

STUDI EKSPERIMENTAL LEKATAN ANTARA BETON DAN TULANGAN PADA BETON MUTU TINGGI

Nuroji ¹

ABSTRACT

In recent years, concrete with compressive strength in excess of 50 MPa has been utilized in building construction. However, many empirical equations used to predict properties of concrete or design structure members are based on test using concrete with compressive strength less than 41 MPa. Applicability of this design equation for high strength concrete structures may lead to conservative or even unsafe design. One such example is the provision for calculating development length of reinforcing bars which is developed based on bond capacity of steel bars embedded in concrete.

The research study was motivated by the lack of test data on bond performance of reinforcing bars embedded in high strength concrete especially those related to high-strength fly-ash concrete. More than 35 specimens with various concrete compressive strength f_c' and bar diameter (deformed and smooth bar) were tested. The result of this experimental shows that bond equation from ACI is too conservative for high strength concrete structures.

Kata kunci : *Lekatan beban dan tulangan, beton mutu tinggi*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Beton merupakan material yang paling banyak digunakan dalam bidang konstruksi. Beberapa alasan yang mendasari penggunaan material ini adalah karena bahan dasar pembuatnya sangat mudah didapatkan di sekitar kita, kekuatan tekannya besar dan pembuatannya mudah dan tanpa memerlukan teknologi tinggi. Luasnya penggunaan beton dibidang konstruksi merangsang para peneliti untuk terus melakukan pengembangan pada material ini. Hal ini dibuktikan dengan adanya berbagai penelitian tentang material beton yang telah banyak dilakukan untuk mendapatkan kinerja beton yang lebih tinggi. Dari hasil penelitian-penelitian tersebut menunjukkan adanya perkembangan yang sangat progresif pada beton, sebagai indikatornya adalah peningkatan

kuat tekan beton yang dihasilkan dari waktu ke waktu. Bahkan beton dengan kuat tekan diatas 60 MPa telah banyak digunakan dalam konstruksi.

ACI mengklasifikasikan beton berdasarkan pada kuat tekannya, beton yang mempunyai kuat tekan kurang dari 6000 psi (41 MPa) dikategorikan sebagai beton mutu normal (*Normal strength concrete*), sedangkan beton yang mempunyai kuat tekan diatas atau sama dengan 6000 psi (41 MPa) dikategorikan sebagai beton mutu tinggi (*High strength concrete*).

Akan tetapi meskipun penggunaan beton mutu tinggi terus meningkat namun tidak diikuti dengan perkembangan pengetahuan tentang perilaku mekanik strukturnya. Terbukti masih belum banyak penelitian-penelitian yang diarahkan pada pemahaman sifat-sifat struktur beton mutu tinggi. Hal ini terlihat pada terbatasnya informasi-informasi mengenai perilaku beton mutu

¹ Pengajar Jurusan Teknik Sipil Universitas Diponegoro

tinggi yang terdapat pada peraturan-peraturan yang ada. Azizinamini (1993) mengatakan bahwa pada umumnya persamaan-persamaan desain yang ada diturunkan secara empiris dari hasil pengujian-pengujian benda uji beton yang mempunyai nilai kuat tekan kurang dari 5000 psi (35 MPa). Penggunaan ekstrapolasi terhadap persamaan-persamaan desain yang ada pada peraturan-peraturan bangunan untuk diaplikasikan pada beton mutu tinggi belum tentu tepat. Salah satu persamaan desain yang akan dibahas dalam artikel ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung kekuatan lekatan (*bond strength*) antara beton dan tulangan.

Dalam beberapa peraturan bangunan yang ada, *bond* antara beton dan tulangan ditentukan oleh diameter tulangan dan faktor akar kuadrat kuat tekan beton $\sqrt{f_c'}$. Dilain pihak hasil dari berbagai penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tarik beton berbanding lurus dengan $\sqrt{f_c'}$. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kapasitas *bond* antara beton dan tulangan merupakan fungsi dari nilai kuat tarik betonnya.

Sementara itu pada beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bahan pengisi (*filler*) seperti abu terbang (*fly ash*), *silica fume* dan terak baja (*slag*) pada material beton, dapat meningkatkan kepadatan *interface* antara matriks beton dan material-material solid di sekitarnya dan juga dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Kuat tekan yang tinggi pada beton mutu tinggi tentu diikuti oleh kuat tarik yang tinggi pula. Bahkan *interface* yang lebih baik pada beton mutu tinggi akibat penggunaan *filler*, juga dapat meningkatkan *bond strength* antara beton dan tulangan melalui peningkatan adhesi. Oleh karena itu sangat dimungkinkan bahwa perilaku *bond* antara beton dan tulangan pada beton mutu tinggi lebih baik dari pada perilaku *bond* antara beton dan tulangan pada beton mutu normal.

Tujuan

Dari penjelasan sebelumnya membuktikan bahwa meskipun beton mutu tinggi telah banyak digunakan, namun persamaan-persamaan desain yang ada masih diturunkan dari hasil pengujian beton mutu normal. Salah satu persamaan tersebut adalah persamaan *bond* dan panjang penyaluran yang ada pada ACI dan SKSNI.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari perilaku *bond* antara beton dan tulangan pada beton mutu tinggi.

STUDI PUSTAKA

Kuat Tekan dan Kuat Tarik pada Beton Mutu Tinggi

Studi yang dilakukan oleh Dewar yang direkomendasikan oleh ACI Committee 363 tentang hubungan antara kuat tarik belah dan kuat tekan pada beton yang mempunyai kuat tekan sampai dengan 12105 psi (83,9 MPa) pada umur 28 hari, menyimpulkan bahwa perbandingan antara kuat tarik belah dan kuat tekan beton pada beton mutu tinggi dapat berkurang 5 % dan kuat tarik belah pada beton dengan agregat batu pecah menunjukkan 8 % lebih tinggi dibanding dengan beton dengan agregat batu berbutir.

Sementara itu studi tentang hubungan kuat tarik beton pada beton dengan f_c' antara 21 - 83 MPa yang dilakukan oleh Carrasquillo, Nilson dan Slate memberikan korelasi sebagai berikut :

$$f_{sp}' = 0,59\sqrt{f_c'} \dots\dots\dots (1)$$

dimana

f_{sp}' : kuat tarik beton

f_c' : kuat tekan beton

Penelitian lain yang dilakukan oleh Munaf dkk(1993) menggambarkan kuat tarik belah pada beton sebagai fungsi dari waktu, dimana pada beton yang menggunakan

bahan pengganti semen *fly ash* pertambahan kuat tariknya lebih lambat dibanding dengan beton yang tidak menggunakan *fly ash*. Akan tetapi setelah beton mencapai umur 90 hari percepatan pertumbuhan kuat tarik untuk beton yang menggunakan bahan pengganti semen *fly ash* lebih tinggi dibanding beton yang tidak menggunakan *fly ash*.

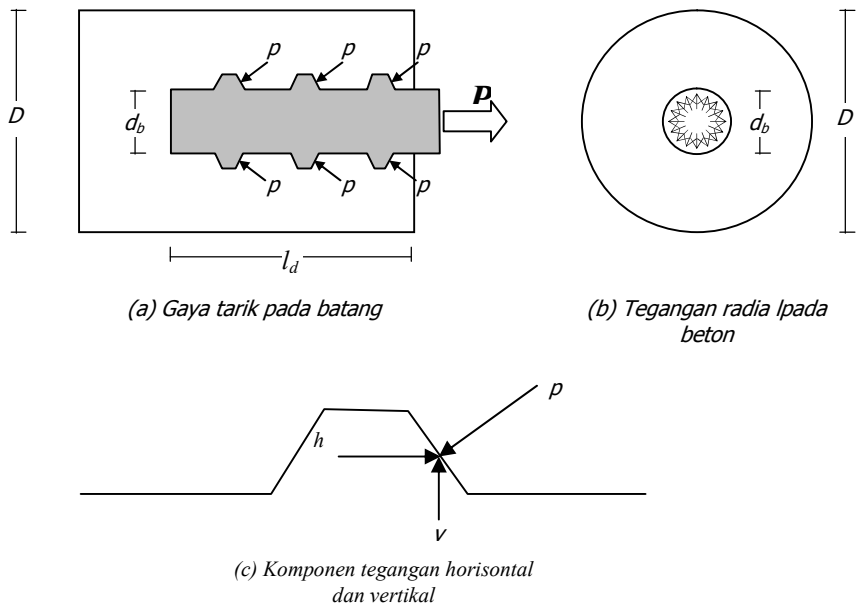
Bond Antara Beton dan Tulangan

Pada umumnya penggunaan tulangan pokok pada struktur beton bertulang adalah untuk mengganti kapasitas tarik dari material beton yang lemah. Tegangan tarik yang terjadi pada beton selanjutnya disalurkan ke tulangan melalui mekanisme *bond*, sehingga kedua material tersebut yaitu beton dan tulangan dapat bekerja sama menjadi satu kesatuan material komposit.

Cara paling mudah untuk mengetahui perilaku dan mekanisme *bond* antara beton dan tulangan ialah dengan melakukan pengujian cabut (*pull-out test*) pada tulangan yang ditanam di dalam beton. Dari pengujian ini dapat diketahui besarnya gaya cabut dan tegangan lekat (*bond stress*) rata-rata yang bekerja pada luas bidang kontak antara beton dan tulangan. Menurut Azizinamini dkk (1993) dan MacGregor (1992) menjelaskan bahwa mekanisme *bond* antara beton dan tulangan terdiri atas:

Adhesi, adhesi ini merupakan ikatan kimiawi yang terbentuk pada seluruh bidang kontak antara beton dan tulangan akibat adanya proses reaksi pengerasan antara semen dan air.

Friksi, Mekanisme ini terbentuk karena adanya permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara beton dan tulangan.



Gambar 1. Mekanisme perpindahan gaya oleh bond pada tulangan ulir (deformed bar)

Interlocking, mekanisme ini terbentuk karena adanya interaksi antara ulir (*rib*) tulangan dengan matriks beton disekitarnya. Mekanisme ini sangat bergantung pada kekuatan material beton, geometri tulangan dan diameter tulangan.

Pada tulangan polos (*smooth bar*), *bond* antara beton dan tulangan hanya dibentuk oleh adhesi dan friksi semata. Pada pembebanan awal adhesi dan friksi bekerja secara bersama-sama sampai mencapai beban maksimum. Setelah adhesi rusak *bond* antara beton dan tulangan hanya dipikul oleh friksi. Kapasitas *bond* kemudian berangsur-angsur turun seiring dengan berkurangnya bidang kontak antara beton dan tulangan akibat slip. Pada kasus dimana tulangan mencapai leleh adhesi dan friksi dapat hilang secara cepat, hal ini dikarenakan adanya pengaruh dari pengecilan diameter tulangan akibat *Poisson's ratio*. Atas dasar alasan ini maka tulangan polos pada umumnya tidak dianjurkan untuk digunakan sebagai tulangan pokok.

Berbeda dengan mekanisme *bond* pada tulangan polos, mekanisme *bond* pada tulangan ulir (*deformed bar*) dibentuk oleh adhesi, friksi dan *interlocking* antara ulir (*rib*) tulangan dan matriks beton di sekitarnya.

Bahkan kontribusi terbesar dalam pembentukan *bond* antara beton dan tulangan didominasi oleh *interlocking* antara *rib* tulangan dan matriks beton di sekitarnya, sedangkan pengaruh adhesi dan friksi relatif kecil dibanding dengan *interlocking*. Pernyataan ini juga dapat kita jumpai pada ACI (1992), hanya saja ACI menganggap bahwa *interlocking* antara tulangan dan beton merupakan bagian dari friksi, tinjauan ini tergantung pada tingkat peninjauan mekanismenya. Kontribusi adhesi cukup kecil dan segera hilang ketika terjadi slip, ACI (1992), CEB (1982).

Sementara itu Lundgren (1999), mengatakan bahwa ketika gaya ditransfer

dari tulangan ke beton oleh *bond* menimbulkan tegangan-tegangan miring akibat *bearing action*. Tegangan miring ini mempunyai komponen longitudinal yang menyatakan *bond* dan komponen radial yang menyatakan *normal stress* atau *splitting stress*.

Gambar 1 di atas menggambarkan mekanisme penyaluran gaya dari tulangan ke beton, mekanisme ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

- Gaya tarik P yang bekerja pada tulangan disalurkan ke beton melalui *rib-rib* tulangan sehingga beton di depan *rib* mengalami tegangan tekan p seperti ditunjukkan dalam gambar 1a. Tegangan tekan beton di depan *rib* harus mampu menahan dua komponen tegangan arah longitudinal h dan tegangan arah radial v .
- Akibat dari desakan tegangan arah radial v seperti terlihat pada gambar 1b, beton mengalami tegangan tarik pada arah keliling.
- Jika tegangan tarik pada arah keliling telah melampaui kapasitas tegangan tarik beton maka akan terjadi retak radial dan jika retak radial terus berkembang maka akan mengakibatkan *splitting failure* pada beton.

Splitting failure umumnya terjadi karena ketebalan *cover* beton tidak cukup untuk menahan tegangan tarik keliling. Adanya retak radial atau *splitting failure* mengakibatkan menurunnya kapasitas *interlocking* antara *rib* tulangan dan matriks beton di sekitarnya yang secara keseluruhan juga berakibat pada menurunnya *bond* antara beton dan tulangan.

ACI dan SKSNI menganggap bahwa tegangan lekat (*bond stress*) antara beton dan tulangan bekerja secara merata sepanjang panjang penyaluran, dimana panjang penyaluran adalah panjang tulangan tertanam minimum yang diperlukan untuk menahan gaya tarik dari

baja tulangan hingga mencapai leleh f_y . Persamaan panjang penyaluran l_d yang diberikan oleh ACI maupun SKSNI adalah sebagai berikut.

$$l_d = \frac{0.019 \cdot A_b \cdot f_y}{\sqrt{f'_c}} \dots\dots\dots(2)$$

Jika *bond stress* rata-rata kita nyatakan dengan \bar{u} maka gaya yang dapat ditahan oleh *bond* sepanjang l_d adalah.

$$P = \pi \cdot d_b \cdot l_d \cdot \bar{u} \dots\dots\dots(3)$$

Kapasitas tulangan untuk menerima gaya tarik dapat diturunkan menjadi.

$$P = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d_b^2 \cdot f_y \dots\dots\dots(4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 4 ke persamaan 3 akan menghasilkan.

$$l_d = \frac{d_b \cdot f_y}{4 \cdot \bar{u}} \dots\dots\dots(5)$$

Bond stress rata-rata menurut ACI diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan 2 ke persamaan 5.

$$\bar{u} = \frac{16.76 \cdot \sqrt{f'_c}}{d_b} \dots\dots\dots(6)$$

METODOLOGI PENELITIAN

Pemodelan Benda Uji

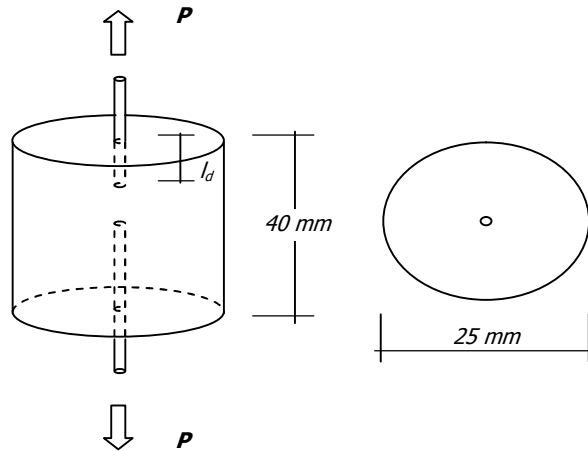
Pada umumnya pengujian lekatan (*bond*) antara beton dan tulangan dilakukan dengan mengacu pada ASTM C234. Pada pengujian ini benda uji ditempatkan pada pelat datar dan pada tulangan dikenakan

beban tarik. Cara seperti demikian dapat menimbulkan tegangan tekan pada beton disatu pihak dan tegangan tarik pada tulangan dilain pihak. Kondisi tegangan demikian kurang bisa merepresentasikan tegangan-tegangan pada struktur beton bertulang. Pengujian seperti ini lebih tepat jika digunakan untuk membandingkan jenis material beton yang satu dengan jenis material beton yang lain.

Pemilihan benda uji pada penelitian ini direncanakan sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan yang terjadi dapat merepresentasikan kondisi tegangan pada struktur beton bertulang. Untuk itu pemodelan benda uji pada penelitian ini mempertimbangkan beberapa aspek-aspek sebagai berikut :

- Bentuk benda uji sedemikian rupa sehingga daerah pengujian tidak terganggu oleh kondisi tepi penampang.
- Cara pengujian sedemikian rupa sehingga beton di sekitar tulangan juga mengalami tegangan tarik.
- Ukuran penampang benda uji sedemikian rupa sehingga keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan yang diinginkan, yaitu keruntuhan lekatan.
- Dapat dilakukan dengan menggunakan alat yang tersedia.

Berdasarkan pertimbangan di atas maka dalam penelitian ini benda uji ditentukan berbentuk silinder dengan tulangan tak menerus yang tertanam pada masing-masing ujung, dimana panjang penanaman tulangan yang akan diukur slipnya lebih pendek dibanding tulangan yang ditanam pada sisi yang lain seperti terlihat pada gambar 2.

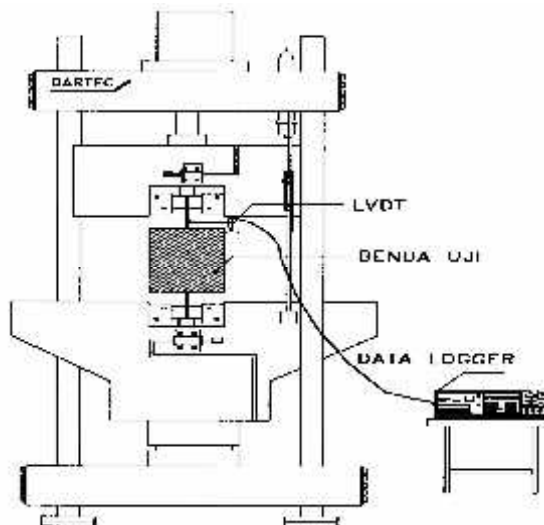


Gambar 2 Bentuk Benda uji

Set-up Pengujian

Pada penelitian ini pengujian tarik benda uji dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine (UTM)* untuk mendapatkan data beban inkrementasi. Slip total yang terjadi pada benda uji diukur dari *relative displacement* tulangan terhadap bidang permukaan benda uji dengan menggunakan *Linear Variable Displacement Transducer (LVDT)* dengan kapasitas 25 mm .

Untuk mendapatkan data korelasi antara beban dan slip maka beban yang dikenakan pada benda uji dilakukan secara bertahap dengan *displacement/stroke control*, yaitu penambahan beban didasarkan pada perubahan *displacement/stroke UTM*. Beban inkrementasi dan slip dicatat secara bersamaan dengan menggunakan *data logger*. Set-up pengujian pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Set-up pengujian

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kuat Tekan Beton

Beberapa silinder beton dibuat untuk mengetahui kuat tekan beton pada benda uji. Silinder beton ditest bersama-sama dengan pengujian *pull-out test* untuk

mendapatkan umur beton yang sama antara silinder dan benda uji. Pada penelitian ini kuat tekan beton divariasikan dalam lima nilai kuat tekan beton yang berbeda. Adapun hasil pengujian terhadap kuat tekan beton rata-rata dari lima jenis campuran tersebut adalah seperti terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tekan

No	Beton	Umur (hari)	f _c ' (MPa)
1	B1	28	47.387
2	B2	28	52.052
3	B3	28	55.253
4	B4	28	71.302
5	B5	28	80.874

Pengujian Bond Antara Beton dan Tulangan

Secara umum pola keruntuhan dari hasil *pull-out test* pada tulangan ulir adalah *splitting failure*, hal ini membuktikan bahwa *bond* pada tulangan ulir sangat didominasi oleh *interlocking* antara *rib* tulangan dan matriks beton di sekitarnya. Sedangkan keruntuhan dari hasil *pull-out test* pada tulangan polos adalah keruntuhan slip.

Data beban dan slip yang masing-masing diperoleh dari UTM dan LVDT merupakan representasi dari hubungan antara beban dan slip untuk masing-masing jenis mutu beton, jenis tulangan dan diameter tulangan. Dari hasil pengujian cabut (*pull-out test*) dapat diperoleh gaya cabut maksimum P_{max} untuk masing-masing benda uji dengan f_c' yang berbeda. Dengan menganggap *bond* bekerja secara merata sepanjang panjang penyaluran l_d maka dapat diperoleh *bond stress* rata-rata sebagai berikut.

$$\bar{u} = \frac{P_{max}}{\pi \cdot d_b \cdot l_d} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana d_b adalah menyatakan diameter tulangan. Jika kita perhatikan, ruas kanan persamaan di atas merupakan konstanta untuk satu benda uji dengan f_c' dan d_b tertentu. Untuk menurunkan persamaan *bond stress* yang merupakan fungsi dari f_c' dan d_b , maka *bond stress* rata-rata untuk semua benda uji dikalikan dengan faktor $\frac{d_b}{\sqrt{f_c'}}$.

Dari data hubungan antara $\frac{\bar{u} \cdot d_b}{\sqrt{f_c'}}$ dan f_c'

seperti terlihat pada gambar 4 dapat ditarik suatu fungsi regresi linier.

$$\frac{\bar{u} \cdot d_b}{\sqrt{f_c'}} = -0.0930918 \cdot f_c' + 40.72678 \dots\dots\dots (8)$$

Karena persamaan 8 di atas mempunyai gradien kecil, maka suku pertama pada ruas kanan dapat diabaikan dan persamaan *bond stress* rata-rata untuk tulangan ulir dapat ditulis kembali menjadi.

$$\bar{u} = \frac{40.72678 \cdot \sqrt{f'_c}}{d_b} \dots\dots\dots(9)$$

Dengan cara yang sama maka persamaan *bond stress* rata-rata untuk tulangan polos juga dapat diturunkan menjadi (lihat gambar 5).

$$\bar{u} = \frac{20.72329 \cdot \sqrt{f'_c}}{d_b} \dots\dots\dots(10)$$

Hasil pengujian cabut dan analisa tegangan lekatnya ditampilkan dalam tabel 2. Sedangkan analisa regresi untuk persamaan 9 dan 10 ditunjukkan pada gambar 4 dan 5.

Untuk mengekspresikan hubungan antara parameter yang satu dengan yang lain dari suatu penelitian maka dilakukan suatu modelisasi hubungan antara parameter pengujian sebagai variabel bebas dan materi pengujian yaitu tegangan lekat (*bond stress*) sebagai variabel tak bebas. Korelasi tersebut dilakukan dengan melakukan analisis regresi linier dan regresi non-linier untuk mendapatkan model hubungan *bond* – slip. Untuk mendapatkan model hubungan *bond* – slip secara umum dilakukan dengan cara menormalisasikan *bond* dengan $\sqrt{f'_c}$ dan menormalisasikan slip dengan $d_b/100$ pada masing-masing kurva *bond*-slip dari berbagai parameter.

Selanjutnya model hubungan antara *bond* – slip yang telah dinormalisasi tersebut didekati dengan tiga fungsi yang mempunyai karakteristik paling mendekati dengan hasil sebaran data pengujian. Hasil persamaan yang diperoleh dari analisa regresi selanjutnya dievaluasi dengan persamaan *bond*-slip yang diberikan oleh CEB (1990) untuk mengetahui seberapa

jauh perbedaannya. Akan tetapi karena persamaan dari CEB merupakan persamaan umum yang tidak tergantung dari f'_c dan d_b maka persamaan *bond*-slip dari CEB harus disesuaikan terlebih dahulu supaya mempunyai parameter-parameter yang sama. Pada artikel ini persamaan CEB yang ditinjau adalah persamaan untuk beton tidak terkekang (*unconfined concrete*) dan kondisi lekatan baik (*good bond condition*). Persamaan-persamaan tersebut adalah sebagai berikut.

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{s}{s_1} \right)^\alpha ; \text{ untuk } 0 \leq s \leq s_1 \dots\dots(11)$$

$$\tau = \tau_{max} ; \text{ untuk } s_1 < s \leq s_2 \dots\dots\dots(12)$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \cdot \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) ;$$

untuk $s_2 < s \leq s_3 \dots\dots\dots(13)$

$$\tau = \tau_f ; \text{ untuk } s > s_3 \dots\dots\dots(14)$$

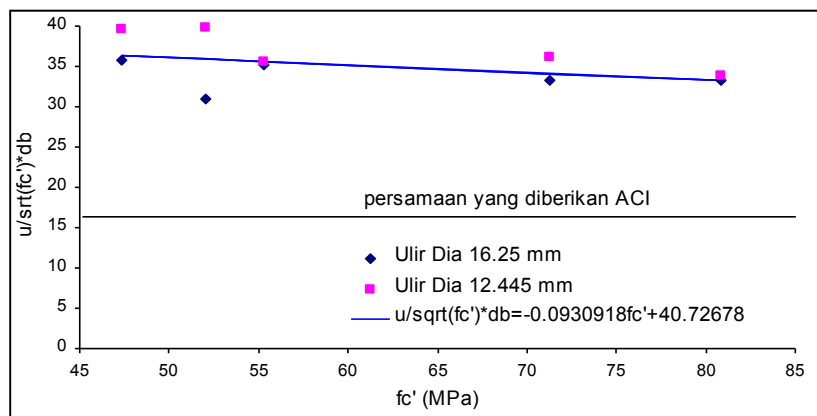
Dimana :

- s_1 : 0.60 mm
- s_2 : 0.60 mm
- s_3 : 1.00 mm
- α : 0.4
- τ_{max} : $2.0 \sqrt{f'_c}$
- τ_f : $0.15 \tau_{max}$

Hasil pemodelan matematik yang merepresentasikan perilaku *bond stress* untuk tulangan ulir dan tulangan polos masing-masing ditunjukkan pada gambar 6 dan 7.

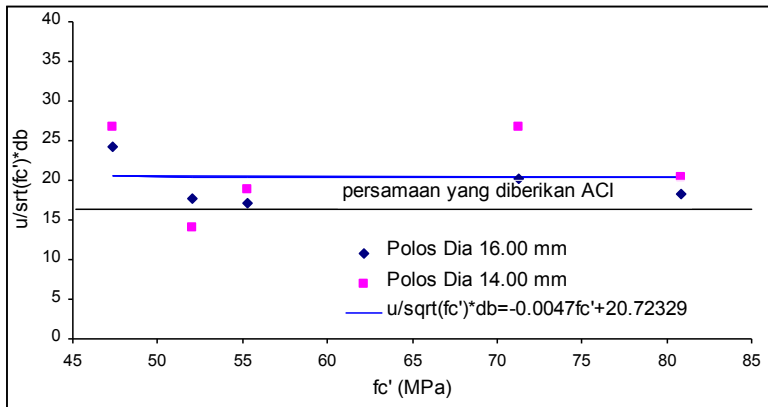
Table 2. Hasil pengujian cabut

Jenis dan diameter tulangan	Data dan analisa	Kekuatan Beton pada umur 28 hari (MPa)				
		B1	B2	B3	B4	B5
		47.387	52.052	55.253	71.302	80.874
Ulir	Pmax rata-rata (kN)	60.197	54.704	63.973	68.837	73.156
16.25 mm	Ld (mm)	78	78	78	78	78
	u rata-rata (MPa)	15.117	13.738	16.066	17.287	18.372
	u/fc	2.196	1.904	2.161	2.047	2.043
	u/fc*db	35.686	30.943	35.122	33.268	33.197
Ulir	Pmax rata-rata (kN)	32.502	34.218	31.643	36.393	36.36
12.445 mm	Ld (mm)	38	38	38	38	38
	u rata-rata (MPa)	21.877	23.032	21.299	24.496	24.473
	u/fc	3.178	3.192	2.865	2.901	2.721
	u/fc*db	39.550	39.729	35.659	36.102	33.868
Polos	Pmax rata-rata (kN)	40.913	31.243	31.243	41.829	40.313
16.00 mm	Ld (mm)	78	78	78	78	78
	u rata-rata (MPa)	10.435	7.969	7.969	10.669	10.282
	u/fc	1.516	1.105	1.072	1.263	1.143
	u/fc*db	24.254	17.672	17.153	20.215	18.293
Polos	Pmax rata-rata (kN)	21.916	12.074	16.766	27.037	21.859
14.00 mm	Ld (mm)	38	38	38	38	38
	u rata-rata (MPa)	13.113	7.224	10.032	16.177	13.079
	u/fc	1.905	1.001	1.350	1.916	1.454
	u/fc*db	26.668	14.018	18.894	26.821	20.361

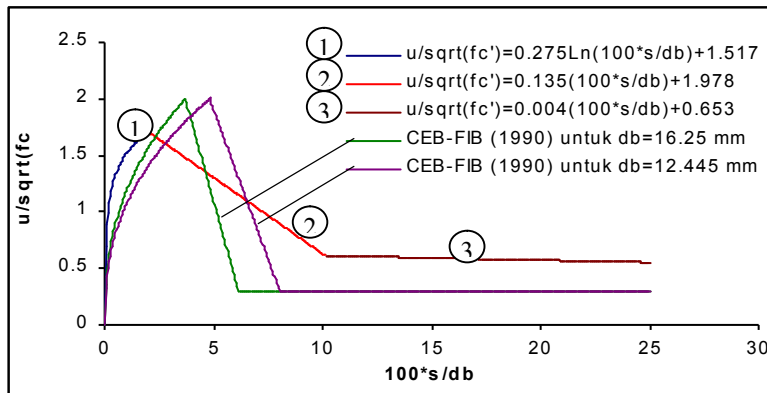


Gambar 4. Hubungan antara $u \cdot d_b / \sqrt{f_c'}$ dan f_c' untuk tulangan ulir

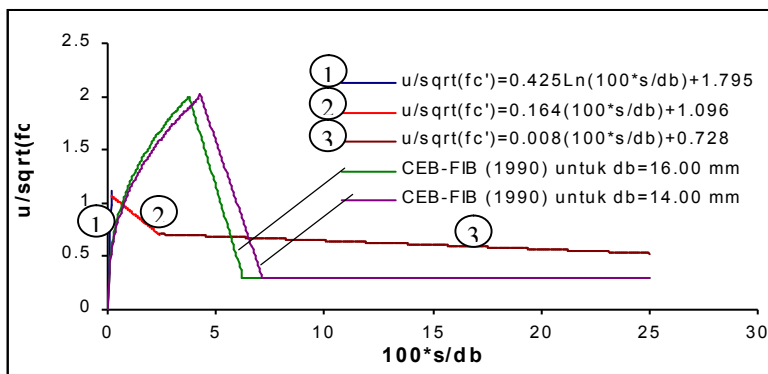
Studi Eksperimental Lekatan Antara Beton Dan Tulangan Pada Beton Mutu Tinggi



Gambar 5. Hubungan antara $u \cdot d_b / \sqrt{f_c'}$ dan f_c' untuk tulangan polos



Gambar 6. Hubungan antara $u/\sqrt{f_c'}$ - $100 \cdot s/d_b$ untuk tulangan ulir



Gambar 7. Hubungan antara $u/\sqrt{f_c'}$ - $100 \cdot s/d_b$ untuk tulangan polos

KESIMPULAN

Dari hasil studi eksperimental ini dapat disimpulkan sebagai berikut :

Dengan membandingkan persamaan 6 dan persamaan 9 dapat disimpulkan bahwa persamaan tegangan lekat rata-rata yang diberikan oleh ACI terlalu konservatif jika digunakan pada beton mutu tinggi dengan tulangan ulir. Bahkan masih lebih tinggi jika dibandingkan dengan persamaan yang diperoleh dari hasil eksperimental pada beton mutu tinggi dengan tulangan polos.

Kurva hubungan *bond*-slip untuk beton mutu tinggi dengan tulangan ulir hasil eksperimental mempunyai puncak sedikit berada di bawah persamaan *bond*-slip yang diberikan oleh CEB.

Hasil eksperimental menunjukkan bahwa puncak kurva hubungan *bond*-slip untuk tulangan polos terjadi pada slip yang jauh lebih kecil dibanding dengan puncak kurva hubungan *bond*-slip untuk tulangan ulir. Hal ini dikarenakan mekanisme lekatan pada tulangan polos hanya dibentuk oleh adhesi dan friksi, dimana adhesi segera hilang begitu terjadi slip dan selanjutnya *bond* hanya dibebankan pada friksi. Sedangkan pada tulangan ulir, mekanisme interlocking masih bekerja sampai mencapai beban maksimum meskipun adhesi telah hilang, *bond* menurun akibat splitting failure dan selanjutnya *bond* hanya dibebankan pada friksi.

DAFTAR PUSTAKA

ACI Committee 363 (1994), *State of The Art on High Strength Concrete*, ACI journal, 8(4),48 pp.

Aziznamini, Atorod et al. (1993), *Bond Performance of Reinfocing Bars Embedded in High-Strength Concrete*, ACI Structural Journal.

CEB-FIP (1990), Model Code, Comite-Euro-International du Beton, Thomas Telford

Lundgren, K (1999), *Three-Dimensional Modelling of Bond in Reinforced Concrete Theoretical Model, Experiments and Applications*, PhD. Dissertation, Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.

MacGregor, J. G. (1992), *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, New Jersey.

Munaf, D. R. et al. (1993), Pembuatan dan Penyelidikan Perilaku Beton Mutu Tinggi Serta Bahan Pembentuknya, Laporan Penelitian Dikti-Bank Dunia No. 39/P4M/DPPN/BD XXI/ID & R.

Nuroji (1996), Perilaku Mekanik Lekatan Beton dan Tulangan pada Beton Mutu Tinggi Akibat Beban Statik, Tesis Magister, ITB.

Surahman, A. et al. (1994), Sifat-sifat Struktur Beton Mutu Tinggi, Laporan Penelitian Asahi Glass Foundation dan PAU Ilmu Rekayasa ITB.