

REKAYASA

**LAPORAN PENELITIAN
HIBAH BERSAING**

Nomor: 005/APHB/UKP/2012



**KINERJA BAJA SIKU SEBAGAI ELEMEN PENGEKANG
EKSTERNAL KOLOM BETON BERTULANG PERSEGI**

Tim Peneliti:

Pamuda Pudjisuryadi, S.T., M.Eng. (NIDN: 0728107502)

Tavio, S.T., M.T., Ph.D. (NIDN: 0027037005)

Dibiayai oleh Kopertis Wilayah VII Jawa Timur, Kementerian Pendidikan dan
Kebudayaan, Tahun Anggaran 2012

Sesuai Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian
Nomor: 0004/SP2H/PP/K7/KL/II/2012 tanggal 9 Pebruari 2012

**UNIVERSITAS KRISTEN PETRA
NOVEMBER 2012**

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN

1. Judul Penelitian : Kinerja Baja Siku Sebagai Elemen Pengekang Eksternal Kolom Beton Bertulang Persegi
2. Ketua Peneliti
- a. Nama Lengkap : Pamuda Pudjisyadi, S.T., M.Eng
 - b. Jenis Kelamin : Laki-Laki
 - c. NIP : 99-037/IV-A
 - d. NIDN : 0728107502
 - e. Strata/Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
 - f. Jabatan Struktural : Kalab. Komputer Teknik Sipil – UK PETRA
 - g. Bidang Keahlian : Rekayasa Struktur
 - h. Fakultas/Program Studi : F.Teknik Sipil dan Perencanaan / Teknik Sipil
 - i. Perguruan Tinggi : Universitas Kristen PETRA
 - j. Telp./Fax/Email : 031-2983399/031-2893392/pamuda@petra.ac.id
 - k. Tim peneliti

No	Nama dan Gelar Akademik	NIDN	Bid. Keahlian	Fak/Program Studi	Perguruan Tinggi
1	Tavio, S.T., M.T., Ph.D.	0027037005	Rekayasa Struktur	F. Teknik Sipil dan Perencanaan	Institut Teknologi 10 Nopember Surabaya

3. Mahasiswa yang terlibat
- a. Jumlah mahasiswa yang terlibat : 0
 - b. Nama dan NRP mahasiswa yang terlibat: -
4. Lokasi Penelitian : Surabaya dan Bandung
5. Kerjasama dengan Institusi lain
- a. Nama Institusi : Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman (Kem. P.U.)
 - b. Alamat : Jl. Panyawungan Cileunyi Wetan, Bandung 40393
6. Waktu penelitian : Tahun ke 1(satu) dari rencana 2(dua) tahun
7. Pembiayaan
- a. Tahun Pertama : Rp. 45.000.000,-
 - b. Tahun Kedua : Rp. 50.000.000,-

Surabaya, 29 November 2012

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Ketua Peneliti,

Ir. Handoko Sugiharto, M.T
(NIP. 84-028/NIDN. 0729015801)

Pamuda Pudjisyadi, S.T., M.Eng.
(NIP. 99-037/NIDN. 0728107502)

Menyetujui,
Ketua LPPM

Prof. Ir. Lilianny Sigit Arifin, MSc., Ph.D
(NIP. 84-011/NIDN. 0707116001)

A. LAPORAN HASIL PENELITIAN

RINGKASAN DAN SUMMARY

Kolom beton bertulang merupakan salah satu bagian vital dari struktur gedung untuk menahan beban gempa. Namun pada kenyataan di lapangan, seringkali disain kolom tersebut tidak memenuhi syarat yang dibutuhkan, sehingga dibutuhkan perkuatan. Dengan banyaknya kebutuhan lapangan untuk perkuatan kolom beton bertulang, salah satu alternatif yang menguntungkan adalah dengan teknik retrofit eksternal. Penelitian ini mempunyai target khusus untuk memberi usulan teknik retrofit eksternal yang efektif, ekonomis, dan mudah dilakukan, untuk kolom beton bertulang. Penelitian awal dilakukan dengan studi pustaka untuk mencari referensi-referensi teknik retrofit eksternal yang sudah dikembangkan. Selanjutnya ditentukan usulan teknik retrofit eksternal yang kemudian diuji dengan percobaan laboratorium. Penelitian ini secara jangka panjang mempunyai tujuan untuk berperan serta dalam mitigasi bencana gempa.

PRAKATA

Kami tim peneliti, pertama-tama mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi yang telah member kesempatan untuk terlibat dalam menyumbangkan waktu dan tenaga untuk Negara pada umumnya, dan masyarakat Teknik Sipil pada khususnya. Melalui program Hibah Bersaing ini, kami mendapatkan banyak manfaat, pengalaman, dan pengetahuan yang berguna, yang mungkin sulit kami dapatkan tanpa adanya hibah ini.

Penelitian kami mengenai teknik retrofit kolom beton bertulang secara eksternal ini, masih berusia dini, dan masih banyak sisi untuk dapat dikembangkan lagi. Skema tahun pertama berupa karakteristik metode retrofit terhadap beban tekan, selanjutnya dilanjutkan untuk pembebanan siklik yang lebih merepresentasikan kondisi bencana gempa. Besar harapan kami, agar kerjasama penelitian ini dapat berlanjut, agar dampak hasilnya menjadi semakin nyata gunanya kepada masyarakat.

Surabaya, 19 November 2012

Ketua tim Peneliti

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN PENELITIAN	i
A. LAPORAN HASIL PENELITIAN	ii
RINGKASAN DAN SUMMARY	ii
PRAKATA.....	iii
DAFTAR ISI	iv
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	12
BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN.....	13
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	17
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN	35
DAFTAR PUSTAKA	viii
LAMPIRAN.....	x
B. DRAF ARTIKEL ILMIAH	
C. SINOPSIS PENELITIAN LANJUTAN	

DAFTAR TABEL

Tabel V-1. Tabel hasil percobaan prediksi kekuatan tekan	21
--	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar I-1 Efek tingkat lunak pada salah satu ruko akibat gempa Nias 2005.....	2
Gambar I-2 Kegagalan kolom karena minimnya sengkang pada gempa Jogja 2006	2
Gambar I-3 Kolom yang lebih lemah dari baloknya, pada gempa Padang 2009	3
Gambar II-1 Metode Steel Plating yang diteliti.....	5
Gambar II-2 Perbandingan respon histeresis : (a) kolom asli dan (b) kolom setelah diretrofit.....	6
Gambar II-3 Peningkatan gaya inersia akibat retrofit <i>steel jacket</i>	6
Gambar II-4 Kurangnya pengekangan dari <i>steel jacket</i> persegi.....	7
Gambar II-5 Detail dari specimen yang diretrofit.	8
Gambar II-6 Peralatan retrofit pada kolom persegi.	10
Gambar II-7 <i>Steel Collar</i> dari pipa kotak yang dibaut dan dilas.	11
Gambar II-8 Gambaran dari <i>Steel Collar</i> solid yang dibaut.	11
Gambar IV-1 Alat tes Tekan.....	14
Gambar IV-2 Gambar skematis specimen tahun 1.	15
Gambar V-1 Ilustrasi model tipikal.	17
Gambar V-2 Daerah yang tidak terkekang efektif (arsir).....	18
Gambar V-3 Mekanisme Kekangan Eksternal pada Kolom Beton Persegi	19
Gambar V-4 Simulasi analitis dari kinerja benda uji yang diusulkan.....	20
Gambar V-5 Benda uji percobaan prediksi kekuatan tekan.	21
Gambar V-6 Prototip Sabuk Siku	22
Gambar V-7 Skema Pengambilan Gambar	23
Gambar V-8 Bidang Kontak Daerah Sudut	23
Gambar V-9 Bidang Kontak Daerah Tengah	23
Gambar V-10 Percobaan bahan bekisting.....	24

Gambar V-11 Bekisting yang sudah diperkuat.	25
Gambar V-12 Tulangan Baja yang dipersiapkan untuk penempelan <i>Strain Gauges</i>	26
Gambar V-13 Pemasangan strain gauges pada tulangan sengkang.	26
Gambar V-14 Pemasangan strain gauges pada tulangan longitudinal.	26
Gambar V-15 Aplikasi Coating untuk pelindung <i>strain gauges</i>	27
Gambar V-16 Bekisting dan tulangan spesimen CS01.	27
Gambar V-17 Bekisting dan tulangan spesimen CS02a.	27
Gambar V-18 Bekisting dan tulangan spesimen CS03a.	28
Gambar V-19 Bekisting dan tulangan spesimen S03.	28
Gambar V-20 Bekisting dan tulangan spesimen S05.	28
Gambar V-21 Contoh pengkodean kabel strain gauges.	29
Gambar V-22 Material pasir dan kerikil yang dipersiapkan.	30
Gambar V-23 Material semen dan bekisting yang dipersiapkan.	30
Gambar V-24 Pengadukan beton basah, dan proses vibrasi beton basah.	30
Gambar V-25 Hasil cor spesimen dan benda uji silinder.	31
Gambar V-26 Hasil cor spesimen dan benda uji silinder setelah mengeras.	31
Gambar V-27 Proses curing spesimen dengan penyiraman air untuk menjaga kelembaban.	32
Gambar V-28 Spesimen (beton dan siku) yang sudah dicat.	32
Gambar V-29 Sabuk siku yang diberi sensor <i>strain gauges</i>	33
Gambar V-30 Spesimen lengkap yang akan diuji laboratorium.	33

BAB I. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Secara geografis Indonesia terletak pada pertemuan empat lempeng tektonik (lempeng Eurasian, Australian, Filipino, dan Pacific). Hal ini membuat Indonesia termasuk salah satu negara dengan resiko gempa tinggi. Kewaspadaan tinggi dibutuhkan agar kerugian karena gempa dapat diminimalkan di negara kita. Pada kenyataannya, masih sering didapatkan kenyataan di lapangan akan banyaknya kerugian karena gempa, yang salah satunya dikarenakan kegagalan dari struktur. Secara khusus, pada struktur beton bertulang seringkali konsep kolom lebih kuat dari balok (*strong column weak beam*) yang diperlukan untuk pengembangan mekanisme pemencaran energi gempa yang stabil, tidak tercapai. Secara tipikal, kelemahan kolom beton bertulang (Liu et.al. 2008) antara lain berasal dari kurangnya sengkang untuk mengekang inti kolom dan mencegah tukul tulangan longitudinal, dan kurangnya sambungan lewatan yang berlokasi pada joint dimana aksi inelastis memerlukan kekuatan lentur tinggi. Ditambah dengan banyaknya bangunan beton bertulang sederhana (*non-engineered buildings*), serta revisi peraturan gempa yang mempunyai *demand* lebih tinggi, perkuatan dari struktur beton bertulang telah menjadi kebutuhan nasional.

Menurut Mander (Mander et.al. 1988), hal terpenting pada disain kolom beton bertulang pada daerah gempa adalah adanya tulangan transversal yang cukup untuk mengekang inti beton, mencegah tekuk tulangan longitudinal, sehingga dapat menghindari kegagalan geser yang getas. Pada kolom beton bertulang yang tidak memenuhi persyaratan diperlukan perkuatan/retrofit. Terdapat berbagai teknik retrofit yang telah dikembangkan, seperti *concrete jacketing*, *steel plating* (Wu et.al. 2003), *steel sheet jacketing* (Chai et.al. 1994, Priestley et.al. 1994, Xiao et.al. 2003, Guo et.al. 2006, Choi et.al. 2010), *fiber-reinforced polymer composite jacketing* (Nesheli et.al. 1992), dan *steel collar jacketing* (Chapman et. al. 2006, Liu et.al. 2008). Secara ideal, teknik retrofit yang efektif harus berkarakter mudah dilaksanakan, tidak memerlukan keahlian khusus, biaya kerja kecil, dan mempunyai hasil efektif. Dari semua alternatif yang ada, metode retrofit eksternal dengan *steel collar* mempunyai karakteristik yang menjanjikan.

Keutamaan Penelitian

Seperti telah diungkapkan di latar belakang, bahwa kerusakan bangunan beton pasca gempa merupakan problem yang tidak dapat dipungkiri. Problem-problem yang diungkapkan para peneliti (Liu et.al 2008, Mander et.al. 1988), tidak terkecuali juga terjadi di Indonesia. Kejadian-kejadian yang teramati pada gedung-gedung di Indonesia akibat gempa akhir-akhir ini, dapat dilihat pada gambar-gambar berikut ini.



Gambar I-1 Efek tingkat lunak pada salah satu ruko akibat gempa Nias 2005



Gambar I-2 Kegagalan kolom karena minimnya sengkang pada gempa Jogja 2006



Gambar I-3 Kolom yang lebih lemah dari baloknya, pada gempa Padang 2009

Pada Gambar I-1, dapat dilihat bahwa efek rusaknya kolom dalam 1 tingkat (*soft story effect*) berpotensi untuk terjadinya kegagalan struktur yang berbahaya dengan runtuhnya 1 tingkat tertentu. Pada Gambar I-2, terlihat salah satu kolom yang sudah gagal pada sebuah bangunan. Tentu saja kegagalan kolom yang umumnya bersifat getas ini sangat berbahaya. Pada Gambar I-3, terlihat penerapan tata cara perencanaan di lapangan masih belum tepat, dimana seharusnya kolom didisain lebih kuat dari baloknya.

Dengan segera berlakunya peraturan gempa yang baru, SNI 03-1726-XXXX, dimana beban gempa rencana rata-rata meningkat dari peraturan sebelumnya (SNI 03-1726-2002), dapat dipastikan struktur-struktur beton bertulang yang tidak memenuhi persyaratan menjadi semakin banyak. Untuk itu, jelas kebutuhan akan perkuatan/retrofit gedung yang ada menjadi sangat tinggi. Karena kebutuhan yang bersifat massal dan cepat, maka diperlukan sebuah teknik retrofit yang tidak mahal, mudah dilakukan, namun tetap efektif manfaatnya. Bila metode retrofit yang diusulkan berhasil, maka penelitian ini akan berkontribusi secara nasional dalam usaha pemerintah untuk meminimalkan kerugian akibat gempa, dan menghemat waktu dan biaya untuk memperbaiki struktur-struktur yang belum memenuhi persyaratan.

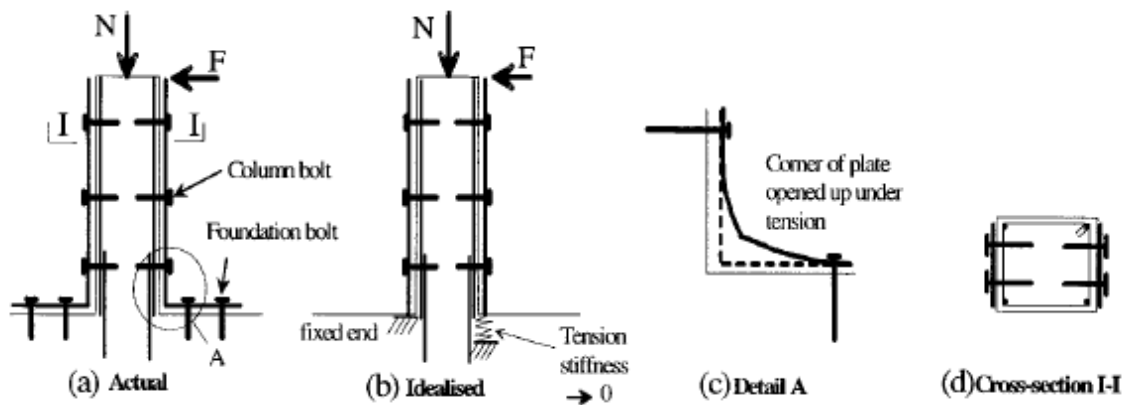
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Umum

Efek pengekangan pada kolom memberikan peningkatan kekuatan secara signifikan. Pengekangan konvensional, dilakukan dengan memberikan sengkang yang cukup pada kolom beton bertulangan. Efek ini telah cukup lama ditemukan dan diteliti. Peneliti-peneliti efek ini antara lain adalah Chan et.al. (1995), Roy et.al. (1965), Soliman et.al (1967), Sargin et.al. (1971), Kent et.al. (1971), Vallenias et.al. (1977), Sheikh et.al. (1980), Mander et.al. (1989), Saatcioglu et.al. (1992). Pada dasarnya semua peneliti menghasilkan kesepakatan umum bahwa beton akan meningkat kekuatannya bila mempunyai kekangan yang baik. Perbedaan antar peneliti satu dengan lainnya hanyalah pada model analitis yang diusulkan untuk memperkirakan peningkatan kekuatan tersebut. Bermula dari pemikiran tersebut, pada peneliti selanjutnya melihat potensi lain dari efek pengekangan. Pengekangan secara eksternal mulai diteliti dengan pemikiran dasar untuk dipakai pada pekerjaan-pekerjaan rehabilitasi dan retrofit, karena relative lebih mudah dilakukan dari teknik retrofit lain (tidak melibatkan pengupasan beton, pemasangan tulangan tambahan, dan pengecoran beton kembali yang memerlukan bekisting). Untuk itu, pada bagian ini akan diuraikan lebih detail mengenai penelitian-penelitian pada bidang eksternal retrofit.

Steel Plating

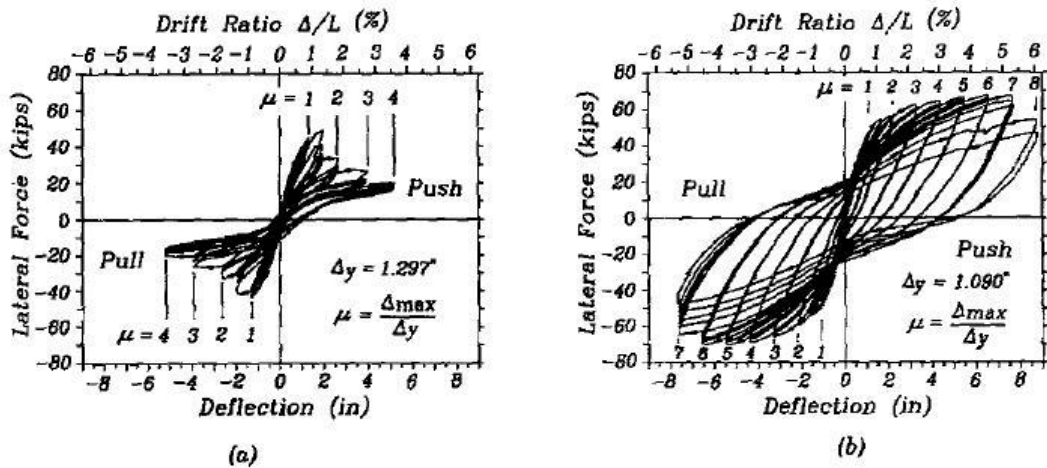
Wu et.al. (2003), meneliti perkuatan eksternal kolom beton bertulang dengan metode *steel plating*. Penelitian ini berangkat dengan pemikiran kurang efektifnya perkuatan-perkuatan eksternal pada penampang persegi dengan metode-metode yang diteliti sebelumnya. Metode baru ini mempunyai konsep meningkatkan kekuatan kolom dengan memanfaatkan aksi komposit beton-*steel plate* yang dihubungkan dengan baut (*shear connector*). Dilaporkan pada percobaan beban monoton siklik, specimen menunjukkan peningkatan kekuatan dan daktilitas. Ilustrasi metode ini dapat dilihat pada Gambar II-1.



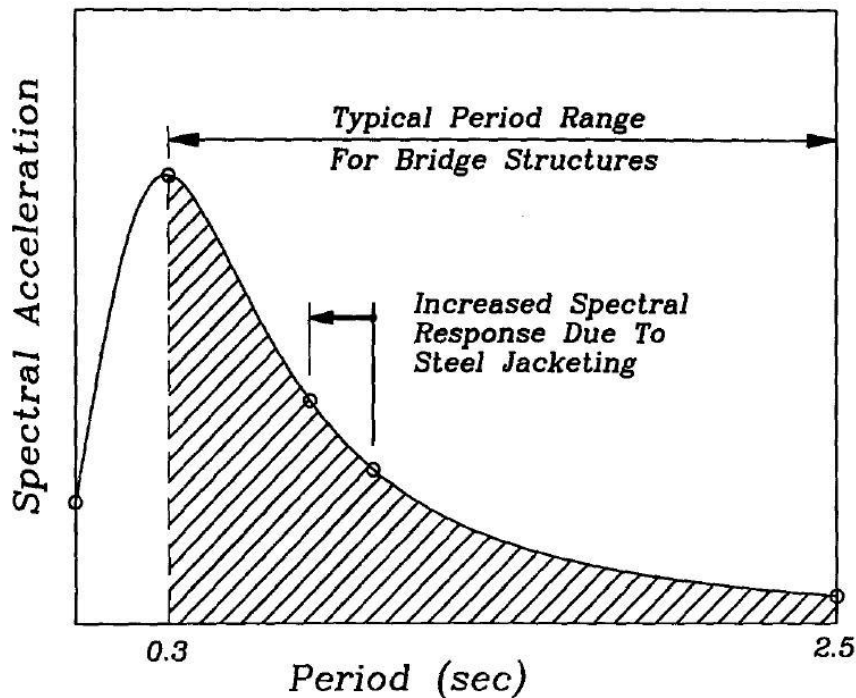
Gambar II-1 Metode Steel Plating yang diteliti

Steel Jacketing

Pendekatan yang paling sering dipakai adalah menggunakan *steel shell jacketing*. *Steel shell jacket* dibuat sedikit lebih besar dari dimensi kolom, dimana gap yang terbentuk akan diisi dengan *grout*. Chai (1991) menunjukkan bahwa *steel jacket* dengan rasio volumetrik sebesar 3,1% dapat meningkatkan daktilitas hingga sebesar 7 dan *drift ratio* sebesar 5%. Tetapi pada penelitian ini, penggunaan steel jacket untuk penampang persegi, belum sepenuhnya dapat diadopsi. Untuk memberikan kekangan efektif, penampang asli persegi diusulkan untuk dijadikan elips. Secara tipikal peningkatan kinerja histeresis kolom setelah diretrofit, dapat dilihat pada Gambar II-2. Akan tetapi, biasanya peningkatan kinerja kolom tersebut disertai dengan peningkatan kekakuan lentur yang drastis. Peningkatan kekakuan ini secara tipikal akan menimbulkan gaya inersia yang lebih besar, karena bergesernya periode natural struktur, seperti terlihat pada Gambar II-3. Chai et.al. (1994) melanjutkan penelitiannya dengan mengembangkan model analitis untuk mensimulasikan respon lentur dari kolom beton bertulang penampang lingkaran setelah diretrofit dengan *steel jacket*. Model yang diusulkan divalidasi dengan percobaan. Pengamatan menunjukkan adanya korelasi baik antara model analitis dengan hasil percobaan.



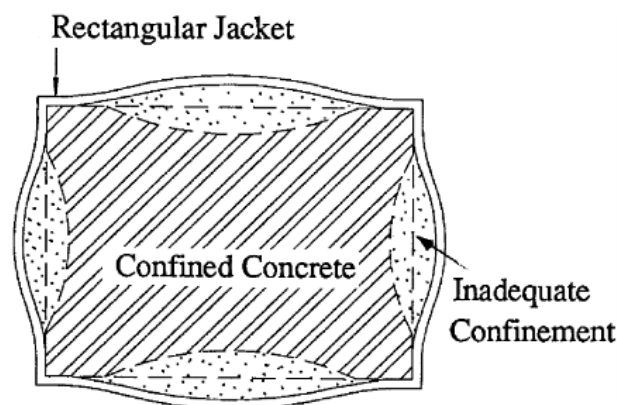
Gambar II-2 Perbandingan respon histeresis : (a) kolom asli dan (b) kolom setelah diretrofit



Gambar II-3 Peningkatan gaya inersia akibat retrofit *steel jacket*.

Priestly et.al. (1994) meneliti hal yang serupa dengan menggunakan *steel jacket* lingkaran dan ellips, untuk memperkuat kolom beton dengan penampang lingkaran dan persegi. Pada penelitian ini, diusulkan metode analitis untuk memperkirakan kekuatan geser dari kolom konvensional dan kolom yang diretrofit. Pada metode ini, kekuatan geser kolom diasumsikan berasal dari kontribusi beton (kunci agregat dan aksi dowel), tulangan transversal (aksi rangka batang), beban aksial (aksi busur), dan *steel jackets*. Sumbangan kekuatan geser dari *steel jacket*, secara konservatif dihitung dengan asumsi bahwa *steel jacket* merupakan

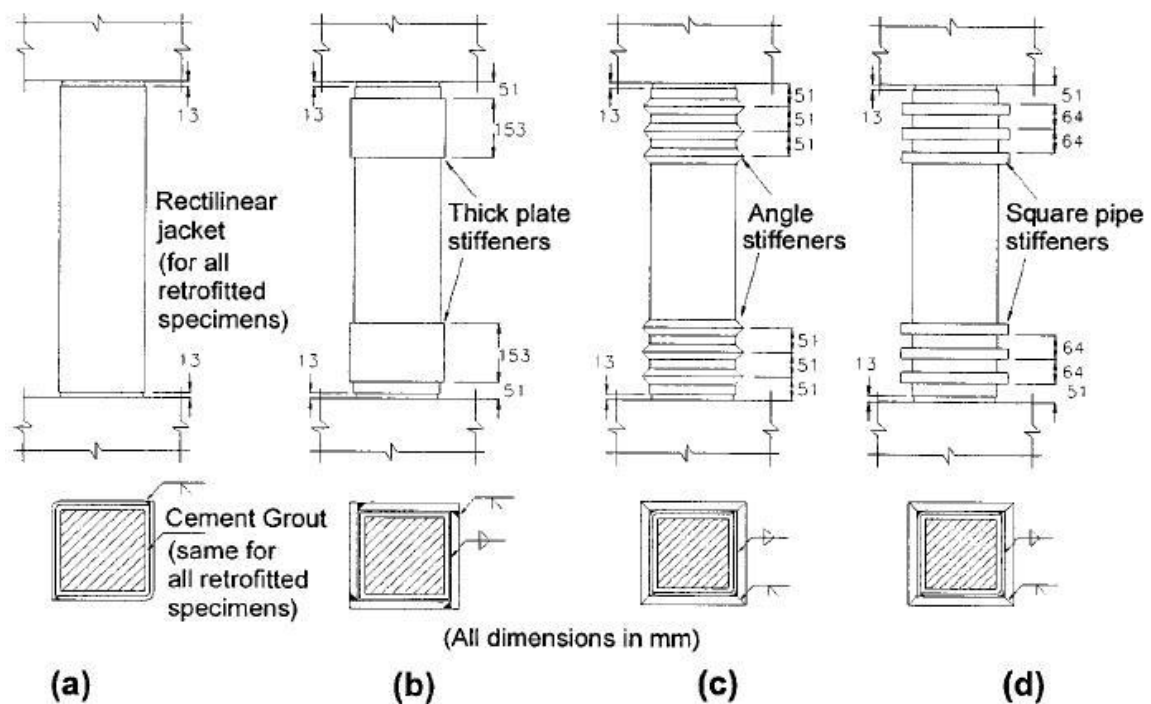
sebuah rangkaian sengkang dengan tebal dan jarak sebesar ketebalan *steel jacket* itu sendiri. Priestley melakukan tes pada 14 specimen kolom dengan beban siklik lateral. Parameter yang diteliti adalah kekuatan tulangan longitudinal, *aspect ratio*, dan bentuk penampang. Pada beton tanpa retrofit, didapatkan daktilitas tidak mencapai 3. Sedangkan pada kolom yang diretrofit, daktilitas meningkat hingga lebih dari 8, dengan *drift ratio* lebih dari 4%. Priestly juga membuat specimen pembandingan, dimana kolom berpenampang persegi diretrofit dengan *steel jacket* persegi juga. Pada specimen ini, tetap tidak menunjukkan peningkatan kinerja yang baik. Kerusakan didominasi dengan kurang kuatnya *steel jacket* untuk memberikan pengekanan, karena lemahnya kekuatan lentur (lihat Gambar II-4).



Gambar II-4 Kurangnya pengekanan dari *steel jacket* persegi.

Xiao et.al. (2003) mengungkapkan bahwa penggunaan *steel jackets* ellips untuk retrofit kolom persegi akan meningkatkan luas penampang secara drastis, dan kurang diinginkan. Pada penelitiannya, sebuah modifikasi dari metode *steel jacket* untuk memperkuat kolom penampang persegi dikembangkan. Metode ini menggunakan *steel sheet jacket* yang diperkaku dengan elemen-elemen tertentu. Lima specimen kolom disiapkan untuk mensimulasikan kolom-kolom yang tidak memenuhi standar pengekanan. Empat specimen lain diperkuat dengan metode seperti terlihat pada Gambar II-5. Keempat specimen diperkuat dengan *steel sheet jacket* persegi untuk peningkatan kekuatan geser. Tiga dari empat specimen tersebut diperkuat lebih lanjut dengan memberikan elemen-elemen pengaku pada bagian sendi plastis. Elemen-elemen pengaku yang digunakan adalah plat baja tebal, baja siku, dan pipa kotak. Xiao melakukan tes dengan pembebanan kombinasi berupa beban aksial konstan (30% dari kapasitas tekan bruto) dan

beban siklik lateral. Spesimen tanpa retrofit menunjukkan kegagalan geser yang getas. Sedikit peningkatan terlihat pada specimen yang diperkuat dengan *steel jacket* tanpa pengaku (seperti pada penelitian Priestley 1994). Tiga specimen dengan tambahan elemen pengaku menunjukkan peningkatan kinerja yang besar. Daktilitas diamati meningkat, dengan *drift ratio* ultimit lebih besar dari 8%.



Gambar II-5 Detail dari specimen yang diretrofit.

Guo et.al. (2006) memodifikasi lebih lanjut teknik retrofit *steel jacket* dengan memberikan gaya prestress pada *steel jacket* tersebut. Enam specimen kolom persegi disiapkan untuk mensimulasi kolom yang tidak memenuhi syarat gempa. Lima diantaranya diretrofit dengan *steel jacket* yang di-*prestressed* dengan berbagai kekuatan. *Steel jacket* yang digunakan berupa sepasang lembaran berbentuk U yang dikencangkan dengan baut mutu tinggi. Pada penelitian ini, ke-4 sudut kolom dimodifikasi menjadi bentuk busur, dan dilapisi dengan plat. Dengan beban kombinasi aksial konstan dan lateral, dapat dilihat bahwa retak geser berkurang seiring dengan meningkatnya gaya prestress. Deformasi ultimit dan daktilitas dari specimen yang diretrofit, meningkat lebih dari 3 kali lipat dibandingkan specimen pembanding.

Choi et.al. (2010) melakukan penelitian dengan dasar pemikiran serupa dengan Guo (Guo et.al. 2006), yaitu menggunakan tegangan lateral untuk

memasang steel jacket. Perbedaan hanya terletak pada teknik prestressing, dan elemen retrofit yang berupa lembaran besar, tidak seperti Guo yang berupa sepasang plat strip berbentuk U. Empat kolom specimen kolom lingkaran diteliti (kolom tanpa retrofit, dan kolom retrofit dengan variasi ketebalan *steel jacket* dan gaya *prestress*). Tes dilakukan dengan beban kombinasi aksial konstan (10% kuat tekan bruto) dan beban statis lateral. Drift lateral meningkat hingga 3% dan 5% untuk retrofit *steel jacket* 1 lapis dan 2 lapis. Tetapi, belum terlihat peningkatan kekuatan tekan secara signifikan, hal ini dikarenakan kurangnya tegangan eksternal yang diberikan pada *steel jacket*.

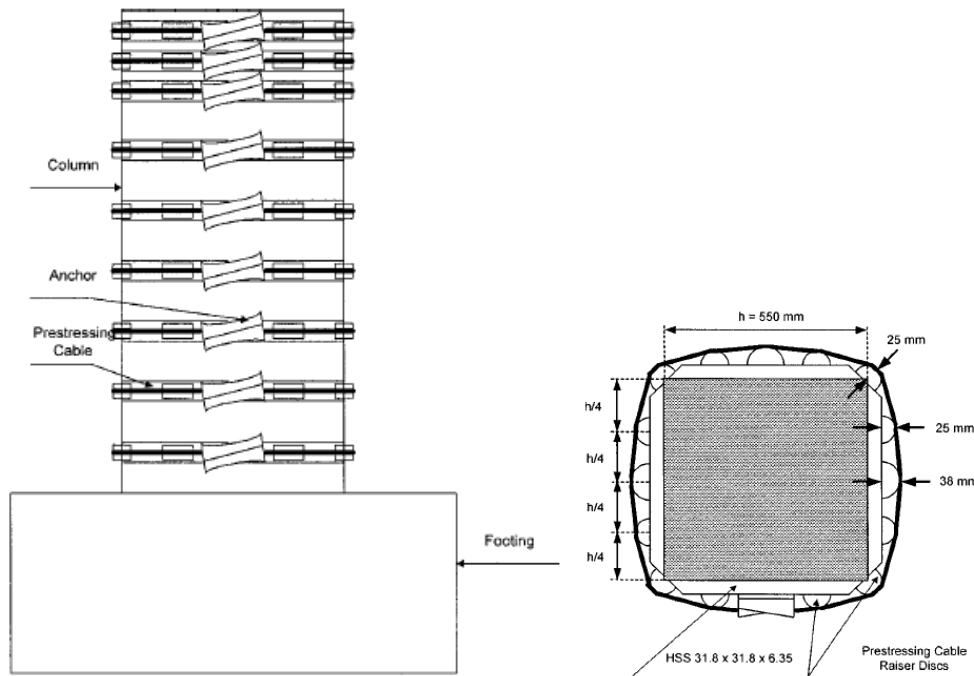
Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Dari teknik retrofit eksternal yang ada, penggunaan *fibre reinforced polymer* (FRP) banyak meningkat, karena tingginya rasio kekuatan terhadap berat material, serta ketahanan terhadap korosi, dan lelah. Nesheli et.al. (1992) meneliti penggunaan FRP ini dengan parameter pengekangan aktif yang dilakukan dengan member gaya *prestress* pada FRP. Penelitian dilakukan pada satu kolom tanpa retrofit, serta 4 kolom lain yang diretrofit memakai FRP dengan berbagai tingkat *prestress*. Beban aksial ditetapkan konstan sebesar 20% kekuatan tekan bruto. Beban lateral siklik dilakukan dengan tiga siklus pada tiap *drift angle* 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; dan 3,0%. Kegagalan geser yang getas terjadi pada specimen tanpa retrofit FRP. Specimen dengan berbagai tingkat gaya *prestress* pada FRP hanya menunjukkan perbedaan pada kerusakan akhir saja. Peningkatan gaya *prestress* harus disertai peningkatan kekakuan lateral untuk dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas secara signifikan.

External Strand Prestressing

Saatcioglu et.al. (2003) mengusulkan retrofit kolom beton bertulang dengan menggunakan *prestressing external strands*. Tujuh kolom jembatan beton skala penuh dites dengan kombinasi gaya aksial konstan dan deformasi lateral bolak-balik yang membesar. Kolom yang diteliti meliputi bentuk lingkaran dan persegi. Untuk retrofit penampang persegi, diperlukan profil-profil tambahan agar tegangan *prestress* dapat bekerja efisien (Gambar II-6). Dari tes, dapat dilihat bahwa retrofit tersebut mampu mengubah perilaku kerusakan dari geser menjadi

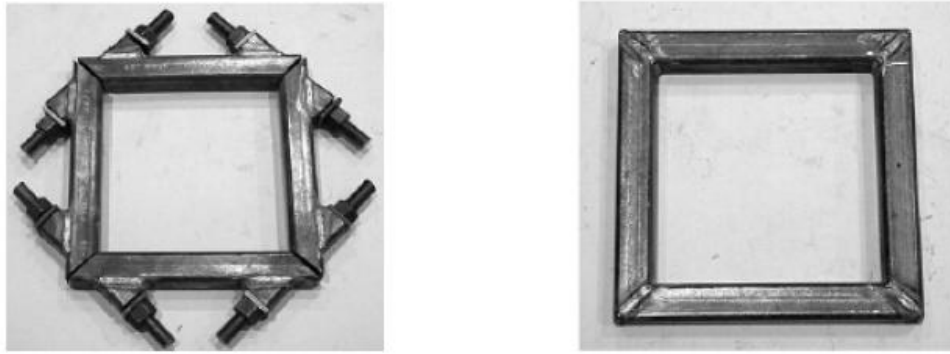
lentur. Penggunaan gaya prestress yang lebih besar dengan spasi lebih kecil, dapat meningkatkan kemampuan berdeformasi.



Gambar II-6 Peralatan retrofit pada kolom persegi.

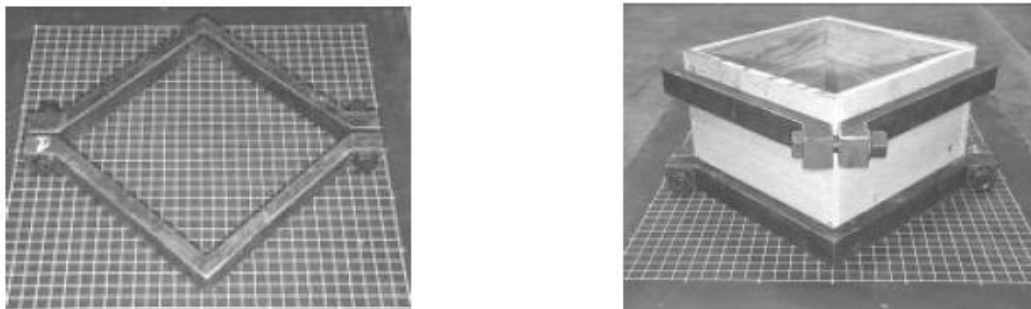
Steel Collar Jacketing

Hussain dan Driver (2001, 2003, 2005a, 2005b) melakukan penelitian pada kolom dengan retrofit *steel collars* yang dibebani secara aksial konsentris, serta kombinasi beban aksial konstan dan lateral. Metode pengekangan ini terbukti merupakan metode rehabilitasi yang efektif dengan peningkatan kekuatan dan daktilitas. *Steel collars* eksternal yang digunakan dikonstruksi dari pipa kotak seperti terlihat pada Gambar II-7. Cara merakit segmen-segmen pipa kotak tersebut adalah dengan menggunakan baut dan las.



Gambar II-7 *Steel Collar* dari pipa kotak yang dibaut dan dilas.

Akan tetapi, pekerjaan las yang diperlukan untuk fabrikasi dan merakit *steel collar* ini membuat proses menjadi kompleks, memakan waktu, dan biaya. Sebuah modifikasi praktis dan ekonomis dikembangkan, dengan mengganti material *steel collar* dengan memotong plat tebal solid menjadi sepasang bentuk L, yang kemudian disambung dengan baut (Gambar II-8). Chapman dan Driver (2006) meneliti metode ini dengan tes pembebanan aksial konsentris dan eksentris, dan melaporkan adanya peningkatan signifikan pada kekuatan dan daktilitas kolom.



Gambar II-8 Gambaran dari *Steel Collar* solid yang dibaut.

State of the Art

Pengusul akan meneliti sebuah teknik varian dari metode eksternal retrofit dengan *steel collar*. Dengan melihat potensi penggunaan lapangan yang harus bersifat massal, elemen *steel collar* dipilih yang ekonomis dan mudah didapat di lapangan. Teknik merakit masih direncanakan dengan menggunakan baut, karena kemudahannya di lapangan. Pada penelitian yang diusulkan, teknik yang akan dipelajari adalah external retrofit pada kolom beton persegi dengan *steel collar* berupa baja siku. Tantangan khusus dari pemilihan elemen ini adalah rendahnya kekuatan baja siku tersebut dibandingkan elemen-elemen yang telah dipakai peneliti-peneliti yang sudah ada.

BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan Khusus

Penelitian ini mengusulkan pengembangan salah satu teknik eksternal retrofit untuk meningkatkan kinerja kolom beton bertulang. Metode yang dipilih adalah dengan memberikan *steel collars* berupa baja siku. Metode ini sangat menjanjikan karena mudahnya material *retrofit* didapatkan, pemasangan yang tidak memerlukan keahlian khusus, dan cukup ekonomis. Namun efektifitas dari metode tersebut harus dipastikan terlebih dahulu melalui serangkaian percobaan. Secara khusus, penelitian ini akan mempelajari hal-hal sebagai berikut :

- Parameter-parameter yang mempengaruhi distribusi tegangan keang pada kolom beton bertulang penampang persegi setelah diretrofit dengan metode yang diusulkan, seperti :
 - Rasio volumetrik baja siku terhadap beton.
 - Jarak pasang dari baja siku
 - Konfigurasi baja siku relatif terhadap sengkang internal
 - *Web stiffeners* dan *dyna bolts* untuk memperkuat siku
- Mengetahui peningkatan dari kapasitas tekan dan daktilitas dari kolom beton bertulang penampang persegi setelah diretrofit dengan metode yang diusulkan.

Manfaat Penelitian

Penelitian ini mempunyai manfaat untuk dapat mempelajari perilaku/kinerja metoder retrofit kolom beton bertulang persegi, yang dilakukan secara eksternal menggunakan elemen sabuk baja siku. Setelah karakteristik diketahui, penelitian ini mempunyai manfaat untuk member solusi mitigasi bencana gempa. Stuktur-struktu beton bertulang yang kolomnya tidak memenuhi persyaratan gempa, dapat diperbaiki dengan metode yang diusulkan ini.

BAB IV. METODOLOGI PENELITIAN

Studi Pustaka

Sebelum melakukan percobaan, langkah pertama penelitian adalah melakukan studi pustaka. Studi pustaka yang sudah dilakukan telah disajikan pada Bab II pada proposal ini. Studi ini berkonsentrasi untuk mempelajari problem-problem yang timbul pada kolom beton bertulang dengan pengekangan yang tidak standar saat menerima beban gempa. Perilaku kolom yang diperkuat dengan teknik-teknik retrofit eksternal yang telah dikembangkan juga dibahas. Studi pustaka ini akan berjalan terus selama dan setelah percobaan sesuai dengan kebutuhan. Luaran yang dihasilkan adalah rangkaian penjelasan ilmiah mengenai problem yang diangkat dan usulan penanggulangannya.

Studi Perilaku Metode Retrofit yang diusulkan

Pada langkah ini, pengusul akan melakukan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga. Langkah ini dilakukan pada awal tahun pertama, dan akan diperteliti pada awal tahun kedua, maupun ketiga masing-masing tepat sebelum mendisain benda uji. Tujuan utamanya adalah untuk mengetahui perkiraan dari perilaku fisik bakal benda uji, sehingga parameter-parameter yang akan dipelajari dapat lebih fokus dan logis dilaksanakan. Luaran yang dihasilkan adalah serangkaian *output* numerik hasil simulasi program yang dapat mendukung pengambilan keputusan dalam disain benda uji.

Disain Specimen untuk tes Tekan Statis Monotonik

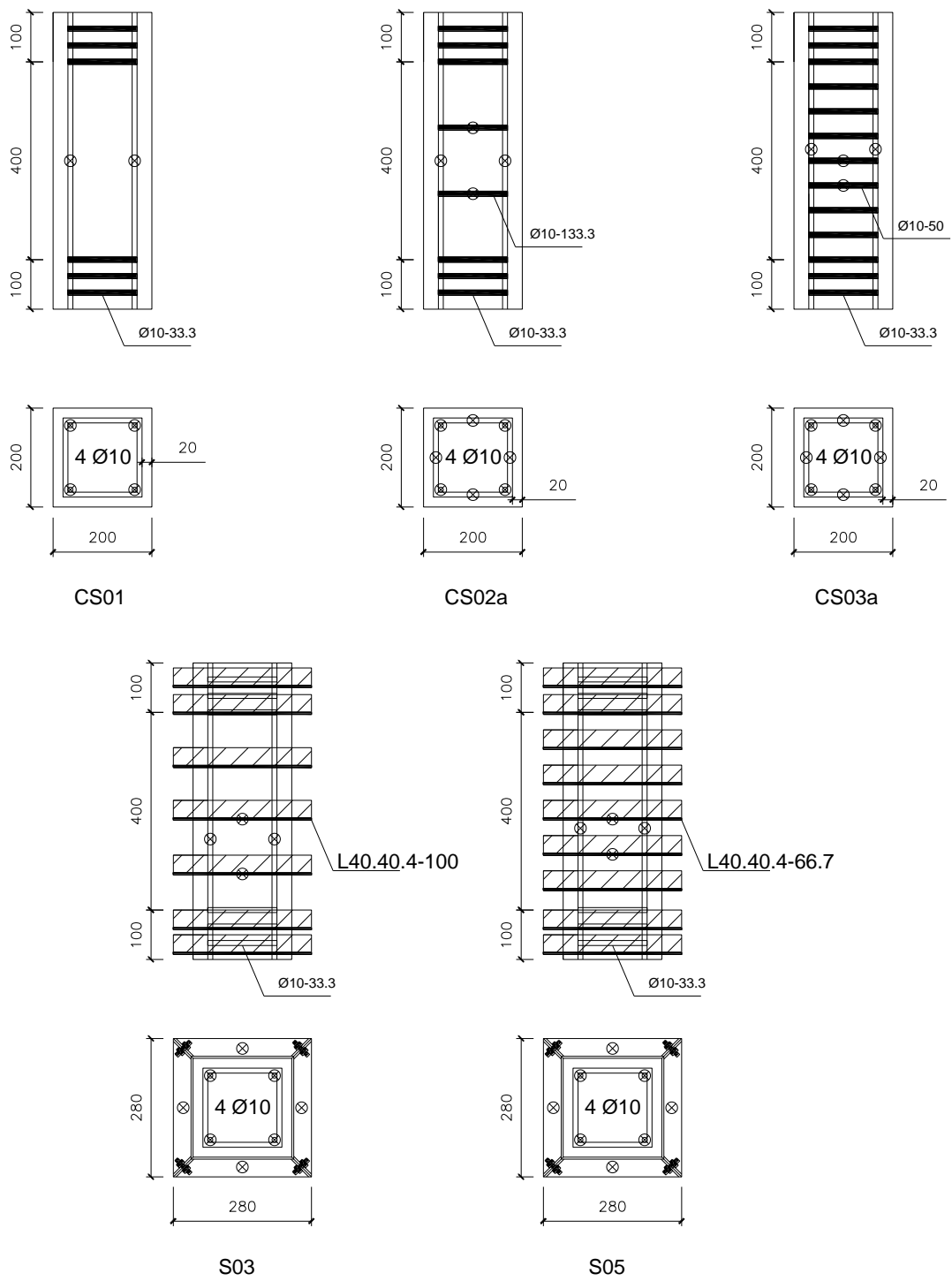
Karena sifat usulan yang dikembangkan bersifat awal, maka pada penelitian ini, akan dipelajari sifat mendasar dari kolom yaitu tekan. Percobaan tekan dilakukan secara statik – monotonik menggunakan alat uji tekan universal pada laboratorium struktur Puslitbang Permukiman (Gambar IV-1). Langkah ini dipisahkan menjadi 3 tahap, masing-masing pada tahun pertama, kedua, dan ketiga. Disain dilakukan dengan pertimbangan ilmiah dari studi pustaka serta simulasi metode elemen hingga. Kemudian variabel-variabel utama yang diteliti akan ditetapkan. Dimana variabel tersebut adalah rasio volumetrik elemen

pengekang (*steel collar*) terhadap volume beton, jarak pasang elemen pengekang, efek pengaku tambahan berupa plat badan, dan baut (*dynabolt*). Luaran yang diharapkan pada tahap ini adalah terdapatnya disain specimen yang efektif dan efisien untuk menangkap perilaku metode retrofit yang diusulkan.



Gambar IV-1 Alat tes Tekan

Pada penelitian tahun pertama ini, tes tekan akan dilakukan pada 5 benda uji. Benda uji tahap pertama ini berfungsi untuk menjadi acuan karakteristik metode retrofit yang diusulkan untuk kondisi pembebanan tekan konsentris. Spesimen-spesimen tahap pertama ini dapat dilihat pada Gambar IV-2. Tahap ke-2 (pada tahun kedua), pengujian dilakukan untuk tahap pembebanan lateral siklik yang lebih merepresentasikan kondisi bencana gempa.



Gambar IV-2 Gambar skematis spesimen tahun 1.

Pembuatan Fisik Benda Uji

Setelah benda uji didisain dengan seksama, pembuatan dilakukan sesuai aturan yang berlaku. Mutu beton didisain dengan deviasi sekecil mungkin, dan pada setiap mix beton, akan dibuat benda uji silindernya. Pada tahap ini pula, instrumen-instrumen pengukur (*strain gauges*) juga dipasang pada lokasi tulangan dan sabuk siku baja yang akan dipelajari perilakunya.

Tes Benda Uji

Benda uji yang telah disiapkan, akan dikirim ke laboratorium balai struktur dan bahan bangunan Puslitbang Peremukiman di Bandung. Pengujian dilakukan di laboratorium ini karena karakteristik daktilitas pasca kekuatan maksimum, baru dapat dilakukan oleh alat yang ada di laboratorium tersebut. Luaran yang dihasilkan adalah serangkaian data akurat (hubungan tegangan, regangan, beban, displacement, pola kerusakan, dan lain-lain), sehingga dapat dilakukan analisa dengan baik. Setiap tes benda uji direncanakan untuk didokumentasikan untuk merekam kondisi percobaan selengkap mungkin.

Analisis, Pembuatan Report, dan Publikasi

Semua data yang telah didapatkan akan dianalisa dengan seksama. Hasil temuan ilmiah ini dilaporkan secara berkala (sesuai jadwal yang ditetapkan dikti), serta dipublikasikan untuk kepentingan bersama. Publikasi akan ditargetkan minimal ke jurnal nasional terakreditasi (Civil Engineering Dimension – Universitas Kristen PETRA).

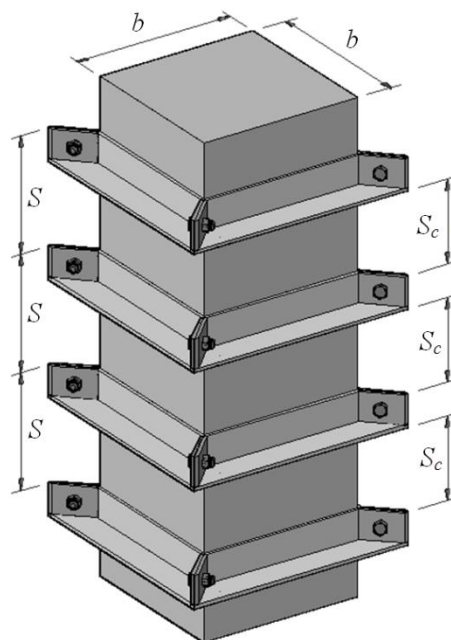
BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Studi Pustaka

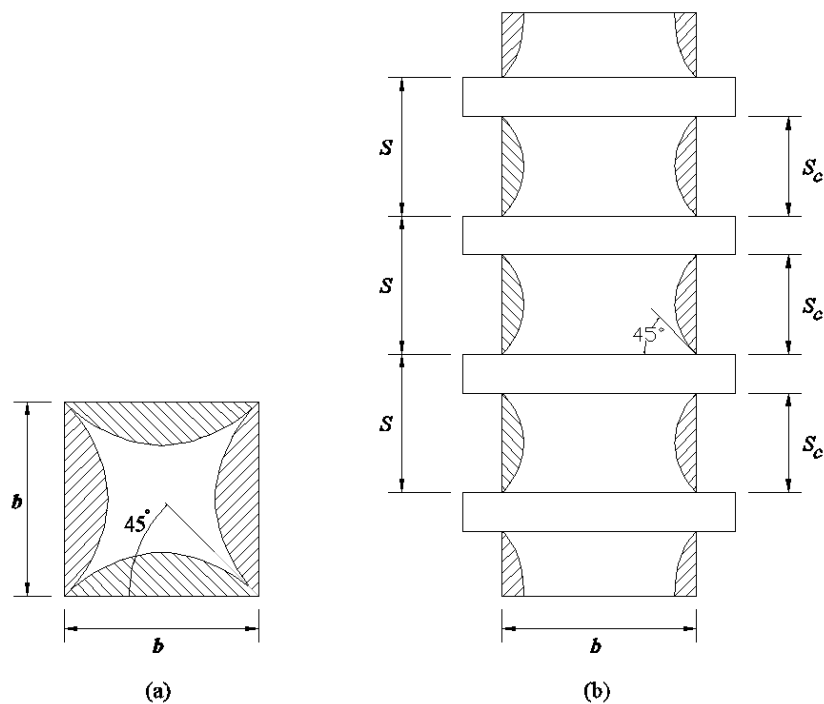
Studi pustaka dilakukan dengan seksama untuk mempelajari perilaku metode retrofit yang diusulkan. Hasil dari tahap ini adalah berupa usulan model analitis dari metode yang diusulkan. Model analitis ini rencana akan dipublikasikan pada sebuah jurnal. Proses sudah dilakukan hingga tahap draft jurnal, yang akan dilengkapi dengan hasil percobaan uji laboratorium. Model analitis yang diuraikan sebagai berikut.

Metode Analitis yang Diusulkan

Tinjau sebuah prototip model retrofit kolom beton bertulang persegi seperti terlihat pada Gambar V-1. Pada gambar tersebut, berturut-turut b , S , dan S_c adalah dimensi kolom, jarak sabuk siku, dan jarak bersih sabuk siku. Problem utama dalam pengekangan kolom persegi, adalah ketidakseragaman kondisi tegangan kekang, baik dalam arah potongan horizontal, maupun potongan vertikal, seperti terlihat pada Gambar V-2.



Gambar V-1 Ilustrasi model tipikal.



Gambar V-2 Daerah yang tidak terkekang efektif (arsir).

Pada kolom persegi terdapat bagian yang tidak efektif terkekang, dan berbentuk parabola. Dengan memperhitungkan ketidakefektifan di arah horizontal maupun vertikal, diusulkan untuk menggunakan luas penampang efektif terkekang ekuivalen rata-rata sebesar A_e sesuai Persamaan 1 dan 2 sebagai berikut:

$$A_e = A_c \left(1 - \frac{A_{par}}{A_c} \right) \left(1 - \frac{S_c}{2b} \right)^2 \quad (1)$$

$$A_{par} = \frac{2}{3} b^2 \quad (2)$$

dimana A_c : area dari inti terkekang, dalam kasus kekangan eksternal sama dengan area bruto kolom.

Lebih lanjut, pada metode ini A_e dipergunakan untuk menghitung factor efektifitas pengekangan ke yang merupakan faktor untuk mengoreksi tegangan kekang uniform (f_l) karena sifat ketidakseragaman distribusi tengangan kekang tersebut. Tegangan terkoreksi ini dinamakan tegangan kekang uniform efektif f_{le} . Setelah tegangan terkoreksi diketahui, prediksi kekuatan kolom dapat dilakukan menggunakan pendekatan-pendekatan yang sudah diteliti pada literatur lain. Persamaan 3, dan 4 merupakan definisi ke dan fle yang disebut di atas.

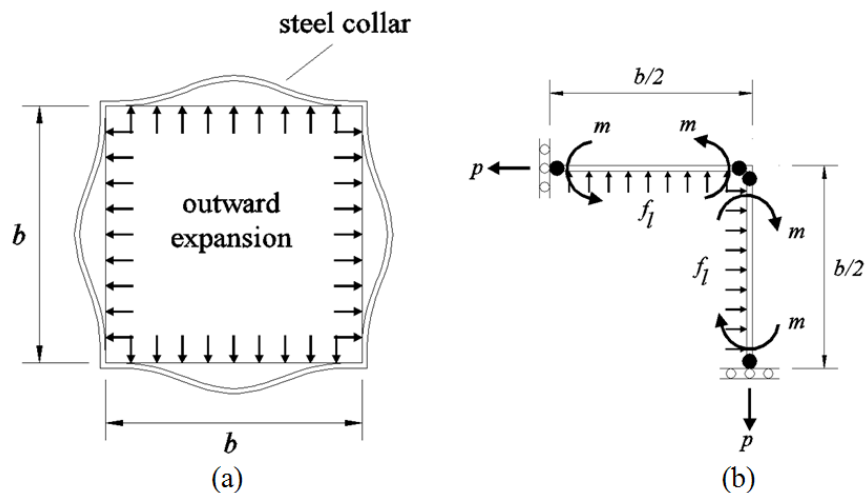
$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (3)$$

$$f_{le} = k_e f_l \quad (4)$$

Pada persamaan 4, tegangan kekang uniform, f_l , pada metode yang diusulkan inilah yang cukup rumit analisisnya, dan merupakan hal yang relatif baru. Untuk mempelajari penurunan analisa f_l ini, dapat dimulai dengan memperhatikan sebuah penampang beton persegi yang dikekang secara eksternal, dan mengalami regangan ekspansi lateral, akibat beban tekan, seperti terlihat pada Gambar V-3(a). Dengan asumsi mekanisme simetris, dan elemen sabuk siku gagal plastis pada sudut dan tengah sisi kolom, dapat dilihat kesetimbangan gaya yang terjadi seperti pada Gambar V-3(b). Dengan prinsip kesetimbangan, dapat diperlihatkan gaya aksial p dan momen m yang terjadi pada sabuk siku, sebagai berikut :

$$p = f_l \frac{b}{2} S \quad (5)$$

$$m = f_l \frac{b^2}{16} S \quad (6)$$



Gambar V-3 Mekanisme Kekangan Eksternal pada Kolom Beton Persegi

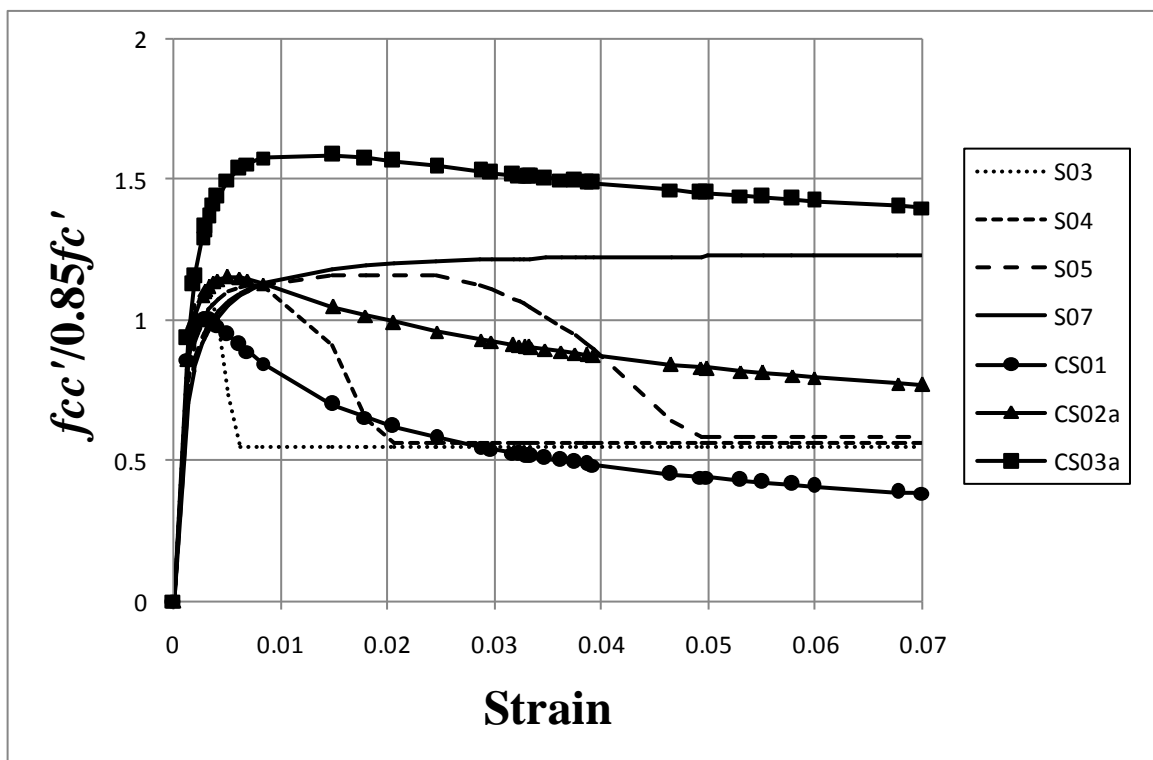
Dengan memperhatikan prinsip gagal kombinasi aksial-lentur dari elemen baja, besar tegangan kekang lateral uniform, f_l , dapat dihitung berdasarkan Persamaan 7 dan 8 berikut ini :

$$\frac{p}{\phi \cdot p_n} + \frac{8}{9} \frac{m}{\phi \cdot m_n} = 1 \rightarrow \text{untuk } \frac{p}{\phi \cdot p_n} \geq 1.0 \quad (7)$$

$$\frac{p}{2\phi \cdot p_n} + \frac{m}{\phi \cdot m_n} = 1 \rightarrow \text{untuk } \frac{p}{\phi \cdot p_n} < 1.0 \quad (8)$$

Pada Persamaan tersebut, p_n , dan m_n adalah kapasitas aksial nominal dan momen nominal dari elemen sabuk siku yang dipakai yang dapat dihitung berdasarkan standar baja struktur yang berlaku. Sedangkan ϕ merupakan faktor reduksi, dimana diambil sama dengan satu untuk sebuah kasus analisa kekuatan.

Adapun model analitis yang diusulkan ini, dapat digunakan untuk memprediksi hasil kinerja dari spesimen-spesimen yang akan diuji laboratorium. Hasil dari simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar V-4. Dalam gambar dapat dilihat bahwa kekangan dengan sabuk eksternal baja, tidak terlalu efektif dalam meningkatkan kekuatan (tidak seefektif sengkang gempa konvensional), namun dapat meningkatkan daktilitas dengan baik (mempunyai kemampuan deformasi yang baik, lihat sumbu horizontal). Pada gambar, ditambahkan simulasi spesimen dengan 4 serta 7 sabuk siku (S04 dan S07).



Gambar V-4 Simulasi analitis dari kinerja benda uji yang diusulkan.

Prediksi kekuatan puncak telah dilakukan, dengan menggunakan tiga benda uji berupa kolom berukuran 15x15x45 cm³ (Gambar V-5). Spesimen dibedakan dalam penggunaan jumlah sabuk siku. Siku yang digunakan sama, yakni siku

40.40.4, sedangkan beton berkekuatan $f_c'=24,6$ MPa (standar deviasi 1,2MPa). Pengujian tekan dilakukan di laboratorium Beton dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil – ITS. Sesuai hipotesa awal, pada bagian yang dikekang sabuk siku mengalami kerusakan yang relatif kecil, karena besarnya pengekangan di sana. Kekuatan yang terukur pada benda uji kolom 1, 2, dan 3, berturut-turut didapatkan $f_c'=23,6$ MPa, 24,7 MPa, dan 26,8 MPa. Sebagai referensi kekuatan kolom tanpa tulangan, pada umumnya diambil 85% kekuatan benda uji silinder. Terhadap referensi tersebut berarti terdapat peningkatan kekuatan spesimen sebesar 12,6%, 18,2%, 28,4% untuk spesimen 1, 2, dan 3. Sedangkan error antara prediksi kekuatan secara analitis terhadap hasil percobaan tidak mencapai 1% dari semua spesimen. Hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel V-1.



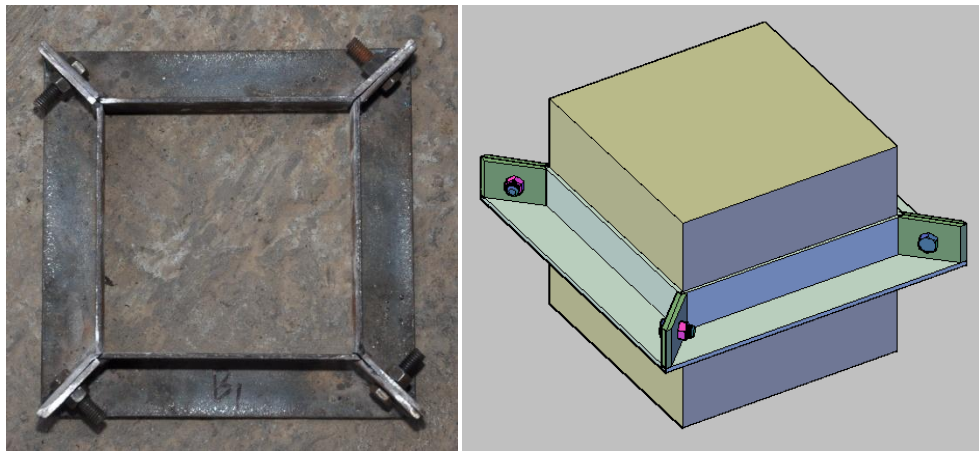
Gambar V-5 Benda uji percobaan prediksi kekuatan tekan.

Tabel V-1. Tabel hasil percobaan prediksi kekuatan tekan

Specimen	Column A	Column B	Column C
In-place strength f_{c0}' (MPa)	20.9		
Experimental, f_{cc}' -ex (MPa)	23.6	24.7	26.8
Analytical, f_{cc}' -an (MPa)	23.7	24.5	27.0
Error (%)	0.42	0.81	0.75
f_{cc}' -ex/ f_{c0}' (%)	12.6	18.2	28.4
f_{cc}' -an/ f_{c0}' (%)	12.8	17.1	29.3

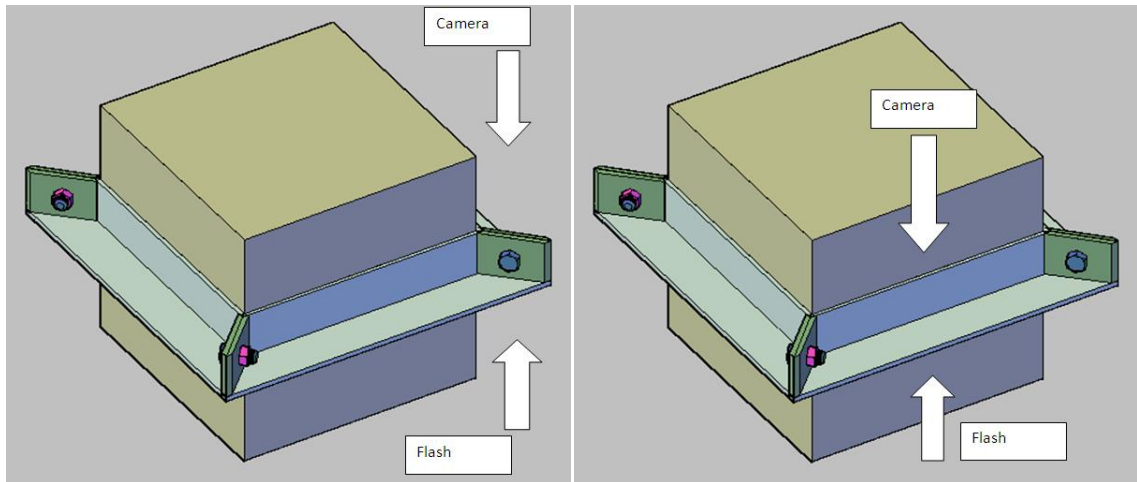
Pembuatan Prototip Sabuk Siku yang akan Digunakan

Sebelum melakukan percobaan dengan skala sebenarnya, sabuk siku sebagai elemen pengekang eksternal percobaan ini, perlu diteliti kelayakannya. Untuk itu, peneliti berinisiatif membuat prototip terlebih dahulu untuk dicoba awal, agar dapat dianalisa kendala-kendala apa saja yang akan dihadapi. Prototip akan dibuat dari siku 40.40.4, dan berukuran 15x15 cm², dengan tujuan dapat dicoba untuk dikekang pada benda uji silinder kubus standar. Secara riil dan skematis, bentuk prototip dapat dilihat pada Gambar V-6.



Gambar V-6 Prototip Sabuk Siku

Kemudian untuk meneliti kehandalan kekangan-nya, prototip yang sudah dipasang difoto pada bagian sudut dan tengah, serta diberi cahaya pada sisi berlawanan. Tujuannya adalah untuk melihat kualitas dari bidang kontak yang terjadi antara beton dan sabuk siku. Skema pengambilan gambar dapat dilihat pada Gambar V-7. Pada daerah sudut, gambar bidang kontak dapat dilihat pada Gambar V-8. Dapat dilihat bahwa pada kontak daerah sudut, cahaya dari bawah sama sekali tidak ada yang terlihat, artinya bidang kontak antara beton dan baja siku telah sempurna dengan pengencangan baut. Pada gambar, juga terlihat celah cahaya kecil, namun bukan berasal dari bidang kontak beton dan sabuk siku, tetapi berasal dari bidang kontak antara 2 plat sudut sambungan, antara ke-2 sisi sabuk siku yang disambung. Meskipun secara teoritis tidak berhubungan dengan kekuatan kekangan ke beton, hal ini dapat disempurnakan dengan membuat prototip sabuk siku yang lebih rapi.



Gambar V-7 Skema Pengambilan Gambar



Gambar V-8 Bidang Kontak Daerah Sudut



Gambar V-9 Bidang Kontak Daerah Tengah

Sedangkan bidang kontak bagian tengah, dapat dilihat pada Gambar V-9. Pada gambar tersebut juga terlihat, bahwa ada cahaya yang lewat, tetapi sangat redup. Hal ini menunjukkan bidang kontak sudah rapat, tetapi tidak sempurna seperti daerah sudut. Hal ini memang sudah diantisipasi, dimana secara teori, pada kasus pengekanan penampang beton persegi, daerah tengah ini memang dinyatakan tidak efektif (lihat area parabola terarsir pada Gambar V-2).

Percobaan Cor Kolom Ukuran 20x20x60 cm³

Selain pembuatan prototip sabuk siku, dilakukan juga percobaan awal cor dengan ukuran kolom yang akan dites sesungguhnya. Tujuannya adalah untuk melihat toleransi perubahan bentuk dari beton segar menjadi beton keras. Karena modul sabuk siku ini tidak akan bekerja baik jika terlalu longgar dibandingkan betonnya. Percobaan ini dilakukan dengan mengecor beton segar (mutu $f_c'=20\text{MPa}$) dengan menggunakan acuan bekisting menggunakan multiplex yang cukup tebal (12mm) dan dipaku rapat pada sambungan-sambungannya. Gambar acuan/bekisting yang sudah dicor ini dapat dilihat pada Gambar V-10. Dapat dilihat bahwa pada daerah sambungan bekisting, terdapat rembesan beton segar yang sangat minim. Hal ini sebaiknya diperbaiki dengan membuat bekisting yang diperkaku dengan kayu-kayu yang lebih kuat.



Gambar V-10 Percobaan bahan bekisting

Adapun hasil beton keras, sebagian besar menghasilkan sisi-sisi yang sudah presisi sebesar 20cm. Namun tetap saja, ada beberapa bagian yang tidak presisi (terburuk berukuran 19,8mm), hal ini dicurigai karena bentuk bekisting awal, dimana kayu multiplex tidak sempurna lurus juga. Untuk percobaan sesungguhnya, tentu diupayakan mencari bekisting dengan multiplex yang lebih baik, dan diperkaku dengan kayu seperti yang dijelaskan sebelumnya. Bentuk bekisting ini dapat dilihat pada Gambar V-11. Variasi ukuran sisi beton keras, sudah pasti tidak akan sempurna. Untuk toleransi yang tidak terlalu besar, hal ini tidak bermasalah, karena pengekangan eksternal tetap dapat dilakukan dengan mengencangkan baut sudut dari sabuk siku. Yang menjadi catatan adalah, sabuk siku yang dibuat, harus berukuran sama atau sedikit lebih kecil dari ukuran beton. Sehingga pembuatan prototip sabuk siku, dapat dilakukan setelah mengetahui ukuran beton kerasnya.



Gambar V-11 Bekisting yang sudah diperkuat.

Pembuatan Benda Uji

Pekerjaan dimulai dengan mempersiapkan permukaan datar pada tulangan-tulangan baja untuk lokasi penempelan *strain gauges*. Hal ini dilanjutkan dengan penempelan dan pemberian coating pada *strain gauges* itu sendiri. Setelah itu, pekerjaan dilanjutkan dengan perakitan tulangan baja, untuk keperluan cor pada acuan cor yang telah dipersiapkan pada langkah sebelumnya. Kabel-kabel *strain gauges* harus diberi kode secara jelas, agar setelah selesai cor, tidak terdapat

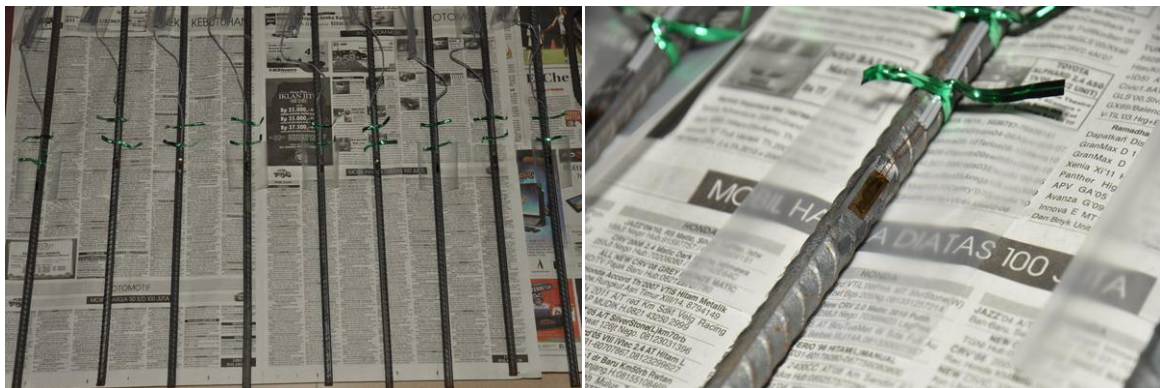
kebingungan mengenai posisi masing-masing kabel yang sudah tertanam dalam beton yang mengeras. Pekerjaan persiapan ini dapat dilihat pada Gambar V-12 sampai dengan Gambar V-21.



Gambar V-12 Tulangan Baja yang dipersiapkan untuk penempelan Strain Gauges.



Gambar V-13 Pemasangan strain gauges pada tulangan sengkang.



Gambar V-14 Pemasangan strain gauges pada tulangan longitudinal.



Gambar V-15 Aplikasi Coating untuk pelindung strain gauges.



Gambar V-16 Bekisting dan tulangan spesimen CS01.



Gambar V-17 Bekisting dan tulangan spesimen CS02a.



Gambar V-18 Bekisting dan tulangan spesimen CS03a.



Gambar V-19 Bekisting dan tulangan spesimen S03.



Gambar V-20 Bekisting dan tulangan spesimen S05.



Gambar V-21 Contoh pengkodean kabel strain gauges.

Pekerjaan cor dilakukan dalam 1 hari, dengan menggunakan material pasir, krikil, dan semen yang identik yang didapatkan melalui 1 vendor toko material. *Mix design* beton dilakukan dengan metode DOE (*Department of Environment*) yang merupakan metode praktis yang sudah lama digunakan di Indonesia. Untuk kebutuhan percobaan, digunakan standar deviasi yang kecil (1 MPa) dari kuat karakteristik beton $f_c' = 20$ MPa yang direncanakan. *Slump* direncanakan cukup besar (100mm) untuk memudahkan pekerjaan. Untuk memperkecil kemungkinan kropos, pada beton segar juga dilakukan vibrasi. Untuk kontrol mutu beton, telah dibuat juga benda uji silinder standar dari beton segar yang sama dengan yang digunakan pada spesimen. Dokumentasi pengecoran ini, dapat dilihat pada Gambar V-22 sampai dengan Gambar V-25 Hasil cor spesimen dan benda uji silinder.



Gambar V-22 Material pasir dan kerikil yang dipersiapkan.



Gambar V-23 Material semen dan bekisting yang dipersiapkan.



Gambar V-24 Pengadukan beton basah, dan proses vibrasi beton basah.



Gambar V-25 Hasil cor spesimen dan benda uji silinder.

Hasil cor beton yang sudah mengeras dapat dilihat pada Gambar V-26. Beton yang sudah mengeras ini harus dirawat (proses *curing*) agar tidak mengalami penguapan air berlebihan pada proses hidrasinya, yang dapat menimbulkan retak. Spesimen diletakkan di lokasi yang tidak terkena matahari secara langsung, serta dibungkus plastik terpal. Penyiraman juga dilakukan agar proses *curing* semakin optimal (Gambar V-27).



Gambar V-26 Hasil cor spesimen dan benda uji silinder setelah mengeras.



Gambar V-27 Proses curing spesimen dengan penyiraman air untuk menjaga kelembaban.

Setelah benda uji/spesimen berusia cukup, spesimen mulai dicat dengan cat tembok putih, agar ketika diuji tekan, mekanisme keretakan dapat dilihat dengan jelas (Gambar V-28). Setelah proses pengecatan, sabuk siku baja yang sudah dipersiapkan dapat mulai diberi strain gauge (Gambar V-29). Benda uji yang siap diuji laboratorium, dapat dilihat pada Gambar V-30.



Gambar V-28 Spesimen (beton dan siku) yang sudah dicat.



Gambar V-29 Sabuk siku yang diberi sensor *strain gauges*.



Gambar V-30 Spesimen lengkap yang akan diuji laboratorium.

Hasil Uji Laboratorium

Spesimen uji yang telah siap ini telah dikirim ke Balai Struktur dan Bahan Bangunan (Puslitbang Permukiman – Kementrian PU) pada tanggal 22 Oktober 2012. Namun karena kepadatan jadwal dari laboratorium tersebut, sangat disayangkan pengetestan masih belum dapat dilakukan. Pengetestan sudah

direncanakan dengan matang (sudah ada kontrak pekerjaan), dan akan segera dilakukan jika jadwal sudah memungkinkan.

Hasil Yang Sudah Dicapai

Adapun hasil-hasil yang telah dicapai, dapat dilihat pada poin-poin berikut di bawah ini:

- Pengembangan model analitis dari metode yang diusulkan
 - Sudah selesai, hasilnya dimasukkan pada draft jurnal nasional terakreditasi, dan siap untuk diverifikasi dengan hasil uji laboratorium
- Pembuatan prototipe sabuk baja siku sebagai elemen pengekang
 - Sudah jadi, dengan hasil pengekangan seperti yang diharapkan.
- Pembuatan benda uji kolom dengan sabuk siku sebagai elemen pengekang
 - Sudah jadi, namun uji spesimen masih menunggu jadwal pihak laboratorium (sudah ada surat kontrak pengujian).
- Publikasi ke Jurnal Nasional Terakreditasi
 - Sudah ada disubmit ke Civil Engineering Dimension – Universitas Kristen PETRA

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari serangkaian penelitian yang telah dilakukan, beberapa poin penting dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Metode retrofit dengan pengekangan kolom beton bertulang secara eksternal menggunakan sabuk baja siku mempunyai dapat dilakukan.
2. Simulasi analitis menunjukkan bahwa metode ini dapat meningkatkan baik kekuatan dan daktilitas tekan dari spesimen kolom beton bertulang.

Adapun saran yang dapat dilakukan untuk penelitian kelanjutan adalah sebagai berikut:

1. Mempertajam verifikasi metode yang diusulkan dengan pembebanan yang bersifat lateral dan siklik, untuk merepresentasikan beban gempa.

DAFTAR PUSTAKA

- Chai Y.H., "Steel Jacketing of Circular Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Flexural Performance," PhD thesis, University of California, San Diego, Calif, 1991.
- Chai, Priestley, Seible, "Analytical Model For Steel Jacketed Rc Circular Bridge Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol.120., no.8, August 1994, pp.2358-2376
- Chan W.W.L., "The Ultimate Strength and Deformation of Plastic Hinges in Reinforced Concrete Frameworks," *Magazine of Concrete Research* (London), V.7., No.21, Nov.1955, pp. 121-132.
- Chapman J.R., Driver R.G., "Behaviour of Collared Concrete Columns Under Concentric and Eccentric Loads," *Structural Engineering Report 263*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta. January 2006. 140 pp.
- Choi E., Chung Y.S., Park J., Cho B.S., "Behavior Of Reinforced Concrete Columns Confined By New Steel-Jacketing Method," *ACI Structural Journal*, V.107., no.6, Nov-Dec 2010, pp.654-662.
- Guo, Z.X, Zhang, J., Yun, Z., "Experimental Study On A New Retrofitted Scheme For Seismically Deficient Rc Columns," *Proceedings : 4th International Conference on Earthquake Engineering*, Taipei, Taiwan – 2006, paper no.109.
- Hussain M.A., Driver R.G., "Finite Element Study on the Strength and Ductility of Externally Confined Rectangular and Square Concrete Columns," Proceedings of Canadian Society for Civil Engineering Annual Conference, May 30-June 2, 2001, Victoria, British Columbia, Canada.
- Hussain M.A., Driver R.G., "Behaviour of Externally Confined Rectangular and Square Concrete Columns under Extreme Lateral Cyclic Loading," Proceedings of 1st Conference on Response of Structures to Extreme Loading, August 3-6, 2003, Toronto, Ontario, Canada.
- Hussain M.A., Driver R.G., "Experimental Investigation of External Confinement of Reinforced Concrete Columns by HSS Collars," *ACI Structural Journal*, V.102, 2005a, No.2:242-251.
- Hussain M.A., Driver R.G., "Seismic Rehabilitation of Reinforced Concrete Columns through Confinement by Steel Collars," *Structural Engineering Report 259*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, May 2005b.
- Kent, Charles D., and Park R., "Flexural Members with Confined Concrete," *Proceedings*, ASCE, V.97, ST7, July 1971, pp.1969-1990.
- Liu J., Driver R.G., Lubell A.S., "Rehabilitation and Repair of Reinforced Concrete Short Columns with External Steel Collars," *Structural Engineering Report No.281*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Alberta. October 2008.
- Mander, Priestly, Park., "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol.114., no.8, August 1988, pp.1804-1826.
- Nesheli K.N., Meguro K., "External Prestressing Concrete Columns with Fibrous Composite Belts," FRPRCS-7, SP-230-92, pp.1631-1645.

- Priestley, Seible, Xiao, Verma, "Steel Jacket Retrofitting Of Reinforced Concrete Bridge Columns For Enhanced Shear Strength – Part 1: Theoretical Consideration And Test Design," *ACI Structural Journal*, V.91., no.4, Jul.-Aug. 1994, pp.394-405.
- Priestley, Seible, Xiao, Verma, "Steel Jacket Retrofitting Of Reinforced Concrete Bridge Columns For Enhanced Shear Strength – Part 2: Test Results And Comparison With Theory," *ACI Structural Journal*, V.91., no.5, Sep.-Oct. 1994, pp.537-551.
- Roy H.E.H., and Sozen M.A., "Ductility of Concrete," *Flexural Mechanics of Reinforced Concrete*, SP-12, American Concrete Institute/American Society of Civil Engineers, Detroit, 1965, pp. 213-224.
- Saatcioglu M., Yalcin C., "External Prestressing Concrete Columns for Improved Seismic Shear Resistance," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol.129., no.8, August 2003, pp.1057-1070.
- Sargin M., "Stress-Strain Relationships for Concrete and the Analysis of Structural Concrete Sections," *Study No. 4*, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, 1971, 167 pp.
- Sheikh S.A., and Uzumeri S.M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns," *Proceedings*, ASCE, V. 106, ST5, May 1980, pp. 1079-1102.
- Sheikh S.A., Yeh C.C., "Flexural Behavior of Confined Concrete Columns," *ACI Journal*, May-June 1986, pp.389-404.
- Sheikh S.A., Khoury S.S., "Confined Concrete Columns with Stubs," *ACI Structural Journal*, vol.90., no.4, July-August 1993, pp.414-431.
- Soliman M.T.M., and Yu C.W., "The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement," *Magazine of Concrete Research* (London), V. 19, No. 61, Dec. 1967, pp. 223-238.
- Vallenas J., Bertero V.V., Popov E.P., "Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads," *Report No. UCB/EERC-77/13*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Aug. 1977, 114 pp.
- Wu Y.F., Griffith M.C., Oehlers D.J., "Improving the Strength and Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Columns through Composite Partial Interaction: Tests," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol.129., no.9, September 2003, pp.1183-1190.
- Xiao Y., Priestley M.J.N., Seible F., "Steel jacket retrofit for enhancing shear strength of short rectangular reinforced concrete bridge columns." Structural system research project, Rep. No. SSRP-92/07, Dept. Of Applied Mechanics and Engineering Sciences, August 1993, 192.
- Xiao Y., ASCE M., Wu H., "Retrofit Of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jacket," *Journal of Structural Engineering*, V.129., no.6, 2003, pp.725-732.

LAMPIRAN

SURAT PERNYATAAN KESEDIAAN ANGGOTA TIM PENELITIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini kami:

Nama : Tavio, S.T., M.T., Ph.D.

NIP : 197003271997021001

Jurusan/Fakultas : Teknik Sipil/Teknik Sipil dan Perencanaan

menyatakan bersedia untuk melaksanakan tanggung jawab sebagai anggota tim penelitian:

Judul Penelitian : Kinerja Baja Siku Sebagai Elemen Pengekang
Eksternal Kolom Beton Bertulang Persegi

Ketua Tim Peneliti : Pamuda Pudjisuryadi, S.T., M.Eng.

Tanggung jawab : Analisa / Intepretasi data.

Surat pernyataan ini kami buat dengan sebenarnya untuk digunakan seperlunya.

Surabaya, 16 September 2011

Yang membuat pernyataan

(Tavio, S.T., M.T., Ph.D.)

BIODATA 1

Nama : Pamuda Pudjisuryadi, S.T., M.Eng
NIP : 99-037
Tempat / Tanggal Lahir : Surabaya / 28 Oktober 1975
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Golongan / Pangkat : IV/A
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
Instansi : Universitas Kristen PETRA
Alamat : Siwalankerto 121-131, Surabaya
Telp./Faks. : +62-31-2983399 / +62-31-8436418
Alamat Rumah : Graha Indah H/20-B, Surabaya
Telp./Faks. : +62-31-8285251 / +62-31-8285251
Alamat e-mail : pamuda@petra.ac.id

RIWAYAT PENDIDIKAN PERGURUAN TINGGI

Tahun	Program Pendidikan	Perguruan Tinggi	Jurusan
1994/1999	Sarjana Teknik (S.T.)	Universitas Kristen PETRA – Surabaya	Teknik Sipil
1999/2001	Master of Engineering (M.Eng.)	Asian Institute of Technology (AIT) – Bangkok Thailand	Structural Engineering
2010/sedang ditempuh	Doktor	Institut Teknologi 10 Nopember - Surabaya	Rekayasa Struktur

JABATAN DALAM PENGELOLAAN INSTITUSI

Peran/Jabatan	Unit	Tahun
Dosen	Jurusan Teknik Sipil	1999 s/d sekarang
Kepala	Laboratorium Komputer Teknik Sipil	2002 s/d sekarang

PENGALAMAN PENELITIAN

Tahun	Judul Penelitian	Ketua/anggota Tim	Sumber Dana
2001	An Indonesian view as epilogue A tale of two kotas, Heritage and impact of Dutch architecture and civil engineeringin Surabaya and Malang	Anggota Tim	DELFT University of Technology - Netherlands
2009	Pembuatan Konsep Rencana Standar Nasional Indonesia untuk Baja Canai Dingin.	Sekretaris Tim	Industri Konstruksi Baja Canai Dingin

KARYA ILMIAH*

A. Buku

Tahun	Judul	Penerbit
2001	Ravesteijn W., Koop J., Patmadjaja H, Pudjisuryadi P., 2001, "An Indonesian view as epilogue A tale of two kotas, Heritage and impact of Dutch architecture and civil engineering in Surabaya and Malang", Bouwen in de Archipel, Netherlands, ISBN: 90.5730.292.6, pp.275-290.	DELFT University of Technology - Netherlands

B. Jurnal

Tahun	Judul	Penerbit
2002	Pudjisuryadi P., 2001, "Moving Least Square Approximation to be used with Meshless Numerical Analysis Method", Civil Engineering Dimension, vol.4.no.1, Maret 2002, Surabaya, ISSN: 1410-9530, pp. 47-50.	Universitas Kristen PETRA
2002	Pudjisuryadi P., 2002, "Introduction to Meshless Local Petrov Galerkin Method", Civil Engineering Dimension, vol.4.no.2, September 2002, Surabaya, ISSN: 1410-9530, pp.112-116.	Universitas Kristen PETRA
2006	Pudjisuryadi P., Lumantarna B., 2006, "Daktilitas Struktur Shearwall – Frame dengan Belt Truss sebagai Virtual Outrigger", Civil Engineering Dimension, vol.8.no.1, Maret 2006, Surabaya, ISSN: 1410-9530, pp.41-46.	Universitas Kristen PETRA
2008	Pudjisuryadi P., 2008, "Adaptive Meshless Local Petrov-Galerkin Method with Variable Domain of Influence in 2D Elastostatic Problems", Civil Engineering Dimension vol.10.no.2., Surabaya, ISSN: 1410-9530, September 2008, pp. 99-108.	Universitas Kristen PETRA

C. Konferensi / Seminar

Tahun	Judul	Penyelenggara
2002	Pudjisuryadi P., Barry W.J., 2002, "An Adaptive Technique For 2d Elastostatic Analysis By The Meshless Local Petrov-Galerkin Method", Proceedings : International Conference on Advancement in Design, Construction, Construction Management, and Maintenance of Building Structures, Bali, ISBN: 979-8954-21-1, March 27-28 2002, pp.I-125-I-136.	Kementrian Pemukiman dan Prasarana Wilayah, Universitas Tarumanegara, Universitas Kristen Petra, ITB, AIT
2006	Tanojo E., Pudjisuryadi P., 2006, "Meshless Methods: Alternatives for Solving 2D Elasticity Problems", Proceedings :Toward Sustainable Civil Engineering Practice, Surabaya, ISBN: 979-15156-0-3, August 25-26 2006, pp. 65-72.	Universitas Kristen PETRA

2006	Pudjistryadi P., Tanojo E., 2006, "Meshless Local Petrov Galerkin Method for 2 Dimensional Elasticity Problem", Proceedings: Toward Sustainable Civil Engineering Practice, Surabaya, ISBN: 979-15156-0-3, August 25-26 2006, pp. 73-80.	Universitas Kristen PETRA
2006	Muljati I., Pudjistryadi P., 2006, "Performance of Special Moment Resisting Frame Designed According to SNI 03-2847-1992 and SNI 03-2847-2002", Proceedings :Toward Sustainable Civil Engineering Practice, Surabaya, ISBN: 979-15156-0-3, August 25-26 2006, pp. 31-37.	Universitas Kristen PETRA
2006	Pudjistryadi P., Lumantarna B., 2006, "A Preliminary Study on the Ductility of Shear Wall Frame – Belt Truss (Virtual Outrigger) System", Proceedings : The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-10), Bangkok Thailand, ISBN: 974-8257-17-7, August 3-5 2006, pp.695-700.	Asian Institute of Technology
2007	Pudjistryadi P., Lumantarna B., 2007, "Base Isolation in Traditional Building – Lesson Learned from Nias March 28, 2005 Earthquake", Proceedings : European Asian Civil Engineering Forum (EACEF)-1, Jakarta, ISBN: 978-979-1053-01-3, 26-27 September 2007, pp. C-242-C-247.	Universitas Pelita Harapan – Universitas Stuttgart Germany
2007	Pudjistryadi P., Lumantarna B., 2007, "Kinerja Sistem Rangka Pemikul Khusus sesuai SNI 03-2847-2002 ditinjau dari Ketentuan Sengkang Minimum Kolom", Proceedings : Konteks-1, Yogyakarta, ISBN: 979-9243-80-7, 11-12 Mei 2007, pp. 349-356.	Universitas Atmajaya Yogyakarta
2007	Pudjistryadi P., Lumantarna B., 2007, "Seismic Performance of Special Moment Resisting Frames Designed in Accordance to the Indonesian Concrete and Earthquake Codes", Proceedings vol.1: Modern Design, Construction, and Maintenance of Structures, Hanoi-Vietnam, ISBN: 978-0-646-48404-4, December 10-11 2007.	Vietnam Institute for Building Science and Technology (IBST), University of Melbourne (Australia)
2008	Pudjistryadi P., Lumantarna B., 2008, "Evaluation of Column's Flexural Strength of Special Moment Resisting Frame in Accordance to the Indonesian Concrete and Earthquake Codes", Proceedings : International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM)-1, Jakarta, ISBN: 978-979-17551-0-8, 14-15 April 2008, pp.591-599.	Indonesian Earthquake Engineering Association
2011	Pudjistryadi P., Tavio, 2011, "In-Elastic Performance of 2D-Two Bay Ordinary Concentrically Steel Braced Frame", Proceedings: The 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation. Surabaya, ISBN : 978-602-97462-2-8, 19-20 July 2011, pp.F-65-F-69.	Institut Teknologi 10 Nopember, Indonesian Earthquake Engineering Association
2011	Pudjistryadi P., Tavio, Suprobo P., 2011, "Transverse Stress Distribution in Concrete Columns Externally	Institut Teknologi 10 Nopember,

	Confined by Steel AngleCollars”, Proceedings : The 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation. Surabaya, ISBN : 978-602-97462-2-8, 19-20 July 2011, pp. H-139-H-143.	Indonesian Earthquake Engineering Association
--	--	---

D. Penyunting/Editor/Reviewer/Resensi

Tahun	Judul	Penerbit/Jurnal
2008	Nonlinear Behavior And Stress-Strain Relationship Of Rectangular Confined Reinforced Concrete Columns	Dimensi Teknik Sipil – Universitas Kristen PETRA
2008	Kriging-Based Finite Element Method: Element-By-Element Kriging Interpolation	Dimensi Teknik Sipil – Universitas Kristen PETRA
2009	Behavior Of R/C Frames In-Filled With Lightweight Materials Under Seismic Loads	Dimensi Teknik Sipil – Universitas Kristen PETRA
2009	Modified Fixed-Angle Strut-And-Tie Model For High Strength Reinforced Concrete Beams	ITS Journal of Civil Engineering
2011	Study On The Effect Of Reinforcement Ratio On The N-M Interaction Diagram Of Circular Columns Using Direct Computational Procedure	ITS Journal of Civil Engineering
2011	Effects Of Longitudinal Reinforcement Of N-M Interaction Diagram Of Rc Rectangular Columns	ITS Journal of Civil Engineering
2011	Analytical Study On The Effect Of Confinement Of Rc Circular Columns Subjected To Various Axial Loading	ITS Journal of Civil Engineering
2011	A New Procedure for Seismic Performance Assessment of Existing Reinforced Concrete Buildings	ITS Journal of Civil Engineering

KEGIATAN PROFESIONAL/PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

Tahun	Jenis>Nama Kegiatan	Tempat
2001	Tim perencana struktur proyek Rumah Sakit milik Yayasan Pondok Kasih	Surabaya
2005-2006	Perencanaan Konstruksi beton Gereja GPPS Jemaat "Agape" Banda Aceh, September 2005-September 2006	Surabaya
2006	Quick Assessment kerusakan bangunan akibat bencana Gempa Yogyakarta	Yogyakarta
2008	Pembicara Lokakarya "Pengenalan Teknis Bangunan Gedung Bagi Aparatur Pemerintahan Kota Surabaya" – World Seismic Safety Initiative (Teddy Boen)+UK PETRA, 2 Desember 2008	Surabaya
2009	Quick Assessment kerusakan bangunan gereja dan non-engineered akibat bencana Gempa Padang - Pariaman	Padang - Pariaman

2009	Pembuatan Konsep Rencana Standar Nasional Indonesia untuk Baja Canai Dingin	Surabaya
------	--	----------

Biodata ini buat dengan sebenarnya untuk digunakan seperlunya.

Surabaya, 19 November 2012
Yang membuat pernyataan

(Pamuda Pudjisuryadi, S.T., M.Eng.)

BIODATA 2

Nama : Tavio, S.T., M.T., Ph.D.
NIP : 197003271997021001
Tempat / Tanggal Lahir : Surabaya / 27 Maret 1970
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Golongan / Pangkat : III/C/Penata
Jabatan Akademik : Lektor Kepala
Instansi : Institut Teknologi 10 Nopember
Alamat : Kampus ITS Sukolilo, Surabaya
Telp./Faks. : +62-31-5931223 / +62-31-5927650
Alamat e-mail : tavio@its.ac.id

RIWAYAT PENDIDIKAN PERGURUAN TINGGI

Tahun	Program Pendidikan	Perguruan Tinggi	Jurusan
1989/1993	Sarjana Teknik (ST.)	Institut Teknologi 10 Nopember (ITS) – Surabaya	Teknik Sipil
1994/1996	Magister Teknik (MT.)	Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) – Surabaya	Teknik Struktur
2000/2004	Doctor of Philosophy (Ph.D.)	Nanyang Technological University (NTU) – Singapore	Structural Engineering

JABATAN DALAM PENGELOLAAN INSTITUSI

Peran/Jabatan	Unit	Tahun
Dosen	Jurusan Teknik Sipil	1997 s/d sekarang
Kepala	Bidang Struktur Program Pascasarjana	2008 s/d sekarang
Kepala	Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan	2009 s/d sekarang

PENGALAMAN PENELITIAN

Tahun	Judul Penelitian	Ketua/anggota Tim	Sumber Dana
2008	Axial Behavior of Normal-Strength RC Columns Confined by Welded Reinforcement Grids (WRG)	Anggota Tim	Hibah Bersaing
2010	Cyclic Behavior of Normal-Strength RC Columns Confined by Welded Reinforcement Grids (WRG).	Anggota Tim	Ford Foundation
2009-2011	Innovative Simple and Quick Precast Connections for Seismic-Resistant Houses.	Ketua Tim	Hibah Strategis Nasional
2011	Axial Behavior of High-Strength RC Columns Confined by Welded Reinforcement Grids (WRG).	Anggota Tim	Hibah Produktif

KARYA ILMIAH*

A. Buku (dipilih yang berkaitan erat saja)

Tahun	Judul	Penerbit
2007	Purwono, R.; Tavio; Imran, I.; and Raka, I G. P., "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) Dilengkapi Penjelasan (S-2002)," ITS Press, Surabaya, Indonesia, Mar. 2007, 408 pp., ISBN: 978-979-8897-20-7	ITS Press
2007	Purwono, R.; and Tavio, "Evaluasi Cepat Sistem Rangka Pemikul Momen Tahan Gempa," ITS Press, Surabaya, Indonesia, Sept. 2007, 51 pp., ISBN: 978-979-8897-21-4.	ITS Press
2009	Tavio; and Kusuma, B., "Desain Sistem Rangka Pemikul Momen dan Dinding Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa: Sesuai SNI 03-2847-2002 dan SNI 03-1726-2002 Dilengkapi Pemodelan dan Analisis dengan Program Bantu ETABS v.9.07," ITS Press, Surabaya, Indonesia, Mar. 2009, 141 pp., ISBN: 978-979-8897-33-7.	ITS Press

B. Jurnal (dipilih yang berkaitan erat saja)

Tahun	Judul	Penerbit
2008	Tavio; Budiantara, I N.; and Kusuma, B., "Spline Nonparametric Regression Analysis of Stress-Strain Curve of Confined Concrete," Journal of Civil Engineering Science and Application, Civil Engineering Dimension, V. 10, No. 1, Department of Civil Engineering, Petra Christian University, Surabaya, Indonesia, Mar. 2008, pp. 14-27.	Universitas Kristen PETRA
2009	Tavio; and Kusuma, B., "Stress-Strain Model for High-Strength Concrete Confined by Welded Wire Fabric," Discussion, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, V. 21, No. 1, Jan. 2009, Reston, Virginia, USA	American Society of Civil Engineering (ASCE)
2009	Tavio; and Arbain T., "Predicting Nonlinear Behavior and Stress-Strain Relationship of Rectangular Confined Reinforced Concrete Columns with ANSYS," Jurnal Internasional Thomson GaleTM, Terakreditasi, Civil Engineering Dimension Journal of Civil Engineering Science and Application, V. 11, No. 1, March 2009, Petra Christian University, Surabaya, Indonesia, ISSN 1410-9530, pp. 23.	Universitas Kristen PETRA
2009	Tavio; I. Wimbadi; Kusuma Negara; and Tirtajaya R., "Effects of Confinement on Interaction Diagrams of Square Reinforced Concrete Columns," Jurnal Internasional Thomson GaleTM, Terakreditasi, Civil Engineering Dimension Journal of Civil Engineering Science and Application, V. 11, No. 2, Sep. 2009, Petra	Universitas Kristen PETRA

	Christian University, Surabaya, Indonesia, ISSN 1410-9530.	
2001	Faimun; Aji, P.; Tavo; and Suprobo, P., "Usulan Kurva Hubungan Tegangan-Regangan Beton Terkekang," Jurnal Ilmu Pengetahuan Alam dan Teknologi IPTEK, V. 12, No. 1, Lembaga Penelitian, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Feb. 2001, pp. 61-70.	Intitut Teknologi Sepuluh Nopember
2008	Tavio, and Arbain Tata, "Stress-Strain Relation And Nonlinear Behavior of Circular Confined Reinforced Concrete Columns," Berkala Ilmiah Media Komunikasi Teknik Sipil, Terakreditasi SK DIKTI No : 23a/DIKTI/KEP/2004, Jurusan Teknik Sipil, FT. Universitas Diponegoro, No. 3, Tahun 16, Oktober 2008, ISSN 0854-1809, hal 255-268.	Universitas Diponegoro

C. Konferensi / Seminar (dipilih yang berkaitan erat saja)

Tahun	Judul	Penyelenggara
2008	Tavio; Purwono, R.; and Ashari, L., "Confinement of Circular RC Columns with Fine Mesh," Proceeding of the International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation, 14-15 Apr. 2008, Jakarta, Indonesia, pp. 510-517.	Asosiasi Ahli Rekayasa Gempa Indonesia (AARGI)
2008	Tavio; Suprobo, P.; and Kusuma, B., "Ductility of Confined Reinforced Concrete Columns with Welded Reinforcement Grids," Proceeding of the International Conference Excellence in Concrete Construction – through Innovation, 9-10 Sept. 2008, Kingston University, London, UK.	Kingston University
2007	Kusuma, B.; and Tavio, "Usulan Kurva Tegangan-Regangan Beton Mutu Tinggi Terkekang Welded Wire Reinforcement," Seminar dan Pameran Teknik HAKI: Konstruksi Tahan Gempa di Indonesia, Hotel Borobudur, Jakarta, 21-22 Aug. 2007, Paper No. SPB-2, pp. 1-13.	Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia
2008	Ashari, M. L.; Tavio; and Purwono, R., "Perilaku Tegangan-Regangan Kolom Bulat Beton Mutu Normal Terkekang Fine Mesh," Seminar Nasional Teknik Sipil IV-2008, Program Studi Pascasarjana, Jurusan Teknik Sipil, FTSP-ITS, Surabaya, 13 Feb. 2008, pp. BB73-BB80.	Institut Teknologi 10 Nopember
2010	Tavio; and Benny Kusuma, "Studi Analitis Pengaruh Pengekangan Terhadap Kapasitas Interaksi P-M Tiang Pancang Prategang," Seminar KONTEKS 4 Universitas Udayana - Universitas Pelita Harapan Jakarta - Universitas Atma Jaya Yogyakarta, di Sanur - Bali tanggal 2-3 Juni 2010, ISBN 978-602-8566-61-2, Makalah 2 (hal. S-349).	Universitas Udayana, Universitas Pelita Harapan, Universitas Atma Jaya Yogyakarta
2011	Pudjisyady P., Tavio, Suprobo P., 2011, "Transverse Stress Distribution in Concrete Columns Externally	Institut Teknologi 10 Nopember,

	Confined by Steel Angle Collars”, Proceedings : The 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation. Surabaya, ISBN : 978-602-97462-2-8, 19-20 July 2011, pp. H-139-H-143.	Indonesian Earthquake Engineering Association
--	---	---

D. Penyunting/Editor/Reviewer/Resensi

Tahun	Jurnal	Penerbit
2010-sekarang	American Concrete Institute (ACI) Structural Journal	American Concrete Institute (ACI)
2010-sekarang	American Concrete Institute (ACI) Material Journal	American Concrete Institute (ACI)
2010-sekarang	Civil Engineering Dimension	Universitas Kristen PETRA
2006-sekarang	Jurnal Teknik Sipil	Universitas Atma Jaya, Yogyakarta
2006-2009	Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil (TORSI)	Institut Teknologi 10 Nopember

Biodata ini buat dengan sebenarnya untuk digunakan seperlunya.

Surabaya, 19 November 2012
Yang membuat pernyataan

(Tavio, S.T., M.T., Ph.D.)

B. DRAF ARTIKEL ILMIAH

Compressive Strength Prediction of Square Concrete Columns Retrofitted by Using External Steel Collars

Pamuda Pudjisuryadi¹, and Tavierio²

¹Department of Civil Engineering – PETRA Christian University – Surabaya Indonesia

²Department of Civil Engineering – Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS) – Surabaya Indonesia

ABSTRACT

Transverse confining stress in concrete columns, commonly provided by transverse reinforcement, has been known to enhance the strength and ductility. The improved stress-strain relationship of confined concrete, in general, has increased compressive strength, flatter post peak descending branch of the curve, and increased ultimate compressive strain. Recently, the confinement studies are extended to external approach. Reinforced concrete column retrofits demand is the main reason to develop such approach. Many techniques have been proven to be successful in retrofitting circular columns. However, for square or rectangular columns, providing effective confining stress by external retrofit is not an easy task due to high stress concentration at the corners. This paper proposes an analytical approach to predict the peak strength of square concrete columns confined by external steel collars. Comparison with experimental result is presented. It is found that the proposed model can predict the peak strength reasonably well. However, compared to conventional internal confining reinforcement, it is should be noted that relatively large amount of steel is needed to achieve the same level of strength enhancement.

Keywords: square concrete columns, external retrofit, analytical model, peak strength.

1. INTRODUCTION

Transverse confining stress in concrete columns has been known to enhance the strength and ductility [1, 2, 3, and 4]. Commonly, the confining stress is provided by the conventional transverse reinforcement in the columns. Many experimental and analytical studies conducted to investigate the effects of confinement are available in literatures. The studies cover circular and square column sections. The loadings of the specimens include axial and combined axial and bending in monotonic and cyclic patterns. In the case of cyclic loading, only the envelope curves are predicted by analytical models. It is concluded that variables affecting the behavior of confined concrete are the plain concrete compressive strength, volumetric ratio of lateral steel to concrete core, yield strength of transverse reinforcement, ratio of area of longitudinal steel around the core perimeter and the resulting tie configuration, and tie spacing. General agreements on the differences of improved stress-strain relationship of confined concrete compared to unconfined concrete are increment of compressive strength, flatter post peak descending branch of the curve, and increment of ultimate compressive strain (increment of ductility).

Recently, the confinement studies are extended to external approach [5, 6, 7, and 8]. High demand of columns retrofits is one of the main reasons why such approach is essential to develop. Many techniques have been proven by experiments to be successful in retrofitting circular columns. However, for square or rectangular columns, providing effective confining stress by external retrofit is not an easy task. The stress concentration at corners causes highly non-uniform confining stress distribution. Some experimental and only a few analytical studies are found to address this problems [9, 10, 11]. Aside of important variables affecting confinement in conventional stirrups, external confinement approach will further increase the complexity. The failure mechanism, contact behavior between concrete and external confinement elements, and distribution of confining stress in 3D space can be totally different to those of conventional stirrups. In this paper, an analytical model of axial stress-strain curve of square columns confined by external steel collars is proposed. The research provides better understanding of the behavior which aids a reliable use of external steel collars on square concrete columns.

2. PROPOSED ANALYTICAL MODEL

The model is mainly adopted from Tabs [12] which combined Mander model [2] and Hoshikusuma model [13]. The prediction of confining stress of external steel collars through combined bending and axial actions is adopted from Xiao and Wu [9]. The development as well as necessary modifications are described in the following sections.

2.1. Development of the Model

Consider a concrete column which is externally retrofitted by steel collars (steel angle sections in the Figure) as illustrated in Fig. 2.1. In Fig. 2.1, the notations b , S , and S_c are the dimension of the square column, spacing of steel collar elements, and clear spacing of steel collar elements, respectively.

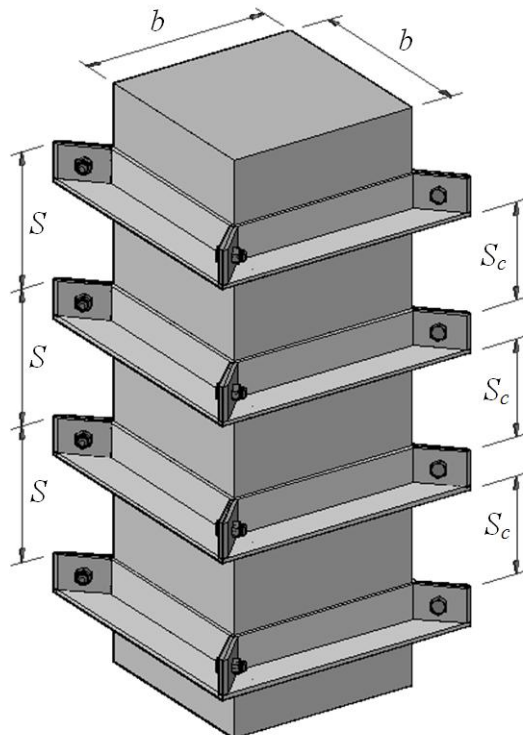


Figure 2.1. Three dimensional illustration of the physical model

In a cross section through the confinement element, the confining stress is not uniform as seen in Fig.2.2(a). Parabolic-shaped ineffective regions at the sides of the columns (the shaded area) are usually assumed due to relatively weaker confinement compared to the stiff corners. An expression of the ineffectively confined area (A_{par}) is adopted from Mander et al. [2] and Lee et al. [11] as in Eq.2.1.:

$$A_{par} = \frac{2}{3}b^2 \quad (2.1)$$

The ineffective confine regions are also assumed vertically between adjacent confinement elements as in Fig. 2.2(b). With consideration of both ineffective regions in horizontal and vertical directions, and average effectively confined cross sectional area, A_e , can be adopted from Mander et al. [2] as in Eq. 2.2.:

$$A_e = A_c \left(1 - \frac{A_{par}}{A_c} \right) \left(1 - \frac{S_c}{2b} \right)^2 \quad (2.2)$$

Where A_c is the core area, which is the gross section area of the column (b^2) in the case of externally confined columns. Further, a confinement effectiveness factor (k_e) can be expressed in Eq. 2.3.:

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \quad (2.3)$$

where A_{cc} is the net core area of the columns (A_c minus the area of longitudinal bars, if any). This factor is used to modify the equivalent uniform confining pressure (f_i , which is explained later) into the effective equivalent uniform confining pressure, f_{le} as in Eq. 2.4.:

$$f_{le} = k_e f_l \quad (2.4)$$

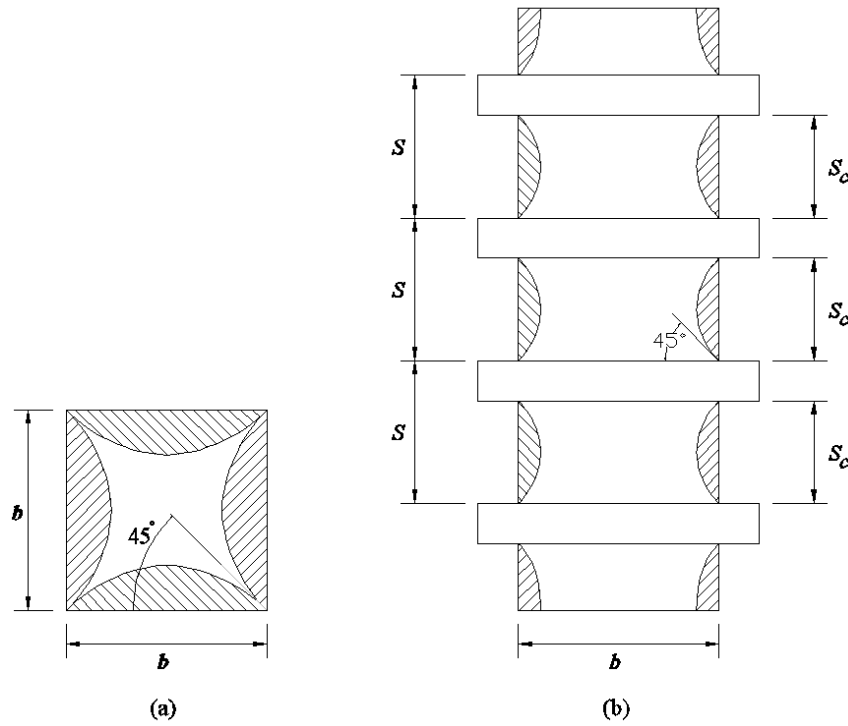


Figure 2.2. The parabolic-shaped ineffectively confined region at : (a) cross section and (b) along the height of the column

With effective equivalent uniform confining pressure determined, the peak strength can be calculated by using Tabsh models, as described in Eqs. 2.5.:

$$f'_{cc} = f'_{c0} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 - \frac{7.94 f'_{le}}{f'_{c0}}} \right) - 2 \frac{f'_{le}}{f'_{c0}} \quad (2.5)$$

where :

- f'_{cc} = compressive strength of confined concrete (MPa)
- f'_{c0} = compressive strength of unconfined concrete (MPa)

2.2. Confining pressure provided by steel collars (f_i)

Externally confined square concrete columns will tend to have more effective confinement at the corners due to stiffer confinement elements. This fact is also observed in conventionally confined concrete by using internal transverse reinforcement. According to Xiao and Wu [9], external steel collars provide the confining pressure through combined bending and axial mechanism. This is different from the assumption for transverse reinforcement which only depends on axial action because of the relatively small bending stiffness. First, consider a bulged externally retrofitted concrete column under axial load in Fig. 2.3(a). The steel collars are assumed to deform such a way to maintain the compatibility of outward expansion of the concrete. This deformation is logically larger at the mid-sides than at the corners. The steel collars are assumed to fail in combined axial and bending mechanism at the corners and mid-sides of the columns (plastic hinges are

developed). With assumption of uniform generated confining pressure, the equilibrium of the forces along cross sectional plane can be seen in Fig. 2.3(b) (only a quarter of the model is analyzed due to double symmetric condition).

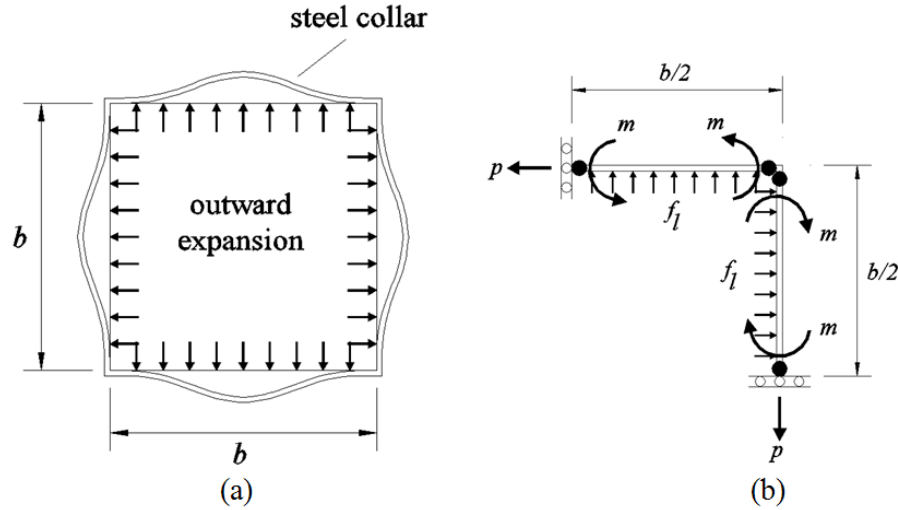


Figure 2.3. (a) Bulged steel collars due to lateral expansion of axially loaded concrete column, and (b) equilibrium of forces analyzed at a quarter of the cross section

Using equilibrium of the forces, the axial (p) and bending moment (m) developed in the steel collars can be expressed as a function of equivalent uniform confining pressure (f_l), dimension of column (b), and spacing of steel collars (S), as in Eqs. 2.10. and 2.11. :

$$p = f_l \frac{b}{2} S \quad (2.10)$$

$$m = f_l \frac{b^2}{16} S \quad (2.11)$$

With nominal axial and bending capacities (p_n and m_n) of steel collars given, and adopting criteria of combined axial and bending failure of steel (Eq. 2.12) in Indonesian structural steel code [14], f_l can be determined. In calculating nominal capacity, the reduction factors (ϕ) in Eq. 2.12., shall be taken as 1.0.

$$\frac{p}{\phi \cdot p_n} + \frac{8}{9} \frac{m}{\phi \cdot m_n} = 1 \rightarrow \text{for } \frac{p}{\phi \cdot p_n} \geq 1.0 \quad (2.12a)$$

$$\frac{p}{2\phi \cdot p_n} + \frac{m}{\phi \cdot m_n} = 1 \rightarrow \text{for } \frac{p}{\phi \cdot p_n} < 1.0 \quad (2.12b)$$

3. COMPARISON WITH EXPERIMENTAL RESULTS

An experiment was conducted to verify the proposed analytical model. Three plain concrete column specimens are externally retrofitted by steel angle collars as seen in Figure 3.1. Description of each column can be seen in Table 3.1. The concrete cylinder strength, f_c' from the same concrete mix as the column specimens is 24.6 MPa (with 1.2 MPa standard deviation). All of the specimens were tested under static concentric compression load to observe the peak strength. These results as well as the corresponding analytical predictions, can be seen in Table 3.2. To observe the effect of confinement, it is necessary to normalize the concrete strength with respect to their unconfined strength (f_{c0}'), taken as $0.85 f_c'$ which commonly used to relate in-place strength to standard cylinder strength [10]. The enhancements of the strengths are then presented relative to this in-place strength.

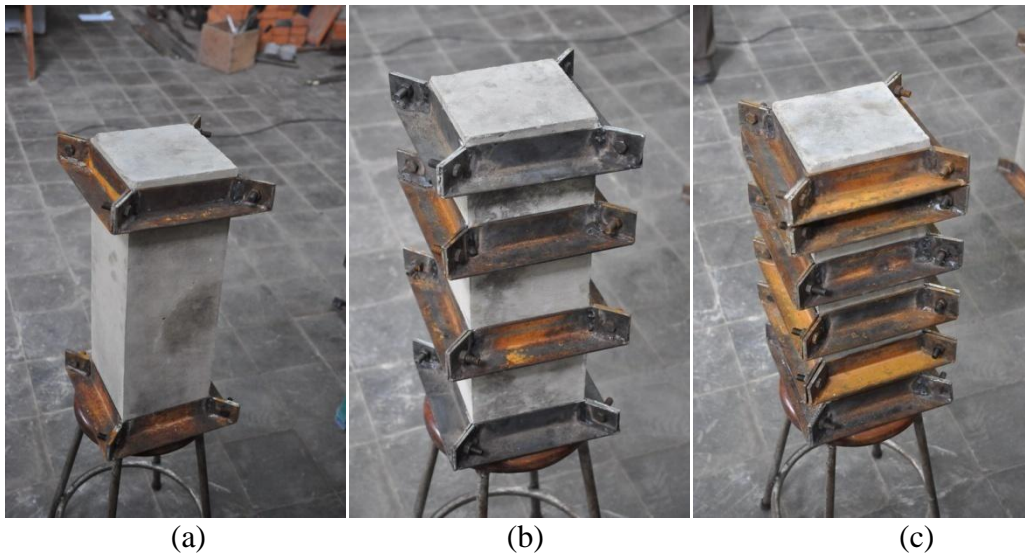


Figure 3.1. (a) Column A, (b) Column B, and (c) Column C

Table 3.1. Data of the specimens

Specimen	Column A	Column B	Column C
Dimension (mm×mm)	150×150		
Steel Collar	Angle 38×38×3.8		
Yield strength (MPa)	240		
Spacing of Steel Collars (mm)	400	150	75
Volumetric ratio of steel collars (%)	4.82	12.9	25.7

Table 3.2. Compressive Strength of the specimens

Specimen	Column A	Column B	Column C
In-place strength f_{c0}' (MPa)	20.9		
Experimental, f_{cc}' -ex (MPa)	23.6	24.7	26.8
Analytical, f_{cc}' -an (MPa)	23.7	24.5	27.0
Error (%)	0.42	0.81	0.75
f_{cc}' -ex/ f_{c0}' (%)	12.6	18.2	28.4

$f_{cc}'-an/f_{c0}'$ (%)	12.8	17.1	29.3
--------------------------	------	------	------

Figure 3.2 gives a view of the damage pattern of each column. It can be seen that the application of steel collars can effectively reduce the damage. It should be noted that corner bolts are fastened with minimum force that it does not generate significant pretension force, and no grouting material is used.

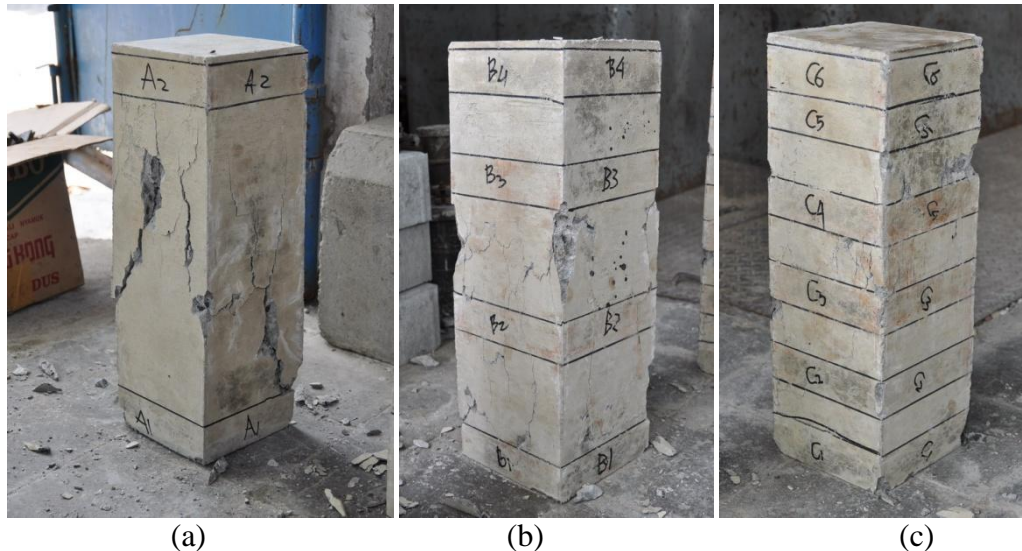


Figure 3.2. The damage pattern of : (a) Column A, (b) Column B, and (c) Column C

4. CONCLUDING REMARKS

An analytical model for predicting the peak strength of square concrete columns is proposed. The model mainly proposes the derivation of obtaining equivalent effective uniform confining stress (f_{ie}) provided by external steel confining elements. The peak strength is then can be calculated by well established confining model, such as Mander model which is adopted in this paper. From observation of analytical model as well as experimental results, some remarks can be concluded:

- The peak strength of the confined column specimens can be predicted very well by the proposed model.
- It should be noted, since the confining element is assumed to fail not by pure axial mechanism, relatively large amount of steel is needed to achieve significant strength gain (steel collar volumetric ratio of 25.7% only results in 29.3% strength gain).

AKNOWLEDGEMENT

This study is supported by the Ministry of National Education (Program Hibah Bersaing). The authors greatly acknowledge for all the support received.

REFERENCES

1. Sheikh, S.A.: A Comparative Study on Confinement Models. *ACI Journal*, **July-August, 1982**, pp. 296-306.
2. Mander, J.B., Priestly, M.J.N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, **114(8)**, 1988, pp. 1824-1826.
3. Mander, J.B., Priestly, M.J.N. and Park, R.: Observed Stress-Strain Behavior of

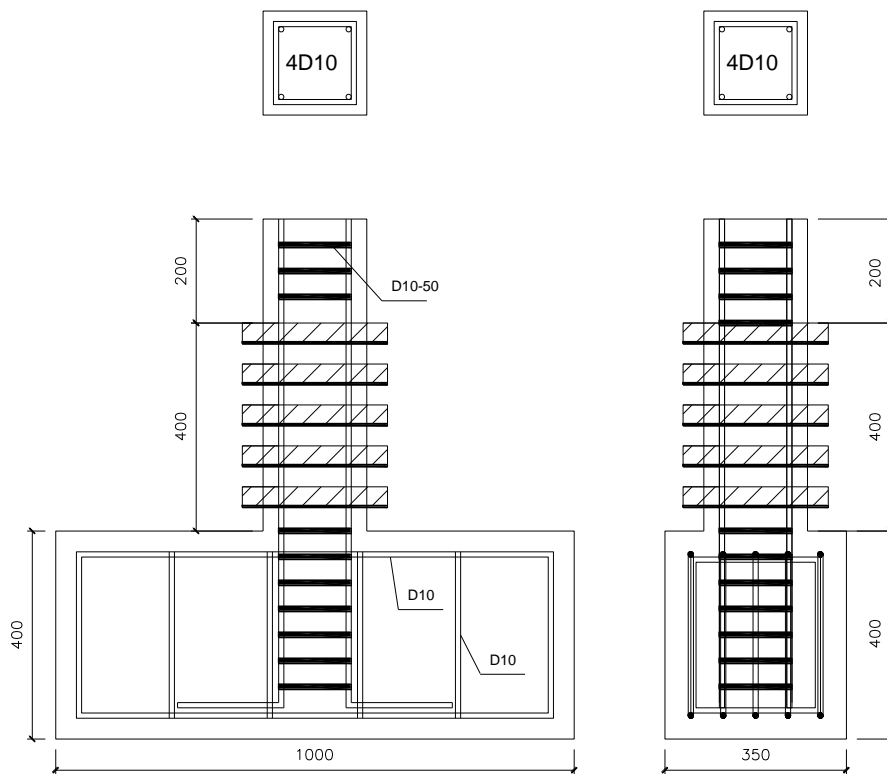
- Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, **114(8)**, 1988, pp. 1827-1849.
4. Saatcioglu, M. and Razvi, S.R.: Strength and Ductility of Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, **118(6)**, 1992, pp. 1590-1607.
 5. Chai, Y.H., Priestly, M.J.N and Seible, F.: Analytical Model for Steel-Jacketed RC Circular Bridge Columns. *Journal of Structural Engineering*, **120(8)**, 1994, pp. 2358-2376.
 6. Saafi, M., Toutanji, H.A. and Li, Z.: Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *ACI Material Journal*, **96(4)**, 1999, pp. 500-509.
 7. Fam, A.Z. and Rizkalla, S.H.: Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-Reinforced Polymer Tubes. *ACI Structural Journal*, **98(4)**, 2001, pp. 541-461.
 8. Carey, S.A. and Harries, K.A.: Axial Behavior and Modeling of Confined Small-, Medium-, and Large-Scale Circular Sections with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Jackets. *ACI Structural Journal*, **102(4)**, 2005, pp. 596-604.
 9. Xiao, Y. and Wu, H.: Retrofit of Reinforced Concrete Columns Using Partially Stiffened Steel Jackets. *Journal of Structural Engineering*, **129(6)**, 2003, pp. 725-732.
 10. Hussain, M.A. and Driver, R.G.: Experimental Investigation of External Confinement of Reinforced Concrete Columns by Hollow Structural Section Collars. *ACI Structural Journal*, **102(2)**, 2005, pp. 242-251.
 11. Lee, C.S., Hegemier, G.A. and Phillipp, D.J.: Analytical Model for Fiber-Reinforced Polymer-Jacketed Square Concrete Columns in Axial Compression. *ACI Structural Journal*, **107(2)**, 2010, pp. 208-217.
 12. Tabsh, S.W.: Stress-Strain Model for High-Strength Concrete Confined by Welded Wire Fabric. *Journal of Materials in Civil Engineering*, April, 2007, pp. 286-294.
 13. Hoshikusuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K. and Taylor, A.W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers. *Journal of Structural Engineering*, **123(5)**, 1997, pp. 624-633.
 14. Badan Standarisasi Nasional, *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*, SNI 03-1729-2002.

C. SINOPSIS PENELITIAN LANJUTAN

Sebagaimana dijelaskan di latar belakang penelitian, bahwa kolom beton bertulang merupakan elemen krusial untuk dipertahankan saat bencana gempa. Karena kerusakan pada satu kolom dapat berakibat efek berkelanjutan yang mengakibatkan kerusakan total gedung. Banyak cara yang dikembangkan peneliti untuk memperbaiki kinerja kolom yang sudah ada, yang mempunyai kondisi tidak memenuhi persyaratan gempa. Salah satu solusi yang cukup strategis untuk diupayakan, adalah dengan member pengekangan tambahan pada kolom. Pemberian pengekangan secara eksternal, jika dapat dilakukan dengan optimal, akan sangat baik dalam solusi rehabilitasi kolom tersebut. Banyak penelitian dilakukan terhadap kolom bernampang lingkaran, namun masih sedikit untuk penampang persegi, dikarenakan kompleksnya mekanisme pengekangan yang terjadi.

Penelitian tahun pertama telah mempelajari efek pengekangan kolom beton persegi yang diberikan secara eksternal melalui sabuk baja siku. Kinerja yang diuji masih terbatas pada karakteristik utama kinerja kolom beton, berupa peningkatan kekuatan dan daktilitas pada uji tekannya. Hasil yang baik dari skema ini, masih perlu diverifikasi lebih teliti, dengan menggunakan skema pembebanan lateral siklik yang lebih merepresentasikan pembebanan gempa pada sesungguhnya. Untuk alasan tersebut, penelitian pada tahap berikutnya, direncanakan untuk membuat spesimen yang diperkuat dengan metode retrofit yang diusulkan, yang kemudian diuji dengan skema baru berupa pembebanan lateral siklik. Skema tipikal set up benda uji dapat dilihat pada Gambar C.1. Variasi banyak sabuk siku direncanakan sebanyak 3 varian. Selain 3 spesimen ini, direncanakan untuk membuat 2 spesimen lagi, sebagai pembanding, dimana efek pengekangan hanya diberikan oleh sengkang internal. Rencana anggaran biaya secara garis besar, dapat dilihat dari tabel C.1.

Hasil yang baik dari skema ke-2 ini, akan lebih memperkuat hipotesa bahwa metode retrofit kolom menggunakan sabuk baja siku secara eksternal, dapat digunakan untuk perbaikan kinerja kolom beton persegi. Hal ini akan berpotensi besar untuk member alternatif solusi nasional dalam meminimalisir kerugian akibat bencana gempa bumi.



Gambar C.1 Skema tipikal benda uji dengan pembebanan lateral siklik

Tabel C.1. Rencana Anggaran Biaya

No.	Uraian	jumlah	Harga satuan	Sub-total (Rp.)
1.	Gaji dan Upah Peneliti Total	2 orang	5.000.000,-	10.000.000,-
2.	Bahan Habis Pakai			
	Baja siku	15 unit	150.000,-	2.250.000,-
	Beton	1 m3	500.000,-	500.000,-
	Bekisting multiplex 12mm	10 lbr	130.000,-	1.300.000,-
	Tulangan baja	150 kg	10.000,-	1.500.000,-
	Strain Gauges	10 packs	1.600.000,-	16.000.000,-
	Adhesive + Coating	1set	850.000,-	850.000,-
3	Peralatan Uji			
	Biaya uji spesimen kolom	5 buah	2.000.000,-	10.000.000,-

	Biaya uji tarik baja	6 buah	300.000,-	1.800.000,-
	Biaya uji tekan beton silinder	10 buah	100.000,-	1.000.000,-
4	Perjalanan dan Akomodasi			
	Surabaya – Bandung PP	1x	2.000.000,-	2.000.000,-
	Penginapan di Bandung	5 hari	400.000,-	2.000.000,-
5	Lain-lain			
	Foto copy dan jilid	Lum-sump	500.000,-	500.000,-
	Pengadaan laporan dan ATK	Lum-sump	500.000,-	300.000,-
TOTAL ANGGARAN				50.000.000,-