

METODE EKSPERIMENTAL PERKUATAN KOLOM BETON BERTULANG MENGUNAKAN FRP

Experimental Method Of Strengthening Concrete Columns Using FRP

Karmila Achmad¹, Agoes SMD², Tavio³

¹Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik – Politeknik Negeri Balikpapan

²Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik – Universitas Brawijaya Malang

³Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik – Institut Sepuluh Nopember Surabaya

Alamat korespondensi: Jl Soekarno Hatta Km. 08, Balikpapan

e-mail: ¹milabpp@yahoo.co.id

Abstract

The column is an important structure element because the failure of column will have direct impact to other structure components, so that the ruin of structural column is an important thing to be observed. The research use experimental method. The aim of this research is to get improving of strength and ductility in column specimen which is given the FRP strengthener (Fiber Reinforced Polymer) compared with original column. There are 3 specimens used. They are C-1 (original column), C-1G (column with GFRP strengthener 1 layer) and C-1C (column with CFRP strengthener 1 layer). From the research got the increasing P_{max} toward original column is 33,52% and 54,97%, the increasing of d_{max} is 6,65% and 81,18%, also the increasing of M_{max} is 32,41% and 55,36% each for C-1G and C-1C. Ductility indexes taken on three positions are plastic hinge zone, a half high of column effective and as high as column effective. From analyze result got the increasing of displacement ductility toward C-1 for C-1G is -34,20%, -28,46% and -12,74% and C-1C is 64,48%, 108,74% and 118,68%, each for plastic hinge zone, a half high of column effective and as high as column effective. In column C-1G happened the decreasing of ductility value because there has been destruction in column head when the test was running.

Key words : Experimental method, FRP, RC, Strengthen column

Abstrak

Kolom merupakan elemen struktur penting karena kegagalan kolom akan berpengaruh langsung terhadap komponen struktur lainnya, sehingga kehancuran kolom struktural merupakan hal yang penting untuk dicermati. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan meningkatkan kekuatan dan daktilitas dalam spesimen kolom yang diberi FRP penguat (Fiber Reinforced Polymer) dibandingkan dengan kolom awal. Ada 3 spesimen yang digunakan. Mereka adalah C-1 (kolom asli), C-1G (kolom dengan GFRP penguat 1 lapisan) dan C-1C (kolom dengan CFRP penguat 1 lapisan). Dari penelitian mendapat peningkatan P_{max} menuju kolom awal adalah 33,52% dan 54,97%, peningkatan d_{max} adalah 6,65% dan 81,18%, juga meningkatnya M_{max} adalah 32,41% dan 55,36% masing-masing untuk C-1G dan C-1C. Indeks daktilitas diambil pada tiga posisi yang zona sendi plastis, setengah tinggi kolom yang efektif dan setinggi kolom yang efektif. Dari hasil analisis mendapat peningkatan daktilitas terhadap C-1 untuk C-1G adalah -34,20%, -28,46% dan -12,74% dan C-1C adalah 64,48%, 108,74% dan 118,68%, masing-masing untuk zona sendi plastis, setengah tinggi kolom yang efektif dan setinggi kolom yang efektif. Dalam kolom C-1G terjadi penurunan nilai daktilitas karena sudah ada kerusakan di kepala kolom saat tes berjalan.

Kata kunci : metode eksperimental, FRP, RC, kolom Strengthen

PENDAHULUAN

Struktur kolom merupakan elemen struktur yang rentan terhadap kegagalan ketika menerima

beban yang besar (ledakan atau seismik), peningkatan beban (meningkatkan penggunaan atau perubahan fungsi struktur) dan degradasi kekuatan (akibat korosi tulangan baja dan reaksi alkali).

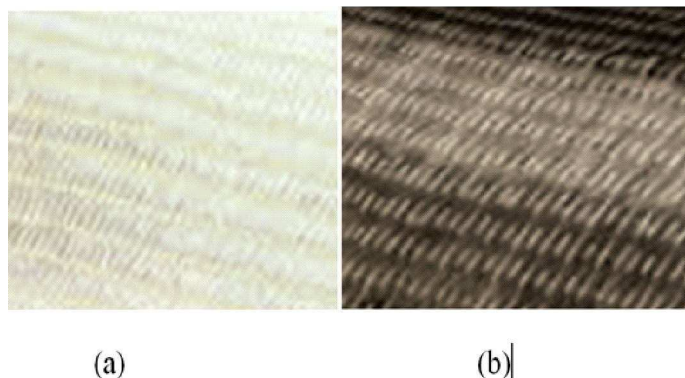
Sebagaimana diketahui bahwa kolom merupakan elemen struktur yang penting karena kegagalan kolom akan berakibat langsung terhadap komponen struktur lainnya. Sehingga dalam suatu struktur keruntuhan kolom struktural merupakan hal yang sangat penting untuk ditinjau.

Ketika struktur bangunan mengalami perubahan fungsi yang berakibat pada meningkatnya beban dari beban rencana maka perlu dicari solusi agar kolom tersebut masih bisa dimanfaatkan tanpa harus mengganti dengan struktur kolom yang baru. Untuk menyelesaikan permasalahan struktur seperti yang diuraikan diatas, maka penelitian ini akan menawarkan solusi dengan cara memanfaatkan kemajuan teknologi berupa penggunaan material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) untuk perkuatan eksternal struktur kolom. Keunggulan dari perkuatan FRP ini yaitu bahan lebih ringan, kekuatan tarik tinggi, tidak terjadi korosi sehingga memiliki durabilitas (keawetan) yang tinggi, mudah dalam pemasangannya sehingga menghemat

waktu serta bahannya mudah untuk dibentuk (fleksibel). Pada umumnya perkuatan FRP yang digunakan untuk konstruksi adalah CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).

Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah inovasi perkuatan komposit yang saat ini banyak digunakan sebagai perkuatan eksternal tambahan pada struktur karena sifatnya setelah dipasang pada struktur beton mampu menghilangkan kekurangan beton yang getas menjadi struktur yang *ductile*. Komposit FRP dapat menjadi alternatif yang murah untuk memulihkan atau meningkatkan kinerja yang ada pada kolom beton (Benzaid, 2008). Dua jenis serat yang umum digunakan untuk perkuatan struktur adalah: *Glass Fiber Reinforced Polymer* (GFRP) dan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP).



Gambar 1. Serat yang digunakan: (a)Tyfo^a SEH System *Uni-directional glass composite*; (b).Tyfo^a SCH System *Uni-directional carbon composite* (Brosur Tyfo^o Fibrwrap^o System)

Kolom

Kolom adalah batang tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktural yang memikul beban dari balok. Kolom meneruskan beban-beban dari elevasi atas ke elevasi yang lebih bawah hingga akhirnya sampai ketanah melalui pondasi. Karena kolom merupakan komponen tekan maka keruntuhan pada satu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan *collapse* (runtuhnya) lantai yang bersangkutan dan bahkan *ultimate total collapse* seluruh struktur (Nawi, 1998).

Perkuatan Struktur

Perkuatan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan rencana. Umumnya struktur perlu perkuatan bilamana terjadi perubahan fungsi bangunan atau elemen-elemen strukturnya dirancang sesuai tata cara yang lama dimana beban gempa nominalnya lebih rendah dari yang ditetapkan oleh tata cara saat ini. Kemungkinan lain adalah karena struktur tersebut sebelumnya hanya didesain terhadap beban gravitasi saja tanpa memperhatikan beban gempa yang mungkin terjadi. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan bahkan kegagalan struktur (Tavio, 2009).

METODE PENELITIAN

Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di dua tempat. Pembuatan benda uji dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi dan Laboratorium Struktur Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya, Malang. Untuk uji tarik FRP dan pengujian struktur dilakukan di Balai Bahan Bangunan dan Balai Struktur

Puslitbang Teknologi Permukiman Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah, Bandung.

Rancangan Penelitian

Benda uji yang digunakan ada 3 buah yaitu C-1 sebagai kolom kontrol, C-1G yaitu kolom perkuatan 1 lapis GFRP dan C-1C yaitu kolom perkuatan 1 lapis CFRP. Dengan spesifikasi benda uji seperti dalam tabel 1.

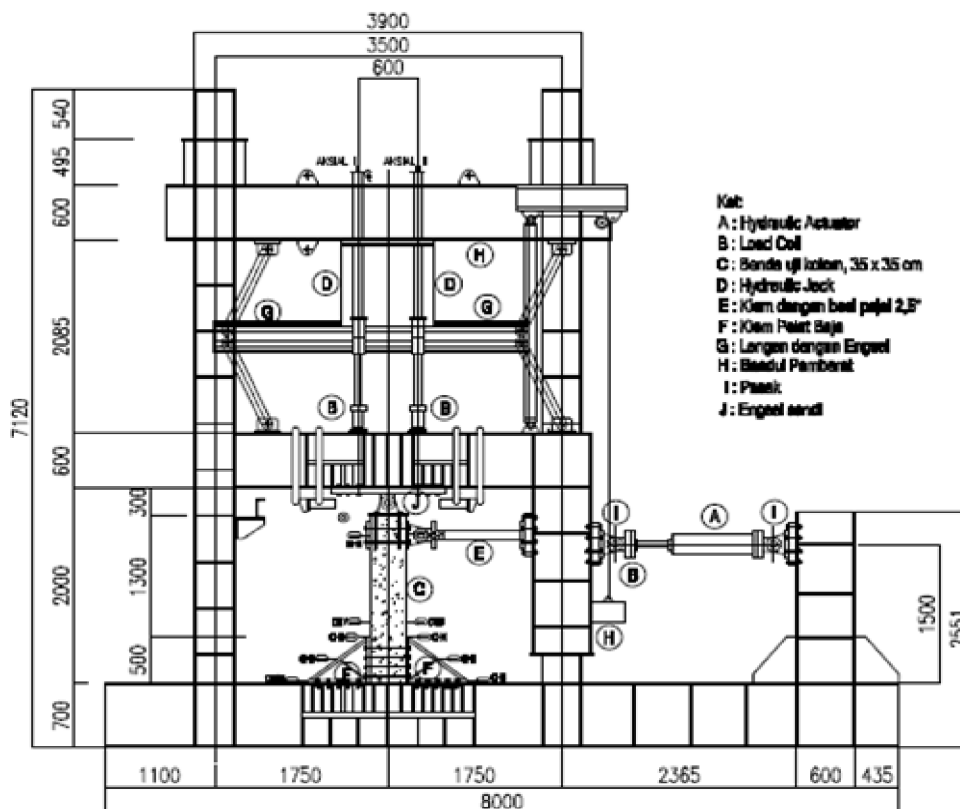
Tabel 1. Spesifikasi Benda Uji

No Benda uji	Benda uji kolom	Kuat tekan beton, Mpa	Ukuran Kolom			Tulangan		FRP komposit <i>jacketing</i>		
			B (mm)	H (mm)	L (mm)	Long	Trans	Fu, MPa	Tebal / lapis (mm)	Jumlah Lapisan
1	C-1	20,34	350	350	1100	8D19	Ø10 - 200	-	-	-
2	C-1G	20,34	350	350	1100	8D19	Ø10 - 200	575	1.3	1
3	C-1C	20,34	350	350	1100	8D19	Ø10 - 200	876	1.0	1

Setting up

Pelaksanaan pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji kolom berdiri tegak pada 2 buah rangka baja (*loading frame*) yang diletakkan di atas lantai kerja yang dikunci pada ujung-ujung balok tumpuan dengan baut. Untuk mendapatkan

asumsi yang diinginkan maka dalam penelitian ini dibuat alat bantu tambahan berupa pelat baja masing-masing diletakkan pada dasar kolom, samping kolom dan pada kepala kolom. *Displacement* beton diperoleh dari 18 *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT). *Set-up* pengujian secara skematik ditunjukkan dalam Gambar 1.



Gambar 2. Setting up pengujian kolom

Pelaksanaan Pengujian Siklik

Pengujian spesimen dilakukan setelah benda uji kolom beton berumur diatas 28 hari. Hal ini terkait dengan kesiapan alat pengujian yang akan digunakan. Untuk kolom yang diberi perkuatan CFRP dan GFRP maka perkuatan dipasang setelah beton benar-benar kering kemudian spesimen dibungkus dan dibiarkan pada suhu kamar selama lebih dari 4 hari agar epoksi benar-benar mengeras sebelum pengujian dilakukan.

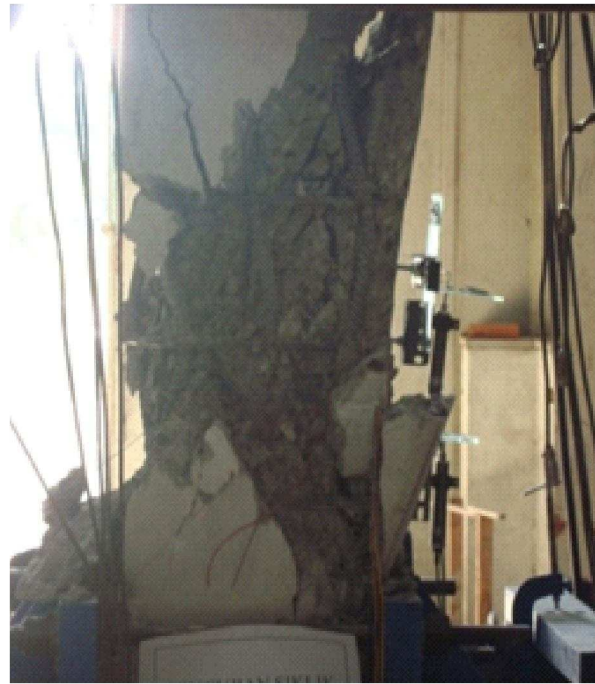
Pengujian dimulai dengan pemberian beban aksial sesuai dengan perencanaan awal yaitu 748 kN. Selama pengujian, beban aksial yang bekerja adalah konstan dengan variasi beban siklik 181,57 kN untuk original column, 217,38 kN untuk C-1G dan 225,96 kN untuk C-1C. Pola pembebanan mengacu pada pola pembebanan ACI 374.1-05 dengan rasio *drift* D/L ($\times 10^2$) : 0,2; 0,25; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,4; 1,75; 2,20; 2,75 dan 3,5 dan tiga siklus untuk setiap tingkat penyimpangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegagalan Benda Uji Kolom C-1

Kegagalan benda uji C-1 akibat *spalling* beton. P_{max} tercapai pada *drift* 2,75% siklus pertama dengan nilai 278,9 kN. Mulai *spalling* kolom terjadi pada saat beban mencapai 250,1 kN dengan *drift* yang sama dengan saat tercapai P_{max} yaitu 2,75% siklus ketiga dengan *displacement* sebesar 28,42 mm. *Spalling* ini terjadi pada sisi tekan kolom yang menyebabkan tulangan longitudinal terlihat dengan jelas.

Untuk benda uji C-1 kerusakan paling parah terjadi di kolom bagian bawah yaitu pada zona sendi plastis mulai dari bawah sampai pada ketinggian sekitar 600 mm diukur dari atas dudukan pelat bawah. Untuk benda uji C-1 kegagalan diakibatkan *spalling* beton dan hancurnya inti beton serta tekuk tulangan longitudinal. Selain di zona sendi plastis, kerusakan juga terjadi pada kolom bagian atas. Dibagian atas kolom juga terjadi *spalling* meskipun tidak sebesar dan separah pada zona sendi plastis.



Gambar 3. Kegagalan benda uji C-1

Kegagalan FRP pada Kolom C-1G

Berbeda dengan C-1, untuk benda uji C-1G, kegagalan kolom ditandai dengan hancurnya beton dan terjadi kegagalan FRP. Dari hasil pengamatan eksperimental menunjukkan bahwa FRP tidak pecah sekaligus namun secara bertahap, yang didahului dengan perubahan warna pada resin. Kegagalan dimulai dari beberapa serat di satu lokasi karena terjadi retak beton. Leleh tulangan pertama terjadi pada step 316 yaitu 150,3 kN rasio lateral drift 0,75% siklus ke dua yang terbaca dari data pada *strain gauge* 1.

Pada step 728 rasio lateral *drift* 3,5% siklus pertama, kepala kolom pecah bersamaan dengan terdengar suara yang nyaring akibat GFRP yang robek. Beton hancur dan GFRP robek dibagian sudut penampang kolom. Kejadian ini sebelumnya ditandai dengan terjadi perubahan warna pada resin dan terdengar bunyi suara merayap. Pada saat yang bersamaan daerah penjepit kolom bagian bawah juga mulai terlihat perubahan warna pada resin berupa garis lurus searah dengan sengkang. Untuk pengujian benda uji C-1G beban puncak yang terbaca adalah 372,4 kN dengan *displacement* sebesar 38,04 mm.

Pengujian dilanjutkan tanpa adanya beban aksial yang mengakibatkan grafik beban lateral-*displacement* menurun secara drastis dan pada

tahap awal pasca kerusakan kepala kolom, pola grafik beban-*displacement* menjadi tidak teratur. Ketika beban lateral mencapai 142,6 kN dengan *displacement* 56,78 mm mulai terlihat kegagalan GFRP pada zona sendi plastis. Hal ini sudah melampaui *displacement* rencana sebesar 54,5 mm. Terjadi perubahan warna pada resin yang semakin lama semakin panjang searah dengan tulangan transversal. Pada step 820 bunyi kegagalan GFRP semakin nyaring dengan beban lateral 104,6 kN dan *displacement* 50,14 mm. Sesuai dengan pola pembebanan yang ada maka pengujian dihentikan pada rasio lateral *drift* 5% siklus ke tiga. Pada saat dihentikan kerusakan di zona sendi plastis hanya sampai tahap terjadi perubahan warna pada resin dan kondisi permukaan benda uji sudah tidak merata yang menandakan beton didalam GFRP telah mengalami kerusakan namun GFRP belum pecah.

Ditemukan dua titik kegagalan pada bagian belakang benda uji, masing-masing sepanjang 10 dan 11 cm serta satu titik *kegagalan* GFRP sepanjang 18 cm dibagian depan benda uji.



Gambar 4. Kegagalan benda uji C-1G

Kegagalan FRP pada Kolom C-1C

Sama halnya dengan benda uji C-1G, kegagalan kolom C-1C ditandai dengan hancurnya beton dan terjadi kegagalan FRP. Leleh tulangan pertama terbaca pada data *strain gauge* 3 dengan rasio lateral *drift* 0,75% siklus pertama pada step 315.

Besar beban lateral adalah 168,1 kN dan *displacement* yang terbaca dari LVDT 2 adalah 7,40 mm. Regangan CFRP putus pada step ke 666 yang terbaca dari data *strain gauge* 10 pada rasio lateral *drift* 2,75% siklus pertama dengan besar beban lateral adalah 347,5kN dan *displacement* 29,88 mm yang dibaca dari LVDT 2.

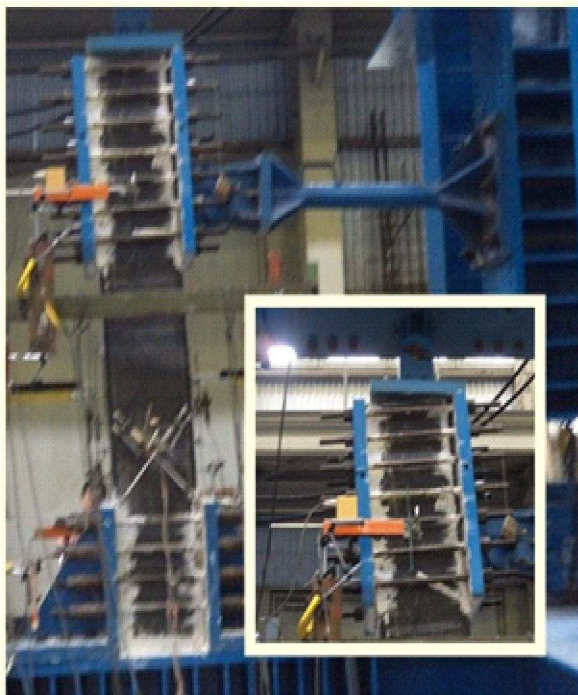
Pada step 656 rasio lateral *drift* 2,75% siklus ke pertama terdengar bunyi dibagian dalam kolom yang menandakan mulai terjadi kerusakan pada beton bagian dalam. Disusul pada step 662 rasio lateral *drift* 2,75% siklus pertama dengan beban lateral 124,4 kN terjadi gelembung pada permukaan benda uji di zona sendi plastis bagian samping. Pada step 666 serat CFRP putus dibagian atas penjepit baja pada zona sendi plastis akibat besarnya gelembung pada permukaan beton sepanjang 12 cm. Putusnya serat CFRP ini sampai akhir pengujian bertambah panjang menjadi 35 cm yaitu sepanjang penampang kolom.

Dari hasil pengamatan eksperimental menunjukkan bahwa kegagalan FRP didahului dengan perubahan warna pada resin. Kegagalan dimulai dari beberapa serat di satu lokasi karena terjadi retak beton. Beban puncak terjadi pada step 800 rasio lateral *drift* 5% siklus pertama dengan nilai beban lateral 432,2 kN dan *displacement* yang terbaca dari LVDT 2 adalah 54,4 mm. Sampai dengan akhir pola pembebanan yang diacu yaitu 5% siklus ke tiga kondisi kolom secara keseluruhan masih baik dan kondisi *ultimate* benda uji belum tercapai. Sehingga rasio lateral *drift* ditingkatkan menjadi 5,5%, 6%, 7% dan berakhir di rasio lateral *drift* 8,5% siklus ke tiga,

Mulai rasio lateral *drift* 5,5% siklus kedua terdengar bunyi merayap yang berkelanjutan sampai dengan akhir pengujian yang menandakan beton bagian dalam telah hancur. Sampai akhir pengujian rasio lateral *drift* 8,5% siklus ke tiga secara visual kemiringan benda uji terlihat dengan jelas dan nilai *displacement* yang diperoleh dari data LVDT 2 adalah 96,46 mm yang meningkat 77,81% dari *displacement* rencana sebesar 54,25 mm. Ketika nilai *ultimate* tercapai maka pengujian langsung dihentikan, hal ini bertujuan untuk menjaga kondisi peralatan.

Kegagalan yang terjadi sampai akhir pengujian pada zona sendi plastis berupa perubahan warna pada resin. Pada sisi samping kiri, kerusakan berupa

putusnya *fiber* searah tulangan transversal sepanjang penampang kolom yang berlanjut kebagian depan benda uji sepanjang 3 cm, Untuk bagian depan sendiri juga terjadi perubahan warna pada resin masing-masing sepanjang 1 cm dan 15 cm searah tulangan transversal. Sedangkan kegagalan kolom bagian samping kanan berupa perubahan warna pada resin yang sudah berupa luasan pada permukaan benda uji. Kerusakan ini setinggi 30 cm sepanjang penampang kolom. Untuk permukaan kolom zona sendi plastis secara keseluruhan sudah tidak rata akibat rusaknya beton dibagian dalam.



Gambar 5. Kegagalan benda uji C-1C

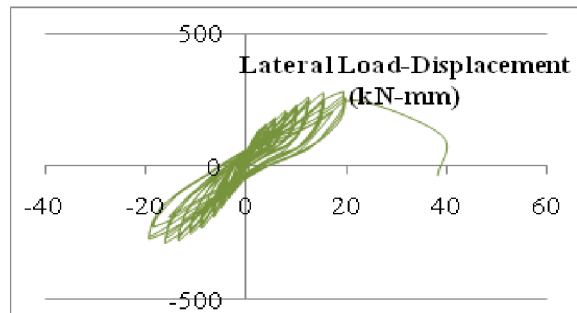
Beban Lateral-Displacement

Grafik P-d merupakan data yang dibaca dari *load cell* berupa beban siklik dari LVDT 2 untuk *displacement*. LVDT 2 adalah alat pembaca *displacement* yang terletak di bagian atas kolom dimana tingginya sama dengan tinggi efektif kolom dengan posisi yang berseberangan dengan *actuator* samping kolom selaku penerus beban siklik.

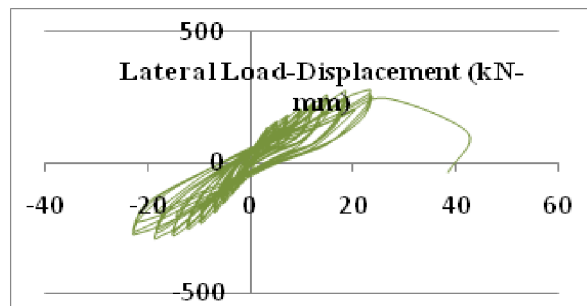
Dari grafik P-d dapat kita tentukan fenomena yang terjadi selama pengujian untuk *specimen* C-1, C-1G dan C-1C. Besarnya P_{max} yang terjadi adalah 278,9 kN; 372,4 kN dan 432,2 kN serta d_{max} yang terjadi adalah 53,24 mm; 56,78 mm dan 96,46 mm berturut-turut untuk C-1, C-1G dan C-1C.

Selain grafik P-d yang dibentuk dari pembacaan data LVDT 2 maka untuk mendapatkan nilai *displacement ductility* pada 3 posisi yaitu zona sendi plastis, setengah tinggi efektif kolom dan setinggi efektif kolom maka dibuat grafik P-d dari pembacaan data LVDT 3 dan LVDT 5. Grafik P-d yang diperoleh dari pengujian C-1, C-1G dan C-1C secara lengkap ditampilkan pada gambar 6,7,8.

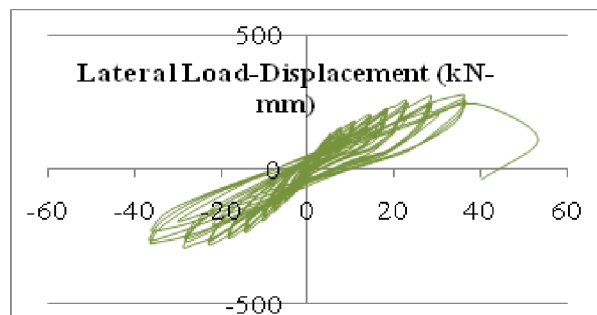
(a) zona sendi plastis



(b) Setengah tinggi kolom efektif

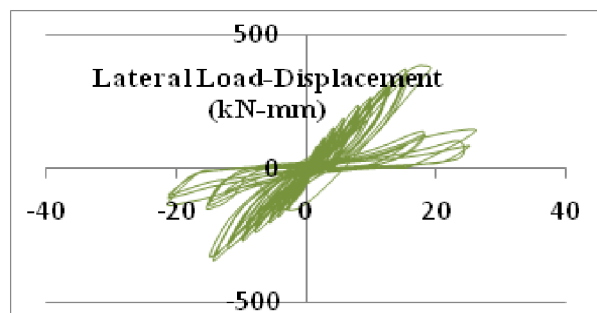


(c) Setinggi efektif kolom

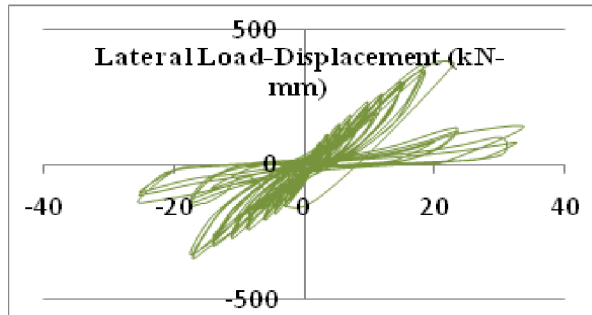


Gambar 6. Grafik beban lateral-*displacement* C-1

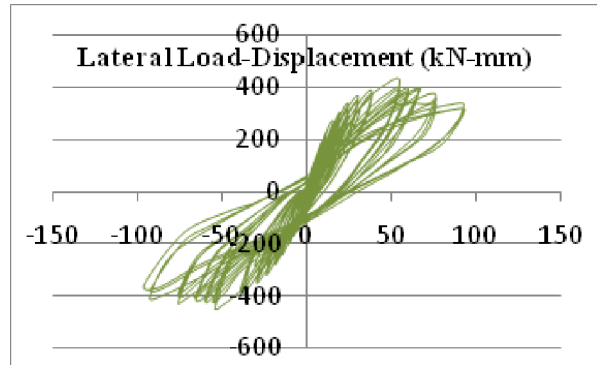
(a) Zona sendi plastis



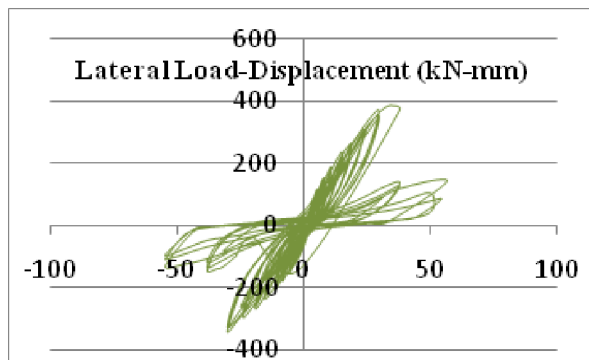
(b) Setengah tinggi efektif kolom



(c) Setinggi efektif kolom



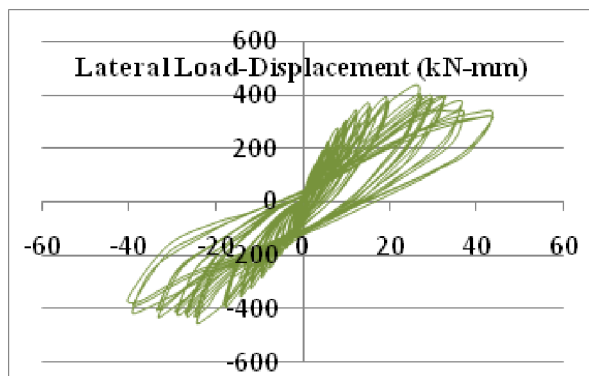
(c) Setinggi efektif kolom



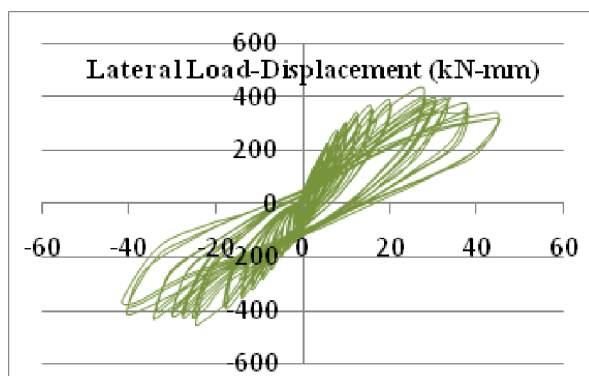
Gambar 8. Grafik Beban-Displacement C-1C

Gambar 7. Grafik beban lateral-displacement C-1G

(a) zona sendi plastis

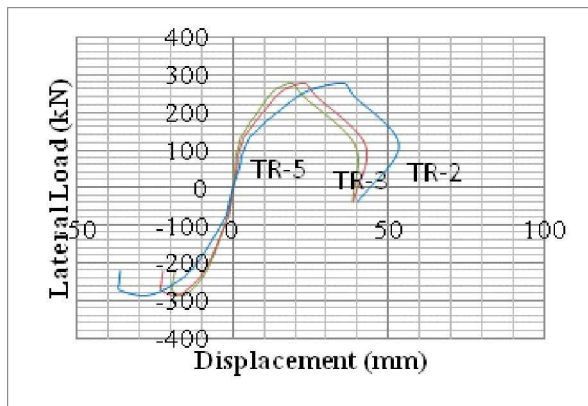


(b) Setengah tinggi kolom efektif

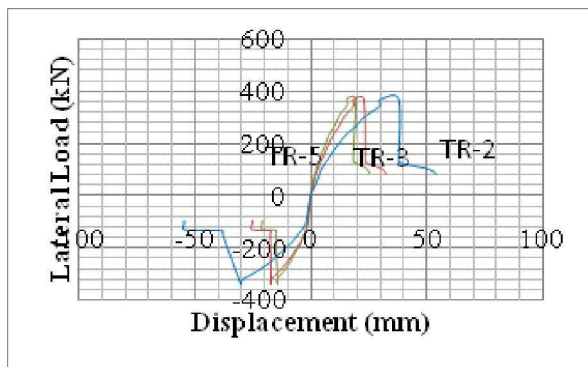


Displacement Ductility

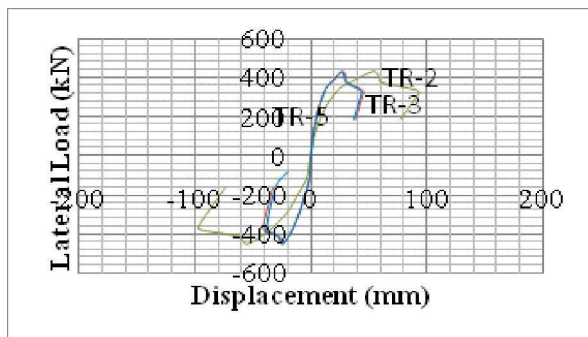
Dari *skeleton* grafik P-d dapat ditentukan besarnya *displacement ductility* untuk masing-masing benda uji. Nilai *displacement ductility* diperoleh untuk tiga posisi yaitu zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom. Untuk benda uji C-1 nilai *displacement ductility* sebesar 6,70; 6,11 dan 5,44, masing-masing untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom. Nilai *displacement ductility* C-1G berturut-turut adalah 4,41; 4,37 dan 4,75 untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom. Nilai ini lebih rendah dari C-1 akibat dari kegagalan pada kepala kolom. Nilai *displacement ductility* C-1C untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom adalah 11,02; 12,75 dan 11,89. Karena kegagalan kepala kolom yang mengakibatkan pengujian dilanjutkan tanpa beban aksial sehingga terjadi penurunan *displacement ductility* pada kolom C-1G terhadap C-1 sebesar 34,20%, 28,46% dan 12,74% untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom. Peningkatan *displacement ductility* untuk C-1C terhadap C-1 adalah 64,48%, 108,74% dan 118,68% masing-masing untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom.



Gambar 9. Skeleton beban lateral-displacement benda uji C-1



Gambar 10. Skeleton beban lateral-displacement benda uji C-1G



Gambar 11. Skeleton beban lateral-displacement benda uji C-1C

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Kerusakan pada kolom original terpusat pada daerah sendi plastis yang ditandai dengan tulangan longitudinal bengkok dan terjadi *spalling* selimut beton hingga inti beton terlihat. Pada kolom C-1G sampai dengan rasio lateral *drift* yang diacu yaitu 5% siklus terakhir, zona sendi plastis tidak mengalami kerusakan yang berarti. Hanya terjadi perubahan warna pada resin dan kondisi permukaan *specimen*

sudah tidak merata yang menandakan beton didalam GFRP telah mengalami kerusakan namun GFRP belum pecah. Ditemukan dua titik kegagalan pada daerah sendi plastis yaitu bagian belakang *specimen* masing-masing sepanjang 10 dan 11 cm serta satu titik *kegagalan* GFRP sepanjang 18 cm dibagian depan *specimen*. Pada kolom C-1C sampai dengan rasio lateral *drift* 8,5% siklus ke tiga secara visual terjadi kemiringan kolom yang cukup besar melampaui *displacement* rencana. Kegagalan kolom di zona sendi plastis berupa putusanya beberapa serat *carbon* disepanjang penampang searah dengan tulangan transversal. Selain itu juga terlihat perubahan warna resin di beberapa titik sepanjang 1 cm dan 15 cm dan perubahan warna resin berupa luasan setinggi 30 cm dari atas penjepit kolom.

Peningkatan kekuatan:

- Besarnya P_{max} yang terjadi saat pengujian berlangsung adalah 278,9 kN untuk C-1, 372,4 kN untuk C-1G dan 432,4 kN untuk C-1C serta d_{max} yang terjadi adalah 53,24 mm, 56,78 mm dan 96,46 mm masing-masing untuk C-1, C-1G dan C-1C. Peningkatan M_{max} untuk C-1, C-1G dan C-1C adalah 328,04 kNm, 434,37 kNm dan 509,63 kNm.
- b. Peningkatan P_{max} terhadap C-1 adalah 33,63% dan 54,97% untuk C-1G dan C-1C. Peningkatan d_{max} adalah 6,65% dan 81,18% masing-masing untuk C-1G dan C-1C terhadap C-1. Peningkatan M_{max} terhadap C-1 adalah 32,41% dan 55,36% untuk C-1G dan C-1C.

Peningkatan daktilitas:

- Nilai *displacement ductility* untuk daerah sendi plastis, setengah tinggi kolom dan setinggi efektif kolom berturut-turut untuk C-1 adalah 6,70; 6,11 dan 5,44, C-1G adalah 4,41; 4,37 dan 4,75 serta C-1C sebesar 11,02; 12,75 dan 11,89.
- Prosentase peningkatan m_d C-1G terhadap C-1 adalah -34,20%, -28,46% dan -12,74% dan peningkatan m_d C-1C terhadap C-1 adalah 64,48%, 108,74% dan 118,68% untuk zona sendi plastis, setengah tinggi kolom dan setinggi efektif kolom.

Saran

- *Specimen* akan sangat menentukan hasil dari penelitian sehingga desain awal, pembuatan dan perawatan *specimen* harus mendapatkan perhatian disetiap tahapannya.
- Agar *displacement* kepala kolom bisa searah dan mengikuti pergerakan dari *actuator* samping maka sebaiknya alat bantu pelat baja samping dibuat setinggi dari *actuator* samping ke kepala kolom sehingga kerusakan kepala kolom bisa dihindari.
- Perlu dilakukan peninjauan ulang terhadap pola pembebanan yang akan diacu dalam pengujian sehingga bisa diperoleh kegagalan kolom seperti yang diharapkan.
- Agar mendapatkan perilaku dan hasil yang memiliki tingkat validitas tinggi maka perlu difikirkan untuk menambah variasi dan pengulangan *specimen*.

- Cole, C. and Belarbi, A. “*Confinement Characteristics of Rectangular FRP-Jacketed RC Columns*”, Proceedings of the Fifth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-5), Cambridge, UK, July 16-18, 2001, pp. 823-832.
- Dhakar, RP and Maekawa, K. “*Post-Peak Cyclic behavior and Ductility of reinforced Concrete Columns*”
- Fam, AZ and Rizkalla, SH. “*Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes*” ACI Structural Journal, July-August, 2001, pp.451-461
- Fernandes, R and Gonçalves, M. “*Sharp Edge Effects on FRP Confinement of RC Square Columns*” Portugal
- Gangarao, H, Taly, N and Gangarao, H. “*Reinforced Concrete Design with FRP Composites*” CRC Press, Prancis, 2007

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 440.2R-02. “*Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*”. ACI Committee 440, 2002
- ACI 440.3R-04. “*Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures*”. ACI Committee 440, 2004
- ACI 374.1-05. “*Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*”. ACI Committee 374, 2005
- Al-Sulayfani, B and Al-Tae, H. “*Modeling of Stress-Strain Relationship for Fibrous Concrete Under Cyclic Loads*” Eng. Tech. Vol.26, No1, 2008, pp. 45-53
- Balaguru, P, Nanni, A and Giancaspro, J. “*FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*” Taylor & Francis Group, New York, 2009
- Bank, Lawrence. “*Structural Design with FRP Materials*” John Wiley & Sons, INC, Canada, 2006
- Benzaid, R, Chikh NE and Mesbah H. “*Behaviour Of Square Concrete Column Confined With GFRP Composite Warp*”, Journal Of Civil Engineering And Management, 2008