

Studi Eksperimental Penggunaan Tulangan Pengekang Tidak Standar yang Dimodifikasi pada Kolom Persegi Beton Bertulang

Anang Kristianto

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

Iswandi Imran

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, E-mail: iswandiimran@gmail.com

Made Suarjana

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, E-mail: mdsuarjana@yahoo.com

Abstrak

Salah satu persyaratan penting untuk konstruksi tahan gempa yang terkait dengan pengekangan adalah pemasangan tulangan pengekang dengan kait gempa 135^0 pada sengkang. Dalam pelaksanaannya banyak pelaksana konstruksi menggunakan tulangan pengekang dengan kait 90^0 atau dengan konfigurasi dobel C (tidak sesuai standar). Berdasarkan beberapa hasil penelitian dan beberapa catatan dari kejadian gempa di Indonesia akhir-akhir ini, pemasangan tulangan pengekang yang tidak sesuai standar untuk kolom beton bertulang menghasilkan kinerja yang buruk sebagai struktur tahan gempa. Makalah ini memaparkan hasil eksperimen yang bertujuan mengembangkan elemen tambahan (pen-binder) untuk meningkatkan efektivitas pengekangan kolom beton dengan tulangan pengekang yang tidak sesuai standar. Efektivitas dari tambahan elemen untuk meningkatkan kinerja pengekangan pada beberapa konfigurasi tulangan pengekang yang tidak standar ini diuji dengan beban aksial dan lateral siklis. Benda uji berjumlah 5 buah kolom, dimensi penampang 260 mm x 260 mm dan tinggi 1500 mm. Variabel pengujian adalah jenis material pen-binder, level beban aksial dan sudut kait yang digunakan dalam tulangan pengekang. Hasil pengujian menunjukkan bahwa modifikasi terhadap tulangan pengekang tidak standar efektif mengekang inti beton, meningkatkan daktilitas dan kemampuan disipasi energi kolom benda uji.

Kata-kata Kunci: Kolom, tulangan pengekang, pen-binder.

Abstract

One of the important requirements for earthquake resistant buildings associated with confinement is the use of seismic hook (135 -degree hook) in hoop. Therefore, in practice many construction workers use confining reinforcement 90 -degree hook or with double C configuration (code non-compliance). Based on some research and some records of recent earthquakes in Indonesia, the use of the code non-compliance confining reinforcement for reinforced concrete columns can result in structures with poor seismic performance. This paper presents the results of experimental study with an objective to develop an additional element (pen-binder) expected to improve the effectiveness of concrete columns confined with non-compliance confining reinforcement. The effectiveness of this additional element in improving the performance of some configuration of non-compliance confining reinforcement in columns under axial and lateral cyclic loading was investigated in this study. The specimens tested in the study were 5 column specimens, with 260 mm x 260 mm in cross section and 1500 mm in height. The test variables were types of pen-binder material, level of axial load, angle of hook applied. The test results indicate that confining reinforcement modification can be effective in confining the core concrete, improving ductility and dissipation energy of column specimens.

Keywords: Column, confining reinforcement, pen-binder.

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang memiliki daerah dengan tingkat kerawanan gempa yang tinggi. Hal ini dapat dilihat dengan berbagai kejadian gempa dalam beberapa tahun terakhir yang melanda beberapa daerah di Indonesia. 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. Peraturan perencanaan SNI 03-2847-02 (Purwono, dkk, 2006) mensyaratkan diberikannya tulangan pengekang dengan kait gempa 135^0 pada elemen kolom yang dibangun pada daerah rawan gempa.

Dalam prakteknya pembuatan dan pemasangan tulangan pengekang ini tidaklah mudah, apalagi untuk kolom-kolom berdimensi besar yang umum dipakai pada bangunan gedung tinggi, jembatan dan jalan layang. Untuk memudahkan pembuatan dan pemasangannya, banyak pelaksana konstruksi yang pada akhirnya menggunakan tulangan pengekang yang dipasang dengan kait 90^0 . Beberapa laporan terkait dengan kerusakan struktur akibat gempa bumi di Indonesia memperlihatkan contoh-contoh keruntuhan bangunan yang terjadi akibat pendetailan tulangan kolom yang tidak memenuhi persyaratan (Imran, dkk., 2005; Imran, dkk., 2006; Imran, 2007), hasil penelitian juga membuktikan bahwa pemasangan tulangan pengekang dengan kait 90^0 untuk kolom pada daerah rawan gempa dapat menghasilkan *performance* yang buruk dan berbahaya bagi sistem struktur secara keseluruhan. (Sheikh dan Yeh, 1990; Saatcioglu dan Razvi 1992, Wehbe et al, 1999).

Oleh karena itu pemasangan tulangan pengekang dengan kait 90^0 untuk elemen struktur kolom beton betulang pada dasarnya tidaklah direkomendasikan. Namun, walaupun demikian sistem ini ternyata banyak diaplikasikan di lapangan mengingat kemudahan dalam pemasangannya.

Makalah ini menyajikan hasil pengembangan suatu perangkat tambahan yang dapat memperbaiki *performance* tulangan pengekang yang dipasang dengan kait gempa 90^0 sehingga sekalipun digunakan pengekang dengan kait gempa 90^0 , struktur kolom yang dihasilkan akan berperilaku daktilitas dan liat (*tough*), yaitu tidak gampang runtuh.

2. Kajian Pustaka

Penelitian penggunaan kait dengan sudut 90^0 pada tulangan pengekang kolom persegi mulai banyak dilakukan sejak tahun 1985. Beberapa hasil penelitian penting terkait penggunaan tulangan pengekang dengan kait 90^0 berikut memberikan gambaran perkembangan penelitian tulangan pengekang pada kolom.

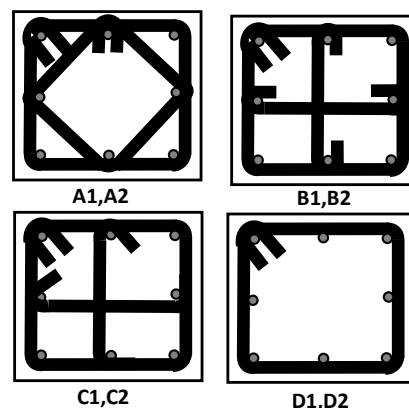
Tanaka et al. (1985) menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan siklis melaporkan bahwa kolom dengan kait 90^0 memberikan hasil pengekangan yang cukup memuaskan hanya pada level beban aksial yang sangat rendah.

Mohle dan Cavanagh (1985) melakukan penelitian benda uji kolom beton normal (konfigurasi seperti **Gambar 1**) dengan pembebanan aksial konsentris. Beberapa hal penting yang didapat dari eksperimen ini adalah :

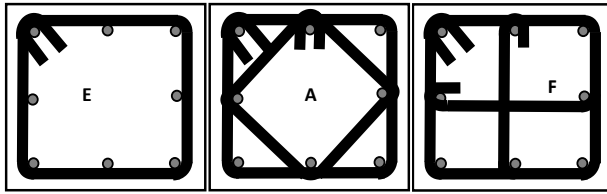
- Urutan konfigurasi dimulai dari yang memiliki kekuatan dan daktilitas paling tinggi yaitu: A,B,C dan D.
- Kecenderungan terbukanya pengikat silang dengan kait 90 sehingga mengakibatkan berkurangnya efektivitas kekangan.
- Penggunaan pengikat silang pada tulangan pengekang memberikan kekuatan dan daktilitas yang lebih baik daripada penggunaan tulangan pengekang tertutup tanpa pengikat silang.

Rabbat et.al (1986), menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan siklis melaporkan bahwa penggunaan pengikat silang dengan kait 135^0 dan 90^0 memberikan hasil yang cukup memuaskan dalam mengekang inti beton khususnya untuk level beban aksial rendah, degradasi kekuatan terjadi pada beban aksial yang tinggi.

Ozcebe dan Saatcioglu (1987), melakukan eksperimen menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan aksial konsentris dan siklis. Dalam penelitian ini dilaporkan bahwa kolom dengan sengkang tertutup saja memiliki efektivitas kekangan yang kurang memadai dibandingkan kolom dengan sengkang tertutup yang diberikan pengikat silang. Pada beban aksial yang relatif rendah (kurang dari P balance) pengikat silang dengan kait 90^0 memberikan efektivitas pengekangan yang cukup baik.



Gambar 1. Konfigurasi tulangan pada eksperimen Mohle dan Cavanagh (1985)



Gambar 2. Konfigurasi tulangan pada eksperimen Sheikh dan Sakai (1989)

Sheikh dan Sakai (1989), menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan lentur dan aksial konsentris, melaporkan bahwa benda uji konfigurasi A dan F (**Gambar 2**) dengan pengikat silang memiliki performance yang lebih baik daripada konfigurasi E. Untuk beban siklis konfigurasi A menghasilkan efektivitas kekangan yg lebih baik. Pada saat mencapai tegangan leleh, pengikat silang dengan kait 90 pada konfigurasi F mulai terbuka. Konfigurasi F efektif dalam mengekang inti beton pada deformasi kecil, pada deformasi besar ketika kait 90° mulai terbuka terjadi kegagalan yang bersifat getas.

Razvi and Saatcioglu (1989), menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan aksial konsentris melaporkan bahwa kolom dengan kait 135° menghasilkan kekuatan dan daktilitas yang lebih baik daripada kolom dengan kait 90°.

Azizinamini dan Gosh (1997), melakukan penelitian kerusakan struktur kolom akibat gempa di Hyogoken-Nanbu tahun 1995, dalam penelitiannya menyebutkan bahwa terjadinya kegagalan kolom dalam menahan beban gempa sebagai akibat tidak adanya pengikat silang dan kait ditekuk hanya dengan sudut 90°. Penggunaan tulangan pengekuat dengan kait 90° mengakibatkan tidak efektifnya pengekuatangan dan tertekuknya tulangan longitudinal.

Wehbe, Saiidi and Sanders (1999), melakukan penelitian menggunakan benda uji beton normal dengan pembebanan aksial konsentris dengan level pembebanan berturut-turut 0.09, 0.1, 0.23 dan 0.24 Ag.fc' sekaligus beban lateral siklis, menyebutkan terbukanya pengikat silang dengan kait 90 pada daerah sendi plastis di setiap level beban aksial, diikuti dengan terjadinya tekuk tulangan longitudinal yang mengakibatkan kegagalan pengekuatangan inti beton.

Lukkunaprasit dan Sittipunt (2003), melakukan pengujian kolom beton normal yang diberikan penambahan elemen "hook-clips" pada kait 90° dengan pembebanan aksial konsentris dan lateral siklis. Pada pengujian ini dilaporkan bahwa kolom dengan kait 90° tanpa clip mengalami kegagalan dengan terbukanya kait 90, penggunaan hook-clips efektif mencegah terbukanya kait 90° pada level beban aksial dan lateral yang sedang (level kecepatan sedang).

3. Pengembangan Pototipe Pen-Binder

Sebagai langkah awal telah dilakukan pemodelan bentuk elemen pengikat (*pen-binder*) dengan menggunakan software finite elemen. Analisis awal dengan menggunakan model *finite element* ini memiliki tujuan untuk mendapatkan gambaran umum mengenai perilaku deformasi tulangan pengekuat akibat adanya penambahan pen-binder pada posisi tertentu. Hasil analisis menunjukkan kemampuan pen-binder yang signifikan untuk menahan tulangan pengekuat pada posisinya (Kristianto, 2010). Selain itu dilakukan optimasi untuk mendapatkan posisi dan jumlah pen-binder yang paling optimal untuk meningkatkan efektivitas kekangan.

Pengujian aksial konsentris menggunakan pen-binder dengan beberapa konfigurasi pemasangan telah dilakukan untuk melihat perilaku tegangan regangan kolom benda uji. Pada eksperimen ini dilakukan pembebanan aksial konsentris untuk benda uji kolom dengan parameter pengujian meliputi konfigurasi pen-binder, spasi tulangan pengekuat serta material pen-binder. Hasil yang diharapkan pada tahap ini adalah perilaku tegangan regangan serta model kehancuran kolom dengan adanya penambahan pen-binder. Hasil eksperimen juga telah divalidasi dengan hasil penelitian dari beberapa tulisan ilmiah terkait dengan model kekangan. Hasil pengujian dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Pada pengujian ini didapatkan bahwa pemberian pen-binder pada tulangan pengekuat yang dipasang tidak sesuai standar (kait 90° atau gabungan dobel) dapat memberikan hasil kekuatan dan daktilitas yang relatif sama bahkan lebih bila dibandingkan dengan kolom dengan pengekuat yang memiliki kait standar 135°. Selain itu penggunaan material plastik sebagai alternatif jenis material pen-binder dengan konfigurasi tertentu dapat memberikan perilaku pengekuatangan yang sama dengan pengekuatangan yang diberi kait standar.

Pengujian selanjutnya yang dipaparkan dalam makalah ini adalah perilaku pengekuatangan dengan tambahan pen-binder dengan konfigurasi tertentu pada tulangan pengekuat tidak standar akibat beban aksial dan lateral siklis.

4. Program Pengujian Aksial dan Lateral Siklis

4.1 Benda uji

Benda uji dalam penelitian ini berjumlah 5 buah (**Tabel 1**), bentuk dan posisi pen-binder yang digunakan dalam penelitian ini adalah posisi yang menghasilkan daktilitas terbaik dari pengujian akibat beban aksial-konsentris yang telah dilakukan pada tahap eksperimen sebelumnya. Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini adalah material pen-

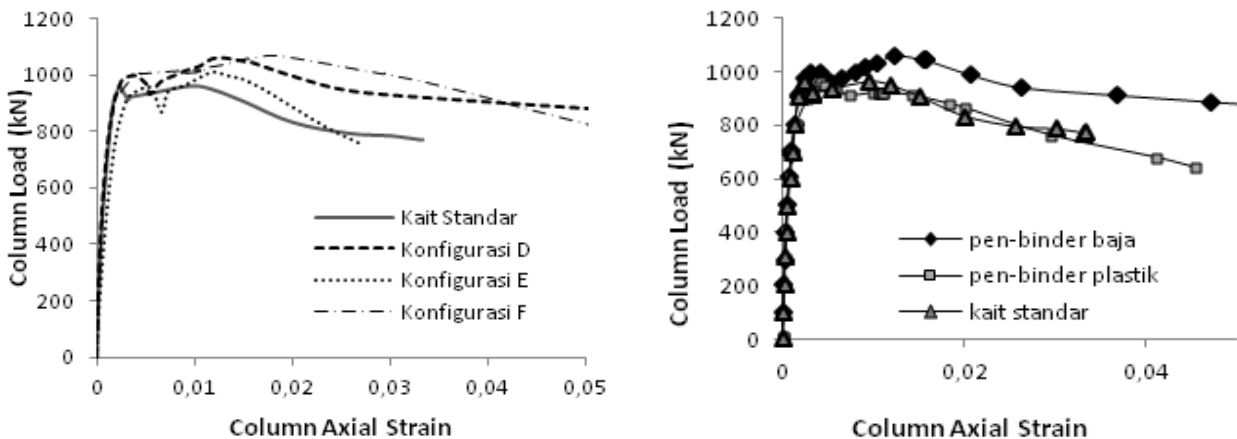
binder, sudut kait tulangan pengekang serta tingkat pembebanan aksial yang diberikan.

Pen-binder menggunakan dua jenis material yaitu material baja dan material plastik ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*). Sudut kait tulangan pengekang dibuat 90° (tidak sesuai standar) dengan tambahan pen-binder serta tulangan pengekang dengan sudut 135° (sesuai standar). Pen-binder dipasang pada bagian kait yang ditekuk 90° ditengah-tengah antara tulangan

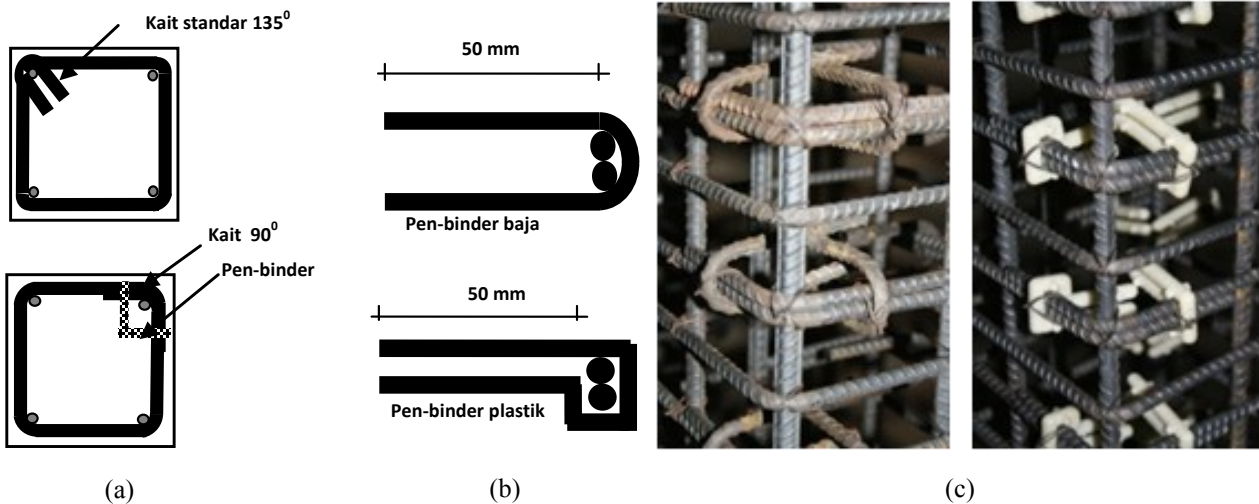
longitudinal sudut dengan tulangan longitudinal di sampingnya (Gambar 4). Dalam eksperimen ini seluruh daerah pengujian kolom sepanjang 1500 mm diberi pen-binder dengan posisi yang berselang-seling. Tingkat beban aksial yang diberikan dibagi dalam dua tingkat pembebanan yaitu sebesar 584 kN dan 986 kN, nilai pembebanan merepresentasikan rasio pembebanan terhadap kapasitas aksial kolom (P/P_o) sebesar berturut-turut 0.3 (level rasio sedang) dan 0.5 (level rasio tinggi). Mutu beton yang digunakan adalah sebesar 27 MPa.

Tabel 1. Spesifikasi benda uji

Kode	P/Po	Tulangan			Tulangan Transversal		Konfigurasi sengkang kait
		PI	Fy (Mpa)	S (mm)	Fys (MPa)	(A _{sh})/(s.h _c), %	
E135-0-0.3	0.3			45		0.9	Kait 135
E90-2P1-0.3	0.3			45		0.9	Kait 90 +pen-binder baja
E90-2P2-0.3	0.3	1.054	414	45	414	0.9	Kait 90+pen-binder plastik
E135-0-0.5	0.5			45		0.9	Kait 135
E90-2P1-0.5	0.5			45		0.9	Kait 90 +pen-binder baja



Gambar 3. Grafik hubungan tegangan dan regangan benda uji kolom pada berbagai konfigurasi pemasangan pen-binder dan jenis material pen-binder yang digunakan



Gambar 4. Modifikasi tulangan pengekang, a) Posisi pen-binder pada tulangan yang dimodifikasi, b) Geometri pen-binder, c) Foto pemasangan modifikasi tulangan pengekang dengan pen-binder

Seluruh benda uji memiliki dimensi yang sama, dimensi penampang sebesar 260 mm x 260 mm serta 1500 mm untuk ketinggiannya, detail penampang benda uji, serta detail penulangan benda uji kolom dapat dilihat pada **Gambar 5**. Pada eksperimen ini kegagalan yang diharapkan adalah lelehnya tulangan longitudinal terlebih dahulu pada bagian ujung kolom pada saat menerima beban aksial dan lateral siklis sebelum mengalami kegagalan pengekangan dan geser.

4.2 Test Setup dan instrumentasi benda uji

Untuk keperluan pengujian ini, pada masing-masing benda uji dipasang strain gauge serta LVDT untuk mengetahui besarnya perubahan regangan pada tulangan serta perpindahan yang terjadi pada benda uji untuk posisi-posisi yang telah ditentukan. Posisi tipikal pemasangan *strain-gauge* untuk salah satu ujung kolom benda uji dengan kait 90° dan diberikan *pen-binder* dapat dilihat pada **Gambar 5**.

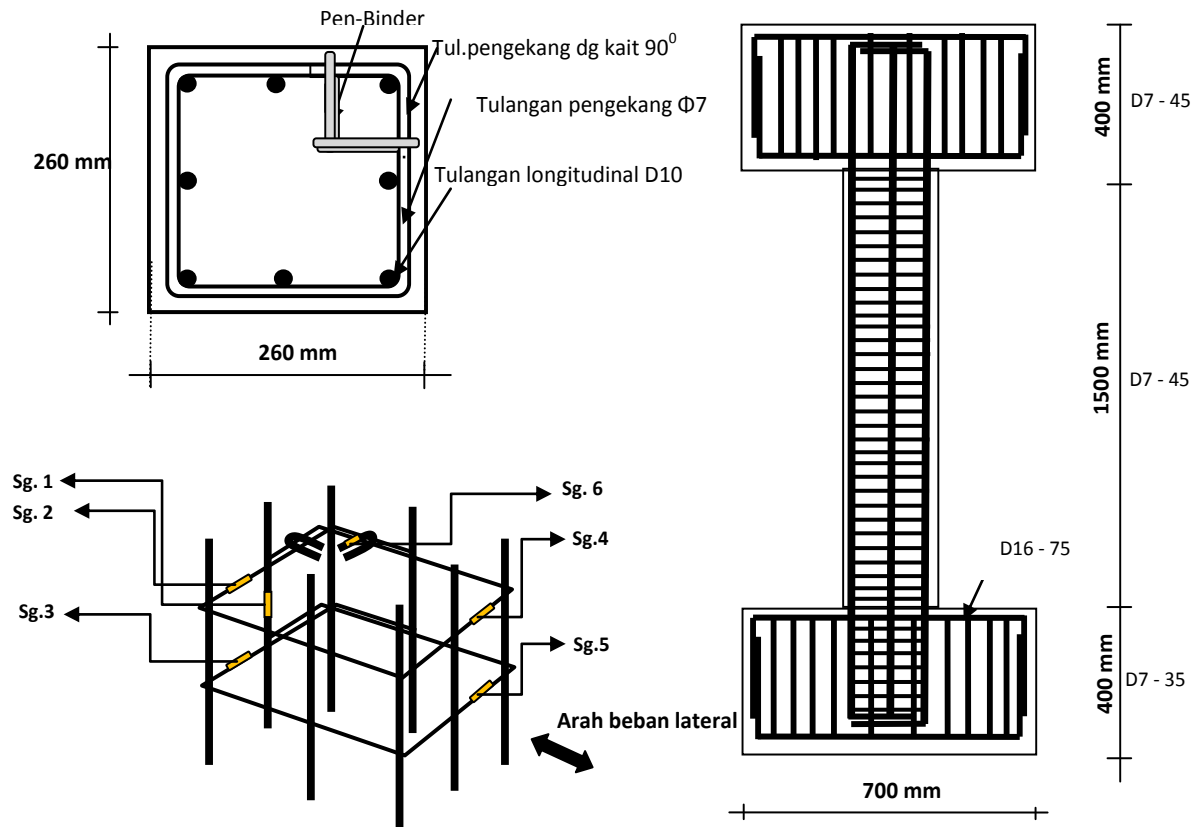
Penempatan *strain gauge* pada ujung atas identik dengan posisi *strain gauge* pada ujung bawah kolom. Titik (1) untuk mengetahui regangan tulangan longitudinal, titik (2) dan (3) untuk mengetahui regangan yang terjadi pada tulangan pengekang di daerah sisi yang terdapat *pen-binder*, titik (4) dan (5) untuk mengetahui regangan didaerah sisi tanpa *pen-binder*, sementara titik (6) untuk melihat regangan pada *pen-binder*.

LVDT ditempatkan pada kedua ujung dan kedua sisi kolom benda uji seperti terlihat pada **Gambar 6**.

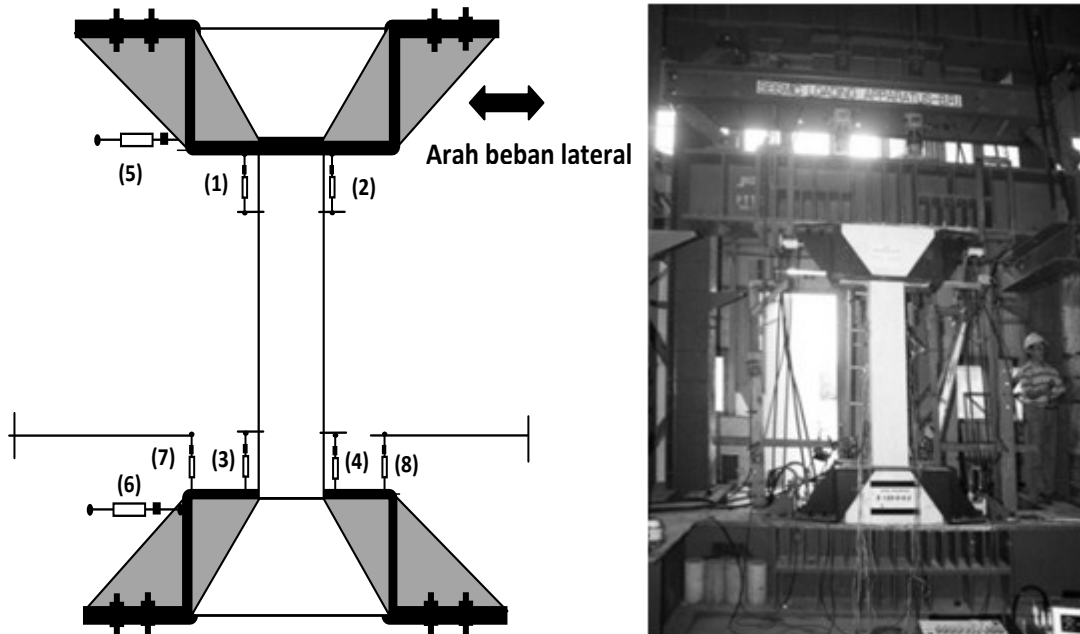
Posisi titik (1) sampai (4) untuk mengetahui besarnya deformasi aksial yang terjadi pada kedua ujung kolom didaerah sendi plastis dengan jarak 260 mm dari masing-masing ujung, selain itu juga untuk melihat besarnya kurvatur pada ujung kolom. Posisi di titik (5) dan (6) untuk mengetahui besarnya perpindahan arah lateral pada saat pengujian berlangsung, sementara LVDT pada titik (7) dan (8) untuk memastikan tidak ada deformasi vertikal pada dudukan kolom pada saat pembebanan. Pada kedua ujung kolom dibuat kepala kolom yang dijepit dengan menggunakan baja dan dibaut pada kedua sisi.

Test setup untuk seluruh benda uji dapat dilihat pada **Gambar 7**. Beban aksial diberikan dengan menggunakan 2 buah jack hidraulik berkapasitas total 200 tonf pada bagian atas, untuk mencatat besarnya beban aksial yang diberikan dipasang loadcell pada kedua aktuator hidraulik tersebut.

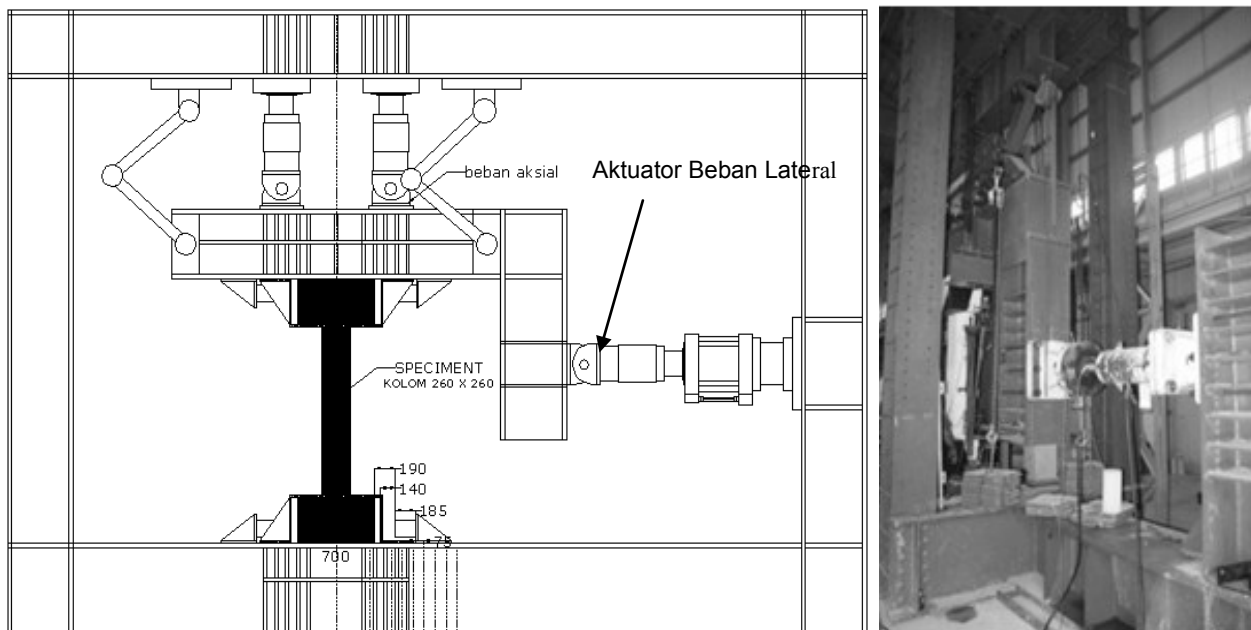
Beban lateral diberikan dengan menggunakan aktuator berkapasitas 100 tonf yang dipasang sedemikian rupa sehingga menghasilkan beban lateral pada ujung atas kolom serta momen pada kedua ujung kolom.



Gambar 5. Benda uji kolom dan penampang serta posisi *strain gauge*



Gambar 6. Ilustrasi dan foto posisi LVDT pada benda uji dan dudukan benda uji

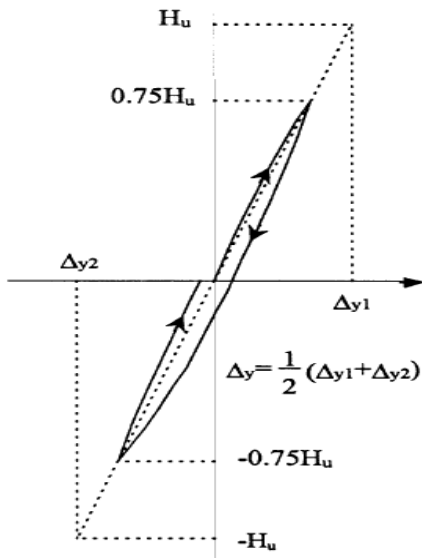


Gambar 7. Ilustrasi dan foto setup alat pengujian aksial dan lateral siklis

Standar pengujian dilakukan berdasarkan ACI 374.1-05 (*Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*). Beban aksial konstan diberikan terlebih dahulu sebesar 584 kN (0.3 P_u) atau 986 kN(0.5 P_u) sesuai dengan level rasio beban aksial. Beban lateral diberikan dalam 2 tahap, yaitu diawali dengan tahap kontrol beban kemudian dilanjutkan dengan tahap berikutnya yaitu kontrol perpindahan. Tahap kontrol beban diberikan hingga sebesar 75% dari beban leleh hasil perhitungan teoritis, setelah titik ini dicapai dilanjutkan dengan tahap pembebanan lateral dengan kontrol perpindahan. Perhitungan perpindahan leleh pertama (*first yield*)

dilakukan secara eksperimental dengan merata-ratakan nilai ekstrapolasi perpindahan (Δ_y) pada 0.75 H_u dan -0.75 H_u (nilai H_u adalah nilai teoritis gaya lateral yang mengakibatkan leleh pertama pada benda uji kolom, Watson and Park 1994, (**Gambar 8**).

Berdasarkan rata-rata perpindahan hasil ekstrapolasi pada titik leleh gaya gesernya didapatkan perpindahan leleh dari benda uji sebesar $\Delta_y = 0.5(\Delta_{y1} + \Delta_{y2})$. Pembebanan siklis dilanjutkan dengan kontrol perpindahan dimulai dari perpindahan pada saat awal leleh tulangnya seperti yang telah didapatkan dari hasil rata-rata ekstrapolasi sebelumnya. Beban siklis lateral diberikan mengikuti siklus pembebanan seperti terlihat pada **Gambar 9**.



Gambar 8. Definisi leleh pertama (Watson and Park, 1994)

Siklus pembebanan dilakukan hingga tercapai penurunan kapasitas lateral kolom sebesar lebih dari 20 % nilai kapasitas lateral maksimum atau terjadi fraktur pada tulangan pengekangnya.

5. Hasil Pengujian

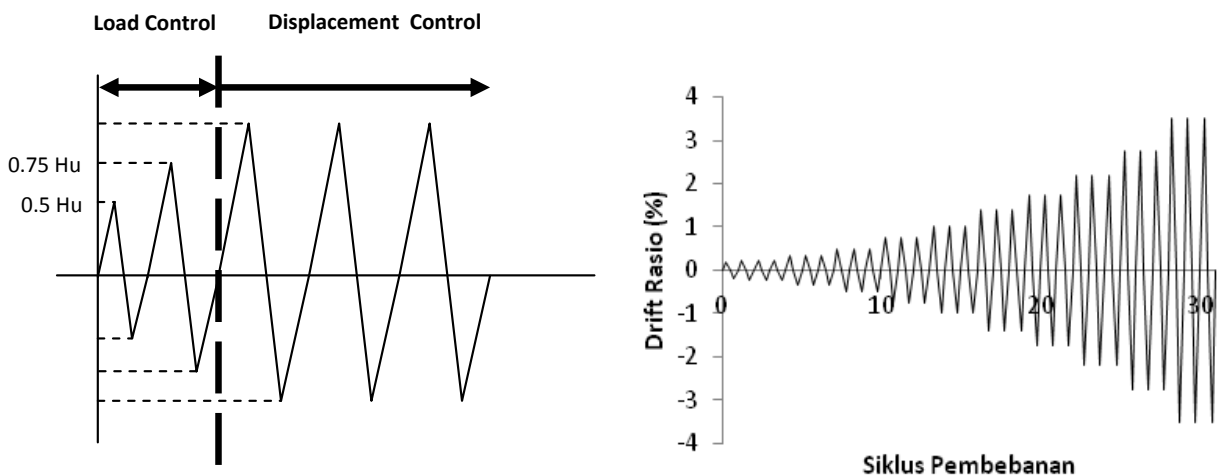
Perilaku hasil pengujian dan foto pada akhir pengujian untuk masing-masing benda uji dapat dilihat pada **Gambar 10** untuk level beban axial $0.3P_0$ dan **Gambar 11** untuk level beban aksial $0.5P_0$.

Dari grafik terlihat bahwa seluruh benda uji memiliki perilaku dengan bentuk kurva histerisis yang baik dan memperlihatkan kegagalan lentur dengan terbentuknya sendi plastis pada kedua ujung kolom. Dalam setiap level drift untuk ketiga siklus yang diberikan tidak terjadi degradasi kekuatan yang berlebihan dan setiap peningkatan drift terjadi degradasi kekuatan dan kekakuan yang tidak terlalu tajam. Bentuk kurva

histerisis yang baik dan tidak *pinching* menunjukkan pendetailan benda uji yang baik dan sesuai dengan standar yang diberikan. Untuk seluruh benda uji pada umumnya retak pertama terjadi pada drift $\pm 1.2\%$, setelah selimut beton lepas inti beton terlihat dalam kondisi terkekang dengan baik pada seluruh benda uji hal ini membuktikan bahwa tulangan pengekang standar maupun yang telah dimodifikasi berfungsi mengkekang inti beton dengan baik hingga pengujian dihentikan.

Pada umumnya tulangan pengekang mengalami leleh terlebih dahulu, diikuti tulangan longitudinal dan selanjutnya terjadi *buckling* pada tulangan longitudinal yang mempercepat terjadinya penurunan kekuatan. Pada level beban aksial sedang ($0.3P_0$) perilaku kurva histerisis untuk ketiga benda uji terlihat mirip, ketiga benda uji menunjukkan perilaku histerisis yang stabil hingga drift 3.5 %, pengujian dihentikan pada drift 5.2 % dengan kondisi sudah terjadinya *buckling* pada tulangan longitudinal di kedua ujung kolom. Sementara pada level beban aksial yang tinggi ($0.5P_0$) terlihat adanya perbedaan yang cukup signifikan. Benda uji dengan kait standar cenderung cepat mengalami penurunan kekuatan, pengujian untuk benda uji ini dihentikan sebelum mencapai drift 5.2 % akibat putusannya tulangan pengekang pada drift 3.51 %. Sementara benda uji dengan kait tidak standar dengan pemberian pen-binder menunjukkan perilaku yang jauh lebih baik, meskipun tetap mengalami putusannya tulangan pengekang tetapi pada drift yang lebih tinggi sebesar 5 %.

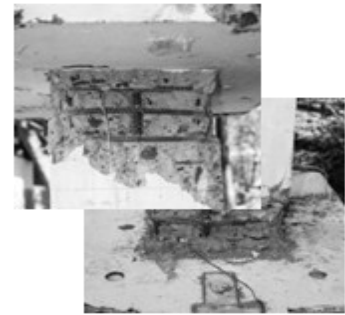
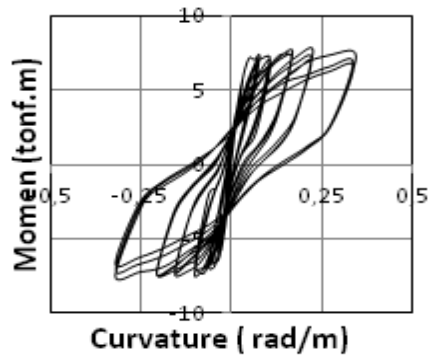
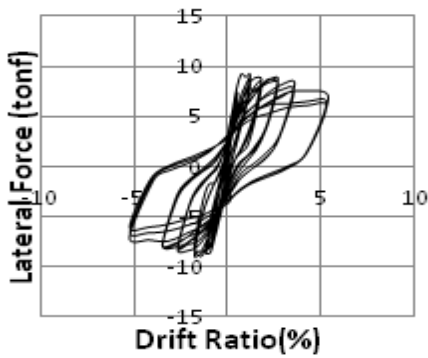
Berdasarkan kurva histerisis (**Gambar 11**), penggunaan tulangan pengekang tidak standar dengan modifikasi memberikan perilaku yang baik pada setiap siklus pembebanan yang diberikan, bahkan pada level beban aksial yang tinggi ($0.5P$) modifikasi tulangan standar memberikan hasil yang jauh lebih baik pada setiap siklus pembebanan dibandingkan dengan benda uji dengan tulangan standar.



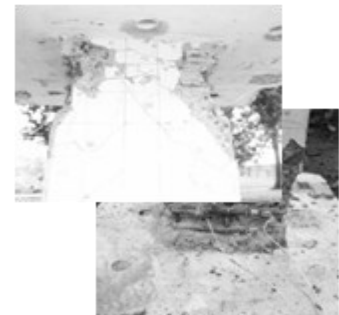
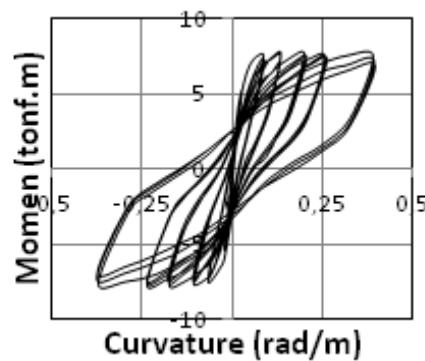
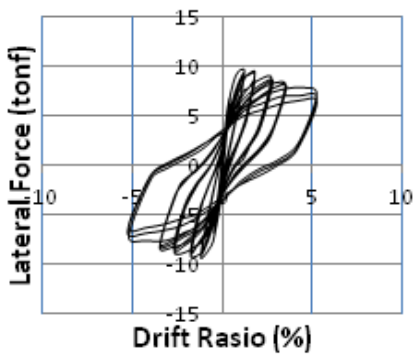
Gambar 9. Tipikal siklus pembebanan lateral

Untuk menentukan besarnya nilai daktilitas baik daktilitas perpindahan (μ_{Δ}) maupun daktilitas kurvatur (μ_{ϕ}), perhitungan pada penelitian ini mengacu kepada metoda yang digunakan oleh Bayrak dan Sheikh (1998). Selain daktilitas dihitung juga rasio kumulatif perpindahan (N_{Δ}) yang bertujuan untuk melihat nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada benda uji. Untuk menunjukkan karakteristik disipasi energi benda uji kolom maka dihitung juga nilai W (Indek kumulatif disipasi energi). Ilustrasi nilai-nilai diatas untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 12**.

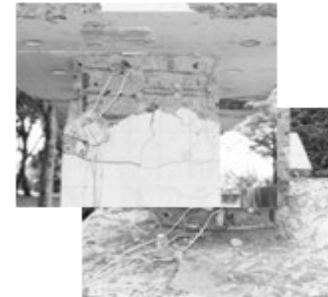
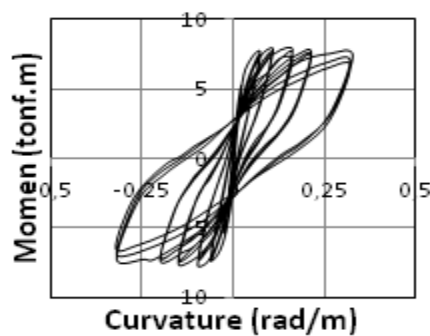
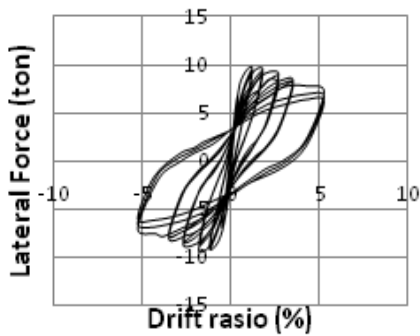
Untuk menentukan nilai-nilai tersebut dibuat *kurva envelope* baik untuk perpindahan maupun kurvturnya pada setiap benda uji (**Gambar 13**). Kurva *envelope rata-rata* merupakan nilai rata-rata dari dua arah hubungan beban lateral dan perpindahan. Nilai $0.8 V_{max}$ yang merupakan titik terjadinya penurunan gaya lateral benda uji sebesar 20% adalah kriteria nilai perpindahan ultimate yang digunakan dalam penelitian ini. Daktilitas perpindahan dihitung dari rasio perpindahan ultimate (Δ_2) dan perpindahan pada saat pertama leleh (Δ_1), sementara daktilitas kurvatur dihitung dari rasio antara kuvatur ultimate (ϕ_u) dan kurvatur pada saat leleh (ϕ_y).



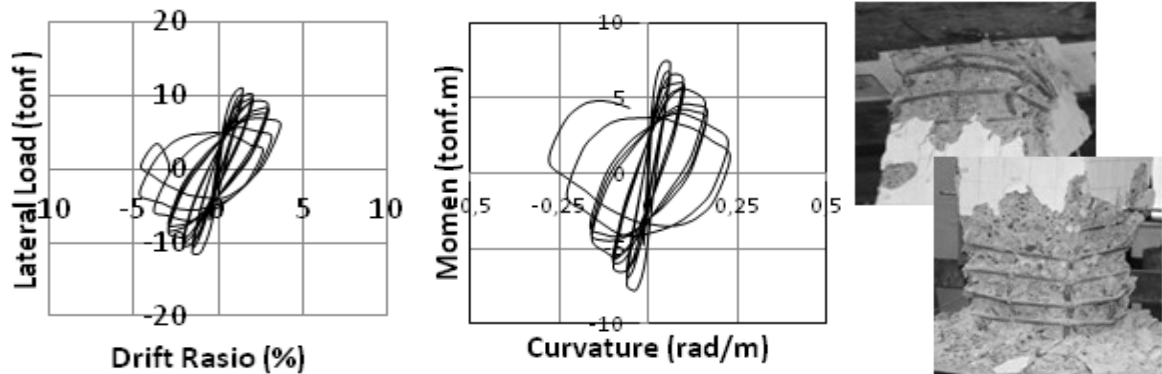
Kode benda uji : E90-2P1-0.3



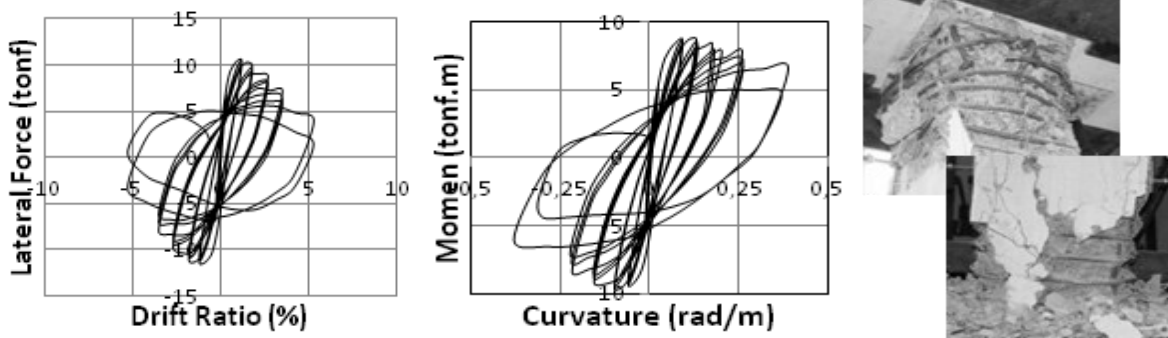
Kode benda uji : E90-2P2-0.3



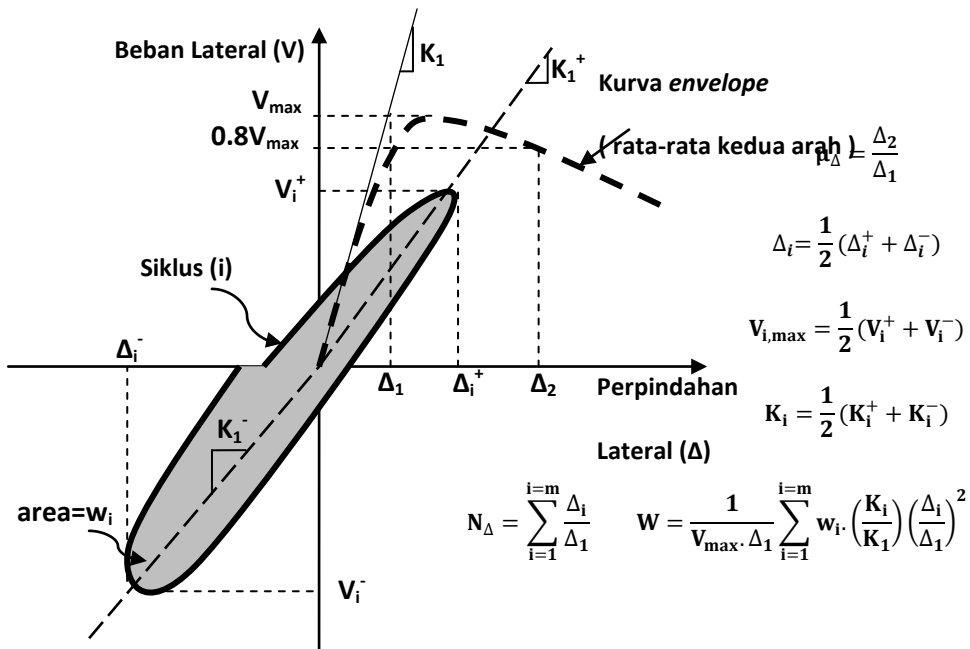
Gambar 10. Perilaku benda uji dan foto pada akhir pengujian untuk level Axial 0.3 Po



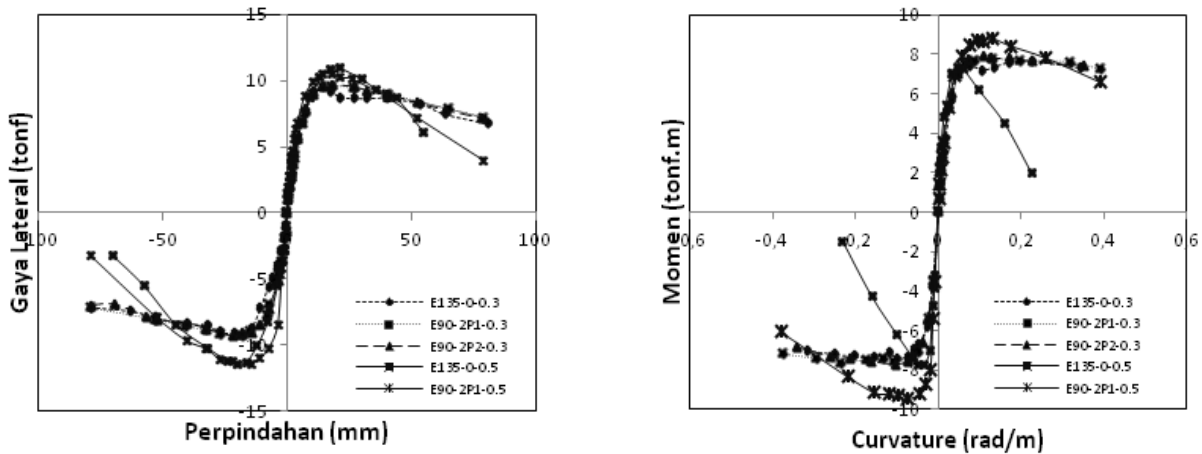
Kode benda uji : E90-2P1-0.5



Gambar 11. Perilaku benda uji dan foto pada akhir pengujian untuk level Axial 0.5 Po



Gambar 12. Definisi parameter daktilitas (Bayrak dan Sheikh, 1998)



Gambar 13. Kurva envelope perilaku benda uji

Hasil perhitungan seluruh nilai diatas untuk masing-masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel Rangkuman hasil pengujian

Benda Uji	V_{max} (tonf)	M_{max} (tonf.m)	μ_{Δ}	μ_{ϕ}	N_{Δ}	W	Keterangan
E135-0-0.3	9.13	7.55	6.29	8.05*	17.5	190	Kait standar
E90-2P1-0.3	9.46	7.70	7.51	10.54*	21.3	274	Kait 90+pen binder baja
E90-2P2-0.3	9.51	7.81	7.47	8.86*	21.1	230	Kait 90+pen binder plastik
E135-0-0.5	11.25	7.56	3.82	4.77	10.50	62	Kait standar
E90-2P1-0.5	10.97	9.13	6.40	9.53	15.8	182	Kait 90+pen binder baja

6. Analisis Hasil Pengujian

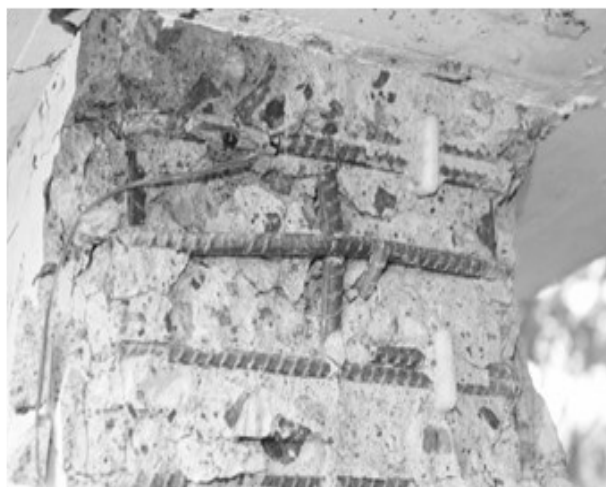
6.1 Efek penggunaan pen-binder

Dari Tabel 2 di atas dapat dilihat benda uji dengan kait 90° yang diberi pen-binder (E90-2P1-0.3) memiliki nilai daktilitas perpindahan maupun daktilitas kurvatur yang lebih baik dari benda uji dengan kait standar (E135-0-0.3). Pada level beban aksial 0.3Po terjadi peningkatan nilai daktilitas dari nilai daktilitas untuk pengekang dengan kait standar (135°) hingga 19.5 % untuk daktilitas perpindahan dan minimum 24.7% untuk daktilitas kurvturnya. Pada level beban aksial 0.5 Po penggunaan pen-binder memberikan hasil yang lebih signifikan, terjadi peningkatan daktilitas perpindahan sebesar 67.6% dan peningkatan daktilitas kurvatur sebesar 99.7%.

Penggunaan pen-binder juga memberikan peningkatan kemampuan kolom dalam mendisipasi energi, hal ini terlihat dari peningkatan nilai indeks kumulatif disipasi energi (W) yang mengalami peningkatan sebesar 44.2% dari nilai 190 untuk kait standar menjadi 274 untuk tulangan yang dimodifikasi dengan pen-binder. Sebagai struktur kolom yang diharapkan mampu berperilaku daktil dan tidak runtuh pada saat terjadi beban gempa maka penggunaan pen-binder tidak hanya memenuhi syarat sebagai kolom berperilaku daktil dimana nilai $\mu_{\Delta} \geq 6$ dan $\mu_{\phi} \geq 15$ (Sakai and Sheikh, 1989) tetapi juga memberikan kapasitas yang melampaui kolom dengan kait standar.

6.2 Penggunaan material plastik pada pen-binder

Pada eksperimen ini pen-binder dari material plastik digunakan untuk menghindari terjadinya korosi akibat berkurangnya selimut beton karena pemasangan pen-binder. Penggunaan pen-binder dari material baja dan plastik tidak memberikan perbedaan hasil yang signifikan untuk nilai daktilitasnya. Pada Gambar 14 terlihat bahwa pen-binder dengan material plastik mampu mempertahankan posisi tulangan pengekang tetap pada tempatnya sekalipun tulangan longitudinal sudah mengalami buckling.



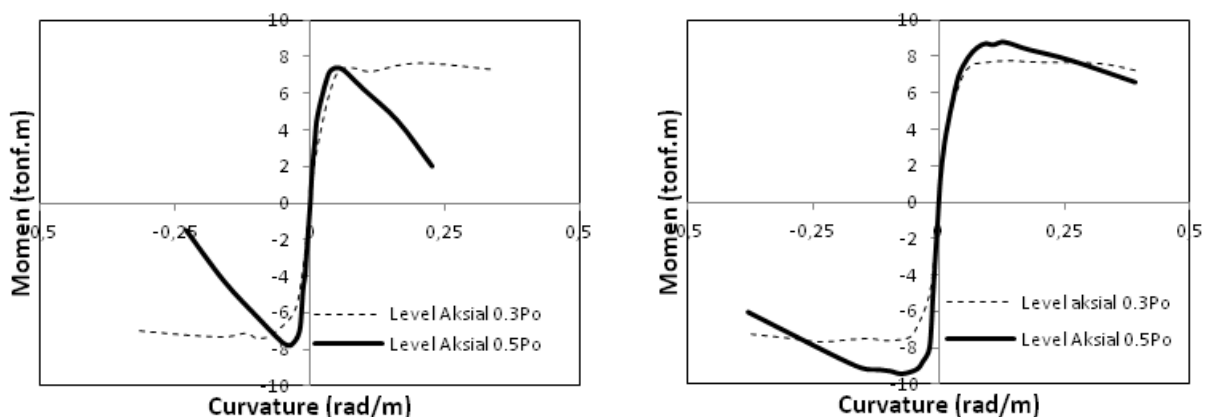
Gambar 14. Foto benda uji pada akhir pengujian dengan pen-binder dari material plastik

Perbedaan yang cukup signifikan hanya pada nilai indeks kumulatif disipasi energi, pada pen-binder baja terjadi peningkatan sebesar 44.2% sementara *pen-binder* plastik mengalami peningkatan sebesar 21%, pada deformasi lateral yang besar pen-binder dengan material baja memiliki kemampuan menahan tulangan pengekok pada posisinya sedikit lebih baik daripada *pen-binder* dengan material plastik.

6.3 Peningkatan level beban aksial

Pemberian beban aksial dari $0.3P_0$ hingga $0.5P_0$ meningkatkan kapasitas gaya lateral rata-rata sebesar 18.5 % dibandingkan benda uji dengan beban aksial $0.3 P$, meskipun begitu penurunan nilai daktilitas perpindahan maupun kurvturnya yang terjadi cukup signifikan. Penggunaan pen-binder dari material baja memberikan pengaruh yang cukup signifikan untuk menekan penurunan nilai daktilitasnya. Pada kait standar terjadi penurunan nilai daktilitas perpindahan sebesar 39.2% sementara penggunaan *pen-binder* memberikan penurunan nilai daktilitas perpindahan hanya sebesar 14.8%. Hal yang sama berlaku juga pada kemampuan benda uji kolom untuk disipasi energi yang menurun akibat penambahan level beban aksial, penggunaan pen-binder menurunkan indek kumulatif disipasi energi sebesar 33.5%, sementara benda uji dengan kait standar terjadi penurunan kemampuan disipasi energi sebesar 67.3%.

Grafik hubungan momen dan kurvatur pada **Gambar 15** menunjukkan perbedaan yang signifikan sebagai akibat peningkatan level beban aksial dari tingkat sedang ke tingkat tinggi, pada kait standar peningkatan kapasitas momen relatif lebih rendah dibandingkan pada benda uji dengan tambahan pen-binder, selain itu terjadi penurunan yang cukup drastis pada tingkat kurvatur yang semakin bertambah untuk benda uji dengan kait standar. Penggunaan pen-binder pada kait tidak standar mempertahankan penurunan kapasitas lentur dengan degradasi yang masih baik pada level kurvatur yang semakin bertambah.



Gambar 15. Pengaruh peningkatan beban aksial a) Benda uji dengan kait standar, b) Benda uji dengan *pen-binder* pada kait tidak standar

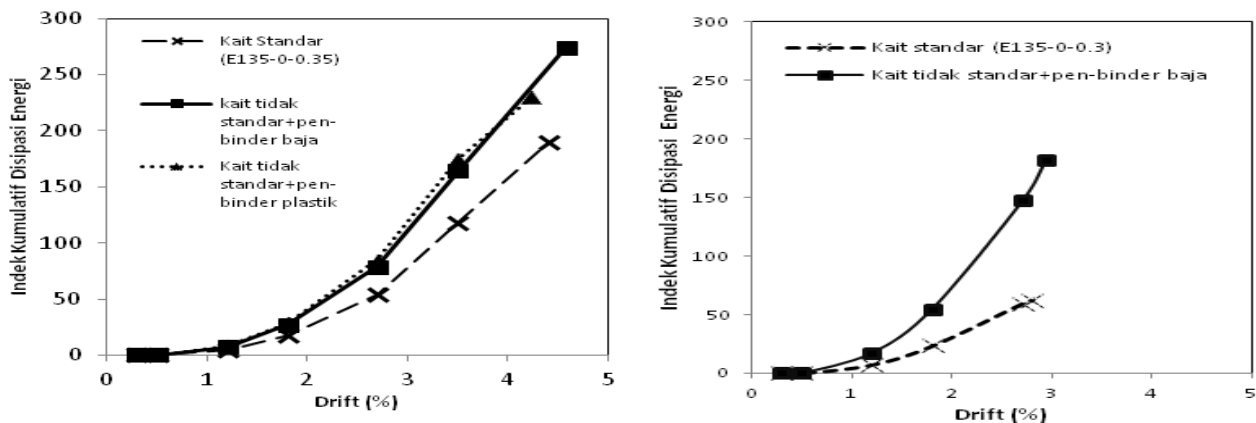
Pada level aksial yang cukup tinggi terlihat perbedaan yang cukup signifikan karena pen-binder bekerja lebih maksimal dengan memanfaatkan tingginya gaya aksial yang menekan inti kolom sehingga menambah aksi pengangkuran *pen-binder* pada inti kolom yang terkekang dan berfungsi seperti pengikat silang yang menahan tulangan pengekok pada posisinya.

6.4 Kemampuan disipasi energi kolom

Grafik pada **Gambar 16** memperlihatkan kemampuan disipasi energi benda uji. Pada grafik ini diperlihatkan kemampuan benda uji kolom dalam mendisipasi energi pada setiap level drift yang diberikan.

Pada level beban aksial sedang ($0.3P_0$) perbedaan kemampuan disipasi energi antara pengekok dengan kait standar dan pengekok yang diberi *pen-binder* mulai terlihat pada drift 1%, pada drift yang lebih tinggi perbedaan semakin jelas terlihat bahwa penggunaan *pen-binder* memberikan kemampuan disipasi energi yang lebih baik. Indek kumulatif disipasi energi antara *pen-binder* baja dan plastik terlihat relatif sama pada setiap level drift yang diberikan, namun disipasi energi dari benda uji kolom dengan *pen-binder* plastik berhenti pada nilai indek 230 sementara pen-binder baja dapat mencapai hingga nilai 270.

Pada level beban aksial tinggi ($0.5P_0$), perbedaan nilai indek kumulatif disipasi energi antara pengekok dengan kait standar dan pengekok dengan pen-binder baja mulai terlihat pada drift 0.5%, pada level drift yang semakin meningkat perbedaan nilai semakin signifikan hingga tercapai nilai indek sebesar 62 untuk pengekok dengan kait standar dan 182 untuk pengekok yang diberi tambahan pen-binder. Pemberian pen-binder pada tulangan pengekok tidak standar pada kolom memberikan hasil yang lebih signifikan untuk meningkatkan kemampuan disipasi energinya pada level beban aksial tinggi daripada kolom dengan level beban aksial yang sedang.



Gambar 16. Indeks Kumulatif Disipasi Energi (W) benda uji hingga 0.8 Vmax, a) Level beban aksial 0.3Po, b) Level beban aksial 0.5Po

7. Kesimpulan

Berdasarkan kajian eksperimen terhadap 5 buah benda uji kolom dan analisisnya maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Benda uji kolom dengan kait standar maupun benda uji dengan kait tidak standar yang dimodifikasi dengan tambahan *pen-binder* menghasilkan nilai daktilitas perpindahan dan daktilitas kurvatur yang dapat digolongkan sebagai kolom dengan daktilitas yang tinggi.
2. Penggunaan kait yang tidak standar dengan penambahan *pen-binder* (plastik maupun baja) memberikan kemampuan daktilitas dan disipasi energi yang lebih baik daripada kolom yang menggunakan pengekang dengan kait standar 135^0 .
3. Pemberian *pen-binder* pada tulangan pengekang tidak standar pada kolom memberikan hasil yang lebih signifikan untuk meningkatkan kemampuan disipasi energinya pada level beban aksial tinggi daripada kolom dengan level beban aksial yang sedang.
4. Penggunaan material *pen-binder* baja ataupun plastik dalam pengujian ini memberikan hasil yang relatif sama pada level beban aksial sedang ($0.3P_0$).

8. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Nasional untuk pendanaan yang diberikan pada penelitian ini melalui Program Hibah Strategis Nasional Tahun 2010, DP2M Dikti. Selain itu juga untuk Laboratorium Struktur Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Departemen PU, Jl. Panyauangan Cileunyi Wetan, Kab. Bandung atas bantuan tempat pelaksanaan serta alat pengujiannya.

Daftar Pustaka

- ACI Committee 374, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentar*. ACI 374.1-05.
- Azizinamini, A., and Gosh S.K., 1997, Steel Reinforced Concrete Structures in 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 8 Aug, pp 986-992.
- Bayrak, O., and Sheikh, S.A., 1998, Confinement Reinforcement Design Consideration for Ductile HSC Column, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, Sept, pp 999-1010.
- Imran, I., Hoedajanto, D., Suharwanto., 2005, Beberapa Pelajaran dari Gempa Aceh; Tinjauan Kinerja Dua Bangunan Perkantoran di Banda Aceh, Jakarta: *Seminar Gempa HAKI*, 25 Mei, (ISBN 979-98441-2-6).
- Imran, I., Suarjana, M., Hoedajanto, D., Soemardi, B., Abduh, M., 2006, Beberapa Pelajaran dari Gempa Yogyakarta; Tinjauan Kinerja Struktur Bangunan Gedung, *Jurnal HAKI*, Vol. 7, No. 1, hal. 1-13 (ISSN No. 0216/5457)
- Imran, I., 2007, The 6 March 2007 West Sumatera Earthquake-Lesson Learned and Recommendations, Padang: *Proceeding The International Symposium on Disaster in Indonesia (ISDI): Problem and Solution*, 26-28 Juli.
- Kristianto, A., Imran, I., Suarjana M., 2010, Pengembangan Sistem Elemen Pengikat untuk Meningkatkan Efektivitas Kekangan Kolom Bangunan Tahan Gempa. *Jurnal Teknik Sipil Vol.6 No.1*, April.

- Lukkunaprasit, P., Sittipunt, C., 2003, Ductility Enhancement of Moderately Confined Concrete Tied Column with Hook-Clips, *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 4, July-August, pp. 422-429.
- Moehle J.P., and Cavanagh T., 1985, Confinement Effectiveness of Crossties in RC, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 111. No.10 October.
- Ozcebe, G., and Saatcioglu, M., 1987, Confinement of Concrete Columns for Seismic Loading, *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 4, July-August, pp. 308-315.
- Purwono, R., Tavio, Imran, I., Raka, I.G.P., 2006, *Indonesian Concrete Code for Buildings (SNI 03-2847-2002) with Commentary*, Surabaya, Indonesia: ITS Press.
- Rabbat, B.G., Daniel, J.L., Weinmann, T.L., and Hanson, N.W., 1986, Seismic Behavior of Lightweight and Normal Weight Concrete Columns, *ACI Journal, Proceedings* Vol.83, No.1, Jan-Feb, pp 69-79.
- Razvi S.R., and Saatcioglu, M., 1989, Confinement of Reinforced Concrete Column with Welded Wire Fabric, *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 5, Sept-Oct, pp. 615-623.
- Sakai, K., and Sheikh, S.A., 1989. What Do We Know about Confinement in Reinforced Concrete Column ? (A Critical Review of Previous Work and Code Provision), *ACI Structural Journal*, Vol. 86, No. 2, Mar-Apr. pp. 192-207.
- Saatcioglu, M., and Razvi, S.R., 1992, Strength and Ductility of Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, June, pp. 1590-1607.
- Sheikh, S.A., and Yeh, C., 1990, Tied Concrete Columns under Axial Load and Flexure, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 10, Oct, pp. 2780-2800.
- Tanaka, H., Park, R., and McNamee, B., 1985, Anchorage of Transverse Reinforcement in Rectangular Reinforced Concrete Columns in Seismic Design, *Bulletin, New Zealand National Society for Earthquake Engineering (Wellington)*, Vol. 18, No.2, June, pp 165-190.
- Watson, S., and Park, R., 1994, Simulated Seismic Load Tests on Reinforced Concrete Columns, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. No. 6, June, pp. 1825-1849/120.
- Wehbe, N.I., Saiidi M.S., and Sanders, D.H., 1999, Seismic Performance of Rectangular Bridge Columns with Moderate Confinement, *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 2, Mar.-Apr, pp. 248-258.

