



**PENGARUH RASIO TULANGAN PADA BERBAGAI MUTU BETON
TERHADAP PENGUATAN TARIK BAJA TULANGAN BETON
BERTULANG (TENSION STIFFENING EFFECT)**

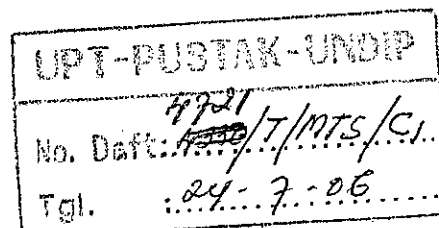
TESIS

Diajukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan
Program Magister Teknik Sipil

Oleh :

Nuryani TA
NIM. L4A.003.025

PROGRAM PASCA SARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2005



HALAMAN PENGESAHAN

PENGARUH RASIO TULANGAN PADA BERBAGAI MUTU BETON TERHADAP PENGUATAN TARIK BAJA TULANGAN BETON BERTULANG (TENSION STIFFENING EFFECT)

Disusun Oleh

Nuryani TA
NIM. L4A.003.025

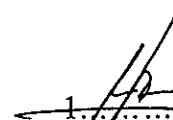
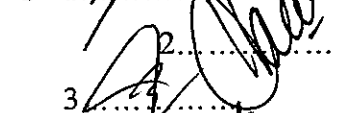
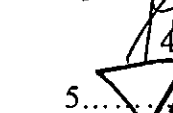

Dipertahankan di depan Tim Penguji pada Tanggal:

22 Agustus 2005

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Magister Teknik Sipil


Tim Penguji

1. Ketua : Ir.Himawan Indarto,MS
2. Sekretaris : Ir. Han Ay Lie,M.Eng
3. Anggota 1 : Dr.Ir. Nuroji, MT
4. Anggota 2 : Dr. Ir. Antonius, MT
5. Anggota 3 : Ir. Purwanto,MT,M.Eng

1. 
2. 
3. 
4. 
5.

Semarang,
Universitas Diponegoro
Program Pasca Sarjana
Magister Teknik Sipil,
Ketua




Dr.Ir. Suripin,M.Eng
NIP. 131668511

ABSTRAKSI

Seperti diketahui beton bertulang merupakan bahan komposit yang terdiri dari baja tulangan dan beton yang mengelilinginya, dapat bekerjasama dengan baik karena adanya faktor lekatan di antara keduanya. Daya lekatnya akan meningkat apabila mutu bahan penyusunnya berhasil ditingkatkan pula. Saat ini akibat kemajuan teknologi beton bertulang mutu beton dengan mudah dapat ditingkatkan, sedangkan baja tulangannya secara geometris dapat ditingkatkan dari jenis polos menjadi ulir.

Apabila daya lekat antara baja tulangan dan beton meningkat, maka kapasitas tarik baja tulangan akan menguat, sehingga terjadi lah *tension stiffening* yaitu suatu peristiwa dimana tegangan di dalam baja tulangan yang terbungkus oleh beton akan menjadi lebih besar bila dibandingkan dengan baja tulangan dalam keadaan terbuka (*bare bar*) apabila kepadanya dikenakan beban tarik.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui lebih lanjut seberapa besar *tension stiffening* yang terjadi pada berbagai rasio tulangan dan mutu beton. Untuk maksud tersebut dibuat 12 benda uji (*concrete tension specimen*) dengan menggunakan baja tulangan berdiameter 10 sampai 19 mm jenis polos dan ulir, sedangkan mutu beton direncanakan akan menggunakan $f_c' = 25, 40$ dan 50 MPa. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Kontruksi FT UNDIP dengan menggunakan alat uji UTM (*Universal Testing Machine*).

Dari hasil penelitian diketahui, pertama: semakin tinggi rasio tulangan pada mutu beton tertentu, penguatan tarik baja tulangan (*tension stiffening*) semakin berkurang, kedua: semakin tinggi mutu beton pada rasio tulangan tertentu, penguatan tarik baja tulangan semakin meningkat dan ketiga: apabila timbul retak pada permukaan, urutannya adalah *transverse cracks*, *splitting cracks* dan akhirnya *slip cracks*.

ABSTRACT

It is well understood that reinforced concrete is a composite material consisting of steel bars working together with concrete. This material can perform excellently because of bonding effect between the reinforcing steel and concrete. The Bonding value will increase as a function of the quality of surrounding material, i.e. the concrete. Improvement in concrete technology make possible to create a high strength or even very high strength concrete, while performance of steel bar's bond can be measured by applying deformed bars.

When the bond between steel bars and concrete can be increased, the tension capacity of steel bars would be enhanced. This is defined as the *tension stiffening effect* a phenomena where the tensile strength of steel bars embedded in concrete is higher than those of bare bars.

This research was aimed to investigate the degree of *tension stiffening* enhancement as a function of the ratio *steel-to-concrete strength*. For this purpose twelve specimens were developed by using steel bars in a variation of 10 to 19 mm in diameter. The concrete strength was set at 25, 40 and 50 MPa. Specimens were then tested with a Universal Testing Machine (UTM) at the Material and Structural Laboratory, Engineering Faculty at the Diponegoro University in Semarang.

The result showed that the higher the *ratio steel-to-concrete area*, the less the stiffening effect on bars was. On the other hand the higher the concrete compression strength, the higher the tension stiffening effect on the embedded bars, and finally; the specimens failed in the sequences of the occurrence of *transverse cracks*, *splitting cracks* and *slip cracks*.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan Yang Maha Pengasih lagi Penyayang, karena hanya Rahmat-Nya lah tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Pelaksanaan penelitian tesis ini diselenggarakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil-Fakultas Teknik UNDIP Semarang selama kurang lebih 6 bulan.

Tesis dengan judul PENGARUH RASIO TULANGAN PADA BERBAGAI MUTU BETON TERHADAP PENGUATAN TARIK BAJA TULANGAN BETON BERTULANG (TENSION STIFFENING EFFECT), ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan di Program Magister Teknik Sipil-Program Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.

Pada kesempatan yang baik ini, penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Ir. Himawan Indarto,MS dan Ibu Ir. Han Ay Lie,M.Eng/ Bapak Sukamta,ST,MT selaku pembimbing yang telah memberikan bimbingan kepada penulis sejak awal sampai selesainya penulisan tesis ini.
2. Bapak Dr.Ir Nuroji,MT dan Bapak Dr.Ir. Antonius,MT selaku dosen pembahas yang telah memberikan masukan kepada penulis yang sangat bermanfaat sehingga penulisan tesis ini berjalan lancar.
3. Bapak Ir. Purwanto,MT,M.Eng selaku dosen penguji atas koreksi dan masukan sehingga dapat menyempurnakan isi dan kajian tesis ini.
4. Pengelola Program Magsiter Teknik Sipil UNDIP beserta segenap sivitas akademika tempat penulis menimba ilmu.
5. Segenap rekan-rekan S2 Program Magsiter Teknik Sipil UNDIP khususnya konsentrasi struktur yang telah banyak memberikan semangat dan dorongan bagi penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
6. Segenap Teknisi Laboratorium Bahan dan Konstruksi FT-UNDIP yang telah banyak membantu pelaksanaan penelitian, sehingga penelitian dapat selesai dengan baik.
7. Bapak dan Ibu penulis yang selalu mendo'akan dengan tulus dan ikhlas untuk keberhasilan penulis di dalam menempuh setiap jenjang pendidikan
8. Istri tercinta Muflichah, BcHk yang telah memberikan dukungan dan dorongan

semangat sampai akhir penulisan tesis ini.

9. Firman, Hara, Dian, Ana dan Ani, anak-anakku tercinta yang selalu mendorong agar studi penulis dapat segera selesai.
10. Semua pihak yang telah membantu atas penulisan tesis ini, baik langsung maupun tidak langsung yang tidak mungkin penulis sebut satu persatu.

Semoga Allah SWT berkenan membalas amal baik Bapak/Ibu sekalian dengan pahala yang berlipat ganda. Penulis berharap semoga tesis ini bermanfaat bagi pembacanya.

Semarang, Agustus 2005
Penulis

Nuryani TA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAKSI	iii
<i>ABSTRACT</i>	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMBANG DAN NOTASI.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	2
1.3. Ruang Lingkup Penelitian	3
1.4. Tempat Penelitian	3
1.5. Sistematika Penulisan	3
1.6. Hipotesa Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Rumusan Dasar Lekatan Beton.....	5
2.2. Mekanisme Lekatan Antara Beton dan Tulangan.....	6
2.2.1. Lekatan Antara Beton dan Baja Tulangan Polos.....	7
2.2.2. Lekatan Antara Beton dan Baja Tulangan Ulir	7
2.3. Pengaruh Lekatan Antara Beton dan Tulangan Terhadap Kekuatan Tarik Baja Tulangan	10
2.4. Keruntuhan Lekatan Antara Beton dan Tulangan	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1. Tahapan Penelitian.....	13
3.2. Pemodelan Benda Uji	14
3.3. Spesifikasi Material	17
3.3.1. Baja Tulangan.....	17
3.3.2. Bahan-Bahan Dasar Campuran Beton.....	18
3.4. Prediksi Kekuatan Benda Uji.....	20
3.5. Pembuatan Benda Uji	21
3.5.1. Penyiapan Baja Tulangan	21
3.5.2. Pembuatan Cetakan (Bekisting).....	22
3.5.3. Pengecoran Beton	22
3.5.4. Perawatan Beton Sebagai Benda Uji	23
3.6. Pengujian Benda Uji.....	24
3.6.1. Pengujian Baja Tulangan Sebagai Bare Bar	24

3.6.2. Pengujian Silinder Beton	24
3.6.3. Pengujian <i>Concrete Tension Specimen</i>	24
3.7. Pencatatan Data Hasil Pengujian	25
3.7.1. Pencatatan Data Pengujian Bare Bar	25
3.7.2. Pencatatan Data Pengujian Silinder Beton	25
3.7.3. Pencatatan Data <i>Concrete Tension Specimen</i>	26
 BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS.....	 29
4.1. Analisa dan Hasil Pengujian Bare Bar.....	29
4.2. Analisa dan Hasil Pengujian Silinder Beton.....	30
4.3. Analisa dan Hasil Pengujian <i>Concrete Tension Specimen</i>	31
4.4. Pembahasan Hasil Pengujian Benda Uji.....	34
4.4.1. Pembahasan Hasil Pengujian <i>Bare Bar</i>	34
4.4.2. Pembahasan Hasil Pengujian Silinder Beton.....	37
4.4.3. Pembahasan Hasil Pengujian <i>Concrete Tension Specimen</i>	38
4.5. Pengamatan Pola Retak	48
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 53
5.1. Kesimpulan	53
5.2. Saran	54
 DAFTAR PUSTAKA.....	 55
 LAMPIRAN.....	 57

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Hasil Pengujian Geometrik Baja Tulangan	17
Tabel 3. 2. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan.....	18
Tabel 3. 3. Rancangan Komposisi Campuran Beton.....	19
Tabel 3. 4. Baja Tulangan Untuk Benda Uji.....	21
Tabel 4. 1. Hasil Analisa dan Uji Tarik <i>Bare Bar</i>	30
Tabel 4. 2. Hasil Analisa Dan Uji Tekan Silinder Beton.....	31
Tabel 4.3. Hasil Analisa Penampang <i>Concrete Tension Specimen</i>	32
Tabel 4.4. Hasil Uji Tarik <i>Concrete Tension Specimen</i> Dan Pola Retak Betonnya	33
Tabel 4. 5. Mutu Beton Riil Untuk Penelitian.....	38
Tabel 4. 6. Nilai σ_{sr} Dan σ_{cr} Dari Berbagai Analisa.....	41
Tabel 4. 7. Prosentase Kenaikan <i>Tension Stiffening Bare Bar</i>	42

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Balok Sederhana dengan Pembebanan Lentur.....	5
Gambar 2.2. Mekanisme Pemindahan Gaya Tegangan Lekat antara Beton dan Tulangan Ulir.....	7
Gambar 3.1. Bagan Alir Tahapan Penelitian.....	13
Gambar 3.2. Balok Beton Bertulang Sederhana dengan Beban Lentur Murni.....	14
Gambar 3. 3. Balok Beton Bertulang Mengalami Retak Tarik.....	15
Gambar 3.4. Dimensi Benda Uji.....	16
Gambar 3.5. Dimensi Benda Uji Percobaan.....	20
Gambar 3.6. Bekisting dan Tulangan Benda Uji.....	22
Gambar 3.7. Kegiatan Pengecoran Benda Uji.....	23
Gambar 3.8. Set Up Alat Pengujian, UTM.....	28
Gambar 4.1. Prototipe Diagram $f-\xi$ Dari <i>Bare Bar</i> Yang Telah Di-idealisasi.....	34
Gambar 4.2. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk <i>Bare Bar</i> Ulir.....	36
Gambar 4.3. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan untuk <i>Bare Bar</i> Baja Ulir.....	37
Gambar 4. 4. Prototipe Diagram $\sigma - \xi$ Gabungan Antara <i>Embedded Bar</i> dan <i>Bare Bar</i> . $OA=$ daerah elastis, $AB=$ daerah plastis.	43
Gambar 4.5. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c'=24,23$ MPa.....	44
Gambar 4.6. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c'=34,98$ MPa.....	45

Gambar 4.7. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c' = 44,27$ MPa	45
Gambar 4.8. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan <i>Bare Bar- Embedded Bar</i> Mutu Beton $f_c' = 24,23$ MPa.....	46
Gambar 4. 9. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan <i>Bare Bar- Embedded Bar</i> Mutu Beton $f_c' = 34,98$ MPa.....	46
Gambar 4. 10. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan <i>Bare Bar-Embedded Bar</i> Mutu Beton $f_c' = 44,27$ MPa.....	47
Gambar 4.11. Kurva Hubungan <i>Tension Stiffening/ $T_s - \rho$</i> Pada Berbagai Mutu Beton	47

DAFTAR LAMBANG DAN NOTASI

A_b = luas penampang tulangan pada perhitungan tegangan lekatan (mm^2)

A_c = luas penampang beton (mm^2)

A_s = luas penampang baja tulangan (mm^2)

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

E_s = Modulus elastisitas baja tulangan (MPa)

F_s = resultante total gaya tarik baja tulangan (N)

F_c = resultante total gaya tekan beton (N)

L = panjang awal benda uji bare bar (mm)

M = momen lentur akibat beban luar (Nmm)

N = beban tarik sentris pada benda uji (N)

N_c = beban tarik yang diterima oleh beton (N)

N_s = beban tarik yang diterima oleh baja tulangan (N)

P = beban tarik pada baja tulangan untuk perhitungan lekatan (N)

P_y = beban tarik leleh pertama baja tulangan (N)

a_1 = faktor karakteristik baja tulangan rumus (2.11)

= 1,0 untuk tulangan ulir

= 0,5 untuk tulangan polos

a_2 = faktor beban rumus (2.11)

= 1,0 untuk beban monotonik

= 0,5 untuk beban berulang

c = tebal selimut beton (mm)

db = diameter tulangan (mm)

dp = diameter pengenal baja tulangan jenis ulir (mm)

f_c = tegangan beton setelah retak (MPa)

f_c' = kuat tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari (MPa)

f_{cr} = tegangan tarik beton (MPa)

f_s = tegangan tarik baja tulangan (MPa)

f_y = tegangan leleh baja tulangan (MPa)

g = berat batang tulangan per-meter (kg/m)

jd = jarak resultan gaya tekan beton ke pusat baja tulangan tarik (mm)

ld = panjang penyaluran tegangan (mm)

$$n = \text{angka ekivalensi} = \frac{E_s}{E_c}$$

α_1 = faktor karakteristik baja tulangan rumus (2.13)

= 1,0 untuk tulangan ulir

= 0,7 untuk tulangan polos

α_2 = faktor beban rumus (2.13)

= 1,0 untuk beban monotonik

= 0,7 untuk beban berulang

α_3 = faktor ratio selimut dan diameter baja tulangan rumus (2.13)

= 1,0 untuk $c/db > 2,50$

= $0,8 c/db - 1$ untuk $1,25 \leq c/db \leq 2,50$

= 0 untuk $c/db < 1,25$

ξ'_c = regangan tekan beton maksimum pada serat tekan terluar

ξ_{cf} = regangan pada beton benda uji

ξ_{cr} = regangan pada beton benda uji pada saat mengalami retak

ξ_s = regangan tarik pada baja tulangan

ξ_{sm} = regangan rata-rata baja tulangan setelah beton mengalami retak

ξ_y = Regangan baja pada saat leleh pertama = $\frac{\Delta L}{L}$

ΔL = Pertambahan panjang sampai saat baja tulangan mengalami leleh pertama (cm)

σ_s = tegangan baja tulangan setelah beton mengalami retak (MPa)

σ_{sr} = tegangan baja tulangan pada saat beton retak pertama (MPa)

μ = tegangan lekat rata-rata antara beton dan baja tulangan (MPa)

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 3.1. Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)
- Lampiran 3.2. Predikasi Kekuatan Benda Uji
- Lampiran 4.1. Data Uji Tarik *Bare Bar*
- Lampiran 4.2. Data Uji Tekan Silinder Beton
- Lampiran 4.3. Data Uji Tarik Benda Uji (*Concrete Tension Specimen*)
- Lampiran 4.4. Cara Menghitung N_c dan T_s Tabel 4.7
- Lampiran 4.5. Foto Dokumentasi Penelitian

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Beton merupakan bahan yang menyerupai batu. Tersusun dari material agregat halus dan kasar, yaitu : pasir, batu pecah dengan menambahkan perekat semen dan air dalam jumlah proporsi tertentu, dihasilkan dengan cara interaksi mekanis dan reaksi kimia selama proses pengerasan berlangsung. Material beton banyak digunakan pada bangunan-bangunan gedung bertingkat dan bangunan sipil lainnya.

Nilai kekuatan serta daya tahannya merupakan fungsi banyak factor, antara lain nilai banding bahan penyusun, mutu material, metode pelaksanaan, temperatur lingkungan serta cara perawatan selama proses pengerasan dan lain-lain. Dari hasil penelitian nilai kuat tekan beton jauh lebih tinggi bila dibandingkan dengan nilai kuat tariknya dan beton merupakan bahan bersifat getas (*brittle*). Nilai kuat tarik hanya sekitar 8-10 % dari kuat tekannya, sehingga untuk dapat digunakan sebagai komponen struktur bangunan, beton tersebut perlu diperkuat dengan baja tulangan untuk membantu kelemahannya, yaitu dengan menempatkan batang tulangan di bagian beton yang menerima beban tarik.

Dengan demikian masing-masing elemen mempunyai tugas yang berbeda:

- a. Baja Tulangan bertugas menahan beban tarik atau menambah kuat tekan beton
- b. Beton hanya bertugas sesuai kemampuannya yaitu menahan beban tekan saja

Komponen komposit seperti itu disebut sebagai beton bertulang yang telah dikenal selama ini.

Kerjasama yang baik antara bahan beton dan baja tulangan dapat terwujud pada garis besarnya disebabkan oleh keadaan-keadaan sebagai berikut:

1. Terjadi lekatan yang baik antara baja tulangan dan beton yang mengelilinginya, sehingga tidak terjadi proses penggelinciran antara keduanya pada saat komponen struktur menerima beban dari luar.

2. Pada umumnya dalam keadaan normal beton yang mengelilingi baja tulangan dapat berfungsi melindungi dan mencegah terjadinya karat baja, sehingga tulangan dapat menjalankan fungsinya dengan baik dan tahan karat.
3. Angka muai terhadap perubahan temperatur kedua bahan tersebut hampir sama, yaitu sekitar $1,2 \times 10^{-5}$, sehingga deformasi yang terjadi akibat perubahan temperatur dapat dianggap sama, dengan demikian dapat terhindar dari proses penggelinciran (*slip*), sehingga kuat lekatnya tetap dapat dipertahankan adanya.

Dengan demikian faktor lekatan memegang peranan sangat penting untuk mewujudkan kerjasama di antara keduanya, sehingga faktor inilah yang akan dijadikan bahasan penting di dalam penelitian ini.

1.2. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Untuk mengetahui lebih lanjut perilaku lekatan antara beton dan baja tulangan, dimana baja tulangan dibebani tarik sentris, maka dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk:

1. Mengetahui mekanisme peningkatan tarik (*tension stiffening*) pada baja tulangan akibat pengaruh dari adanya lekatan beton dan tulangan.
2. Mengetahui pola retak (*crack*) pada permukaan beton.
3. Mengetahui pengaruh yang terjadi oleh berbagai rasio tulangan terhadap peningkatan tarik baja tulangan dari berbagai mutu beton yang ada.

Sedangkan manfaat yang dapat diperoleh dari adanya penelitian ini adalah :

1. Terjadinya penguatan tarik pada baja tulangan, khususnya pada daerah elastis linier, akan merupakan faktor keamanan tersendiri di dalam perhitungan tulangan tarik, konstruksi beton bertulang.

2. Memberikan informasi penting tentang perilaku material pada kondisi retak yang berguna untuk analisa lebih lanjut bagi struktur, misalnya dengan metode elemen hingga.

1.3. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini diarahkan pada perilaku serta peningkatan tarik (*tension stiffening*) pada benda uji akibat beban tarik sentris pada baja tulangan. Kuat tekan beton rencana yang digunakan adalah mutu 25 MPa, 40 MPa dan 50 MPa sedang baja tulangan jenis ulir dan polos, diameter di pasaran antara 10 mm dan 19 mm.

Parameter pengujian dalam penelitian ini meliputi :

- a. Kuat tekan beton
- b. Kuat tarik baja tulangan
- c. Macam diameter tulangan (rasio tulangan)

1.4. Tempat Penelitian

Pengujian dilakukan di laboratorium bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil-Fakultas Teknik UNDIP.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tesis ini adalah sebagai berikut :

B A B I : PENDAHULUAN.

Dalam bab ini dibahas mengenai latar belakang masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup penelitian, tempat penelitian sistematika penulisan dan Hipotesa Penelitian.

B A B II : TINJAUAN PUSTAKA.

Dalam bab ini akan dibahas mengenai teori-teori yang akan digunakan dalam penyelesaian masalah-masalah yang ada.

B A B III : METODOLOGI PENELITIAN, ASUMSI DAN PROSEDUR

Dalam bab ini akan membahas kerangka akhir dan prosedur-prosedur dari pemecahan masalah.

B A B IV : HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini akan dilakukan prosedur pengolahan data.

B A B V : KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini akan diambil kesimpulan mengenai hasil pengolahan data dan analisis, kemudian diakhiri dengan saran. Sebagai pelengkap laporan disertakan juga beberapa data dan hasil analisis sebagai LAMPIRAN

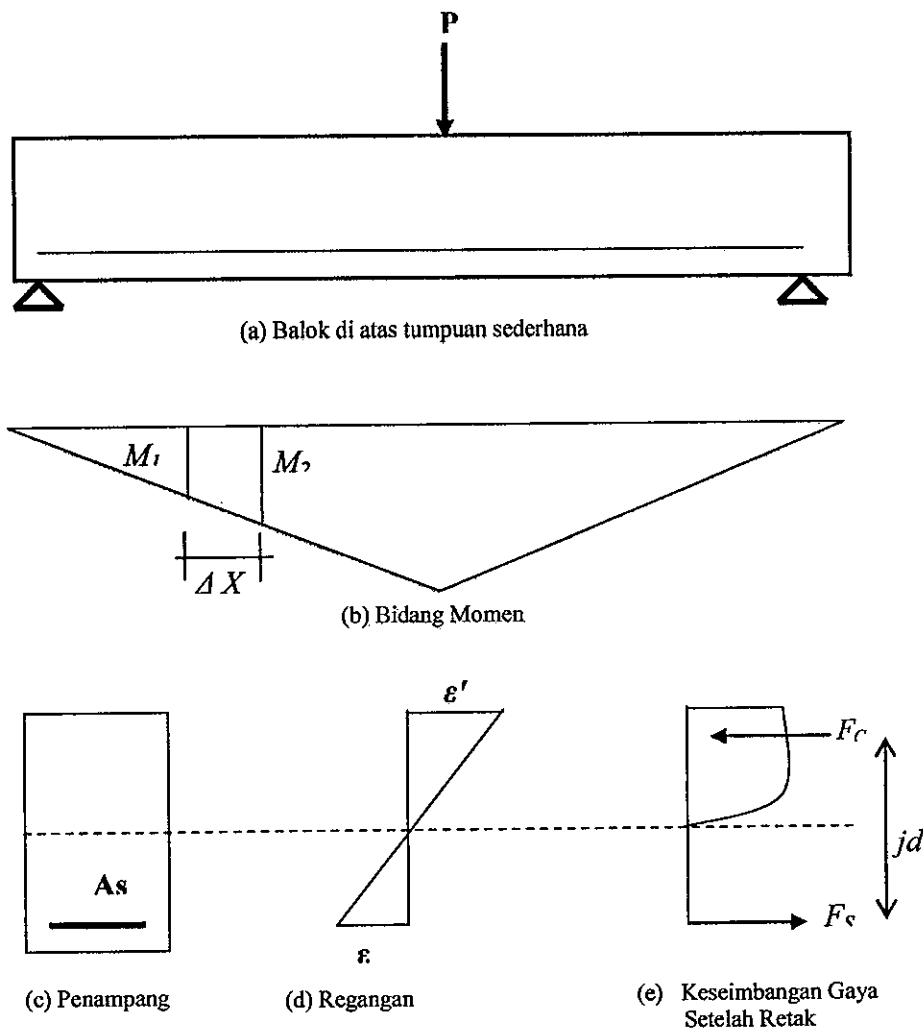
1.6. Hipotesa Penelitian

Agar maksud dan tujuan penelitian ini dapat tercapai dengan baik, maka perlu dilakukan pembuktian hipotesis terlebih dahulu dengan cara dibuat benda uji percobaan atas dasar teori perhitungan kekuatan penampang untuk memperkirakan bahwa permukaan beton akan retak lebih dahulu sebelum proses *slip* (penggelinciran) antara baja tulangan dan beton terjadi. Prediksi kekuatan benda uji tercantum pada Lampiran 3.2

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rumusan Dasar Lekatan Beton

Agar beton bertulang dapat berfungsi sebagai bahan komposit, maka penyaluran gaya dari beton ke baja tulangan harus berjalan dengan baik. Peranan utama tegangan lekat antara beton dan baja tulangan dapat dijelaskan dengan gambar pada suatu struktur balok beton bertulang yang tertumpu di atas perletakan sederhana yang dikenakan beban lentur seperti Gambar 2.1. Akibat beban P pada penampang balok bagian atas mengalami tegangan tekan dipikul oleh beton, sedangkan penampang balok bagian bawah mengalami tegangan tarik yang dipikul oleh baja tulangan, sesuai bidang tugas masing-masing bahan tersebut. Menurut Nuroji ^[7] dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 2.1. Balok Sederhana dengan Pembebanan Lentur

Ditinjau sepanjang ΔX , persamaan keseimbangan gaya adalah sebagai berikut:

$$F_s = \frac{M}{jd} \dots\dots\dots (2.1.)$$

$$F_{s2} - F_{s1} = \frac{\Delta M}{jd} \dots\dots\dots(2.2.)$$

$$\Delta F_s = \frac{\Delta M}{jd} \dots\dots\dots(2.3)$$

Persamaan 2.3. di atas menunjukkan bahwa besarnya gaya tarik yang bekerja pada bagian baja tulangan yang menerima momen sebesar ΔM sepanjang ΔX adalah ΔF_s , dimana jd jarak resultan gaya tekan beton ke pusat tulangan tarik. Jika db menyatakan diameter tulangan tarik, maka besar tegangan lekat rata-rata antara beton dan baja tulangan sepanjang ΔX adalah:

$$\mu = \frac{\Delta F_s}{\pi \cdot db \cdot \Delta X} \dots\dots\dots(2.4.)$$

2.2. Mekanisme Lekatan Antara Beton dan Tulangan

Secara umum mekanisme yang membentuk adanya lekatan antara beton dan baja tulangan antara lain, menurut Nuroji ^[7] :

- a. Adhesi merupakan ikatan kimiawi yang terbentuk pada seluruh bidang kontak antara beton dan tulangan akibat adanya proses reaksi pengerasan antara air dan semen.
- b. Memegang erat (*gripping*) sebagai akibat penyusutan dari beton yang telah mengering di sekeliling baja tulangan.
- c. Friksi yang terjadi karena adanya permukaan yang tidak beraturan pada bidang kontak antara beton dan baja tulangan.
- d. *Interlocking* terjadi karena adanya interaksi antara ulir tulangan dengan matriks beton yang berada di sekitarnya. Hal ini tidak akan terjadi pada baja tulangan polos.

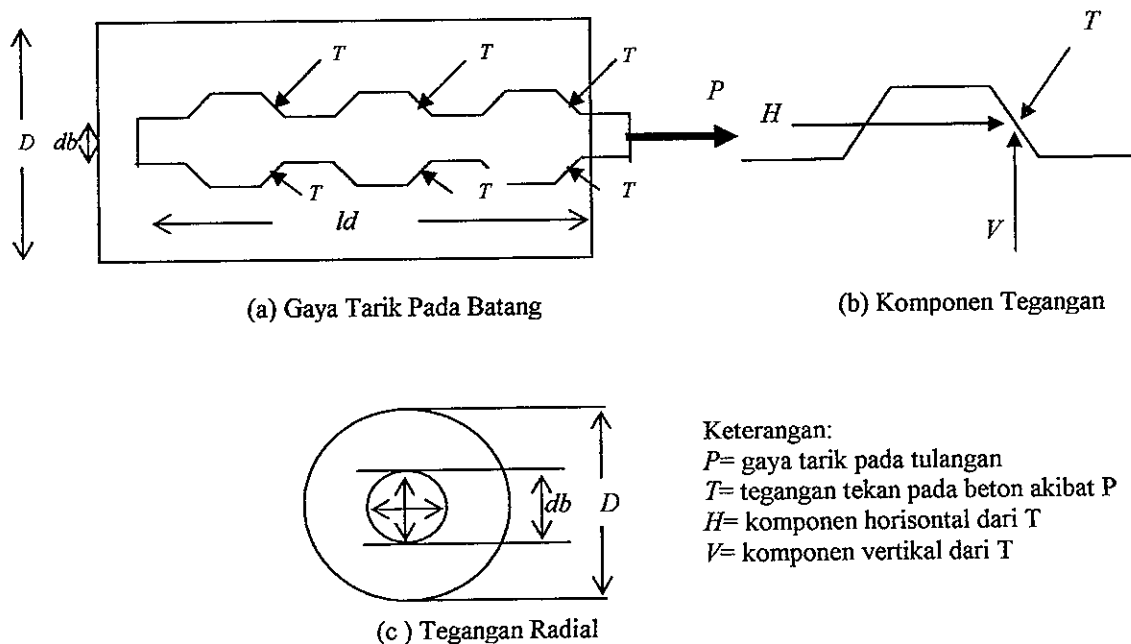
2.2.1. Lekatan Antara Beton dan Baja Tulangan Polos

Pada baja tulangan polos, lekatan antara beton dan baja dibentuk oleh adanya *adhesi*, *gripping* dan friksi. Pada awal pembebanan, ketiganya bekerja bersama-sama hingga tercapai kondisi beban maksimum.

Pada pembebanan dimana baja tulangan mencapai tegangan leleh, adhesi, *gripping* dan friksi dapat hilang secara cepat. Hal ini disebabkan karena pengecilan diameter tulangan akibat pengaruh *poisson's ratio*. Berdasarkan hal ini maka tulangan polos tidak direkomendasikan untuk digunakan pada bangunan-bangunan bertingkat atau besar lainnya.

2.2.2. Lekatan Antara Beton dan Baja Tulangan Ulir

Pada baja tulangan ulir, selain adhesi, *gripping* dan friksi, lekatan antara beton dan tulangan dibentuk pula oleh *interlocking*. *Interlocking* mempunyai peran terbesar antara matrik beton dan ulir tulangan, sedangkan faktor *adhesi*, *gripping* dan friksi hanya berperan pada awal pembebanan saja dan cepat hilang saat terjadi *slip*.



Gambar 2.2. Mekanisme Pemindahan Gaya Tegangan Lekat antara Beton dan Tulangan Ulir

Pelimpahan gaya tarik dari baja tulangan ke beton dilaksanakan oleh ulir tulangan. Pelimpahan tersebut mengakibatkan tegangan tekan pada beton bagian depan ulir tulangan dan bekerja tegak lurus terhadap bidang miring ulir tulangan seperti ditunjukkan Gambar 2.2.b. Mekanisme lekatan seperti ini disebut mekanisme *interlocking*.

Tegangan tekan tersebut dapat diuraikan menjadi 2 komponen yaitu :

1. Tegangan longitudinal, sejajar sumbu tulangan yang merupakan tegangan lekat efektif (H).
2. Tegangan radial, tegak lurus sumbu tulangan yang mengakibatkan desakan keliling dan menimbulkan tegangan tarik pada keliling selimut beton (V).

Apabila tegangan tarik keliling tersebut melampaui kapasitas tarik beton, maka akan menimbulkan retak radial yang berakibat terjadinya *splitting failure* pada beton.

Adanya retak radial dan *splitting* akan menurunkan kapasitas *interlocking* yang berarti menurunnya lekatan antara beton dan baja tulangan ulir. Terjadinya *splitting failure* ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

1. Jarak antara tulangan dan permukaan beton (selimut beton).
2. Jarak antara tulangan.
3. Tegangan tarik beton
4. Besarnya tegangan lekat rata-rata

SKSNI^[2] menentukan bahwa tegangan lekat antara beton dan baja tulangan bekerja merata sepanjang panjang penyaluran sebagai berikut:

$$l_d = \frac{0,02 \cdot A_b \cdot f_y}{\sqrt{f_c'}} \dots \dots \dots (2.5.)$$

Panjang penyaluran adalah panjang tulangan tertanam minimal yang diperlukan untuk menahan gaya dari baja tulangan hingga mencapai kondisi tegangan leleh.

Gaya yang dapat ditahan oleh lekatan sepanjang l_d adalah:

$$P = \bar{\mu}.ld.\pi.db \dots\dots\dots(2.6)$$

Kapasitas baja tulangan menerima gaya tarik adalah:

$$P = \frac{1}{4}.\pi.db^2.fy \dots\dots\dots(2.7)$$

Substitusi persamaan (2.6) ke dalam persamaan (2.7) didapat:

$$ld = \frac{db.fy}{4\bar{\mu}} \dots\dots\dots(2.8)$$

Tegangan lekat rata-rata menurut SKSNI diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) ke dalam persamaan(2.8) dan diperoleh:

$$\bar{\mu} = \frac{15,92.\sqrt{fc'}}{db} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dari persamaan (2.6) juga dapat diperoleh tegangan lekat rata-rata riil antara beton dan baja tulangan:

$$\bar{\mu} = \frac{P}{\pi.db.ld} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

ld = panjang penyaluran (mm)

Ab = luas penampang tulangan (mm²)

db = diameter tulangan (mm)

fy = tegangan leleh baja tulangan (MPa)

fc' =kuat tekan beton (MPa)

$\bar{\mu}$ = tegangan lekat antara beton dan baja tulangan ulir (MPa)

Menurut SKSNI tegangan lekat antara beton dan baja tulangan ulir berbanding lurus dengan akar kuadrat tekan beton dan berbanding terbalik dengan diameter baja tulangan

dan hanya dipengaruhi faktor *interlocking* saja sedang faktor *adhese*, *gripping* dan friksi diabaikan.

2.3. Pengaruh Lekatan Antara Beton dan Tulangan Terhadap Kekuatan Tarik Baja Tulangan

Adanya lekatan (*bond*) antara beton dan baja tulangan dapat mempengaruhi dan meningkatkan kekuatan tarik (*Tension Stiffening Effect*).

H. Abrishami et al^[5] merumuskan beberapa hal sebagai berikut:

$$\xi_{sm} = \frac{\sigma_s}{E_s} \left[1 - a_1 \cdot a_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \text{ tidak lebih kecil dari } 0,4 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$N = A_c f_c + A_s f_s \leq A_s f_y \dots\dots\dots(2.12)$$

$$f_c = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \xi_{cf}}} \text{ untuk } \xi_{cf} > \xi_{cr} \dots\dots\dots(2.13)$$

Persamaan (2.12) digunakan pada saat benda uji dalam stadium utuh yaitu dianalisa dengan cara elastis-linier sedangkan persamaan (2.11) dan (2.13) digunakan setelah benda uji mengalami retak (*cracking*), dimana:

- A_c = luas penampang beton (mm²)
- A_s = luas penampang baja tulangan (mm²)
- c = selimut beton (mm)
- db = diameter baja tulangan (mm)
- E_s = modulus elastisitas baja tulangan (MPa)
- f_c = tegangan beton (MPa)
- f_{cr} = tegangan tarik beton (MPa)

f_s = tegangan pada baja tulangan (MPa)

f_y = tegangan leleh pada baja tulangan (MPa)

ξ_{cr} = regangan pada beton akibat tegangan

ξ_{cr} = regangan pada beton pada saat retak

ξ_{sm} = regangan rata-rata pada baja tulangan

ξ_s = regangan pada baja tulangan

σ_s = tegangan baja tulangan pada saat retak (MPa)

σ_{sr} = tegangan baja tulangan pada saat retak yang berhubungan dengan beban retak (MPa)

α_1 = faktor karakteristik baja tulangan

= 1,0 untuk tulangan ulir

= 0,7 untuk tulangan polos

α_2 = faktor beban

= 1,0 untuk beban monotonic

= 0,7 untuk beban berulang

α_3 = faktor ratio selimut dan diameter baja tulangan

= 1,0 untuk $c/db > 2,50$

= $0,8 c/db - 1$ untuk $1,25 \leq c/db \leq 2,50$

= 0 untuk $c/db < 1,25$

α_1 = faktor karakteristik baja tulangan

= 1,0 untuk tulangan ulir

= 0,5 untuk tulangan polos

a_2 = faktor beban

= 1,0 untuk beban monotonik

= 0,5 untuk beban berulang

2.4. Keruntuhan Lekatan Antara Beton dan Tulangan

Keruntuhan lekatan antara beton dan tulangan yang terjadi pada saat pengujian, biasanya ditunjukkan oleh salah satu atau lebih dari kejadian berikut:

1. *Transverse Failure*

Ditunjukkan adanya retak pada beton arah melintang akibat tegangan tarik yang tidak dapat ditahan oleh selimut beton. Keruntuhan ini mengakibatkan menurunnya tegangan lekat antara beton dan baja tulangan

2. *Splitting Failure*

Ditunjukkan adanya retak pada beton arah memanjang akibat tegangan radial geser yang tidak dapat ditahan oleh selimut beton, keruntuhan ini juga mengakibatkan menurunnya tegangan lekat antara beton dan baja tulangan

3. *Pull Out Failure/ Slip*

Kondisi keruntuhan dimana baja tulangan tercabut dari beton tanpa mengalami retak yang diakibatkan komponen tegangan geser yang memecah lekatan antara beton dan baja tulangan.

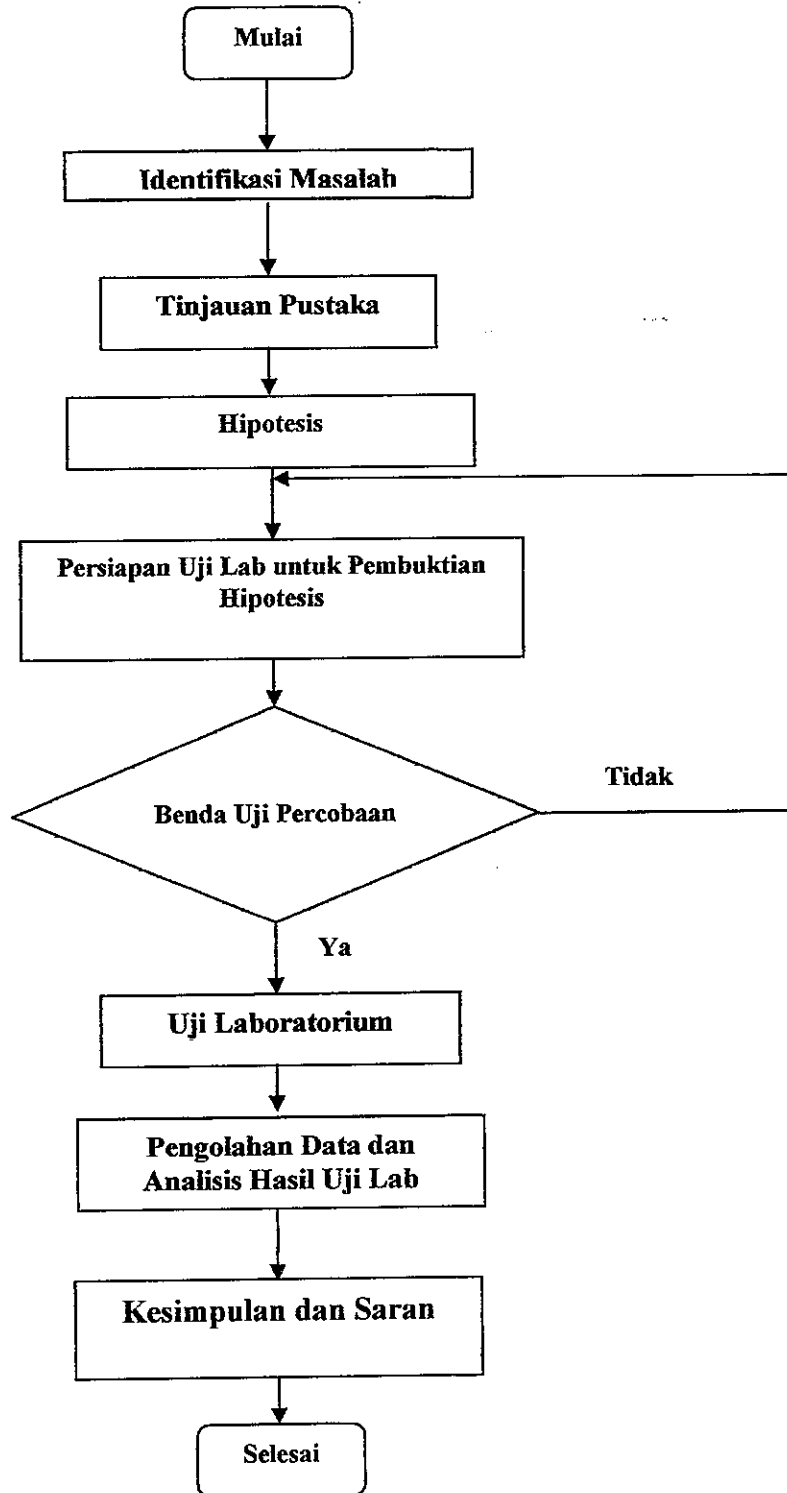
4. Baja Tulangan Mencapai Titik Leleh

Apabila baja tulangan meleleh diikuti oleh kontraksi (pengecilan diameter), yang dapat meninggalkan fungsi lekatnya terhadap beton yang mengelilinginya, sehingga berakibat hilang atau menurunnya daya lekat antara beton dan baja tulangan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tahapan Penelitian

Berikut adalah Bagan Alir Tahapan Penelitian yang dilakukan peneliti:

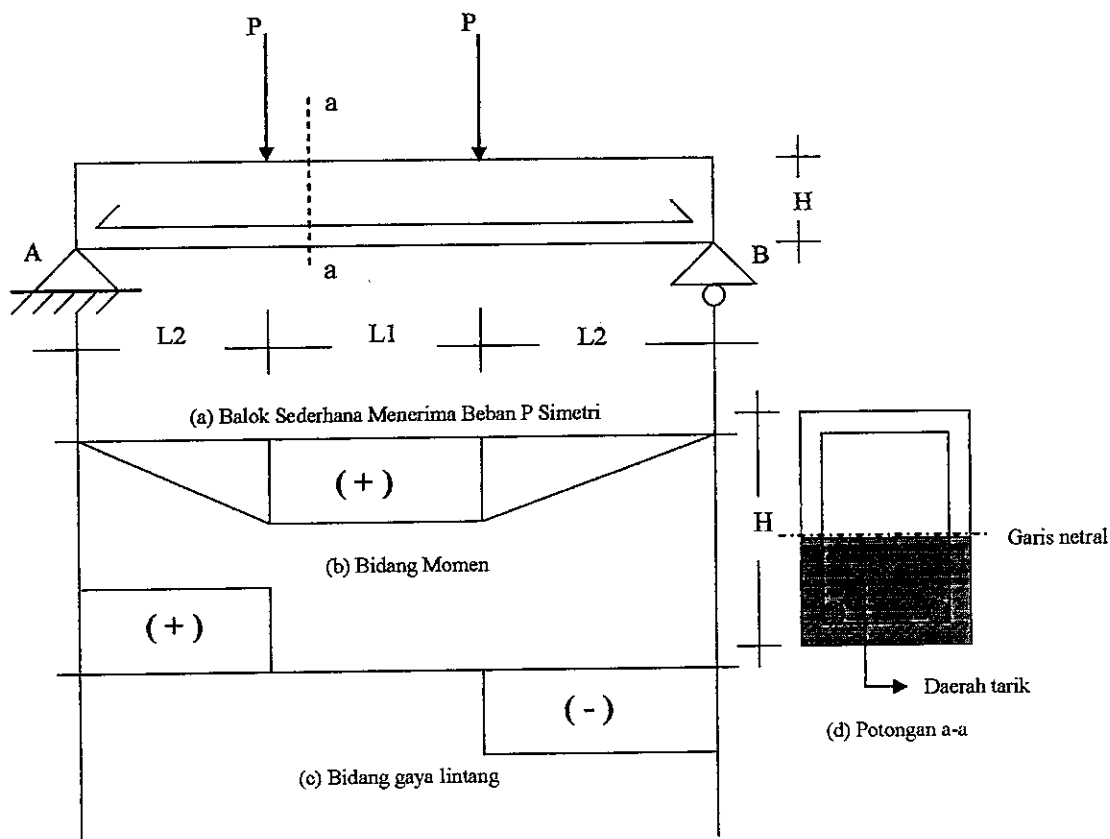


Gambar 3. 1. Bagan Alir Tahapan Penelitian

Metode Analisis penelitian ini (Lihat Gambar 3.1) secara umum dilakukan dengan kegiatan pengujian di Laboratorium terdiri dari 4 tahapan, yaitu:

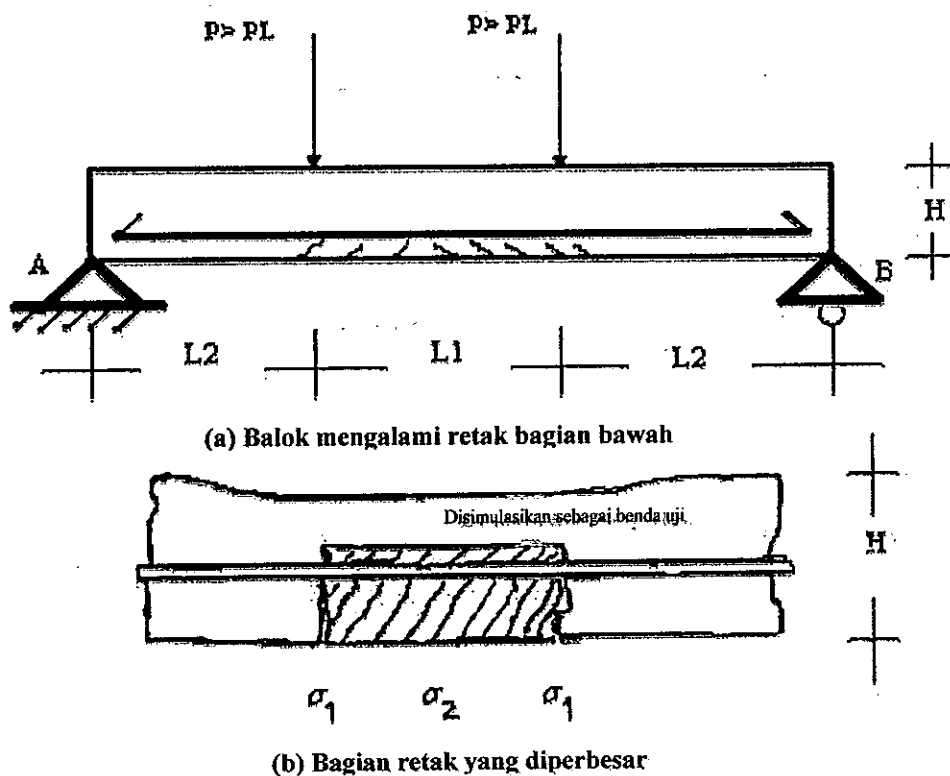
1. Persiapan teknis, meliputi : perencanaan *mix design*, pembuatan silinder beton dan *slump test*.
2. Persiapan bahan dasar, meliputi: pembuatan bekisting, pengadaan baja tulangan, pengadaan PC, pasir dan split/ batu pecah.
3. Pembuatan benda uji, meliputi: pengecoran *concrete tension spesimen*, pembuatan silinder beton, *slump test*.
4. Pengujian benda uji, meliputi : pengujian tarik *bare bar* dan *concrete tension spesimen*, pengujian tekan silinder beton dan pengamatan pola retak

3.2. Pemodelan Benda Uji



Gambar 3.2. Balok Beton Bertulang Sederhana dengan Beban Lentur Murni

Balok bertulang sederhana dengan beban terpasang seperti Gambar 3.2, pada bagian tengah bentang menahan beban lentur murni. Selama beban masih rendah, penampang balok dalam kondisi elastis-linier (stadium utuh). Akibat beban lentur tersebut penampang balok bagian bawah, termasuk baja tulangnya menderita tegangan tarik (Gambar 3.2. d). Apabila beban P terus ditambah sampai batas elastis linier terlampaui, maka perilaku penampang balok bagian bawah (selimut betonnya) akan mulai retak.



Gambar 3. 3. Balok Beton Bertulang Mengalami Retak Tarik

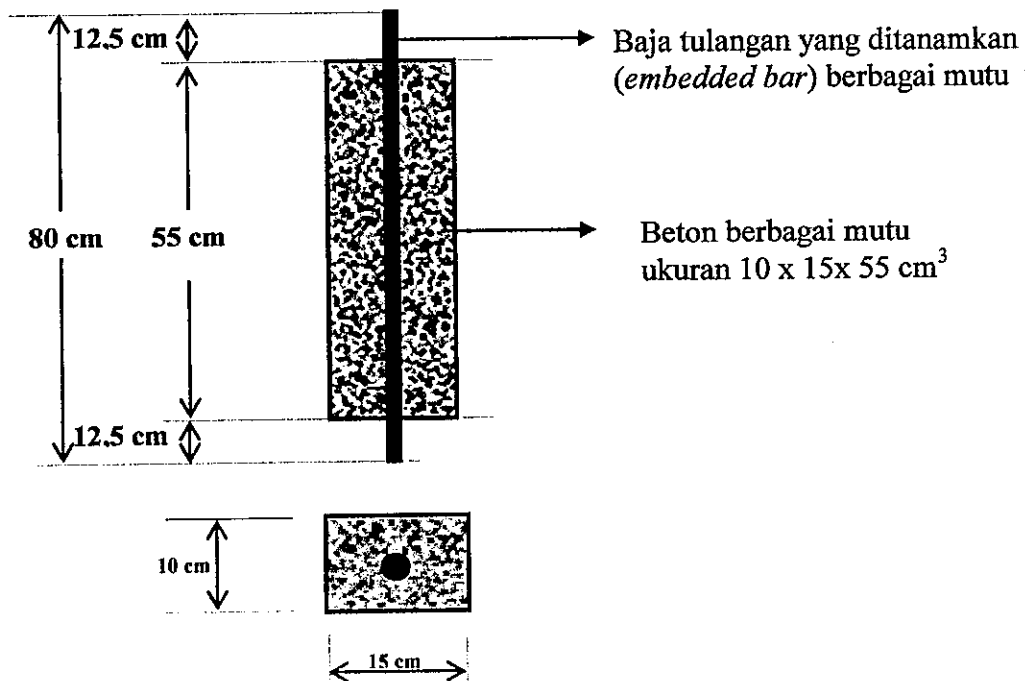
Hal tersebut terilustrasi seperti Gambar 3.3, yaitu apabila beban P terus ditingkatkan di atas beban leleh P_L , penampang beton bagian bawah akan mengalami retak, yang berakibat tegangan yang timbul pada baja tulangan menjadi tidak seragam, yaitu σ_1 lebih besar dari σ_2 . Bagian yang diarsir pada Gambar 3.3 b dijadikan model pada penelitian ini.

Pemilihan dimensi benda uji dalam penelitian ini direncanakan sedemikian rupa sehingga dapat menggambarkan kondisi yang realistis sesuai dengan maksud dan tujuan

penelitian. Untuk maksud tersebut, dimensi benda uji mempertimbangkan aspek-aspek sebagai berikut:

1. Selimut beton terkecil mendekati selimut beton pelaksanaan lapangan.
2. Cara pengujian sedemikian rupa sehingga beton di sekitar baja tulangan mengalami tegangan tarik.
3. Ukuran penampang benda uji sedemikian rupa sehingga keruntuhan yang terjadi diarahkan pada *transverse* dan *splitting failure* serta menghindari terjadinya *pull out failure* (slip) pada baja tulangan.
4. Dapat dilaksanakan dengan alat yang tersedia.

Berdasarkan pertimbangan di atas, dengan demikian benda uji dalam penelitian ini ditentukan berbentuk empat persegi panjang, dengan ukuran seperti disajikan pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4. Dimensi Benda Uji

3.3. Spesifikasi Material

3.3.1. Baja Tulangan

Untuk mengetahui spesifikasi teknis baja tulangan yang didapat dari pasaran, sebagai bahan penelitian dilakukan pengujian langsung laboratorium, meliputi:

a. Ukuran Geometrik

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan diameter pengenal baja tulangan secara tepat pada baja tulangan ulir maupun polos. PBI 1971^[1] menentukan bahwa untuk menghitung diameter pengenal baja tulangan ulir digunakan rumus sebagai berikut:

$$dp = 12,80\sqrt{g} \dots\dots\dots(3.1.)$$

dimana:

dp = diameter pengenal baja tulangan (mm)

g = berat batang tulangan per-meter (kg/m)

Untuk baja tulangan polos diukur langsung dengan menggunakan alat jangka sorong. Hasil pengujian geometrik diameter baja tulangan tercantum dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Hasil Pengujian Geometrik Baja Tulangan

Diameter Tulangan di Pasaran	Berat (kg/m)	Diameter Pengenal (mm)
D-10	0,5636	9,61
D-13	0,9383	12,40
D-16	1,5165	15,76
Ø11	-	11
Ø15	-	15
Ø19	-	19

Keterangan : Ø= Tulangan Polos, D= Tulangan Ulir , Sumber : Hasil Pengukuran

b. Kuat Tarik

Kapasitas Tarik baja tulangan yang sesungguhnya diperoleh dari pengujian tarik langsung laboratorium yang hasilnya digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini. Hasil pengujian tarik baja tulangan disajikan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3. 2. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan

Diameter Pengenal (mm)	Tegangan Leleh (MPa)
D-9,61	324,14
D-12,40	339,69
D-15,76	441,07
Ø11	378,99
Ø15	384,99
Ø19	275,24

Keterangan : Ø= Tulangan Polos, D= Tulangan Ulir , Sumber : Hasil Pengukuran

3.3.2. Bahan-Bahan Dasar Campuran Beton

a. Semen

Semen yang digunakan untuk penelitian ini adalah PC Nusantara berat isi 50 kg dengan berat jenis kondisi lapangan $3,1 \text{ ton/m}^3$

b. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah ukuran 1/2 , berasal dari daerah Puduk Payung Semarang. Dari analisa laboratorium diperoleh paramater bahan sebagai berikut:

1. Modulus Kehalusan Butir	6,232
2. Ukuran Agregat Maksimum	25,000 mm
3. Berat Volume Gembur	1,420 t/m^3
4. Kadar Air	0,600 %
5. Daya Serap Air	1,000 %

c. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan untuk penelitian ini adalah pasir alam berasal dari Muntilang-Magelang. Dari Analisa laboratorium diperoleh parameter bahan sebagai berikut:

Modulus Kehalusan Butir	2,840
2. Ukuran Agregat Maksimum	4,000 mm
3. Berat Volume Gembur	1,380 t/m ³
4. Kadar Air	3,800 %
5. Daya Serap Air	3,000%

3.3.3. Rancangan Komposisi Campuran Beton

Pada penelitian ini, rancangan komposisi campuran beton menggunakan mutu sebagaimana tercantum dalam Tabel 3.3.

Tabel 3. 3. Rancangan Komposisi Campuran Beton

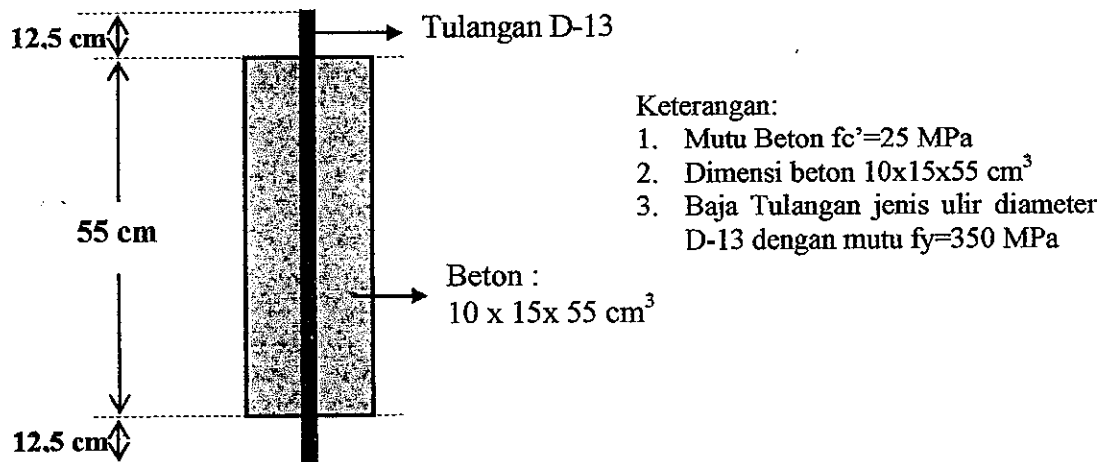
Mutu Dalam Kubus 15x15x15 cm ³	Perbandingan Volume	Mutu Dalam Silinder 15x 30 (MPa)
	Semen : Pasir : Batu Pecah	
K300	1,00 : 1,93 : 2,78	24,90
K450	1,00 : 1,43 : 2,06	37,35
K600	1,00 : 1,06 : 1,53	49,80

Sumber : Hasil Analisis Perhitungan

Perhitungan rancangan komposisi campuran beton (*mix design*) selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 3-1.

3.4. Prediksi Kekuatan Benda Uji

Sebelum benda-benda uji yang sebenarnya dibuat, terlebih dahulu dibuat benda uji percobaan dan dilakukan pengujian tarik untuk mendapatkan kepastian bahwa akan terjadi retak beton (*crack*) lebih dahulu sebelum peristiwa penggelinciran (*slip*) antara baja tulangan dan beton terjadi, sesuai maksud dan tujuan dari penelitian ini. Dimensi dan parameter benda uji percobaan seperti disajikan Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Dimensi Benda Uji Percobaan

Hasil analisis kekuatan benda uji percobaan selengkapnya disajikan pada Lampiran 3-2, dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada saat beban tarik mencapai 26394 N, beton sudah mengalami retak awal dengan menderita tegangan tarik (*normal stress*) sebesar 1,65 MPa.
2. Bersamaan dengan peristiwa nomor 1, tegangan lekat (*bond stress*) antara baja tulangan dan beton yang terjadi sebesar 2,35 MPa masih di bawah tegangan lekat (*bond stress*) yang dapat ditahannya, yaitu sebesar 6,12 MPa.
3. Dengan demikian diprediksi pada pengujian benda uji, permukaan beton akan retak (*crack*) lebih dahulu, sedangkan baja tulangannya masih terenggam erat oleh beton yang berarti proses penggelincirannya (*slip*) belum terjadi.

3. 5. Pembuatan Benda Uji

Informasi yang teliti dan lengkap dari suatu penelitian sangat tergantung pada ketelitian dan kelengkapan pembuatan benda uji yang akan digunakan. Oleh sebab itu pembuatan dan penyiapan benda uji harus dilakukan secara cermat dan hati-hati agar diperoleh benda uji yang baik sesuai dengan maksud dan tujuan penelitian.

3.5.1. Penyiapan Baja Tulangan

Baja Tulangan dalam penelitian ini diperoleh dengan membeli di pasaran. Jenis diameter, panjang dan jumlahnya seperti tercantum pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4. Baja Tulangan Untuk Benda Uji

No	Jenis Tulangan	Diameter (mm)	Panjang (cm)	Jumlah (Buah)
1	Deform/ Ulir	10	80	3
	Deform/Ulir	10	70	2
2	Deform/ Ulir	13	80	3
	Deform/Ulir	13	70	2
3	Deform/ Ulir	16	80	3
	Deform/Ulir	16	70	2
4	Plain/ Polos	11	80	1
	Plain/ Polos	11	70	1
5	Plain/ Polos	15	80	1
	Plain/ Polos	15	70	1
6	Plain/ Polos	19	80	1
	Plain/ Polos	19	70	1

Catatan : Baja tulangan yang dipilih dalam keadaan lurus, baru, bersih dan bebas karat.

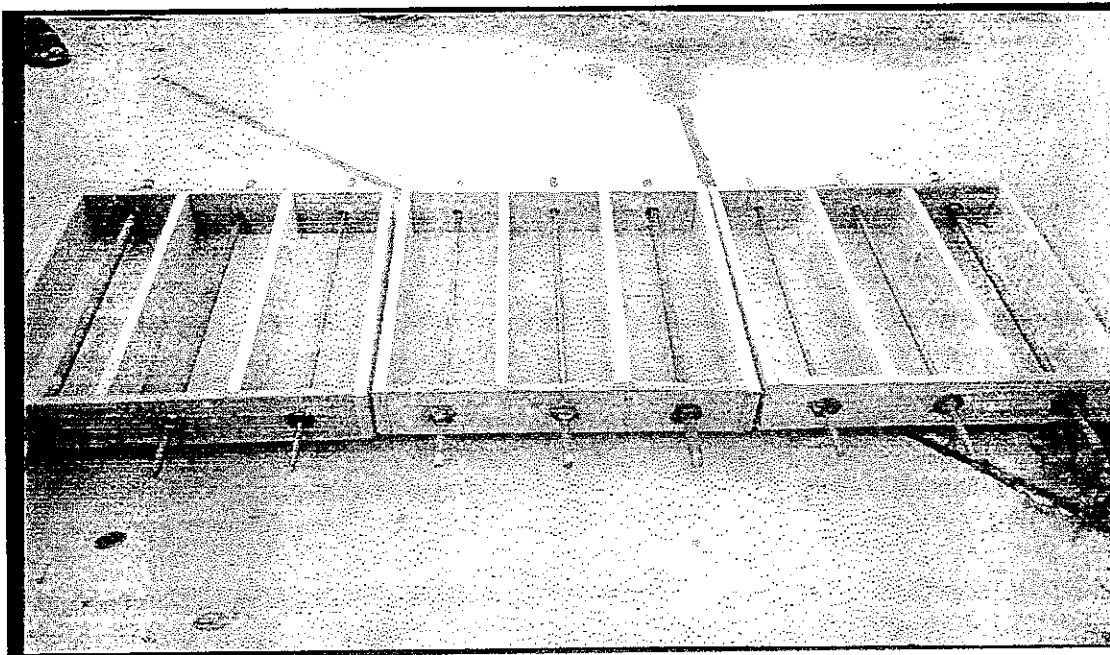
Sumber : Hasil Pengukuran

3.5.2. Pembuatan Cetakan (Bekisting)

Pembuatan cetakan harus kuat, tidak mudah berubah bentuk dan mudah dilepas agar pada saat bekisting dibongkar tidak mengakibatkan rusak atau cacat pada betonnya. Papan cetakan dibuat dari kayu kalimantan jenis meranti tebal 2 cm dengan dasar triplek tebal 4 mm, dibuat sebanyak 4 unit, masing-masing unit berisi 3 buah benda uji.

Cetakan-cetakan tersebut diletakkan di atas lantai rabat beton datar yang kuat untuk menjamin pada saat pengecoran dapat dilakukan pemadatan yang sempurna.

Baja Tulangan yang menembus papan cetakan disumbat dengan malam/lilin mainan agar posisi tulangan tidak berubah dan menghindari kemungkinan bocornya air semen pada waktu dilakukan pengecoran. Hasil pembuatan bekisting disajikan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Bekisting dan Tulangan Benda Uji

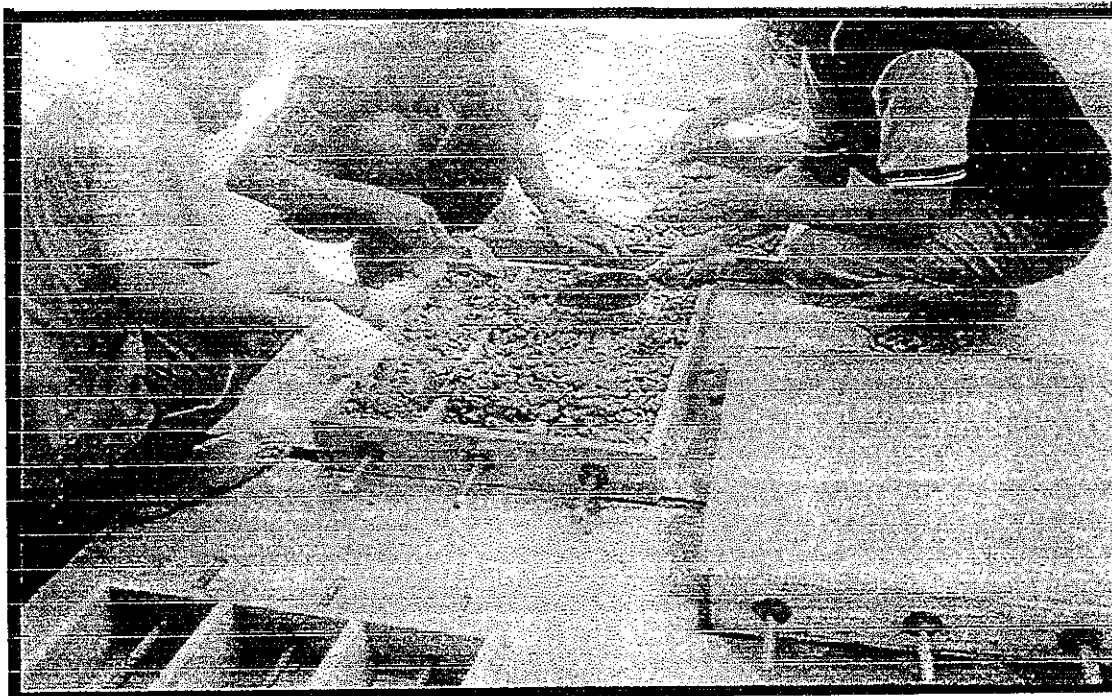
3.5.3. Pengecoran Beton

Sebelum dilakukan pengecoran beton, cetakan diperiksa dulu kebersihannya, letak baja tulangan diukur kembali agar benar-benar sentris, panjang tulangan di kanan-kiri bekisting (bagian luar) disamakan yaitu masing-masing 10,50 cm. Lilin mainan (malam) diperiksa kembali kerapatannya agar air semen beton tidak bocor keluar. Setelah semua siap, komposisi campuran yang didapat dari hasil *mix design* diaplikasikan pelaksanaannya dan

dituangkan ke dalam *mixer/molen* kapasitas 110 liter. Pencampuran dimulai dengan memasukkan agregat kasar, agregat halus, kemudian $\frac{2}{3}$ kebutuhan air ke dalam *mixer*, diaduk hingga kurang lebih selama 1 menit, selanjutnya semen dan sisa $\frac{1}{3}$ kebutuhan air dituangkan terakhir ke dalam *mixer*.

Proses pengadukan ini memakan waktu sekitar 5 sampai 10 menit. Sebelum beton dituangkan ke dalam cetakan yang telah tersedia, beton diperiksa dahulu nilai *slump*-nya yaitu antara 6 cm sampai 12 cm dan dibuatkan silinder beton untuk masing-masing mutu sebanyak 3 buah silinder beton. Kegiatan pengecoran benda uji disajikan pada Gambar 3.7.

Pembukaan cetakan beton dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari, sedangkan cetakan silinder beton dibuka setelah berumur minimal 3 hari.



Gambar 3.7. Kegiatan Pengecoran Benda Uji

3.5.4. Perawatan Beton Sebagai Benda Uji

Untuk menghindari penguapan air pada benda uji, maka benda-benda uji tersebut ditutup dengan karung basah sampai benda uji berumur 28 hari.

3.6. Pengujian Benda Uji

Ada 3 macam benda uji yang akan dilakukan pengujiannya pada penelitian ini, yaitu:

1. Batang tulangan dalam keadaan terbuka (*bare bar*) sebanyak 9 buah.
2. Silinder beton sebanyak 6 buah
3. Baja tulangan dalam keadaan tertanam di dalam beton (*embedded bar*) sebagai benda uji atau disebut *concrete tension specimen* sebanyak 12 buah.

Konsep tension stiffening diambil dari CEB-FIP Model Code yang dijadikan standar pengujian.

3.6.1. Pengujian Baja Tulangan Sebagai Bare Bar

Bare bar diuji dengan uji tarik menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) untuk memperoleh data pembebanan, termasuk pembebanan leleh pertama dan putus, serta perubahan panjang yang saling berkorelasi dengan penambahan bebannya. Sebelum pengujian tarik dilaksanakan, benda uji diukur panjang dan beratnya ditimbang.

3.6.2. Pengujian Silinder Beton

Silinder beton diuji dengan uji tekan yang menghasilkan kuat tekan beton. Pengujiannya menggunakan alat *Compression-Tension Test*, dilaksanakan sampai benda uji mengalami kehancuran. Sebelum pengujian tekan dilaksanakan, benda uji silinder beton masing-masing ditimbang beratnya.

3.6.3. Pengujian *Concrete Tension Specimen*

Benda uji ini diuji dengan uji tarik menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*) untuk memperoleh data pembebanan dan perubahan panjang yang saling berkorelasi dengan penambahan bebannya. Sebelum pengujian tarik, benda uji ditimbang serta pada keempat sisi permukaan betonnya dicat dengan warna putih agar mudah mengamati pola retak yang terjadi selama uji tarik berlangsung.

3.7. Pencatatan Data Hasil Pengujian

Selama pengujian benda uji berlangsung data-data yang dihasilkan oleh alat uji perlu dicatat dengan lengkap dan cermat agar hasil pengujian secara menyeluruh dapat dievaluasi dengan baik sesuai dengan maksud dan tujuan penelitian.

3.7.1. Pencatatan Data Pengujian Bare Bar

Pengujian ini dilakukan dengan cara memberi beban tarik pada benda uji dengan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Machine*). Data yang diperoleh dari pengujian ini berupa:

- a. Besaran beban dalam kN
- b. Perubahan panjang dalam mm

Keduanya saling berkorelasi. Peningkatan besar beban dapat dibaca langsung melalui jarum penunjuk besar beban yang dicapai. Sedangkan perubahan panjang benda uji dapat dibaca langsung pada mistar ukur yang ditempelkan pada rangka UTM. Selain diperoleh data hasil pengujian dengan cara membaca tersebut diperoleh pula gambar grafik hubungan antara beban dengan perpanjangan (P -delta) di atas kertas yang sebelumnya sudah dipasang berdampingan dengan layar baca pertambahan beban yang kerjanya berputar mengikuti gerakan tarikan benda uji.

3.7.2. Pencatatan Data Pengujian Silinder Beton

Silinder beton diuji tekan dengan menggunakan alat *Compression-Tension Test* yang hasilnya langsung dapat dibaca dan dicatat dengan melihat suatu angka maksimum bersamaan dengan hancurnya benda uji.

3.7.3. Pencatatan Data *Concrete Tension Specimen*

Benda uji ini diuji dengan cara uji tarik. Pengujiannya merupakan bagian terpenting dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui *tension stiffening* yang terjadi pada baja tulangan yang tertanam dalam beton apabila beban tarik sentris diperlakukan padanya.

Peralatan dan kelengkapan yang mendukung pengujian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat UTM (Gambar 3.8) adalah untuk melakukan beban tarik terhadap benda uji berupa kerangka mekanis yang dikendalikan secara elektrik-hidrolik.
2. Alat Ukur Pencatatan Beban UTM. Alat ini merupakan pusat operasional dan pengendali seluruh aktifitas UTM yang dilayani oleh seorang operator yang dapat membaca secara langsung data perubahan atau perkembangan beban yang terjadi. Data yang dapat dicatat dalam uji tarik penelitian ini antara lain:
 - a. Besar beban yang mengakibatkan terjadinya leleh pertama pada benda uji.
 - b. Besar beban yang mengakibatkan terjadinya putus pada benda uji.

Output data yang dihasilkan berupa pembacaan dan pencatatan secara manual. Kelemahan alat ukur ini adalah:

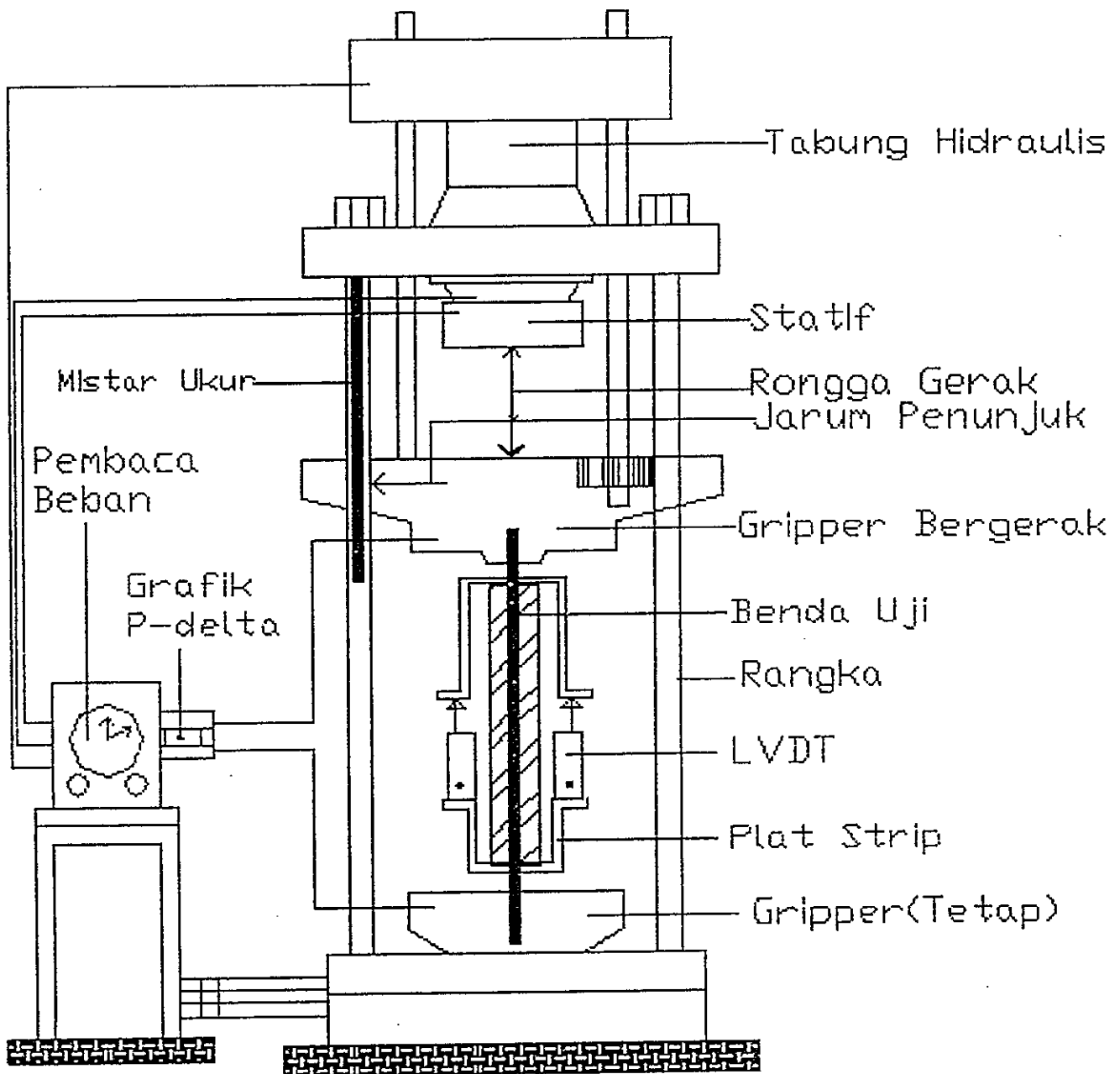
- a. Pada pembebanan awal, jarum penunjuk beban bergerak dengan cepat, sehingga pembacaan data pada periode ini sulit dilakukan.
- b. Selama pengujian berlangsung, alat tidak dapat dihentikan sehingga keinginan untuk melakukan pengamatan benda uji akibat besar beban tertentu tidak dapat dilaksanakan.

Namun demikian pada kejadian-kejadian penting seperti terjadinya titik leleh pertama dan titik putus bahan, jarum penunjuk besar beban dengan mudah masih dapat diikuti pembacaannya karena pada peristiwa tersebut jarum berjalan relatif lambat.

3. Alat Penggambar Grafik *P*-delta (Beban-Perpanjangan). Alat ini dipasang menyatu dengan alat ukur pencatatan beban. Alat ini menghasilkan grafik yang menggambarkan hubungan antara beban dan perpanjangan. Ordinat menunjukkan besar beban sedangkan absisnya menunjukkan besarnya perpanjangan yang terjadi. Mengingat *output* data yang dihasilkan sudah berupa grafik yang tergambar pada kertas yang

disediakan, maka tingkat keakuratannya menjadi lebih baik bila dibandingkan dengan data yang didapat dari hasil pembacaan alat ukur lain.

4. Mistar Penunjuk perubahan panjang, dipasang pada rangka tegak UTM. Akibat gerakan penjepit ujung benda uji (*gripp*) yang dilengkapi dengan jarum penunjuk dapat menunjuk ke mistar, mengikuti gerakan *gripp*. Angka pada mistar yang ditunjuk merupakan perubahan panjang yang dialami benda uji. Dengan demikian hasil datanya hanya dapat dibaca dan dicatat secara manual seperti LVDT.
5. LVDT (*Linear Variable Displacement Transducer*), yaitu alat ukur perubahan panjang yang hasil keluarannya dapat dibaca dan dicatat secara manual. Di dalam penelitian ini pembacaan data LVDT kurang akurat dan hanya bersifat sebagai pelengkap dan pembanding dari data yang didapat oleh alat ukur yang lain



Gambar 3.8. Set Up Alat Pengujian, UTM

BAB IV
PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

4.1. Analisa dan Hasil Pengujian Bare Bar

Sebelum dilakukan uji tarik baja tulangan terbuka (*bare bar*), terlebih dahulu diadakan analisa meliputi : pengukuran diameter, luas penampang, panjang benda uji, kemudian dilakukan uji tarik.

Dengan menganggap bahwa penampang baja tulangan konstan (tidak terpengaruh oleh *poisson ratio*) pada saat pembebanan, maka dengan hasil pengukuran uji tarik dapat dihitung modulus elastisitas baja tulangan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E_s = \frac{f_y}{\xi_y} = \frac{P_y}{A_s} \cdot \frac{L}{\Delta L} \dots\dots\dots(4.1.)$$

Dimana:

E_s = Modulus elastisitas baja tulangan (MPa)

f_y = Tegangan baja pada saat terjadi leleh pertama (MPa)

ξ_y = Regangan baja pada saat leleh pertama = $\frac{\Delta L}{L}$

P_y = Besar beban tarik yang mengakibatkan baja tulangan mengalami leleh pertama (N)

A_s = Luas penampang baja tulangan (mm²)

L = Panjang awal baja tulangan (cm)

ΔL = Pertambahan panjang sampai saat baja tulangan mengalami leleh pertama (cm)

Hasil analisa dan pengujian tarik *bare bare* dapat diperiksa di Tabel 4.1.

Tabel 4. 1. Hasil Analisa dan Uji Tarik Bare Bar

Diameter (mm)		Luas Penampang As (mm ²)	Panjang Awal L (cm)	Beban Tarik (kN)		fy (MPa)	Modulus Elastisitas, Es (MPa)
Notasi	Terukur			Leleh	Putus		
D-10	9,61	72,50	39,00	23,50	31,00	324,14	198.581
D-13	12,40	120,70	39,50	41,00	58,00	339,69	197.880
D-16	15,76	194,98	38,75	86,00	128,00	441,07	199.065
Ø11	11	94,99	39,80	36,00	49,00	378,99	196.763
Ø15	15	176,63	40,00	68,00	98,00	384,99	197.342
Ø19	19	283,39	49,70	78,00	118,00	275,24	195.420

Sumber: Hasil Uji Lab dan Perhitungan

Output data hasil uji tarik *bare bare* disajikan secara lengkap pada Lampiran 4-1.

4.2. Analisa dan Hasil Pengujian Silinder Beton

Sebelum dilakukan uji tekan terhadap silinder beton terlebih dahulu benda uji ditimbang. Pengujian dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari. Dari hasil uji tekan dapat diketahui kuat tekan beton yang disyaratkan f_c' dan selanjutnya dapat dihitung pula Modulus Elastisitas beton dengan menggunakan rumus SKSNI ^[2] sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(4.2)$$

Dimana:

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

f_c' = Kuat tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari (MPa)

Hasil analisa dan uji tekan silinder beton disajikan pada Tabel 4.2, sedangkan data hasil uji tekan silinder beton secara lengkap disajikan pada Lampiran 4-2.

Tabel 4. 2. Hasil Analisa Dan Uji Tekan Silinder Beton

No.	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (gram)	Kuat Tekan umur 33 hari (MPa)	Kuat Tekan Silinder 28 hari (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata Silinder 28 hari (MPa)	Modulus Elastisitas Beton Ec (MPa)
1	fc 30	33	12.950	28,87	27,87	24,23	23.135
2	fc 30	33	13.500	19,82	19,13		
3	fc 30	33	12.900	26,61	25,69		
4	fc 45	33	12.820	32,84	31,70	34,98	27.798
5	fc 45	33	13.000	36,80	35,52		
6	fc 45	33	12.970	39,07	37,71		
7	fc 60	33	12.950	50,96	49,18	44,27	31.272
8	fc 60	33	13.200	40,20	38,80		
9	fc 60	33	13.850	46,43	44,81		

Sumber : Hasil uji Lab dan Perhitungan

4.3. Analisa dan Hasil Pengujian *Concrete Tension Specimen*

Sebelum dilakukan uji tarik, benda uji ini terlebih dahulu diadakan analisa penampang, meliputi diameter baja tulangan, dimensi penampang beton, perhitungan angka ekuivalensi (n), mengingat benda uji ini merupakan bahan komposit yang dibentuk oleh beton dan baja tulangan (beton bertulang). Hasil analisa baja dan beton benda uji disajikan pada Tabel 4.3. Sedangkan hasil pengujian tarik benda uji disajikan pada Tabel 4.4. Hasil uji tarik *concrete tension specimen* disajikan secara lengkap pada Lampiran 4-3..

Tabel 4.3. Hasil Analisa Penampang Concrete Tension Specimen

No.	Kode Benda Uji	fc' (MPa)	fy (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)		$n = \frac{E_s}{E_c}$	Dimensi Penampang		Luas Penampang				Ratio Tulangan $\rho = \frac{A_s}{A_c}$
				Es	Ec		Beton (bruto) b x h (mm ²)	Diameter Tulangan (mm)	Beton (neto), Ac (mm ²)	Baja Tulangan As (mm ²)	As komposit $A_s + \frac{A_c}{n}$ (mm ²)	Ac Komposit $nA_s + A_c$ (mm ²)	
1	A10	24,23	324,14	198581	23.135	8,58	100X150	9,61	14.927,50	72,50	1.812,30	15.549,55	0,00486
2	A13	24,23	339,69	197880	23.135	8,55	100X150	12,40	14.879,30	120,70	1.860,97	15.911,29	0,00811
3	A16	24,23	441,07	199065	23.135	8,60	100X150	15,76	14.805,02	194,98	1.916,49	16.481,85	0,01317
4	B10	34,98	324,14	198581	27.798	7,14	100X150	9,61	14.927,50	72,50	2.163,19	15.445,15	0,00486
5	B13	34,98	339,69	197880	27.798	7,12	100X150	12,40	14.879,30	120,70	2.210,49	15.738,68	0,00811
6	B16	34,98	441,07	199065	27.798	7,16	100X150	15,76	14.805,02	194,98	2.262,72	16.201,08	0,01317
7	C10	44,27	324,14	198581	31.272	6,35	100X150	9,61	14.927,50	72,50	2.423,29	15.387,88	0,00486
8	C13	44,27	339,69	197880	31.272	6,33	100X150	12,40	14.879,30	120,70	2.471,30	15.643,33	0,00811
9	C16	44,27	441,07	199065	31.272	6,36	100X150	15,76	14.805,02	194,98	2.522,81	16.045,09	0,01317
10	TP 11	24,23	378,99	196763	23.135	8,50	100X150	11,00	14.905,01	94,99	1.848,52	15.712,43	0,00637
11	TP 15	24,23	384,99	197342	23.135	8,53	100X150	15,00	14.823,37	176,63	1.914,42	16.330,02	0,01192
12	TP 19	24,23	275,24	195420	23.135	8,45	100X150	19,00	14.716,61	283,29	2.024,90	17.110,41	0,01925

Sumber: Hasil Uji Lab dan Perhitungan

Tabel 4.4. Hasil Uji Tarik Concrete Tension Specimen Dan Pola Retak Betonnya

No.	Kode Benda Uji	Mutu Bahan		Ratio Tulangan $\rho = \frac{A_s}{A_c}$	$\frac{C}{d_p}$	Beban Tarik (kN)		Perpanjangan (cm)	Pola Retak	Spacing Retak Maksimum (mm)
		fc' (MPa)	fy (MPa)			Leleh	Putus			
1	A10	24,23	324,14	0,00486	4,70	21	28	5,30	U	-
2	A13	24,23	339,69	0,00811	3,53	41	58	10,20	T	50
3	A16	24,23	441,07	0,01317	2,67	96	130	9,40	T+S+G	25
4	B10	34,98	324,14	0,00486	4,70	21	28	0,60	U	-
5	B13	34,98	339,69	0,00811	3,53	42	58	10,90	T	60
6	B16	34,98	441,07	0,01317	2,67	96	129	9,00	T+S+G	Sulit diukur
7	C10	44,27	324,14	0,00486	4,70	24	31	2,50	U+T	30
8	C13	44,27	339,69	0,00811	3,53	44	59	10,00	T+S+G	30
9	C16	44,27	441,07	0,01317	2,67	96	129	8,70	T+S+G	20
10	TP 11	24,23	378,99	0,00637	4,05	37	49	11,90	U	-
11	TP 15	24,23	384,99	0,01192	2,83	67	98	12,30	U	-
12	TP 19	24,23	275,24	0,01925	2,13	81	118	14,00	U	-

Keterangan: U= Dalam keadaan masih utuh, baja tulangan putus di luar, T= Transverse Cracks, S= Splitting Cracks, G= Terjadi Penggelinciran (Slip).

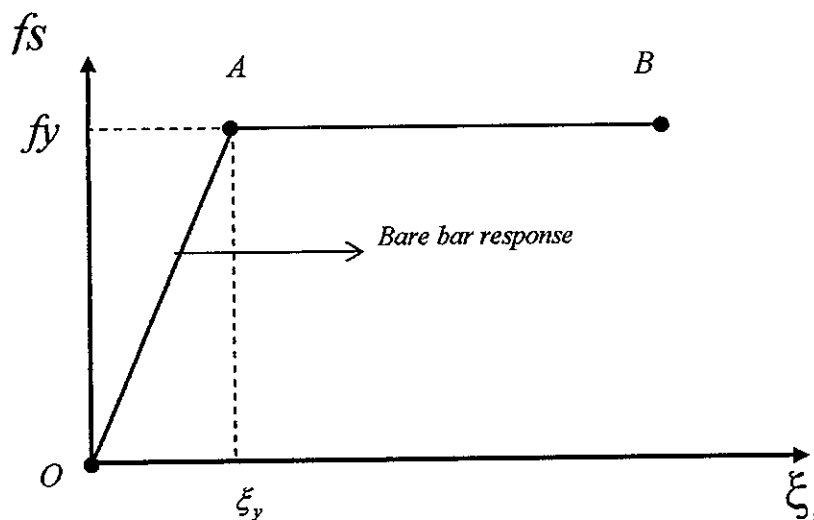
Sumber: Hasil Uji Lab dan Perhitungan

4.4. Pembahasan Hasil Pengujian Benda Uji

4.4.1. Pembahasan Hasil Pengujian *Bare Bar*

Sebelum benda uji *bare bar* diuji tarik, data-data yang berkaitan dengan dimensi dicatat seteliti mungkin. Data-data ini diperlukan untuk menganalisa lebih lanjut data-data yang dihasilkan oleh pengujian tarik *bare bar*, sehingga maksud dan tujuan yang diinginkan pada penelitian ini dapat tercapai dengan baik. Data-data penting dari pengujian tarik ini yang perlu dicatat untuk dievaluasi adalah: besar beban pada saat terjadi leleh pertama, besar beban yang mengakibatkan benda uji putus serta perubahan panjang benda uji selama pengujian berlangsung.

Agar perilaku baja tulangan (*bare bar response*) dapat diikuti dan dibaca dengan mudah, maka dari data-data hasil pengujian dapat dibuat grafik seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Prototipe Diagram $f-\xi$ Dari *Bare Bar* Yang Telah Di-idealisasi

Gambar Grafik *Stress-Strain* (Gambar 4.1.) diperoleh dengan cara sebagai berikut:

1. Dari hasil pengujian tarik *bare bar*, diperoleh data besar beban N yang berkorelasi dengan besar perubahan panjang ΔL_s
2. Dari data awal benda uji telah diketahui diameter pengenal d_p , sehingga luas penampangnya A_s dapat diketahui pula. Demikian pula panjang awal L benda uji sebelum dilakukan uji tarik telah diukur panjangnya.

3. Dari uraian di atas kemudian besar f_s dan ξ_s dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$f_s = \frac{N_s}{A_s} \dots\dots\dots (4.3.)$$

$$\xi_s = \frac{\Delta L_s}{L} \dots\dots\dots (4.4.)$$

Dimana:

f_s = Tegangan tarik yang terjadi di dalam baja tulangan (MPa)

N_s = Beban tarik yang diperoleh dari hasil pengujian pada tahapan beban tertentu (N)

A_s = Luas penampang baja tulangan sebelum benda uji ditarik (mm²)

ξ_s = Regangan baja tulangan yang terjadi pada tahapan beban yang ditinjau

ΔL_s = Perpanjangan yang terjadi pada tahapan beban yang ditinjau (cm)

L = Panjang benda uji mula-mula sebelum pengujian dilangsungkan (cm)

4. Besaran f_y dan ξ_y diperoleh dengan rumus yang sama, yaitu pada saat benda uji baja tulangan mengalami leleh pertama dengan menggantikannya ke dalam rumus f_s dengan f_y , N_s dengan N_y , ξ_s dengan ξ_y dan ΔL_s dengan ΔL_y , dimana:

f_y = Tegangan tarik yang terjadi di dalam baja tulangan saat kondisi leleh pertama terjadi (MPa)

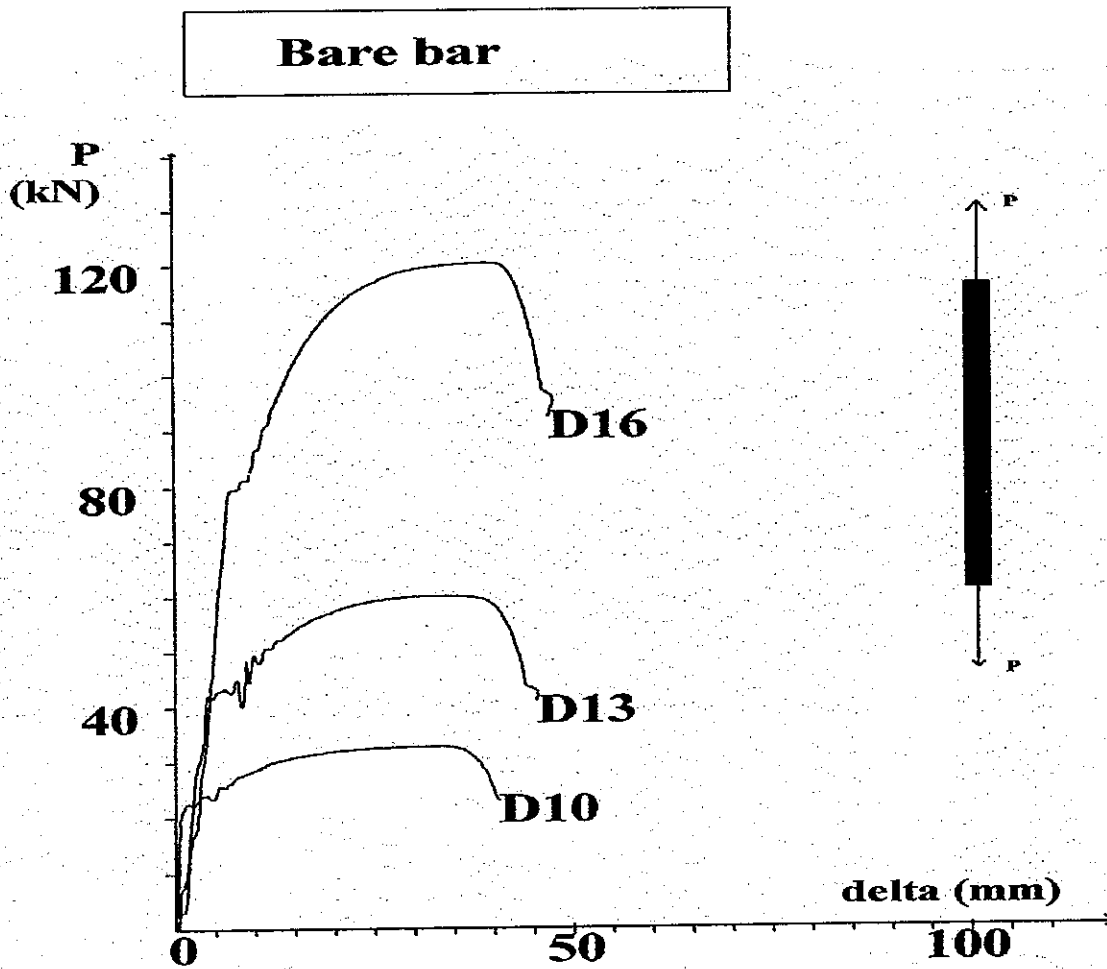
N_y = Beban tarik yang menyebabkan terjadinya leleh pertama (N)

ξ_y = Regangan yang terjadi pada saat baja tulangan mengalami leleh pertama

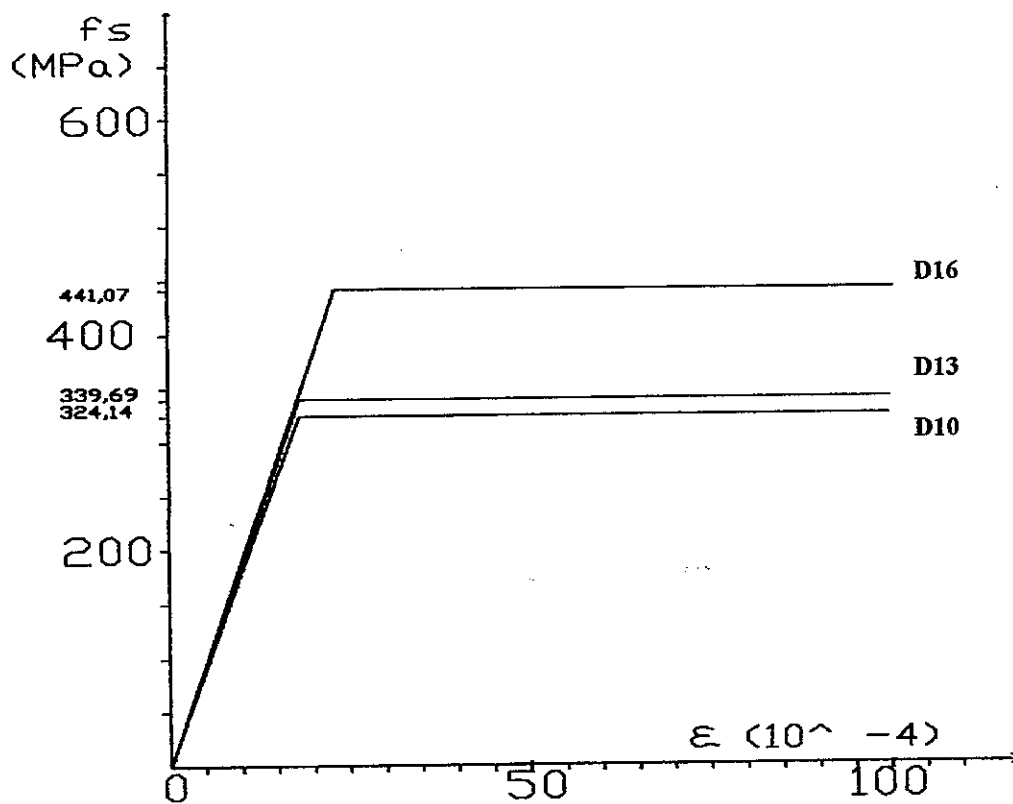
ΔL_y = Perpanjangan pada saat leleh pertama (cm)

Garis O-A pada Gambar 4.1. merupakan garis lurus yang bersifat elastis linier dimana Hukum Hooke berlaku, sedangkan garis A-B merupakan daerah plastis, dan pada daerah ini Hukum Hooke sudah tidak berlaku lagi. Ruang lingkup penelitian ini untuk *bare bar* peninjauannya dibatasi pada daerah elastis linier, sehingga evaluasi perhitungan sepenuhnya menggunakan Hukum Hooke. Atas dasar hal tersebut penggambaran grafik daerah plastis di-idealisasi menjadi garis lurus mendatar A-B.

Kurva hubungan antara beban dan perpanjangan yang diperoleh dari hasil pengujian tarik *bare bar* disajikan pada Gambar 4.2. Sedangkan Kurva hubungan tegangan dan regangan yang didapat dari Gambar 4.2. setelah dilakukan analisis dengan persamaan 4.3 dan 4.4 untuk tiap mutu bahan dan dia meter baja tulangan disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.2. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk *Bare Bar* Ulir



Gambar 4.3. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan untuk *Bare Bar* Baja Ulir

4.4.2. Pembahasan Hasil Pengujian Silinder Beton

Sebelum melaksanakan pembuatan benda uji silinder beton, pada awal penelitian telah dirancang untuk 3 mutu beton masing-masing $f_c' = 25$ MPa, $f_c' = 40$ MPa dan $f_c' = 50$ MPa. Supaya mutu beton tercapai di Laboratorium Bahan dan Konstruksi dibuat rancangan komposisi campuran beton (*mix design*) dengan hasil perbandingan volume bahan untuk masing-masing mutu beton sebagai berikut:

1. Mutu $f_c' = 25$ MPa dengan komposisi 1 PC: 1,93 Ps : 2,78 Split
2. Mutu $f_c' = 40$ MPa dengan komposisi 1 PC: 1,43 Ps : 2,06 Split
3. Mutu $f_c' = 50$ MPa dengan komposisi 1 PC: 1,06 Ps : 1,53 Split

Setelah mutu beton rancangan dengan komposisi campuran bahannya diperoleh dan dijadikan acuan dalam pembuatan benda uji, maka dibuatlah benda-benda uji sesuai acuan tersebut. Bersamaan dengan pembuatan benda uji tersebut, dibuat pula silinder-silinder

beton yang juga akan diuji kekuatannya. Mutu beton yang diperoleh dari silinder beton menggambarkan mutu beton yang berada di benda uji. Berdasarkan hal tersebut, benda uji dan silinder beton dibuat dan diuji pada waktu atau hari yang bersamaan yaitu setelah beton berumur minimal 28 hari.

Mutu beton riil yang dipakai untuk analisis penelitian tercantum pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5. Mutu Beton Riil Untuk Penelitian

No.	Kode	Mutu Beton Riil Silinder f_c' (MPa)
1	A	24,23
2	B	34,98
3	C	44,27

Sumber: Hasil Uji Lab

Dengan demikian untuk keperluan analisis dari data-data hasil pengujian benda uji di dalam penelitian ini, digunakan mutu beton riil yang diperoleh dari hasil uji tekan silinder-silinder beton tersebut. Rancangan mutu beton dan mutu riil yang diperoleh dari uji tekan beton masing-masing secara lengkap disajikan pada Lampiran 4.2

4.4.3. Pembahasan Hasil Pengujian *Concrete Tension Specimen*

Selama pengujian tarik berlangsung, dua kejadian penting dapat dicatat, yaitu:

1. Keadaan dimana beban tarik mulai bekerja sampai peristiwa leleh pertama terjadi pada benda uji. Kejadian ini menunjukkan bahwa benda uji dalam keadaan masih utuh, diagram yang dihasilkan berjalan lurus (linier). Dengan demikian material masih bersifat elastis sempurna sehingga benda uji dapat diberlakukan Hukum Hooke. Apabila σ_{sr} merupakan batas atas daerah elastis linier, maka berlaku rumus:

$$\sigma_{sr} = \frac{Nr}{As + \frac{Ab}{n}} = \frac{Nr}{As_{komp}} \dots\dots\dots(4.5)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{Nr}{nAs + Ab} = \frac{Nr}{Ac_{komp}} \dots\dots\dots(4.6)$$

dimana:

σ_{sr} = Tegangan di dalam baja tulangan yang berhubungan dengan besar beban yang menyebabkan retak pertama (MPa)

σ_{cr} = Tegangan tarik beton pada saat akan retak (MPa)

Nr = Beban tarik yang menyebabkan terjadinya retak pertama (N)

As = Luas penampang baja tulangan (mm²)

Ab = Luas penampang beton (mm²)

$$n = \text{angka ekivalensi} = \frac{Es}{Ec}$$

Es = Modulus elastisitas baja tulangan (MPa)

Ec = Modulus elastisitas beton (MPa)

As_{komp} = Luas baja tulangan dikonversi dengan material komposit (mm²)

Ac_{komp} = Luas beton dikonversi dengan material komposit (mm²)

Menurut *Homayoun H. Abrishami dan Denis Mitchell* ^[5], nilai σ_{cr} diprediksi sebesar $0,33\sqrt{f'c}$, sedang menurut *Istimawan Dipohusodo* ^[4] menentukan sebesar $0,57\sqrt{f'c}$. Hasil analisis dalam penelitian harga σ_{sr} dan σ_{cr} tercantum pada Tabel 4.6.

2. Keadaan dimana beban tarik bekerja dan menyebabkan benda uji meleleh pertama sampai menjadikan benda uji terputus. Keadaan ini ditandai dengan diagram hasil pengujian berbentuk garis lengkung yang menunjukkan bahwa material sudah

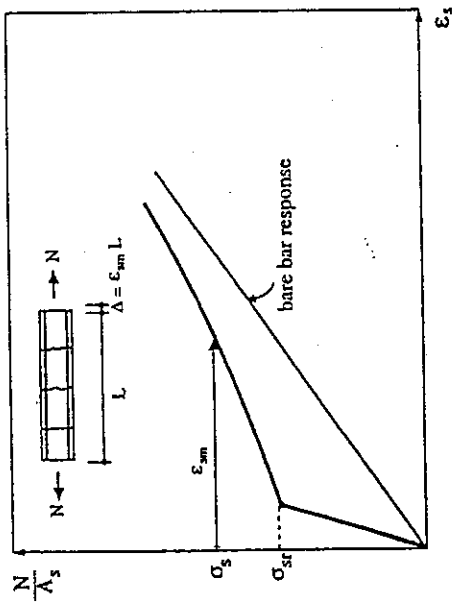
bersifat plastis maka Hukum Hooke sudah tidak berlaku lagi di daerah ini. Oleh karena itu benda uji perlu dianalisis dengan rumus lain.

Tabel 4.7 mencantumkan prosentase kenaikan tension stiffening untuk berbagai rasio tulangan dan mutu beton. Nilai N_c dihitung berdasarkan rumus (2.13) dikalikan luas netto penampang beton.

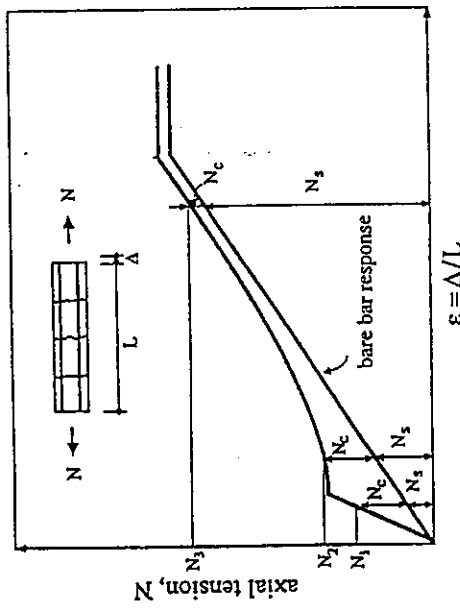
Tabel 4. 6. Nilai σ_{sr} Dan σ_{cr} Dari Berbagai Analisa

No.	Kode Benda Uji	Mutu Beton f_c' (MPa)	Ratio Tulangan, ρ	Luas Komposit		Beban Leleh Nr (kN)	$\sigma_{sr} = \frac{Nr}{A_s_{comp}}$ (MPa)	σ_{cr}		
				As (mm ²)	Ac (mm ²)			$\frac{Nr}{AC_{comp}}$ (MPa)	Istimawan D $0,57\sqrt{f_c'}$ (MPa)	Abrishami $0,33\sqrt{f_c'}$ (MPa)
1	A10	24,23	0,00486	1.812,30	15.549,55	21	11,59	1,35	2,81	1,62
2	A13	24,23	0,00811	1.860,97	15.911,29	41	22,03	2,58	2,81	1,62
3	A16	24,23	0,01317	1.916,49	16.481,85	96	50,09	5,82	2,81	1,62
4	B10	34,98	0,00486	2.163,19	15.445,15	21	9,71	1,36	3,37	1,95
5	B13	34,98	0,00811	2.210,49	15.738,68	42	19,00	2,67	3,37	1,95
6	B16	34,98	0,01317	2.262,72	16.201,08	96	42,43	5,93	3,37	1,95
7	C10	44,27	0,00486	2.423,29	15.387,88	24	9,90	1,56	3,79	2,20
8	C13	44,27	0,00811	2.471,30	15.643,33	43	17,40	2,75	3,79	2,20
9	C16	44,27	0,01317	2.522,81	16.045,09	96	38,05	5,98	3,79	2,20
10	TP11	24,23	0,00637	1.848,52	15.712,43	37	20,02	2,35	2,81	1,62
11	TP15	24,23	0,01192	1.914,42	16.330,02	67	35,00	4,10	2,81	1,62
12	TP19	24,23	0,01925	2.024,90	17.110,41	81	40,00	4,73	2,81	1,62

Sumber : Hasil Uji Lab dan Perhitungan



(a)



(b)

Fig. 2—Influence of tension in concrete on load-deformation response: (a) concept of tension stiffening, adapted from CEB-FIP Model Code; (b) concept of tension stiffening, adapted from Collins and Mitchell⁹

Tabel 4. 7. Prosentase Kenaikan Tension Stiffening Bare Bar

NO	Kode Benda Uji	f _c ' (MPa)	Tulangan		Beban (kN)		Ts (%)	Keterangan
			Ratio (ρ)	Jenis	Ns	Nc		
1	A10	24,23	0,00486	D	23,50	-	-	Tulangan Putus di luar
2	A13	24,23	0,00811	D	41,00	12,50	30,50	
3	A16	24,23	0,01317	D	86,00	11,70	13,60	
4	B10	34,98	0,00486	D	23,50	-	-	Tulangan Putus di luar
5	B13	34,98	0,00811	D	41,00	15,20	37,07	
6	B16	34,98	0,01317	D	86,00	14,06	16,35	
7	C10	44,27	0,00486	D	23,50	-	-	Tulangan Putus di luar
8	C13	44,27	0,00811	D	41,00	17,11	41,73	
9	C16	44,27	0,01317	D	86,00	15,84	18,42	

Keterangan:
 D= Deformulir
 N_s= Beban leleh Bare bare
 N_c= Beban diterima beton kondisi retak = f_c x A_c net
 $\% = \frac{N_c}{N_s} \times 100\%$
 Ts = Tension stiffening

Sumber : Hasil Uji Lab dan Perhitungan

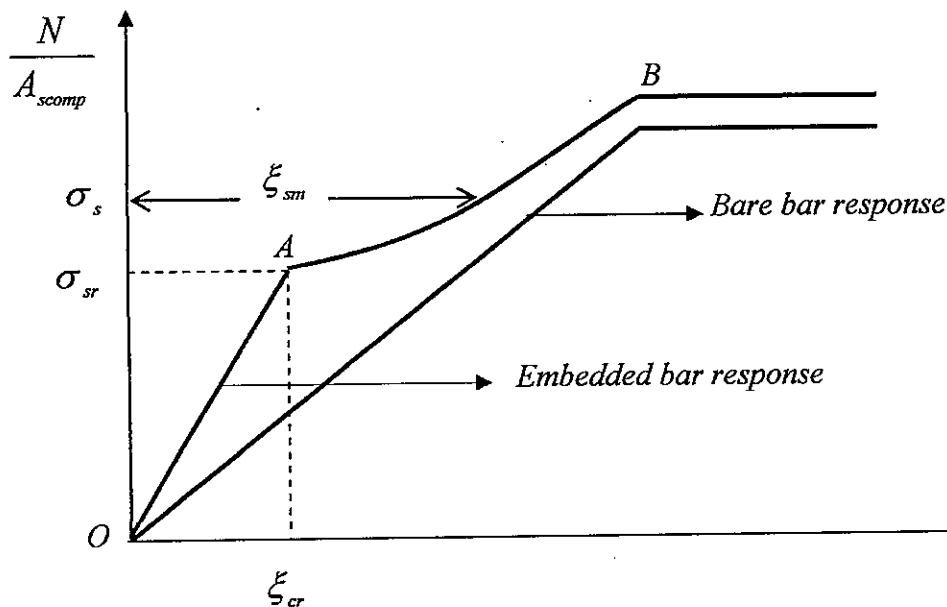
Cara Menghitung N_c dan T_s disajikan pada Lampiran 4.4

Rumus yang digunakan untuk keperluan analisa perilaku *embedded bar* daerah plastis adalah persamaan 2.11 dan persamaan 2.13, menurut *Abrishami* dan *Mitchell*:

$$1. \xi_{sm} = \frac{\sigma_s}{Es} \left[1 - a_1 a_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \text{ tidak lebih kecil dari } 0,40 \frac{\sigma_s}{Es}$$

$$2. f_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \cdot f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \xi_{ef}}} \text{ untuk } \xi_{ef} > \xi_{cr}$$

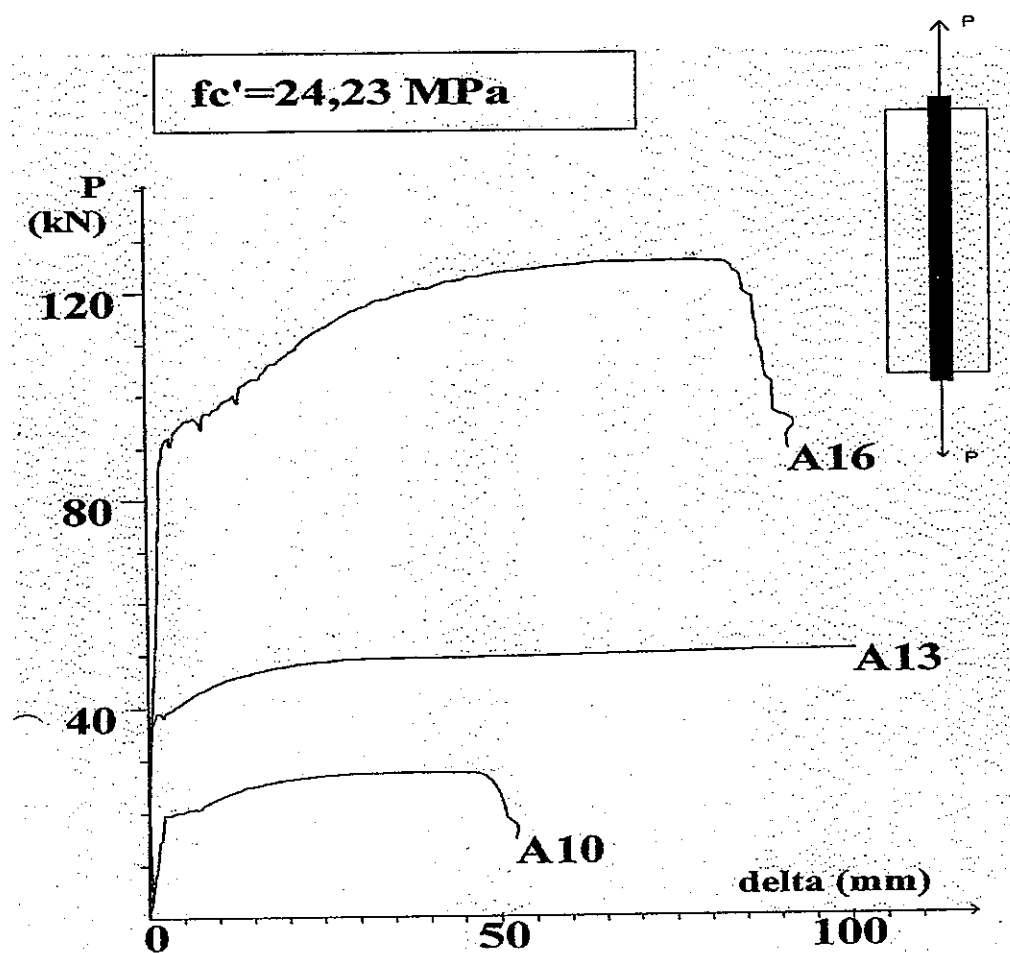
Apabila kedua diagram hasil pengujian bare bar dan embedded bar digabung menjadi satu maka akan diperoleh sebuah diagram yang dapat menunjukkan besarnya tension stiffening yang dihasilkan oleh elemen benda uji embedded bar, akibat tarikan sentris yang dibebankan padanya, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.4.



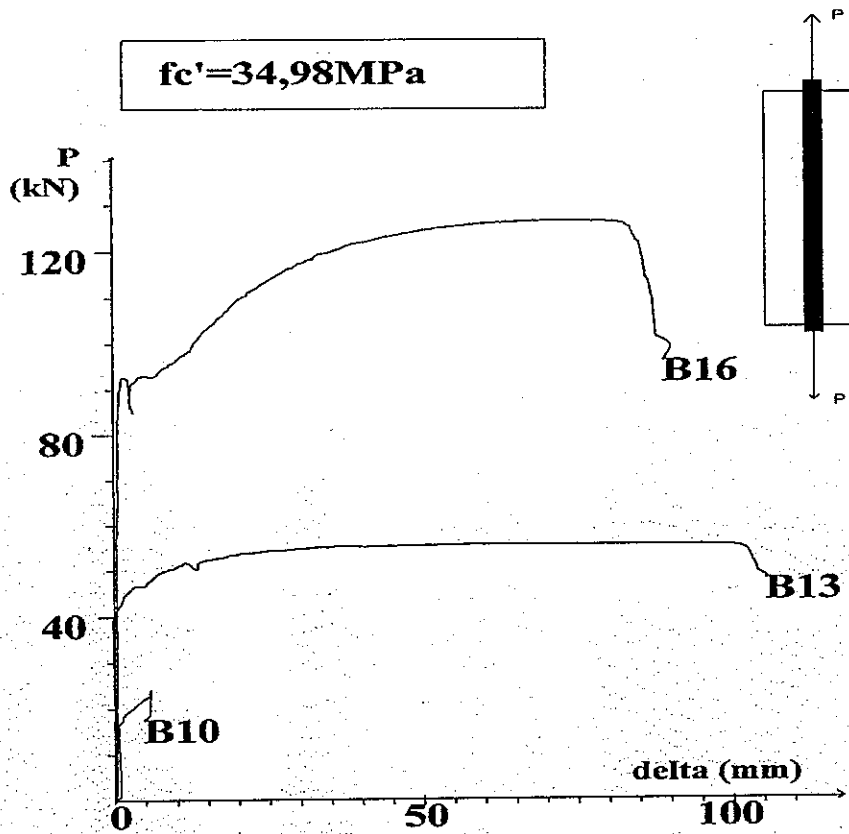
Gambar 4. 4. Prototipe Diagram $\sigma - \xi$ Gabungan Antara *Embedded Bar* dan *Bare Bar*. *OA*= daerah elastis, *AB*= daerah plastis.

Dengan demikian *tension stiffening* merupakan penguatan tarik pada baja tulangan yang ditanamkan pada beton. Keadaan itu timbul karena adanya tarikan dan terjadinya dimungkinkan karena faktor lain yang sangat penting yaitu adanya lekatan (*bond*) di antara baja tulangan dan beton yang mengelilinginya.

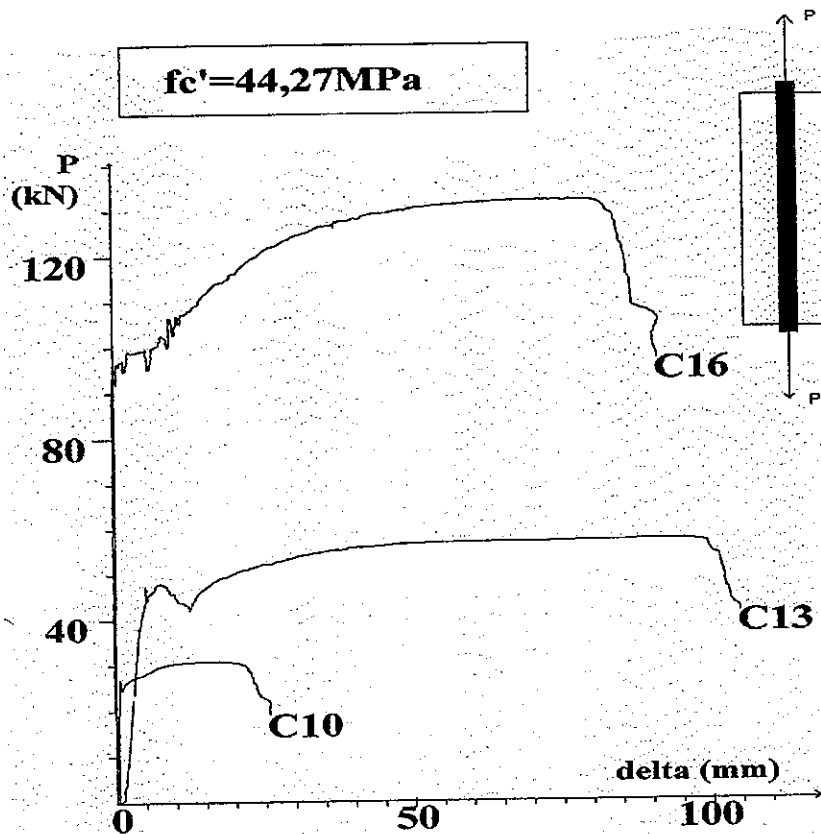
Kurva hubungan antara beban dan perpanjangan yang diperoleh dari hasil pengujian tarik benda uji disajikan pada Gambar 4.5. sampai Gambar 4.7. , sedangkan Gambar 4.8 sampai Gambar 4.10. menampilkan kurva hubungan antara tegangan-regangan yang didapat dari Gambar 4.5. sampai Gambar 4.7. setelah dilakukan analisa dengan menggunakan rumus-rumus dari persamaan 2.11, 2.12 dan 4.5, dan menggabungkannya dengan Gambar 4.3. (Kurva Tegangan-Regangan *Bare Bar*), sehingga menjadi satu gambar kurva bersama antara *embedded bar* dan *bare bar* untuk setiap mutu bahan dan diameter baja tulangan. Gambar 4.11. menampilkan Gambar kurva $T_s - \rho$ *tension stiffening effect embedded* baja tulangan ulir, dimana T_s adalah nilai *tension stiffening* dan ρ / ρ adalah rasio tulangan yang diperoleh dari Tabel 4.7.



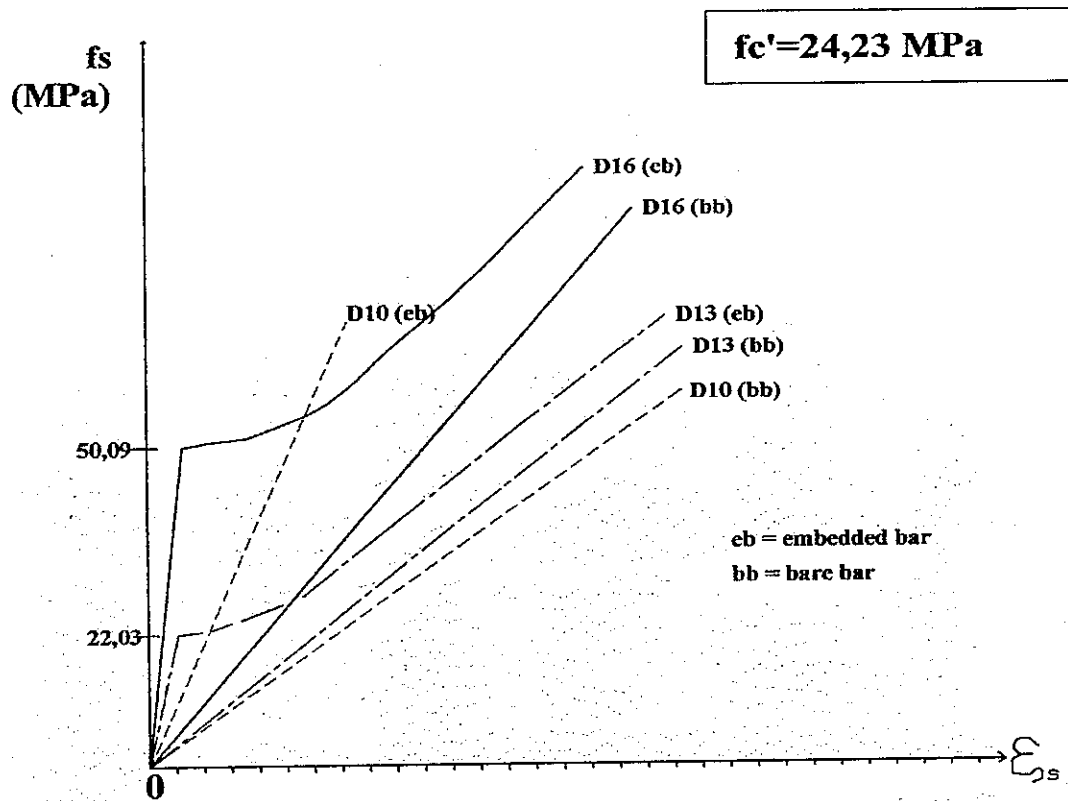
Gambar 4.5. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c' = 24,23 \text{ MPa}$



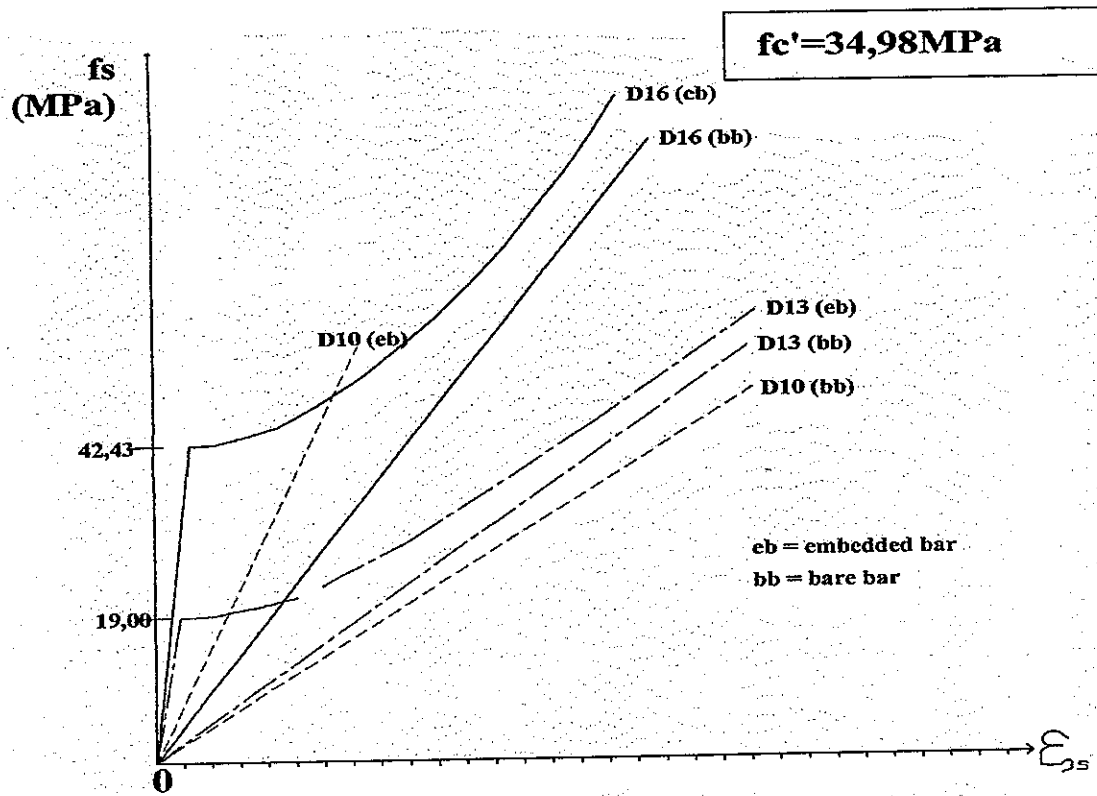
Gambar 4.6. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c' = 34,98 \text{ MPa}$



Gambar 4.7. Kurva Hubungan Antara Beban dan Perpanjangan untuk Benda Uji Mutu Beton $f_c' = 44,27 \text{ MPa}$

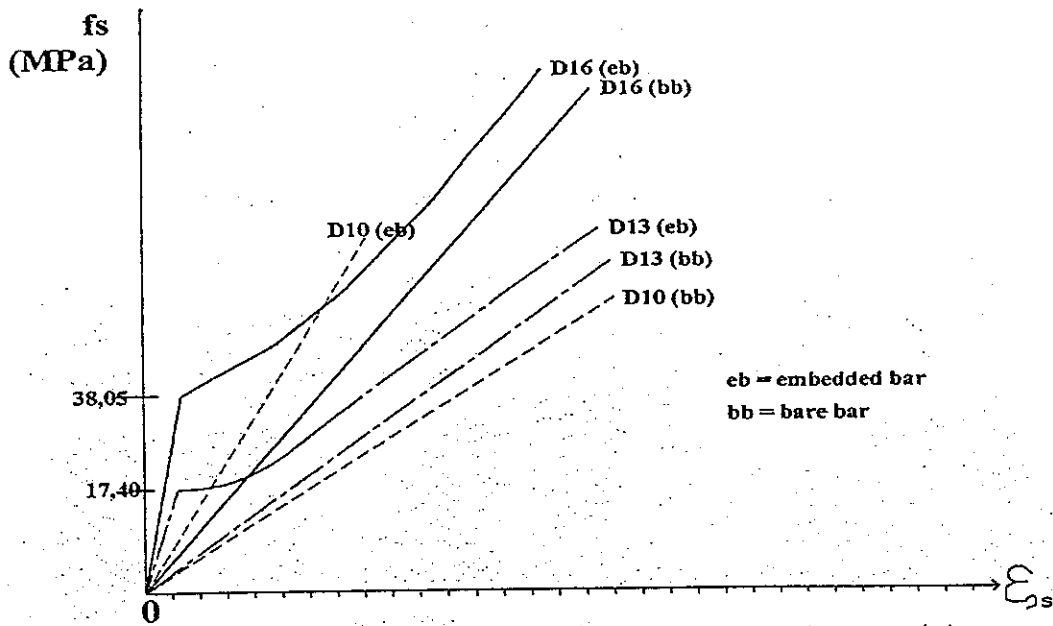


Gambar 4.8. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan *Bare Bar- Embedded Bar* Mutu Beton $f_c' = 24,23 \text{ MPa}$

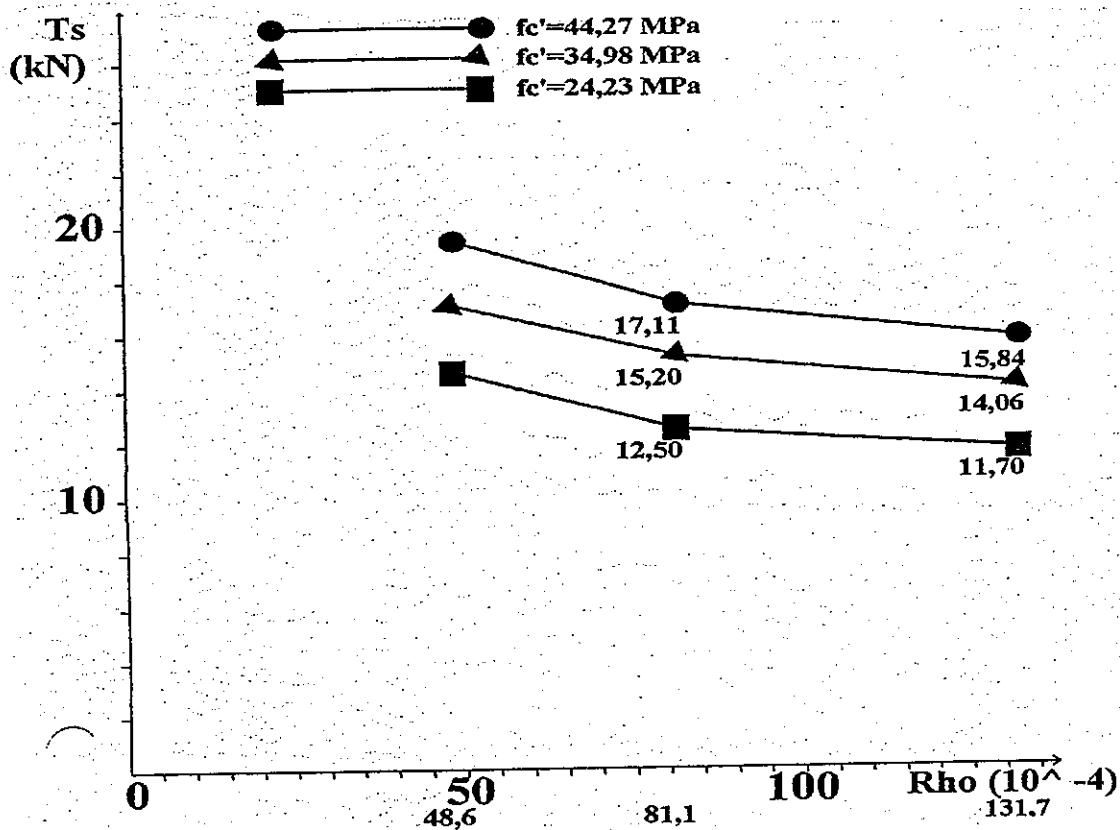


Gambar 4.9. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan *Bare Bar- Embedded Bar* Mutu Beton $f_c' = 34,98 \text{ MPa}$

$f_c' = 44,27 \text{ MPa}$



Gambar 4.10. Kurva Hubungan Antara Tegangan dan Regangan *Bare Bar-Embedded Bar* Mutu Beton $f_c' = 44,27 \text{ MPa}$



Gambar 4.11. Kurva Hubungan *Tension Stiffening/ Ts- ρ* Pada Berbagai Mutu Beton

4.5. Pengamatan Pola Retak

Selama pengujian tarik *embedded bar* berlangsung, selain dicatat data-data teknis yang dihasilkan oleh pengujian, diamati pula pola retak permukaan beton yang terjadi. Supaya pola retak yang terjadi dapat terbaca dengan jelas, maka seluruh bidang luar permukaan betonnya dicat dengan warna putih.

Hasil pengamatan pola retak menunjukkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Benda uji dengan mutu beton $f_c' = 24,23$ MPa, diwakili oleh 3 benda uji :
 - a. Baja Tulangan ulir dengan diameter pengenal $d_p = 9,61$ mm dengan kode benda uji A10, pada beban tarik 28 kN, baja tulangan di luar beton telah mengalami putus lebih dahulu, sementara permukaan beton masih dalam keadaan utuh (U), tidak terlihat adanya retak (*crack*) awal.
 - b. Baja Tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 12,40$ mm dengan kode benda uji A13, pada beban tarik sebesar 41 kN sudah menunjukkan adanya retak awal dengan tipe *transverse cracks* (T) yang semakin membesar lebar retaknya dan disusul *transverse cracks* (T) berikutnya yang lebih lembut lebar retaknya sampai baja tulangan putus di tempat retak yang lebar. Pada saat itu kondisi beban tarik mencapai nilai sebesar 58 kN. Pada pengujian ini tidak tampak adanya *splitting cracks* (S) di permukaan beton benda uji. Lebar retak terbesar yang terjadi berjarak sekitar 50 mm.
 - c. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 15,76$ mm dengan kode benda uji A16, pada beban tarik sebesar 88 kN sudah menunjukkan adanya retak awal dengan tipe *transverse cracks* (T). Pada peningkatan beban berikutnya semakin bertambah munculnya *transverse cracks* (T) yang baru kemudian diikuti dengan *splitting cracks* (S) pada bagian tengah dan ujung benda uji sampai baja tulangan benda uji putus di tempat retak dengan beban tarik pada saat itu mencapai nilai sebesar 128 kN. Lebar retak rata-rata berjarak sekitar 25 mm.

Bentuk retak benda uji kode A hasil uji tarik disajikan pada Gambar 4.13

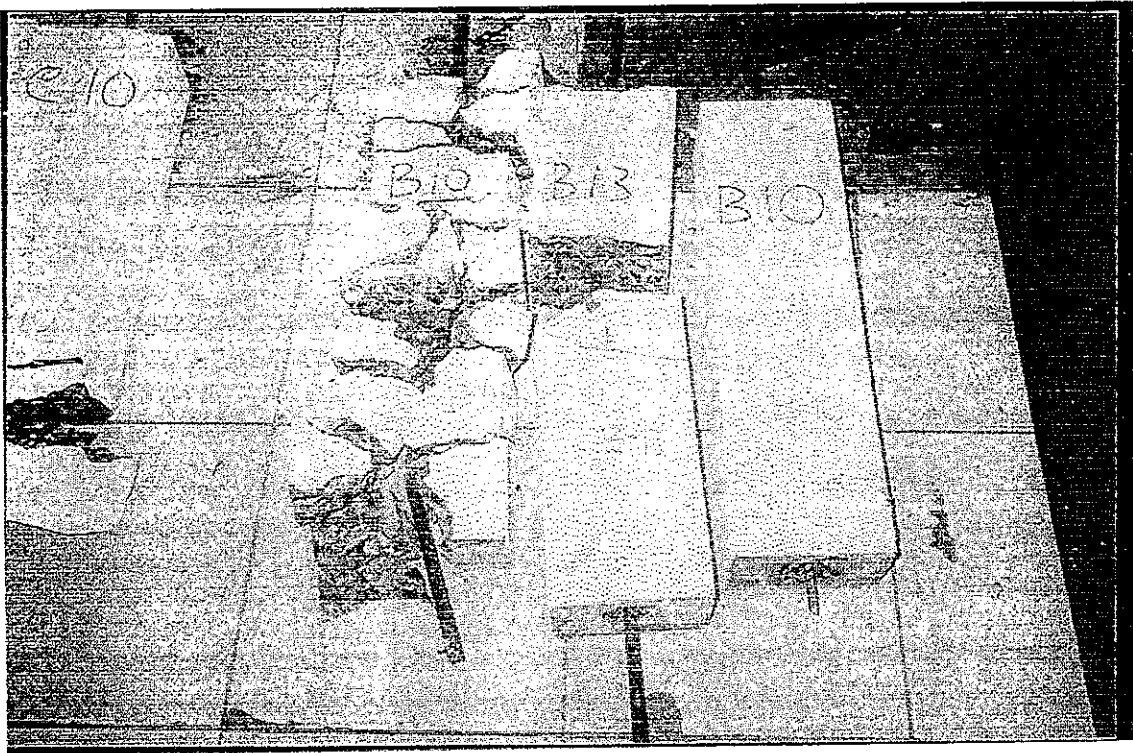


Gambar 4.13. Pola Retak Benda Uji A10, A13 dan A16.

2. Benda uji dengan mutu beton $f_c' = 34,98$ MPa, diwakili oleh 3 benda uji :
 - a. Baja Tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 9,61$ mm dengan kode benda uji B10, menunjukkan perilaku yang sama dengan benda uji berkode A10, yaitu tulangan luar putus lebih dahulu pada saat beban tarik sebesar 28 kN dan tidak terlihat adanya retak di permukaan betonnya. Grafik leleh pertama menunjukkan beban sebesar 21 kN.
 - b. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 12,40$ mm dengan kode benda uji B13 pada beban tarik sebesar 42 kN sudah menunjukkan adanya retak awal dengan tipe *transverse cracks* (T) yang semakin membesar lebar retaknya dan disusul *transverse cracks* (T) berikutnya yang lebih lembut lebar retaknya sampai baja tulangan putus di tempat retak yang lebar. Pada saat itu kondisi beban tarik mencapai nilai sebesar 58 kN. Pada pengujian ini tidak tampak adanya *splitting cracks* (S) di permukaan beton benda uji. Lebar retak terbesar yang terjadi berspacing sekitar 60 mm.
 - c. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 15,76$ mm dengan kode benda uji B16 pada beban tarik sebesar 94 kN sudah menunjukkan adanya retak awal dengan tipe *transverse cracks* (T). Pada peningkatan beban berikutnya semakin bertambah munculnya *transverse cracks* (T) yang baru, kemudian

diikuti dengan *splitting cracks* (S) pada bagian tengah dan ujung benda uji serta terjadi proses penggelinciran (*slip*) baja tulangan dan beton sampai baja tulangan putus pada beban tarik sebesar 129 kN. Lebar retak rata-rata sulit diukur karena benda uji dalam keadaan hancur.

Bentuk retak benda uji kode B hasil uji tarik disajikan pada Gambar 4.14.



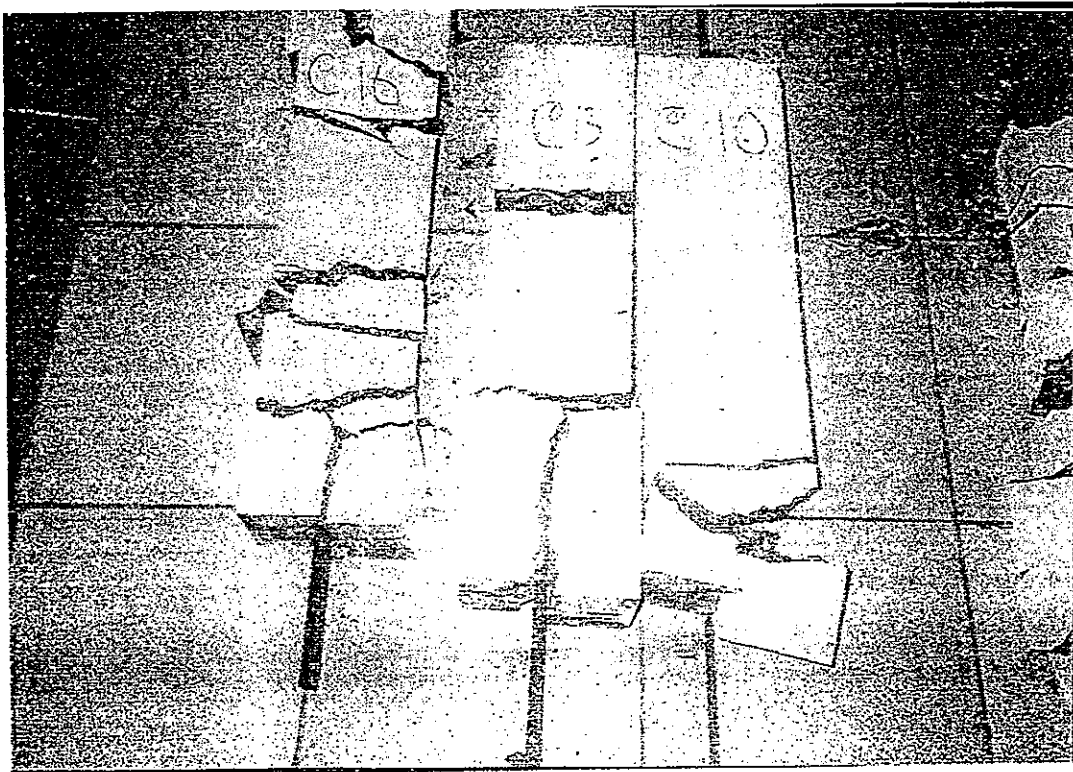
Gambar 4.14. Pola Retak Benda Uji B10, B13 dan B16

3. Benda uji dengan mutu beton $f_c' = 44,27$ MPa, diwakili oleh 3 benda uji :
 - a. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 9,61$ mm dengan kode benda uji C10 menunjukkan perilaku baja tulangan putus di bagian luar dengan sebelumnya didahului timbulnya *transverse cracks* (T) di bagian ujung benda uji. Saat leleh pertama terjadi, menunjukkan beban sebesar 24 kN, sedangkan saat baja tulangan putus nilai beban sebesar 31 kN.
 - b. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p = 12,40$ mm dengan kode benda uji C13 sudah menunjukkan adanya retak awal pada beban 43 kN dengan *transverse cracks* (T) yang semakin membesar lebar retaknya dan disusul *transverse cracks* (T) berikutnya yang lebih lembut lebar retaknya sampai baja tulangan putus pada beban sebesar 59 kN. Sebelum baja tulangan putus, sempat terjadi *splitting cracks* (S) pada ujung benda uji serta tulangan

mengalami proses penggelinciran (*slip*). Lebar retak terbesar yang terjadi berspacing sekitar 30 mm.

- c. Baja tulangan ulir berdiameter pengenal $d_p=15,76$ mm dengan kode benda uji C16 pada beban tarik sebesar 90 kN sudah menunjukkan adanya retak awal dengan tipe *transverse cracks* (T). Pada peningkatan beban berikutnya semakin bertambah *transverse cracks* (T) yang baru, kemudian diikuti *splitting cracks* (S) pada kedua ujung benda uji. Baja tulangan putus pada beban tarik sebesar 129 kN. Lebar retak terbesar yang terjadi berjarak sekitar 20 mm.

Bentuk retak benda uji kode C hasil uji tarik disajikan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15. Pola Retak Benda Uji C10, C13 dan C16

4. Benda uji dengan mutu beton $f_c'=24,23$ MPa , mengandung tulangan polos dengan kode TP11, TP15 dan TP19. Untuk benda uji bertulangan polos diameter P11, P15 dan P19 semuanya mempunyai perilaku yang sama yaitu:
 - a. Pada saat besar beban mencapai beban leleh yaitu masing-masing 37 kN, 67 kN dan 81 kN permukaan beton tidak menunjukkan tanda-tanda retak, jadi permukaan masih dalam keadaan utuh.

- b. Setelah beban leleh dilewati, diameter baja tulangan mengalami pengecilan (kontraksi) akibat pengaruh *poisson ratio*, berakibat seluruh beton lepas (lolos) dari baja tulangan dalam keadaan utuh.
- c. Setelah beton lepas, tulangan yang menjadi bebas tersebut akhirnya putus pada beban masing-masing 49 kN, 98 kN dan 118 kN

Beberapa kegiatan penelitian ini dokumentasinya dapat dilihat pada **Lampiran 4.5**.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian benda uji untuk masing-masing parameter seperti telah dijelaskan dan dibahas, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

A. Benda uji dengan baja tulangan ulir.

1. Pada penelitian ini, semakin besar nilai rasio tulangan, penguatan tarik baja tulangan (*tension stiffening*) yang terjadi akan semakin menurun atau berkurang.
2. Semakin tinggi mutu beton, *tension stiffening* yang terjadi semakin tinggi pula, karena beton mutu tinggi mempunyai gaya lekat yang tinggi pula.
3. Pada rasio tulangan dengan nilai kecil ($\rho = 0,00486$) yaitu benda-benda uji A10, B10 dan C10, baja tulangan pada beban di atas beban leleh putus di bagian luar betonnya. Hal ini mengindikasikan bahwa kekuatan lekatnya masih mampu mengimbangi beban luar tanpa mengalami proses penggelinciran (*slip*), sehingga pada saat baja tulangan luar putus, permukaan betonnya masih dalam keadaan utuh.
4. Dari penelitian dapat dicatat bahwa *splitting cracks* akan signifikan apabila c/d_b mempunyai nilai kurang dari 2,70, dimana c = tebal selimut beton, sedang d_b = diameter baja tulangan.

B. Benda uji dengan tulangan polos

Pada baja tulangan polos lekatan dengan beton dibentuk oleh : adhesi, *gripping* dan friksi saja tanpa unsur *interlocking*. Pada beban di bawah beban leleh, faktor adhesi, *gripping* dan friksi tersebut masih dapat bekerja maksimal mengimbangi beban yang ada. Begitu beban ditingkatkan menjadi di atas atau mendekati titik leleh, kekuatan lekatan menjadi terganggu dan tidak dapat mengimbangi beban dari luar, serta diikuti oleh adanya kontraksi penampang tulangan, menjadikan proses penggelinciran (*slip*) antara beton dan baja tulangan yang mengakibatkan *tension stiffening* menjadi hilang.

5.2. Saran

Setelah dilakukan analisis pada penelitian ini, maka dapat disampaikan saran-saran sebagai berikut:

1. Pada analisa perencanaan dengan menggunakan cara kekuatan batas ultimit (*Ultimate Strength Design Method*) karena f_y mendasari perhitungannya, maka sebaiknya baja tulangan yang digunakan berjenis ulir (*deform*), karena pada bagian baja tulangan ulir mempunyai kecenderungan terjadinya *tension stiffening* akibat adanya daya lekat dan interaksi *interlocking* antara ulir tulangan dengan matrik beton yang mengelilinginya, sampai pada tingkat tegangan mencapai leleh f_y .
2. Untuk baja tulangan polos, *tension stiffening* terbentuk hanya pada beban rendah, yaitu pada beban di bawah tegangan leleh f_y , sehingga baja tulangan jenis polos sesuai untuk digunakan pada analisa perencanaan dengan cara-n (elastis linier) atau metode tegangan kerja (*Working Stress Design Method*) dan terbatas pada konstruksi ringan.

DAFTAR PUSTAKA

1. PBI, 1971, Departemen Pekerjaan Umum Republik Indonesia
2. SKSNI T-15-1991-03, Departemen Pekerjaan Umum, Yayasan LPMP, Bandung
3. Vis dan Gideon, 1993, *Dasar-Dasar Perencanaan beton Bertulang*, Erlangga, Jakarta
4. Istimawan, 1994, *Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SKSNI T-15-1991-03*, Departemen Pekerjaan Umum RI, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
5. Abrishami and Mitchell, 1996, *Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening*, ACI Structural Journal November-Desember, Technical Paper Tittle No. 93-S67 pp 703-710
6. Abrishami and Mitchell, 1997, *Influence of Steel Fiber on Tension Stiffening*, ACI Structural Journal November-Desember, Technical Paper Tittle No. 94-S70 pp 769-776
7. Nuroji, 1996, *Perilaku Mekanik Lekatan Beton Dan Tulangan Pada Beton Mutu Tinggi Akibat Beban Statik*, Tesis Program Magister Teknik Sipil, ITB, Bandung
8. Jaafar, KR, 2000, *Bond In Reinforced Concrete*, Dissertation for Master Degree, University Cambridge.
9. Kelvin Fields and Peter H Bischoff, 2004, *Tension Stiffening and Cracking of High-Strength Reinforced Concrete Tension Members*, ACI Structural Journal July August, Technical Paper Tittle No. 101-S44 pp. 447-456
10. Kazim Turk and M Sukru Yildirim, 2003, *Bond Strength of Reinforcement in Splices in Beams*, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 16 No. 4. pp. 469-478
11. Peter H. Bischoff, 2001, *Effects of Shrinkage on Tension Stiffening and Cracking in Reinforced Concrete*, NRC Canada pp.363-374.
12. Abdeldjelil Belarbi and Thomas T.C Hsu, 1994, *Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete*, ACI Structural Journal July August, Technical Paper Tittle No. 91-S46 pp. 465-474
13. Walter Gerstle et all, *Tension Stiffening: A Fracture Mechanics Approach*, Department of Structural Engineering Cornell University Ithaca, NY 14853, USA pp. 97-105
14. Chen et all, 2004, *Experimental Investigation on Steel-Concrete Bond in Lightweight and Normal Weight Concrete*, Structural Engineering and Mechanics, Vol.17 No.2, pp 141-152

15. -----, ACI Committee 224.2R-92, *Cracking of Concrete Members in Direct Tension*
16. **Wollrab et all**, 1996, *Response of Reinforced Concrete Panels Under Uniaxial Tension*, ACI Structural Journal November-December, Technical Paper Tittle No. 93-S61 pp. 648-657
17. **Shin and Choi**, 1996, *Bond Characteristics of Reinforcing Bars Embedded In High Strenght Concrete*, 4th Interational Symposium on Utilization of High-Strength/ High Performance Concrete, Paris
18. -----, CEB Bulletin d'Information No.242, May,1998, *Ductility of Reinforced Concrete Structures*.
19. **Lorrain and Hamouine**, 1996, *Bond Performance of High-Strength Concrete*, 4th Interational Symposium on Utilization of High-Strength/ High Performance Concrete, Paris.
20. **Yerlici et all**, 1996, *An Investigation on Bond Performance of High Strength-Concrete*, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/ High Performance Concrete, Paris