

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Studi Eksperimental Penggunaan Pen-Binder dan FRP sebagai Perkuatan Tulangan Tidak Standar pada Kolom Lingkaran

Anang Kristianto

Program Studi Teknik Sipil U.K. Maranatha, Jl. Suria Sumantri 65 Bandung
E-mail: anang.kristianto@gmail.com

Yosafat Aji Pranata

Program Studi Teknik Sipil U.K. Maranatha, Jl. Suria Sumantri 65 Bandung
E-mail: yosafat.ap@gmail.com

Iswandi Imran

Program Studi Teknik Sipil ITB, Jl. Ganesha No. 10 Bandung
E-mail: iswandiimran@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi peningkatan kekuatan yang terjadi pada spesimen kolom lingkaran beton bertulang dengan tulangan pengekat tidak standar yang diberi perkuatan pen-binder dan perkuatan FRP. Benda uji berupa kolom lingkaran dengan diameter 190 mm dan tinggi 480 mm dengan mutu beton 15 MPa. Benda uji terdiri dari 4 jenis yaitu kolom dengan tulangan sengkang spiral, kolom dengan tulangan tidak standar/lingkaran, kolom dengan tulangan tidak standar yang diberi perkuatan pen-binder dan kolom dengan tulangan tidak standar dengan perkuatan FRP. Untuk setiap jenis kolom dibuat 3 buah benda uji yang sama. Pengujian dilakukan dengan uji tekan konsentris hingga kolom mengalami kegagalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pen-binder dan FRP pada tulangan pengekat tidak standar memberikan peningkatan kapasitas aksial berturut-turut sebesar 18% dan 58% dari kolom dengan tulangan spiral. Pen-binder dapat digunakan sebagai solusi perkuatan sederhana untuk tulangan pengekat tidak standar dan lebih ekonomis daripada FRP.

Kata-kata Kunci: Perkuatan, kolom, FRP, pen-binder, daktilitas.

Abstract

This study was conducted to evaluate the increasing strength of circular reinforced concrete column specimens with non-compliance confinement reinforcements strengthened by pen-binder and FRP. The test specimens were circular column 190 mm diameter and 480 mm height with 15 MPa concrete strength. The test specimens consist of 4 types of columns where there is a column with spiral reinforcement, columns with non-compliance reinforcements, a column with non-compliance reinforcement strengthened by pen-binder and columns with non-compliance reinforcements strengthened with FRP reinforcement. Three specimens were made for each type of column. The axial concentric test was done until the column specimen failure. Test results showed that the use of pen-binder and the FRP with non-compliant confining reinforcement improved axial capacity by 18% and 58% respectively as compared to the columns with spiral reinforcements. Pen-binder can be used as a simple solution for non compliant confining reinforcement strengthening and more economical than FRP.

Keywords: Strengthening, column, FRP, pen-binder, ductility.

1. Pendahuluan

Berbagai kejadian gempa dalam beberapa tahun terakhir yang melanda beberapa daerah di Indonesia memperlihatkan bahwa Indonesia merupakan negara yang memiliki daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi. Kondisi ini menyebabkan sistem struktur yang dibangun di Indonesia harus mengikuti kaidah bangunan tahan gempa sehingga pada saat terjadi gempa, struktur dapat bertahan dan melindungi penghuninya dari resiko bahaya gempa. Selain itu untuk struktur eksisting yang telah mengalami kerusakan akibat beban gempa diperlukan perkuatan khusus agar bangunan masih dapat berfungsi sebagaimana mestinya di dalam menahan beban gravitasi dan beban gempa yang kemungkinan akan terjadi lagi.

Perkuatan adalah salah satu alternatif yang dapat diberikan untuk memperbaiki kinerja struktur sehingga pada saat mengalami beban berlebih baik akibat beban gempa maupun beban tambahan lainnya masih dapat berperilaku baik dan sesuai standar yang berlaku. Perkuatan dapat dilakukan pada struktur elemen balok, kolom maupun pelat lantai. Salah satu perkuatan yang penting dalam struktur rangka yang biasa digunakan untuk gedung maupun rumah tinggal adalah perkuatan kekangan pada kolom di daerah yang berpotensi terjadi sendi plastis pada saat beban gempa terjadi. Perkuatan tulangan pengekat/transversal kolom pada struktur eksisting tidaklah mudah dalam pelaksanaannya mengingat adanya balok dan pelat lantai yang sudah dibangun sehingga pemasangan tulangan pengekat pada lingkaran kolom tidak dapat dilakukan dalam bentuk spiral. Untuk mengatasi hal tersebut biasanya

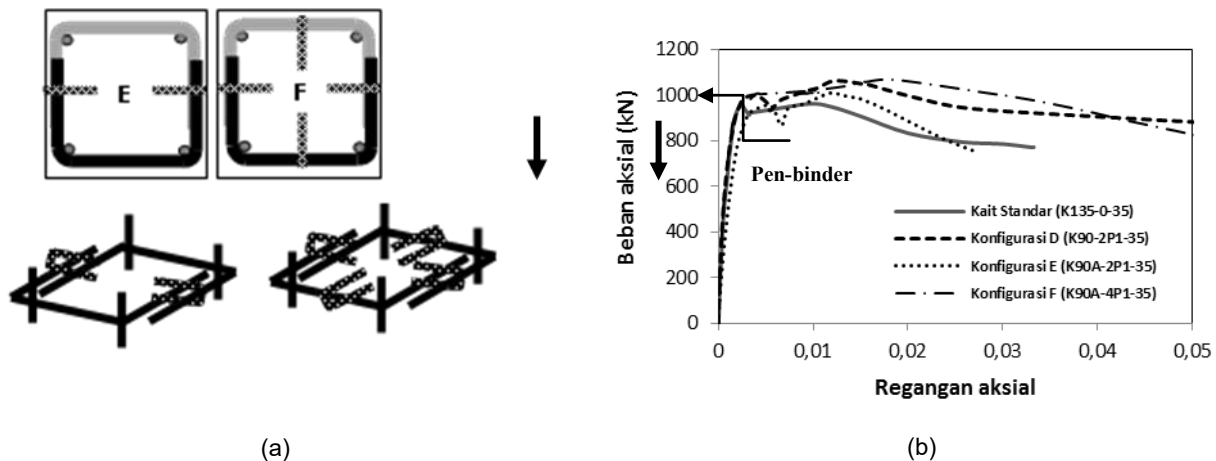
digunakan beberapa metoda perkuatan yang pada umumnya belum teruji di laboratorium perilakunya.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan (Kristianto, dkk., 2012) untuk kolom beton bertulang persegi yang diberi perkuatan dengan menggunakan pen-binder. Pengujian eksperimental penggunaan pen-binder pada kolom persegi dengan beban aksial konsentris memberikan hasil yang memuaskan, dimana penggunaan pen-binder sebagai perkuatan memberikan kapasitas aksial serta daktilitas yang lebih baik dari kolom dengan tulangan pengekan yang memiliki kait standar (ditekuk 135^0) seperti terlihat pada grafik **Gambar 1** berikut.

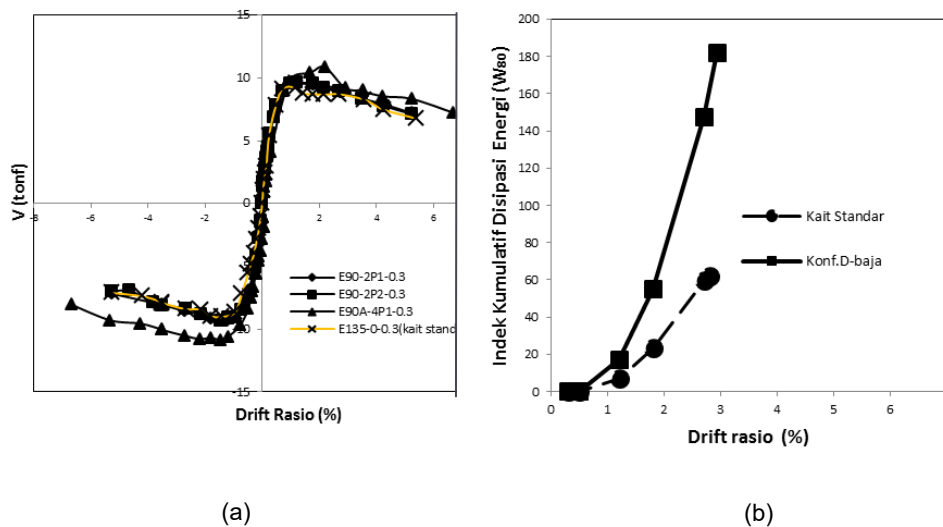
Selain itu pengujian dengan beban aksial dan lateral siklis terhadap kolom beton bertulang persegi yang diberikan perkuatan pen-binder (Kristianto, dkk., 2011) juga memberikan hasil yang memuaskan. Pada Level beban aksial $0.3P_o$ terjadi peningkatan nilai daktilitas perpindahan sebesar 19.5% dibandingkan dengan penggunaan tulangan pengekan standar. Pada

beban aksial yang lebih tinggi sebesar $0.5P_o$ penggunaan pen-binder memberikan peningkatan daktilitas perpindahan sebesar 67.6% (**Gambar 2**). Dari hasil rangkaian pengujian aksial konsentris serta aksial dan lateral siklis dapat disimpulkan bahwa penggunaan pen-binder sebagai perkuatan tulangan pengekan menghasilkan kemampuan yang baik dan memenuhi standar dalam elemen struktur kolom yang berfungsi menahan beban lateral atau dalam hal ini adalah beban gempa.

Makalah ini memaparkan studi ekperimental penggunaan perkuatan pen-binder pada kolom lingkaran beton yang diberi tulangan pengekan tidak standar yaitu bebentuk lingkaran (gabungan dari 2x setengah lingkaran). Untuk keperluan perbaikan kolom eksisiting yang berbentuk lingkaran, tidak memungkinkan penggunaan spiral, alternatif yang memungkinkan adalah penggunaan tulangan berbentuk setengah lingkaran yang digabungkan dengan pasanganya dan diberi perkuatan pen-binder.



Gambar 1. (a) Konfigurasi pemasangan pen-binder pada kolom persegi (b) Hasil pengujian penggunaan pen-binder sebagai perkuatan tulangan pengekan pada kolom persegi (Kristianto, dkk., 2012)



Gambar 2. (a) Grafik hubungan beban lateral dan drift rasio (b) Indeks kumulatif disipasi energi penggunaan pen-binder pada level beban aksial $0.5 P_o$ serta beban siklis (Kristianto, dkk., 2011)

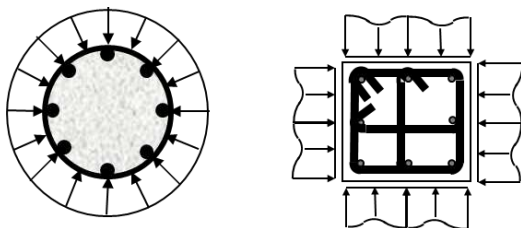
2. Tinjauan Pustaka

Pengekangan material beton dalam hal ini dapat dihasilkan melalui pemasangan tulangan spiral atau sengkang tertutup yang rapat, yang melingkupi penampang beton yang ingin dikekang. Pengekangan tersebut menyebabkan termobilisasinya tegangan tekan lateral pada saat beton menahan beban tekan aksial, sehingga timbul kondisi tegangan tekan tiga arah atau, dalam batas-batas tertentu, tegangan tekan triaksial simetris. Dalam bentuk tegangan uniaksial dan tegangan lateral maka hubungan tegangan pada beton terkekang (f'_{cc}) dan tidak terkekang (f'_{co}) dapat diberikan secara umum sebagai berikut :

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_l f_l \quad (1)$$

k_l merupakan koefisien yang menunjukkan variasi dari nilai tegangan lateral (f_l) yang bekerja dan nilainya dapat ditentukan berdasarkan eksperimen. Richart, *et al.* (1928) yang telah melakukan eksperimen pada benda uji silinder dengan berbagai level tegangan lateral fluida dan juga menggunakan tulangan spiral (Richart, *et al.*, 1929) mendapatkan nilai 4,1 untuk k_l . Nilai ini dilaporkan memberikan korelasi yang baik untuk pengekangan dengan tulangan spiral, sehingga persamaan diatas dengan nilai $k_l=4,1$ menjadi dasar perhitungan untuk kebutuhan tulangan pengekangan seperti yang digunakan pada standar ACI 318M-05 dan SNI 2847:2013 hingga saat ini. Nilai tegangan beton tidak terkekang (f'_{co}) adalah nilai kekuatan beton tanpa tulangan akibat beban konsentris dari spesimen dengan ukuran geometri yang sama, sehingga diperlukan suatu faktor modifikasi apabila menggunakan data kekuatan tekan dari benda uji silinder. Berdasarkan penelitian beberapa literatur nilai modifikasi berkisar antara 0,85 hingga 1,0.

Hubungan beton terkekang dengan tegangan lateral dalam **Persamaan (1)** hanya valid untuk tegangan lateral yang seragam. Penggunaan pengekat spiral yang cukup rapat dapat menghasilkan aksi kekangan lateral pasif yang mendekati seragam, sementara untuk sengkang tertutup pada kolom persegi cenderung menghasilkan aksi kekangan lateral yang tidak seragam. Beberapa pengujian menunjukkan bahwa kekangan tulangan spiral pada kolom lingkaran lebih efektif daripada sengkang tertutup pada kolom persegi. Pada umumnya aksi kekangan lateral tertinggi kolom persegi berada pada daerah sudut dan pada titik yang terpasang tulangan pengikat silang (Saatcioglu and Razvi, 1992), semakin jauh dari posisi ini akan menghasilkan aksi kekangan lateral yang semakin menurun. (**Gambar 3**)



Gambar 3. Efektifitas aksi kekangan lateral pada pengekat spiral dan persegi

Tulangan pengekat dipasang dengan maksud agar pada saat terjadi *spalling* pada selimut beton, kolom tidak akan kehilangan kekuatan aksialnya. Sehingga prinsip yang digunakan dalam SNI 2847:2013 (Pasal 21.6.4.4) dan ACI 318 (Chapter 21.4.4, Commentary R21.4.4, Transverse Reinforcement) adalah luas tulangan sengkang tertutup atau spiral yang terpasang harus mampu meningkatkan kuat tekan inti kolom sedemikian hingga peningkatan tersebut dapat mengkompensasi berkurangnya daya dukung kolom dengan lepasnya selimut beton. Bila kekuatan kolom sebelum selimut terkelupas adalah :

$$P_0 = 0,85 \cdot f'_c \cdot (A_g - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (2)$$

dan kekuatan kolom setelah selimut terkelupas adalah :

$$P_1 = f_1 \cdot (A_{ch} - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \quad (3)$$

dimana A_g = luas penampang total, A_{st} = luas total tulangan longitudinal, A_{ch} = luas penampang setelah selimut terkelupas, f_1 = kuat tekan setelah kekangan bekerja, f_y = mutu tulangan longitudinal. Sesuai dengan konsep bahwa diharapkan kekuatan kolom minimum sama sebelum dan sesudah selimut lepas maka $P_0 = P_1$. Sehingga ACI 318M-05 maupun SNI 2847:2013 menetapkan rasio volumetrik minimum tulangan transversal untuk kolom lingkaran sebesar :

$$\rho_s = 0,45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (4)$$

untuk kasus kolom yang berdiameter besar, rasio A_g/A_c nilainya mendekati 1 sehingga rasio volumetrik minimum diberikan sebesar :

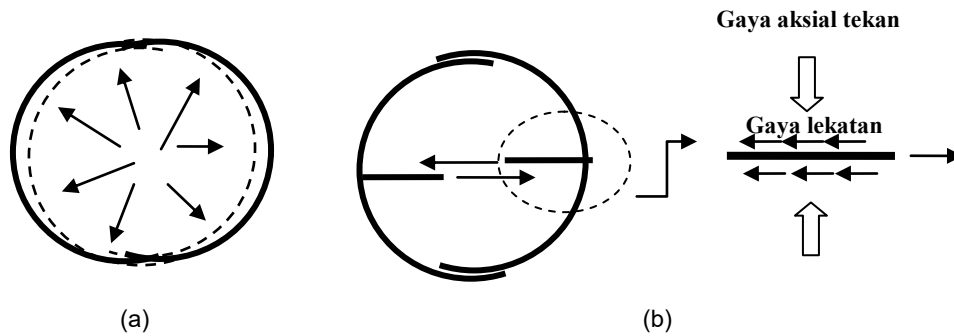
$$\rho_s = 0,12 \cdot \frac{f'_c}{f_{yh}} \quad (5)$$

3. Konsep Perkuatan dengan Pen-Binder dan FRP

3.1 Perkuatan dengan pen-binder

Pemasangan perkuatan tulangan pengekat pada kolom lingkaran dengan menggunakan tulangan 2x setengah lingkaran merupakan salah satu contoh tulangan pengekat yang memerlukan elemen pengikat agar pada saat beban aksial dan lateral bekerja tidak mengakibatkan kegagalan kolom karena hancurnya inti beton. Elemen pengikat atau pen-binder ini harus bekerja sedemikian rupa sehingga memiliki kemampuan untuk menahan titik-titik tertentu yang akan membuka akibat ekspansi lateral inti beton. **Gambar 4** memperlihatkan ilustrasi konsep pen-binder sebagai elemen pengikat tulangan pengekat yang dipasang pada sengkang lingkaran.

Pemasangan pen-binder pada posisi tertentu seperti dalam ilustrasi **Gambar 4(b)** mengikat tulangan pengekat sehingga sengkang tidak bergeser seperti pada **Gambar 4(a)**. Pen-binder memanfaatkan gaya aksial yang mengekang inti beton dalam arah longitudinal dengan mengembangkan kapasitas lekatannya sehingga membantu menahan tulangan pengekat menahan ekspansi lateral beton. Semakin besar gaya aksial yang



Gambar 4. Ilustrasi konsep pen-binder sebagai elemen pengikat (a) Pengekan lingkaran tanpa pen-binder (b) Pengekan lingkaran yang diberi pen-binder

bekerja pada kolom, semakin besar kapasitas pen-binder dalam menahan tulangan pengekan agar tetap pada posisinya, hal ini dibuktikan dalam penelitian sebelumnya untuk kolom persegi yang menggunakan beban aksial sebesar 0.3 Po dan 0.5 Po (Kristianto, dkk., 2011). Penggunaan pen-binder memberikan alternatif perkuatan yang relatif mudah dalam pemasangannya serta biaya yang tidak tinggi.

3.2 Perkuatan dengan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*)

FRP adalah material yang terbuat dari serat mutu tinggi yang dibuat di pabrik. Beberapa keuntungan penggunaan material FRP sebagai bahan perkuatan struktural adalah memiliki berat yang ringan, tahan terhadap korosi serta mudah dan cepat dalam pemasangannya. Pada mulanya dikembangkan untuk pesawat terbang tetapi hingga saat ini telah berkembang penggunaannya sebagai material untuk perkuatan elemen struktur bangunan. Keuntungan penggunaan FRP untuk keperluan perkuatan eksisting struktur diantaranya adalah meningkatkan kapasitas beban aksial, lentur dan geser, memberikan kemampuan daktilitas untuk meningkatkan kinerja elemen kolom dan balok dalam menerima beban gempa, meningkatkan usia fatiq, meningkatkan keawetan menghadapi kondisi lingkungan.

Penggunaan FRP pada kolom untuk perkuatan pengekan memberikan peningkatan kapasitas aksial yang tinggi. ACI (ACI Committe 440, 2002) memberikan rekomendasi perhitungan kapasitas aksial nominal dari kolom lingkaran dengan tulangan spiral sebagai berikut :

$$P_n = 0.85\phi[0.85f'_c\psi_f(A_g - A_{st}) + A_{st}f_y] \quad (6)$$

dimana

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f_l}{f'_c}} - 2 \frac{f_l}{f'_c} - 1.25 \right] \quad (7)$$

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f E_f \varepsilon_{fe}}{2} \quad (8)$$

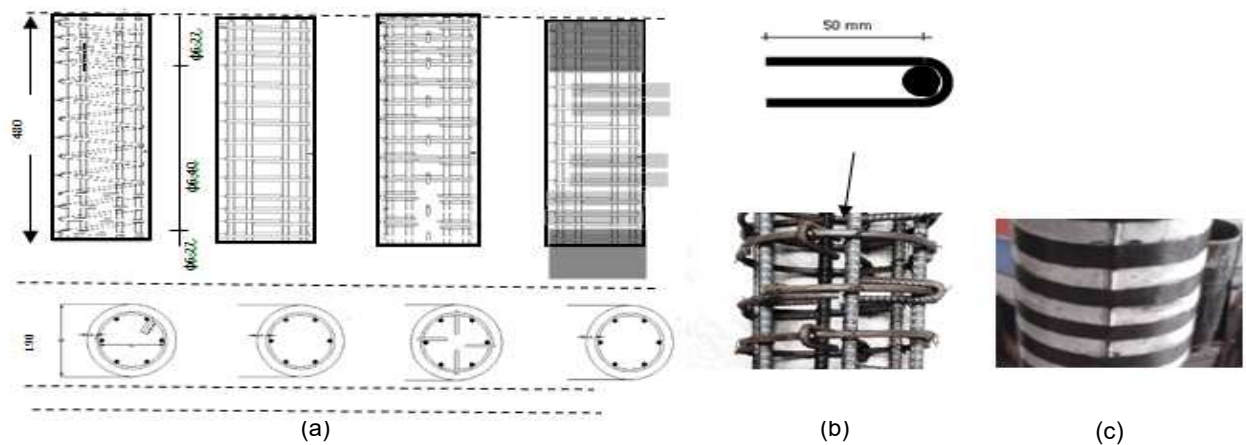
$$\rho_f = \frac{4nt_f}{h} \quad (9)$$

ϕ = faktor reduksi kolom, ψ_f = faktor reduksi tambahan, A_g = Luas netto, A_{st} = luas tulangan, f_y = mutu baja tulangan longitudinal, f'_c = mutu beton tak terkekang, f'_{cc} = mutu beton terkekang, f_l = tegangan kekangan akibat FRP, κ_a = faktor efisiensi bentuk penampang kolom (untuk kolom lingkaran $\kappa_a = 1$), ρ_f = rasio perkuatan FRP, E_f = modulus elastisitas FRP, ε_{fe} = regangan fraktur efektif ($= 0.004 \leq 0.75\varepsilon_{fu}$, ε_{fu} = regangan ultimate FRP), h = diameter kolom, t_f = tebal FRP, n = jumlah lapisan FRP. Penggunaan FRP sebagai perkuatan merupakan suatu alternatif lain perkuatan elemen struktur yang mudah dalam pelaksanaannya tetapi secara ekonomis memerlukan biaya yang relatif tinggi.

4. Program Pengujian Aksial

4.1 Benda uji

Untuk keperluan penelitian ini digunakan 16 benda uji kolom beton bertulang dengan diameter 190 mm dan tinggi 480 mm, mutu beton yang digunakan adalah 15 MPa. Untuk seluruh kolom digunakan tulangan longitudinal 6D10, dan tulangan pengekan polos diameter 6 mm (**Gambar 5**), untuk pen-binder digunakan tulangan ulir diameter 8 mm. Tulangan pengekan terdiri dari 4 jenis yaitu: kolom dengan tulangan pengekan standar/spiral, kolom dengan tulangan pengekan tidak standar/lingkaran, kolom dengan tulangan pengekan tidak standar yang diberi perkuatan pen-binder, serta kolom dengan tulangan pengekan tidak standar yang diberi perkuatan FRP. Untuk masing-masing jenis tulangan pengekan dibuat 3 buah benda uji kolom sehingga total benda uji berjumlah 12 buah. Tulangan longitudinal dan pen-binder menggunakan mutu 410 MPa, tulangan pengekan/sengkang digunakan mutu 240 MPa. Pada jarak 100 mm dari masing-masing ujung benda uji kolom diberikan jarak sengkang yang lebih rapat sebesar 27 mm untuk menghindari kegagalan pada daerah ini. Setelah 100 mm dari masing-masing ujung kolom merupakan daerah pengujian (tinggi 280 mm) digunakan jarak sengkang 40 mm, atau rasio volumetrik $\rho_s = 0.01127$. Nilai rasio volumetrik ini diatas persyaratan rasio volumetrik minimum sebesar 0.009. Kegagalan yang diharapkan dari pengujian aksial konsentris ini adalah lelehnya tulangan longitudinal dilanjutkan dengan tekuk yang membuat tulangan pengekan terbuka atau putus.



Gambar 5. Gambar benda uji (a) Detail tulangan benda uji (b) Pemasangan pen-binder pada benda uji kolom (c) Pemasangan FRP pada benda uji kolom

Untuk benda uji dengan tulangan pengekuat lingkaran yang diberi perkuatan pen-binder, pemasangan pen-binder dibuat berselang-seling posisi pada setiap jarak spasi (**Gambar 5b**), jarak *overlap* sengkang lingkaran digunakan jarak minimum 75 mm. Benda uji dengan perkuatan FRP menggunakan FRP jenis Carbon yaitu FRP Nitowrap FRC 300, tebal FRP $t_f = 0,167$ mm, kuat tarik ultimate $f_u = 3800$ MPa. FRP dipasang melingkar 1 lapis menutupi kedua daerah ujung kolom sepanjang 100 mm dari ujung kolom atas dan bawah, tujuannya adalah agar tidak terjadi kegagalan pada kedua ujung kolom. Untuk perkuatan didaerah pengujian (sepanjang 280 mm) dipasang dengan lebar 25mm dengan jarak sesuai jarak pengekuat tidak standar yang diperkuat. (**Gambar 5c**). Strain gauge untuk memonitor besarnya regangan yang terjadi baik pada tulangan longitudinal maupun transversal dipasang pada lokasi tengah kolom dipasang pada salah satu tulangan longitudinal dan tulangan pengekuat.

4.2 Set up pengujian

Untuk mengukur besarnya deformasi aksial kolom digunakan LVDT yang dipasang pada daerah pengujian (sepanjang 280 mm) seperti terlihat pada **Gambar 6(a)**, data besarnya besarnya deformasi masuk ke data logger

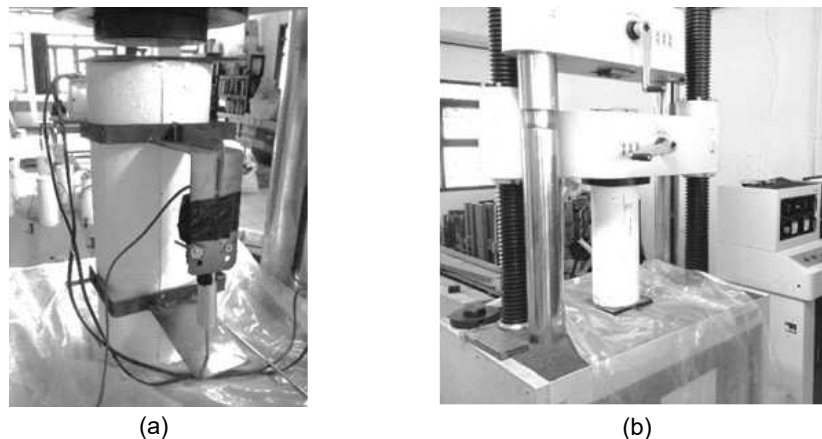
dalam bentuk file. Pengujian kolom benda uji dilakukan dengan menggunakan mesin uji UTM dengan kapasitas 100 ton seperti tampak pada **Gambar 6(b)**. Pembebanan dilakukan hingga terjadi penurunan signifikan pada kurva pembebanan. Proses pembebanan dicatat mulai dari terjadinya retakan dan terlepasnya selimut beton hingga kolom mengalami keruntuhan. Seluruh data – data pengujian yang didapat dari strain gauge, LVDT dan gaya tekan dapat juga langsung dimonitor melalui komputer.

5. Hasil Pengujian dan Analisis

Pola keruntuhan untuk benda uji kolom secara umum sama yaitu dimulai dari terjadi retak-retak rambut kemudian diikuti dengan terkelupasnya selimut beton untuk kolom dengan tulangan standar dan kolom dengan tulangan tidak standar yang diberi perkuatan pen-binder. Setelah mencapai beban puncak terjadi penurunan kapasitas aksialnya sebagai akibat lelehnya tulangan longitudinal yang akhirnya menekuk.

5.1 Pola retak dan kegagalan kolom

Gambar 7 memperlihatkan pola retak dan keruntuhan yang terjadi pada kolom lingkaran dengan tulangan standar berbentuk spiral.

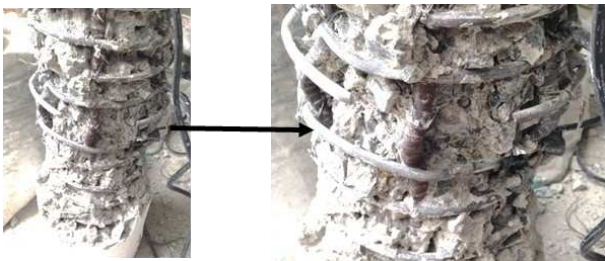


Gambar 6. Setup alat pengujian (a) Posisi LVDT pada benda uji (b) Benda uji pada UTM



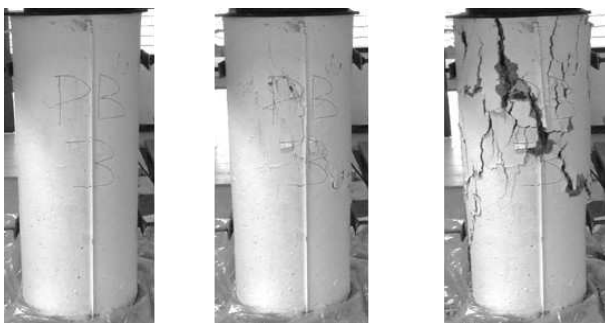
Gambar 7. Pola retak benda uji kolom lingkaran tulangan pengekan standar/spiral

Gambar pola retak memperlihatkan setelah selimut retak dan terkelupas maka tulangan spiral berfungsi dengan baik hingga akhirnya mengalami kelelahan bersama dengan tulangan longitudinal. Kegagalan yang terjadi adalah akibat menekuknya tulangan longitudinal setelah mengalami kelelahan dan dilanjutkan putusnya tulangan spiral yang membuat kapasitas aksialnya turun secara drastis. **Gambar 8** memperlihatkan detail putusnya tulangan spiral sehingga mengakibatkan tulangan longitudinal menekuk dengan cepat. Inti kolom beton terlihat masih baik sehingga sesuai dengan harapan standar penulangan spiral kolom lingkaran bahwa tulangan pengekan bertujuan menahan inti kolom sehingga mempertahankan kemampuan aksialnya sekalipun selimut beton telah mengelupas.



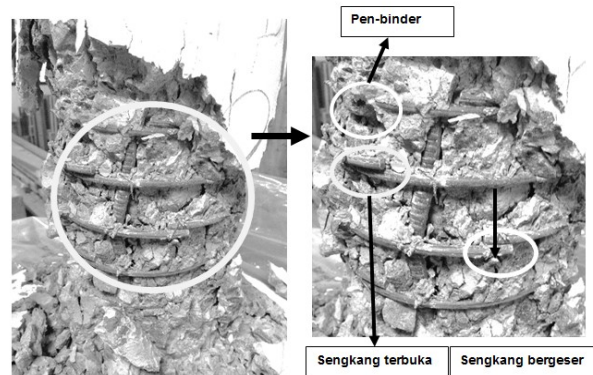
Gambar 8. Detail kegagalan tulangan pengekan standar/spiral

Gambar 9 memperlihatkan pola retak pada benda uji kolom dengan tulangan tidak standar yang diberi perkuatan pen-binder. Secara umum penggunaan pen-binder tidak memberikan pola retak yang berbeda dengan kolom yang menggunakan tulangan standar. Penggunaan perkuatan pen-binder pada tulangan pengekan yang tidak standar meningkatkan kapasitas aksialnya tetapi setelah mencapai kapasitas puncaknya keruntuhan yang terjadi bersifat getas/mendadak.



Gambar 9. Pola retak benda uji kolom lingkaran tulangan pengekan tidak standar dengan perkuatan pen-binder

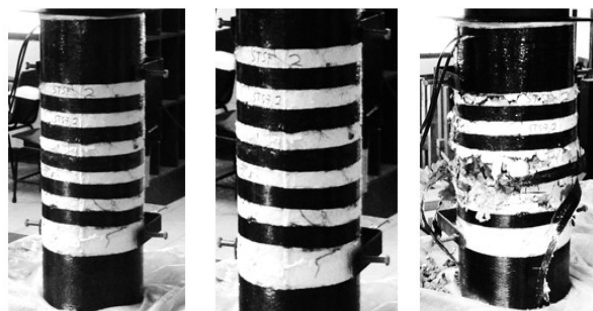
Pada saat terjadi beban aksial tulangan pengekan dapat ditahan oleh pen-binder untuk dapat berfungsi mengekan inti kolom, namun pada kondisi beban maksimum terjadi slip pada tulangan pengekan yang tidak standar ini sehingga mengakibatkan tulangan longitudinal tidak dapat mempertahankan kekakuannya (**Gambar 10**).



Gambar 10. Detail kegagalan tulangan pengekan tidak standar dengan perkuatan pen-binder

Gambar 10 menunjukkan tulangan pengekan tidak standar yang mengalami pergeseran pada akhir pengujian. Selain mengalami pergeseran terlihat juga sedikit terbuka pada saat selimut beton terkelupas. Pada kondisi ini terlihat bahwa inti kolom beton masih dapat ditahan dengan baik oleh tulangan pengekan karena pen-binder berfungsi dengan baik membantu tulangan pengekan tetap pada posisinya dalam menahan inti beton.

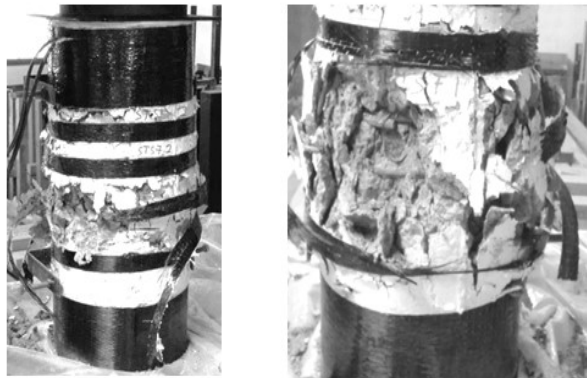
Pola retak dan kegagalan benda uji dengan perkuatan FRP diperlihatkan pada **Gambar 11**. Penggunaan FRP memberikan kekangan yang sangat baik untuk tulangan pengekan yang tidak standar. Perbedaan pola retak dengan perkuatan pen-binder serta tulangan standar adalah tidak terjadinya pengelupasan selimut beton. Kondisi ini terjadi karena serat FRP mengekan dengan baik selimut beton hingga tercapai kondisi *ultimatenya* yang ditandai dengan putusnya serat FRP. Setelah serat putus maka terjadi penurunan kekuatan aksial secara drastis sehingga terjadi kegagalan yang mendadak.



Gambar 11. Pola retak benda uji kolom lingkaran tulangan pengekan tidak standar dengan perkuatan FRP

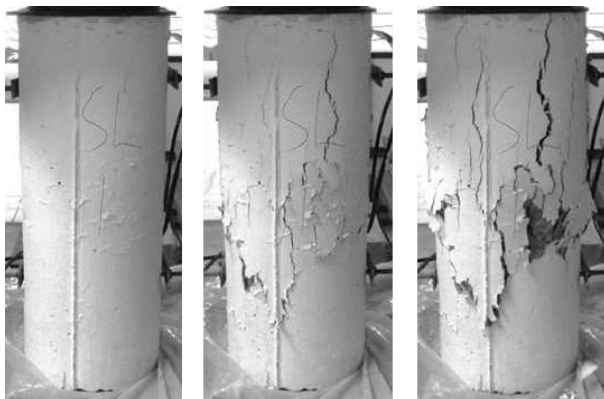
Gambar 12 memperlihatkan detail kegagalan yang terjadi benda uji dengan perkuatan FRP. Kegagalan

yang terjadi adalah mirip dengan benda uji dengan perkuatan pen-binder, hal ini terjadi karena bergesernya tulangan pengekan yang tidak standar setelah serat FRP putus dan mengakibatkan tulangan longitudinal menekuk dengan tiba-tiba karena menahan beban yang sangat besar.



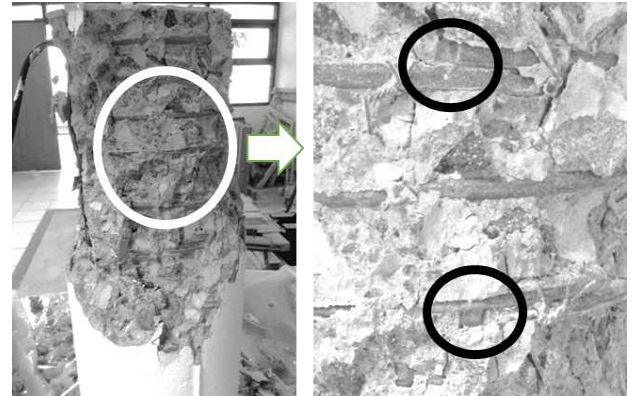
Gambar 12. Detail kegagalan tulangan pengekan tidak standar dengan perkuatan FRP

Untuk perkuatan kolom di daerah rawan gempa, kegagalan mendadak seperti ini adalah hal yang harus dihindarkan karena tidak memberikan peringatan yang memadai apabila kondisi tulangan baja sudah mencapai batas yang melebihi kekuatannya.



Gambar 13. Pola retak benda uji kolom lingkaran tulangan pengekan tidak standar

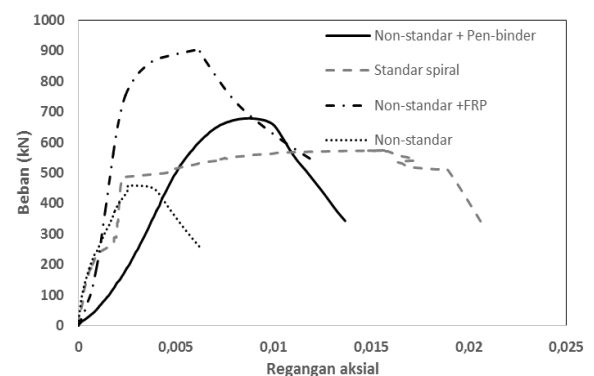
Pola retak dan kegagalan kolom dengan tulangan tidak standar (sengkan lingkaran) terlihat pada **Gambar 13** diatas. Sesuai dengan prediksi, terjadi retak dengan cepat pada daerah pengujian yaitu setelah 100 mm dari kedua ujung kolom yang merambat dengan cepat hingga kedua ujung kolom. Kegagalan terjadi karena sengkan lingkaran tidak berfungsi dengan baik seperti sengkan spiral untuk menahan inti beton pada posisinya ketika beban aksial terjadi. Tanpa pemasangan pen-binder maka sengkan tidak standar yang berbentuk dari gabungan setengah lingkaran akan mengalami pergeseran ketika timbul aksi lateral dari inti kolom akibat beban aksial tinggi yang bekerja, hingga akhir pengujian sengkan tidak standar hanya mengalami pergeseran saja, tidak sampai mengalami putus seperti sengkan spiral. **Gambar 14** memperlihatkan detail tulangan tidak standar yang bergeser pada saat keruntuhannya.



Gambar 14. Detail kegagalan tulangan pengekan tidak standar

5.2 Deformasi dan kapasitas aksial

Perilaku beban dan regangan keempat jenis kolom benda uji pada saat menerima beban aksial diperlihatkan pada **Gambar 15**. Data beban didapat dari data rekaman aktuator yang bekerja, sementara data regangan aksial merupakan data deformasi aksial yang tercatat dari LVDT dibagi dengan panjang daerah pengukuran (280 mm). Penggunaan sengkan tidak standar memberikan kapasitas dan deformasi aksial yang paling kecil, hal ini sesuai dengan kegagalan yang terjadi seperti terlihat pada gambar sebelumnya yaitu terbukanya pengekan tidak standar/lingkaran setelah beban puncak tercapai. Penggunaan pen-binder sanggup meningkatkan kapasitas aksial kolom bahkan melampaui kapasitas aksial dari benda uji kolom dengan tulangan standar/spiral. Meskipun sanggup berdeformasi hingga regangan yang cukup tinggi penggunaan pen-binder memberikan kegagalan yang lebih getas daripada benda uji dengan tulangan spiral. Penggunaan FRP meningkatkan dengan signifikan kapasitas aksial kolom, terlihat pada grafik bahwa penggunaan FRP dapat meningkatkan kapasitas aksial hampir dua kali lipatnya dari kolom dengan pengekan standar, yang menjadi persoalan adalah kemampuan deformasi aksial dari kolom dengan perkuatan FRP adalah kegagalan yang bersifat getas pada regangan yang relatif kecil.



Gambar 15. Kurva beban dan regangan aksial pengujian kolom lingkaran

Tabel 1 memberikan gambaran yang lebih detail mengenai kapasitas dan deformasi aksial untuk masing-

masing benda uji. Data yang didapat merupakan rata-rata dari ketiga buah bendah uji dalam satu jenis yang sama. **Kolom [2]** adalah perhitungan teoritis kapasitas aksial kolom dengan beban konsentris (P_0) tanpa faktor reduksi, pada **Kolom [3]** ditunjukkan nilai beban puncak yang terjadi pada masing-masing tipe benda uji. Untuk kolom dengan tulangan spiral standar perbandingan nilai eksperimen dan teoritis **Kolom [6]** cukup mendekati. Penggunaan tulangan pengekat tidak standar memberikan penurunan kapasitas aksial sebesar 16%, sementara penambahan pen-binder memberikan peningkatan kapasitas aksialnya sebesar 24% dari perhitungan teoritisnya. Penggunaan FRP untuk perkuatan tulangan tidak standar memberikan peningkatan sebesar 65% terhadap hitungan teoritisnya. Perbandingan dengan kolom standar/tulangan spiral terlihat pada **Kolom [7]**. Perkuatan pen-binder dan FRP memberikan kenaikan kapasitas aksial kolom berturut-turut sebesar 18% dan 58% dari kolom dengan tulangan standar. **Kolom [4]** adalah regangan aksial kolom yang terjadi pada saat tulangan longitudinal mengalami leleh, data lelehnya tulangan longitudinal didapat dari pencatatan strain gauge yang dipasang pada tulangan longitudinal. **Kolom [5]** adalah regangan yang terjadi pada saat beban mencapai nilai 0.85 dari nilai maksimumnya setelah melewati beban puncak. **Kolom [8]** adalah nilai daktilitas dari masing-masing benda uji. Kolom standar memiliki daktilitas paling tinggi karena bentuk spiral memiliki kekuatan pengekatkan tidak hanya arah lateral tetapi juga arah longitudinal kolom.

Pada kolom spiral efektifitas kekangan sangat baik sehingga kolom dapat mempertahankan kapasitas aksialnya hingga regangan yang tinggi. Putusnya tulangan pengekat pada saat kegagalannya memperlihatkan kekangan bekerja efektif hingga kondisi ultimatenya. Perkuatan pen-binder pada tulangan tidak standar memang memberikan peningkatan kapasitas aksial tetapi daktilitas yang dihasilkan tidak sebaik kolom standar dengan tulangan spiral, namun bila dibandingkan dengan kolom tidak standar tanpa perkuatan maka pemberian perkuatan pen-binder memberikan kontribusi juga pada kemampuan daktilitas selain kapasitas aksialnya. Selain hal tersebut adalah masalah kemudahan dalam pelaksanaannya di lapangan pada struktur kolom eksisting, penggunaan tulangan spiral hanya bisa dilaksanakan pada kolom baru, penggunaan sengkang tidak standar dengan perkuatan pen-binder memberikan solusi pemasangan yang mudah untuk perkuatan kolom.

Penggunaan FRP memberikan peningkatan kapasitas aksial yang signifikan namun nilai daktilitas yang dihasilkan masih lebih rendah dari kolom dengan tulangan pengekat standar. Pada standar ACI 440.2R-2 digunakan faktor reduksi yang cukup besar untuk mengantisipasi terjadinya keruntuhan tiba-tiba, sehingga untuk kolom diatas kapasitas aksial maksimum teoritis yang dapat digunakan dengan perkuatan FRP secara penuh pada seluruh kolom sesuai dengan **Persamaan (6)** adalah tanpa faktor reduksi ϕ dan ψ_f adalah sebesar $P_0 = 744.3 \text{ kN}$. Nilai teoritis ini hanya memberikan peningkatan kapasitas sebesar 35.7% terhadap kolom spiral, sementara hasil eksperimen memperlihatkan perbedaan 57.9% lebih tinggi dari kapasitas aksial tulangan spiral.

Peningkatan kekuatan aksial akibat perkuatan dengan pen-binder dan FRP terjadi karena adanya penambahan nilai kekuatan tegangan pengekat yang bekerja pada kolom. Sesuai dengan **Persamaan (6)** dan **(7)** bahwa peningkatan kekuatan aksial kolom terkekang sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan kekangan (f_t) yang diberikan oleh pen-binder maupun FRP. Tegangan kekangan merupakan fungsi dari rasio volumetrik (perbandingan volume baja pengekat dengan beton dalam satu spasi), penggunaan pen-binder tidak hanya membantu tulangan tidak standar dapat mengekang inti beton tetapi juga meningkatkan rasio volumetrik tulangan pengekat, hal ini sesuai dengan penelitian Razvi and Saatcioglu (1994) bahwa peningkatan rasio volumetrik akan menghasilkan peningkatan kuat tekan yang signifikan. Sementara penggunaan FRP sesuai dengan **Persamaan (8)** dan **(9)** juga meningkatkan besarnya tegangan kekangan yang diberikan.

6. Kesimpulan

1. Penggunaan pen-binder sebagai sebagai pengikat tulangan pengekat yang tidak standar (sengkang lingkaran) memberikan hasil yang baik untuk meningkatkan kapasitas aksial tekan kolom. Terjadi peningkatan sebesar 18% dari kolom dengan sengkang spiral dan peningkatan 24% dari nilai teoritis kapasitas aksial kolom beton bertulang.
2. Penggunaan pen-binder memberikan kontribusi peningkatan secara signifikan terhadap besarnya kapasitas aksial maupun daktilitas sebesar berturut-turut 47.9% dan 14.2% dari kolom dengan tulangan non standar.

Tabel 1. Kapasitas aksial rata-rata benda uji kolom lingkaran

Benda Uji	P_0 teoritis (kN)	P_0 eksp (kN)	ϵ_y	ϵ_{85}	P_0 eksp/ P_0 teoritis	P_0 eksp/ P_0 standar	$\mu = \epsilon_{85} / \epsilon_y$
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]
Tulangan Spiral/Standar	548.7	573.45	0.00178	0.019	1.05	1.00	10.7
Tulangan non standar	548.7	458.54	0.00100	0.0042	0.84	0.80	4.2
Tulangan non standar + pen-binder	548.7	678.30	0.00224	0.01087	1.24	1.18	4.8
Tulangan non standar + FRP	744.4	905.75	0.00123	0.0085	1.22	1.58	6.9

3. Penggunaan FRP memberikan kontribusi peningkatan secara signifikan terhadap besarnya kapasitas aksial maupun daktilitas sebesar berturut-turut 97.5% dan 64.2% dari kolom dengan tulangan non-standar
4. Penggunaan FRP sebagai perkuatan pada tulangan pengekang yang tidak standar (sengkanh lingkaran) memberikan peningkatan kapasitas aksial sebesar 58% dari kolom dengan tulangan standar.

Standar Nasional Indonesia (SNI 2847-2013), 2013, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional (BSN).

7. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Kementrian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat untuk Dana Hibah Penelitian Fundamental T.A. 2015-2016 yang telah diberikan dalam rangka penelitian ini.

Daftar Pustaka

- ACI 440.2R-02, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI Committee 440.
- ACI Committee 318M-05, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary*, (ACI 318M-05), American Concrete Institute, Detroit
- Kristianto, A., dkk., 2011, Studi Eksperimental Penggunaan Tulangan Pengekang Tidak Standar yang dimodifikasi pada Kolom Persegi Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil ITB (ISSN 0853-2982)*, Vol 18. No.3 Desember 2011
- Kristianto, A., dkk., 2012, Confinement of Reinforced-Concrete columns with Non-Code Compliant Confining Reinforcement plus Supplemental Pen-Binder, *ITB Journal of Engineering Science (ISSN 1978-3051)* Vol. 44 No.3, November 2012
- Richart, *et al.*, 1928, *A Study of Failure of Concrete Under Combined Compression Stresses*, *Engineering Experiment Station Bulletin*, No. 185, University of Illinois, pp 104, Urbana
- Richart, *et al.*, 1929, *The Failure of Plain and Spirally R.C in compression*, *Engineering Experiment Station Bulletin*, No. 190, University of Illinois, pp 14, Urbana.
- Razvi, S.R., and Saatcioglu M., 1994, Strength and Deformability of confined High-Strength Concrete Columns, *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 6, Nov-Dec. 1994, pp. 1-10.
- Saatcioglu, M., and Razvi, S.R., 1992, Strength and Ductility of Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 118, No. 6, June 1992, pp. 1590-1607.

