

## PENGUATAN GESEN PADA KERETAKAN SENDI BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN KOMPOSIT SERAT KARBON YANG DIPERKUAT PLASTIK (SKDP)

Maryo P. Eisenring\*

### Abstract

*Carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP), has over two decades become an increasingly notable material used in structural engineering application. CFRP could be used as prestressing materials due to their high strength. However research by improving the shear capacity of beam-column T-joints using CFRP composite materials is still in the early stages.*

*The present paper describes some experimental results of unreal scale (one-third times the actual size) tests of concrete beam-column joints of several experiments by the Civil Construction Experts for 14 specimens. The variables considered were the composite system, the fiber orientation, and the surface preparation. The tests have demonstrated the viability of carbon FRP composites for their use in improving the shear capacity of the joints with inadequate confinement and their reinforcement. analysis.*

**Keywords:** Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), Concrete, Civil Construction

### 1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, metode-metode perbaikan *seismik* (keadaan akibat gempa) telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja struktur-struktur Beton bertulang (RC). Baru-baru ini, sebuah metode *retrofit* baru (pemasangan komponen bantuan untuk perkuatan) melibatkan pemakaian serat karbon yang diperkuat plastik (SKDP) telah menjadi pusat perhatian. Komposit ini menawarkan keunggulan yang lebih hebat dibandingkan struktur baja, beton bertulang, maupun kayu. Beberapa keuntungannya antara lain keunggulannya atas daya tahannya terhadap pengaruh korosi, kekakuan tinggi - terhadap-berat dan rasio-rasio kekuatan terhadap berat, dan kemampuan untuk mengontrol perilaku material dengan memilih orientasi yang tepat dari serat. Semua keistimewaan ini membuat komposit serat karbon menjadi bahan yang sangat teknis dan cocok untuk penerapan pada prasarana, terlepas dari fakta bahwa biaya serat karbon jauh lebih tinggi daripada biaya bahan konstruksi konvensional.

Penelitian yang luas atas *retrofit* (penambahan komponen bahan untuk perkuatan) kolom telah disosialisasikan di Universitas California di San Diego oleh Sun et al. (1993),

Seible et al. (1994), Priestley et al. (1996), dan Seible et al (1997). Kolom Bundar, Segi empat, dan kolom persegi empat panjang jembatan telah diperkuat dari luar dengan menggunakan bahan komposit serat karbon diperkuat plastik yang dibungkus secara menerus (SKDP) dan baja berselimut, confinement (tindakan pengekangan untuk keutuhan bentuk), daktilitas dan gesernya dipelajari, dan dengan pedoman desain yang dikembangkan. Sebuah percobaan investigasi dilakukan oleh Saadarmahesh et al (1996) untuk mempelajari kinerja seismik kolom beton bertulang dipasang dengan straps komposit. Kolom dipasang memiliki daktilitas yang unggul (sampai 6) dibandingkan dengan tingkat daktilitas yang normal 1,5 yang diamati untuk spesimen awal. Rangkaian 12 balok beton diuji oleh Chajes dkk (1994) untuk mempelajari efektivitas lembaran-lembaran komposit diterapkan secara eksternal untuk meningkatkan kapasitas geser bagian beton yang retak ini. Karbon, dan lembaran Fiber yang diperkuat plastik (FRP) yang digunakan untuk mempelajari pengaruh kekakuan dan kekuatan dari bahan. Peningkatan kekuatan batas balok itu dari 60 - 150% tercapai. Dalam sebuah studi yang dilakukan oleh Triantafillou (1998), hasil eksperimen dan analisis diperbandingkan dengan balok yang diperkuat dari luar.

\* Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Tadulako, Palu

Kegagalan balok-balok ini disebabkan delaminasi (bagian beton membelah ke dalam lapisan) material komposit dari permukaan beton, pada tingkat regangan komposit yang sangat rendah (dalam kisaran 0,05 - 0,17%). Malek dan Saadatmanesh (1998) baru-baru ini mempelajari kapasitas geser batas dari balok beton bertulang utama yang diperkuat dengan jaringan – yang melekat pada pelat Fiber yang diperkuat plastic (FRP).

Tegangan Geser sendi direkomendasikan oleh ACI 352R – 91 ("Rekomendasi" 1991) berlaku untuk balok yang baru dibuat – sendi-sendi kolom. Tekanan yang diijinkan ini didasarkan pada beton sendi tepat terbatas dengan tulangan geser pada sendi yang memadai. Namun, struktur beton tua tidak memenuhi kriteria ini, dan berdasarkan pada studi eksperimental, T - sendi telah dirancang tiga dekade yang lalu dan gagal pada tingkat tekanan yang jauh lebih rendah (Nilsson dan Losberg, 1976; Priestley et al 1997).

Untuk memperkuat sendi yang lemah, sudah tersedia beberapa metode. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Lowes dan Moehle (1995), untuk salah satu spesimen bagian dari sendi ditambah dan paku dinding khusus disediakan. Untuk spesimen lainnya, batang-batang yang menjadi pusat ketegangan tambahan difungsikan ke dalam bagian yang ditingkatkan, dan gaya aksial diterapkan kepada bagian beton tersebut. Kekuatan kerangka koneksi telah bertambah dengan tindakan pengekangan pada daerah sendi dalam studi yang dilakukan oleh Aleacer dan Jirsa (1993) peningkatan serupa juga diperoleh dengan menerapkan selimut baja bergelombang di sekitar sambungan balok-kolom (Biddah et al 1997). Sebuah metode dirumuskan untuk merancang selimut baja tebal bergelombang dan dalam.

Penguatan beton sendi balok-kolom dibutuhkan untuk jembatan beton dan struktur beton lainnya yang telah dibangun sebelum tahun 1980-an yang mungkin memiliki masalah korosi atau seismik (pengaruh gempa). Penelitian ini berfokus pada teknik retrofit (pemasangan komponen bantuan untuk perkuatan) berdasarkan lembaran SKDP eksternal yang diterapkan secara komposit.

Untuk mempelajari perilaku beton T-sendi maka dirancang 14 spesimen, dibangun, dan diuji. Ada empat dasar spesimen yang telah dicoba pada kondisi terbangun. Spesimen yang tersisa

diperkuat dari luar dengan menggunakan lembaran tenunan komposit. Variabel berikut telah dipertimbangkan; proses perawatan komposit, tata letak SKDP, dan persiapan permukaan spesimen beton. Hasil eksperimen tersebut kemudian dibandingkan dengan temuan analitis dari DRAIN-2DX (Prakash et al 1992). Berdasarkan peningkatan kekuatan spesimen dan bergabung dengan menganalisis tegangan geser, persamaan desain diberikan untuk retrofit balok-kolom sendi. Temuan analisis dari T-sendi spesimen yang digunakan dalam retrofit dari lengkungan jembatan di Interstate 15.

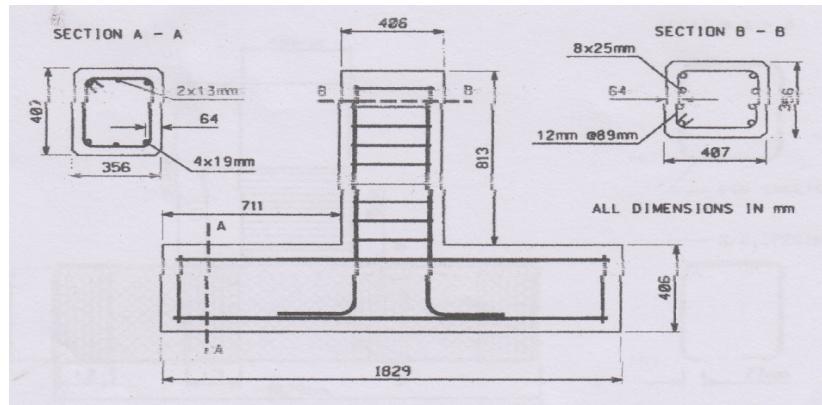
## 2. Desain Sampel

Gambar 1 menunjukkan dimensi dan penguatan dalam sampel-sampel beton bertulang. Spesimen (sampel) diuji dalam posisi sela antara yang dibandingkan dengan posisi dalam struktur Beton bertulang yang nyata, seperti yang ditunjukkan pada Gbr.2. Pada tahap I Sampel beton 20-Mpa disampaikan untuk pembuatan sembilan spesimen (sampel). Untuk menjelaskan persiapan permukaan sebagai variabel tes, lima spesimen (sampel) lagi dibuat (Tahap II). Namun, untuk kasus terakhir, kekuatan tekan diukur dari beton adalah 34 MPa.

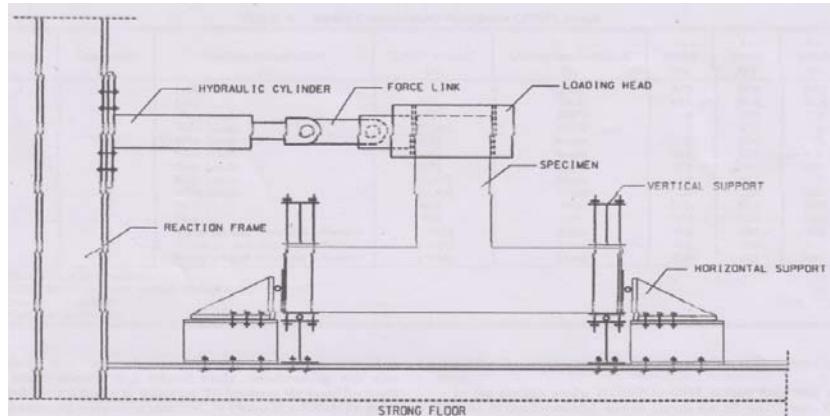
Diasumsikan bahwa kekuatan yang dihasilkan dari tulangan longitudinal dan transversal untuk semua sampel adalah 414 Mpa.

Agar dapat mengidentifikasi berapa banyak masing-masing komponen pertahanan (beton, baja tulangan, dan lembaran SKDP) memberikan kontribusi untuk kapasitas geser keseluruhan sendi, penguatan melintang dalam balok dan kolom balok pada daerah sendi sepenuhnya dihilangkan. Jumlah tulangan longitudinal dan transversal yang disediakan dalam kolom sudah cukup untuk memastikan bahwa beban lateral sesuai dengan kapasitas lentur dan geser dari kolom melebihi beban yang sesuai dengan kapasitas geser balok dan sendi.

Ditemukan dari penelitian sebelumnya bahwa efektivitas lembaran komposit diterapkan untuk bagian beton persegi panjang sangat tergantung pada tingkat konsentrasi tekanan dalam material komposit di sudut. Oleh karena itu, Chamfer (permukaan miring terbentuk di sudut beton)  $r = 38\text{-mm}$  dibentuk dan digurinda di sudut spesimen (sampel).



Gambar 1. Dimensi-dimensi sampel konstruksi sendi dari Kolom-Balok



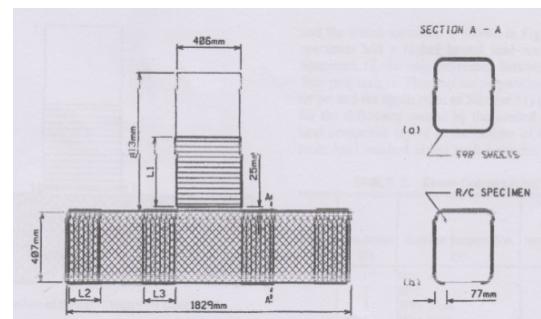
Gambar 2. Pengaturan uji sampel konstruksi sendi Kolom-Balok

### 3. Aplikasi Komposit

Dua spesimen (sampel) dalam setiap fase diuji dalam kondisi apa adanya. Tujuh spesimen dalam Tahap I dan tiga spesimen dalam Tahap II dan tiga spesimen di Tahap II diperkuat dengan pemakaian lembar komposit SKDP tenunan dari luar. Gambar. 3 memberikan tata letak komposit umum. Untuk setiap spesimen, dimensi suhu perawatan, dan persiapan permukaan dirangkum dalam Tabel 1.

Seperti dalam setiap prosedur perbaikan yang melibatkan bahan-bahan dari luar melekat pada bagian beton yang ada, di sini juga, ikatan antara permukaan beton dan lembar komposit sangat penting. Kualitas permukaan beton dari sudut pandang adhesi sangat tergantung pada kualitas penyelesaian akhir, kekuatan beton, dan keberadaan bahan yang diendapkan pada

permukaan antara lain (cat, debu, minyak, material lepas dan lain lain).



Gambar 3. Tata letak Serat Karbon yang diperkuat plastik pada  
a) Keempat sisi dari balok.  
b) Ketiga sisi dari balok.

Tabel 1. Tata letak Sampel Sendi Balok-Kolom

Fase	Sampel	Persiapan Permukaan	Tata-letak SKDP (4)	Temperatur yg disesuaikan (5)	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>3</sub> (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			
I	1 <sup>b</sup>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	2 <sup>b</sup>	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	3	Sikat kawat	[45]	350 <sup>0</sup> F	0	178	0
	4	Sikat kawat	<b>45</b>	350 <sup>0</sup> F	0	178	0
	5	Sikat kawat	[45]	Ruangan	0	229	0
	6	Sikat kawat	[45]	Ruangan	432	229	406
	7	Sikat kawat	[45]	Ruangan	432	229	406
	8	Sikat kawat	<b>45</b>	Ruangan	0	203	0
	9	Sikat kawat	<b>45</b>	Ruangan	406	229	203
II.	10 <sup>b</sup>	N/A	[45]	N/A	N/A	N/A	N/A
	11	N/A	[45]	N/A	N/A	N/A	N/A
	12	Penyemprotan air dan perekatan struktural	[45]	Ruangan	406	203	406
	13		N/A	Ruangan	406	203	406
	14	Penyemprotan air dan perekatan struktural	N/A	Ruangan	406	203	406
			<b>45</b>				
			<b>45</b>				
			<b>45</b>				

Catatan : N/A = tidak bisa terpakai, Perletakan SKDP pada setiap permukaan vertical balok. Sampel Dasar hanya pada 3 sisi.

Pada tahap I, spesimen (sampel) disikat kawat sampai bahan-bahan lepasnya tersingkirkan. Namun, metode ini terbukti tidak memuaskan dalam suatu studi yang terkait. Sandblasting (ledakan udara atau uap yang sarat dengan pasir, digunakan untuk membersihkan, menggiling, memotong, atau menghiasi permukaan yang keras) juga ternyata akan kalah dengan jet air(semprotan air). Untuk meningkatkan perekatan antara material beton dan komposit, di Tahap II jet air dengan tekanan 276-MPa digunakan untuk menghilangkan bahan lepas dan lemah dari permukaan suatu spesimen balok-kolom hingga pada ketebalan 3-mm.

Matriks (bagian berbutir halus dari batu yang kasar kristal atau fragmen batuan yang tertanam) dalam bahan komposit memiliki 2 komponen, rasio, dan bahan pengawet. Campuran kedua memberikan ikatan yang kuat dan efektif

antara lembaran komposit dan permukaan yang dirawat. Sebuah resin Epon 828 digunakan dalam Tahap I. Karena padat tenun dari bahan serat karbon (tujuh serat setiap 25,4 mm) dan jenis resin dengan viskositas lebih tinggi, itu lebih sulit untuk memastikan kandungan resin memuaskan dalam komposit. Untuk menghilangkan masalah ini, sebuah resin **Epon 826** dalam kombinasi dengan tenun longgar (enam serat per 25,4 mm) yang digunakan dalam Tahap II.

Kedua jenis agen (objek yang memproduksi atau digunakan untuk mendapatkan hasil tertentu) perawatan yang digunakan dalam proyek ini mengharuskan prosedur yang berbeda. Jenis pertama dari bahan pengawet (Epires Epicure) diperlukan suhu perawatan pada temperatur 154<sup>0</sup>C selama 90 menit, dan jalan pendinginan 30 menit. Karena jenis agent (benda memproduksi atau digunakan untuk memperoleh hasil tertentu)

perawatan, adalah mungkin bila terlebih dahulu mempersiapkan bahan fiber resin dalam lingkungan produksi yang diawasi secara ketat. Tipe kedua bahan pengawet (3379 Epicure) diperlukan suhu kamar hanya untuk merawat selama kurang lebih 7 hari.

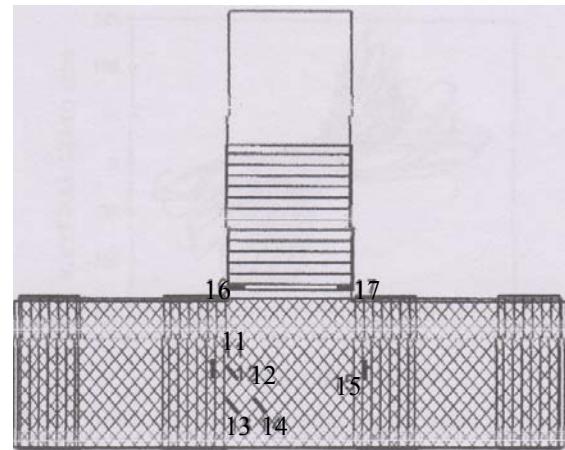
Dalam penelitian ini, serat karbon PANEX33-0048 diterapkannya dalam lembaran anyaman yang tidak searah untuk semua spesimen. Lebar lembaran tersebut adalah 406 mm, yang memungkinkan sebuah aplikasi lebih mudah untuk mengurangi spesimen skala. Ketebalan lembaran karbon adalah sekitar 1,32 mm.

Sebelum menerapkan material komposit, spesimen itu benar-benar tersikat kawat dan hampa udara. Untuk salah satu spesimen di Tahap II, permukaan disiapkan penyemprotan air, lapisan tipis Sikadur 31 tergelar di permukaan. Hal ini diperlukan untuk memperoleh permukaan yang kasar bahkan untuk meningkatkan ikatan.

Garis besar tata letak komposit ditandai pada sampel, yang membuat penerapan lapisan miring lebih mudah. Lembar komposit kemudian dipotong dengan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Sebuah lapisan tipis epoksi dipakaikan pada permukaan yang disiapkan dan komposit diletakkan mengikuti spesifikasi disain.

Lapisan  $L_1$  di bagian bawah dari kolom (Gbr.3 dan tabel I) memiliki efek menerus pada daerah puncak momen lengkung. Itu diperlukan untuk menerapkan pita SKDP pada ujung balok (dimensi  $L_2$ ) dalam arah melintang untuk memperkuat balok di lokasi perangkat alat pemegang. Lapisan  $L_3$  pada kedua sisi balok dalam arah melintang melayani dua tujuan, untuk membatasi wilayah momen maksimum balok dan untuk meningkatkan efektivitas jangkar untuk lapisan komposit yang dipakaikan pada daerah sendi balok-kolom.

Lapisan komposit menerus dipakaikan pada sudut  $45^\circ$  di sepanjang balok, namun hanya untuk tiga sisi, atas, dan dua sisi lateral. Namun, lapisan ini berbalik di bagian bawah balok oleh kira-kira 76 mm. Hal ini diperlukan untuk menstimulasi aksesibilitas di bagian atas balok topi, yang merupakan bagian bawah benda uji, dalam jembatan melengkung yang sebenarnya (dukungan untuk girders) atau di gedung beton bertulang di mana lempengan dihubungkan ke bagian atas balok.



Gambar 4. Lokasi Pengukuran tegangan pada komposit

Alat pengukur tegangan digunakan untuk memantau variasi tingkat tegangan pada tulangan membujur balok dan permukaan beton. Pengukur regangan juga menempel pada permukaan bahan komposit dalam arah serat, seperti yang ditunjukkan di dalam Gambar 4.

Sebuah putaran, menyerupai beban lateral statis dipakaikan di bagian atas kolom. Tes ini adalah tenaga yang dikendalikan dari beban meningkat pada setiap langkah dari 44,5 kN dengan kenaikan 22,2 kN dalam setiap langkah ada tiga siklus, dan setiap siklus terdiri dari dorongan dan tarikan segmen dari posisi netral kolom ini.

Tes ini berlangsung hingga kerugian yang signifikan dalam kekuatan diamati karena retak, balok tertarik keluar, atau kegagalan komposit.

#### 4. Hasil Eksperimental

Modus kegagalan yang diamati adalah fungsi dari tata letak komposit, persiapan permukaan, dan jumlah lapisan. Untuk spesimen awal, kerusakan geser di daerah sendi balok-kolom yang menyebabkan kegagalan pada beban lateral cukup rendah. Ketika tekanan tarik diagonal mencapai kekuatan tarik beton itu, retak diagonal mulai muncul. Dengan lebih meningkatkan beban putaran, secara signifikan terjadi kerusakan sendi dan model kegagalan kemudian diamati. Untuk spesimen yang diperkuat, lembaran SKDP secara bertahap dibagi dalam lapisan tipis dari muka balok, membiarkan sendi tanpa tulangan eksternal yang efektif. Hal ini mengakibatkan kerusakan serupa tetapi berisi. Namun, beban lateral puncak

secara signifikan meningkat. Ringkasan dari beban lateral puncak untuk semua spesimen diberikan dalam Tabel 2.

Gambar 5 menunjukkan kurva perpindahan beban untuk garis dasar spesimen pada Tahap II (Specimen 10) and gambar 6 menunjukkan gambar dari spesimen pada akhir tes.

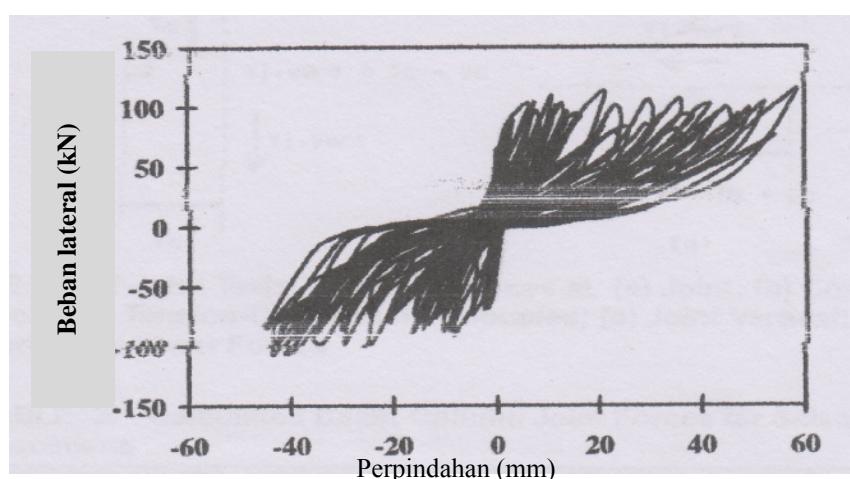
Kapasitas beban lateral spesimen ini mirip dengan kapasitas spesimen 1 dan 2 (Tahap I) meskipun ada perbedaan dalam kekuatan tekan beton, hal ini disebabkan oleh torsi yang lebih besar memperkenalkan ke dalam sistem. Beban maksimum dicapai dalam segmen dorong adalah 126 kN, dan segmen tarik 116 kN.

Tabel 2. Hasil-hasil percobaan pada Sendi Balok-Kolom

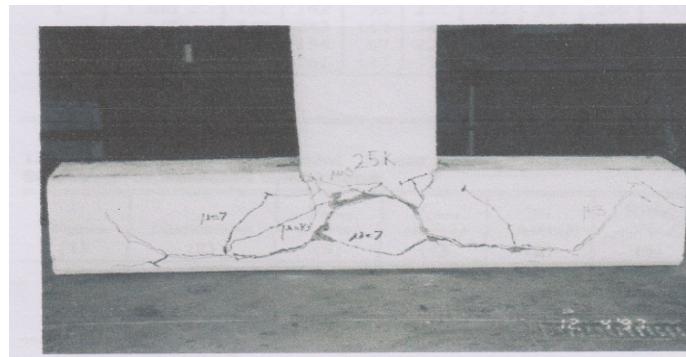
Fase (1)	Sampel (2)	Persiapan Permukaan (3)	Temperatur yg disediakan (5)	Gaya tekan (kN)	Gaya Tarik (kN)
I	1 <sup>b</sup>	N/A	N/A	129	129
	2 <sup>b</sup>	N/A	N/A	129	142
	3	Sikat kawat	350 <sup>0</sup> F	182	142
	4	Sikat kawat	350 <sup>0</sup> F	187	187
	5	Sikat kawat	Ruangan	161	154
	6	Sikat kawat	Ruangan	158	140
	7	Sikat kawat	Ruangan	156	143
	8	Sikat kawat	Ruangan	187	187
	9	Sikat kawat	Ruangan	216	200
II.	10 <sup>b</sup>	N/A	N/A	126	116
	11	N/A	N/A	148	98
	12	Penyemprotan air	dan	184	217
	13	perekatan struktural	dan	204	198
	14	Penyemprotan air	dan	229	224
		perekatan struktural			
		Penyemprotan air	dan		
		perekatan struktural			

Catatan N/A = Tidak dapat digunakan Spesimen dasar

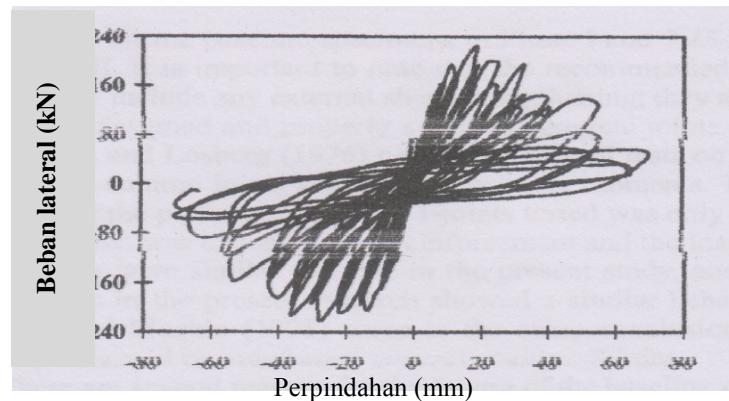
Nilai-nilai yang tepat.



Gambar 5. Pengujian Sendi-T Beban vs Pemindahan untuk sampel 10.



Gambar 6. Spesimen 10 pada akhir pengujian



Gambar 7. Pengujian Sendi-T Beban vs Pemindahan untuk sampel 14.



Gambar 8. Spesimen 14 pada akhir pengujian

Gambar 5 menunjukkan kurva perpindahan beban untuk garis dasar spesimen pada Tahap II (Specimen 10) and gambar 6 menunjukkan gambar dari spesimen pada akhir tes. Kapasitas beban lateral spesimen ini mirip dengan kapasitas spesimen 1 dan 2 (Tahap I) meskipun ada perbedaan dalam kekuatan tekan beton, hal ini

disebabkan oleh torsi yang lebih besar memperkenalkan ke dalam sistem. Beban maksimum dicapai dalam segmen dorong adalah 126 kN, dan segmen tarik 116 kN.

Gambar 7 menunjukkan kurva beban-perpindahan untuk Spesimen 14 dan spesimen teruji ditunjukkan pada gambar. 8. Seperti yang

diharapkan, spesimen ini memiliki kapasitas resistensi beban lateral yang lebih tinggi dibandingkan Spesimen 12, satu-satunya perbedaan antara mereka menjadi persiapan permukaan. Persiapan permukaan ini (grinding menggunakan jet air dan penerapan Sikadur 31) terbukti untuk mengkompensasi kekurangan yang disebabkan oleh perpanjangan terbatas dari lapisan komposit vertikal di bagian bawah balok. Beban maksimum dicapai dalam segmen dorong adalah  $P_{max} = 229$  kN, dan untuk segmen tarik  $P_{max} = 224$  kN. Nilai-nilai beban puncak lateral lebih tinggi dari rata-rata beban Spesimen 12 dan 13 (Tabel 2). Bahkan dengan ikatan beton unggul komposit, regangan pada komposit yang sesuai dengan beban lateral puncak itu hanya sepertiga dari tegangan utama untuk bahan yang digunakan.

## 5. Hasil Analisis

Untuk menghitung gaya geser horisontal dan vertikal di daerah sendi, gaya yang bekerja pada wajah kolom dan balok dikurangi terhadap ketegangan-kompresi pasangan. Hal ini diilustrasikan dalam Gbr.9 (a) dengan semua kekuatan di sendi. Gambar. 9 (b) menunjukkan kekuatan yang dihasilkan pasangan, dapat dilihat bahwa karena reaksi horisontal  $H_b$  yang membebani balok, gaya-gaya  $T_b$  dan  $C_b$  tidak akan sama.

Untuk menemukan data gaya, tegangan dan data kelengkungan dari analisis DRAIN-2DX yang digunakan, untuk menghitung kompresi gaya  $C_1$ , kontribusi penguatan di zona kompresi juga disertakan dengan bagian beton. Hal ini diperlukan karena skala spesimen dan jumlah tulangan yang disediakan untuk unsur-unsur.

Pasangan Tegangan-kompresi menghitung dari unsur gaya yang diberikan dalam Tabel 3. Untuk menghitung gaya geser horisontal dan vertikal gabungan (diberikan dalam Kolom 9 dan 10 pada Tabel 3), persamaan berikut (berasal dari hubungan kekuatan keseimbangan ditunjukkan pada Gbr.9 (c dan d) telah digunakan:

$$V_{j,vert} = T_c - V_a \quad (1)$$

$$V_{j,vert} = C_a - T_b \quad (2)$$

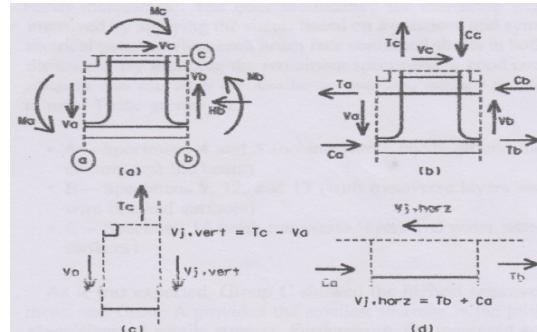
Dimana  $V_{j,vert}$  = gaya geser gabungan vertikal, dan  $V_{j,horz}$  = gaya geser sendi horisontal. Tegangan geser di wilayah sendi dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$V_{j,vert} = \frac{V_{j,vert}}{h_b \times b_b} \quad (3)$$

$$V_{j,horz} = \frac{V_{j,horz}}{h_a \times b_a} \quad (4)$$

Dimana  $V_{j,vert}$  = tegangan geser gabungan vertikal;  $V_{j,vert}$  = dihitung gaya geser vertikal;  $h_b$  = kedalaman efektif balok,  $b_b$  = lebar efektif balok  $V_{j,horz}$  = dihitung gaya geser horizontal,  $h_a$  = kedalaman efektif kolom, dan  $b_a$  = lebar efektif kolom. Dalam kasus T-sendi diuji, lebar efektif balok adalah sama dengan lebar efektif kolom (356 mm), dan kedalaman efektif balok sama dengan kedalaman efektif kolom (406 mm).

Tekanan-tekanan Tegangan geser sendi yang terhitung diberikan pada Tabel 4 (Kolom 3 dan 4). Hal ini menekankan hanya sebagian kecil dari kekuatan geser gabungan diberikan dalam ACI 352R-91. Nilai-nilai yang direkomendasikan (sebagai fungsi dari kuat tekan beton) adalah 5,52 MPa untuk spesimen-spesimen garis dasar dalam Tahap I dan 7,25 MPa di Tahap II. Penting untuk dicatat bahwa nilai yang direkomendasikan tidak mencakup penguatan geser eksternal, mereka berlaku untuk disain baru dan dirancang sendi-sendi beton terkekang yang nyata.



Gambar 9. Pengujian-pengujian Sambungan T:

- Sambungan
- Pasangan Tegangan –Kompresi yang sesuai.
- Sendi vertikal.
- Gaya-gaya Geser horizontal.

Tabel 3. Gaya-gaya sendi Balok-Kolom yang dihitung

Phase (1)	Specimen (2)	$T_a$ (kN) (3)	$C_a$ (kN) (4)	$T_b$ (kN) (5)	$C_b$ (kN) (6)	$T_c$ (kN) (7)	$C_c$ (kN) (8)	$V_{j,vert}$ (kN) (9)	$V_{j,horz}$ (kN) (10)
I	1 and 2 <sup>a</sup>	162	162	93	232	327	327	240	255
	9 <sup>b</sup>	243	243	140	346	487	487	358	382
II	10 and 11 <sup>a</sup>	154	154	87	221	347	347	263	241
	14 <sup>b</sup>	261	261	147	375	589	589	447	408

Tabel 4. Gaya geser sendi Balok-Kolom yang dihitung & tekanan-tekanan tarik diagonal untuk sampel terpilih

Phase (1)	Specimen (2)	$V_{j,vert}$ (MPa) (3)	$V_{j,horz}$ (MPa) (4)	$\sigma_t$ (MPa) (5)	Ratio $\sigma_t/\sqrt{f_c}$ (6)
I	1 and 2 <sup>a</sup>	1.66	1.76	1.71	0.39
	9 <sup>b</sup>	2.48	2.64	2.56	0.58
II	10 and 11 <sup>a</sup>	4.82	4.64	4.75	0.33
	14 <sup>b</sup>	3.09	2.82	2.96	0.51

Nilson dan Losberg (1976) melakukan beberapa tes pada sendi balok-kolom yang khas mengalami momen lentur. Mereka menemukan bahwa kinerja T-sendi diuji hanya 24 - 40% dari apa yang diharapkan. Penguatan dan kondisi pemutatan yang serupa dengan yang dalam penelitian ini, dan spesimen dalam penelitian ini menunjukkan perilaku serupa Lowes dan Moehle (1995) sampai pada kesimpulan yang sama untuk hasil tes yang dilakukan bagi sendi/sambungan T jembatan beton bertulang

Ada beberapa alasan untuk kegagalan spesimen awal pada sepertiga dari nilai desain kekuatan yang disarankan:

- a. Sendi-sendi Balok - kolom tekanan penguatan regangan tidak mengembangkan kapasitas penuhnya. Hal ini berlaku jika kita menganggap bahwa gaya geser sendi horizontal diambil oleh tulangan kolom melewati atau benar bertumpu di wilayah sendi.
- b. Ketika tekanan ketegangan sendi utama nominal mencapai tegangan tarik dari beton, retak-retak diagonal akan menyebabkan kerusakan yang luas di wilayah sendi.
- c. Sendi T memiliki tulangan kolom melengkung jauh dari sendi tidak memberikan kekangan yang memadai beton dalam inti sendi. Selain itu, tekanan tarik dalam tulangan dan kait menghasilkan kekuatan yang cenderung

menunjuk terpusat keluar dari kaitan dan kelebihan berat balok di daerah ketegangan. Efek ini menciptakan tekanan tinggi pada balok yang tidak masuk akal pada tulangan membujur.

- d. Jika diameter tulangan melewati sendi itu besar dibandingkan dengan ukuran keseluruhan dari balok dan kolom, potensi selip tulangan dan kegagalan obligasi penulangan kembali menjadi tinggi.

Berdasarkan hasil pengujian, Priestley et al. (1996) membuktikan bahwa retak sendi dapat terjadi ketika sendi ketegangan nominal tekanan utama  $\sigma_t$  melebihi  $0,29 \times \sqrt{f_c}$ . Tegangan tarik nominal utama (atau tegangan tarik diagonal) yang dikembangkan di daerah sendi balok-kolom dapat dievaluasi dengan:

$$\sigma_t = \frac{\sigma_p}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_p^2}{4} + v_j^2}$$

Dimana  $\sigma_t$  = tekanan tegangan pokok nominal yang dihitung atau tegangan tarik diagonal;  $\sigma_p$  = tekanan kompresi aksial pada sendi (dari beban aksial atau pratekan, yang diabaikan untuk spesimen-spesimen yang dipelajari), dan  $v_j$  = tekanan geser sendi yang setara. Tegangan tarik diagonal yang dihitung

dirangkum dalam Tabel 4 (kolom 5) Rasio tegangan tarik diagonal sehubungan dengan kuat tekan beton juga diberikan (kolom 6).

Untuk kedua fase, garis dasar spesimen gagal pada tingkat tegangan tarik ringan lebih tinggi daripada nilai kekuatan yang diberikan, meskipun tegangan geser jauh lebih rendah daripada nilai yang diharapkan, hal ini menunjukkan bahwa spesimen gagal disebabkan oleh retak diagonal yang berlebihan yang disebabkan oleh gabungan tarik tinggi diagonal stres dan oleh kegagalan obligasi rebar.

Jelaslah dari Tabel 4 bahwa spesimen diperkuat oleh kekangan lembaran SKDP eksternal menunjukkan meningkatnya kapasitas geser sendi balok-kolom. Dalam sebagian besar benda uji diperbaiki, kerugian kekuatan substansial diamati segera setelah lembaran komposit delaminasi (dipakaikan secara berlapis-lapis) dari muka sendi. Delaminating ini terjadi dalam satu langkah beban tunggal, yang menunjukkan kegagalan yang agak rapuh.

Tabel 5. Penampilan uji Sendi Balok – Kolom

Phase (1)	Specimen (2)	Diagonal tensile stress (MPa) (3)	Increase in $\sigma_t$ (%) (4)	Contribution of CFRP (%) (5)
I	1 and 2	1.71	0	N/A
	3	2.04	0.33	0.44
	4	2.56	0.66	3.71
	5	1.99	0.28	0.37
	6	1.88	0.17	0.22
	7	1.89	0.18	0.24
	8	2.36	0.62	1.64
	9	2.56	0.85	2.25
II	10 and 11	1.75	0	N/A
	12	2.59	0.84	2.22
	13	2.58	0.83	2.19
	14	2.04	1.21	3.33

Tabel 5 di atas memberikan ringkasan dari tegangan tarik diagonal (MPa) untuk semua balok-kolom spesimen sendi (kolom 3). Untuk mengidentifikasi perbaikan yang dilakukan dengan menerapkan lembaran komposit, peningkatan atas dasar spesimen juga disertakan MPa x mm (kolom 4) dan akhirnya kontribusi lembar SKDP yang termasuk juga di dalamnya (kolom 5). Hal ini dapat dilihat dari Tabel 5 bahwa kontribusi dari satu lapisan tunggal pada setiap permukaan balok (spesimen 3 dan 5 - 7) agak tidak konsisten. Hal buruk yang berlebihan untuk setup ini ditingkatkan dengan menerapkan lembar didasarkan pada suatu

pola yang seimbang dan simetris, ketika masing-masing permukaan balok terkandung lembar di kedua arah. Dengan mengelompokkan spesimen tersisa, korelasi baik diamati untuk tata letak yang sama dan persiapan permukaan. Kelompok-kelompok ini adalah:

- A - Spesimen 4 dan 8 (tidak ada lapisan melintang di sekitar kolom dan balok)
- B - Spesimen 9, 12, dan 13 (dengan lapisan melintang dan permukaan yang disikat kawat).
- C - Spesimen 14 (dengan lapisan melintang dan permukaan yang disemprot air).

Seperti yang diharapkan, Grup C menunjukkan peningkatan tertinggi, dan Grup A diberikan kenaikan terkecil di geser sendi / tegangan tarik diagonal. Selain itu, rata-rata strain diukur dalam lapisan komposit yang sangat kecil (dalam kisaran 0,1-0,35%) dan hanya mewakili sebagian kecil dari regangan tarik utama (1,0%). Hal ini menyiratkan bahwa efektivitas longgar lapisan pada awal delaminating dari permukaan beton, bukan dengan mencapai kapasitas tariknya.

Berdasarkan hasil dari Tabel 5, salah satu rekomendasi untuk desain lembaran SKDP dalam meningkatkan kapasitas geser bersama adalah untuk menyertakan lapisan melintang di sekitar balok dan menentukan persiapan permukaan minimum. Oleh karena itu, hanya hasil dari Grup B dan C, akan digunakan untuk mengembangkan persamaan desain untuk aplikasi komposit eksternal di wilayah sendi.

Karena beban aksial di wilayah bersama yang diabaikan untuk tes yang diberikan, tegangan tarik diagonal yang kurang lebih sama dengan tekanan sendi geser horizontal dan vertikal. Tegangan tarik diagonal, bagaimanapun, adalah sebanding dengan tegangan aksial dikembangkan dalam lembaran SKDP. Jadi hubungan antara peningkatan kekuatan geser gabungan / tekanan dan sifat komposit dapat dinyatakan sebagai:

$$V_f = n \times t \times \epsilon_f \times E_f \times d_e \times (\sin \beta / \cos \beta) \dots \dots \dots (6)$$

Di mana  $V_f$  = peningkatan gaya geser sendi yang diberikan oleh lembaran SKDP,  $n$  = jumlah lapisan komposit cenderung oleh sudut  $\beta$  yang sama terhadap sumbu longitudinal bagian ini,  $t$  = tebal dihitung dari lembaran komposit,  $\epsilon_f$  = rata-rata regangan aksial dalam arah serat pada beban puncak horizontal dihitung untuk setiap kelompok;  $E_f$  = modulus elastisitas dari material komposit, dan  $d_e$  = kedalaman sendi yang efektif. Dari penelitian

sebelumnya telah ditemukan bahwa panjang penggunaan lembaran komposit yang direkatkan beton adalah setebal 51 mm. Dengan demikian, kedalaman sendi yang efektif merupakan puncak dari panjang dikurangi dua kali pengembangan, dan  $\beta$  = sudut antara orientasi serat dan sumbu longitudinal bagian ini.

Untuk kedua kelompok dipertimbangkan, gaya geser yang disediakan oleh lembaran SKDP dievaluasi oleh (6). Ini nilai untuk Grup B dihitung sebagai 109 kN, di mana nilai-nilai berikut digunakan,  $n = 2$ ,  $t = 0,00132$  m,  $\epsilon_f = 0,0021$ ,  $E_f = 64.730.000$  kPa,  $d_e = 0,305$  m, dan  $\beta = 45^\circ$ . Untuk Grup C gaya geser adalah 172 kN menggunakan  $n = 2$ ,  $t = 0,00132$  m,  $\epsilon_f = 0,0033$ ,  $E_f = 64.730.000$  kPa,  $d_e = 0,305$  m, dan  $\beta = 45^\circ$ .

Kekuatan geser dihitung Namun, mewakili peningkatan tegangan geser gabungan dari 0,76 MPa untuk Grup B dan 1,18 MPa untuk Grup C, ini tegangan geser sedikit lebih rendah dari nilai yang diamati diberikan dalam Tabel 5, yang mungkin disebabkan oleh estimasi berlebih terhadap pembangunan jangka panjang. Kecenderungan komposit yang paling efektif di wilayah sendi untuk T-sendi adalah paralel  $45^\circ \perp$  ke bidang utama.

Hanya tarik diagonal dianggap dalam analisis sebelumnya, meskipun kompresi diagonal memiliki besarnya sama dengan kompresi diagonal memiliki besarnya sama dengan tarik diagonal. Persamaan. (6) tidak mencakup lapisan komposit dalam kompresi. Alasannya adalah bahwa kuat tekan beton secara substansial lebih tinggi dari kekuatan tarik, sehingga beton mampu menahan gaya tekan. Tegangan tekan komposit yang diabaikan, seperti ditegaskan oleh nilai-nilai regangan tekan direkam selama pengujian.

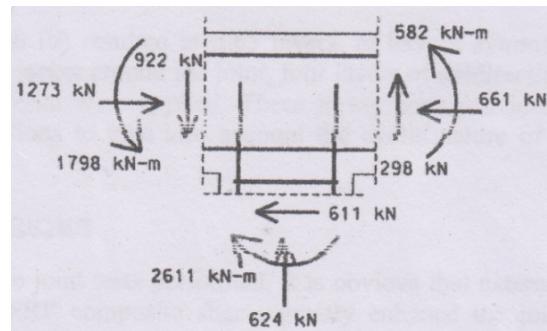
## 6. Aplikasi

Untuk menunjukkan contoh desain, sendi interior lengkungan jembatan akan dianalisis dan tata letak komposit ditentukan. Contoh lengkungan diambil dari bagian dari proyek percobaan yang dilakukan untuk 15 jembatan antar Negara bagian (Pant elides et al 1999) di mana sifat-sifat bagian dan kondisi pembebanan yang diberikan dalam Gambar secara lebih mendetail. Detail. 10(a) menunjukkan kekuatan bagian untuk jembatan sendi interior yang melengkung dikenakan beban mati diterapkan pada puncak balok bertingkat. Pasukan diperoleh dari push over analisis

lengkungan dipasang ditampilkan: ini dibandingkan dengan kekuatan dari analisis lengkungan dalam kondisi seperti itu.

Pasangan kompresi yang dihasilkan ketegangan dan gaya geser yang diberikan pada Gambar. 10 (b). Menggunakan (1) - (4), pasukan geser berikut bersama dan tekanan dihitung: The joint horizontal geser kekuatan  $V_j.\text{horz} = 2,176$  kN, tegangan geser horizontal bersama  $V_j.\text{horz} = 2,99$  MPa, kekuatan geser vertikal joint  $V_j.\text{horz} = 3,139$  kN; vertikal tegangan geser sesuai bersama  $V_j.\text{vert} = 3,02$  MPa, dan tegangan tekan akibat gaya aksial  $\sigma_p = -0,63$  MPa.

Untuk menghitung tegangan pokok dan tekanan kompresi, (5) digunakan. Tegangan tarik utama yang dihasilkan ditemukan sebagai 2,70 MPa, dan tegangan tekan utama adalah -3,33 MPa.



Gambar 10a. Pengujian-pengujian Jembatan untuk bengkokan nomor 6

Karena tegangan tekan 0,63 MPa, pesawat pokok tidak akan berada di 450 dari bidang horizontal. Gambar. 11 (a) menunjukkan elemen di daerah sendi dengan tegangan geser dan normal bertindak di muka elemen. Jika elemen ini diputar berlawanan dengan 420 [Gbr.11 (b)], hasil ini hanya dalam tekanan yang normal (tegangan pokok) dengan arah sejajar dengan bidang utama.

Untuk mengidentifikasi desain tegangan pokok, lingkaran Mohr ini dibuat (ditunjukkan pada Gambar. 11 (c)) Tegangan geser pada bidang vertikal adalah positif, dan itu adalah negatif untuk bidang horizontal. Lokasi kedua bidang ini ditandai dengan A dan B, tekanan-tekanan utama yang ditemukan di Poin 1 dan 2. Jika beban horizontal terbalik, hanya desain perubahan tegangan geser. Akibatnya, arah tegangan tarik utama akan berada di  $48^\circ$ , dari bidang horizontal, diukur berlawanan dengan arah jarum jam.

Dengan demikian, untuk memaksimalkan efek dari lapisan komposit, orientasi serat harus berada di  $\pm 48^\circ$  dari sumbu longitudinal balok topi. Namun, dalam studi tersebut diatas, seprai yang diuraikan dan diletakkan di sekitar  $\pm 45^\circ$ . Perbedaan dari 30 termasuk dalam toleransi desainer harus menerima dalam aplikasi komposit, dan tidak ada koreksi yang dibuat untuk desain.

Dengan peningkatan kapasitas beban lateral seluruh sistem (untuk pemasangan yang melengkung), maka kebutuhan untuk tegangan tarik sendi utama harus dinaikkan menjadi sebesar 0,72 MPa =  $\Delta\sigma$ , 1,96-2,70 MPa. Untuk menemukan jumlah lapisan komposit miring pada  $48^\circ$  kapasitas gesernya harus lebih tinggi, retak tarik diagonal pada daerah sambungan dianalisis.

Gambar. 12 menunjukkan tutup balok kolom sendi dengan lapisan komposit retak tegak lurus. Arah retak disejajarkan dengan tekanan-tekanan kompresi utama. gaya F yang bekerja normal untuk meretakan adalah gaya total dilawan oleh lapisan komposit yang menekan ke arah serat. Seperti dapat dilihat, dimensi sendi dan

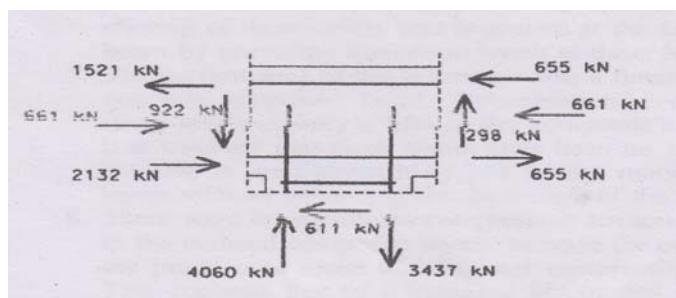
kecenderungan rencana utama dikendalikan oleh nilai ketebalan efektif yang tergabung  $d_e$ . Besarnya gaya F, dinyatakan sebagai fungsi dari jumlah n lapisan-lapisan komposit, dapat dihitung.

$$F = \frac{nt\epsilon_f E_f}{\cos \beta} \quad \dots\dots(7)$$

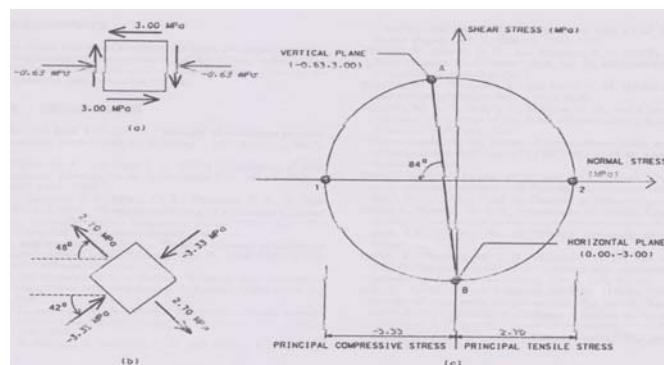
di mana  $\beta$  = sudut antara sumbu membujur dari bagian beton dan searah serat. Gaya ini ditemukan sebagai  $F = 221$  kN xn, dengan menggunakan nilai-nilai ini:  $t = 0,00132$  m,  $\epsilon_f = 0,0021$ ,  $E_f = 64.730.000$  kPa,  $d_e = 0,823$  m, dan  $\beta = 48^\circ$ .

Untuk menemukan tegangan tarik utama dalam komposit, nilai dari gaya F dibagi dengan lebar sendi dan oleh panjang cenderung (sepanjang retak) berbatasan dengan kedalaman efektif.

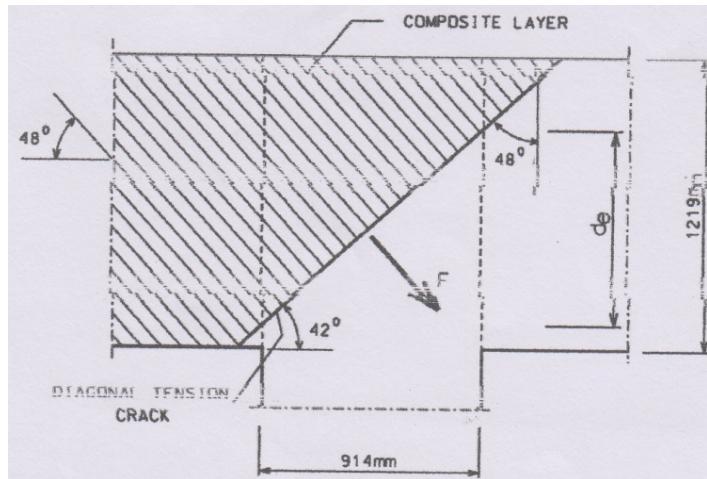
$$\epsilon_f = \frac{F \cos \beta}{bd_e} \quad \dots\dots(8)$$



Gambar 10b. Tegangan yang disesuaikan – pasangan2 kompresi



Gambar 11. Gaya tekan utama dalam interior sendi untuk bengkokan no. 8



Gambar 12. Gaya-gaya regangan komposit di dalam Sendi Jembatan

Menggunakan  $b = 0.914$  m, tekanan ini dihitung sebagai  $0,197 \text{ MPa} \times n \text{ MPa}$ . Tekanan Tarik Utama  $\sigma_f$ , bagaimanapun, peningkatan tekanan harus menjadi  $> 0,72 \text{ MPa}$ . Jumlah lapisan yang diperlukan diberikan oleh:

Meskipun (9) menghasilkan 3,65 lapisan, memiliki jaket komposit simetris di sekitar sendi, empat lapisan bahan kain searah yang diterapkan. Ini lapisan disediakan di kedua arah untuk mempertimbangkan sifat siklus beban.

## 7. Kesimpulan

Dari hasil rekayasa pengujian sendi, jelas bahwa kekangan oleh lembaran komposit CFRP ternyata sangat meningkatkan kapasitas geser sendi di samping itu, SKDP memperbaiki terkendalinya seluruh kerusakan, dan sendi terbukti memiliki kekuatan sisa minimal pada akhir tes yang cukup untuk mendukung beban mati. Kegagalan garis dasar spesimen adalah identik, dengan luas retak tarik diagonal di wilayah sendi, yang diperluas ke balok di tingkat bawah tulangan membujur. Spesimen perkuatan FRP mencapai beban puncaknya, tetapi sebagai komposit, tingkat

beban tidak bisa dipertahankan. Hal ini disebabkan kegagalan spesimen pada beban rendah dan momen lentur yang sesuai lebih dari kapasitas elemen.

Beban lateral puncak yang tercatat untuk setiap spesimen disajikan di samping empat garis dasar spesimen, ada 11 spesimen beton betulang FRP yang diuji. Dalam program uji, variabel beberapa telah dipantau dengan hasil sebagai berikut:

- a) Kinerja yang unggul telah dicapai dengan penyemprotan air pada permukaan beton, dan menggunakan perekat kekuatan tinggi seperti Sikadur 31.
  - b) Tidak ada bukti peningkatan geser yang lebih baik pada sendi dengan menggunakan sistem suhu tinggi obat dibandingkan sistem suhu kamar menyembuhkan.
  - c) Serat yang paling efektif di wilayah sendi cenderung pada  $450^\circ$ , arah dari bidang utama. Dengan menerapkan komposit pada sudut  $450^\circ \pm$  pada kedua wajah, tata letak simetris dan seimbang dicapai.
  - d) Pembagian lapis demi lapis lembar FRP cenderung diamati mulai dari atas dan bawah dari sendi. Yang memperkuat pentingnya penempatan yang tepat. Para anchoring dari lapisan ditingkatkan pada permukaan balok dengan menyediakan lapisan melintang di lokasi tersebut.
  - e) Kinerja spesimen adalah fungsi dari ikatan komposit beton. Delaminating sembuh pada

- tingkat stres hanya seperlima dari kapasitas komposit ini.
- f) Hal ini diyakini bahwa akan ada peningkatan signifikan dalam kekuatan sendi dengan hanya lebih cenderung menambahkan lapisan tanpa meningkatkan pengekangan dari lembaran komposit.
- g) Tidak ada tekanan kompresi yang berarti yang tercatat untuk lapisan komposit miring, karena beton pada sendi bisa menahan gaya kompresi diagonal. Hal ini menunjukkan bahwa dalam tata letak seimbang dan untuk sendi dikenai beban putaran, hanya lapisan dengan arah yang sama yang harus dihitung dalam analisis.

## 8. Referensi

- Alcocer S.M. and Jirsa, J.O. (1993). "Strength of reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing" ACI Struct.J., 90(3), 249-261.
- Biddah, A, Ghobarah A. and Aziz T.S. (1997) "Upgrading of non-ductile reinforced concrete frame connection S. Struct.Eng ASCE, 123(8) 1001-1010.
- Chajes, M.J. Januasza, T.F. Mertz D.R. Thomson T.A. and Finch, W.W. Jr. (1994), Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics "Res. Rep. No.CIEG94-I University of Delaware, Newark, Del.
- Lowes, L.N and Moehle , J.P. (1995). "Seismic behavior of retrofit of older reinforced concrete bridge T-joints, "Rep No. UCB/EERC-95/09, University of California, Berkeley, Calif.
- Matek, A.M. and Saadammanesh, H. (1998) "Ultimate Shear capacity of RC beams strengthened with web bonded FRP Plates "ACI Struct. J-95(4), 391-399.
- Nilsson, I.H.E., and Losberg, A (1976) Reinforced concrete corners and joints subjected to bending moment "J. Struct Div, ASCE, 102(ST6), 1229=1254.
- Pantelides, C.P. Gergely, J. Reaveley L.D. and Volnyy, V.A. (1999) " Retrofit and test of R/C bridge piers with CFRP composites " J. Struct. Eng. ASCE, 125 (10), 1094- 1099.
- Prakash, V., Powell, G.H. and Filippou, F.C. (1992), "DRAIN-2DX Base program User Guide" Rep No. UCB/SEMM-92/29, University of California Berkeley Calif.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi G.M. (1996). Seismic design and retrofit of bridges, Wiley Network.
- Priestley, M.J.N., Seible, F., MacRae. G.A. and Chai, Y.H. (1997). "Seismic assessment of the Santa viaduct bent details" ACI Struct J. 94(S), 513-524."Recommendation for design of beam-column joints in monolithic reinforced concrete structures." (1991). ACI 352R-91 American Concrete Institute, Detroit.
- Seible, F., Priestley, M.J.N. F. MacRae, Innamorato, D., Weeks, J. and Policelli, F.(1994)"Carbon fiber jacket retrofit test of circular shear bridge column, CRC-2" RepNo. ACTT-94/02, University of California, San Diego.
- Seible, F., Priestley, M.J.N. Hegemier, G.A., and Innamorato, D. (1997). "Seismic retrofit of rectangular bridge column for seismic loads. "Rep.No. SSRP-93/07, University of California – San Diego, La Jolla, Calif.
- Triantafillou, T.C. (1998) " Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites." ACI Struct. J., 95(2), 107-115.