnya.



Gambar 4.11 Pengaruh Lebar Benda Uji Beton diKekang *E-GFRP* Terhadap Regangan Pada saat tegangan puncak ( $f'_{cc}$ )

Dari Grafik diatas kekuatan tegangan tekan lebar 30mm dengan satu dan tiga lapis kekuatan tekan lebih rendah dibanding dengan dua lapis , sehingga tidak dibahas dalam grafik tersebut.

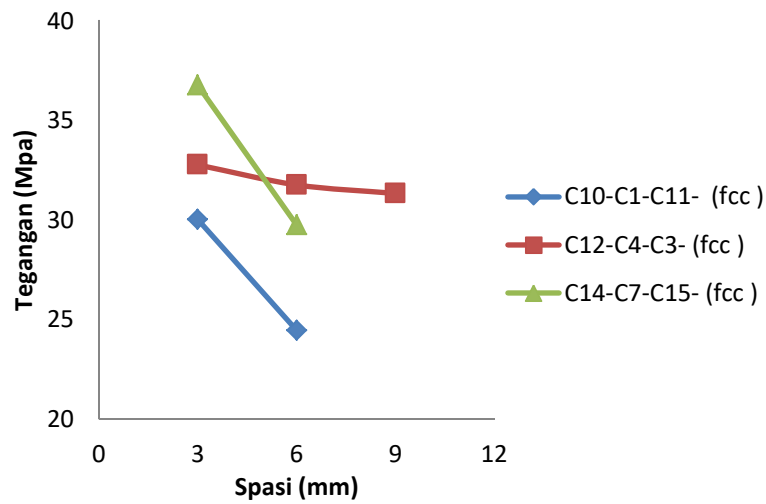


Gambar 4.12 Pengaruh Lebar Benda Uji Beton dikekang E-GFRP Terhadap Regangan Pada Saat Tegangan Turun Hingga 80% Dari Tegangan Puncak ( $f_{cc}$ ) Grafik pada Gambar 4.12 menunjukkan lebar 40mm untuk satu, dua dan tiga lapis tidak menunjukkan kekuatan tegangan tekan yang melebihi lebar 20 dan 30mm sehingga tidak dianalisis dan dibahas di grafik.

#### 4.3.6.2 Pengaruh Spasi E-GFRP

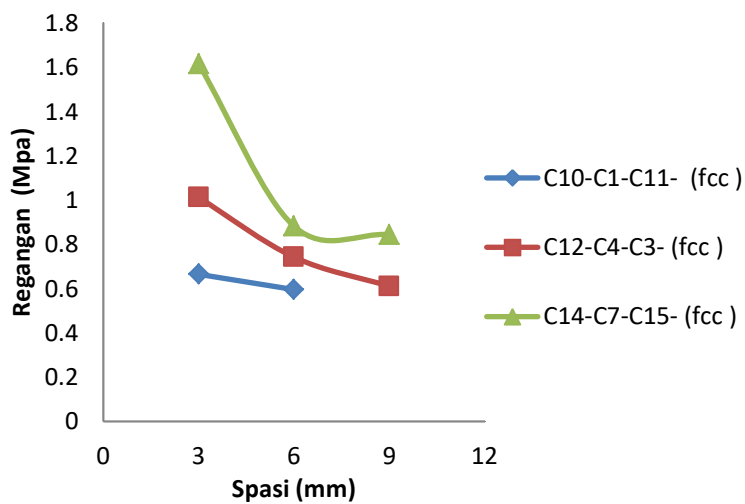
Tabel 4.12 Benda Uji Kolom Beton Dikekang *E-FGRP Strap* Dengan Variasi Spasi

| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ ) (Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ ) (%) |                        |                       |
|----|--------------------|-----------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|
|    |                    | $f_{cc}'$                   | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                 | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |
| 1  | C10-W2-S3-1L       | 26.94                       | 21.55         | 13.47         | 0.79                             | 1.28                   | 1.42                  |
| 2  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                       | 21.79         | 13.62         | 0.77                             | 1.14                   | 1.24                  |
| 3  | C11-W2-S9-1L       | 22.38                       | 17.90         | 11.19         | 0.92                             | 1.20                   | 1.50                  |
| 4  | C12-W2-S3-2L       | 24.37                       | 19.50         | 12.19         | 0.58                             | 0.98                   | 1.06                  |
| 5  | C4-W2-S6-2L        | 30.81                       | 24.75         | 15.47         | 0.80                             | 1.12                   | 1.17                  |
| 6  | C13-W2-S9-2L       | 24.46                       | 19.57         | 12.23         | 0.65                             | 1.06                   | 1.29                  |
| 7  | C14- W2-S3-3L      | 32.77                       | 26.21         | 16.38         | 1.01                             | 1.09                   | 1.33                  |
| 8  | C7-W2-S6-3L        | 32.57                       | 26.05         | 16.28         | 1.31                             | 1.48                   | 1.63                  |
| 9  | C15- W2-S9-3L      | 32.23                       | 25.78         | 16.11         | 0.88                             | 1.12                   | 1.26                  |



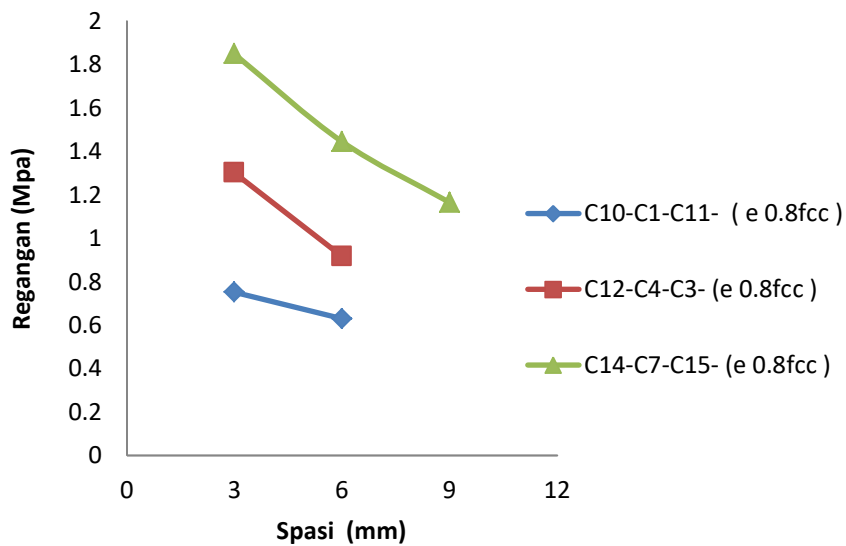
Gambar 4.13 Pengaruh spasi Benda Uji Beton dikekang E-GFRP Terhadap Model Senggang Pada Saat Tegangan Puncak ( $f_{cc}$ ) 100 %

Dari Gambar 4.13 diatas spasi 90 mm untuk lapis satu dan tiga menunjukkan kekuatan tengangan tekan yang lebih tinggi di banding dengan spasi 30 dan 60mm pada satu, dua dan tiga lapis.



Gambar 4.14 Pengaruh Spasi Benda Uji Beton diKekang E-GFRP Terhadap Regangan Pada Saat Tegangan Puncak ( $f_{cc}$ )

Pengaruh spasi *E-GFRP Strap* pada Gambar 4.14 spasi 90mm dengan satu lapis kekuatan tegangan tekan lebih tinggi dibanding dengan dua dan tiga lapis sehingga tidak dianalisa grafiknya



**Gambar 4.15 Pengaruh Spasi Benda Uji Beton diKekang *E-GFRP* Terhadap Regangan Pada Saat Tegangan Turun Hingga 80% Dari Tegangan Puncak ( $f_{cc}$ )**

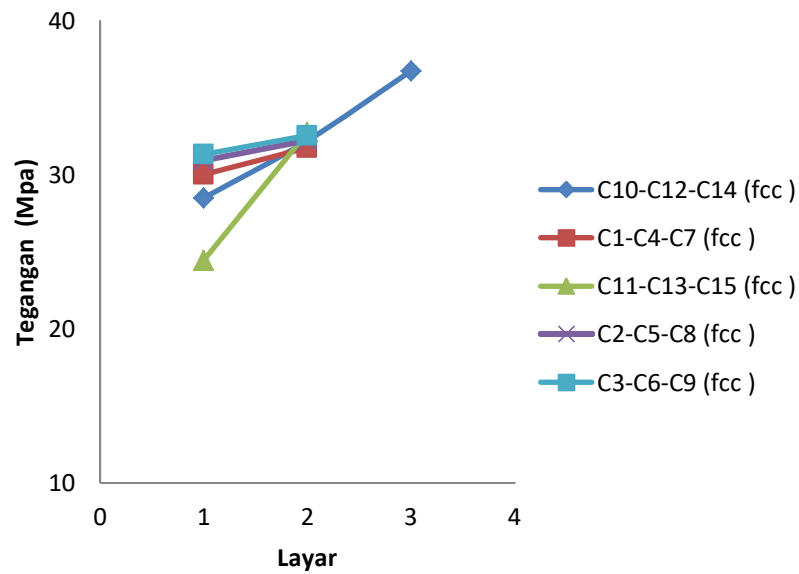
Pengaruh spasi *E-GFRP Strap* pada Gambar 4.14 spasi 90mm dengan satu dan dua lapis kekuatan tegangan tekan lebih tinggi dibanding dengan tiga lapis sehingga tidak dianalisa digrafik



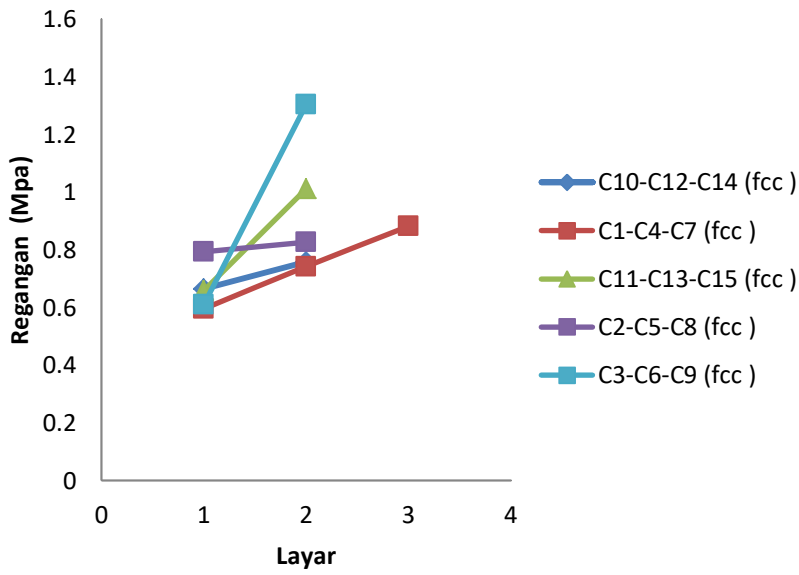
#### 4.3.6.3 Pengaruh layer E-GFRP

Tabel 4.13 Pengaruh Variasi Lebar, Spasi, *Full Wrap* Dan Jumlah *Layer*

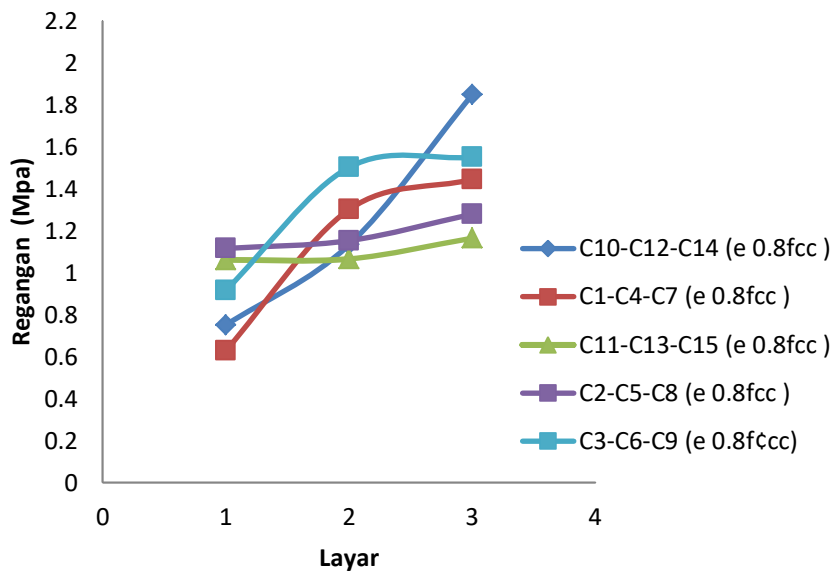
| No | Identitas Spesimen | Tegangan ( $f_{cc}$ )<br>(Mpa) |               |               | Regangan ( $\epsilon_{cc}$ )<br>(%) |                        |                       |
|----|--------------------|--------------------------------|---------------|---------------|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|
|    |                    | $f_{cc}'$                      | $0,8 f_{cc}'$ | $0,5 f_{cc}'$ | $\epsilon_{cc}'$                    | $\epsilon 0.8 f_{cc}'$ | $\epsilon 0.5f_{cc}'$ |
| 1  | C1-W2-S6-1L        | 27.24                          | 21.79         | 13.62         | 0.77                                | 1.14                   | 1.24                  |
| 2  | C4-W2-S6-2L        | 30.81                          | 24.75         | 15.47         | 0.80                                | 1.12                   | 1.17                  |
| 3  | C7-W2-S6-3L        | 32.57                          | 26.05         | 16.28         | 1.31                                | 1.48                   | 1.63                  |
| 4  | C2-W3-S6-1L        | 29.75                          | 23.80         | 14.87         | 0.88                                | 1.85                   | 1.53                  |
| 5  | C5-W3-S6-2L        | 31.34                          | 25.07         | 15.67         | 0.61                                | 0.92                   | 1.02                  |
| 6  | C8-W3-S6-3L        | 31.98                          | 25.58         | 15.99         | 0.81                                | 1.50                   | 1.68                  |
| 7  | C3-W4-S6-1L        | 30.81                          | 24.65         | 15.40         | 0.84                                | 1.16                   | 1.24                  |
| 8  | C6-W4-S6-2L        | 31.76                          | 25.41         | 15.88         | 0.74                                | 1.30                   | 1.35                  |
| 9  | C9-W4-S6-3L        | 32.24                          | 25.79         | 16.12         | 0.83                                | 1.15                   | 1.28                  |



Gambar 4.16 Pengaruh Layer Benda Uji Beton diKekang *E-GFRP* Terhadap Model Sengkang Pada Saat Tegangan Puncak ( $f_{cc}$ ) 100 %



Gambar 4.17 Pengaruh layer Benda Uji Beton diKekang E-GFRP Terhadap Regangan Pada Saat Tegangan puncak ( $f'_{cc}$ )



Gambar 4.18 Pengaruh Layer Benda Uji Beton diKekang E-GFRP Terhadap Regangan Pada Saat Tegangan Turun Hingga 80% Dari Tegangan Puncak ( $f'_{cc}$ )

## BAB 5

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN PERUMUSAN USULAN TEGANGAN REGANGAN.

5.1 Analisa Perhitungan diagram tegangan – regangan benda uji kolom beton yang dikekang E-GFRP menurut Pelegrino dan Modena (2010).

$$\sigma = \frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{\left[1 + \left(\frac{(E_0 - E_1)\varepsilon}{f_{ul}}\right)^n\right]^{1/n}} + E_1\varepsilon \quad \text{for } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \dots \dots \dots 18$$

$$\rho_f = 2 * n_f t_f \frac{(b+h)}{bh} \dots \dots \dots 2b$$

$$Kh = 1 - (b - 2r^2) + (h - 2r^2) \dots \dots \dots 4$$

$$Kv = \frac{(1 - \rho'_f)}{2d_{min}^2} \dots \dots \dots 5$$

$$Kf = K_\alpha K_v K_h \dots \dots \dots 3$$

$$\varepsilon_{f_{eff}} = K_\varepsilon \varepsilon_{fu} \dots \dots \dots 7$$

$$f_{lf} = 0.5 K_f \rho_f E_f \varepsilon_{f_{eff}} \dots \dots \dots 1$$

$$E_0 = 4700 (f'_c)^2 \quad \square$$

$$PU = f_{lf}$$

$$k_r = 1 \quad \text{for } -2 \frac{r}{b} \leq$$

$$k_r = 1 - 2.5 \left(0.3 - 2 \frac{r}{b}\right) \quad \text{for } -2 \frac{r}{b} < 0.3 \dots \dots \dots 29$$

$$KA = 2.25 \left(\frac{PU}{f_{co}}\right)^{0.15}$$

$$K1 = K_r KA \quad \square \dots \dots \dots 27$$

$$f_{cc} = 1 + \left(K1 \frac{PU}{f_{co}}\right) f_{co} \dots \dots \dots 26$$

$$\varepsilon_{cu} = 2 + 23 \left(\frac{PU}{f_{co}}\right) \varepsilon_{co}$$

$$\square \quad E_{co} = \left(\frac{f_{co}}{\varepsilon_{co}}\right) \dots \dots \dots 22$$

$$E_1 = \frac{(f_{cc} - f_{co})}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{co}} \dots\dots\dots 19$$

$$E_{sec} = \frac{(f'_{cc} - f'_c)}{(\epsilon_c - 100)}$$

$$r = \frac{(E)}{(E - E_{sec})}$$

$$f_{il} - E_1 \epsilon_{cu} \dots\dots\dots 20$$

$$n = 1 + 1 \frac{E_0}{E_{co}} f_{co} \dots\dots\dots 21$$

$$E_{sec} = \frac{(f'_{cc} - f'_c)}{(\epsilon_c - 100)}$$

$$r = \frac{(E)}{(E - E_{sec})}$$

$$\chi = \frac{(\epsilon_{cc} \cdot sbx)}{(\epsilon_c)}$$

Dimana :

- p'f = spasi wrap
- nf = Jumlah layar
- tf = ketebalan GFRP
- b = lebar penampang kolom
- h = panjang penampang kolom
- βf = Rasio penguatan FRP
- r = radius kolom
  
- d min = dimensi paling kecil dari penampang kolom
- Kh = koefisien horisontal efisien
- Kv = Koefisien vertikal efisien
- kα = koefisien digunakan utk serat dipasang secara spiral
- Kf = koefisien efisien dari pengekang
- εeff = Regangan FRP efektif
- kε = 0.85 diambil menurut Lam dan Tang (2003)
- εfu = Regangan FRP ultimit
- α = untuk kolom spiral maka nilai k=1
- E0 = modulus elastisitas beton

5.2 Analisa Perhitungan diagram tegangan – regangan benda uji kolom beton yang dikekang E-GFRP menurut usulan model.

Dari pengelompokan hasil pengujian laboratorium berdasarkan parameter spasi, lebar, dan jumlah layer EGFRP Strap, maka dilakukan analisa perhitungan untuk mendapatkan kurva tegangan regangan dengan cara :

1. Perhitungan nilai koefisien a,b,c,d,e dan f untuk mendapatkan kurva tegangan regangan, dimana tegangan puncak dengan menggunakan persamaan fungsi  $y_1=ax^2+bx+c$  dan regangan saat tegangan puncak 80% dengan persamaan  $y_2=dx^2+ex+f$ .

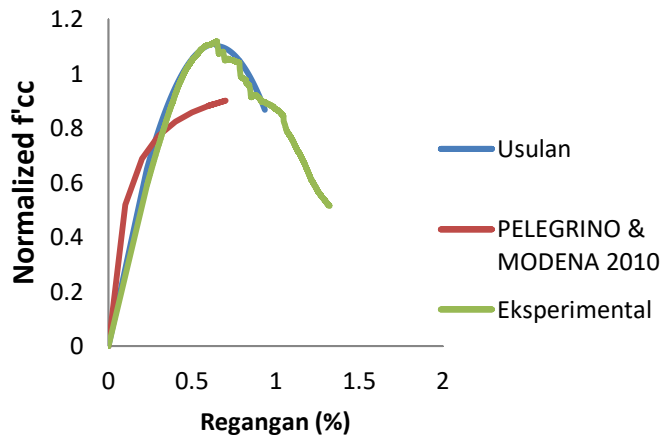
Nilai koefisien a,b,c,d,e dan f didapat dari :

$$b = \frac{2 f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}}, \quad a = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}^2} - \frac{b}{\varepsilon_{cc}}, \quad c = f_{cc} - c\varepsilon_{cc}^2 - d\varepsilon_{cc}$$

$$d = \frac{0.8 f'_{cc} - f'_{cc}}{\varepsilon'_{cc} - 0.8\varepsilon'_{cc}{}^2} \quad e = \frac{f'_{cc} - 0.8f'_{cc} - d(\varepsilon'_{cc} - 0.8\varepsilon'_{cc}{}^2)}{\varepsilon'_{cc} - 0.8\varepsilon'_{cc}{}^2}$$

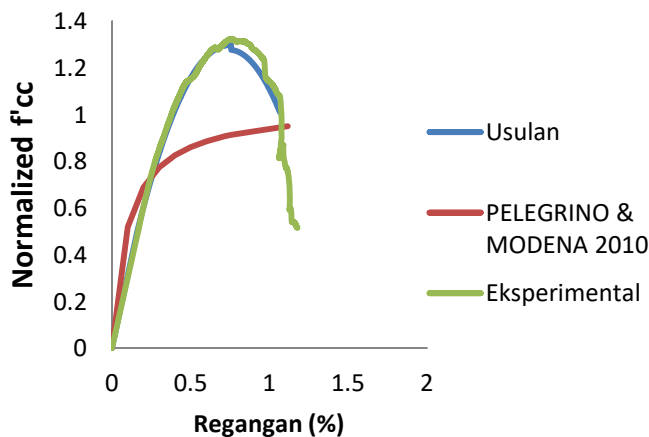
$$f = f'_{cc} - d(\varepsilon_{cc}^2 - e\varepsilon_{cc})$$

2. Analisa regresi dengan bantuan program *Microsoft Excel* untuk membantu menganalisa model hubungan tegangan-regangan berdasarkan tiga parameter tersebut didapat dari nilai koefisien dan nilai tiga parameter akan didapat grafik , lalu dibuat regresi untuk mendapatkan nilai a,b,c,d,e dan f dan dari hasil analisa regresi tersebut diusulkan suatu model perhitungan untuk tegangan puncak dan regangan saat tegangan turun  $0.8f'_{cc}$  seperti grafik di gambar 5.1-5.15



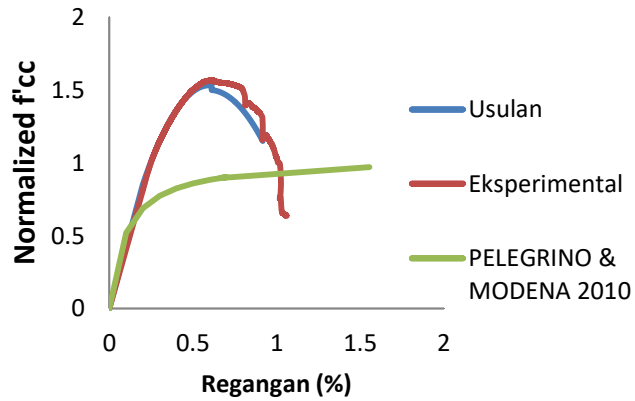
Gambar 5.1 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C1-W2-S6-1L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C1-W2-S6-1L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 18.6%



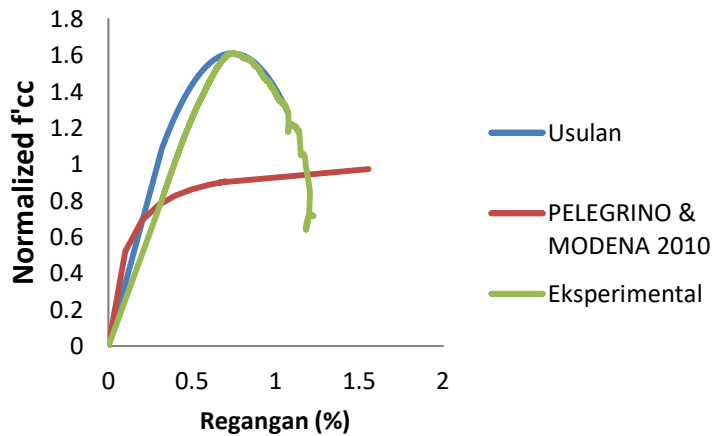
Gambar 5.2 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C2-W3-S6-1L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C2-W3-S6-1L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 40%



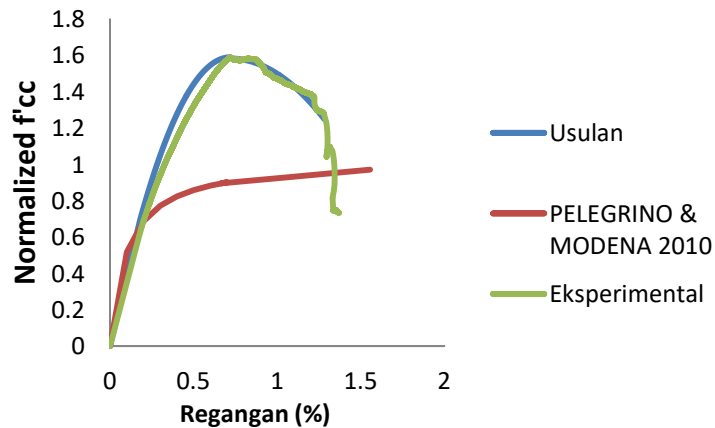
Gambar 5.3 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C3-W4-S6-1L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C3-W4-S6-1L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 44%



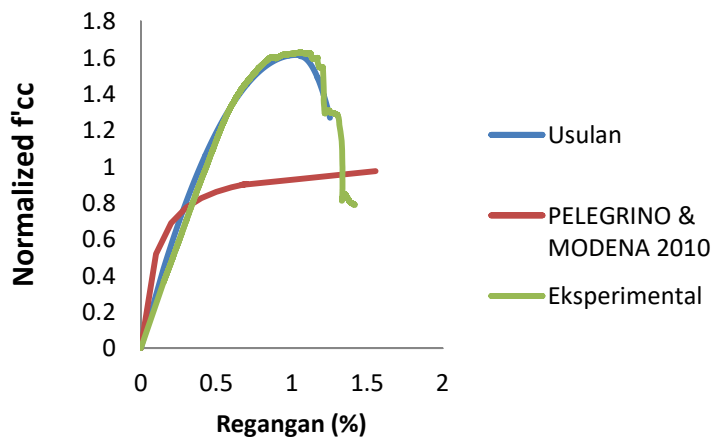
Gambar 5.4 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C4-W2-S6-2L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C4-W2-S6-2L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 40%



Gambar 5.5 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C5-W3-S6-2L dan Pelegrino dan Modena (2010)

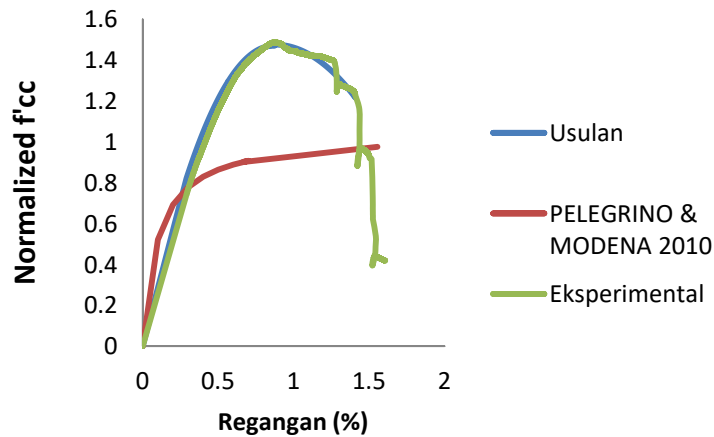
Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C5-W3-S6-2L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 43%



Gambar 5.6 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C6-W4-S6-2L dan Pelegrino dan Modena (2010)

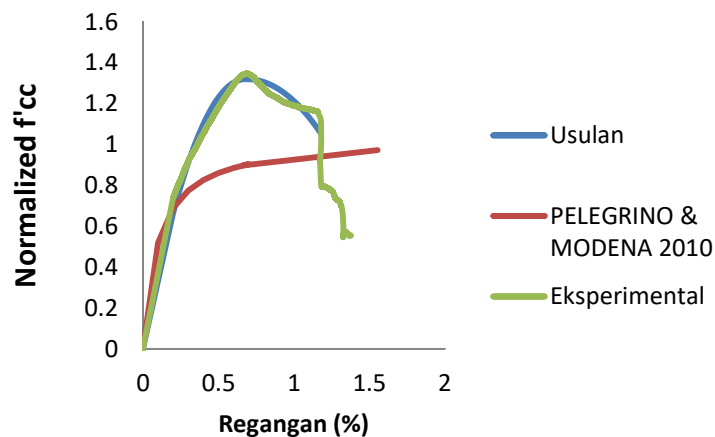
Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C6-W4-S6-2L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 40%





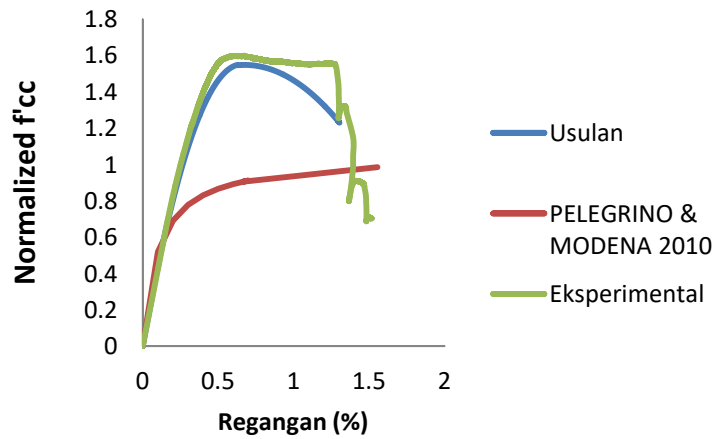
Gambar 5.7 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen **C7-W2-S6-3L** dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C7-W2-S6-3L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 34%



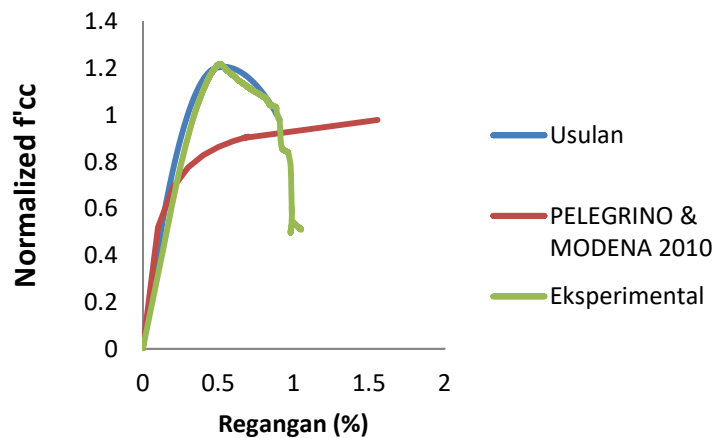
Gambar 5.8 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen **C8-W3-S6-3L** dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C8-W3-S6-3L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 33%



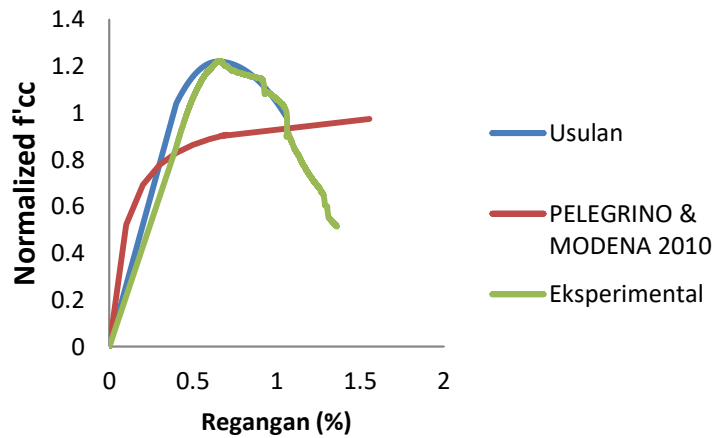
Gambar 5.9 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C9-W4-S6-3L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f'_{cc}$ ) benda uji kolom beton C9-W4-S6-3L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f'_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 44%



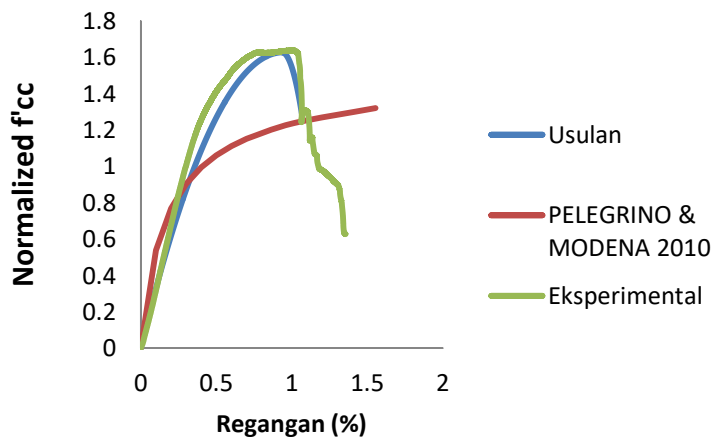
Gambar 5.10 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C10-W2-S3-1L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C10-W2-S3-1L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 29%



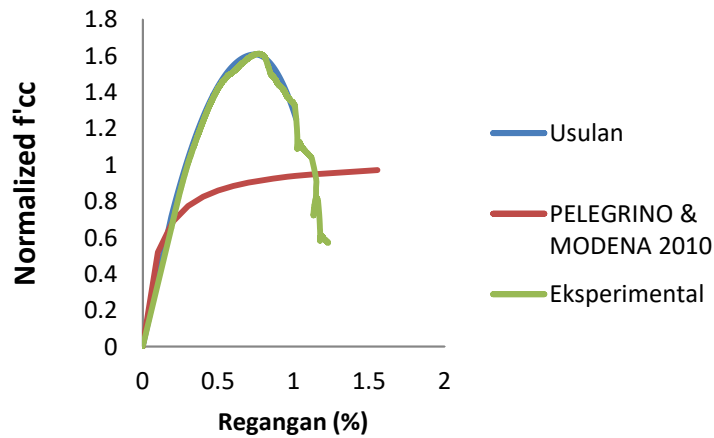
Gambar 5.11 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C11-W2-S9-1L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C11-W2-S9-1L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 26%



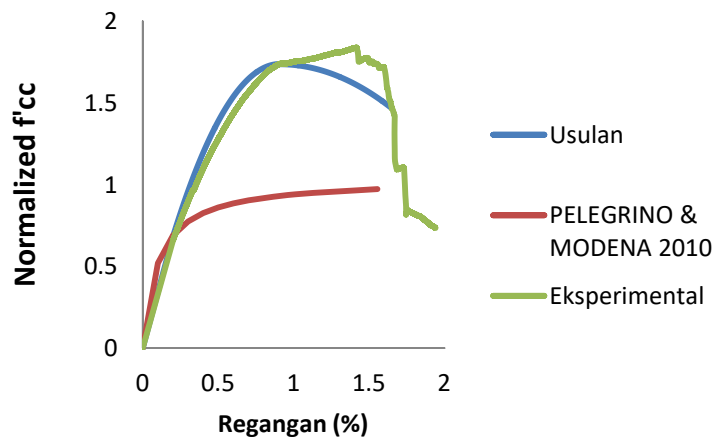
Gambar 5.12 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C12-W2-S3-2L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C12-W2-S3-2L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 24%



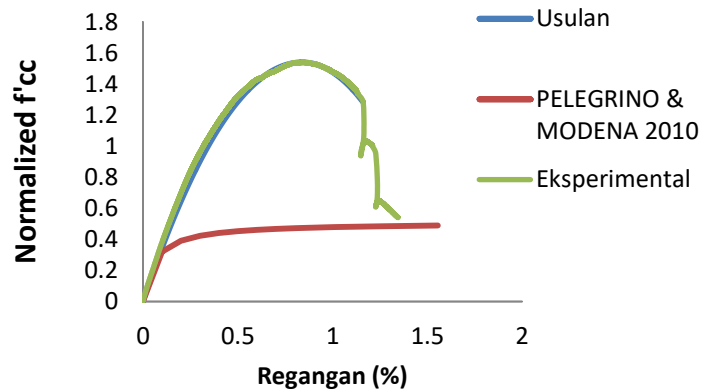
Gambar 5.13 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C13-W2-S9-2L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C13-W2-S9-2L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 42%



Gambar 5.14 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C14-W2-S3-3L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C14- W2-S3-3L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 49%



Gambar 5.15 Perbandingan kurva tegangan-regangan usulan model terhadap hasil eksperimental spesimen C15- W2-S9-3L dan Pelegrino dan Modena (2010)

Tegangan tekan puncak ( $f_{cc}$ ) benda uji kolom beton C15- W2-S9-3L hasil eksperimental dan usulan model sebanding atau sama, namun tegangan tekan puncak dan regangan saat tegangan turun ( $0.8f_{cc}$ ) adanya penimpangan dengan Pelegrino dan Modena (2010) turun sebesar sekitar 67%

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB 6**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1 Kesimpulan**

Hasil Penelitian eksperimental dan analitis yang telah dilakukan terhadap benda uji kolom beton persegi yang dikekang E-GFRP dengan tujuan untuk mempelajari perilaku kekuatan tekan aksial, maka akan memberikan beberapa kesimpulan yang penting yaitu :

1. Kegagalan benda uji kolom beton persegi yang dikekang E-GFRP full wrap satu lapis, dua lapis dan tiga lapis serta strip dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan selalu dimulai pada atau dekat sudut kolom, karena adanya konsentrasi tegangan tinggi pada sudut tersebut.
2. Benda uji kolom beton persegi yang dikekang E-GFRP full wrap satu lapis, dua lapis dan tiga lapis menunjukkan peningkatan kekuatan tegangan tekan puncak sebesar 16.5%, 50.9% dan 68.7% terhadap kekuatan tegangan tekan puncak kolom tanpa E-GFRP.
3. Lebar *Strap* memberikan pengaruh peningkatan kekuatan tegangan tekan puncak sebesar 31.20% terhadap kolom tanpa E-GFRP. Namun pada lebar tertentu, peningkatan yang dihasilkan semakin mengecil.
4. Spasi *Strap* memberikan pengaruh peningkatan kekuatan yang paling efektif dengan tegangan tekan puncak 50,83% dibandingkan dengan benda uji kolom tanpa E-GFRP. Namun semakin kecil spasi, pengerjaan akan semakin sulit.
5. Jumlah *layer Strap* memberikan pengaruh peningkatan kekuatan yang paling besar dibandingkan dengan lebar dan spasi *strap sebesar 61,89%* kekuatan tekan tegangan puncak terhadap kolom tanpa *E-GFRP* namun pengerjaannya paling mudah dibandingkan yang lain.

## **6.2 Saran**

Beberapa saran yang dapat disampaikan dalam penelitian eksperimental ini adalah :

1. Desain awal benda uji kolom akan sangat menentukan hasil penelitian, maka sangat diharapkan pada proses pembuatan benda uji kolom harus benar-benar memperhatikan prosedur dan tahapannya.
2. Perlu penelitian lanjutan mengenai pengaruh pengekangan pada kolom beton persegi dengan menggunakan E-GFRP.
3. Perbanyak jumlah kolom beton E-GFRP strap dengan variasi lebar, spasi dan jumlah lapisan untuk mendapatkan nilai pendekatan yang lebih valid.



## DAFTAR PUSTAKA

Al-Khafaji, H. L., (2016) "Experimental Investigation of CFRP Wrapped Square Non-ductile Reinforced Concrete Columns," Dissertations and Theses Master of Science in Civil and Environmental Engineering Portland State University, 212 hal.

Al-Karaghool, H. O., (2013), "Strength And Ductility Of Axially Loaded Rc Short Columns Confined With Cfrp And Gfrp Wraps," Theses Masters of Master of Science in Civil Engineering Sharjah, United Arab Emirates 117 hal.

Au, C., (may 2001)"Behavior of FRP – confined concrete," Theses Master Science at the Massachusetts Institut of Technology, , 244 hal.

Al-Karaghool Haider Osamah,(January 2013) "Strength and Ductility of Axially Loaded RC Short Columns Confined with CFRP and Gfrp Wraps" A Thesis Presented to the Faculty of the American University of Sharjah College of Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering, Sharjah, United Arab Emirates

Cui, C., (2009), "Behaviour Of Normal And High Strength Concrete Confined With Fibre Reinforced Polymers (Frp)," A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering University of Toronto 376 hal.

Campione G., Miraglia N. dan Papia M.(2004) "Strength and strain enhancements of concrete columns confined with FRP sheets", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 18, No. 6 (2004) 000-000 Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Palermo Viale delle Scienze – 90128 Palermo, Italy

Ghanem, S. Y. ,(2016) "Circular RC Columns Partially Confined With Frp,"Theses And Dissertations--Civil Engineering Civil Engineering *University Of Kentucky*,

Jaffry, S. A. D. , (2001), "Concrete Filled Glass Fibre Reinforced Polyrler (Gfrp) Shells Under Concentric Compression ," Theses Masters of Applied

Science Graduate Department of Civil Engineering ,University of Toronto 214 hal.

Mukherjee, A.dan Arwika S.J., (2007) "Performance of externally bonded GFRP sheets on concrete in tropical environments. Part I: Structural scale tests," Director, Thapar Institute of Engineering and Technology, Patiala 147004, India Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, Mumbai 400 076, India.

Pinto, D.,Tavio, dan Raka,I.G.P., ( 2019) "Axial Compressive Behavior Of Square Concrete Columns Retrofitted With Gfrp Straps" International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET), Volume 10, Issue 01, (January).

Raval, R. dan Dave,U., (2013) "Behavior of GFRP wrapped RC Columns of different shapes," Procedia Engineering 51 240 – 249.

Megalooikonomou , K.G., Kim, K.D. dan Monti, G., (2007) "Stress-Strain Model For Frp-Confined Rectangular Rc Sections Via An Incremental Procedure " European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, ROSE School, Pavia, Italy 2 Department of Structural Engineering and Geotechnics,"Sapienza" University of Rome, Italy Asia-Pacific Conference on FRP in Structures

Pellegrino C, and Modena C, (2010) "Analytical Model for FRP Confinement of Concrete Columns with and without Internal Steel Reinforcement" Journal of Composites for Construction (December)

FYFE Co.llcc Tyfo Fibrwrap system for Transportasion for infrastructure bridge,airports,other highway structures.Nancy ridge Tehnologi Center San Diego,6310 Nancy Ridge Drive, Suite 103 San Diego USA

## LAMPIRAN

### A. Foto – Foto Eksperimental Laboratorium

#### A1. Foto analisa material beton



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar A1 Foto Analisa Material Beton :

(a) Material, (b) Pasir, (c) Kerikil, (d) Satu set ayakan)



(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar A2, Foto Analisa material beton :

(a) (Timbang kerikil, (b) Tmbang pasir, (c) Oven, (d) Kerikil  
(Lanjutan

## A2. Pembuatan Specimen silinder beton



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar A3 Foto Pembuatan specimen silinder beton :  
(a) Material, (b) Mixer, (c) specimen silinder, (d) Beton segar, (e) Benda uji silinder beton, (f) Perawatan specimen silinder beton

A3. Foto test specimen silinder beton



(a)



(b)



(c)

Gambar A4. Test specimen silinder beton :  
Capping silinder beton, (b) Mesin tekan beton, (c) Hasil test specimen silinder  
beton

A4. Foto Specimen Kolom Beton E-GFRP



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar A5, Foto specimen kolom beton E-GFRP

(a) Casing, (b) Persiapan casing, (c) Beton segar, (d) specimen kolom beton, (e) Bongkar casing, (f) Perawatan

#### A5. Persiapan Material dan specimen kolom beton E-GFRP



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Gambar A6, Foto Persiapan Material dan specimen kolom beton E-GFRP

(a) E-GFRP sheet (b) Epoxy, (c) E-GFRP Strap, (d) Pemerataan sudut specimen (e) Campur Epoxy A dan B (f) Aplikasi Epoxy pada E-GFRP



A6. Foto Aplikasi E-GFRP pada Specimen Kolom Beton



(a)



(b)



(c)

Gambar A8, Foto Aplikasi E-GFRP pada Specimen Kolom Beton

(a) Pengukuran specimen kolom beton, (b) Aplikasi E-GFRP pada Specimen Kolom, (c) Specimen kolom beton E-GFRP

A7. Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP



(a)



(b)



(c)

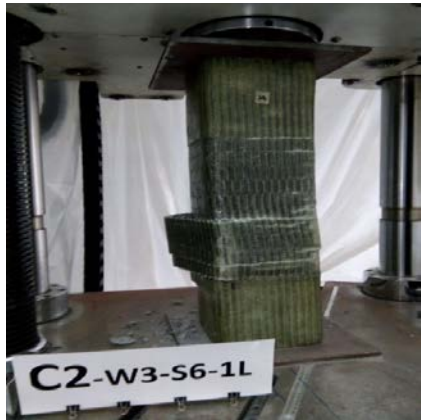


(d)



(e)

Gambar A8 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C1-W2-S6-1



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A9 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C2-W3-S6-1L



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A10 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C3-W4-S6-1L



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A11 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C5-W3-S6-2L



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A12 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C6-W4-S6-2L



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A13 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C7-W2-S6-3L



(a)



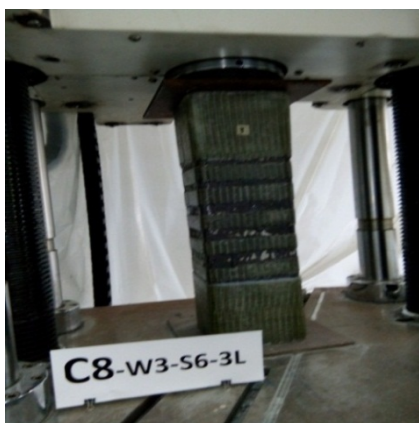
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A14 Foto Hasil Test Specimen kolom beton E-GFRP  
(a-e) C8-W3-S6-3L





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A15 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C9-W4-S6-3L



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar A16 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C10-W2-S3-1L



Gambar A17 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C11-W2—S9-1L



Gambar A18 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C12-W2-S3-2L



(a)



(b)



(c)



(d)

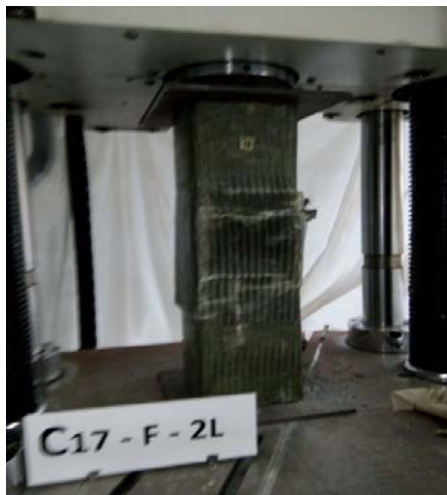
Gambar A19 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C13-W2-S9-2L



Gambar A20 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C15-W2-S9-3L

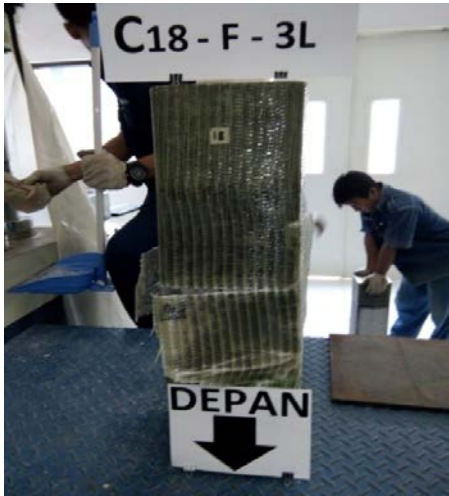


Gambar A21 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C16-F-1L



Gambar A22 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C17-F-2L





Gambar A23 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C18-F-3L



Gambar A24 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C19



Gambar A25 Pengujian specimen kolom beton E-GFRP C20

*Halaman ini sengaja dikosongkan*