

KEKUATAN DAN DAKTILITAS PERPINDAHAN KOLOM PENDEK BETON BERTULANG PERSEGI DIBAWAH PENGARUH PEMBEBANAN SIKLIK

Parmo

Abstract: Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif sehingga sangat rawan terhadap gempa bumi. Oleh karena itu perencanaan elemen struktur bangunan gedung sangatlah perlu memperhatikan kekuatan dan juga daktilitas. Kekuatan struktur berfungsi menahan beban oleh adanya gaya gravitasi sedangkan daktilitas merupakan salah satu persyaratan struktur tahan gempa, sedangkan pembebanan siklik merupakan representasi yang tepat untuk menggambarkan beban dinamis yang terjadi. Kolom merupakan komponen struktur yang berperan penting untuk mendukung beban aksial, beban gempa, momen lentur dan gaya geser. Karena keruntuhan kolom bisa mengakibatkan struktur bangunan runtuh (*collapse*) secara keseluruhan. Dalam penelitian ini diuji 1 buah kolom masing-masing berpenampang persegi, dengan ukuran tinggi 350 mm, lebar 350 mm dan panjang 1100 mm. Kuat tekan beton rata-rata digunakan $f'_c = 20,34$ Mpa, tegangan leleh tulangan baja longitudinal $f_y = 549,94$ Mpa. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban aksial konstan 748 kN dan beban lateral siklik metode *displacement control* untuk mensimulasikan beban gempa. Hasil analisa teoritis diagram interaksi sebagai representasi kekuatan kolom secara teoritis diperoleh beban horizontal (P_h) dan momen yang secara teoritis diperoleh P_h sebesar 185,73 kN dan momen nominal kolom secara teoritis diperoleh 202,45 kN.m sedangkan pengujian eksperimen diperoleh $P_{h\text{ maks}}$ sebesar 288,0 kN dengan momen nominal sebesar 316,8 kN.m. Nilai Daktilitas kolom diperoleh setelah benda uji dilakukan pengujian siklik dan hasil pengujian dilakukan analisis. Daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) kolom uji C-1 sebesar 2,71, sehingga kolom termasuk daktil parsial.

Kata kunci: kolom beton bertulang, kekuatan, daktilitas.

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Keberadaan interaksi antar lempeng-lempeng ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi. Tingginya aktivitas kegempaan ini terlihat dari hasil pencatatan dimana dalam rentang waktu 1897-2009 terdapat lebih dari 14.000 kejadian gempa dengan magnitudo $M > 5.0$. Gempa bumi yang terjadi di Indonesia dan di dunia telah menyebabkan jutaan korban jiwa, keruntuhan dan kerusakan ribuan infrastruktur dan bangunan, serta dana trilyunan rupiah untuk rehabilitasi dan rekonstruksi (Tim revisi peta gempa Indonesia, 2010). Untuk meminimalkan akibat yang ditimbulkan oleh adanya gempa dapat berupa: 1) penyediaan peralatan *emergency* (keadaan darurat); 2) tempat tinggal atau bangunan yang tahan gempa; dan 3) prediksi terhadap gempa (Khrisnamurti, 2009).

Suatu struktur bangunan dikatakan kuat apabila dia mampu menyokong beban-beban yang ada di atasnya. Kekuatan struktur ditentukan oleh kualitas material, dimensi dan kombinasi penyusun struktur tersebut, apabila beton bertulang kekuatan struktur ditentukan oleh kualitas beton, kualitas baja, dimensi dan banyak sedikitnya baja tulangan. Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur bangunan untuk mengalami simpangan pasca elastik yang besar secara berulang kali dan siklik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelepasan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup, sehingga struktur bangunan

gedung tersebut tetap berdiri, walaupun sudah berada dalam kondisi plastik. Daktilitas merupakan salah satu persyaratan dasar pada struktur yang menahan pembebanan dinamis, seperti gempa bumi. Dimana pembebanan siklis merupakan model representatif yang tepat untuk menggambarkan beban dinamis yang terjadi.

Kolom merupakan elemen struktur yang penting karena kegagalan kolom akan berakibat langsung terhadap komponen struktur lainnya. Kegagalan ini akan berakibat fatal baik dari segi ekonomis maupun dari segi kemanusiaan (korban jiwa). Sehingga dalam suatu struktur keruntuhan kolom struktural merupakan hal yang sangat penting untuk ditinjau.

Tingkat pembebanan dan jumlah siklus sangat mempengaruhi perilaku respon tegangan-regangan beton seperti yang dinyatakan dalam model Mander dkk untuk beton terkekang (Shao, 2003). Perkuatan eksternal FRP juga bisa berfungsi sebagai *confinement* eksternal yang akan meningkatkan daktilitas struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar kekuatan secara teoritis dan ekperimental kolom pendek beton bertulang persegi yang dilakukan pembebanan serta untuk mengetahui seberapa besar daktilitas perpindahan setelah dilakukan analisis dari data ekperimental uji siklik.

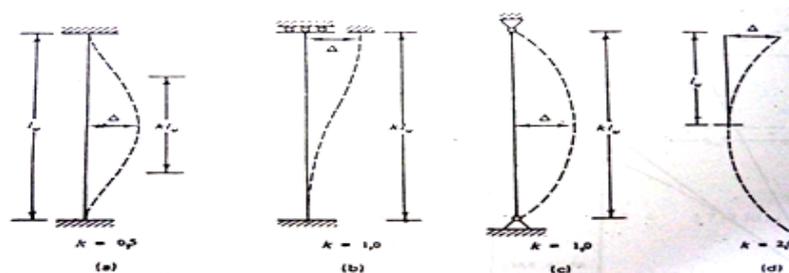
Beton dan Beton Bertulang

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air yang membentuk suatu massa mirip batuan. Terkadang satu atau lebih bahan aditif ditambahkan untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu, seperti kemudahan pengerjaan (*workability*), durabilitas dan waktu pengerasan.

Beton bertulang adalah suatu kombinasi antara beton dan baja, dimana tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton. Tulangan baja juga dapat menahan gaya tekan sehingga digunakan pada kolom dan pada berbagai kondisi lainnya (McCormac, 2003).

Kolom Pendek (Kolom tak Langsing) Beton Bertulang

Apabila kolom runtuh karena kegagalan materialnya (yaitu lelehnya baja atau hancurnya beton), kolom diklasifikasikan sebagai kolom tak langsing (*non slender column*). Apabila panjang kolom bertambah, kemungkinan kolom runtuh karena tekuk semakin besar. Dengan demikian ada suatu transisi dari kolom tak langsing (runtuh karena material) ke kolom langsing (runtuh karena tekuk) yang terdefinisi dengan menggunakan perbandingan panjang efektif kl_u dengan jari-jari girasi r . Tinggi l_u adalah panjang tak tertumpu (*unsupported length*) kolom, seperti yang ditunjukkan gambar 1. Dimana nilai kl_u/r disebut sebagai angka kelangsingan.



Gambar 1. Besar faktor panjang kolom untuk kondisi : (a) Jepit-jepit; (b) Jepit- jepit elastis; (c) Sendi-sendi; (d) Jepit-bebas

Identifikasi angka kelangsingan untuk kolom pendek adalah sebagai berikut :

a) Kolom yang bergoyang/tanpa pengaku (*unbraced*) : $\frac{KL_u}{r} \leq 22$ (1)

b) Kolom tidak bergoyang/dengan pengaku (*braced*) : $\frac{KL_u}{r} \leq 34 - 12 \frac{M_1}{M_2}$ (2)

Kekuatan dan Daktilitas Kolom

Kekuatan

Kolom dapat dikekang untuk meningkatkan daya dukung aksial. Kapasitas nominal beban aksial teoritis dari kolom non-slender adalah:

$$P_{n(maxs)} = 0,80 [0,85 \psi_f f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (3)$$

Dimana, A_g = luas bruto beton, A_{st} = luasan tulangan memanjang baja, f_y = tegangan leleh baja longitudinal, ψ_f = faktor reduksi FRP, dan f'_{cc} = kuattekan beton terkekang. Kapasitas aksial nominal maksimum kolom nonslender perkuatan FRP dengan pengekang *tied* adalah:

$$f'_{cc} = f'_c \left(2,25 \sqrt{1 + 7,9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1,25 \right) \quad (4)$$

Dalam desain hanya kekuatan pengekangan maksimum dan regangan yang diperlukan. Menurut ACI 440.2R-02 [7] kekuatan tekan pengekangan, f'_{cc} yang merupakan persamaan kekuatan beton terkekangyang dikembangkan oleh Mander dkk(1988) adalah:

$$f'_{cc} = f'_c \left(2,25 \sqrt{1 + 7,9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1,25 \right) \quad (5)$$

Dimana tekanan pengekangan disediakan oleh FRP, f_l oleh ACI 440.2R-02 dirumuskan sebagai:

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f E_f \epsilon_f e}{2} \quad (6)$$

κ_a merupakan faktor efisiensi yang tergantung dari bentuk kolom, untuk kolom persegi besarnya adalah:

$$\kappa_a = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_g)} \quad (7)$$

ρ_g adalah Rasio perkuatan kotor untuk kolom persegi, dengan syarat $h/b \leq 1,5$ serta b dan h lebih kecil dari 36 in dirumuskan:

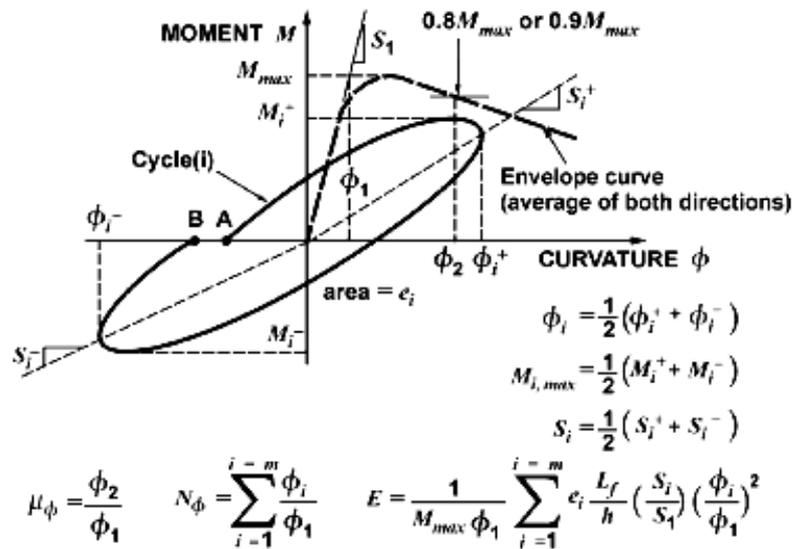
$$\rho_g = \frac{(A_s + A'_s)}{A_g} \quad (8)$$

dan ρ_f untuk kolom persegi dirumuskan:

$$\rho_f = \frac{2nt_f(b+h)}{bh} \quad (9)$$

Daktilitas

Berbagai parameter daktilitas pada struktur beton bertulang seperti pada gambar 2. Termasuk didalam parameter daktilitas ini adalah *curvature ductility factor* (μ_ϕ), *cumulative ductility ratio* (N_ϕ) dan *energy damage indicator* (E). Semua istilah yang didefinisikan dalam Gambar. 2 kecuali L_p adalah panjang sendi plastis yang mewakili panjang wilayah paling rusak yang diukur dari pengujian dan h merupakan tinggi kolom. Di mana tidak ada terjadi penurunan kekuatan dan kapasitas meningkat dengan meningkatnya deformasi sampai terjadi kegagalan. *Toughness*/ketangguhan dan disipasi energi dapat menentukan karakteristik bagian kinerja lebih baik daripada parameter daktilitas lainnya (Sheikh, 2006).



Gambar 2. Definisi dari parameter daktilitas

Parameter daktilitas yang sering digunakan untuk mengevaluasi perilaku seismik kolom termasuk faktor daktilitas kelengkungan μ_ϕ , faktor daktilitas perpindahan μ_Δ dan rasio lateral drift δ .

Definisi faktor daktilitas kelengkungan $\mu_\phi = \phi_2 / \phi_1$ adalah dijelaskan dalam Gambar. 2 untuk respon momen-kelengkungan. ϕ_1 kurvatur nominal leleh adalah kelengkungan pada momen maksimum M_{max} yang diukur sepanjang garis lurus menghubungkan titik asal dan titik 75% M_{max} pada kurva amplop, sementara ϕ_2 adalah kelengkungan ultimit ketika kapasitas momen pasca-puncak mengurangi sampai 80% M_{max} atau pada kegagalan kolom, mana yang lebih dahulu.

Demikian pula, faktor perpindahan daktilitas $\mu_\Delta = \Delta_2 / \Delta_1$ dan rasio lateral drift $\delta = \Delta_2 / L$ juga dapat ditentukan untuk kolom menggunakan respon lateral geser-defleksi tip (V- Δ), dimana Δ_1 = defleksi leleh nominal, Δ_2 = defleksi sesuai dengan pengurangan 20% dalam kapasitas beban lateral pada *descending branch* geser-defleksi *envelop curve* dan L = panjang kolom kantilever diukur dari bagian momen maksimum ke titik *contraflexure* (Sheikh & Liu, 2010).

Daktilitas diekspresikan sebagai faktor daktilitas atau indeks daktilitas. Faktor daktilitas didefinisikan sebagai rasio dari perpindahan maksimum dengan perpindahan leleh (Park, Paulay, 1975):

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (10)$$

dimana: μ_{Δ} = faktor daktilitas (Δ mengacu pada perpindahan)

Δ_m = perpindahan maksimum (respon inelastis)

Δ_y = perpindahan leleh

Agar faktor daktilitas lebih besar dari satu maka jumlah perpindahan maksimum, Δ_m (respon inelastis) harus memiliki nilai lebih besar dari perpindahan leleh (Δ_y), $\Delta_m > \Delta_y$. Selain itu perpindahan maksimum dapat menjadi perpindahan yang mungkin dicapai pada kondisi ultimit Δ_u sehingga faktor daktilitas menjadi

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (11)$$

Dari persamaan (11) faktor daktilitas (indeks daktilitas) dapat didefinisikan sebagai rasio dari deformasi ultimit dan leleh. Selisih antara perpindahan ultimit dan perpindahan leleh adalah perpindahan plastis, $\Delta_p = \Delta_u - \Delta_y$. Sehingga persamaan (11) menjadi:

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = 1 + \frac{\Delta_p}{\Delta_y} \quad (12)$$

Untuk meningkatkan faktor daktilitas perpindahan kolom maka daktilitas perpindahan plastis harus ditingkatkan dan hal ini dapat dicapai dengan pengekangan. Karena defleksi, kurvatur dan rotasi adalah sebanding dengan momen maka faktor daktilitas untuk material dapat ditulis sebagai berikut:

$$\text{Ductility factor} = \frac{\text{Deflection (or curvature, or rotation) at ultimate}}{\text{Deflection (or curvature, or rotation) at steel yield}} \quad (13)$$

Dari perspektif desain, indeks daktilitas memberikan ukuran kemampuan penyerapan energi (Park & Paulay, 1975).

Persamaan dibawah menunjukkan bahwa ada hubungan linear antara daktilitas kelengkungan dan daktilitas perpindahan kolom. Disini juga dapat diamati bahwa panjang sendi plastis l_p dan ketinggian kolom L merupakan dua faktor penting yang mempengaruhi hubungan ini.

$$\Delta_t = \Delta_y + \Delta_p = \frac{\phi_y L^2}{8} + (\phi - \phi_y) l_p (L - 0.5 l_p) \quad (14)$$

$$\mu_{\Delta} = 1 + 3(\mu_{\phi} - 1) \frac{l_p}{L} \left(1 - 0.5 \frac{l_p}{L}\right) \quad (15)$$

Dimana: Δ_t = perpindahan

Δ_y = perpindahan leleh

Δ_p = perpindahan plastis

ϕ_y = kelengkungan leleh

ϕ = kelengkungan

μ_{Δ} = daktilitas perpindahan

μ_{ϕ} = daktilitas kelengkungan

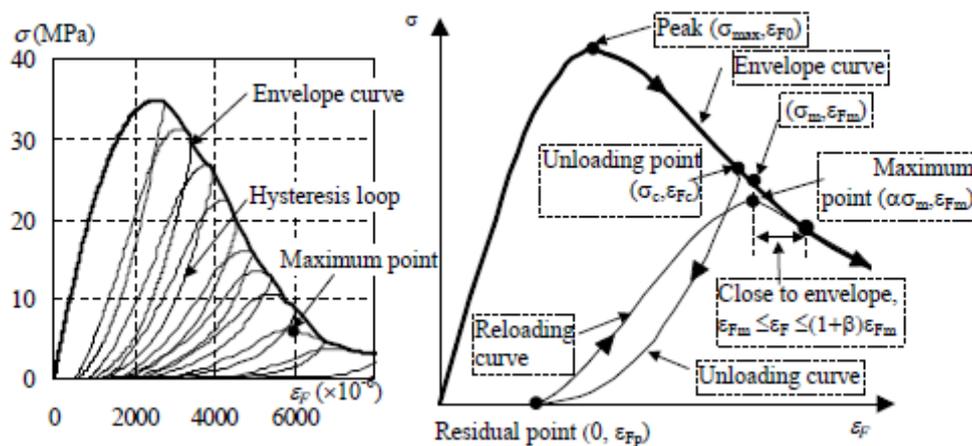
Meningkatkan daktilitas kelengkungan, pada gilirannya akan membutuhkan meningkatkan jumlah pengekangan dengan rincian yang tepat. Oleh karena itu, persamaan (15) menunjukkan bahwa jumlah pengekangan adalah cara yang efisien untuk mengontrol kolom beton.

Pembebanan Siklik

Beban siklis merupakan beban berulang yang diterima oleh suatu struktur. Kegagalan struktur juga bisa disebabkan oleh beban siklis yang terjadi, meskipun desain awal struktur memiliki kekuatan yang memenuhi persyaratan yang ditentukan. Kegagalan akibat kelelahan struktur (*fatigue*) yang merupakan fenomena dimana beton pecah ketika mengalami beban berulang pada tegangan lebih kecil daripada kekuatan tekan maksimum dan kekuatan *fatigue* yang didefinisikan sebagai kekuatan yang dapat didukung untuk sejumlah siklus tertentu. *Fatigue* dipengaruhi oleh berbagai pembebanan, tingkat pembebanan, *load history* dan sifat material [Al-Sulayfani, 2008].

Pada struktur kolom, beban aksial merupakan representatif dari berat sendiri dan beban siklis merupakan beban luar yang terjadi berulang misalkan beban gempa. Beban aksial dan siklis ini akan bekerja secara bersamaan pada struktur kolom.

Untuk memprediksi perilaku struktur beton di bawah pembebanan seismik, model tegangan-regangan beton di bawah beban siklik (*loop histeresis*) adalah hal yang penting untuk diamati [Watanabe] dan digambarkan seperti gambar 3.

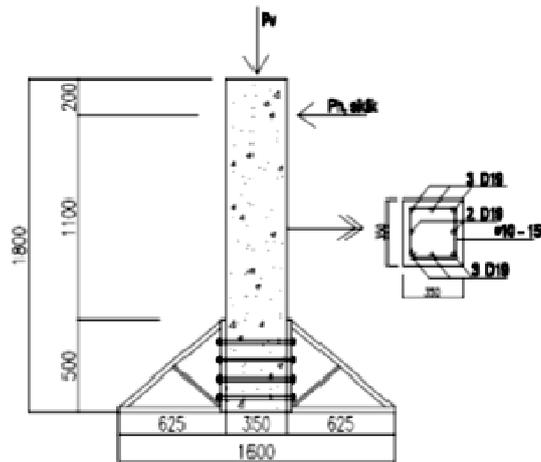


Gambar 3. Histeresis Loop

METODE

Desain Benda Uji

Spesimen yang diuji adalah 1 buah kolom persegi *full scale* dengan ukuran 350 x 350 mm dan tinggi 1100 mm. Pada bagian bawah kolom dijepit setinggi 500 mm. Asumsi yang digunakan adalah kolom pendek dengan tumpuan jepit-bebas. Pada bagian atas kolom dibiarkan bebas bergerak sesuai dengan beban yang bekerja. Mutu beton yang digunakan adalah $f'_c = 20,34$ MPa, mutu baja untuk tulangan longitudinal adalah $f_y = 549,94$ MPa dengan jumlah tulangan longitudinal 8D19 dan mutu baja untuk tulangan transversal 386,52 MPa berdiameter tulangan $\phi 10$ mm dengan jarak antar tulangan 200 mm. Benda uji ditampilkan pada gambar 4 dan spesifikasi benda uji ditampilkan pada tabel 1.



Gambar 4. Benda uji C-1

Tabel 1: Spesifikasi benda uji

No Benda uji	Benda uji kolom	Kuat tekan beton (Mpa)	Ukuran Kolom			Tulangan		CFRP Jacketing		
			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	-	-	-

Karakteristik Material Benda Uji
Material Beton

Beton yang direncanakan pada penelitian adalah beton normal dengan kuat tekan beton rencana 28 hari $f_c' = 20$ MPa dengan deviasi standar 5 MPa serta memiliki nilai slump (12 ± 2) cm. Pada saat dilakukan pengecoran benda uji, dilakukan pengambilan sampel uji kontrol. Sampel uji kontrol tersebut berupa silinder yang memiliki diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7 hari, 28 hari, dan 47 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2: Hasil uji kuat tekan beton

Deskripsi	Kuat Tekan Beton (Mpa)						Rata-rata (Mpa)
	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Benda Uji 4	Benda Uji 5	Benda Uji 6	
Kuat Tekan Beton 7 hari	12,11	12,39	12,56	13,41	11,71	12,73	12,48
Kuat Tekan Beton 28 hari	18,44	18,10	18,89	17,87	19,63	19,35	18,71
Kuat Tekan Beton 47 hari	22,29	22,12	21,55	21,33	21,49	20,65	20,34

Material Baja

Baja tulangan yang dipakai untuk tulangan longitudinal adalah ulir (deform) D19 mm sedangkan tulangan transversal (sejangkang) menggunakan tulangan baja polos $\phi 10$ mm. Hasil pengujian tarik tulangan baja dapat dilihat pada tabel 3. .

Tabel 3: Hasil uji tarik baja tulangan

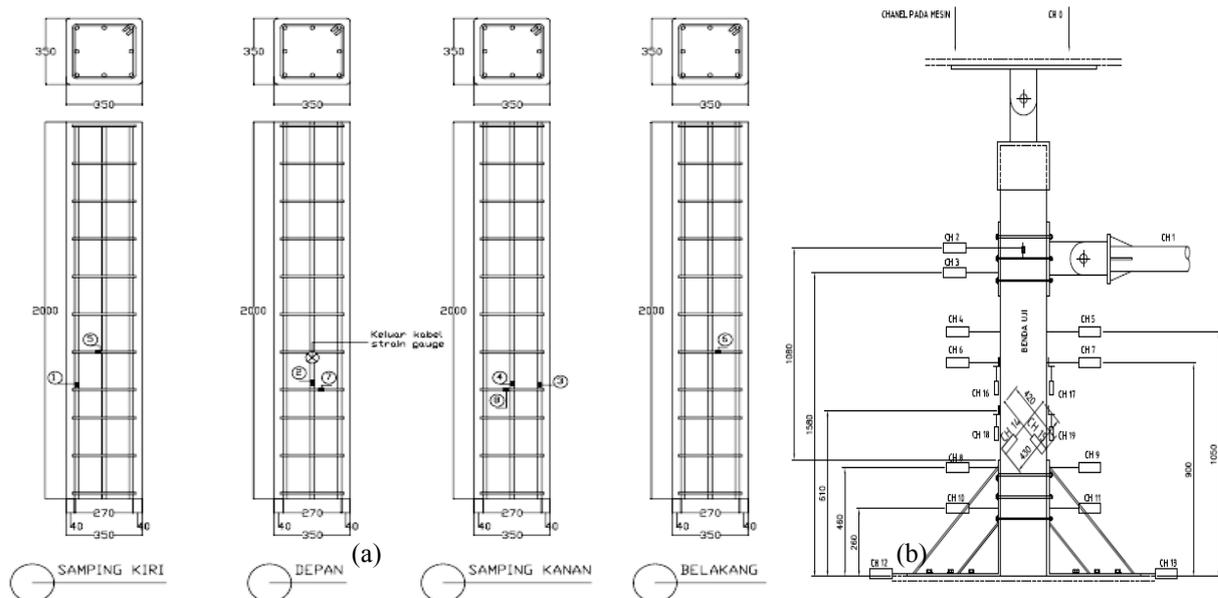
Material baja	Kuat leleh (Mpa)	Kuat Ultimit (Mpa)
Tulangan ulir diameter 19 mm	549,94	530,08
Tulangan polos diameter 10 mm	386,52	756,17

Instrumentasi Dan Test Setup

Instrumentasi

Strain gauge dipasang untuk masing-masing spesimen, *Strain gauge* baja dipasang pada tulangan longitudinal sebanyak 4 buah, pada sengkang sebanyak 4 buah dan 2 buah *strain gauge* dipasang pada *fiber* pada sisi samping kiri dan kanan setinggi 500 mm dari dasar kolom. Khusus untuk kolom original dipasang 2 buah strain gauge untuk beton dengan posisi yang sama seperti penempatan *strain gauge fiber*. Pemasangan strain gauge dapat dilihat pada gambar 5a.

LVDT dipasang untuk memonitor besarnya peralihan dan rotasi pada daerah yang ditinjau selama pengujian. Jumlah keseluruhan LVDT untuk pengujian adalah 18 buah dengan posisi masing-masing 8 buah diletakkan pada zona sendi plastis, 2 buah dibagian tengah tinggi efektif kolom, 2 buah diatas dan 6 buah dibawah sebagai kontrol alat bantu pelat baja bagian bawah. Pemasangan LVD pada benda uji dapat dilihat seperti pada gambar 5b.

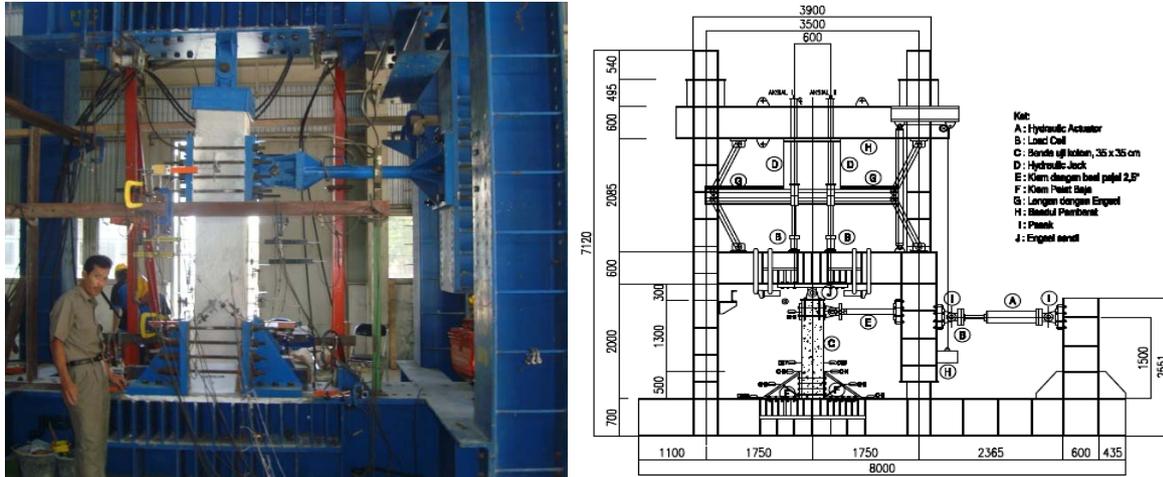


Gambar 5. (a) Pemasangan Strain gauge dan (b) Setting Up LVDT

Test Setup

Pelaksanaan pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji kolom berdiri tegak pada 2 (dua) buah rangka baja (*loading frame*) yang diletakkan diatas 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. Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian adalah *loadcell*, *hydraulic*

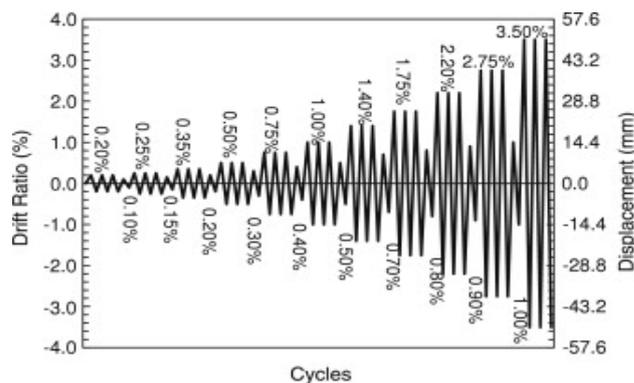
jack, hydraulic actuator, pompa hidrolis, strainmeter dan 18 buah LVDT. Load cell yang digunakan sebanyak 3 buah yang masing-masing diletakan pada kepala kolom sebanyak 2 buah yang berfungsi sebagai pembaca beban aksial dan 1 buah load cell diletakan pada samping kolom yang berfungsi sebagai pembaca beban siklik. Test Setup pengujian ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Test Setup

Pola Pembebanan

Besar beban aksial yang bekerja adalah konstan sebesar 748 kN dan dilakukan variasi untuk beban lateral siklik dengan metode *displacement control*. Pola pembebanan mengacu pada ACI 374.1-05 [4] dengan rasio drift Δ/L ($\times 10^2$) : 0,2; 0,25; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,4; 1,75; 2,20; 2,75; 3,5 dan seterusnya. Pola pembebanan dapat dilihat seperti gambar 7. Pengujian dihentikan saat terjadi kegagalan specimen (*failure*). Pada benda uji C-1RC, untuk memberi kerusakan pada benda uji pengujian dihentikan pada drift 2,2 % selanjutnya benda uji dilakukan retrofiting dengan cara grouting dan injeksi dan setelah umur memenuhi dilanjutkan lagi proses pengujian sampai benda uji hancur.

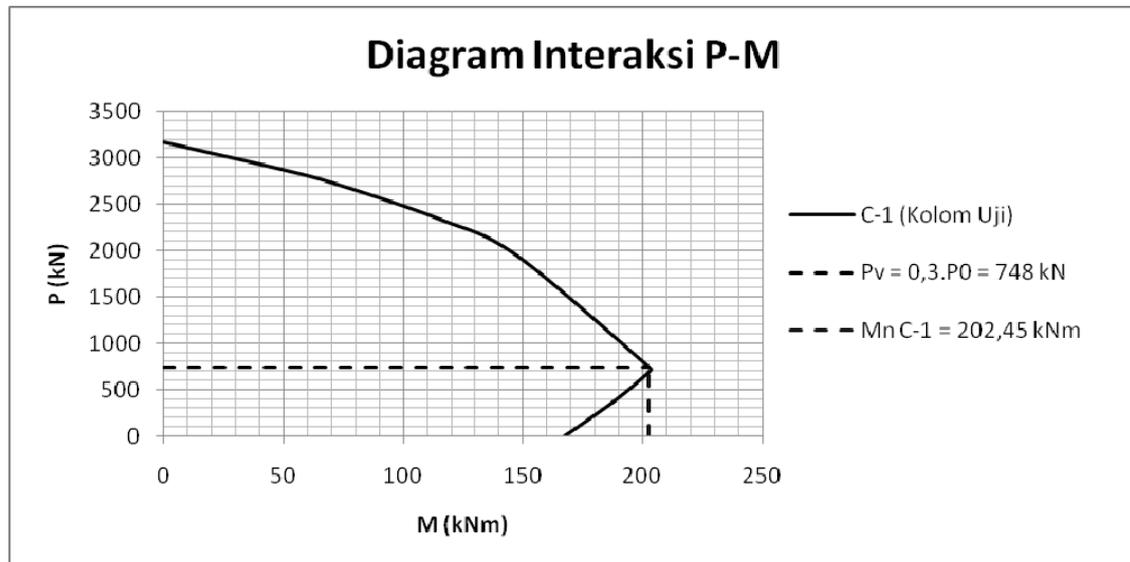


Gambar 7. Pola pembebanan

PEMBAHASAN

Kekuatan Kolom Teoritis

Perhitungan analisa kekuatan kolom teoritis untuk masing-masing benda uji diperoleh dari perhitungan diagram interaksi P-M seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar8. Diagram Interaksi Benda Uji

Dari diagram interaksi maka diperoleh kapasitas kekuatan teoritis untuk masing-masing benda uji sebagai berikut:

Tabel 4. Perhitungan Beban Rencana

Nilai	Original Column
C (mm)	164
Pv (kN)	748
e (mm)	250
Mn (kNm)	202,45
Ph (kN)	185,73

Dimana :

- C = Lebar bidang tekan
- Pv = Beban/Gaya aksial
- e = Eksentrisitas
- Mn = Momen nominal
- Ph = Beban/Gaya lateral

Beban vertikal direncanakan konstan sebesar 748 kN hal ini sebagai simulasi beban sendiri bangunan dan beban hidup yang bekerjapada suatu struktur bangunan. Beban vertikal diambil 30% dari beban nominal yang direpresentasikan pada kolom tengah bangunan (*intermediate column*). Kekuatan kolom ditunjukkan oleh kapasitas

beban horizontal (P_h) dan momen yang secara teoritis diperoleh P_h sebesar 185,73 kN dan momen nominal kolom secara teoritis diperoleh 202,45 kN.m.

Hasil Eksperimental

Retak Awal, Spalling dan P_{maks}

Pada kolom C-1 retak awal terjadi pada beban lateral sebesar 226,4 kN di drift rasio 1,4%. *Spalling* kolom terjadi pada saat beban mencapai 250,1 kN drift rasio 2,75% yang menyebabkan tulangan longitudinal terlihat dengan jelas. P_{maks} terjadi pada beban lateral 288,0 kN drift rasio 3,50%. Kerusakan kolom C-1 paling parah terjadi pada zona sendi plastis sampai ketinggian 600 mm di atas penjepit (pondasi) 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 9.



Gambar 10. Kerusakan lentur kolom C-1

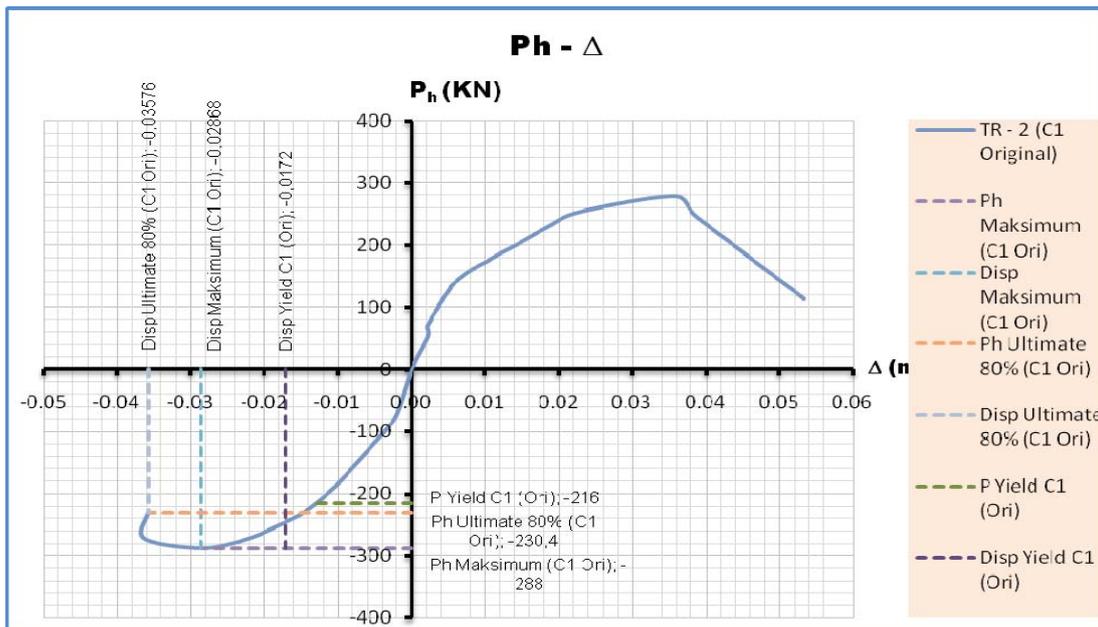
Tabel 5 memberikan data beban saat terjadi retak awal, *spalling* dan beban maksimum. Beban saat terjadi retak awal, *spalling* dan beban maksimum kolom diperoleh dari hasil uji aksial-siklik.

Tabel 5. Kolom uji mengalami retak awal, *spalling* dan P_{max}

Kolom Uji	Beban (kN)		
	Retak Awal/Drift	Spalling/Drift	P_{max} /Drift
C-1	-226,4 kN/1,4%	-250,1 kN/2,75%	-288,0 kN/3,5 %

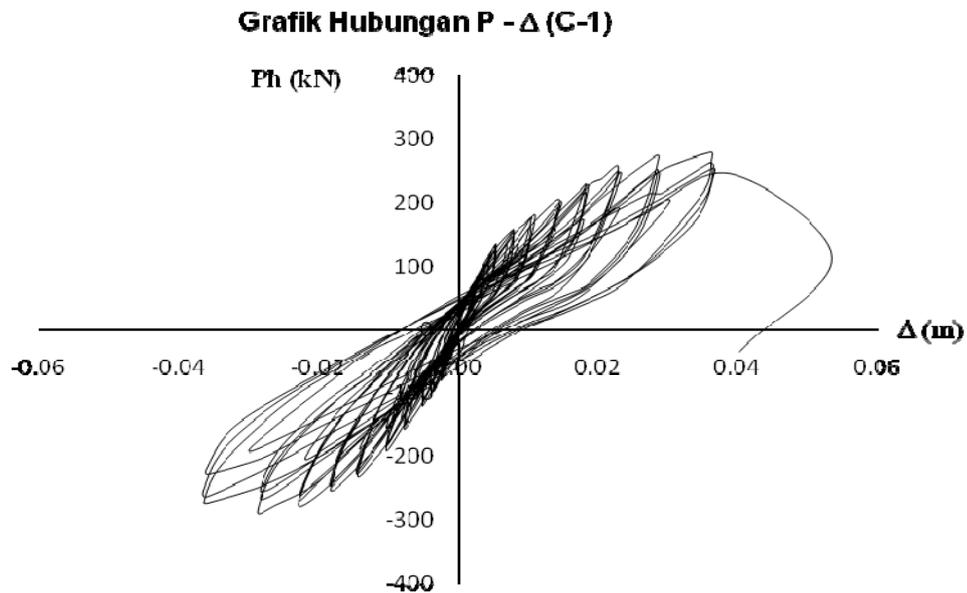
Daktilitas dan Grafik Hubungan $P - \Delta$

Untuk mengukur daktilitas digunakan 2 (dua) parameter yaitu daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) dan daktilitas curvature ($\mu\phi$). Pada pembahasan ini parameter yang digunakan adalah daktilitas perpindahan. Nilai Ultimate diperoleh dari data pengujian pada saat beban ultimate dan leleh diperoleh dari data saat baja tulangan mengalami leleh pertama kali. Nilai-nilai daktilitas untuk kolom C-1 dapat digambarkan dengan grafik skeleton sebagai berikut (gambar 11):



Gambar 11. Grafik Sekeleton Hubungan P - Δ

Dari hasil eksperimen diperoleh nilai daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) untuk C-1 sebesar 2,71. Sedangkan hubungan Beban dan Lendutan pada kolom dapat diberikan dengan gambar 12 sebagai berikut:



Gambar 12. Grafik Hubungan P – Δ kolom C-1

KESIMPULAN

Dari analisa teoritis diagram interaksi diperoleh nilai P_h (kapasitas beban lateral) sebesar 185,73 kN momen nominal kolom secara teoritis diperoleh 202,45 kN.m sedangkan dari hasil ekperimental diperoleh $P_{h \text{ maks}}$ sebesar 288,0 kN sehingga diperoleh momen nominal sebesar 316,8 kN.m. Nilai Daktilitas kolom diperoleh setelah benda uji dilakukan pengujian siklik dan hasil pengujian dilakukan analisis. Daktilitas perpindahan ($\mu\Delta$) kolom uji C-1 sebesar 2,71, sehingga kolom termasuk daktail parsial.

DAFTAR PUSTAKA

- Krisnamurti. “*Metode Analisis Struktur Akibat Beban Gempa*” Jember University Press, Jember, 2009
- Mander, J.B., Priestly, M.J.N., and Park, R., “*Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*”, *Jornal of Structural Engineering, ASCE*, V. 114, No. 8, August 1988, pp. 1804-1826
- McCormac, Jack. “*Desain Beton Bertulang*” Jilid 1 Edisi Kelima, Penerbit Erlangga, 2003
- Park, R and Paulay, T. “*Reinforced Concrete Structures*” John Wiley and Sons, Canada, 1975
- Sheikh, S., A., and Li, Y. “*Design of FRP Confinement for Square Concrete Columns*” *Engineering Structures*, 2006
- Tim Revisi Peta Gempa Indonesia (2010) “*Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*” Bandung.
- Watanabe, K, Niwa, J, Yokota, H and Iwanami, M. “*Stress-Strain Relationship for the Localized Compressive Failure Zone of Concrete under Cyclic Loading*”