

# **PENGARUH TULANGAN KEKANGAN TERHADAP KUAT REKATAN DAN PANJANG PENYALURAN TULANGAN TERTANAM PADA BETON**

**Putu Deskarta**

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Udayana*

*Email: pdeskarta@yahoo.com*

**Abstrak:** Kuat rekatan antara tulangan dengan beton dan panjang penyaluran baja tulangan sangat dipengaruhi oleh tegangan kekangan yang diberikan oleh beton. Tegangan kekangan ini bergantung pada tebal selimut beton dan tulangan kekangan yang tersedia. Penelitian tentang kuat rekatan tulangan umumnya dilakukan dengan memakai benda uji tarik cabut (*pull-out*) dengan posisi tulangan pada tengah penampang. Hal ini tidak mencerminkan kondisi tulangan pada balok beton bertulang yang mengalami lentur. Oleh sebab itu dilakukan penelitian pengaruh luas tulangan kekangan persatuan panjang terhadap rekatan tulangan yang tertanam pada tepi beton, dengan metoda pengujian ujung balok lentur. Penelitian ini dilakukan dengan membuat benda uji berupa tulangan yang tertanam pada balok beton dengan ukuran penampang 150x150 mm dan panjang yang bervariasi. Variasi panjang tulangan diambil dengan menggunakan acuan nilai panjang penyaluran dari formula SNI yang kemudian dikurangi secara bertahap. Tulangan ditanam pada tepi dengan tebal selimut beton yang konstan yaitu sebesar 2,5 kali diameter tulangan. Benda uji diberikan tulangan kekangan berupa sengkang dengan jarak yang divariasikan. Dari dua variable yang divariasikan itu dibuat 20 jenis benda dan setiap jenis benda uji diwakilkan oleh satu benda uji. Dari hasil penelitian tersebut didapat, panjang penyaluran dari tulangan semakin mengecil dengan meningkatnya luas tulangan sengkang. Selain itu didapat juga bahwa meningkatkan luas tulangan sengkang dapat meningkatkan kuat rekatan dari tulangan yang ditanamkan pada beton.

**Kata kunci:** kuat rekatan, panjang penyaluran, tulangan kekangan

## ***EFFECTS OF CONFINE REINFORCEMENT TO BOND STRENGTH AND DEVELOPMENT LENGTH OF REBARS EMBEDDED IN CONCRETE***

**Abstract:** *Bond strength between steel rebars and concrete and development length of the rebars are greatly depend on confine stress given by the concrete. The confine stress of the concrete is affected by concrete cover to rebars and confine reinforcement given to the concrete. Experiments on bond strength of rebars usually done by pull-out specimen which the rebars are placed in the centre of concrete block. These experiment are not represent the condition of the rebars inside the concrete beam on flexural. That is way an experiment on effects of confine reinforcement to the bond strength and development length of rebars embedded in concrete was performed, using beam-ends specimen, with the rebars are not placed in the centre of concrete section. This experiment contain of making and testing specimen in the form of a rebars embedded in concrete beams which section 15 cm by 15 cm and length variable according to embedded length of rebars. The rebar was placed close to the edge of beam with concrete cover 2.5 of bar diameter. Confine reinforcement was added the beam with the same space but different in diameter to make variation of confinement. From the variation of embedded length and confine reinforcement, 20 type of specimen were made and each contain of one specimen. Results from this experiment shows, that the development length of rebars decrease as confine reinforcement increase. Furthermore, the result shows also, bond strength of rebars can be increased by increasing the confine reinforcement of the concrete.*

**Keywords:** *bond strength, development length, confine reinforcement*

## PENDAHULUAN

Gaya penjangkaran dari tulangan yang tertanam pada beton merupakan produk dari tegangan rekatan, antara tulangan dan beton, dikalikan dengan luas permukaan tulangnya. Saat tulangan yang tertanam ditarik atau ditekan, akan terjadi gaya perlawanan yang diberikan oleh tegangan rekatan tulangan. Tegangan rekatan ini bervariasi sepanjang tulangan, tergantung dari deformasi / slip yang terjadi pada tulangan tersebut. Besarnya tegangan rekatan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti panjang tulangan yang tertanam, kuat tekan beton, bentuk permukaan tulangan, ketebalan selimut beton, dan luas tulangan kekangan yang diberikan. Banyak penelitian yang telah mempelajari hubungan antara kuat rekatan dengan slip dari tulangan yang tertanam pada beton diantaranya adalah Ligehausen *et al.* (1983) dan Hawkins *et al.* (2009) yang menggunakan model pull-out test dimana benda ujinya berupa tulangan yang tertanam pada tengah-tengah beton dan panjang tulangan yang tertanam konstan. Goto (1971) menggunakan model tension test dimana betonnya ditarik, berbeda dari model pull-out yang betonnya mengalami tekan. Kemp *et al.* (1968) menggunakan model benda uji beam-end dimana tulangnya terletak pada tepi dan ditarik seperti layaknya perilaku pada balok yang menerima lentur.

Tegangan rekatan rata-rata bergantung dari panjang tulangan yang tertanam, makin panjang tulangan tertanam maka tegangan rekatan rata-rata akan semakin berkurang. Ini dibuktikan oleh hasil penelitian Ligehausen *et al.* (1983) yang mendapatkan tegangan rekatan rata-rata  $2,6 \sqrt{f'_c}$  karena menggunakan tulangan panjang dan Hawkins *et al.* (1982) yang mendapatkan tegangan rekatan rata-rata  $5,0 \sqrt{f'_c}$  untuk tulangan yang pendek. Oleh sebab itu harus ada standar panjang tulangan tertanam yang digunakan untuk mendapatkan tegangan rekatan rata-rata. Tegangan rekatan ini diperlukan untuk menghitung panjang penjangkaran tulangan yang memberikan gaya penjangkaran sebesar kuat lelehnya. Kuat rekatan didefinisikan sebagai tegangan rekatan rata-rata yang terjadi pada permukaan kontak antara tulangan dengan beton, saat gaya tarik yang diberikan pada tulangan mencapai kuat leleh. Untuk mendapatkan nilai kuat rekatan tersebut maka panjang tulangan dari

benda uji harus divariasikan mulai dari tulangan yang pendek ke yang panjang, dan dicari nilai tegangan rekatan rata-rata saat beban pada benda uji mencapai kuat leleh dari tulangan.

Selain itu elemen struktur beton bertulang umumnya memiliki tulangan kekangan dalam bentuk sengkang. Adanya tulangan kekangan ini memberikan peningkatan kuat rekatan pada tulangan. Ligehausen *et al.* (1983) melaporkan peningkatan kuat rekatan sebesar dua kali lipat pada beton dengan tulangan kekangan, terhadap beton tanpa tulangan kekangan. Akan tetapi sistem pengekangan yang dikerjakan pada penelitian itu berbeda dengan system pengekangan yang diberikan oleh sengkang elemen balok, sehingga pengaruh luas, serta jarak sengkang terhadap kuat rekatan atau panjang penyaluran tulangan pada beton masih belum jelas diketahui.

Panjang penyaluran, yang didefinisikan sebagai panjang tulangan tertanam minimal yang memberikan kuat penjangkaran sebesar kuat leleh dari tulangan, sebenarnya secara langsung bisa dicari dari perkalian kuat rekatan dengan luas permukaan tulangan tertanam. Akan tetapi peraturan-peraturan beton bertulang umumnya tidak memberikan formula untuk menghitung kuat rekatan melainkan formula langsung untuk menghitung panjang penyaluran seperti pada SNI 03-2847-2013 pasal 12.7 (BSN, 2013). Sehingga untuk dapat menghitung panjang penyaluran tulangan maka perlu diketahui perilaku rekatan tulangan pada beton. Dari beberapa variable yang mempengaruhi perilaku rekatan, penekanan hanya difokuskan pada luas tulangan kekangan persatuan panjang dan panjang penanaman. Sehingga permasalahan yang akan diteliti adalah bagaimana pengaruh luas tulangan sengkang per satuan panjang dan bagaimana pengaruh panjang tulangan yang tertanam pada beton terhadap kuat rekatan tulangan pada beton. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat dipakai untuk membuat formula menghitung panjang penyaluran tulangan sebagai fungsi dari luas tulangan kekangan pada beton.

Dengan banyaknya variabel yang mempengaruhi kuat rekatan maka penelitian ini hanya membatasi pada penggunaan satu jenis mutu beton, satu jenis tulangan dan ketebalan selimut beton.

## MATERI DAN METODA

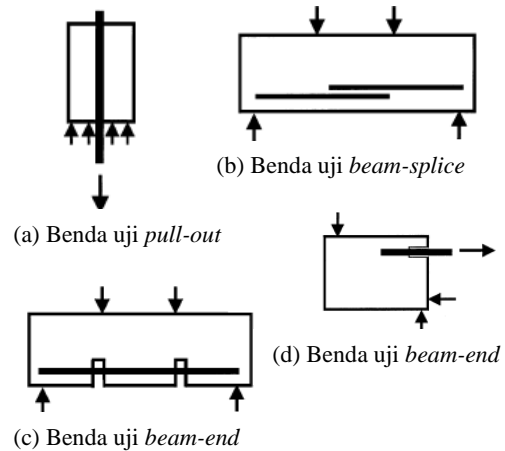
### Kuat Rekatan Tulangan dalam Beton

Kuat rekatan merupakan ukuran dari peralihan beban antara beton dengan tulangan. Teori kuat ekatan merupakan dasar formula penentuan panjang penyaluran yang digunakan pada struktur beton bertulang. Kuat rekatan dipengaruhi oleh bentuk tulangan, mutu beton, dan kondisi pengekangan beton sekeliling tulangan. Pengekangan beton disekeliling tulangan dapat diberikan oleh ketebalan selimut beton dan tulangan kekangan (sengkang) yang terdapat pada beton tersebut.

Kuat rekatan tulangan pada beton menentukan panjang penyaluran yang diperlukan oleh sebuah tulangan agar mampu memberikan gaya penjangkaran yang maksimal. Ada dua definisi tentang kuat rekatan yaitu; Pertama, kuat rekatan didefinisikan sebagai tegangan rekatan rata-rata maximum pada permukaan tulangan, yaitu pada saat beban mencapai maximum. Untuk mencapai ini diperlukan slip yang cukup besar dan kondisi ini tidak mungkin diberikan oleh elemen beton bertulang karena slip yang besar berarti lebar retak dari baloknya juga besar. Kedua, kuat retakan adalah tegangan rekatan kritis, yaitu tegangan rekatan rata-rata pada saat slip mencapai slip maximum yang diijinkan pada saat struktur dinyatakan sudah hendak runtuh. Beberapa peneliti menyarankan menggunakan nilai slip maximum yang diijinkan sebesar 0,25mm (Johnson, 2010).

Secara garis besar ada tiga metode pengujian untuk mendapatkan hubungan antara tegangan rekatan dan slip dari tulangan yaitu metoda pengujian *pull-out*, metoda pengujian balok ujung (*beam-end*) dan metoda pengujian balok tulangan overlap (*beam-splice*). Model benda uji yang dipakai pada pengujian tersebut diilustrasikan seperti pada gambar 1. Pada pengujian *pull-out* beban tarik dikerjakan pada salah satu ujung tulangan dengan tumpuan sisi permukaan beton pada ujung tulangan yang ditarik tersebut, sehingga mengakibatkan beton mengalami tekan pada arah memanjang tulangan. Kelemahan dari metoda pengujian ini adalah nilai rekatan yang didapat menjadi bertambah akibat adanya tekan pada permukaan tulangan. Sedangkan pada pengujian balok ujung dan balok tulangan overlap, kondisi tulangan sudah mirip seperti

kondisi realnya sebagai tulangan tarik pada elemen yang menerima lentur.

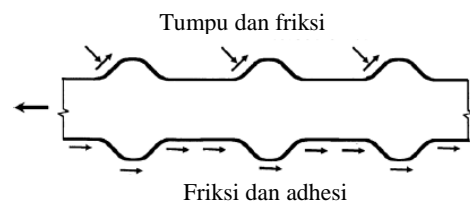


Gambar 1. Model benda uji kuat rekatan (ACI 408 R)

Rekatan pada tulangan adalah gaya transfer dari beton ke tulangan atau sebaliknya. Rekatan ini merupakan gabungan dari tiga komponen gaya yang terjadi pada permukaan tulangan yaitu:

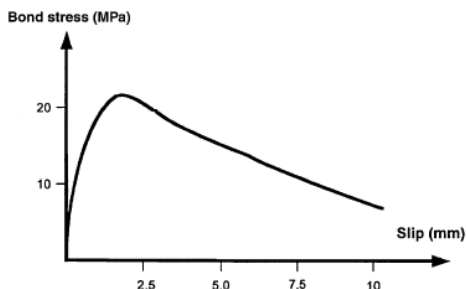
1. Gaya adhesi antara beton dan tulangan
2. Gaya friksi antara permukaan tulangan dengan beton
3. Gaya tumpu pada gerigi (rib) dari tulangan terhadap beton

Gaya adhesi dan friksi memberikan kontribusi yang besar pada pada tahap awal ketika beban rendah kemudian kemudian seiring dengan meningkatnya beban, sampai beban tertentu adhesinya lepas kemudian diikuti menurunnya friksi ketika beban terus ditingkatkan, dan gaya tumpu kemudian mengambil alih sebagian besar beban. Gaya friksi paling kecil dibandingkan dengan gaya adhesi dan gaya tumpu dan juga pengaruhnya akan hilang saat luas tulangan mulai mengecil akibat *effect poisson* dari bertambah panjangnya tulangan. Gaya transfer terbesar diberikan melalui tumpu rib tulangan pada beton. Ilustrasi dari masing-masing komponen gaya rekatan pada tulangan diberikan pada gambar 2.



Gambar 2. Komponen gaya rekatan (ACI 408 R)

Pada pengujian rekatan gaya yang bekerja pada tulangan dan slip pada ujung tulangan diukur pada setiap saat untuk mendapatkan hubungan antara gaya rekatan dan slip yang terjadi. Bentuk typical dari hubungan gaya rekatan terhadap deformasi ditampilkan pada Gambar 3.

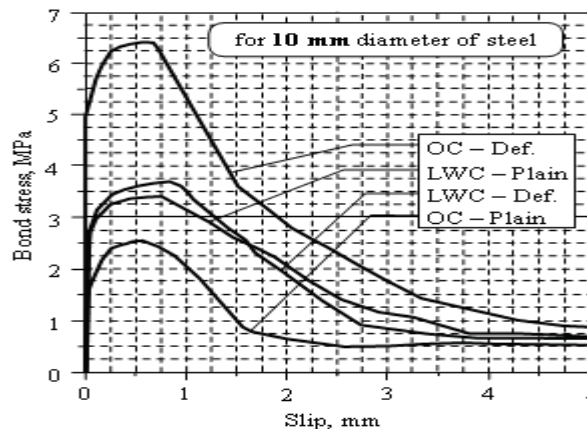


Gambar 3. Kurva tegangan rekatan terhadap slip, Ligehausen *et al.*(1983)

Slip yang dimaksud biasanya adalah pergeseran dari ujung tulangan yang tidak dibebani terhadap beton. Pada tahap awal, saat adhesi dan friksi bekerja, kurva hampir tegak, kemudian mulai melandai saat adhesi dan friksi mulai berkurang. Akan tetapi gaya rekatan terus meningkat sampai mencapai nilai maksimum akibat adanya tumpu. Nilai maksimum ini lah yang didefinisikan sebagai kuat rekatan nominal dari tulangan.

**Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kuat Rekatan**

Ada banyak faktor yang mempengaruhi kuat rekatan, diantaranya yang paling dominan adalah bentuk geometri tulangan, mutu beton, selimut beton, jarak tulangan dan tulangan kekangan. Pul (2010) meneliti hubungan antara kuat rekatan tulangan polos dan tulangan berulir pada beton biasa dan beton ringan, untuk beberapa diameter tulangan. Tulangan di tanam dalam kubus beton 15x25 cm dengan panjang 30 kali diameter tulangan dan selanjutnya dilakukan uji pull-out. Beton yang dipakai memiliki kuat tekan cylinder karakteristik sebesar 35,6 MPa. Hubungan antara tegangan rekatan dan slip yang terjadi di tampilkan dalam bentuk grafik, salah satunya adalah seperti grafik pada gambar 4, untuk tulangan dia. 10 mm. Selanjutnya nilai tegangan rekatan maksimum dan tegangan rekatan pada slip 0,25mm untuk beberapa jenis tulangan disimpulkan dalam Tabel 1.



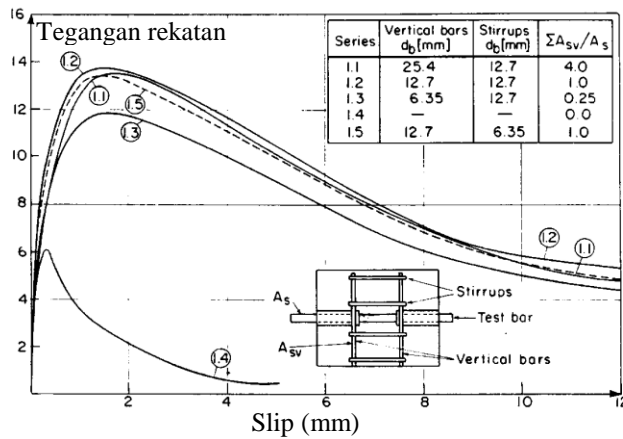
Gambar 4. Kurva tegangan rekatan tulangan pada beton biasa dan beton ringan. Ligehausen *et al.*(1983)

Tabel 1. Tegangan rekatan tulangan

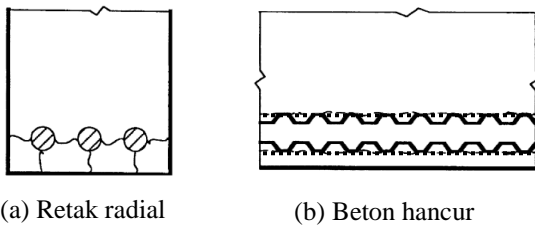
Diameter	Jenis	$\tau_b$ (slip 0,25mm)	$\tau_b$ (max)
		MPa	MPa
8 mm	Polos	2,58	2,65
	Ulir	4,31	4,69
10 mm	Polos	2,47	2,55
	Ulir	6,25	6,44
12 mm	Polos	2,20	2,20
	Ulir	6,17	6,49
14 mm	Polos	1,73	1,75
	Ulir	6,71	7,13

Pengaruh tulangan kekangan atau tulangan transversal terhadap kuat rekatan dapat dilihat dari hasil penelitian Ligehausen *et. al.* (1983). Benda uji yang dibuat berperilaku seperti tulangan balok yang mengangker pada kolom, seperti pada gambar 5, sehingga tulangan kekangan yang dimaksud disini adalah tulangan vertikal yang tegak lurus terhadap tulangan yang dilakukan pengujian. Ratio luas tulangan kekangan terhadap luas tulangan yang diuji divariasikan. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara tegangan rekatan terhadap slip pada ujung bebas untuk berbagai variasi ratio luas tulangan kekangan seperti pada gambar 5. Dari hasil tersebut terlihat bahwa pemberian tulangan kekangan pada benda uji berpengaruh besar terhadap kuat rekatan sampai pada batas ratio tertentu. Benda uji yang menggunakan ratio luas tulangan kekangan terhadap luas tulangan uji sebesar 25% memberikan kuat rekatan sekitar dua kali dari benda uji yang tidak menggunakan tulangan kekangan. Pada nilai ratio 100% pertambahan kuat rekatan sangat kecil dan hampir tidak bertambah pada ratio diatas 100%. Artinya

ada nilai optimum untuk ratio luas tulangan kekangan. Hal ini sesuai dengan perilaku beton, dimana tulangan kekangan dapat meningkatkan kuat tarik beton disekitar tulangan karena mencegah terjadinya retak pecah memanjang (*longitudinal splitting crack*). Akan tetapi pada ratio tulangan kekangan yang besar, peningkatan kuat tarik tidak lagi meningkatkan kuat rekatan, karena yang terjadi adalah kehancuran beton akibat tekan pada permukaan rib dari tulangan. Bentuk keruntuhan akibat terjadinya retak radial dan kehancuran pada beton disekitar tulangan dapat dilihat pada gambar 6, a dan b.



Gambar 5. Kurva tegangan rekatan terhadap slip



Gambar 6. Bentuk Keruntuhan (ACI 408R)

Tapfers (1979), mengasumsikan ada tiga tahap respon dari beton dalam menerima gaya transfer dari tulangan tertanam yang mengalami tarik yaitu; pertama tahap tidak adanya retak, kemudian tahap retak partial dan terakhir tahap plastis. Selanjutnya Tapfers menurunkan persamaan untuk menghitung kuat rekatan pada ketiga tahap tersebut berdasarkan asumsi tulangan anker pendek dan mendapatkan hasil yang sesuai dengan hasil pengujian pada benda uji anker pendek dan teori retak partial. Menurut teori

perilaku retak elastis, kuat rekatan,  $\tau_c$ , pada saat selimut beton retak adalah;

- Untuk tebal selimut yang kecil,  $\tau_c = 0,6(0,5 + c/d_b)f_{ct}$
- Sedangkan untuk selimut beton yang tebal maka diasumsikan terjadi perilaku plastis beton pada permukaan tulangan sehingga memberikan kuat rekatan,  $\tau_c = 2(c/d_b)f_{ct}$

Dimana:  
 $\tau_c$  = kuat rekatan saat beton retak  
 c = selimut beton  
 $d_b$  = diameter tulangan  
 $f_{ct}$  = kuat tarik dari beton

Selanjutnya dalam merencanakan panjang anker tulangan, ACI 408 R-03, (2003), menyarankan penggunaan kuat rekatan maksimum sebesar,

$$\tau_b = 9,5 \frac{\sqrt{f'_c}}{d_b} \leq 800 \text{ psi} \tag{1}$$

Dimana:  
 $\tau_b$  = kuat rekatan  
 $d_b$  = diameter tulangan  
 $f'_c$  = kuat tekan cylinder beton

**Panjang Penyaluran**

Agar tulangan pada beton bertulang dapat memberikan kekuatan penuh pada penampang yang ditinjau, maka tulangan pada daerah tersebut harus memiliki panjang penjangkaran, yaitu panjang dari titik yang ditinjau keujung tulangan, yang cukup. Panjang penjangkaran ini paling sedikit harus sama dengan panjang penyaluran  $\lambda_d$ . SNI 03-2847-2002 memberikan rumus untuk menghitung  $\lambda_d$ , salah satunya adalah, untuk tulangan ulir diameter  $\leq 19$  mm,

$$l_d = \frac{0,5 f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b \tag{2}$$

Dengan syarat, tebal selimut beton dan jarak antar tulangan > dari diameter tulangan dan beton memiliki tulangan sengkang yang cukup sepanjang tulangan penyaluran. Rumus yang hampir sama diberikan oleh peraturan Canada, CSA Satandard A23.3-94,yaitu:

$$l_d = \frac{0,468 f_y}{\sqrt{f'_c}} d_b \tag{3}$$

Untuk tulangan yang memiliki kait dengan kuat leleh 400 MPa, SNI 03-2847-2002 dan CSA

standard memberikan rumus yang sama yaitu (BSN, 2002):

$$l_d = 100d_b / \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Sebagai contoh, panjang penyaluran  $l_d$ , untuk tulangan dengan  $f_y = 360$  MPa dan beton dengan  $f'_c = 20$  MPa menggunakan formula SNI 03-2847-2002 adalah sebesar  $40 \cdot d_b$  untuk tulangan tanpa kait dan  $20 \cdot d_b$  untuk tulangan dengan kait standar. Ketiga rumus panjang penyaluran diatas tidak menyertakan secara langsung faktor lain yang mempengaruhi kuat rekatan tulangan seperti, ketebalan selimut beton, luas tulangan kekangan, jarak antar tulangan, bentuk geometri rib tulangan dan faktor lainnya. Rumus untuk menghitung panjang penyaluran yang menyertakan semua faktor yang mempengaruhi kuat rekatan tersebut diberikan oleh SNI 03-2847-2013 yaitu;

$$l_d = \left( \frac{f_y}{1.1\lambda\sqrt{f'_c}} \frac{\psi_t\psi_s\psi_e}{\left(\frac{c_b+K_{tr}}{d_b}\right)} \right) d_b \quad (5)$$

Dimana;

$K_{tr}$  = faktor tulangan sengkang (tulangan transversal)

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{s \cdot n} \quad (6)$$

$A_{tr}$  = las tulangan sengkang

$s$  = jarak sengkang

$n$  = jumlah tulangan memanjang

$l_d$  = panjang penyaluran

$f_y$  = tegangan leleh tulangan

$d_b$  = diameter tulangan

$c_b$  = tebal selimut beton

$\lambda$  = faktor jenis beton

$\psi_t$  = faktor ukuran tulangan

$\psi_e$  = faktor lokasi tulangan

$\psi_s$  = faktor tulangan ulir las

### Rancangan Benda Uji

Untuk mendapatkan hasil penelitian kuat rekatan tulangan, yang sesuai dengan kondisi tulangan yang terpasang pada struktur beton bertulang, maka dibuat benda uji batang tulangan yang ditanam pada balok beton. Balok beton yang dipakai berukuran penampang 150x150 mm dan panjang sesuai dengan panjang tulangan yang ditanamkan pada balok tersebut. Tulangan ditanam sedemikian rupa sehingga memiliki tebal selimut beton yang konstan sesuai dengan persyaratan. Pada balok beton dipasang sengkang dengan diameter yang divariasikan untuk

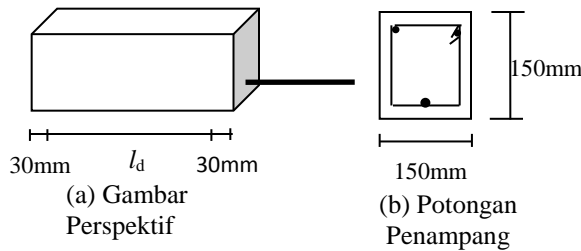
mendapatkan luas tulangan kekangan yang bervariasi. Untuk menghindari efek tepi, maka pada tulangan yang menerima beban dan pada ujung bebas diberi daerah bebas rekatan sepanjang 30 mm dengan cara membungkusnya dengan plastic kedap sebelum beton dicor.

Panjang penyaluran adalah panjang tulangan tertanam minimum yang mengakibatkan keruntuhan leleh pada tulangan. Untuk bisa mendapatkan panjang penyaluran tersebut, dari setiap variasi luas sengkang, maka panjang tulangan yang tertanam pada beton harus divariasikan. Jadi variabel yang di jadikan berubah dalam menentukan panjang penyaluran ini adalah, luas tulangan kekangan dan panjang tulangan tertanam. Untuk memvariasikan luas tulangan sengkang dipakai 4 variasi tulangan sengkang sesuai dengan yang tersedia dipasaran. Kemudian untuk memvariasikan panjang tulangan tertanam dibuat 5 variasi panjang, dimana panjang yang paling tengah mengacu pada rumus 2. Dengan memakai variabel berubah seperti diatas maka diperlukan 20 jenis benda uji dan untuk setiap jenis benda uji diwakilkan oleh 1 buah benda uji sehingga dibuat 20 buah benda uji. Rincian benda uji ditunjukkan pada tabel 2.

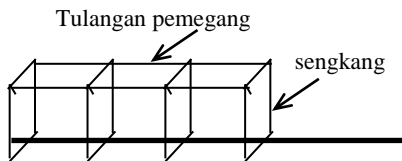
Tabel 2. Rincian benda uji

Benda Uji	Tulangan utama	Sengkang	Panjang tertanam
S01	Ulir d 12	Tidak ada	273 mm / 22.8 d
S02	Ulir d 12	Tidak ada	312 mm / 26.0 d
S03	Ulir d 12	Tidak ada	351 mm / 29.3 d
S04	Ulir d 12	Tidak ada	390 mm / 32.5 d
S05	Ulir d 12	Tidak ada	429 mm / 35.8 d
S11	Ulir d 12	d 4.7–50 mm	234 mm / 19.5 d
S12	Ulir d 12	d 4.7–50 mm	273 mm / 22.8 d
S13	Ulir d 12	d 4.7–50 mm	312 mm / 26.0 d
S14	Ulir d 12	d 4.7–50 mm	351 mm / 29.3 d
S15	Ulir d 12	d 4.7–50 mm	390 mm / 32.5 d
S21	Ulir d 12	d 5.3–50 mm	195 mm / 16.3 d
S22	Ulir d 12	d 5.3–50 mm	234 mm / 19.5 d
S23	Ulir d 12	d 5.3–50 mm	273 mm / 22.8 d
S24	Ulir d 12	d 5.3–50 mm	312 mm / 26.0 d
S25	Ulir d 12	d 5.3–50 mm	351 mm / 29.3 d
S31	Ulir d 12	d 6.5–50 mm	156 mm / 13.0 d
S32	Ulir d 12	d 6.5–50 mm	195 mm / 16.3 d
S33	Ulir d 12	d 6.5–50 mm	234 mm / 19.5 d
S34	Ulir d 12	d 6.5–50 mm	273 mm / 22.8 d
S35	Ulir d 12	d 6.5–50 mm	312 mm / 26.0 d

Gambaran bentuk benda uji ditunjukkan pada gambar 7, dan rangkaian tulangan pada benda uji ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar.7 Gambaran bentuk benda uji



Gambar 8. Rangkaian tulangan

**Pembuatan Benda Uji**

Dalam proses pembuatan benda uji, pertama-tama dibuat terlebih dulu cetakan benda uji yang dibuat dari block board tebal 18 mm sesuai dengan ukuran benda uji dan sejumlah benda uji yang dibuat. Tulangan sengkang dan tulangan utama kemudian dirakit seperti pada gambar 8 dengan variasi diameter sengkang dan panjang tulangan utama sesuai dengan tabel 2. Sengkang dibuat tertutup dengan ukuran luar 100x100mm untuk mendapatkan selimut beton 25mm dan dipasang dengan jarak setiap 50 mm. Pembungkusan dengan pipa plastic sepanjang 30mm dilakukan pada tulangan utama pada posisi di kedua ujung balok, dengan tujuan untuk mendapatkan kondisi yang bebas dari pengaruh ujung balok beton. Terdapat lima cetakan pada setiap variasi sengkang dengan panjang sesuai dengan yang disebutkan pada tabel 2.

Selanjutnya disiapkan beton dengan mutu K 250 yang display oleh sebuah perusahaan beton ready mixed. Beton yang dalam keadaan cair kemudian dituangkan kedalam cetakan benda uji sambil dirojok dengan tongkat guna mendapatkan pemadatan yang cukup. Untuk mendapatkan hasil pengujian mutu dari beton yang dipakai, dibuat juga benda uji berupa kubus beton 15x15x15 cm sebanyak tiga buah. Satu hari setelah pengecoran, cetakan benda uji kemudian dilepas dan dilakukan perawatan benda uji selama 28 hari dengan cara menutupnya dengan karung basah. Terdapat lima

buah benda uji pada setiap variasi sengkang gambar dengan panjang sesuai dengan yang disebutkan pada tabel 2. Salah satunya adalah gambar 9, yang menunjukkan kelompok benda uji dengan tulangan sengkang diameter 4,7mm.

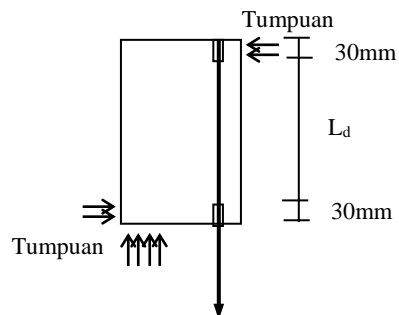


Gambar 9. Benda uji sengkang d 4,7 mm

**Metode Pengujian**

Pengujian dilakukan dengan metoda *beam-end* yaitu benda uji diperlakukan menyerupai ujung balok yang menerima beban lentur. Kondisi itu didapatkan dengan cara menarik ujung tulangan benda uji yang bertumpu pada tiga tumpuan seperti yang diilustrasikan pada gambar 10. Metoda ini dipakai agar mendapatkan kuat rekatan tulangan yang sesuai dengan kondisi riil dari tulangan yang terpasang pada elemen beton bertulang. Pengujian dilakukan pada benda uji yang telah berumur 28 hari guna mendapatkan perilaku rekatan tulangan pada umur beton tersebut. Pengujian dilakukan pada mesin uji tarik dengan melakukan penarikan tulangan pada benda uji yang ditumpu pada tiga tempat seperti yang diilustrasikan pada gambar 10.

Mesin uji dijalankan dengan mode kecepatan deformasi yang konstan yaitu sebesar 0,1 mm/sec. Data berupa gaya tarik yang terjadi pada tulangan dan deformasi dari ujung tulangan yang ditarik dicatat secara otomatis oleh computer yang terintegrasi dengan mesin uji.



Gambar. 10 Ilustrasi Pengujian

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil Pengujian**

Data hasil pengujian berupa beban dan deformasi yang dicatat secara otomatis oleh computer ditampilkan dalam bentuk grafik hubungan beban dan deformasi. Semua umum bentuk grafik hubungan beban dan deformasi tersebut menunjukkan pola yang sama, yaitu dapat dibagi dalam tiga kondisi; saat kondisi elastis, saat kondisi leleh dan saat kondisi ultimit. Pada kondisi elastis, beban meningkat secara linier terhadap deformasi yang terjadi. Selanjutnya pada saat leleh, peningkatan beban hampir tidak ada atau sangat kecil saat bertambahnya deformasi. Akhirnya pada saat mencapai ultimit, sejalan dengan bertambahnya deformasi terjadi peningkatan beban kembali, walaupun tidak sebesar pada saat kondisi elastis. Beban dan deformasi akan terus bertambah sampai beban ultimit yang ditandai dengan turunnya beban keposisi nol secara tiba-tiba akibat benda uji mengalami keruntuhan. Data dari beban dan deformasi pada saat kondisi ultimit dapat dilihat pada tabel 3.

**Tabel 3 Hasil pengujian benda uji rekatan**

Benda Uji	Panjang (d)	Sengkang	Load (kN)	Deformasi (mm)	Moda runtuh
S01	22.8 d	tidak ada	40.6	62	cabut
S02	26.0 d	tidak ada	43.1	75	putus
S03	29.3 d	tidak ada	43.4	80	putus
S04	32.5 d	tidak ada	42.7	78	putus
S05	35.8 d	tidak ada	42.9	76	putus
S11	19.5 d	d 4.7 mm	41.8	64	cabut
S12	22.8 d	d 4.7 mm	42.5	82	putus
S13	26.0 d	d 4.7 mm	43.2	79	putus
S14	29.3 d	d 4.7 mm	42.9	78	putus
S15	32.5 d	d 4.7 mm	42.7	77	putus
S21	16.3 d	d 5.3 mm	41.3	65	cabut
S22	19.5 d	d 5.3 mm	42.8	79	putus
S23	22.8 d	d 5.3 mm	43.6	80	putus
S24	26.0 d	d 5.3 mm	43.0	79	putus
S25	29.3 d	d 5.3 mm	43.2	79	putus
S31	13.0 d	d 6.5 mm	38.2	38	cabut
S32	16.3 d	d 6.5 mm	42.5	76	putus
S33	19.5 d	d 6.5 mm	43.2	79	putus
S34	22.8 d	d 6.5 mm	42.4	78	putus
S35	26.0 d	d 6.5 mm	42.8	78	putus

Secara umum didapat dua pola keruntuhan yaitu keruntuhan ditandai dengan terjadinya tercabutnya tulangan pada beban maksimum dan keruntuhan yang ditandai dengan putusnya

tulangan pada saat beban maksimum. Selain itu data hasil pengujian menunjukkan pula bahwa keruntuhan cabut memberikan nilai beban dan deformasi yang lebih kecil dari keruntuhan putus.

Selain benda uji utama, juga dibuat benda uji berupa kubus beton untuk mendapatkan kekuatan tekan beton dari benda uji dan benda uji tarik dari tulangan. Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan menguji tiga buah kubus beton yang mewakili kekuatan dari benda uji dan pengujian tarik tulangan dilakukan terhadap satu buah benda uji tarik tulangan. Hasil pengujian kubus beton ditampilkan pada tabel 4 serta hasil pengujian tulangan ditampilkan pada tabel 5.

**Tabel 4. Hasil pengujian kubus beton**

Benda Uji	Beban Runtuh (kN)	Kuat Tekan Kubus (MPa)	Kuat Tekan Cylinder $f_c'$ (MPa)
Kubus 1	680	30,2	25,1
Kubus 2	660	29,3	24,3
Kubus 3	690	30,7	25,4
Rata-rata		30,1	24,9

**Tabel 5. Hasil pengujian tarik tulangan**

Benda Uji	d (mm)	Py (kN)	Pu (kN)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)
Bar 1	12	31,9	42,9	282	379

**Pembahasan Panjang Penyaluran**

Gaya penjangkaran yang diberikan oleh tulangan yang tertanam pada beton bergantung pada panjang tulangan yang tertanam. Secara umum gaya penjangkaran ( $F_a$ ) dapat dinyatakan dalam rumus;

$$F_a = \pi * d * l_d * \tau \tag{7}$$

dengan;

$d$  = diameter tulangan

$l_d$  = panjang tulangan tertanam

$\tau$  = tegangan rekatan rata-rata antara

Besar gaya penjangkaran dari benda uji hanya dapat diketahui jika benda uji mengalami keruntuhan cabut. Sebaliknya untuk benda uji mengalami keruntuhan putus maka besar gaya penjangkarannya tidak dapat diketahui namun yang pasti nilainya lebih besar dari kekuatan tulangan.

Hasil pengujian benda uji rekatan, menunjukkan hanya satu benda uji pada setiap kelompok sengkang yang mengalami runtuh



cabut. Benda uji lainnya yang mengalami keruntuhan putus, kuat rekatan tulangnya tidak dapat ditentukan, sehingga tidak dapat disimpulkan pengaruh panjang penanaman terhadap kuat rekatan dari tulangan. Data beban dari benda uji yang tercabut ini menyatakan kuat angkernya telah melebihi kuat leleh dari tulangan. Dengan interpolasi linier antara data beban ultimit tulangan yang mengalami cabut, pada masing-masing kelompok sengkang, maka panjang anker yang diperlukan untuk mencapai kuat leleh dari tulangan dapat dihitung. Selanjutnya tegangan rekatan pada beban tersebut dihitung dengan rumus (7). Panjang anker dan tegangan rekatan tulangan saat beban mencapai kuat leleh tulangan pada tabel 6.

Tabel 6. Panjang anker dan tegangan rekatan

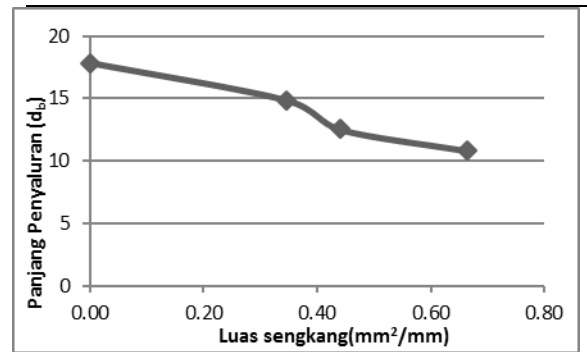
Benda Uji	Sengkang	Panjang (d)	Load (kN)	$\tau$ (MPa.)
S01	tidak ada	17.9 d	31.9	3.9
S11	d 4.7 mm	14.9 d	31.9	4.7
S21	d 5.3 mm	12.6 d	31.9	5.6
S31	d 6.5 mm	10.9 d	31.9	6.5

Panjang penyaluran tidak lain adalah panjang penjangkaran yang diperlukan agar tulangan mencapai kuat leleh. Sehingga panjang penyaluran untuk tiap variasi sengkang sama dengan nilai yang ditampilkan pada tabel 6. Nilai ini mendekati hasil prediksi menggunakan persamaan 5. Akan tetapi jika menggunakan, rumus SNI 2002 (persamaan 2), yang menghitung panjang penyaluran tanpa meninjau faktor kekangan dan kondisi tulangan, memberikan nilai 28,3  $d_b$ . Nilai ini jauh berbeda dengan yang didapat dari hasil penelitian khususnya untuk yang memakai tulangan kekangan. Perbandingan antara nilai panjang penyaluran hasil experiment dengan hasil prediksi memakai persamaan 5 dan 2 dapat dilihat pada tabel 7. Dari tabel tersebut terlihat bahwa luas sengkang sangat berpengaruh terhadap panjang penyaluran tulangan.

Tabel 7. Perbandingan panjang penyaluran

Benda Uji	Sengkang	$l_d$ Exp.	$l_d$ Predik. Pers.5	$\frac{l_d(exp)}{\lambda_{d(pre)5}}$	$\frac{l_d(exp)}{\lambda_{d(pre)2}}$
S01	-	17,9 d	19,7 d	0,91	0,63
S11	d 4,7	14,9 d	12,7 d	1,17	0,53

S21	d 5,3	12,6 d	11,6 d	1,08	0,44
S31	d 6,5	10,9 d	9,6 d	1,13	0,38



Gambar 11. Grafik Panjang Penyaluran Thd Sengkang

Hubungan antara luas tulangan sengkang terhadap panjang penyaluran ditampilkan dalam bentuk grafik pada gambar 11. Dari grafik dapat dilihat bahwa meningkatkan luas tulangan sengkang akan mengurangi panjang penyaluran tulangan.

### Kuat Rekatan

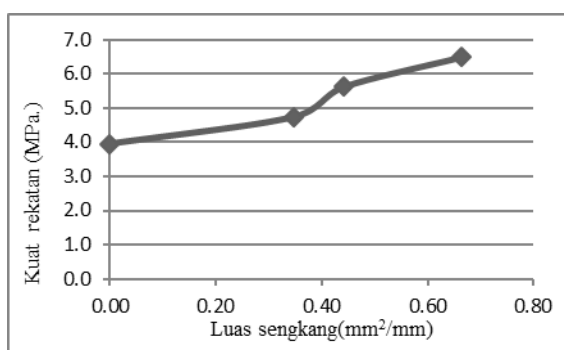
Kuat rekatan adalah tegangan rekatan rata-rata pada permukaan tulangan yang kontak dengan beton. Nilai ini dihitung dari besarnya gaya penjangkaran yang didapat dari pengujian benda uji dibagi dengan luas permukaan tulangan yang kontak dengan beton. Gaya penjangkaran hanya dapat diketahui pada benda uji yang mengalami keruntuhan cabut, yaitu sama dengan beban pada saat keruntuhan tersebut. Kuat rekatan adalah gaya penjangkaran dibagi dengan luas permukaan kontak beton dan tulangan, dan kuat rekatan untuk masing-masing jenis benda uji dapat dilihat pada tabel 8. Selanjutnya, hubungan antara luas sengkang persatuan panjang terhadap kuat rekatan dalam bentuk tabel dapat dilihat pada tabel 9, dan dalam bentuk grafik pada gambar 12. Dari tabel 8 dan 9 atau grafik gambar 12, terlihat bahwa kuat rekatan meningkat jika tulangan sengkang ditingkatkan.

Tabel 8 Kuat rekatan untuk setiap jenis benda uji

Benda Uji	Panjang (mm)	Sengkang	Beban (kN)	A (mm <sup>2</sup> )	$\tau$ (Mpa)
S01	273	-	40.6	10296	3.94
S11	234	d4,7mm	41.8	8825	4.74
S21	195	d5,3mm	41.3	7354	5.62
S31	156	d6,5mm	38.2	5883	6.49

Tabel 9. Luas sengkang terhadap kuat rekatan

Benda Uji	Sengkang	$A_v$ /sat. panjang (mm <sup>2</sup> /mm)	Beban (kN)	$\tau$ (Mpa)
S01	-	0	40.6	3.94
S11	d4,7-50mm	0,35	41.8	4.74
S21	d5,3-50mm	0,44	41.3	5.62
S31	d6,5-50mm	0,66	38.2	6.49



Gambar. 12 Grafik Luas Sengkang Thd Kuat Rekatan

Mengacu hasil penelitian Ligehausen et. al. (1983) tentang hubungan antara kuat rekatan terhadap tulangan transversalnya, yang mendapatkan bahwa ada batas dimana peningkatan tulangan transversal tidak memberikan peningkatan terhadap kuat rekatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 5. Berdasar pada perilaku tersebut, kurva gambar 12 dapat diperkirakan menuju garis datar (membentuk asymptoth) pada angka luas sengkang diatas 0,66. Sehingga kurva hubungan antara kuat rekatan terhadap sengkang secara kasar dapat didekati dengan kurva berbentuk seperti huruf S (kurva S).

**SIMPULAN**

Dari hasil penelitian ini maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut;

1. Panjang penyaluran tulangan semakin mengecil dengan meningkatnya luas tulangan kekangan pada penampang beton. Prediksi panjang penyaluran yang menggunakan rumus SNI 03-2847-2002 yang tidak meninjau faktor tulangan kekangan dan selimut beton, memberikan hasil yang jauh lebih besar dari yang didapat dari hasil penelitian dengan nilai 1,6 kali untuk beton tanpa sengkang dan mencapai 2,6 kali untuk beton dengan sengkang. Akan tetapi jika

menggunakan rumus SNI 03-2847-2013 maka angka yang didapat hampir mendekati hasil penelitian.

2. Dengan mengasumsikan bentuk kurva hubungan panjang penyaluran terhadap luas sengkang sebagai tiga garis linier maka didapat rumus hubungan antara panjang penyaluran terhadap sengkang adalah sebagai berikut;

$$l_d = (18 - 8,5 \cdot A_s) \cdot d_b$$

untuk  $A_s \leq 0,35 \text{ mm}^2/\text{mm}$

$$l_d = [15 - 22,2 \cdot (A_s - 0,35)] \cdot d_b$$

untuk  $0,35 < A_s \leq 0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}$

$$l_d = (13 - 9,0 \cdot A_s) \cdot d_b$$

untuk  $A_s > 0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}$

3. Luas tulangan kekangan berpengaruh terhadap peningkatan kuat rekatan dari tulangan yang ditanamkan pada beton. Semakin besar luas tulangan kekangan maka semakin besar pula kuat rekatan yang terjadi pada permukaan tulangan. Jika pola hubungannya disederhanakan menjadi tiga garis linier, maka nilai kuat rekatan terhadap sengkang dapat didekati dengan fungsi sebagai berikut;

$$\tau = 3,9 + 8,5 \cdot A_s \text{ (MPa.)}$$

untuk  $A_s \leq 0,35 \text{ mm}^2/\text{mm}$

$$\tau = 4,7 + 10 \cdot (A_s - 0,35) \text{ (MPa.)}$$

untuk  $0,35 < A_s \leq 0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}$

$$\tau = 5,6 + 9,0 \cdot A_s \text{ (MPa.)}$$

untuk  $A_s > 0,44 \text{ mm}^2/\text{mm}$

**DAFTAR PUSTAKA**

ACI Committee . 2003. *Bond and development of Straight Reinforcing Bars in Tension*, ACI 408 R-03. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan USA.

BSN. 2002. *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Gedung, SNI 03-2847-2002*.

BSN. 2013. *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Untuk Gedung, SNI 03-2847-2013*.

Goto, Y. 1971. *Cracks Formed in Concrete around Deformed Tension Bars*, ACI Structural Journal, Vol. 68, No. 4, pp 244-251.

Hawkins, N.M., Lin, I.J., and Jeang, F.L., 1982. *Local bond strength of concrete for cyclic reversed loading*, Bond in Concrete, P. Bartos (editor), Applied Science Publishers Ltd., London, 1982, pp. 151-161.

- Johnson, J. B. 2010. *Bond Strength of Corrosion Resistance Steel Reinforcement in Concrete*, Thesis, Virginia USA, 2010
- Kemp, E. L., Brezny, F. S., and Unterspan, J. A. 1968. *Effect of Rust and Scale on the Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Bars*, ACI Journal, Vol. 65, No. 9, pp 743-756.
- Ligehausen, R., Popov, E. P. & Betero, V. 1983. *Local bond stress-slip relationships of deformed bar under generalized excitations*. Report No. UCB/EERC-83/23, Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, Calif., p. 185.
- Pul S. 2010. *Loss of concrete steel bond strength under monotonic and cyclic loading of light weight and ordinary concrete*, Iranian Journal of Science and Technology, Vol 34, pp 397-406, The Islamic Republic of Iran.
- Pul, S., Husem, M., Gorkem, S. E. & Yozgat, E. 2007. Lightweight and ordinary concrete-steel bond strength. *2nd. International Symposium on Connection between Steel and Concrete*, Proceedings book, Vol. 2, pp. 1141-1150, Stuttgart, Germany.