



ISBN : 978-979-99327-9-2



SEMINAR NASIONAL
TEKNIK SIPIL X-2014

PROSIDING

**Inovasi Struktur Dalam Menunjang
Konektivitas Pulau di Indonesia**

05 Februari 2014

*Program Pascasarjana,
Jurusan Teknik Sipil ITS,
Kampus ITS Sukolilo,
Surabaya 60111*

PROSIDING
SEMINAR NASIONAL
TEKNIK SIPIL X-2014



PROGRAM PASCASARJANA TEKNIK SIPIL
KAMPUS ITS SUKOLILO
JL. ARIF RAHMAN HAKIM, SURABAYA 60111

*Seminar Nasional X – 2014 Teknik Sipil ITS Surabaya
Inovasi Struktur dalam Menunjang Konektivitas Pulau di Indonesia*

SEMINAR NASIONAL TEKNIK SIPIL X-2014

TEMA:

INOVASI STRUKTUR DALAM MENUNJANG KONEKTIVITAS PULAU DI INDONESIA

SURABAYA, 05 FEBRUARI 2014



SUSUNAN PANITIA
SEMINAR NASIONAL TEKNIK SIPIL X – 2014
PROGRAM STUDI PASCASARJANA TEKNIK SIPIL FTSP-ITS

Pelindung	: Dekan FTSP-ITS Ketua Jurusan Teknik Sipil FTSP-ITS Sekjur I Teknik Sipil FTSP-ITS Sekjur II Teknik Sipil FTSP-ITS Koordinator PPs T. Sipil FTSP-ITS
Ketua	: Endah Wahyuni, S.T. MSc. Ph.D.
Wakil Ketua	: Ir. Ervina Ahyudhanari, M.Eng. PhD
Bendahara	: Januarti Jaya Eka Putri, ST., MT., Ph.D Debby Lusy F. T. H., SE
Sekretaris	: Aniendhita Rizki Amalia, ST.MT
Sie Dana	: Ir. Faimun, MSc., PhD
Sie Editor	: Dr. Tech. Pujo Aji, ST., MT. Putu Tantri Kumalasari, ST. MT. A. A. Ngr. Satria Damar Negara, ST.,MT. Nastasia Festy Margini, ST. MT.
Sie Publikasi dan Dokumentasi	: Istiar, S.T. M.T. Dimas W. L. Pamungkas, S.Kom
Sie Konsumsi	: Endang Trismiati, AM.d Ferna Anis T.S
Sie Acara	: Dr. Ir. Edijatno Yusronia Eka Putri, S.T. M.T.
Sie Perlengkapan	: Data Iranata S.T.,M.T.,P.hD Achmad Fauzi Djunarko
Kesekretariatan dan Pembantu Umum	: Robin Wisang Adji Rasmana Eva Sundari, ST

*Seminar Nasional X – 2014 Teknik Sipil ITS Surabaya
Inovasi Struktur dalam Menunjang Konektivitas Pulau di Indonesia*

Reviewer : Trijoko Wahyu Adi, ST. MT. Ph.D.
Dr. Ir. Ria A. A. Soemitro, M.Eng.
Ir. Hera Widyastuti, M.T., Ph.D
Budi Suswanto, S.T. MT. Ph.D.
Prof. Dr.Ir. Nadjaji Anwar, MSc
Prof. Ir. Noor Endah, MSc., Ph.D
Suntoyo ST., Meng., Ph.D.
Ir. Faimun, MSc., Ph.D
Prof. Dr. Ir. Triwulan, DEA
Ir. Putu Artama W, MT., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Indarto, DEA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
SUSUNAN PANITIA.....	iv
KATA PENGANTAR	vi
SAMBUTAN KETUA PANITIA.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
MANAJEMEN PROYEK KONSTRUKSI	
ANALISA PEMILIHAN BENTUK <i>BOX CULVERT</i> DAN <i>ABILITY TO PAY</i> CALON PENGGUNA JARINGAN UTILITAS TERPADU DI KOTA SURABAYA	1
<i>Tri Joko Wahyu Adi, I Putu Artama Wiguna dan Anita Intan Nura Diana</i>	
<i>QUALITY CONTROL</i> PADA PELAKSANAAN PEMBANGUNAN PROYEK PERUMAHAN	11
<i>Anton Soekiman dan Winner Yousman</i>	
ANALISIS PERBANDINGAN BIAYA STRUKTUR ATAP MENGGUNAKAN KAYU KEMPAS DAN BAJA RINGAN	19
<i>Anton Soekiman dan Airin Milasari</i>	
PEMODELAN HUBUNGAN ANTARA FAKTOR KETIDAKPASTIAN YANG MEMPENGARUHI KINERJA BIAYA PROYEK KONSTRUKSI MENGGUNAKAN <i>BELIEF NETWORK</i>	27
<i>Fahirah F, Tri Joko Wahyu Adi dan Nadjadji Anwar</i>	
KEPUASAN WAKIL PEMILIK proyek TERHADAP KUALITAS LAYANAN KONTRAKTOR	39
<i>Herlita Prawenti dan Muhamad Abduh</i>	
PENILAIAN KESIAPAN RANTAI PASOK BAJA RINGAN DI INDONESIA	47
<i>Azaria Andreas dan Muhamad Abduh</i>	
PENGARUH PERILAKU TENAGA KERJA DAN LINGKUNGAN KERJA YANG DIMODERASI FAKTOR PENGALAMAN KERJA DAN TINGKAT PENDIDIKAN TERHADAP KECELAKAAN KERJA KONSTRUKSI DI SURABAYA	57
<i>Iqbal Al Faris dan Feri Harianto</i>	
MODEL MANAJEMEN RISIKO PENGEMBANGAN PROPERTI PADA KAWASAN PARIWISATA	65
<i>I Wayan Muka dan M. Agung Wibowo</i>	
KAJIAN PELAKSANAAN PEMBANGUNAN PROYEK KONSTRUKSI DENGAN EARNED VALUE (STUDI KASUS PROYEK X, Y, Z)	75
<i>Ari Kusuma</i>	

ANALISIS KINERJA OPERASIONAL KERETA API SRIWEDARI EKSPRESS JURUSAN SOLO – YOGYA <i>Wahju Herijanto dan Bayu Rosida Sumantri</i>	389
MANAJEMEN LALU LINTAS AKIBAT TREM DI JALAN RAYA DARMO SURABAYA <i>Wahju Herijanto dan Zuhri Muhsin</i>	399
PENGARUH PENAMBAHAN <i>WETFIX-BE</i> TERHADAP KETAHANAN PENGELUPASAN DAN ALUR PADA CAMPURAN PANAS BETON ASPAL LAPIS AUS ASBUTON (AC-WC Asb) <i>Arief Setiawan, Ratnasari Ramlan, dan Moh Yani</i>	409
FEKTIFITAS JARINGAN JALAN MAMMINASATA (STUDI KASUS PENYEMPITAN PADA RUAS JALAN LINGKAR MAMMINASATA) <i>Yusuf Harun, Wihardi Tjaronge, Sakti Adji Adisasmita, dan Nur Ali</i>	419
ASSESSMENT TO A MAX-PLUS ALGEBRA POWER OPERATION ON UN- WEIGHTED TRANSPORTATION NETWORK MODEL OF ITS BEHAVIOR, CONNOTATION AND UTILIZATION <i>Hitapriya Suprayitno, Indrasurya B. Mochtar, dan Achmad Wicaksono</i>	429
STRUKTUR	
STUDI PERBANDINGAN PERILAKU INELASTIK PADA SISTEM RANGKA BERPENGAKU EKSENTRIK MENGGUNAKAN LINK WF DAN TUBULAR DENGAN METODE <i>PERFORMANCE BASED DESIGN</i> <i>Abdul Somad, Budi Suswanto, dan Hidayat Sugihardjo</i>	437
STUDI KETAHANAN BALOK BETON BERTULANG PASKA LELEH DIPERKUAT LEMBARAN GFRP AKIBAT BEBAN FATIK <i>Arbain Tata, Rudy Djamaluddin, Herman Parung, dan M. Wihardi Tjaronge</i>	447
PERILAKU ELEMEN BALOK KOLOM KASTELLA AKIBAT BEBAN BOLAK BALIK <i>Junus Mara, Herman Parung, Jonie Tanijaya, dan Rudy Djamaluddin</i>	457
PENGARUH LINGKUNGAN LAUT TERHADAP EFEKTIFITAS GFRP SHEET SEBAGAI BAHAN PENGUAT ELEMEN LENTUR <i>Mufti Amir Sultan, Rudy Djamaluddin, Herman Parung dan M. Wihardi Tjaronge</i>	467
PENINGKATAN KEKUATA KOLOM BERONGGA UNTUK MEMIKUL BEBAN MAKSIMUM <i>Safrin Zuraidah, Ikhsan, dan K Budihastono</i>	477
PEMODELAN DENGAN PROGRAM BERBASIS ELEMEN HINGGA DALAM ANALISA PERILAKU PELAT BETON BERTULANG KETIKA TERKENA API <i>Wahyuniarsih Sutrisno, dan Endah Wahyuni</i>	487

EVALUASI KERENTANAN BANGUNAN AKIBAT PENGARUH GEMPA (STUDI KASUS GEDUNG-GEDUNG FAKULTAS SAINS DAN TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL SOEDIRMAN)	497
<i>Yanuar Haryanto, Nanang Gunawan Wariyatno, dan Prisca Evelyn Yulianita</i>	
PERILAKU LENTUR BALOK BETON BERTULANG YANG BERISI STYROFOAM	511
<i>Yasser¹, Rudy Djamaluddin, M. Wihardi Tjaronge, dan Herman Parung</i>	
PERILAKU PENGGUNAAN MODEL STRUKTUR PENUNJANG DAN PENGIKAT (STRUT-AND-TIE MODEL) PADA BALOK BETON MUTU NORMAL UNTUK TINGGI BALOK 1500 MM.	521
<i>Agus Sugianto dan Andi Marini Indriani</i>	
ALIKASI EVALUASI CEPAT STRUKTUR BETON TERHADAP GEMPA PADA KONSTRUKSI GEDUNG DI PEKANBARU	535
<i>Alex Kurniawandy, Andy Hendri, dan Muhammad Akbar Muttaqin</i>	
PENGEMBANGAN MODEL SAMBUNGAN BALOK KOLOM PADA STRUKTUR PORTAL BETON TERKEKANG BERTULANGAN BAMBU TAHAN GEMPA	545
<i>B. Sri Umniati, Nindyawati, Sri Murni Dewi, dan Agoes S. MD</i>	
KAJI PEREDAMAN VORTEX INDUCED VIBRATIONS PADA GEDUNG TINGGI MENGGUNAKAN TUNED MASS DAMPER	557
<i>Matza Gusto Andika, Rianto Adhy Sasongko, dan Leonardo Gunawan</i>	
STUDI PERILAKU DINDING GESER PELAT BAJA (STEEL PLATE SHEAR WALL) TERHADAP KONFIGURASI PENGAKU LATERAL	567
<i>Ramdan Taufiq Nussa, Budi Suswanto, dan Hidayat Sugihardjo</i>	
STATE OF THE ART PENGEKANGAN EKSTERNAL UNTUK RETROFIT KOLOM BETON BERTULANG	579
<i>Utari Khatulistiani, Tavio, dan I G. P. Raka</i>	
DAKTILITAS BALOK BETON PRATEKAN PARSIAL PRATARIK DENGAN LEKATAN BERPENAMPANG PERSEGI SETELAH MENDAPAT BEBAN BERULANG TERBATAS.	597
<i>I Gusti Putu Raka</i>	
STUDI PEMODELAN STRUKTUR SUBMERGED FLOATING TUNNEL	611
<i>Endah Wahyuni, Heppy Krisjanto, Djoko Irawan, dan Syayhuddin Sholeh</i>	
PENGUJIAN KUALITAS BATAKO SESUAI DENGAN PERSYARATAN STANDAR NASIONAL INDONESIA PADA USAHA MIKRO, KECIL DAN MENENGAH (UMKM) SUMBER LANGGENG MOJOKERTO	619
<i>Yusroniya Eka Putri</i>	

STATE OF THE ART PENGEKANGAN EKSTERNAL UNTUK RETROFIT KOLOM BETON BERTULANG

Utari Khatulistiani¹, Tavio² dan I G. P. Raka³

¹Utari Khatulistiani, Kandidat Doktor, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, E-mail: utari_wiyoso@yahoo.co.id

²Tavio, Profesor, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, E-mail: tavio_w@yahoo.com

³I G. P. Raka, Profesor, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, E-mail: raka@its.ac.id

ABSTRAK

Bila struktur kolom beton bertulang yang telah dibangun mengalami kerusakan akibat gempa bumi, maka dibutuhkan perlakuan retrofit dengan tujuan untuk peningkatan kekuatan dan juga daktilitasnya. Retrofit dapat juga dilakukan terhadap kolom di gedung yang menahan beban lebih besar dari beban perencanaan awal. Hasil penelitian para peneliti diperoleh bahwa kekuatan dan daktilitas kolom beton bertulang dapat dilakukan dengan memberi pengekangan, baik dengan cara pengekangan di bagian sisi dalam kolom (internal) maupun di sisi luar kolom (eksternal). Pelaksanaan retrofit menjadi praktis bila teknik pengekangan dengan cara pengekangan luar. Berdasarkan studi literatur, *state of the art* pengekangan eksternal kolom beton bertulang diuraikan pada makalah ini. Pengekangan eksternal dapat meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom dengan menggunakan bahan yang cukup kaku sehingga mampu menahan gaya lateral kolom. Metode *steel collar* yang menggunakan HSS, plat baja dan bajaprofil siku dapat direkomendasi untuk retrofit kolom beton bertulang persegi.

Kata kunci: beton bertulang, gempa, kolom, pengekangan eksternal, retrofit

1. PENDAHULUAN

Kolom merupakan salah satu elemen penting pada struktur gedung, karena fungsinya sebagai penopang dan juga menerima beban-beban yang kemudian ditransfer ke pondasi. Kekuatan serta kemampuan daktilitas kolom sangat berpengaruh terhadap kapasitas struktur menahan beban gempa. Konsep perencanaan mengharuskan struktur gedung berperilaku *strong column-weak beam* supaya saat terjadi gempa bumi, kolom masih mampu bertahan lebih lama sebelum terjadi keruntuhan, dan penghuni gedung masih memiliki waktu untuk menyelamatkan diri sehingga korban jiwa berkurang [5,12-16,19-36].

Hal tersebut menjadi perhatian khusus terhadap struktur kolom-kolom di gedung-gedung lama yang telah dibangun berdasar peraturan terdahulu, karena akan ada kolom yang butuh perbaikan (*retrofit*) guna peningkatan kekuatan serta daktilitasnya agar kemampuan menahan beban gempa meningkat dan sesuai dengan peraturan yang ditetapkan saat ini. Semakin ketatnya standar yang ditetapkan dalam peraturan untuk perencanaan struktur gedung di Indonesia, saat ini peraturan gempa SNI 2012 [19] dan draft SNI Beton [16] menjadikan kolom dituntut memiliki kemampuan kekuatan dan daktilitas lebih tinggi, sehingga berpengaruh terhadap detailing penulangan kolom yang sudah terpasang. Selain itu, perlakuan retrofit guna meningkatkan kekuatan kolom juga diperlukan bila ada penambahan beban-beban pada gedung yang telah dibangun.

Retrofit kolom dengan tujuan agar kekuatan dan daktilitasnya meningkat saat menahan beban gempa menjadi isu penting di negara-negara dengan gempa kekuatan tinggi.

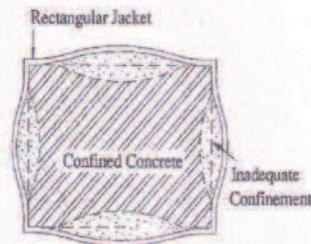
Teknik yang efisien untuk peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom beton bertulang adalah dengan cara pengekangan (confinement). Efek pengekangan mulai dikaji oleh Park dan Paulay [10] melalui pengujian eksperimental kolom persegi dan bulat dengan mengamati tulangan pengengkang (tulangan transversal) yang ditentukan oleh variabel-variabel: 1) perbandingan antara volume tulangan transversal terhadap volume inti beton, 2) tegangan leleh baja tulangan, 3) perbandingan antara jarak tulangan transversal terhadap dimensi dari inti beton, dan 4) perbandingan antara diameter tulangan transversal terhadap panjang tulangan transversal yang tidak tertahan. Hasil pengujian disimpulkan bahwa tulangan sengkang menyebabkan pengekangan inti kolom beton bertulang meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom. Selanjutnya penelitian dilakukan oleh Sheikh, dkk. [17,18], dan Mander, dkk. [8,9] melalui pengujian kolom persegi dan menyimpulkan bahwa luas efektif penampang kolom terkekang (A_e) kurang dari luas penampang yang diberi tulangan transversal (A_{sh}) atau dengan kata lain A_e kurang dari A_{sh} [25]. Selain itu disimpulkan pula bahwa volume tulangan transversal terhadap volume inti beton, distribusi tulangan longitudinal, konfigurasi tulangan dan spasi tulangan transversal mempengaruhi efektivitas pengekangan. Penelitian tentang tulangan transversal untuk pengekangan kolom terus dikembangkan, tidak saja menggunakan tulangan konvensional, tetapi juga non konvensional yang dilakukan oleh Tavio, dkk. [24-26,28,31] dengan menggunakan tulangan transversal *welded fire fabric* pada kolom beton bertulang persegi.

Perbaikan kolom beton bertulang yang telah dibangun (*retrofit*) dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatannya dalam menahan beban gempa akan membutuhkan penambahan pengekangan lateral berupa penulangan sengkang yang dipasang dengan jarak tertentu di dalam kolom, atau dikenal dengan sebutan pengekangan internal. Bila retrofit dilakukan dengan cara pengekangan internal, hal tersebut merupakan suatu pekerjaan yang tidak praktis dan butuh waktu lama, karena harus membongkar permukaan kolom beton, memasang perancah, bekisting, kemudian memasang tulangan-tulangan sengkang yang menjadi suatu pekerjaan sangat rumit serta butuh waktu lama. Pelaksanaan retrofit akan praktis bila pengekangan dilakukan dari bagian luar kolom, atau disebut pengekangan eksternal. Penelitian-penelitian pengekangan eksternal telah dilakukan, dimulai pada 1990-an berupa teknik *steel jacketing*, dan telah diaplikasikan pada konstruksi-konstruksi di Jepang, Taiwan, dan California [6]. *Steel jacketing* (jaket baja) yang dipasang mengelilingi kolom dapat meningkatkan kekuatan tekan, kuat geser dan daktilitas kolom diteliti oleh Priestley, dkk. [11] dan dikembangkan oleh Xiao, dkk. [38]. Kemudian teknik retrofitting kolom dengan pengekangan eksternal berkembang, yaitu teknik *new steel jacketing* yang dilakukan oleh Choi, dkk. [2,3], *steel plating* oleh Wu, dkk. [37], dan *steel collar jacketing* oleh Hussain dan Driver [4] yang kemudian metode *steel collar* ini dikembangkan oleh Liu, dkk. [7].

2. STEEL JACKETING

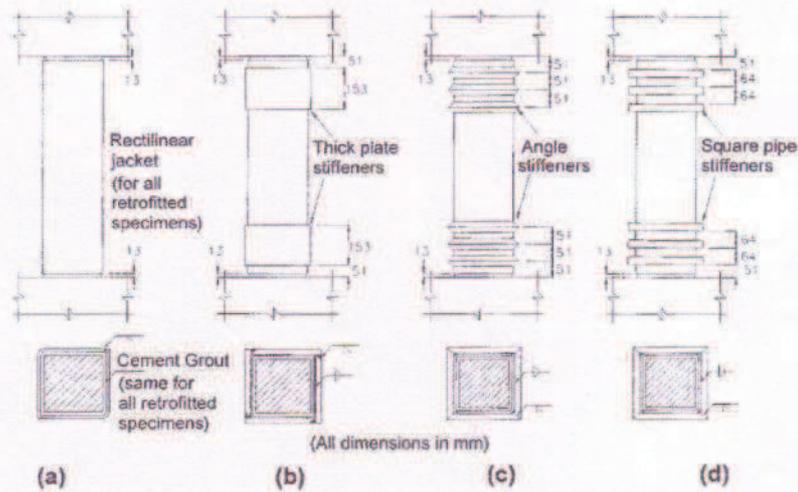
Teknik *steel jacketing* awalnya dikembangkan untuk kolom jembatan penampang bulat oleh Priestley, dkk. [11] pada tahun 1996 [6]. Dua plat baja semi-bulat yang lebih besar daripada diameter kolom difabrikasi di pabrik. Sambungan vertikal antara kedua lembaran plat dilas di tempat agar menjadi tube baja menerus dengan kesenjangan (gap)

yang kecil antara kolom jembatan dan plat baja. Gap diisi dengan pasta semen murni atau matriks *epoxy* untuk mentransfer tegangan di kolom jembatan dengan plat baja [6]. Priestley, dkk. [11] menggunakan steel jacket berbentuk silinder dan elips untuk retrofit kolom bulat dan persegi. Hasil pengujian diperoleh kuat geser dan daktilitas meningkat dengan adanya jaket baja berbentuk bulat atau elips yang dipasang pada kolom bulat, dan diperhitungkan secara konservatif dengan pertimbangan bahwa jaket beraksi sebagai rangkaian sengkang hoop yang tidak bergantung pada jarak dan ketebalan jaket t_j . Tetapi pengekanan steel jacket berbentuk persegi yang dipasang pada kolom persegi menghasilkan daktilitas displacement lebih rendah dibanding kolom bulat, karena degradasi respons tidak dapat dihindari yang disebabkan tidak memadainya pengekanan beton (Gambar 1) dan penulangan tekan pada daerah sendi plastis lentur, dan kinerja geser yang tidak memadai.



Gambar 1: Pengekanan yang tidak memadai dengan *steel jacket* persegi (Priestley, dkk. [11])

Xiao, dkk. [38] menyatakan bahwa penggunaan jaket berbentuk elips untuk meningkatkan kekuatan geser kolom persegi panjang dengan memperbesar ukuran penampang tidak diperlukan. Xiao, dkk. melakukan penelitian terhadap retrofit kolom persegi yang merupakan pengembangan metode *steel jacket* dengan menggunakan *welded rectilinear steel jacket* terdiri dari empat model seperti pada Gambar 2.

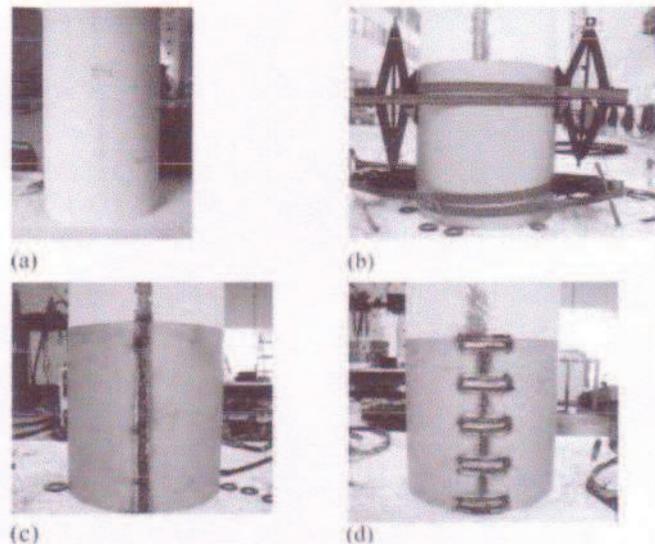


Gambar 2: Detail benda uji *Retrofitting Steel Jacketing* (Xiao, dkk. [38])

Keempat benda uji retrofitting dengan *rectilinear steel jacket* hanya meningkatkan geser saja. *Steel jacket* didesain untuk peningkatan kekuatan geser yang dibutuhkan pada retrofit. Tiga dari empat benda uji retrofit kemudian dilakukan retrofit dengan kekakuan pada daerah potensi sendi plastis. Tiga perbedaan kekakuan yang berbeda yaitu ketebalan plat baja, siku dan tabung persegi. Dilakukan pengujian benda uji dengan memberi beban aksial konstan (30% dari $A_g f'_c$) dan beban lateral siklik dengan kontrol displacement. Benda uji tanpa retrofit mengalami kegagalan geser. Sedikit peningkatan terjadi pada benda uji retrofit dengan *rectilinear steel jacket*.

3. NEW STEEL JACKETING

Pengembangan penelitian metode *steel jacketing* kemudian dilakukan oleh Choi, dkk. [2] tahun 2010 terhadap kolom bulat. Penelitian Choi, dkk. disebut *new steel jacketing* karena teknik pemasangan *steel jacketing* menggunakan alat klem yang berfungsi memberikan tekanan eksternal (*external pressure*) guna mempererat melekatnya jaket plat baja di permukaan benda uji beton (Gambar 3b), sehingga jaket baja benar-benar menempel rapat. Sambungan dilakukan dengan cara pengelasan terhadap sambungan overlap plat baja arah vertikal (Gambar 3c), dan tambahan perkuatan arah lateral berupa strip band (Gambar 3d). Pemasangan tidak perlu grouting seperti penelitian *steel jacketing* sebelumnya yang menggunakan grouting guna mengisi ruang kosong antara *steel plate* dengan benda uji kolom bulat.



Gambar 3: Prosedur pemasangan steel jacket pada kolom beton bertulang: (a) benda uji silinder; (b) pemasangan tekanan eksternal pada steel-jacket; (c) las jaket sambungan arah vertikal; (d) strip band sambungan las arah lateral (Choi, dkk. [2])

Choi, dkk. [2] menggunakan jaket dengan lebar yang lebih besar dari diameter silinder. Ketebalan steel jacketing yang dipasang pada benda uji silinder adalah 1 mm, 1,5 mm, dan 2 mm. Jaket ketebalan 2 mm dibuat dari dua jaket ketebalan 1 mm yang disatukan, dan disebut jaket berlapis ganda. Prosedur pemasangan jaket yaitu: 1) membungkus jaket di sekeliling silinder; 2) jaket ditekan dengan klem, 3) mengelas garis overlap, dan 4) mengelas strip band lateral yang melintasi garis pengelasan. Strip band-strip band

lateral yang digunakan untuk mencegah kegagalan di garis pengelasan karena terbukti menjadi titik lemah dalam tes sebelumnya, dan klem digunakan untuk memperkenalkan lateral pressure pada jaket baja.

Menurut Choi, dkk. [2] metode *new steel jacketing* ini dapat digunakan untuk retrofit kolom, dan teknik pemasangan dengan cara memberi tekanan eksternal memberi keuntungan mempermudah instalasi jaket baja pada setiap lokasi pada kolom beton bertulang di bagian bawah, tengah, atau atas, dan hal itu dinilai memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode jaket baja konvensional. Jaket tidak meningkatkan kekuatan lentur yang bisa disebabkan dari instalasi yang tidak sempurna dari jaket karena tekanan eksternal yang tidak cukup. Kekakuan efektif kolom tidak meningkat karena jaket tidak menginduksi perilaku komposit antara jaket dan beton. Properti metode *jacketing* baja yang baru ini menguntungkan karena tidak mengganggu kekakuan asli dari kolom.

Hasil pengujian perkuatan *steel jacketing* metode baru yang dikembangkan Choi, dkk. [2] ini mampu meningkatkan kekuatan, daktilitas perpindahan dan kapasitas disipasi energi kolom beton bertulang. *Steel jacketing* yang baru ini mampu mencapai drif lateral ultimit sebesar 5% dan 6% untuk masing-masing jaket tebal 1 dan 2 mm. Nilai rata-rata daktilitas displacement, μ , adalah 4,87 dan 5,65 untuk masing-masing kolom berjaket tebal 1 dan 2 mm. Kinerja dari jaket berlapis ganda (tebal 2 mm) lebih baik 14,7% dibandingkan dengan jaket berlapis tunggal.

4. METODE PELAPISAN FRP

Penelitian pengekangan eksternal kolom beton bertulang kemudian berkembang menggunakan *fiber reinforced polymer* (FRP) yang dipasang di permukaan kolom. Jaket FRP memiliki beberapa keunggulan dibandingkan *steel jacket*: 1) kemudahan instalasi; 2) tidak ada peningkatan penampang kolom beton bertulang; dan 3) tidak mengalami kenaikan dari kekakuan lentur atau geser struktur menjadi karakteristik signifikan untuk rehabilitasi seismik [3]. Beberapa keuntungan dari jaket FRP dan juga pemasangannya yang praktis akan disukai dalam teknik retrofit.

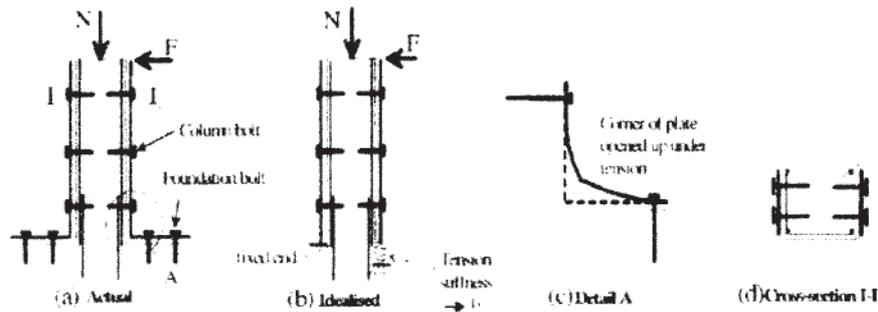
Menurut Hussain dan Driver [4] perbaikan kolom bulat beton bertulang menggunakan pembungkus dan lekatan dengan bahan komposit seperti serat karbon dan kaca telah menjadi subjek beberapa peneliti, karena rasio *high strength-to-weight* dan ketahanan terhadap korosi. Karena kekakuan lentur mereka diabaikan, bahan-bahan ini mengembangkan tekanan pengekang ke kolom hanya melalui membran saja, oleh karena itu, sangat efektif untuk kolom bulat. Metode ini kurang efektif untuk kolom persegi dan persegi panjang karena tekanan pengekang dikembangkan melalui aksi membran. Oleh karena itu, untuk ke depan penggunaan elemen pengekang lentur yang kaku untuk upgrade seismik kolom beton bertulang persegi dan persegi panjang adalah wajar.

Sedangkan kelemahan dari metode ini adalah harga jaket FRP umumnya lebih tinggi dari jaket beton atau baja [3]. Selain itu, jaket FRP menggunakan perekat seperti *epoxy* untuk menempelkannya pada permukaan beton yang terbukti mengurangi efektivitas jaket di silinder beton karena menghasilkan sedikit kesenjangan antara beton dan jaket.

5. STEEL PLATING

Penelitian pengekangan eksternal kolom beton bertulang persegi dilakukan oleh Wu, dkk. [37] menggunakan plat baja (*steel plate*) yang dipasang menyelubungi bagian

permukaan kolom (Gambar 4) dan menjadi sistem kolom plat komposit. Plat baja dibaut ke kolom dari arah berlawanan seperti Gambar 4 (a dan d). Saat gaya lateral F bekerja dari arah kiri kolom seperti ditunjukkan Gambar 4(a), penahan di bagian bawah dari plat sisi kiri kolom beraksi sebagai tumpuan jepit seperti Gambar 4(b). Sebaliknya, plat di sisi kanan dapat timbul seperti ditunjukkan Gambar 4(c) karena penahan di bagian kanan relatif kecil seperti yang diindikasikan pada Gambar 4 (b). Gaya F berlawanan atau kebalikannya, seperti terjadi pada kondisi pembebanan seismik, hanya kebalikan dari kondisi tahanan.



Gambar 4: Retrofit kolom persegi dengan *Steel Plating* (Wu, dkk. [37])

Inti dari metode ini adalah kekuatan longitudinal plat dapat langsung meningkatkan kapasitas tekan tanpa ada peningkatan yang signifikan pada kapasitas tarik. Metode pendekatan yang baru dari komposit plat ini jauh berbeda dengan pelapisan yang mengandalkan pengekangan lateral untuk meningkatkan sifat material beton. Kekakuan sistem plat bergantung pada kekakuan plat baja dan jumlah baut pada kolom. Baut kolom bekerja sebagai *stud shear connector* pada balok komposit, yang mengurangi slip antara beton dan plat baja. Hasil dari uji beban monotonik dan siklik menunjukkan bahwa metode *steel plate* dengan dibaut ini mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas kolom beton bertulang.

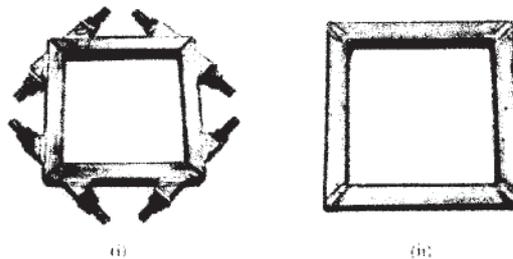
Tebal plat yang digunakan adalah 3, 6, dan 12 mm. Dari hasil pengujian diperoleh pada kolom komposit dengan tebal plat 12 mm menghasilkan nilai kekuatan dan displacement lebih tinggi dibanding kolom lainnya. Pada komposit plat, kekuatan longitudinal plat baja digunakan untuk mencegah pecahnya beton. Berbeda dengan jaket tradisional, transfer kekuatan dari plat baja digunakan untuk meningkatkan pengekangan pada beton, dimana plat baja/FRP sengaja dipotong pendek dari bagian dasar untuk menghindari kekuatan longitudinal [11]. Teknik *steel plating* ini efektif karena detail sambungan yang khusus diperbolehkan plat pada permukaan tarik dari kolom untuk “open up” (membuka) tanpa gaya tegangan tarik yang signifikan, sementara plat pada permukaan tekan kolom dapat menarik gaya tekan yang cukup besar, sehingga mengurangi regangan tekan (dan tegangan) pada daerah tekan penampang beton dan menunda mulainya kehancuran.

6. STEEL COLLAR JACKETING

Pada tahun 2005, penelitian pengekangan eksternal kolom beton bertulang dikembangkan oleh Hussain dan Driver [4] menggunakan *hollow structural section (HSS) collar* yang memiliki kombinasi dari lentur dan kekakuan aksial. *Collar* ini tidak hanya memberikan manfaat pengekangan yang efisien, tetapi juga menghambat pengelupasan dari bagian luar selimut beton dan memberi fungsi tambahan sebagai

tulangan geser. Meskipun aplikasi utama dari sistem ini mungkin saja untuk rehabilitasi gempa, untuk memberikan pemahaman mendasar tentang perilaku perkuatan kolom, investigasi eksperimental dilakukan pada kolom yang dibebani aksial konsentris.

Tipe *collar* dibuat dari penampang *HSS* dengan sambungan baut atau las di ujung-ujung kolom (Gambar 5). *Collar* sambungan baut dimaksudkan untuk menyediakan sambungan di sudut yang memungkinkan rotasi dari sisi *collar* yang berdekatan, sedangkan *collar* sambungan las dimaksudkan untuk mendekati kondisi ujung jepit. Kedua jenis sambungan ini memungkinkan penilaian terhadap kinerja *collar* yang terikat kondisi sudut, tetapi tidak dimaksudkan untuk mewakili satu-satunya cara perakitan *collar* untuk aplikasi rehabilitasi kolom. Memang *collar* dilas hanya pada dua sudut yang berlawanan di bengkel dan kemudian dibaut ke kolom di dua sudut lainnya sehingga menjadi paling praktis dan ekonomis.

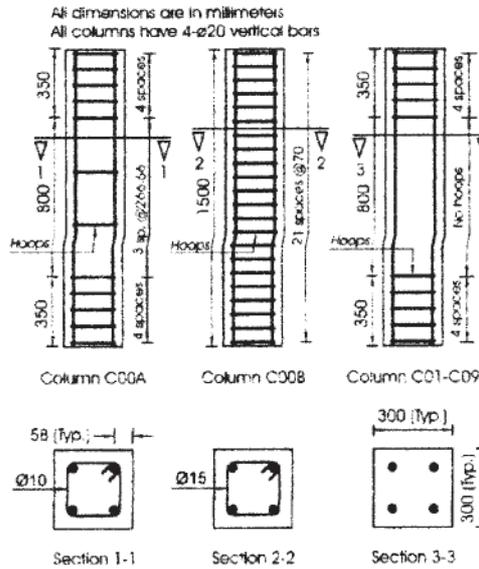


Gambar 5: Tipe *HSS collar* untuk kolom persegi : (i) sambungan baut, (ii) sambungan las (Hussain dan Driver [4])

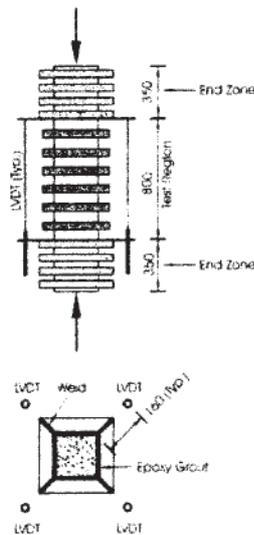
Pada penelitian ini, Hussain dan Driver [4] menggunakan benda uji kolom berukuran penampang 300×300 mm dan tinggi 1500 mm. Dua kolom (C00A dan C00B) digunakan sebagai kolom kontrol dengan pengekang tulangan sengkang konvensional, dan sembilan kolom (C01 hingga C09) diberi pengekang eksternal *collar*. Masing-masing kolom dipasang empat tulangan longitudinal diameter 20 mm, dengan rasio penulangan longitudinal sama dengan 1,33%. Penempatan tulangan transversal pada kolom dibagi dalam tiga bagian : daerah atas dan bawah (masing-masing panjang 350 mm), dan daerah pengujian (panjang 800 mm). Detail penulangan untuk masing-masing kolom seperti ditunjukkan Gambar 6. Kolom C01 hingga C09 diberi pengekang eksternal *HSS collar*, dan tidak ada tulangan sengkang yang dipasang di daerah pengujian. Jarak antar tulangan sengkang kolom C00B adalah 70 mm. Kedua kolom kontrol dipasang tulangan sengkang dengan bengkokan 135 derajat. Pada daerah ujung semua kolom, jarak tulangan sengkang (sama seperti *collar* eksternal, seperti yang digambarkan dalam penampang berikut) dipasang untuk mencegah keruntuhan yang terjadi di dekat titik reaksi. *Collar* yang dipasang pada kolom terdiri dari tiga bagian yang dibedakan oleh jarak antar *collar* (Gambar 7). Pada daerah ujung-ujung kolom dipasang *collar* dengan jarak rapat, sedangkan pada daerah uji *collar* dipasang dengan jarak lebih renggang.

Dalam kasus *collar* dengan sambungan las di sudut, penetrasi alur V-tunggal ditanamkan di sekeliling pertemuan sudut-sudut menggunakan proses las busur logam terlindung. Untuk memudahkan prosedur fabrikasi *collar*, dimensi bagian dalam *collar* dibuat 10 hingga 12 mm lebih besar daripada penampang kolom. *Collar* diposisikan sedemikian agar gap antara *collar* dan kolom adalah sama di semua sisi. Gap yang ada disegel dari bagian bawah dengan sealant konstruksi dan kemudian diisi dengan *grouting epoxy* viskositas rendah. Tekanan pengekangan pada kolom yang diberikan

oleh collar las adalah pasif. Di daerah uji, baik empat, enam, atau delapan collar digunakan jarak yang sama.

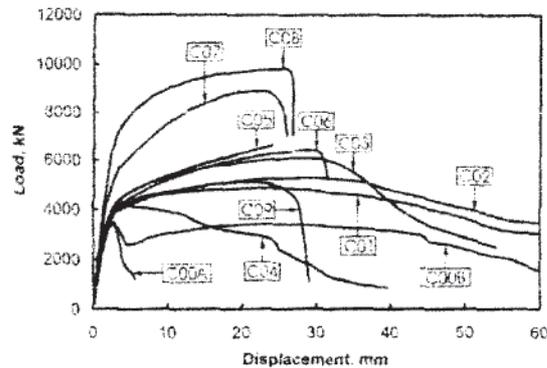


Gambar 6: Detail penulangan kolom



Gambar 7: Tipe benda uji kolom HSC Collar

Hussain dan Driver [4] melakukan pengujian dengan memberi beban tekan aksial statis pada kolom pengekang eksternal HSS Collar. Masing-masing benda uji di-grouting secara hati-hati dengan plaster pada bagian atas dan bawah untuk memastikan keseragaman perletakan. Hasil pengujian beban versus perpindahan diperoleh seperti dalam Gambar 8.



Gambar 8: Kurva beban versus perpindahan aksial

Pada kasus kolom C01, C02, dan C03 beberapa bagian dari kolom mengalami kerusakan yang disebabkan lokalisasi regangan, sehingga kedalaman pengelupasan selimut beton berdasarkan sisa pada daerah pengujian. Kolom C04 dan C09 pengelupasan selimut terjadi secara tiba-tiba dan tidak didistribusikan melewati daerah pengujian. Kolom C00A, kerusakan pengelupasan beton terjadi sangat luas, sedangkan kolom C00B, pengelupasan terdistribusi dengan baik ke daerah uji tetapi regangan dimana pengukuran diambil jauh melampaui beban puncak. Sebaliknya, untuk kolom C05, C06, C07, dan C08, pengelupasan terdistribusi dengan baik ke daerah uji, dan regangan pengukuran di tempat pengelupasan selimut mendekati beban puncak. Berdasarkan keempat kolom, dimana pengukuran pengelupasan tampak paling mewakili kondisi beban puncak, rata-rata kedalaman pengelupasan ke dalam inti mendekati $0.29s'$, di mana s' adalah jarak bersih antara collar.

Keruntuhan kolom C00A terlihat berupa keruntuhan getas karena jarak pengekang yang relatif renggang, sehingga derajat pengekangan sangat rendah dan perilaku kolom menyerupai tipe beton tanpa pengekang. Puncak beban mencapai regangan 0,0035. Kolom C00B menunjukkan keruntuhan daktail karena jarak tulangan sengkang yang rapat di daerah pengujian. Puncak beban mencapai regangan rata-rata 0,0305 pada daerah pengujian, sekitar sembilan kali regangan kolom C00A. Kolom C01, C02, C03 dan C04 dengan collar baut, menunjukkan keruntuhan daktail, meskipun daktilitas kolom C04 lebih rendah, disebabkan oleh jarak collar yang relatif besar. Kolom C05 juga dengan collar baut tidak dapat runtuh dengan mesin tes kapasitas 6,5 MN, dan diakhiri sebelum waktunya dan regangan kegagalan tidak diketahui. Kolom C06, C07, C08 dan C09 dengan collar las, menunjukkan keruntuhan getas yang dipicu oleh kehancuran las sudut dalam satu atau lebih daricollar. Karena volumetrik rasio tulangan transversal ρ_t untuk kolom-kolom ini sangat tinggi, dan collar memiliki kekakuan lentur yang tinggi sehingga memiliki efek pada tekanan pengekangan, diantisipasi bahwa, jika daktilitas dari join collar diperbaiki, kolom-kolom ini akan menunjukkan daktilitas lebih tinggi yang signifikan.

Disimpulkan oleh Hussain dan Driver [4], dari hasil pengujian kolom menggunakan pengekang eksternal collar HSS bahwa metode ini sangat potensial untuk rehabilitasi struktur beton bertulang yang terkena beban gempa karena mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas. Selain itu collar HSS mampu mencegah pengelupasan selimut beton dan menghambat pengelupasan antara collar. Daerah inti yang efektif dari kolom

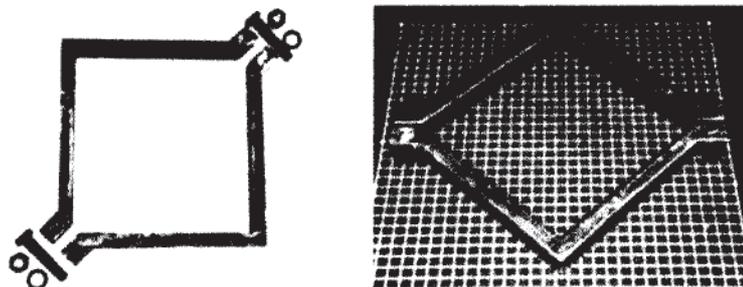
terkekang eksternal lebih besar daripada kolom konvensional. Kolom yang dikekang dengan sambungan las di ujung memperlihatkan peningkatan kekuatan, berdasarkan pada daerah inti yang tereduksi, yaitu berdasarkan daerah inti berkurang adalah 1,95 kali dari kolom *collar* baut.

Pengekangan eksternal dengan metode *collar HSS* memiliki dampak yang besar terhadap kekuatan kolom [4], disebabkan kekakuannya yang tinggi. Peningkatan kekakuan HSS meningkatkan kekuatan dan daktilitas benda uji yang diamati, meskipun manfaat kekuatan relatif kecil dibandingkan dengan peningkatan kekakuan *collar*. Untuk *collar* baut, peralatan ini perilakunya dipengaruhi oleh deformasi baut, yang komponennya relatif fleksibel dari sistem. *Collar* las, tingginya tingkat pengekan disebabkan adanya sambungan sudut yang kaku, yang akan mengurangi dampak dari momen inersia dari elemen *HSS*. Karena itu, saat meningkatnya kekakuan *collar*, ada ambang batas luar yang nilai kenaikannya berkurang dengan cepat. Kolom dengan tekanan pengekan aktif awal yang relatif tinggi menunjukkan perbaikan perilaku hingga beban puncak, tetapi menunjukkan softening yang cepat pada bagian puncak kurva, mungkin disebabkan beberapa kombinasi pengelupasan beton yang cepat antara *collar* dan lelehnya (*yielding*) baut. Peningkatan kekuatan beton yang sudah diamati adalah 1,39 kali, sementara kolom yang sama dengan peningkatan tekanan pengekan awal dengan 2,24 kali.

Pengekangan eksternal metode *steel collar* kolom beton bertulang persegi kemudian dikembangkan oleh Pudjisuryadi, dkk. [12-15] dan Tavio, dkk. [27] menggunakan baja profil siku dan sambungan baut pada sudut-sudut kolom. Pemilihan bahan profil siku untuk pengekan eksternal oleh Pudjisuryadi dan Tavio dengan pertimbangan bahan tersebut mudah diperoleh di pasaran dan harganya relatif tidak mahal. Selain itu, pembentukan (fabrikasi) *collar* tidak terlalu sulit pengerjaannya. Hasil pengujian kolom beton bertulang dengan pengekan *collar* profil siku $40 \times 40 \times 4$ mm yang dilakukan Tavio, dkk. [27] diperoleh peningkatan kekuatan dan daktilitas kolom. Kemampuan tekan kolom menggunakan pengekan *collar* siku lebih tinggi 38% dibanding kolom tanpa pengekan .

7. STEEL COLLAR PLAT BAJA L-SHAPE

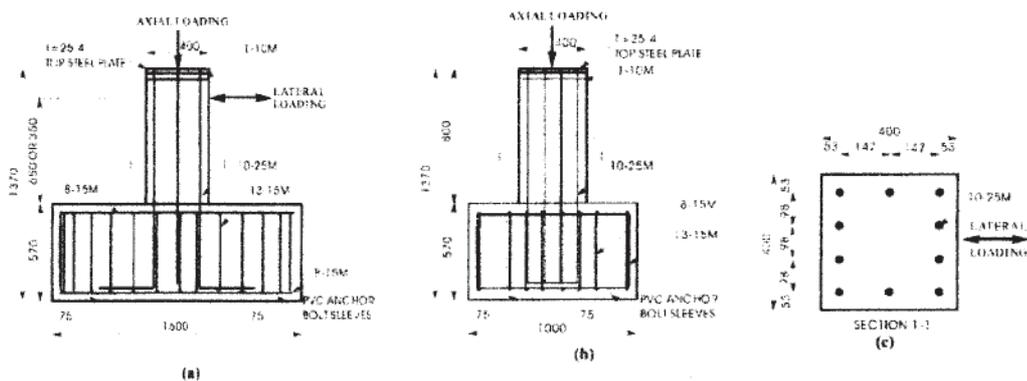
Liu, dkk. [7] pada tahun 2011 mengembangkan penelitian pengekan kolom eksternal *steel collar* dengan tipe yang lebih praktis (Gambar 9). Pengujian dilakukan terhadap benda uji dengan diberi beban aksial dan lateral siklik untuk mengetahui kekuatan, daktilitas dan respons *overall* dari kolom pendek beton bertulang. Guna mengetahui efektivitas *collar*, hasil pengujian kolom *collar* dibandingkan terhadap hasil pengujian benda uji yang dibuat dengan penulangan konvensional.



Gambar 9: Tipe *Steel collar L-Shape* (Liu, dkk. [7])

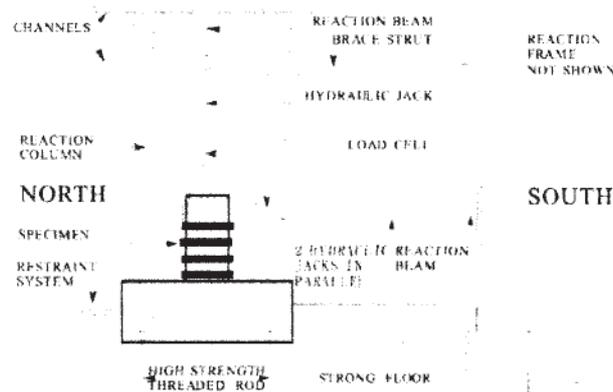
Tipe *collar* yang digunakan Liu, dkk. [7] terdiri dari dua plat baja tebal 50 mm (2 inci) yang dipotong berbentuk L. Kedua potongan disambung menggunakan baut struktur diameter 25,4 mm (1 inci) dengan standar kekuatan sesuai ASTM A490. Proses fabrikasi ini, dibuat menggunakan peralatan yang umum dan benar-benar menghilangkan kebutuhan pengelasan, sehingga biaya menjadi efektif dibandingkan dengan *built-up collar hollow structural section (HSS)* yang digunakan dalam pengujian sebelumnya. Tujuh belas *collar* dipasang dengan memutar masing-masing *collar* 90 derajat terhadap sumbu longitudinal kolom, bertujuan menyeimbangkan efek yang mungkin timbul dari penahan yang berbeda antara sudut-sudut yang kaku dan baut.

Benda uji digunakan kolom penampang ukuran 400 × 400 mm dan tinggi 800 × 570 mm sebanyak 10 buah, terdiri dari dua kolom kontrol (CV0A, CV0B) dan delapan kolom dikekang eksternal menggunakan *steel collar* (CV01 hingga CV08). Diagram penulangan benda uji kolom *collar* seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Mutu beton direncanakan mampu mencapai kekuatan 30 MPa. Parameter pengujian adalah kekakuan dan jarak *collar*, beban tekan aksial, rasio penulangan longitudinal dan kekuatan baut *collar* (35% dari kuat tarik minimum baut) untuk mencegah tekanan pengekang aktif. Semua benda uji diberi penulangan longitudinal 25M kecuali CV4 dipasang penulangan 20M.



Gambar 10: Detail penulangan benda uji kolom: (a) potongan memanjang penampang, (b) potongan melintang penampang, (c) penampang kolom (Liu, dkk. [7])

Kolom CV01 hingga CV08 diberi *collar* eksternal tetapi tidak diberi penulangan sengkang di bagian dalam di daerah uji untuk studi pengaruh penyebaran kekuatan *collar*. Kolom kontrol CV0A dan CV0B diberi penulangan transversal konvensional berupa sengkang tertutup 10M dengan bengkokan 135 derajat, dan jarak 400 mm untuk beban gravitasi (terkekang tidak baik) dan jarak 100 mm untuk kondisi pembebanan seismic (terkekang baik). Setelah pengujian CV0A selesai, kolom diperbaiki dengan *grouting mortar epoxy* di bagian daerah bahaya dan direhabilitasi dengan *steel collar*, kemudian diuji ulang untuk mengetahui kemampuan penggunaan *steel collar* pada kolom yang sebelumnya rusak. Setup pengujian dilakukan seperti dalam Gambar 11.



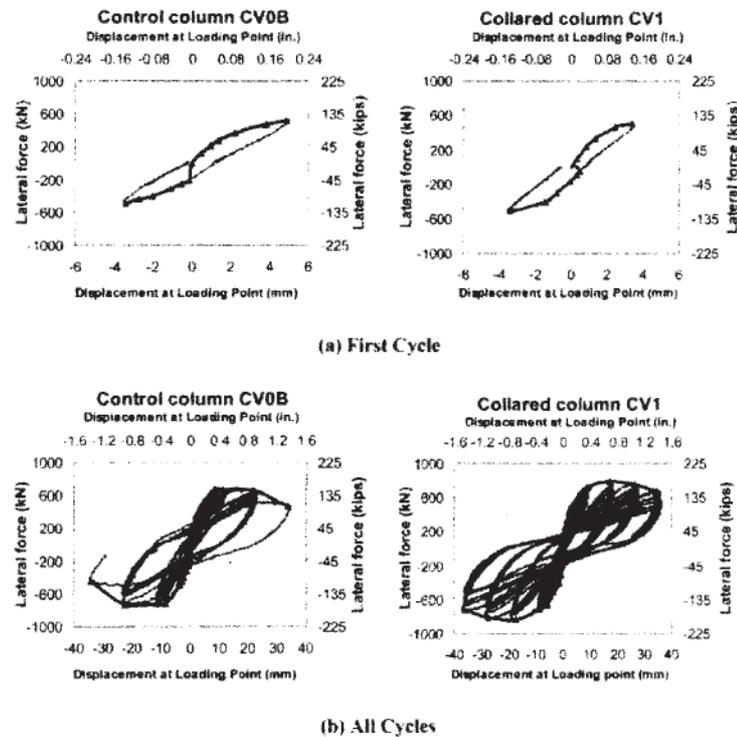
Gambar 11: Skema test set-up pengujian steel collar (Liu, dkk. [7])

Hasil pengujian kolom *steel collar* rancangan Liu, dkk. [7], tidak terjadi slip pada *collar* selama pengujian bahkan saat pengelupasan dan hancurnya selimut beton di antara *collar-collar*, dan ini bisa menjadi suatu hal yang menguntungkan untuk aplikasi rehabilitasi kolom yang rusak terkena beban gempa. Terjadi peningkatan aspek rasio kolom dari 0,88 hingga 1,63 yang dihasilkan penurunan 56% puncak gaya lateral, tetapi peningkatan 26% daktilitas perpindahan (*displacement ductility*) dan peningkatan 490% energi disipasi. Benda uji yang mendapat perlakuan perbaikan (CV0AR) dibandingkan dengan kolom kontrol (CV0A) menunjukkan peningkatan 28% gaya lateral puncak, peningkatan 64% daktilitas perpindahan, dan peningkatan 2270% energi disipasi. Level peningkatan menunjukkan bahwa perbaikan kolom beton bertulang yang rusak menggunakan mortar *epoxy* dan *steel collar* eksternal dapat mencapai kinerja yang baik. Secara umum, untuk benda uji dengan ukuran dan penulangan yang sama, kolom collar beton bertulang menahan gaya lateral dengan puncak lebih tinggi, daktilitas perpindahan dan energi disipasi yang lebih besar, dan sedikit degradasi dibanding kolom tanpa *collar*, bahkan dengan jarak tulangan sengkang yang rapat.

Kekuatan pengencangan baut pada *collar* hasil pengujian Liu, dkk. [7] berpengaruh terhadap kekuatan kolom beton bertulang collar. Kolom *collar* yang menggunakan sambungan baut lebih kencang (*snug-tight bolts*) menunjukkan peningkatan sebesar 20% pada puncak gaya lateral, dan peningkatan disipasi energi 26%, tetapi hanya peningkatan marginal dalam daktilitas perpindahan. Ukuran *collar* juga berpengaruh pada kekuatan kolom beton bertulang *collar*. Benda uji CV08 yang menggunakan *collar* eksternal ukuran 50 × 50 mm, menjadikan kekakuannya yang lebih besar, dan mampu menahan 5% lebih tinggi gaya lateral puncak dari kolom CV1 yang menggunakan *collar* ukuran lebih kecil (30 × 50 mm). Daktilitas perpindahan kolom CV8 dan total energi disipasi adalah 45% dan 64% lebih tinggi, dibandingkan dengan kolom CV1.

Untuk benda uji yang diperbaiki (CV0AR), dibandingkan dengan kolom kontrol asli, CV0A, menunjukkan peningkatan 28% beban lateral puncak, peningkatan 64% daktilitas perpindahan, dan 2270% peningkatan energi disipasi. Level peningkatan menunjukkan bahwa perbaikan suatu kolom beton bertulang yang awalnya rusak dengan *epoxy* mortar dan *steel collar* eksternal dapat mencapai kinerja yang baik. Bahkan, spesimen CV0AR, yang serupa pada akhir konfigurasi untuk kolom referensi berkerah, CV1, dilakukan lebih baik daripada kolom referensi, menunjukkan bahwa

steel collar eksternal dan grouting epoxy dapat merehabilitasi benda uji dengan kondisi yang mirip dengan kolom collar yang rusak. Hasil penelitian Liu, dkk. menunjukkan bahwa kolom *steel collar* dengan plat baja yang dibentuk L efektif untuk teknik rehabilitasi kolom yang rusak akibat gempa.



Gambar 12: Loops histeresis gaya perpindahan lateral dan amplop benda uji CV0B and CV1 (Liu, dkk. [7])

Hasil histeresis gaya perpindahan lateral bolak-balik benda uji *steel collar* Liu, dkk. [7] berhubungan dengan masing-masing tipe pengujian. Gambar 12 memperlihatkan hasil pengujian kolom tanpa *collar* (CV0B), tetapi diberi tulangan sengkang dengan jarak yang rapat, dan hasil uji kolom CV1. Secara umum, setelah tahap pembebanan, bentuk loops menjadi semakin "mengecil" terhadap awal, dan kekuatan dan kekakuan benda uji menurun pada saat nilai pembebanan meningkat. Pengujian menunjukkan bahwa kolom *collar* memiliki perilaku histeresis yang stabil, dan sistem *collar* terjaga integritasnya dengan beban siklik bolak-balik dan amplitudo perpindahan yang besar.

8. PEMBAHASAN

Pengekangan eksternal untuk retrofit kolom beton bertulang bulat dan persegi yang awalnya dilakukan oleh Priestley, dkk. [11] dengan menggunakan *steel jacket* berbentuk silinder dan elips diperoleh hasil adanya peningkatan kuat geser dan daktilitas. Kelemahan sistem *steel jacket* ini adalah bila dipasang pada kolom persegi, maka akan menghasilkan daktilitas perpindahan (*displacement ductility*) lebih rendah dibanding kolom bulat, karena degradasi respons tidak dapat dihindari yang disebabkan tidak memadainya pengekangan beton. Pengekangan sangat efektif terjadi di bagian tengah dan sudut-sudut kolom. Kemudian Xiao, dkk. [38] melakukan penelitian metode steel

jacket dengan menggunakan *welded rectilinear steel jacket* untuk kolom beton bertulang persegi, tetapi hanya untuk meningkatkan kekuatan geser saja. Sedikit peningkatan terjadi pada benda uji retrofit dengan *rectilinear steel jacket*. Metode ini kurang memadai bila digunakan untuk metode retrofit, karena belum dapat meningkatkan daktilitas kolom untuk menahan beban gempa.

Choi, dkk. [2] kemudian mengembangkan metode *new steel jacketing* untuk kolom beton bertulang bulat. Dengan metode ini, keuntungannya adalah kekakuan asli kolom tetap terjaga, tidak meningkatkan kekuatan lentur, meningkatkan kekuatan, daktilitas perpindahan dan kapasitas disipasi energi kolom beton bertulang. Metode pemasangan yang menggunakan klem untuk menghasilkan tekanan eksternal berupa tekanan lateral menjadikan metode ini cukup praktis, dan memungkinkan untuk digunakan sebagai teknik retrofit kolom.

Penelitian pengekangan eksternal untuk kolom persegi kemudian banyak dilakukan, karena umumnya kolom di gedung-gedung dibangun berbentuk persegi ataupun persegi panjang. Selain itu penelitian bertujuan mendapatkan pengekangan yang efektif pada kolom persegi atau persegi panjang karena akibat pengekang, tegangan yang terjadi di kolom tidak merata dan konsentrasi tegangan yang tinggi terjadi di sudut-sudut kolom [27]. Metode pengekangan eksternal kolom beton bertulang persegi dilakukan oleh Wu, dkk. [37] menggunakan plat baja (*steel plate*). *Steel plate* dibungkus ke kolom dengan cara diberi baut dari arah berlawanan. Hasil pengujian diperoleh pada kolom komposit dengan tebal plat 12 mm menghasilkan nilai kekuatan dan *displacement* lebih tinggi dibanding kolom lainnya. Teknik *steel plating* ini efektif karena detail sambungan yang khusus diperbolehkan plat pada permukaan tarik dari kolom untuk “*open up*” (membuka) tanpa gaya tegangan tarik yang signifikan, sementara plat pada permukaan tekan kolom dapat menarik gaya tekan yang cukup besar, sehingga mengurangi regangan tekan (dan tegangan) pada daerah tekan penampang beton dan menunda mulainya kehancuran.

Metode pengekangan eksternal kolom beton bertulang menggunakan teknik *steel collar* dilakukan oleh Hussain dan Driver [4], Liu, dkk. [7], Pudjisyadi [12-15] dan Tavio, dkk. [27] terhadap kolom beton bertulang persegi. *Steel collar* penelitian Hussain dan Driver dibuat dari HSS, dengan sambungan-sambungan baut atau las pada sudut-sudut kolom sebanyak empat titik. Teknik *steel collar* Liu, dkk. lebih praktis, karena dirakit dari plat baja tebal 50 mm yang dibentuk L dan digunakan sambungan baut hanya pada dua titik sambungan. *Collar* Pudjisyadi, dkk. [12-15] dan Tavio, dkk. [27] menggunakan baja profil siku yang disambung menggunakan baut di empat sudut-sudut kolom. Bahan yang digunakan Pudjisyadi, dkk. dan Tavio, dkk. Ini mudah diperoleh di pasaran dengan harga yang relatif tidak terlalu mahal. Selain itu, perakitan *collar* tidak terlalu sulit. Semua teknik *steel collar* ini sangat menguntungkan karena *collar* dibuat menggunakan bahan yang memiliki kekakuan lentur yang tinggi sehingga memiliki efek pada tekanan pengekangan, mampu meningkatkan kekuatan dan daktilitas, mampu mencegah pengelupasan selimut beton, menggunakan bahan yang mudah diperoleh di lapangan, dan teknik penyambungan yang tidak terlalu rumit. Jarak *steel collar* Hussain dan Driver yang dipasang pada kolom sangat mempengaruhi perilaku keruntuhan kolom saat diberi pembebanan. Keruntuhan getas terjadi pada kolom dengan *steel collar* yang jaraknya relatif renggang, sebaliknya *steel collar* yang dipasang lebih rapat menyebabkan kolom mengalami keruntuhan daktail. Alat sambung baut atau las tidak berpengaruh terhadap perilaku keruntuhan kolom. *Collar* Liu, dkk. [7] yang dipotong berbentuk L selama pengujian tidak terjadi slip antar *collar* bahkan

saat pengelupasan dan hancurnya selimut beton di antara *collar-collar*. Ukuran *steel collar* dan kerasnya pengencangan baut berpengaruh terhadap kemampuan kolom untuk menahan gaya lateral. Metode *steel collar jacketing* ini dapat disarankan untuk rehabilitasi kolom yang rusak terkena beban gempa. Penelitian retrofit menggunakan *steel collar* ini menjadi perhatian karena bermanfaat untuk kolom persegi yang menurut Prietsley, dkk. [11] pengekanan kolom persegi tidak memadai karena adanya degradasi respons, sehingga kolom terkekang dengan baik di bagian inti dan sudut-sudutnya.

9. KESIMPULAN

Dari bahasan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa untuk retrofit kolom beton bertulang dengan metode pengekanan eksternal dibutuhkan metode yang praktis saat pemasangannya ke kolom maupun saat perakitan pengekang. Bahan yang digunakan untuk pengekang relatif murah dan mudah diperoleh di lapangan, serta memiliki kekakuan yang cukup baik agar mampu menahan gaya lateral kolom sehingga menunda keruntuhan kolom lebih lama atau kolom memiliki daktilitas tinggi. Dari beberapa metode di atas, metode *new steel jacketing* Choi, dkk. [2] untuk kolom beton bertulang bulat, dan metode *steel collar* Hussain dan Driver [4]; Liu, dkk. [7]; Pudjisuryadi, dkk. [12-15]; Tavio, dkk. [27] dapat direkomendasikan untuk rehabilitasi kolom beton bertulang persegi yang rusak akibat gempa, agar kekuatan dan daktilitas kolom meningkat. Tegangan yang diakibatkan oleh pengekang eksternal pada kolom persegi tidak terdistribusi secara merata, sehingga perlu dikembangkan penelitian pengekang eksternal untuk kolom berbentuk persegi atau persegi panjang agar diperoleh pengekanan yang efektif namun efisien.

10. DAFTAR PUSTAKA

1. Achmad, K.; Suhardjono, A.; and Tavio, "Experimental Behavior of Seismic-Resistant Structural RC Columns Retrofitted with CFRP as External Confinement," *Journal of Integrated Technology*, State Polytechnic of Balikpapan, V. 1, No. 1, Oct. 2013, Balikpapan, Indonesia, pp. 30-36.
2. Choi, E.; Chung, Y. S.; Park, J.; and Cho, B. S., "Behavior of Reinforced Concrete Columns Confined by New Steel-Jacketing Method," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 107, No. 6, Farmington Hills, Michigan, USA, Nov.-Dec. 2010, pp. 654-662.
3. Choi, E.; Chung, Y. S.; Park, K.; and Jeon, J. S., "Effect of Steel Wrapping Jackets on the Bond Strength of Concrete and the Lateral Performance of Circular RC Columns," *Engineering Structures*, Elsevier, V. 48, Mar. 2013, pp. 43-54.
4. Hussain, M. A.; and Driver, R. G., "Experimental Investigation of External Confinement of Reinforced Concrete Columns by Hollow Structural Section Collars," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 102, No. 2, Farmington Hills, Michigan, USA, Mar.-Apr. 2005, pp. 242-251.
5. Kusuma, B.; and Tavio, "Unified Stress-Strain Model for Confined Columns of Any Concrete and Steel Strengths," *Proceedings of the 1st International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM-I 2008)*, 14-15 Apr. 2008, Borobudur Hotel, Jakarta, Indonesia, pp. 502-509.
6. Li, Y. F., Chen, S.H., and Chang, K. C., "A Constitutive Model of Concrete Confined by Steel Reinforcement and Steel Jackets," *Canadian Journal of Civil Engineering*, V. 32, Canada, 2005, pp. 279-288.
7. Liu, J.; Driver, R. G.; and Lubell, A. S., "Experimental Study on Short Concrete Columns with External Steel Collars," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 108, No. 3, Farmington Hills, Michigan, USA, May-June 2011, pp. 360-369.

8. Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; and Park, R., "The Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), V. 114, No. 8, Aug. 1988, Reston, Virginia, USA, pp. 1804-1826.
9. Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; and Park, R., "Observed Stress-Strain Behavior of Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), V. 114, No. 8, Aug. 1988, Reston, Virginia, USA, pp. 1827-1849.
10. Park, R.; and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures," John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1975, 769 pp.
11. Priestley, M. J. N.; Seible, F.; and Xiao, Y., "Steel Jacket Retrofitting of Reinforced Concrete Bridge Columns for Enhanced Shear Strength-Part 1: Theoretical Considerations and Test Design," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 91, No. 4, Farmington Hills, Michigan, USA, July-Aug. 1994, pp. 394-405.
12. Pudjisuryadi, P.; and Tavio, "Compressive Strength Prediction of Square Concrete Columns Retrofitted with External Steel Collars," *Civil Engineering Dimension: Journal of Civil Engineering Science and Application*, Thomson Gale™, Petra Christian University, V. 15, No. 1, Mar. 2013, Surabaya, Indonesia, pp. 18-24.
13. Pudjisuryadi P.; Tavio; and Suprobo, P., "Transverse Stress Distribution in Concrete Columns Externally Confined by Steel Angle Collars," *Proceedings of the 2nd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation (ICEEDM-II 2011)*, 19-20 July 2011, Shangri-La Hotel, Surabaya, Indonesia, pp. H-139-H-143.
14. Pudjisuryadi, P.; Tavio; and Suprobo, P., "Analytical Confining Model of Square Reinforced Concrete Columns using External Steel Collars," *International Journal of ICT-aided Architecture and Civil Engineering*, Science and Engineering Research Support Society (SERSC), accepted for publication in Dec. 2013 issue.
15. Pudjisuryadi, P.; Tavio; and Suprobo, P., "Strengthening Rectangular Concrete Columns by using External Confining Steel Collars," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Springer, under reviewed.
16. RSN13-2847 Committee, "Structural Concrete Requirements for Buildings (RSNI 3-2847-201X)," *Draft*, National Standardization Board (BSN), Jakarta, Indonesia, 264 pp.
17. Sheikh, S. A.; and Yeh, C. C., "Flexural Behavior of Confined Concrete Columns," *ACI Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 83, No. 3, Farmington Hills, Michigan, USA, May-June 1986, pp. 389-404.
18. Sheikh, S. A.; Shah, D. V.; and Houry, S. S., "Confinement of High-Strength Concrete Columns," *ACI Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 91, No. 1, Farmington Hills, Michigan, USA, Jan.-Feb. 1994, pp. 100-111.
19. SNI-1726 Committee, "Seismic-Resistant Design Code for Buildings (SNI-1726-2012)," National Standardization Board (BSN), Jakarta, Indonesia, 2012, 138 pp.
20. Tavio, "Interactive Mechanical Model for Shear Strength of Deep Beams," Discussion, *Journal of Structural Engineering*, V. 132, No. 5, May 2006, American Society of Civil Engineers (ASCE), Reston, Virginia, USA, pp. 826-829.
21. Tavio, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary (ACI 318R-08)," Discussion and Closure, *Concrete International*, American Concrete Institute (ACI), V.30, No. 4, Apr. 2008, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 1-171.
22. Tavio; Achmad, K.; Parmo; and Sulistiawan, A., "Strength and Ductility of RC Columns Retrofitted by FRP under Cyclic Loading," *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Technology, Science, and Arts (APTECS-IV 2013)*, 10 Dec. 2013, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), Surabaya, Indonesia.
23. Tavio, Budiantara, I N.; and Kusuma, B., "Spline Nonparametric Regression Analysis of Stress-Strain Curve of Confined Concrete," *Civil Engineering Dimension: Journal of Civil Engineering Science and Application*, Thomson Gale™, Petra Christian University, V. 10, No. 1, Mar. 2008a, Surabaya, Indonesia, pp. 14-27.

24. Tavio; and Kusuma, B., "Stress-Strain Model for High-Strength Concrete Confined by Welded Wire Fabric," Discussion, *Journal of Materials in Civil Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), V. 21, No. 1, Jan. 2009, Reston, Virginia, USA, pp. 40-45.
25. Tavio; dan Kusuma, B., "State of the Art of Non-Conventional Steel Reinforcement as Confinement in Reinforced Concrete Columns," *Proceedings of the 3rd International Conference of European Asian Civil Engineering Forum (EACEF)*, 20-22 Sept. 2011, Atmajaya University, Yogyakarta, Indonesia, pp. S127-S132.
26. Tavio; Kusuma, B.; and Suprobo, P., "Experimental Behavior of Concrete Columns Confined by Welded Wire Fabric as Transverse Reinforcement under Axial Compression," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 109, No. 3, May-June 2012, Farmington Hills, Michigan, USA, pp. 339-348.
27. Tavio; and Pudjisuryadi, P., "L-Shaped Steel Collars: An Alternative External Confining Retrofit for Improving Ductility and Strength of Rectangular Concrete Columns," *Proceedings of the International Seminar on Concrete Technology: Green Concrete Technology Innovation*, 4 June 2013, Diponegoro University, Semarang, Indonesia, pp. 1-16.
28. Tavio; Suprobo, P.; and Kusuma, B., "Effects of Grid Configuration on the Strength and Ductility of HSC Columns Confined with Welded Wire Fabric under Axial Loading," *Proceedings of the 1st International Conference on Modern, Construction and Maintenance of Structures*, V. 1, 10-11 Dec. 2007, Hanoi, Vietnam, pp. 178-185.
29. Tavio; Suprobo, P.; and Kusuma, B., "Ductility of Confined Reinforced Concrete Columns with Welded Reinforcement Grids," *Proceedings of the International Conference Excellence in Concrete Construction – through Innovation*, 9-10 Sept. 2008b, Kingston University, London, UK, pp. 339-344.
30. Tavio; Suprobo, P.; and Kusuma, B., "Strength and Ductility Enhancement of Reinforced HSC Columns Confined with High-Strength Transverse Steel," *Proceedings of the Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11 2008)*, 19-21 Nov. 2008c, Taipei International Convention Center, Taipei, Taiwan, pp. 350-351.
31. Tavio; Suprobo, P.; and Kusuma, B., "Investigation of Stress-Strain Models for Confinement of Concrete by Welded Wire Fabric," *Journal of Procedia Engineering*, Elsevier Ltd., V. 14, Paper No. 255, July 2011, pp. 2031-2038.
32. Tavio; and Tata, A., "Stress-Strain Relation and Nonlinear Behavior of Circular Confined Reinforced Concrete Columns," *Journal of Communication Media in Civil Engineering*, Diponegoro University, V. 16, No. 3, Oct. 2008, Semarang, Indonesia, pp. 255-268.
33. Tavio; and Tata, A., "Predicting Nonlinear Behavior and Stress-Strain Relationship of Rectangular Confined Concrete Columns with ANSYS," *Civil Engineering Dimension: Journal of Civil Engineering Science and Application*, Thomson Gale™, Petra Christian University, V. 11, No. 1, Mar. 2009, Surabaya, Indonesia, pp. 23-31.
34. Tavio; and Teng, S., "Effective Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Members," *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute (ACI), V. 101, No. 2, Farmington Hills, Michigan, USA, Mar.-Apr. 2004, pp. 252-260.
35. Tavio; Wimbadi, I.; Negara, A. K.; and Tirtajaya, R., "Effects of Confinement on Interaction Diagrams of Square Reinforced Concrete Columns," *Civil Engineering Dimension: Journal of Civil Engineering Science and Application*, Thomson Gale™, Petra Christian University, V. 11, No. 2, Sep. 2009, Surabaya, Indonesia, pp. 78-88.
36. Teng, S.; and Tavio, "Deflections of Flat Plate Floors with Irregular Column Layout," *Deflection Control for the Future, ACI SP-210*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Michigan, USA, 2003, pp. 37-63.
37. Wu, Y. F.; Griffith, M. C.; and Oehlers, D. J., "Improving the Strength and Ductility of Rectangular Reinforced Concrete Columns through Composite Partial Interaction: Tests,"

- Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), V. 129, No. 9, Sept. 2003, pp. 1183-1190.
38. Xiao, Y.; and Wu, H., "Retrofit of Reinforced Concrete Columns using Partially Stiffened Steel Jackets," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), V. 129, No. 6, June 2003, pp. 725-732.