PENGGUNAAN *CARBON FIBER-REINFORCED POLYMER* SEBAGAI PERKUATAN KOLOM BETON BERTULANG AKIBAT BEBAN SIKLIK UNTUK MENINGKATKAN DAKTILITAS PERPINDAHAN STRUKTUR

Karmila Achmad
Agoes Soehardjono M.D.
Tavio

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan daktilitas perpindahan pada spesimen kolom yang diberi perkuatan *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Ada dua spesimen kolom skala penuh yang digunakan, yaitu C-1 (kolom original) dan C-1C (kolom dengan perkuatan *CFRP* 1 lapis). Hasil penelitian untuk masing-masing C-1 dan C-1C adalah P_{max} sebesar 278,9 dan 432,2 kN, δ_{max} sebesar 53,24 dan 96,46 mm, serta M_{max} sebesar 328,04 dan 509,63 kNm. Hasil daktilitas perpindahan untuk C-1 adalah 6,70; 6,11 dan 5,44, sedang C-1C adalah 11,02; 12,75 dan 11,89. Peningkatan persentase daktilitas perpindahan kolom C-1C terhadap C-1 adalah 64,48; 108,74; dan 118,68% masing-masing untuk zona sendi plastis, setengah tinggi efektif kolom dan setinggi efektif kolom.

Kata-kata kunci: *carbon fiber-reinforced polymer,* kolom, siklik, daktilitas

Abstract: *The Use of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) as a Concrete Column Reinforcement in Order to Improve the Structure Displacement Ductility Caused by a Cyclic Load. The aim of this research is to improve the displacement ductility of a column specimen by giving CFRP strengthener (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Two full-scale specimens are used, C-1 (original column) and C-1C (column with CFRP strengthener 1 layer). The tests on C-1 and C-1C are respectively shown on the following results: P_{max} is 278.9 and 432.2 kN, δ_{max} is 53.24 and 96.46 mm, and M_{max} is 328.04 and 509.63 kNm. The displacement ductility of C-1 are 6.70, 6.11 and 5.44, and the displacement ductility of C-1C are 11.02; 12.75; and 11.89. The percentages of the increase of displacement ductility in column C-1C compared to C-1 are 64.48; 108.74; and 118.68% respectively for plastic hinge zone, half high of the column effectiveness and as high as the column effectiveness.*

Keywords: *carbon fiber-reinforced polymer, column, ductility*

Struktur kolom merupakan elemen tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktural yang memikul beban dari balok. Karena kolom merupakan komponen tekan maka keruntuhan pada satu kolom merupakan lokasi kritis yang dapat menyebabkan *collapse* lantai yang bersangkutan dan *ultimate total collapse* struktur

Karmila Achmad adalah Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil-Struktur FT Universitas Brawijaya dan Dosen Teknik Sipil Politeknik Negeri Balikpapan; Agoes Soehardjono M.D. adalah Guru Besar Teknik Sipil-Struktur FT Universitas Brawijaya Malang; dan Tavio adalah Dosen Jurusan Teknik Sipil-Struktur FTSP Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

keseluruhan (Nawy, 2008). Penyebab kegagalan kolom antara lain 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). Selain itu juga dengan adanya pergeseran peta zona gempa Indonesia (Tim Revisi Gempa Indonesia, 2010) maka perlu dilakukan peninjauan terhadap desain struktur yang ada untuk mencegah terjadinya kerugian material dan korban jiwa.

Dua hal penting yang harus diperhatikan dalam mendesain struktur adalah kekuatan yang terkait dengan peningkatan beban dan daktilitas sebagai persyaratan dasar pada struktur yang menahan pembebanan dinamis seperti gempa bumi.

Carbon fiber didefinisikan sebagai serat yang mengandung setidaknya 90,00% berat karbon. Umumnya digunakan *graphite fiber* yang merupakan serat dengan karbon di atas 95,00% beratnya. Komposit *carbon fiber* cocok untuk aplikasi struktur yang harus memenuhi persyaratan kekuatan, kekakuan, ringan, dan ketahanan terhadap *fatigue*.

Tidak seperti *glass fiber* dan *aramid fiber*, *carbon fiber* tidak menunjukkan korosi atau pecah pada suhu kamar. Selain itu karbon juga dapat digunakan dalam aplikasi yang memerlukan ketahanan suhu tinggi, kelembaman dan redaman. Kelebihan lainnya adalah *carbon fiber* memiliki kekuatan yang relatif lebih tinggi dibanding *glass fiber*. Sehingga material ini cocok digunakan untuk perkuatan kolom beton. Dalam penelitian ini akan digunakan material *carbon Tyfo®SCH* seperti ditunjukan pada Gambar 1.

Konsep pengekangan atau *confinement* adalah untuk menahan beton dan menunda kegagalan. *Confinement* dapat didefinisikan sebagai pembatasan pelebaran lateral beton. Sehingga diharapkan dengan adanya pengekangan yang baik pada struktur maka mampu meningkatkan kekuatan tekan dan regangan aksial ultimit. Dalam penelitian ini akan digunakan dua jenis pengekangan yaitu tulangan baja transversal sebagai *internal confinement* dan *CFRP* sebagai *external confinement*.



Gambar 1. ***Tyfo®SCH System Uni-Directional Carbon Composite***

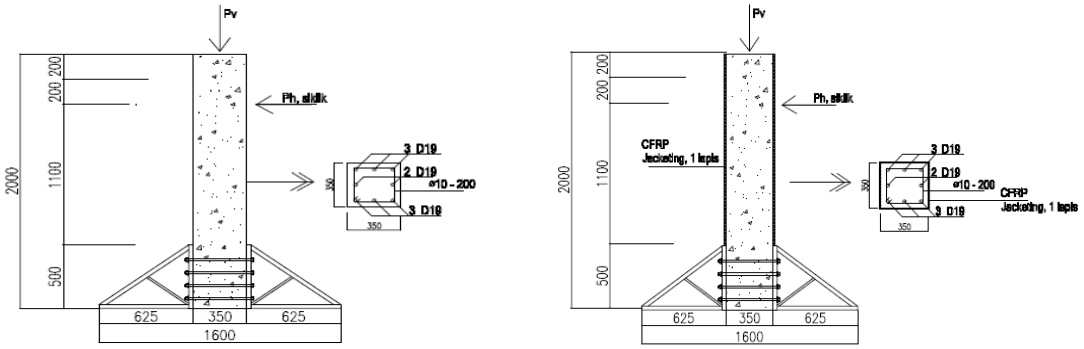
Beban siklik merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan namun tidak menutup kemungkinan terjadi kegagalan struktur akibat beban siklik. Hal ini dikaitkan dengan kegagalan *fatigue* pada struktur yang merupakan fenomena di mana beton pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum.

Struktur yang mampu menahan deformasi plastis yang besar dikatakan *ductile*. Struktur yang mampu menahan deformasi plastis yang kecil sebelum hancur dikatakan *brittle*.

METODE

Specimen yang diuji adalah kolom persegi dengan ukuran 350 × 350 mm dan tinggi efektif 1100 mm. Pada bagian bawah kolom dijepit dengan pelat baja setinggi 500 mm. Dalam penelitian ini digunakan 2 buah *specimen full scale* yaitu kolom original adalah kolom beton bertulang tanpa perkuatan *fiber* (C-1) dan kolom dengan 1 lapis *CFRP* (C-1C).

Jumlah tulangan longitudinal 8D19 dan jarak antar sengkang ϕ10−200. Detail gambar seperti pada Gambar 2.



(a) (b)

Gambar 2. *Specimen*: (a) C-1 dan (b) C-1C

Gambar 3 merupakan aplikasi *FRP* pada benda uji dengan menggunakan metode *Wet Lay-U*. Untuk menghindari geser dan *debonding* maka digunakan *overlap* antar lapisan sepanjang 200 mm. Benda uji kolom yang terbungkus dibiarkan pada suhu kamar selama 4 hari untuk memastikan *epoxy* telah mengeras sebelum dilakukan pengujian siklik. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan kekuatan penuh sebelum pengujian.

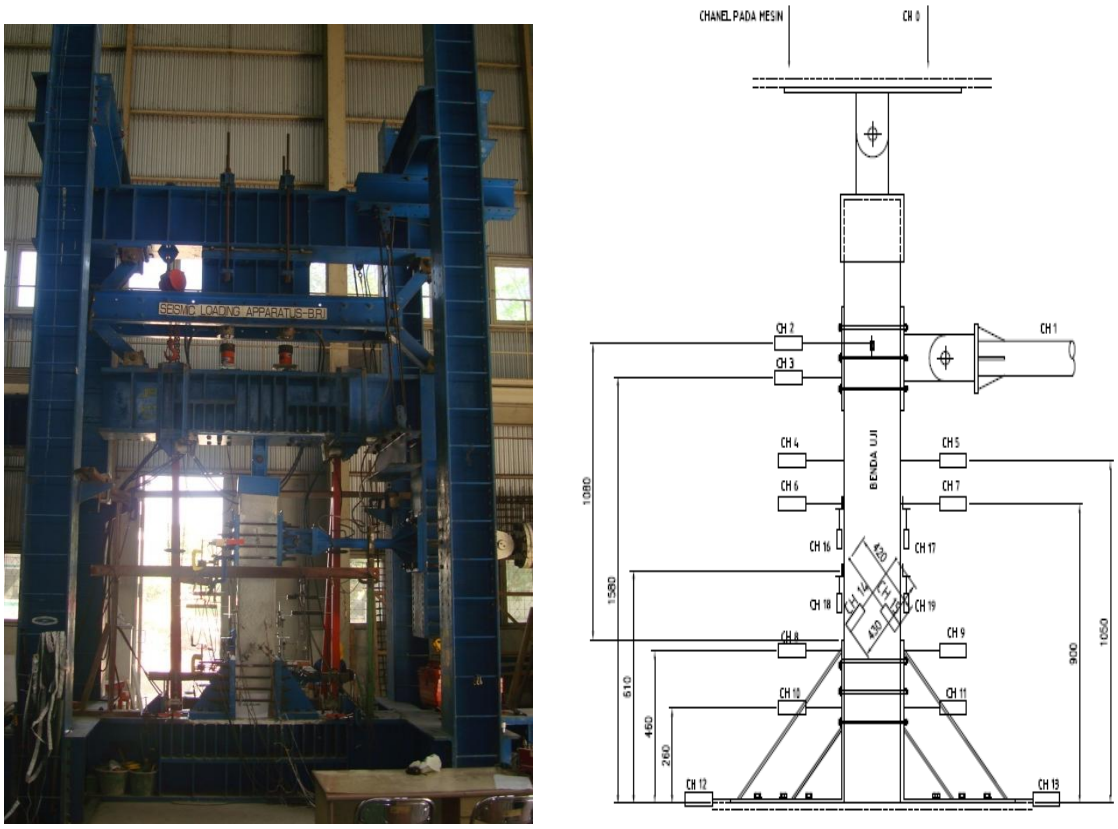


Gambar 3. Aplikasi *FRP*

Pelaksanaan pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji kolom berdiri tegak pada *loading frame*. Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian adalah *load cell*, *hydraulic actuator* dan 18 buah *LVDT*. *Load cell* yang digunakan sebanyak 3 buah yang masing-masing diletakan pada kepala kolom sebanyak 2 buah yang berfungsi sebagai pembaca beban aksial dan 1 buah *load cell* diletakkan pada samping kolom yang berfungsi sebagai pembaca beban siklik. *Displacement* diperoleh dari 18 *Linear Variable Displacement Transducer* (*LVDT*), masing-masing 8 buah diletakkan pada zona sendi plastis, 2 buah di bagian tengah tinggi efektif kolom, 2 buah di atas, dan 6 buah di bawah sebagai kontrol alat bantu pelat baja bagian bawah. *Set-up* pengujian secara skematik ditunjukkan dalam Gambar 4.

Berdasarkan analisis diagram interaksi seperti pada Gambar 5 maka beban rencana yang digunakan adalah beban aksial konstan sebesar 748 kN dan *lateral load* bervariasi sebesar 181,57 dan 246,30 kN masing-masing untuk C-1 dan C-1C.

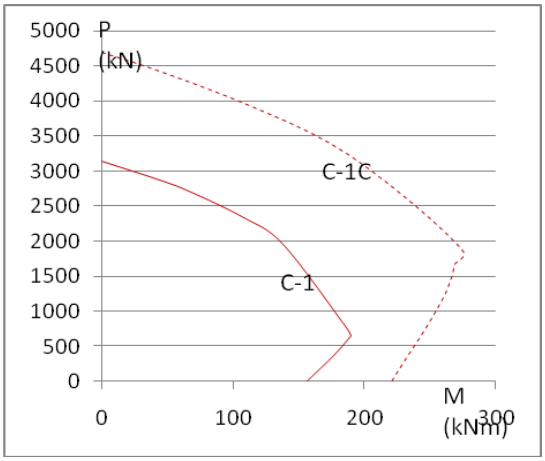
Pengujian dimulai dengan pemberian beban aksial sesuai dengan perencanaan awal kemudian *lateral load* diberikan secara bertahap sesuai dengan pola pembebanan pada Gambar 6. Pola pembeban-



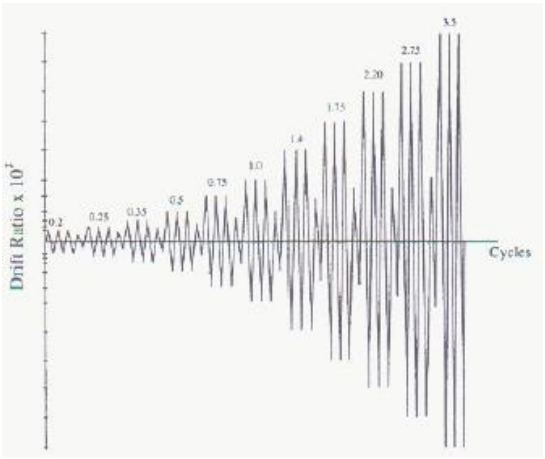
(a) (b)

Gambar 4. *Set-up* Pengujian: (a) Kolom pada *Frame* dan (b) Aplikasi *LVDT*

an yang diacu adalah pola pembabanan ACI 374.1-05 dengan rasio *drift* Δ/L ($\times 10^2$): 0,20; 0,25; 0,35; 0,50; 0,75; 1,00; 1,40; 1,75; 2,20; 2,75 dan 3,50 dengan tiga siklus untuk setiap tingkat penyimpangan. Pengujian dihentikan setelah terjadi penurunan beban sampai 20,00% dari P_{max} dengan target *displacement* untuk C-1 sebesar 54 mm dan C-1C sebesar 54,25 mm.



Gambar 5. Diagram Interaksi *Specimen*



Gambar 6. Pola Pembebanan

HASIL

Dalam makalah ini akan dibahas hasil dari pengujian pendahuluan, hasil pengamatan dan hubungan beban lateral-*displacement*.

Pengujian Pendahuluan

Dalam penelitian ini dilakukan 3 buah pengujian pendahuluan sebelum pengujian siklik dilakukan. Pengujian pendahuluan tersebut adalah uji tekan beton, uji tarik baja dan uji tarik CFRP. Hasil yang diperoleh dari pengujian pendahuluan: mutu beton yang digunakan adalah 20,34 MPa, mutu baja adalah 549,94 MPa dan tegangan tarik CFRP adalah 876 MPa.

Hasil Pengamatan

Kegagalan benda uji C-1 akibat *spalling* beton. P_{max} tercapai pada rasio lateral *drift* 2,75% siklus pertama dengan nilai 278,90 kN. Mulai *spalling* kolom terjadi pada saat beban mencapai 250,10 kN dengan rasio lateral *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.

Kerusakan C-1 paling parah terjadi pada zona sendi plastis sampai ketinggian 600 mm dari atas penjepit kolom. Kegagalan diakibatkan *spalling* beton dan hancurnya inti beton serta tekuk tulangan longitudinal. Selain di zona sendi plastis, kerusakan juga terjadi pada kolom bagian atas, meskipun tidak sebesar pada zona sendi plastis. Kegagalan yang terjadi pada C-1 seperti ditampilkan pada Gambar 7.

Kegagalan kolom C-1C ditandai dengan hancurnya beton dan terjadi kegagalan *FRP*. Pada rasio lateral *drift* 2,75% siklus pertama terdengar bunyi dibagian dalam kolom yang menandakan mulai terjadi kerusakan pada beton bagian dalam. Disusul terjadi gelembung pada permukaan benda uji pada zona sendi plastis bagian samping pada *lateral load* 124,40 kN.



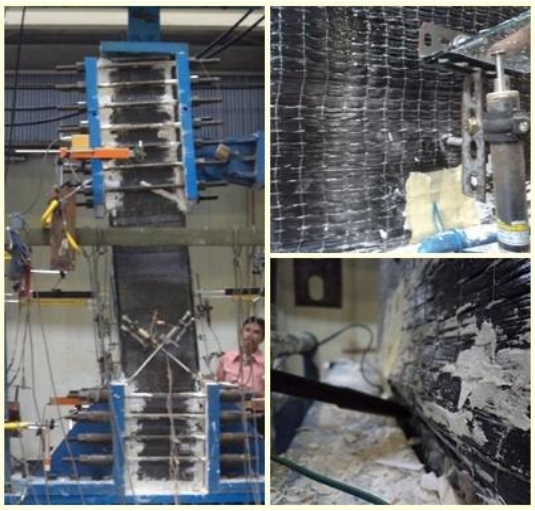
Gambar 7. Kegagalan Kolom C-1

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 rasio lateral *drift* 5,00% siklus pertama dengan nilai *lateral load* 432,20 kN dan *displacement* yang terbaca dari *LVDT* 2 adalah 54,40 mm.

Mulai rasio lateral *drift* 5,50% siklus kedua terdengar bunyi merayap yang berkelanjutan sampai dengan akhir pengujian yang menandakan beton bagian dalam telah hancur. Sampai akhir pengujian rasio lateral *drift* 8,50% siklus ke tiga secara visual kemiringan benda uji terlihat dengan jelas (Gambar 8) 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 menjaga kondisi peralatan.

Kegagalan yang terjadi sampai akhir pengujian pada zona sendi plastis berupa perubahan warna pada resin, dapat dilihat

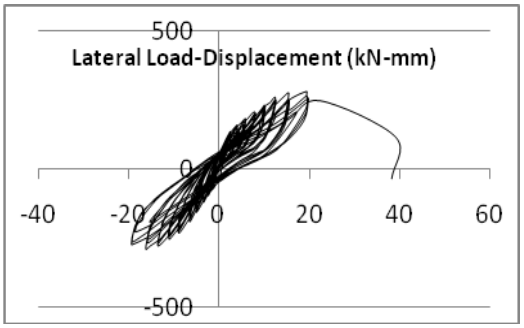
pada Gambar 8. Pada sisi samping, kerusakan berupa putusnya *fiber* searah tulangan transversal sepanjang penampang kolom yang berlanjut ke bagian depan benda uji sepanjang 3 cm. Kegagalan kolom sisi tekan berupa perubahan warna pada resin yang sudah berupa luasan pada permukaan benda uji. Kerusakan ini setinggi 30 cm sepanjang penampang kolom. Untuk permukaan kolom zona sendi plastis secara keseluruhan sudah tidak rata akibat rusaknya beton di bagian dalam.



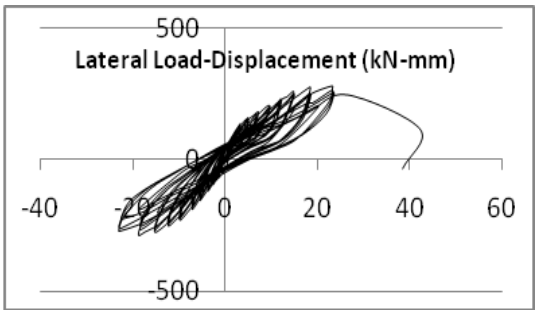
Gambar 8. Kegagalan Kolom C-1C

Hubungan Beban Lateral-*Displacement*

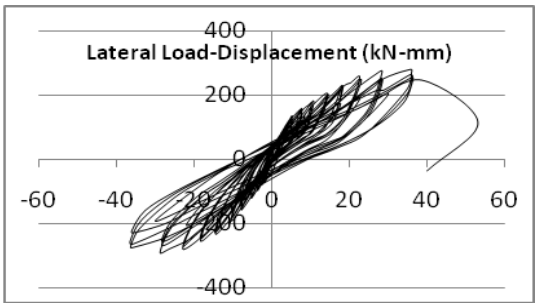
Pengujian siklik C-1 dilakukan sebanyak 800 *step* pengujian dan 1048 *step* pengujian pada *specimen* C-1C. Data yang diperoleh dari pengujian siklik adalah data *lateral load* dan *displacement.* Dalam artikel ini ditampilkan grafik *lateral load-displacement* yang diperoleh dari data hasil pengujian, seperti ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10. Grafik *lateral load-displacement* akan diambil pada tiga posisi yaitu zona sendi plastis, setengah tinggi efektif kolom dan setinggi efektif kolom, yang masing-masing diambil dari data *LVDT*-5, *LVDT*-3, dan *LVDT*-2.



(a) Zona sendi plastis

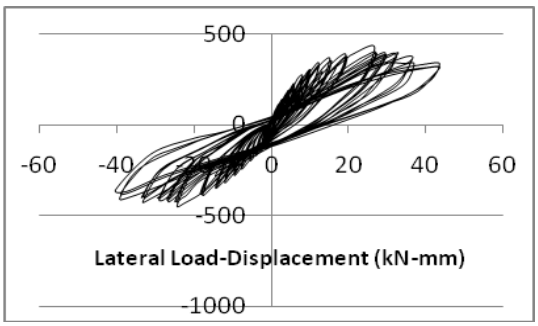


(b) Setengah tinggi efektif kolom

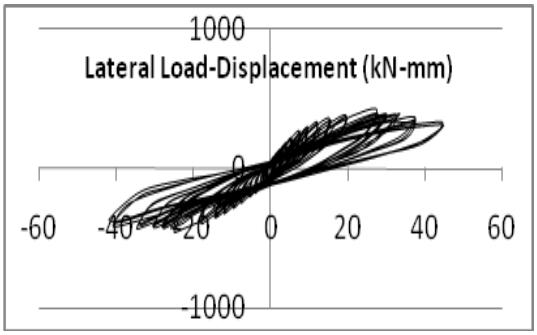


(c) Setinggi efektif kolom

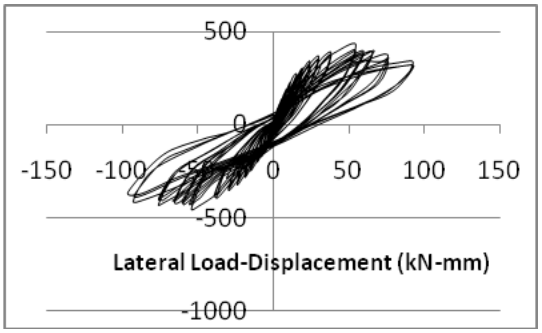
Gambar 9. Grafik Hubungan *Lateral Load-Displacement* C-1



(a) Zona sendi plastis



(b) Setengah tinggi efektif kolom



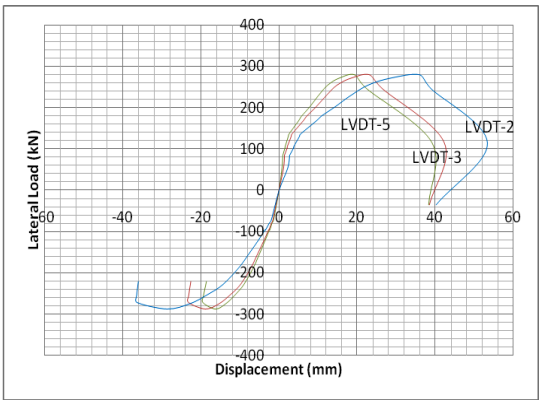
(c) Setinggi efektif kolom

Gambar 10. Grafik Hubungan *Lateral Load-Displacement* C-1C

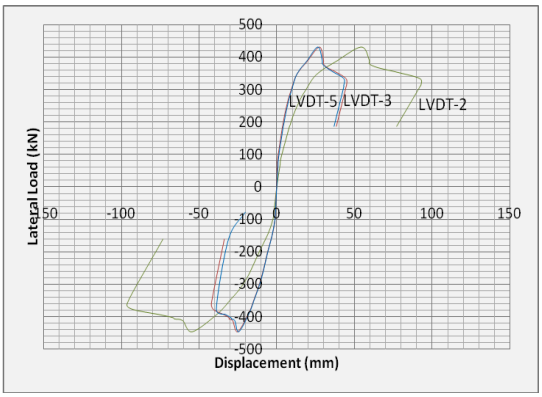
PEMBAHASAN

Dari grafik hubungan beban lateral-*displacement* maka dapat ditentukan *skeleton* grafik *lateral load-displacement* C-1 dan C-1C pada Gambar 11 dan 12. Dalam penelitian di ambil daktilitas perpindahan pada 3 posisi zona sendi plastis, setengah tinggi efektif kolom dan setinggi efektif kolom. Data *displacement* dari pembacaan *LVDT* 2 untuk zona sendi plastis, *LVDT* 3 untuk setengah tinggi kolom dan *LVDT* 5 untuk data setinggi kolom efektif.

Nilai daktilitas perpindahan untuk daerah sendi plastis, setengah tinggi kolom dan setinggi efektif kolom berturut-turut untuk C-1 adalah 6,70; 6,11; dan 5,44 serta C-1C sebesar 11,02; 12,75; dan 11,89. sesuai pendapat Ozcan, dkk. (2007), menyatakan bahwa satu lembar *CFRP* mampu meningkatkan daktilitas secara signifikan akibat seismik.



Gambar 11. Perbandingan *Skeleton Lateral Load-Displacement Specimen C-1*



Gambar 12. Perbandingan *Skeleton Lateral Load-Displacement Specimen* C-1C

Selain itu juga, hasil penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian Sheikh (2002), yang menyatakan bahwa penggunaan CFRP dengan beban aksial 0,27 Po mampu menghasilkan peningkatan daktilitas lebih dari 100%. Dalam penelitian ini peningkatan daktilitas perpindahan C-1C terhadap C-1 adalah 64,48; 108,74; dan 118,68% untuk zona sendi plastis, setengah tinggi kolom dan setinggi efektif kolom.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan dari penelitian ini adalah: (1) nilai daktilitas perpindahan pada zona

sendi plastis, setengah tinggi efektif dan setinggi efektif kolom masing-masing untuk benda uji C-1 adalah 6,70; 6,11; dan 5,44 serta C-1C adalah 11,02; 12,75; dan 11,89 dan (2) nilai daktilitas perpindahan C-1C terhadap C-1 meningkat sebesar 64,48; 108,74; dan 118,68% untuk daerah sendi plastis, setengah tinggi kolom dan setinggi efektif kolom.

Pada penelitian ini, terdapat beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan agar kemungkinan tersebut dapat diperbaiki dikemudian hari antara lain: (1) *specimen* akan sangat menentukan hasil penelitian sehingga desain awal, pembuatan, dan perawatan *specimen* harus mendapatkan perhatian di setiap tahapannya, dan (2) agar mendapatkan perilaku dan hasil yang memiliki tingkat validitas tinggi maka perlu dipikirkan untuk menambah variasi dan pengulangan *specimen*.

DAFTAR RUJUKAN

Nawy, E. 2008. *Beton Bertulang suatu Pendekatan Dasar*. Bandung: PT. Refika Aditama.

Ozcan, O., Binici, B., & Ozcebe, G. 2007. S*eismic Retrofitting of Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*. Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS), pp.193–198.

Sheikh, K. 2002. *Manufacturing Re-source Planing (MRP II), with Introduction to ERP, SCM, and, CRM*. Singapore: Mc Graw Hill.

Tim Revisi Gempa Indonesia. 2010. Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010. Bandung, 1 Juli 2010. Laporan Studi.