

PERPUSTAKAAN	
8 Agustus 2005	
TGL TERIMA	024564
NO. JUDUL	5720001569001
NO. INV.	
NO. INDEX	

**TUGAS AKHIR
PENELITIAN LABORATORIUM**

**PENGARUH RASIO TINGGI DAN LEBAR (h/b)
TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK
BETON BERTULANG**



Diusun Oleh :

**Ferizal IB
Rusnapi**

**96 310 133
96 310 248**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2005**

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR PENELITIAN LABORATORIUM

PENGARUH RASIO TINGGI DAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk memenuhi sebagian
persyaratan memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil

Disusun Oleh :

Ferizal IB. **No. Mhs. 96 310 133**

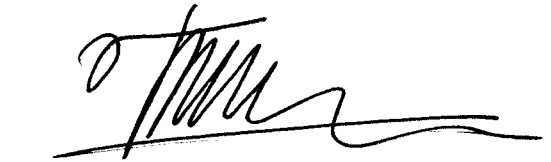
Rusnapi **No. Mhs. 96 310 248**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I
Ir. H. Suharyatmo, MT.


Tgl. : 07-01-2005

Dosen Pembimbing II
Ir. Fatkhurrohman NS, MT.


Tgl. : 07-01-2005

HALAMAN PERSEMBAHAN

Ferizal IB

Karya ini kupersembahkan untuk Bapak Ibu, Bang Mushadi serta Adik-adikku, Fitri dan Riska tercinta, yang dengan sabar dan penuh ketulusan memberikan spirit sehingga selesainya karya ini

Special Tanks for :

Rusnapi atas kerjasama, bimbingan dan kesabarannya, serta dedikasi yang tinggi demi terselesaikannya penelitian ini. Keluarga Riboet Supriadi, Inten, Vella, atas segala bantuan, spirit, dan sumbangan tak ternilai demi terselesaikannya karya ini.

DR. Ir. Ade Ilham, MT, atas revisi yang diberikan.

Wahyu Perdana, ST, dr. Grace Geovani, Eddy K. & Devy ST, Teddy Octaviadi, ST, Boy (Dian Anggrani) yang telah banyak membantu sumbangan ide-ide dasar.

Puput beserta keluarga yang telah memberikan spirit demi terselesaikannya karya ini.

Mas Aris, Mas Santoro, dan Mas Herry atas segala bantuan Administrasi dan dukungannya

Rusnapi

Karya ini kupersembahkan untuk Ibu dan Ayah tercinta, Adikku Sanggi Widode, yang telah banyak memberikan perhatian, semangat dengan kasih yang tak ternilai selamanya.

Special Tanks for :

Ferizal IB atas kerjasama dan kesabaran, serta dedikasi yang tinggi demi terselesaikannya penelitian ini. Keluarga Ir. Wakidi, Keluarga Riboet Supriadi, Intan, Vella, atas segala bantuan, bimbingan, spirit, dan sumbangan tak ternilai lainnya demi terselesaikannya karya ini.

DR. Ir. Ade Ilham, MT, atas revisi yang diberikan.

Wahyu Perdana, ST, dr. Grace Geovani, Eddy K. & Devy ST, Teddy Octaviadi, ST, Boy (Dian Agraini), Puput, yang telah banyak membantu sumbangan ide-ide.

Mas Aris, Mas Santoro, dan Mas Herry atas segala bantuan Administrasi dan dukungannya.

Ferizal & Rusnapi

Tanks for :

Mas Ndaru, Mas Wamo, Mas Rusdi

Teman-teman Lab. BKT, Pulung, Puger, Udin, Tio, Hadi, SinChan, Santi, Yulia, atas ide-ide dan bantuan disepanjang waktu penyelesaian penelitian ini. Temen-temen Costenans, Ogroz, Kuri-Boy, Riqi, Tophik, dan Hengky, atas segala pengertian dan bantuan tenaga serta ide-ide.

Pentium 233 MMX, Pentium IV 1,6 Gb, Windows XP, Microsoft Office XP, Conon S100SP.

Diana Krall, Bob Marley, Ermy Kulit, Iwan Fals, Anggun C. Sasmi, Joe Satriani, No Doubt BIP, atas hiburan disepanjang penulisan karya ini.

PENGARUH RASIO TINGGI DAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG

Oleh : Ferizal. IB dan Rusnapi

Abstraksi

Kapasitas lentur suatu balok beton bertulang akan sangat dipengaruhi oleh rasio tinggi terhadap lebar (h/b) penampangnya. Dimana semakin besar nilai rasio tinggi terhadap lebar (h/b) sebuah penampang balok, maka kapasitas lentur akan semakin besar. Hal ini karena momen inersia sumbu lenturan akan bertambah besar dengan membesarnya nilai rasio (h/b), sehingga balok akan memiliki kapasitas dalam menahan lentur yang besar sebagai akibat dari beban-beban yang dikerjakan padanya.

Kapasitas lentur yang besar akan dicapai dengan membesarnya nilai rasio (h/b), tetapi penampang balok akan semakin langsing. Kelangsingan penampang adalah fungsi dari rasio (h/b) dan panjang bentang balok. Kelangsingan penampang akan mempengaruhi kestabilan arah lateral balok (*lateral Instability*), karena lebar penampangnya yang kecil akan memperkecil momen inersia sumbu lateralnya dan akan mempengaruhi kestabilan tampang terlentur. Kegagalan instabilitas disebabkan kekakuan lenturan (*flexural Stiffness*) pada bidang yang terlentur sangat besar jika dibandingkan dengan kekakuan lateralnya, akibatnya kapasitas lentur balok tidak akan tercapai karena balok akan mengalami kegagalan lentur arah lateral yang terlalu dini yang akan mengendalikan kekuatannya.

SNI dan ACI juga membatasi rasio h/b penampang dalam disain balok tidak lebih besar dari 3. Berdasarkan uraian diatas, berarti hubungan rasio tinggi dengan lebar penampang balok terhadap kapasitas lentur mempunyai nilai optimum. Dimana proporsi tinggi terhadap lebar balok memiliki nilai batas tertentu dalam menahan gaya lentur tanpa harus terjadi kegagalan kestabilan arah lateral.

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirahim

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji dan syukur penyusun panjatkan kehadiran Allah S.W.T karena rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tentang **PENGARUH RASIO TINGGI DAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG** ini dengan baik.

Penelitian ini dilakukan guna melengkapi salah satu syarat untuk mencapai Derajat Kesarjanaan (S1) di jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyelesaian laporan ini penyusun telah banyak mendapat bantuan dan motivasi dari berbagai pihak, untuk itu penyusun menyatakan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. Suharyatmo, MT, selaku dosen Pembimbing Utama yang dengan penuh kesabaran dan ketekunan telah meluangkan waktunya untuk membimbing penulis.
2. Bapak Ir. Fatkhurrohman, MT., selaku dosen Pembimbing Pendamping yang telah memberikan banyak sekali ide-ide dasar dan bimbingannya hingga selesainya penelitian penulis, dan juga selaku Kepala Laboratorium Mekanika Rekayasa, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

3. Bapak Prof. Ir. Widodo, MSCE, Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Ir. Munadir, MS, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
5. Segenap Staff dan karyawan Laboratorium Mekanika Rekayasa, Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik dan seluruh lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
6. Rekan-rekan : Swastiko, Jacky Nugroho, Riqi Fauzi, Herlys Sapto Aji, serta semua pihak yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu yang telah banyak memberikan bantuan ide-ide, dukungan, dan tenaganya.

Penulis menyadari bahwa hasil karya penelitian tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, sehingga penulis sangat terbuka dalam menerima kritik dan saran dari pembaca. Namun penulis berharap, semoga karya ini dapat bermanfaat dan menjadi sumber ide-ide bagi penelitian yang akan datang.

Wabillahi taufik wal hidayah

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Yogyakarta, Desember 2004

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR NOTASI	xiii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Manfaat Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	 4
 BAB III LANDASAN TEORI	 7
3.1 Distribusi Tegangan	7
3.1.1 Distribusi tegangan balok beton bertulang pada pembebanan ultimit	 7
3.1.2 Blok tegangan ekivalen Whitney	8

5.3 Hasil Uji Lentur Balok dan Pembahasan	43
5.3.1 Hubungan beban dengan lendutan balok	43
5.3.2 Hubungan momen dengan kelengkungan	46
5.4 Analisa retak	54
5.4.1 Pola retak hasil pengujian	54
5.4.2 Pola retak lentur balok (pembahasan retak hasil pengujian)	58
5.5 Stabilitas Arah Lateral	59
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	61
6.1 Kesimpulan	61
6.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 3.1 Tegangan-tegangan yang terjadi pada penampang balok terlentur	7
Gambar 3.2 Diagram tegangan-regangan penampang balok pada pembebanan ultimit	8
Gambar 3.3 Distribusi regangan dan tegangan pada penampang balok dengan tulangan tarik dan tulangan tekan	9
Gambar 3.4 Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b	11
Gambar 3.5 Grafik non dimensional hubungan h/b dengan $M_n/M_n, (h/b=2)$	13
Gambar 3.6 Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b	14
Gambar 3.7 Grafik non dimensional hubungan h/b dengan $M_n/M_n, (h/b=2)$	16
Gambar 3.8 Pengaruh momen lateral terhadap kapasitas lentur pada berbagai rasio h/b penampang	19
Gambar 3.9 Kelengkungan balok	20
Gambar 3.10 Grafik momen kelengkungan	23
Gambar 3.11 Diagram tegangan-regangan penampang bertulangan rangkap terlentur (a) pada saat leleh (b) pada saat kekuatan lentur ultimit	24
Gambar 3.12 Hubungan momen dengan kelengkungan pada berbagai rasio h/b	27
Gambar 3.13 Jenis-jenis dan ukuran retak	28

Gambar 4.1	Perletakan dan penampang serta penulangan benda uji	33
Gambar 4.2	Perletakan dan penampang serta penulangan benda uji	34
Gambar 4.3	Alat pengujian lentur (<i>loading frame</i>)	35
Gambar 4.4	Prosedur pengujian	39
Gambar 5.1	Grafik hubungan beban lendutan berbagai variasi h/b penampang balok	44
Gambar 5.2	Grafik hubungan h/b dengan kekakuan	45
Gambar 5.3	Grafik hubungan momen-kelengkungan teoritis variasi h/b ...	47
Gambar 5.4	Grafik non dimensional hubungan M/M_y , ($h/b=2$) dengan Φ/Φ , ($h/b=2$) pada berbagai variasi h/b	48
Gambar 5.5	Grafik hubungan momen kelengkungan hasil pengujian	49
Gambar 5.6	Grafik non dimensional hubungan M/M_y , ($h/b=2$) dengan Φ/Φ , ($h/b=2$) pada berbagai variasi h/b	50
Gambar 5.7	Grafik non dimensional M/M_y , ($h/b=2$) dengan Φ/Φ , ($h/b=2$) perbandingan teoritis dengan hasil pengujian	51
Gambar 5.8	Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok	54
Gambar 5.9	Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok	55
Gambar 5.10	Grafik non dimensional hubungan M/M_{mak} , ($h/b=2$) dengan a/h pada berbagai variasi h/b	55
Gambar 5.11	Grafik non dimensional hubungan M/M_{mak} , ($h/b=2$) dengan w/h pada berbagai variasi h/b	56
Gambar 5.12	Grafik non dimensional hubungan tinggi penampang dengan jarak retak pada berbagai variasi h/b	56
Gambar 5.13	Grafik non dimensional hubungan M_n dengan M_{cr}	59

DAFTAR LAMPIRAN

	halaman
Lampiran 1 Data Hasil Pengujian bahan	64
Lampiran 2 Perhitungan momen retak secara teoritis	71
Lampiran 3 Data hasil pengujian lentur	86
Lampiran 4 Grafik hubungan M_n dengan M_{cr}	117

DAFTAR NOTASI

a	Kedalaman blok tekan ekivalen Whitney
A	Luas penampang balok
A_s	Luas tulangan tarik
A_s'	Luas tulangan tekan
c	Jarak sumbu netral penampang ke serat paling tertekan
C	Gaya tekan beton
C_s	Gaya tekan tulangan tekan
D	Diameter baja tulangan
d	Tinggi efektif penampang balok
d_s	Jarak titik berat tulangan tarik ke serat paling tertarik
d'	Jarak titik berat tulangan tekan ke serat paling tertekan
E_c	Modulus elastis beton
E_s	Modulus elastis baja
f_c'	Kuat tekan beton yang disyaratkan
f_y	Tegangan leleh baja tulangan
f_s	Tegangan yang terjadi pada baja tulangan tarik
f_s'	Tegangan yang terjadi pada baja tulangan tekan
f_r	Modulus Retak beton
G	Modulus geser beton
h	Tinggi penampang

I_x	Momen Inersia arah sumbu x
I_y	Momen Inersia arah sumbu y
J	Momen Inersia Polar
k	Faktor kedalaman garis netral
l_c	Panjang retak
l	Panjang bentang
M	Momen
M_n	Momen nominal
M_u	Momen ultimit
M_{cr}	Momen kritis arah lateral
M_{rt}	Momen Retak
n	Rasio Modulus Elastisitas
P	Gaya, beban
T	Gaya tarik baja tulangan
w	Lebar retak
Y_w	Jarak dari titik pembebanan ke titik berat penampang
Y_t	Jarak dari garis netral ke serat paling tertarik
x	Jarak 2 retak
ρ	Rasio penulangan tarik
ρ'	Rasio penulangan tekan
Φ	Kelengkungan
Φ_{rt}	Kelengkungan retak
Φ_u	Kelengkungan ultimit

Φ_y	Kelengkungan leleh
ϕ	Faktor reduksi kapasitas
Δ	Defleksi, lendutan
ϵ_c	Regangan beton
ϵ_{cu}	Regangan beton ultimit
ϵ_s	Regangan baja tulangan
ϵ_s'	Regangan baja tekan
λ	Koefisien pola pembebanan

3.2 Momen Kapasitas	9
3.3 Ketidakstabilan Balok Arah Lateral	17
3.4 Momen dan Kelengkungan Balok	20
3.4.1 Kelengkungan balok	20
3.4.2 Leleh dan ultimit momen-kelengkungan	23
3.5 Ragam Retak	27
3.6 Perhitungan Momen Retak	28
3.7 Difleksi Balok	29
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	31
4.1 Bahan dan Benda Uji	31
4.1.1 Bahan	31
4.1.2 Benda uji	31
4.2 Peralatan Penelitian	34
4.3 Pelaksanaan Penelitian	37
4.3.1 Persiapan bahan	37
4.3.2 Pembuatan sampel.....	38
4.3.3 Pengujian kuat lentur	38
4.3.4 Pengujian kuat tekan beton	40
4.3.5 Pengujian kuat tarik baja tulangan	41
BAB V HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	42
5.1 Hasil Uji Kuat Tekan Beton	42
5.2 Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan	43

DAFTAR TABEL

Gam					
Gam					
Gam					Halaman
Gam	Tabel	5.1	Hasil uji kuat tarik baja tulangan	43	
Gam	Tabel	5.2	Kekakuan balok (k)	45	
	Tabel	5.3	Hasil perhitungan momen kelengkungan teoritis	47	
Gam	Tabel	5.4	Momen dan kelengkungan hasil pengujian	49	
Gam	Tabel	5.5	Rasio momen nominal pengujian dengan		
Gam			momen nominal teoritis	51	
	Tabel	5.6	Rasio kelengkungan (Φ) pengujian dengan		
Gam			kelengkunga (Φ) teoritis	52	
Gam	Tabel	5.7	Analisa data factor kekakuan	54	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kapasitas lentur balok beton bertulang dipengaruhi oleh geometri penampang, mutu beton, serta mutu dan luas (A_s) baja tulangan. Pada balok penampang persegi dengan luas tertentu, tegangan desak karakteristik beton (f_c'), serta tegangan leleh baja tulangan (f_y) tertentu, kapasitas lentur balok akan dipengaruhi oleh kelangsingan penampangnya, yaitu rasio tinggi (h) penampang terhadap jarak antar dukungan (L). Semakin besar rasio tinggi terhadap lebar sebuah penampang balok, maka kapasitas lentur balok juga akan meningkat karena momen inersianya juga akan meningkat, tetapi penampang balok akan semakin langsing. Kelangsingan penampang akan mempengaruhi kestabilan arah lateral balok (*lateral Instability*), karena lebar penampangnya yang kecil akan memperkecil momen inersia sumbu lateralnya dan akan mempengaruhi kestabilan tampang terlentur. Kegagalan instabilitas disebabkan kekakuan lenturan (*flexural Stiffness*) pada bidang yang terlentur sangat besar jika dibandingkan dengan kekakuan lateralnya, akibatnya kapasitas lentur balok tidak akan tercapai karena balok akan mengalami kegagalan lentur arah lateral yang terlalu dini yang akan mengendalikan kekuatannya.

SNI dan ACI juga membatasi rasio h/b penampang dalam disain balok tidak lebih besar dari 3.

Berdasarkan uraian diatas, berarti hubungan rasio tinggi dan lebar penampang balok terhadap kapasitas lentur mempunyai nilai optimum. Dimana proporsi tinggi terhadap lebar balok memiliki nilai batas tertentu dalam menahan gaya lentur tanpa harus terjadi kegagalan kestabilan arah lateral. Hal ini disebabkan oleh balok dengan luas penampang yang sama, dengan semakin tinggi rasio h/b penampangnya maka momen inersia arah sumbu x akan meningkat tetapi momen inersia arah sumbu y akan menurun, sehingga akan mengganggu kestabilan balok terlentur.

Untuk itu penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui sejauh mana pengaruh rasio tinggi dengan lebar balok terhadap kapasitas lentur nominal (M_n).

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk :

1. Membandingkan kuat lentur balok penampang persegi yang mempunyai luas penampang (A) sama dan rasio penulangan (ρ) sama pada variasi $h/b = 2$ hingga $h/b = 6$.
2. Membandingkan kekakuan balok penampang persegi yang mempunyai luas penampang (A) sama dan rasio penulangan (ρ) sama pada variasi $h/b = 2$ hingga $h/b = 6$.
3. Mempelajari pola atau ragam kegagalan balok beton bertulang dengan variasi $h/b = 2$ hingga $h/b = 6$.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah diketahuinya pengaruh rasio tinggi terhadap lebar penampang balok dalam menahan gaya-gaya lentur untuk tujuan perencanaan yang efisien.

1.4 Batasan Masalah

Pembatasan masalah ditujukan untuk mengarahkan agar hasil penelitian dapat mencapai tujuan penelitian, adalah sebagai berikut :

1. Sampel pengujian adalah balok dengan tulangan rangkap batas liat.
2. Luas penampang balok tetap yaitu $A = 29400 \text{ mm}^2$
3. Digunakan beton dengan mutu $f'_c = 20 \text{ MPa}$
4. Mutu baja tulangan, $f_y = 280 \text{ MPa}$
5. Tulangan tarik dan sengkang balok menggunakan baja tulangan polos
6. $\rho = 0,008$
7. $\rho' = 0,00058$
8. Perletakan balok sendi dan rol (momen positif)
9. Beban yang diterapkan pada pengujian adalah beban statis.
10. Beban transversal bekerja pada pusat geser penampang, sehingga tidak menimbulkan gaya torsi.
11. Rasio bentang bersih dengan tinggi penampang $(l_n/h) > 5$, sehingga tidak berlaku perilaku balok tinggi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Balok adalah batang yang mengalami beban transversal (terlentur), dan paling efisien bila luasnya disebar sedemikian rupa hingga jaraknya jauh dari garis netral (Salmon dan Johnson, 1994).

Tegangan didefinisikan sebagai intensitas gaya per satuan luas permukaan tempatnya bekerja (Timoshenko dan Goodier, 1986).

Menurut Istimawan (1999), asumsi-asumsi yang digunakan dalam menetapkan kekuatan penampang adalah sebagai berikut :

1. Bidang penampang rata sebelum terjadi lenturan, tetap rata setelah terjadi lenturan dan tetap tegak lurus pada sumbu bujur balok (prinsip Bernoulli). Oleh karena itu, nilai regangan dalam penampang terdistribusi linier atau berbanding lurus terhadap jaraknya ke garis netral (prinsip Navier).
2. Tegangan sebanding dengan regangan hanya sampai pada kira-kira beban sedang, dimana tegangan beton tekan tidak melampaui kurang lebih $1/2 f_c'$. Apabila beban meningkat sampai beban ultimit, tegangan yang timbul tidak sebanding lagi dengan regangannya yang berarti distribusi tegangan tekan tidak lagi linier.
3. Kuat tarik beton diabaikan (tidak diperhitungkan) dan seluruh gaya tarik dilimpahkan kepada tulangan baja tarik.

Kekuatan lentur atau momen tahanan Penampang balok adalah kapasitas tegangan-tegangan dalam yang membentuk sebuah momen kopel sebagai perlawanan dari momen lentur luar yang timbul sebagai akibat beban luar (Istimawan, 1999).

Besaran-besaran didalam menentukan penampang persegi yang bertulangan rangkap adalah b , d , A_s' dan A_s . Luas A_s diperoleh dari gabungan sejumlah luas tulangan tarik balok. Karena kekuatan tarik beton diabaikan dalam perhitungan lentur, maka bentuk dari penampang di daerah tarik dan besarnya selimut beton tidak mempengaruhi kekuatan lentur. Dengan demikian tinggi penampang yang menentukan didalam perhitungan kekuatan adalah tinggi efektif (d) ketimbang tinggi total (h). (Wang dan Salmon, 1993).

Agar kesetimbangan gaya horizontal terpenuhi, gaya tekan yang terjadi pada beton dan gaya tarik pada baja tulangan tarik akan saling mengimbangi membentuk sebuah momen kopel dalam melawan gaya lentur akibat beban luar. Sehingga penampang akan melawan momen luar sampai pada kekuatan batasnya yaitu sesaat sebelum runtuh (Edward G Nawy, 1990).

Kekuatan suatu balok lebih banyak dipengaruhi oleh tinggi dari pada lebarnya. Lebar yang sesuai dapat sepertiga sampai setengah dari tinggi, tetapi mungkin jauh lebih kecil untuk suatu balok tinggi, dan mungkin pula dipakai balok-balok yang lebar dan rendah untuk mempertahankan tinggi ruangan. (Mosley dan Bungey, 1984).

Untuk perencanaan struktur rangka yang diproporsikan terutama untuk menahan lentur dengan tingkat daktilitas 2 rasio lebar terhadap tinggi balok tidak

boleh kurang dari 0,25, dan untuk struktur dengan tingkat daktilitas 3 rasio lebar terhadap tinggi tidak boleh kurang dari 0,3 (SK SNI T-15-1991-03, 1991).

Untuk bentang bersih (l_n) lebih besar dari 4 kali tinggi efektif (d) Penampang balok lentur, ACI (*American Concrete Insitute*) mensyaratkan rasio lebar terhadap tinggi efektif lebih besar dari 0,3 (ACI 138 – 89, 1990).

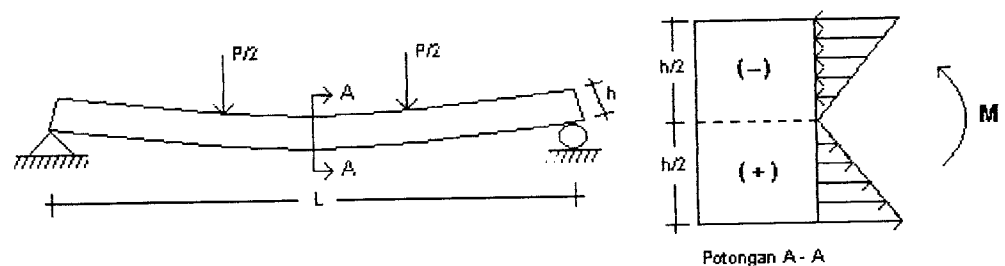
Penampang balok yang memiliki rasio tinggi efektif terhadap lebar lebih besar dari 2 akan mulai sensitif terhadap tekuk arah lateral (*lateral instability*) (Park dan Paulay, 1975).

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1. Distribusi Tegangan

Balok adalah elemen struktur yang menerima gaya transversal yang mengakibatkan tegangan-tegangan lentur pada penampang. Pada suatu balok elastis perletakan sederhana yang menerima momen lentur positif, tegangan tekan akan terjadi di bagian atas dan regangan tarik di bagian bawah penampang, distribusi tegangan ditunjukkan pada Gambar 3.1 (b). Tampak pada gambar bahwa tegangan memiliki nilai yang sebanding dengan jaraknya ke garis netral. Tetapi balok beton bukan merupakan material yang bersifat elastis penuh, sehingga distribusi tegangan linier hanya berlaku pada pembebanan kecil.

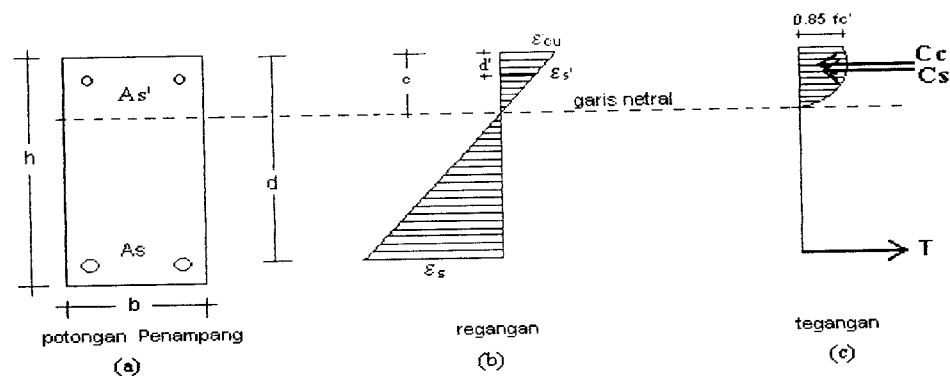


Gambar 3.1 Tegangan-tegangan yang terjadi pada tampang balok terlentur

3.1.1. Distribusi tegangan balok beton bertulang pada pembebanan ultimit

Pada tingkat pembebanan ultimit, nilai regangan serta tegangan tekan akan meningkat dan cenderung untuk tidak lagi sebanding antar keduanya. Dimana tegangan beton tekan akan membentuk kurva non-linier, dan kurva tegangan tekan

diatas garis netral akan berbentuk sama dengan kurva tegangan-regangan beton dengan regangan sebesar ϵ_{cu} . Bila distribusi regangan dan tegangan penampang sudah mencapai pada kondisi ini, tegangan dan regangan yang terjadi sudah berada atau dekat dengan keadaan ultimit, komponen struktur telah retak, terjadi lendutan yang besar dan tidak akan kembali ke panjang semula (Istimawan, 1999). Distribusi regangan-tegangan penampang beton pada keadaan ultimit ditunjukkan pada gambar 3.2.



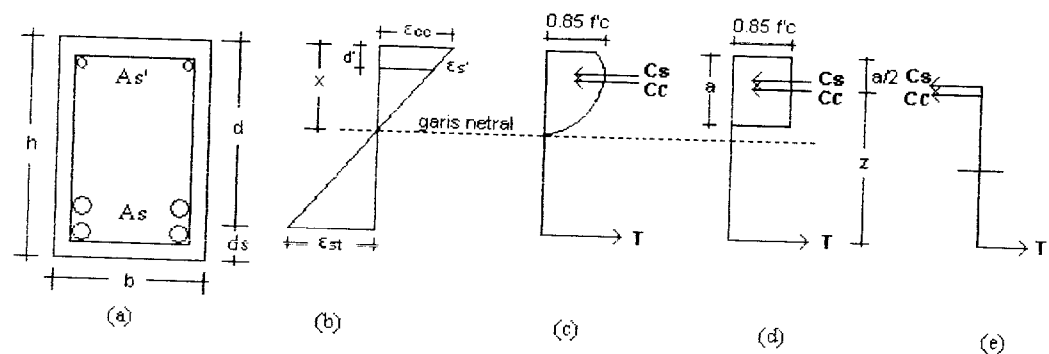
Gambar 3.2 Diagram tegangan-regangan penampang balok pada pembebanan ultimit

3.1.2. Blok tegangan ekuivalen Whitney

Untuk analisa tampang pada keadaan batas ultimit, dimana distribusi tegangan tekan yang terjadi membentuk sebuah blok tegangan kurva parabola, Whitney melakukan penyederhanaan menjadi distribusi blok tegangan ekuivalen yang memiliki tinggi a dan tegangan tekan rata-rata sebesar $0,85 f'_c$. Dimana $a = \beta_1 C$, dengan $\beta_1 = 0,85$ untuk $f'_c \leq 30$ MPa dan berkurang 0,008 untuk setiap kenaikan 1 MPa kuat tekan beton, dan nilai tersebut tidak boleh kurang dari 0,65. distribusi tegangan blok ekuivalen tersebut ditunjukkan pada gambar 3.3. (Istimawan, 1999).

3.2. Momen Kapasitas

Pada suatu komposisi tertentu balok menahan beban sedemikian hingga regangan tekan lentur beton maksimal ($\epsilon'_c \text{ max}$) mencapai 0,003 sedangkan tegangan tarik baja tulangan mencapai tegangan luluh (f_y). Gaya-gaya dalam dan distribusi tegangan dan regangan balok terlentur pada kondisi ultimit ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Distribusi regangan dan tegangan pada Penampang balok dengan tulangan tarik dan tulangan tekan

Menggunakan diagram tegangan seperti yang dikemukakan oleh Whitney, maka gaya-gaya dalam yang terjadi pada penampang adalah :

Gaya desak pada beton :

$$C = 0,85 f'_c . b . a \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

Gaya tekan baja tulangan tekan :

$$C_s = A_s' . f_s' \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

Dengan :

$A_s' =$ luas tulangan baja tekan

$f_s' =$ tegangan tulangan baja tekan

Gaya tarik dalam keadaan tulangan baja tarik leleh :

$$T = A_s \cdot f_y \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

dengan :

A_s = luas tulangan baja tarik

f_y = tegangan leleh baja

Kesetimbangan gaya-gaya dalam harus terjadi sebagai lawan momen luar, dari Persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3) persamaan kesetimbangan gaya-gaya dalam dapat ditulis :

$$C + C_s = T \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

$$0.85 \cdot f'_c \cdot b \cdot a + A_s' \cdot f_s' = A_s \cdot f_y$$

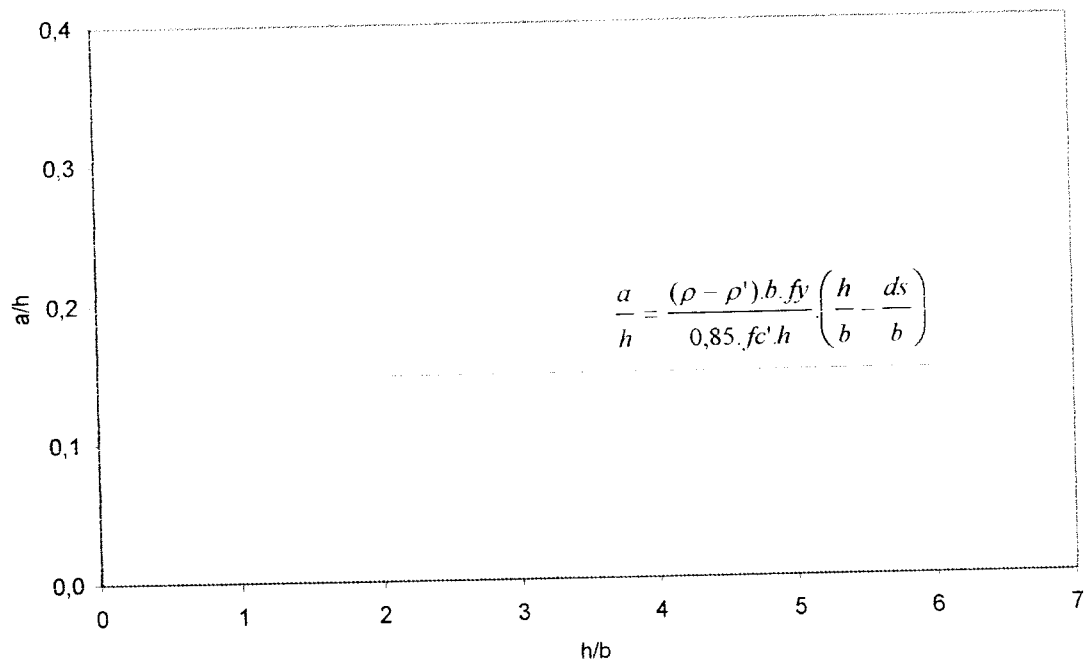
bila baja tulangan tekan sudah leleh, didapat kedalaman blok tekan ekivalen Whitney :

$$a = \frac{(A_s - A_s') \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot b} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

dengan membagi a Persamaan (3.5) dengan h didapat :

$$\frac{a}{h} = \frac{(\rho - \rho') \cdot b \cdot f_y}{0.85 \cdot f'_c \cdot h} \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{d_s}{b} \right) \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

Dari Persamaan (3.5) dapat dilihat a merupakan fungsi b, hubungan nilai a pada A_s , A_s' , d_s , d' , dan f_y serta f'_c konstan dengan variasi h/b ditunjukkan dalam Gambar 3.4. Tampak pada gambar bahwa nilai a/h konstan pada variasi nilai h/b .



Gambar 3.4. Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b

Menggunakan diagram regangan yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 untuk mengontrol apakah baja tulangan sudah leleh, maka didapat :

Baja tulangan tekan :

$$\epsilon_{s'} = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \dots\dots\dots (3.7)$$

$$f_{s'} = f_y \quad \text{jika} \quad 0,003 \frac{a - \beta_1 d'}{a} \geq \frac{f_y}{E_s}$$

Baja tulangan tarik :

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \dots\dots\dots (3.8)$$

$$f_s = f_y \quad \text{jika} \quad 0,003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \geq \frac{f_y}{E_s}$$

Jika baja tulangan tekan leleh, maka momen nominal adalah :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

substitusi Persamaan (3.5) dengan Persamaan (3.9) didapat :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \left(\frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot (1 - \frac{\rho'}{\rho}) \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \right) \left(d - \frac{\rho \cdot b \cdot d \cdot (1 - \frac{\rho'}{\rho}) \cdot f_y}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot (1 - \frac{\rho'}{\rho}) \cdot f_y \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho} \right) \frac{f_y}{f_c'} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

Jika :

$$C_1 = (1 - \frac{\rho'}{\rho})$$

$$C_2 = (d - d')$$

Maka Persamaan (3.9) menjadi :

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 \cdot C_1 \cdot f_y \cdot \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot C_1 \cdot \frac{f_y}{f_c'} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot C_2 \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

jika :

$$d = (h - ds) = \left(\frac{h - ds}{h} \cdot h \right)$$

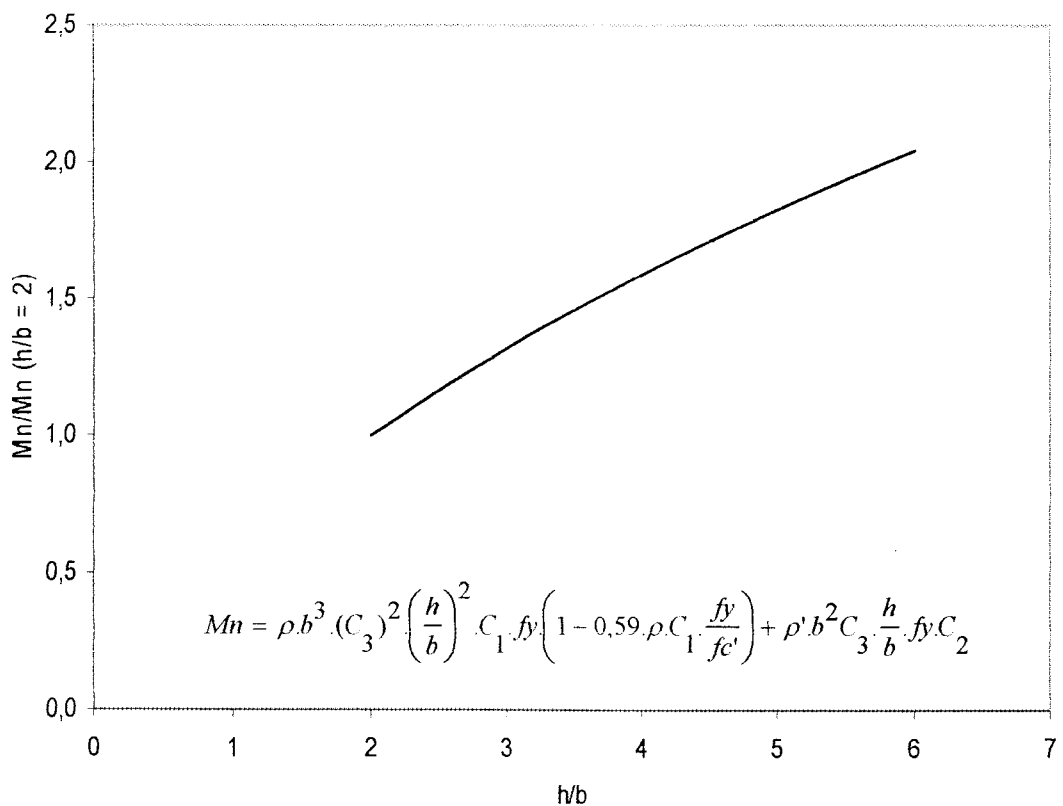
maka :

$$C_3 = \frac{h - ds}{h}$$

$$Mn = \rho.b^3.(C_3)^2.\left(\frac{h}{b}\right)^2.C_1.fy\left(1-0,59.\rho.C_1.\frac{fy}{fc'}\right) + \rho'.b^2.C_3.\frac{h}{b}.fy.C_2 \dots\dots\dots(3.11)$$

Jika ρ , ρ' , ds , d' , dan fc' serta fy konstan, maka momen nominal merupakan fungsi dari rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) dan momen akan bertambah besar jika rasio h/b penampang besar.

Hubungan h/b dengan kapasitas lentur nominal (Mn) pada fc' , fy , dan As serta As' konstan dengan menganggap distribusi tegangan Whitney masih berlaku pada rasio h/b besar serta tidak ada pengaruh momen lateral ditunjukkan oleh Gambar 3.5



Gambar 3.5 Grafik non dimensional hubungan h/b dengan Mn/Mn , ($h/b=2$)

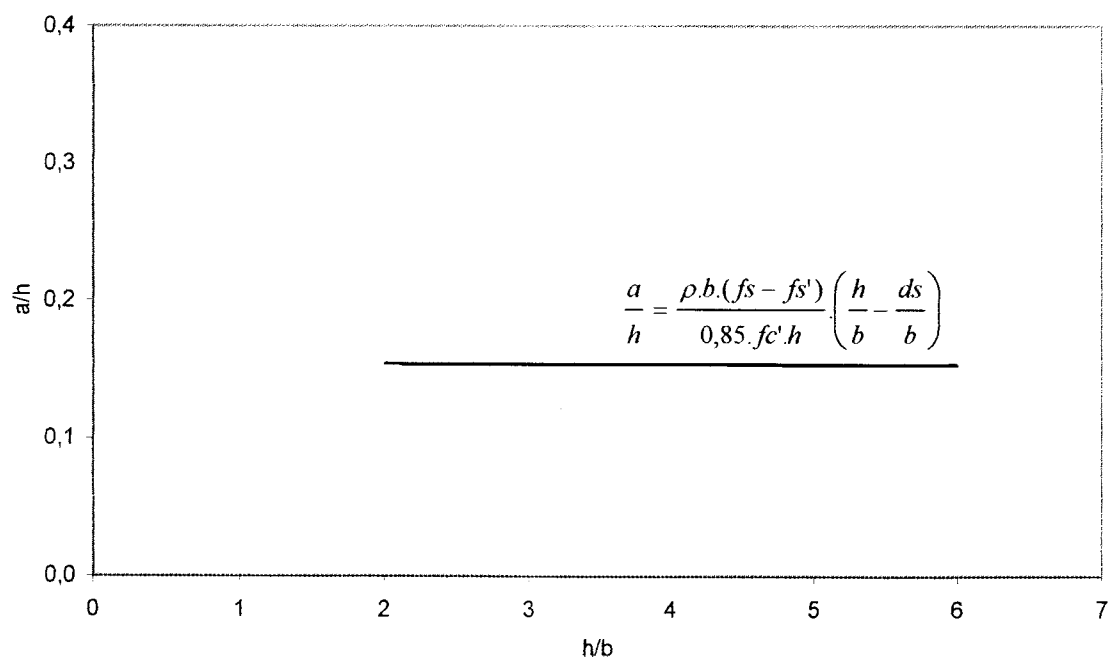
Jika ternyata baja tulangan tekan belum leleh, maka kedalaman blok tekan ekuivalen dihitung dengan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots(3.12)$$

dengan membagi a Persamaan (3.12) dengan h didapat :

$$\frac{a}{h} = \frac{\rho \cdot b \cdot (f_s - f_s')}{0,85 \cdot f_c' \cdot h} \cdot \left(\frac{h}{b} - \frac{d_s}{b} \right) \dots\dots\dots(3.13)$$

Dari persamman (3.12) dapat dilihat a merupakan fungsi b, hubungan nilai a/h pada A_s , f_y , f_c' dan d_s , serta d' konstan dengan variasi h/b ditunjukkan dalam Gambar 3.6. Tampak pada gambar bahwa nilai a/h konstan terhadap meningkatnya nilai h/b .



Gambar 3.6. Grafik non dimensional hubungan a/h dengan h/b

Menggunakan diagram regangan pada Gambar 3.3 maka didapat :

Tegangan baja tulangan tekan :

$$f_s' = \varepsilon_s' \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{a - \beta_1 \cdot d'}{a} \cdot E_s \quad \dots\dots\dots (3.14)$$

Tegangan baja tulangan tarik :

$$f_s = \varepsilon_s \cdot E_s = 0,003 \cdot \frac{\beta_1 \cdot d - a}{a} \cdot E_s \quad \dots\dots\dots (3.15)$$

Pada kondisi baja tekan belum leleh, momen nominal didapat dengan :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d') \quad \dots\dots\dots (3.16)$$

Substitusi Persamaan (3.12) dengan Persamaan (3.16) didapat momen nominal :

$$Mn = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \left(\frac{A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \right) \left(d - \frac{(A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s')}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + A_s' \cdot f_s' \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d \left(f_s - \frac{\rho'}{\rho} f_s' \right) \left(d - \frac{\rho \cdot b \cdot d \left(f_s - \frac{\rho'}{\rho} f_s' \right)}{1,7 \cdot f_c' \cdot b} \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_s' \cdot (d - d')$$

$$Mn = \rho \cdot b \cdot d^2 (f_s - C_4 \cdot f_s') \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot \left(\frac{f_s - C_4 \cdot f_s'}{f_c'} \right) \right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot C_2$$

jika :

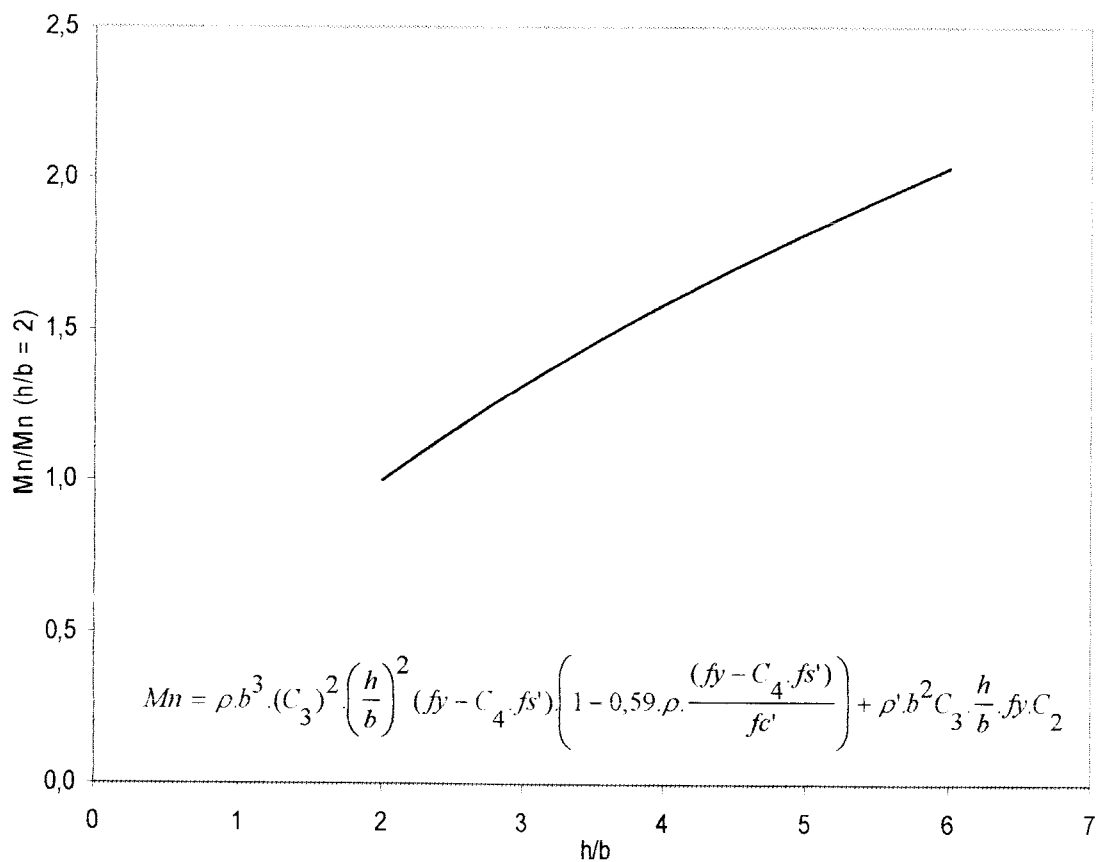
$$C_4 = \frac{\rho'}{\rho} \quad \text{dan bernilai konstan, dan } f_s = f_y$$

Maka :

$$Mn = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot (f_y - C_4 \cdot f_s') \left(1 - 0,59 \cdot \rho \cdot \frac{(f_y - C_4 \cdot f_s')}{f_c'} \right) + \rho' \cdot b^2 \cdot C_3 \frac{h}{b} \cdot f_s' \cdot C_2 \quad \dots\dots\dots (3.17)$$

Jika ρ , ρ' , d_s , d' , dan f_c' serta f_y konstan, maka momen nominal merupakan fungsi dari rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) dan momen akan bertambah besar jika rasio h/b penampang besar.

Hubungan h/b dengan kapasitas lentur nominal (M_n) pada f_c' , f_y , dan A_s , A_s' , d_s , serta d' konstan dengan menganggap distribusi tegangan Whitney masih berlaku pada rasio h/b besar dan tidak dipengaruhi dengan momen arah lateral ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Grafik non dimensional h/b dengan M_n/M_n , ($h/b=2$)

3.3. Ketidakstabilan Balok Arah Lateral (*lateral instability of beams*)

Pada balok berpenampang langsing, kekakuan lentur (*flexural stiffness*) penampang sangat besar jika dibandingkan dengan kekakuan lentur arah lateralnya (*lateral stiffness*). Sehingga kapasitas lentur nominal balok tidak tercapai karena penampang akan mengalami kegagalan lentur arah lateral, kondisi seperti ini dinamakan ketidakstabilan arah lateral (*lateral instability*).

Momen kegagalan tekuk arah leteral (M_{cr}) pada penampang balok yang elastis linier, homogen, isotropis prismatis, diberikan dalam persamaan berikut (Park dan Paulay, 1975) :

$$M_{cr} = \frac{\lambda}{l} \sqrt{\frac{E_c I_x E_c I_y G J}{E_c I_x - E_c I_y}} \left[1 - 1.74 \cdot \frac{Y_w}{l} \sqrt{\frac{E_c I_y}{G J}} \right] \dots\dots\dots(3.18)$$

Dimana :

λ = Koefisien pola pembebanan, yang memiliki nilai :

- a) π untuk momen seragam sepanjang bentang.
- b) 3,53 untuk beban terdistribusi merata.
- c) 4.24 untuk beban titik sentrik.

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

G = Modulus Geser Beton (MPa)

I_x, I_y = Momen Inersia arah sumbu kuat dan lemah (m^4)

J = Momen Inersia Polar (m^4)

l = Panjang bentang (m)

y_w = Jarak dari titik pembebanan ke titik berat Penampang (m)

Tampak pada persamaan (3.18) bahwa momen kegagalan tekuk arah lateral (M_{cr}) akan dipengaruhi oleh panjang bentang (l), dimana semakin panjang bentang maka momen kegagalan tekuk arah lateral akan semakin kecil dan kegagalan tekuk arah lateral akan terjadi pada rasio h/b penampang yang semakin rendah. Pada kuat tekan beton (f_c') yang semakin besar, kegagalan tekuk arah lateral akan semakin besar, karena f_c' yang semakin besar akan memberikan nilai modulus elastis beton yang semakin besar. Geometri penampang juga memberikan pengaruh pada nilai momen kegagalan arah lateral, dimana semakin besar rasio h/b maka momen kegagalan arah lateral akan semakin kecil, padahal momen lentur nominal balok akan semakin besar, hingga pada nilai rasio h/b tertentu maka momen kegagalan tekuk arah lateral akan menguasai tipe kegagalan balok.

Karena penampang yang sensitif terhadap tekuk lateral paling kecil memiliki rasio h/b sama dengan 2, sehingga rasio I_y/I_x menjadi kecil, sehingga Persamaan (3.18) dapat disederhanakan menjadi :

$$M_{cr} = \frac{\lambda}{l} \sqrt{E_c I_y G J} \left(1 - 1.74 \left(\frac{y_w}{l} \right) \sqrt{\frac{E_c I_y}{G J}} \right) \dots \dots \dots (3.19)$$

Untuk terjadinya suatu kegagalan instabilitas lateral, kapasitas lentur balok (M_u) akan lebih besar dari momen kritis (M_{cr}).

British code CP 110 membatasi parameter-parameter geometri untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan lateral, sebagai berikut (Park and Paulay, 1975) :

1. Untuk balok dengan dukungan sederhana atau kontinyu, jarak minimum antar dukungan lateral (l_b) adalah :

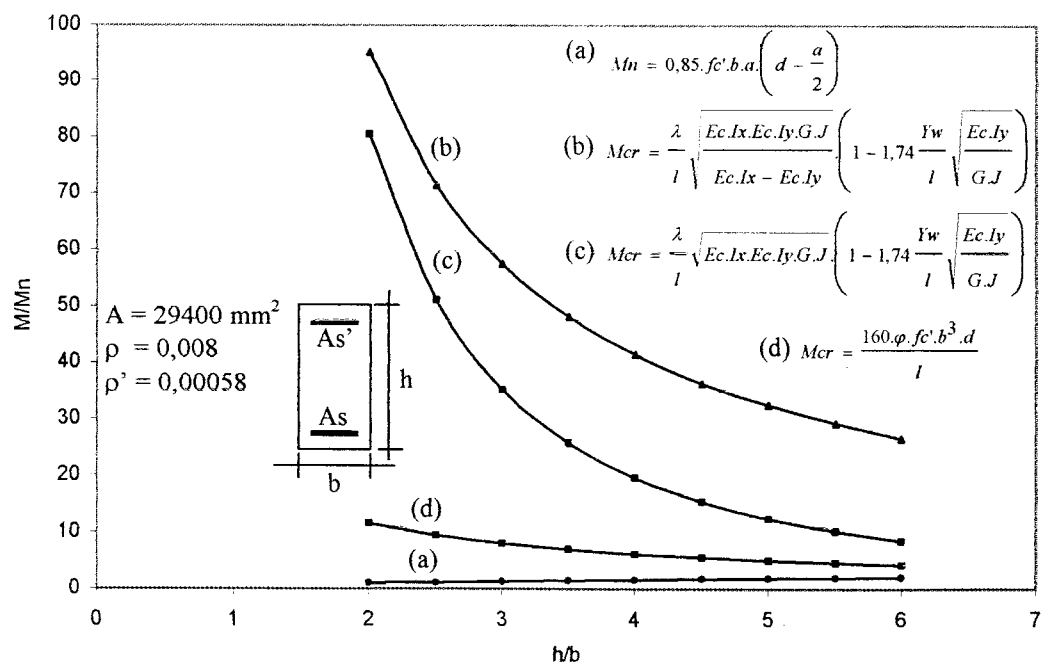
$$\frac{l}{b} < 60 \text{ dan } \frac{ld}{b^2} < 250 \quad \dots\dots\dots(3.20)$$

Jika batasan ini berlebihan, momen kritis akan mengendalikan kekuatan balok. Marshall memberikan perkiraan nilai M_{cr} sebagai berikut (Park and Paulay, 1975) :

$$M_{cr} = \frac{160 \cdot \phi \cdot f_c' \cdot b^3 \cdot d}{l} \quad \dots\dots\dots(3.21)$$

Dimana $\phi = 0,5$ diambil sebagai faktor reduksi kapasitas (*capacity reduction factor*)

Hipotesa kegagalan momen arah lateral dengan menggunakan Persamaan (3.18), (3.19), dan (3.21) ditunjukkan pada Gambar 3.8.

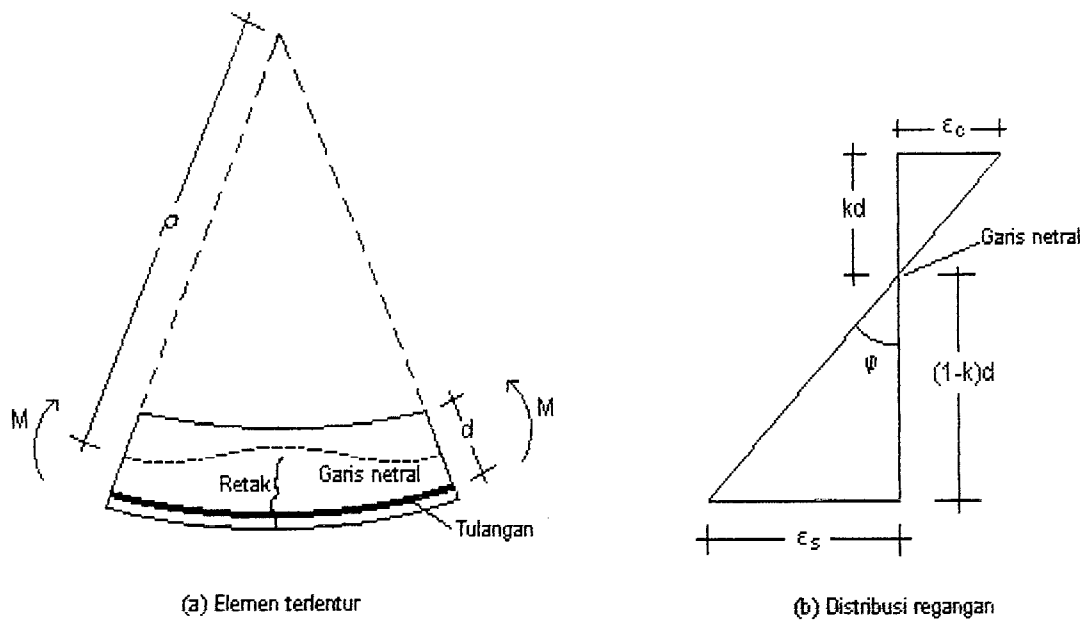


Gambar 3.8 Pengaruh momen lateral terhadap kapasitas lentur pada berbagai rasio h/b penampang

3.4. Momen dan Kelengkungan Balok

3.4.1. Kelengkungan balok

Menurut Park dan Paulay (1975), kelengkungan balok didapat dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 3.9. Jari-jari kelengkungan ρ diukur dari garis netral. Adanya retak-retak pada beton akibat terjadi penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (ρ), tinggi garis netral (kd), regangan beton (ϵ_c) dan regangan baja tarik (ϵ_s). Berdasar teori tersebut, retak beton akan bertambah jika dilakukan penambahan pembebanan.



Gambar 3.9 Kelengkungan balok, (Park and Paulay, 1975)

Menurut Popov (1983), kelengkungan suatu garis dalam koordinat Cartesian dinyatakan dengan persamaan :

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \Phi = \frac{d^2y/dx^2}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots\dots(3.22)$$

Jika $\frac{dy}{dx}$ kecil, maka $\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 \approx 0$ sehingga Persamaan (3.22) akan menjadi :

$$\Phi = \frac{d^2y}{dx^2} \dots\dots\dots(3.23)$$

Dengan menganggap sebuah elemen kecil panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 3.9 maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{\rho} = \frac{\epsilon_c dx}{kd} = \frac{\epsilon_s dx}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.25)$$

dengan $\frac{1}{\rho} = \phi$

dari Gambar 3.9 (b) jika regangan dijumlahkan diperoleh :

$$\Phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.25)$$

dengan :

Φ = Kelengkungan

ϵ_c = Regangan beton

ϵ_s = Regangan baja

d = Tinggi efektif penampang

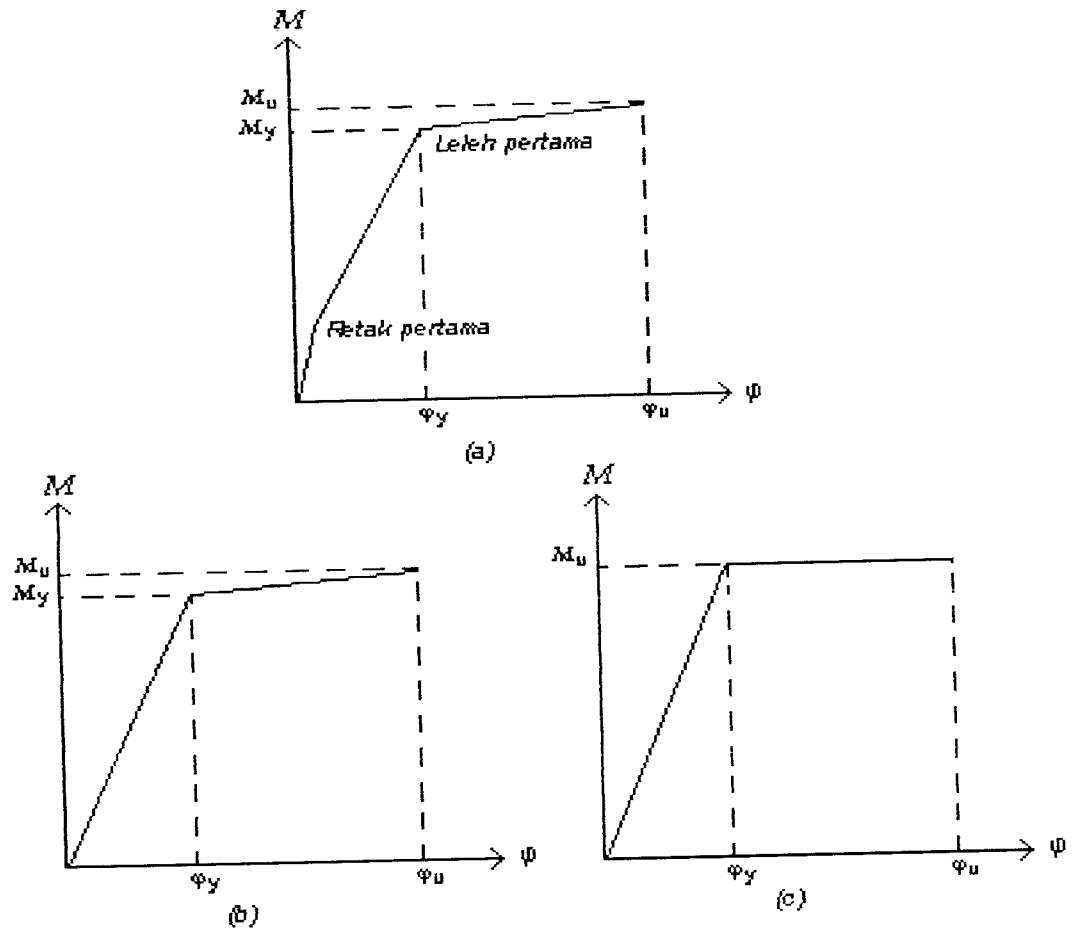
Persamaan (3.23) dapat diselesaikan dengan pendekatan *central difference*, menjadi :

$$\Phi = \frac{y(i+1) - 2yi + y(i-1)}{2\Delta x} \dots\dots\dots(3.26)$$

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan ϕ adalah gradien dari regangan dari elemen seperti dalam Gambar 3.9. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen adalah kecil dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan Persamaan (3.25). Dua grafik yang diperoleh dari penghitungan balok bertulangan rangkap adalah lurus/linear diawal dan hubungan antara momen dan kelengkungan diberikan persamaan :

$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \dots\dots\dots(3.27)$$

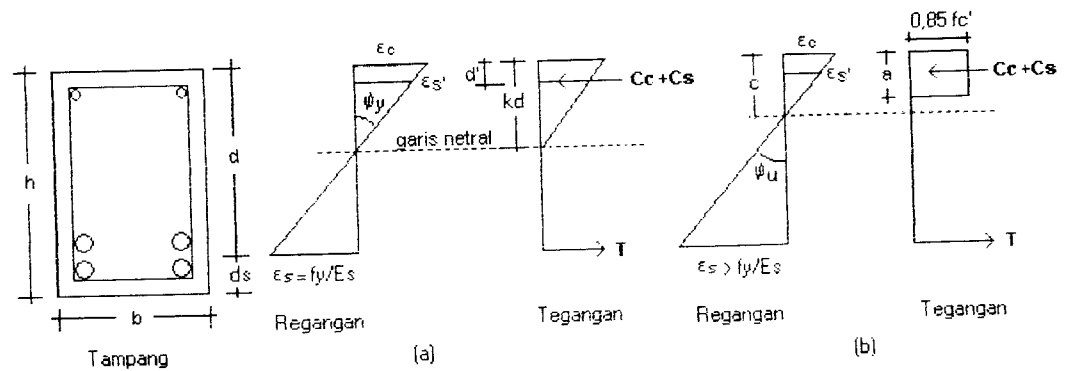
Dimana EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton akan mengurangi faktor kekakuan (EI) penampang, keadaan ini ditunjukkan pada Gambar 3.10 a. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah peningkatan kurva $M-\phi$ yang linear diatas titik leleh baja (Gambar 3.10 b). dengan menganggap peningkatan momen yang konstan ketika baja sudah leleh, maka dapat digambarkan hubungan $M-\phi$ seperti ditunjukkan pada (Gambar 3.10 c).



Gambar 3.10 Grafik momen kelengkungan

3.4.2. Leleh dan ultimit Momen-Kelengkungan

Gambar 3.11 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi bertulangan rangkap pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja tulangan ϕ_y didapat dari Persamaan (3.25) dalam istilah regangan baja saat leleh.



Gambar 3.11 Diagram tegangan-regangan penampang bertulangan rangkap terlentur (a) pada saat leleh (b) pada saat kekuatan lentur ultimit

Momen-Kelengkungan pada saat leleh pertama dapat dicari dengan persamaan :

$$M_y = A_s \cdot f_y \left(d - \frac{kd}{3} \right) \quad \dots\dots\dots (3.28)$$

$$M_y = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \left(\frac{h}{b} \right)^2 \cdot f_y \left(1 - \frac{k}{3} \right) \quad \dots\dots\dots (3.29)$$

dimana :

$$k = \sqrt{(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \cdot n \left(\rho + \frac{\rho' \cdot d'}{d} \right)} - (\rho + \rho') \cdot n \quad \dots\dots\dots (3.30)$$

Kelengkungan pada leleh pertama adalah :

$$\phi_y = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{f_y/E_s}{(h-ds)(1-k)} \quad \dots\dots\dots (3.31)$$

dimana :

k = Faktor tinggi garis netral

M_y = Momen leleh pertama

ϕ_y = Kelengkungan leleh pertama

$$n = \frac{E_s}{E_c}$$

Pada nilai f_c' dan f_y serta A_s konstan, nilai $\rho = A_s/bd$ akan dipengaruhi oleh rasio h/b . Pada Persamaan (3.31) kelengkungan merupakan fungsi nilai k , nilai k semakin besar maka kelengkungan akan semakin besar dan nilai kelengkungan leleh pertama (ϕ_y) juga akan semakin besar.

Kelengkungan ultimit dan momen dari penampang bertulangan rangkap (Gambar 3.11) dapat dicari dengan persamaan :

$$a = \frac{A_s \cdot f_y - A_s' \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \dots\dots\dots(3.32)$$

$$Mu = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_s' \cdot f_y \cdot (d - d') \dots\dots\dots(3.33)$$

substitusi Persamaan (3.32) dan (3.33) menghasilkan :

$$Mu = \rho \cdot b \cdot (h - d_s)^2 \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho \cdot f_y \cdot \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)}{1,7 \cdot f_c'}\right) + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')$$

$$Mu = \rho \cdot b^3 \cdot (C_3)^2 \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^2 \cdot f_y \cdot C_1 \cdot \left(1 - 0,59 \frac{\rho \cdot f_y \cdot C_1}{f_c'}\right) + \rho' \cdot b^2 \cdot C_3 \cdot \frac{h}{b} \cdot f_y \cdot C_2 \dots\dots(3.34)$$

kelengkungan ultimit :

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_c \cdot \beta_1}{a} \dots\dots\dots(3.35)$$

dari Persamaan (3.32), nilai a dipengaruhi oleh lebar tampang (b). Jika ρ , ρ' , f_c' , f_y , d_s , dan d' konstan, nilai a akan membesar dengan mengecilnya nilai b . Maka Persamaan (3.35) memberikan hubungan kelengkungan ultimit (ϕ_u) akan kecil dengan membesarnya rasio h/b .

Ukuran peningkatan momen lentur setelah leleh dikenal dengan M_u/M_y .

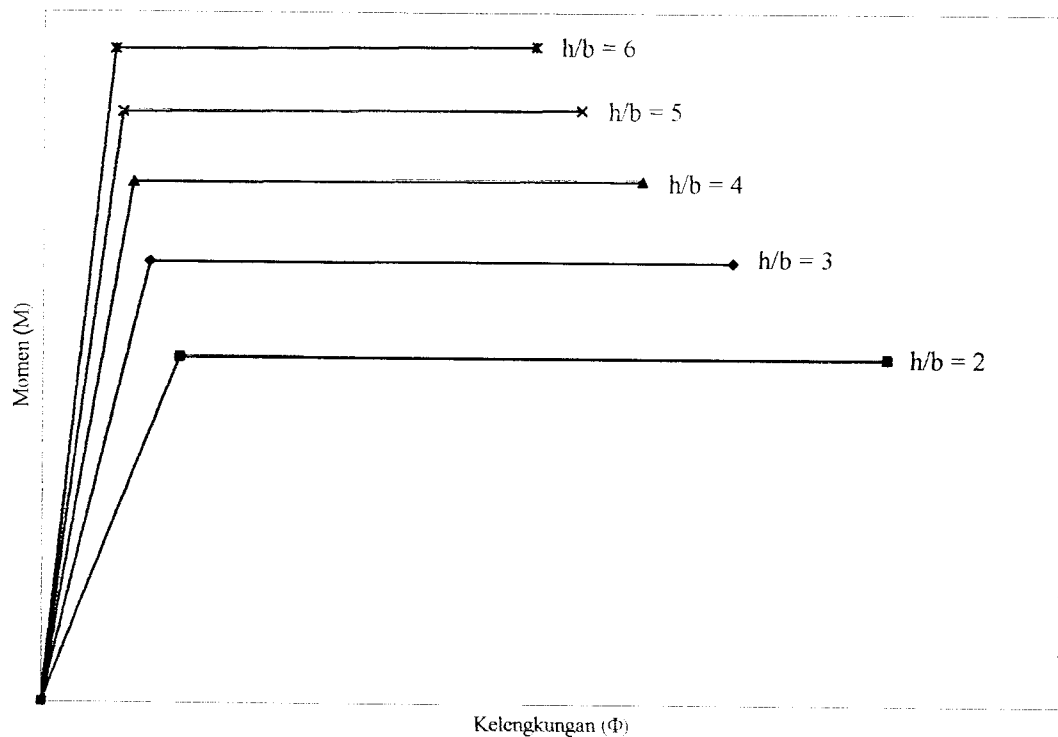
Rasio ini ditentukan dari Persamaan (3.29) dan (3.34), menghasilkan :

$$\frac{M_u}{M_y} = \frac{\left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right) \left[1 - \frac{\rho \cdot f_y \left(1 - \frac{\rho'}{\rho}\right)}{1,7 \cdot f_c'}\right] + \rho' \cdot b \cdot d \cdot f_y \cdot (d - d')}{\left(1 - \frac{k}{3}\right)} \dots\dots\dots(3.36)$$

Rasio ϕ_u/ϕ_y dapat ditulis :

$$\frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{\varepsilon_c \cdot \beta_1 \cdot E_s \cdot (1 - k)}{a \cdot f_y} \cdot (h - d_s) \dots\dots\dots(3.37)$$

Rasio h/b yang tinggi akan memiliki momen yang besar dan kelengkungan yang kecil. Hubungan momen dengan kelengkungan ditunjukkan pada Gambar 3.12 dalam variasi h/b .



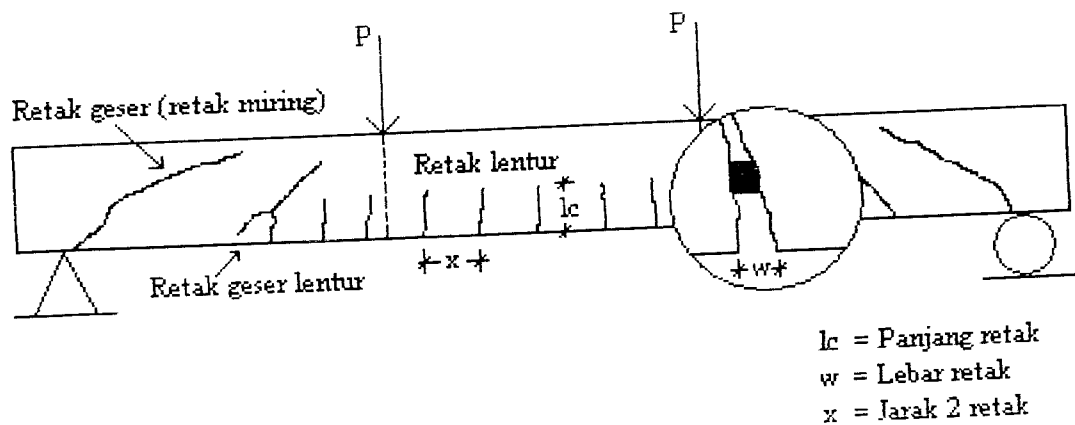
Gambar 3.12 Hubungan momen dengan kelengkungan dengan berbagai rasio h/b

3.5. Ragam Retak

Beton merupakan bahan yang lemah terhadap tegangan tarik, dengan hanya memiliki kekuatan tarik kira-kira 8% hingga 15% dari kekuatan tekannya. Pada balok terlentur, dimana tegangan tarik akan terjadi pada satu bagian bawah yang dibatasi oleh garis netral penampang, dan jika tegangan yang terjadi sudah melebihi dari tegangan tarik beton, maka retak lentur akan terjadi.

Pada balok dengan perletakan sederhana yang seperti diperlihatkan di dalam Gambar 3.13, ditunjukkan jenis-jenis retak yang mungkin terjadi. Retak lentur cenderung terjadi merambat hampir vertikal ke dalam balok, retak ini menimbulkan pengurangan tegangan sampai timbulnya suatu kombinasi yang

kritis dari tenggangan lentur dan geser di dekat daerah dalam garis salah satu retak. Retak miring kemudian terbentuk, retak miring terjadi karena penambahan beban yang mengakibatkan tegangan geser yang tinggi (Wang dan Salmon, 1993).



Gambar 3.13 Jenis-jenis dan ukuran retak

Untuk mengetahui sampai sejauh mana pengaruh peningkatan nilai rasio h/b penampang balok terhadap pola retak yang terjadi, maka perlu dilakukan pengukuran dan identifikasi retak yang terjadi pada setiap momen, sehingga didapat hubungan pola retak yang terjadi dengan peningkatan nilai rasio h/b penampang balok.

3.6. Perhitungan Momen Retak

Momen retak secara teoritis menurut Istimawan (1999), dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{Y_t} \dots \dots \dots (3.38)$$

dimana :

M_{cr} = Momen retak

f_r = Modulus retak beton = $0,7 \cdot \sqrt{f'_c}$

I_g = Inersia balok = $\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$

Y_t = Jarak garis netral ke serat tepi tertarik

Inersia balok masing-masing Penampang sebagai akibat dari variasi h/b tampang balok akan sangat mempengaruhi besar momen retak balok.

3.5. Defleksi Balok

Defleksi batang-batang struktural merupakan fungsi dari panjang bentang, perletakan, atau kondisi-kondisi tumpuannya, jenis pembebanan, dan kekakuan lentur (EI) dari elemen (Edward G. Nawy, 1990).

Persamaan umum defleksi maksimum (Δ_{maks}) pada balok elastis adalah :

$$\Delta_{maks} = K \frac{P L_n^3}{48 E I_c} \dots\dots\dots (3.39)$$

dimana :

P = Beban total pada bentang

L_n = Panjang bentang bersih

E_c = Modulus elastisitas beton

I_c = Momen inersia Penampang

K = Faktor yang bergantung pada derajat kekakuan tumpuan

Persamaan (3.39) dapat dinyatakan dalam momen lentur sehingga defleksi pada suatu titik pada balok adalah :

$$\Delta_{\text{maks}} = K \frac{M L^2}{E_c I_e} \dots\dots\dots(3.40)$$

dimana :

K = Suatu faktor yang bergantung pada kekakuan tumpuan dan kondisi pembebanan

M = Momen yang bekerja pada penampang

I_e = Momen Inersia efektif

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Bahan dan Benda Uji

4.1.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji penelitian ini adalah :

- a. Semen Portland jenis I merek Semen Gresik yang ada di pasaran Daerah Istimewa Yogyakarta.
- b. Agregat kasar (Split) berasal dari Clereng dengan diameter maksimum 10 mm.
- c. Agregat halus (Pasir) berasal dari Sungai Krasak.
- d. Baja tulangan polos D 8 mm digunakan untuk penulangan tarik dan baja D 5,5 mm digunakan untuk sengkang. Baja tulangan diperoleh dari baja-baja tulangan yang ada di pasaran Daerah Istimewa Yogyakarta.
- e. Air bersih dari instalasi air di Laboratorium BKT-FTSP Universitas Islam Indonesia.

4.1.2. Benda uji

Benda uji berupa balok beton bertulang dengan luas tampang 29400 mm^2 dengan luas tulangan sama $A_s = 200,062 \text{ mm}^2$, $A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$, serta $f_y = 280 \text{ MPa}$ dan $f_c' = 20 \text{ MPa}$. Panjang balok 3 meter, dengan variasi rasio h/b dibuat sebanyak 5 buah, Yaitu :

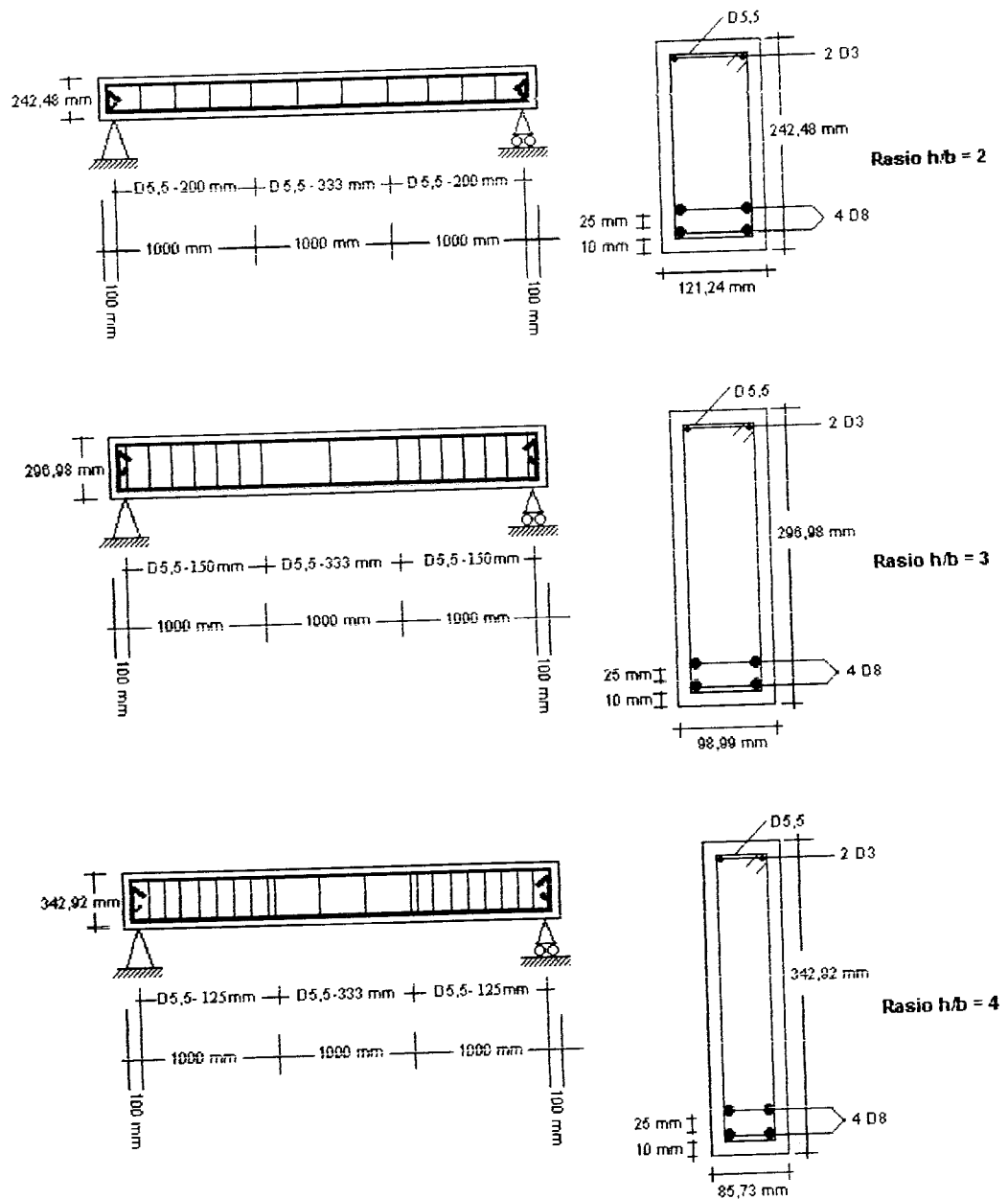
1. Satu buah sampel rasio $h/b = 2$ dengan ukuran tampang $(121,244 \times 242,487) \text{ mm}^2$.
2. Satu buah sampel rasio $h/b = 3$ dengan ukuran tampang $(98,995 \times 296,985) \text{ mm}^2$.
3. Satu buah sampel rasio $h/b = 4$ dengan ukuran tampang $(85,732 \times 342,029) \text{ mm}^2$.
4. Satu buah sampel rasio $h/b = 5$ dengan ukuran tampang $(76,681 \times 383,406) \text{ mm}^2$.
5. Satu buah sampel rasio $h/b = 6$ dengan ukuran tampang $(70 \times 420) \text{ mm}^2$.

Keseluruhan sampel di atas memakai tulangan tarik dengan $\rho = 0.008$, dan tulangan tekan dengan $\rho' = 0,00058$, dengan penulangan geser menggunakan baja polos $\varnothing 5,5 \text{ mm}$. Pada penulangan geser, karena tidak diharapkan terjadinya kegagalan geser maka tulangan geser dipasang $1/2$ dari jarak tulangan geser hasil hitungan.

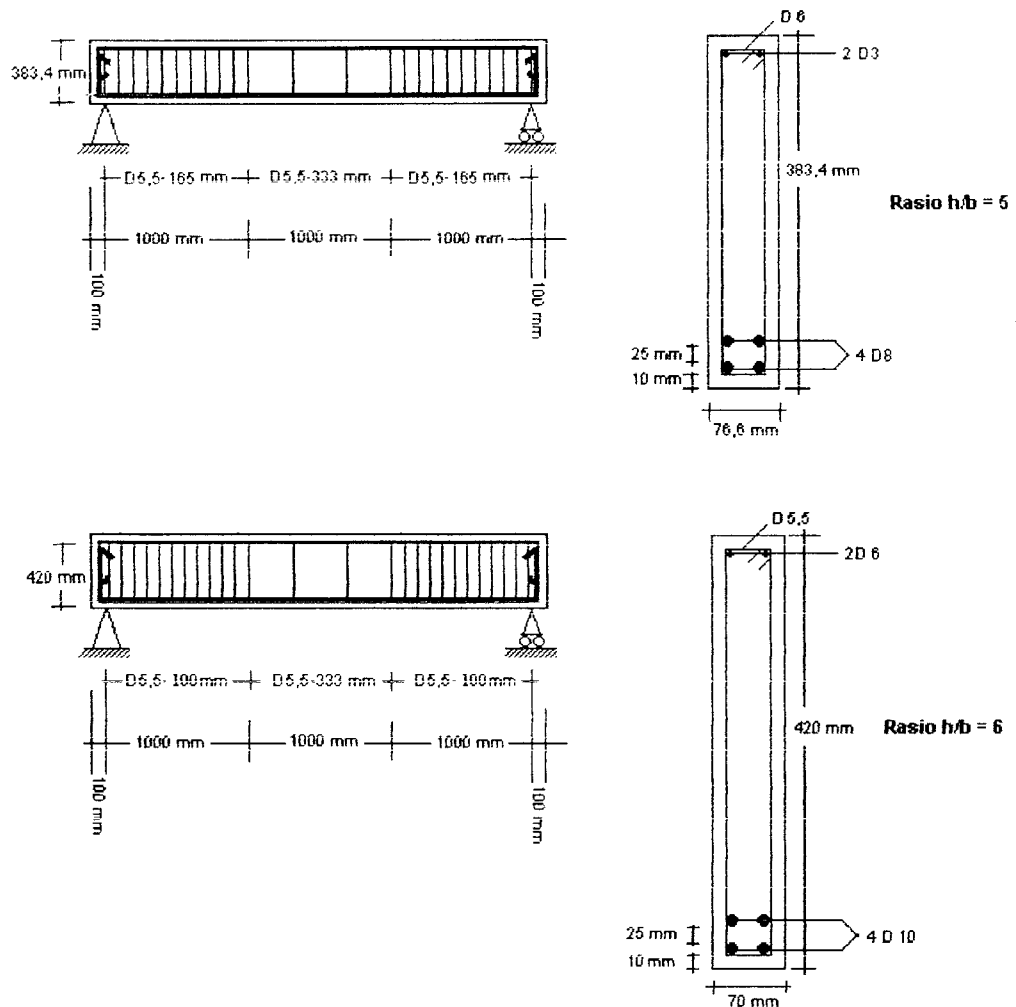
Pada setiap pembuatan satu benda uji balok dibuat juga 2 buah benda uji silinder beton, sehingga diperoleh 10 benda uji untuk mengetahui kuat tekan dan berat satuan beton yang telah dibuat, sedangkan semua ukuran baja yang digunakan diperiksa dan dilakukan uji tarik agar diketahui tegangan leleh dan tegangan maksimumnya.

Pembuatan adukan beton dalam penelitian dilakukan dengan menggunakan metode DOE (*Department of Environment*), dengan mencapai mutu beton rencana adalah 20 MPa, dan setelahnya dilakukan perawatan beton dengan menjaga permukaan beton selalu lembab. Hal ini dimaksudkan agar proses hidrasi semen

berlangsung sempurna, rawatan dilakukan dengan menutupi sampel-sampel yang telah dibuat dengan karung goni basah dan menjaga kelembabannya dengan cara membasahnya secara berkala. Rawatan dilakukan paling sedikit selama 2 minggu.



Gambar 4.1 Perletakan dan penampang serta penulangan benda uji



Gambar 4.2 Perletakan dan penampang serta penulangan benda uji

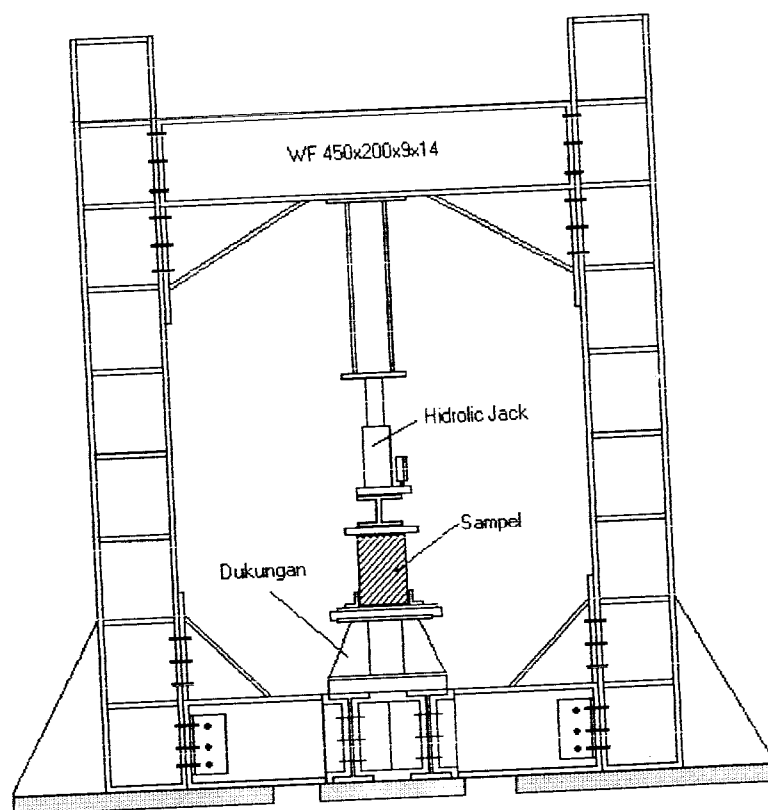
4.2. Peralatan Penelitian

Untuk kelancaran penelitian diperlukan beberapa peralatan yang akan digunakan sebagai sarana mencapai tujuan penelitian. Peralatan-peralatan yang akan digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Alat Uji lentur (*Loading Frame dan Hydraulic Jack*)

Loading frame merupakan portal yang berdiri diatas lantai beton dengan perantara pelat dasar dari baja setebal 14 mm. Agar *loading frame* tetap stabil, pelat dasar dibaut kelantai beton dan kedua kolomnya dihubungkan oleh balok WF 450x200x9x14 mm.

Hidraulic jack digunakan untuk memberikan pembebanan pada pengujian lentur balok skala penuh. Dalam penelitian ini digunakan hidraulic jack dengan kapasitas maksimum 30 ton dan ketelitian pembacaan beban sebesar 0,5 ton. Bentuk fisik *loading frame* dan hidraulic jack ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Alat pengujian lentur (*loading frame*)

2. Mesin uji desak

Mesin uji desak digunakan untuk mengetahui kuat desak silinder-silinder beton yang telah dibuat agar diketahui kuat desak karakteristik silinder beton (f_c'). Dalam penelitian ini digunakan mesin uji desak merk *Controls* dengan kapasitas 1000 kN.

3. Mesin uji kuat tarik

Peralatan ini digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum dan kuat leleh baja tulangan. Dalam penelitian ini digunakan *Universal Testing Machine* (UTM) merk *Shimatsu* type UMH 30 dengan kapsitas 30 ton.

4. Dial Gauge

Alat ini digunakan untuk mengukur besarnya lendutan yang terjadi pada balok yang dibebani dalam proses pengujian kuat lentur, untuk pengujian penuh digunakan dial gauge dengan kapasitas maksimum 50 mm dan mempunyai ketelitian maksimum 0,01 mm.

5. Dukungan sendi dan rol

Dukungan sendi dipasang pada salah satu ujung balok, sedang ujung yang lainnya dipasang dukungan rol, sehingga balok mendekati perlakuan balok dengan dukungan sederhana (*simple beams*)

6. Mistar dan Kaliper

Mistar dari logam digunakan untuk mengukur dimensi cetakan benda uji, sedangkan kaliper digunakan untuk mengukur diameter tulangan.

7. Mesin aduk beton (molen)

Mesin aduk beton digunakan untuk mengaduk campuran beton yang akan dibuat.

8. Cetakan silinder beton

Cetakan silinder beton digunakan untuk membuat benda uji silinder beton dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm.

4.3. Pelaksanaan Penelitian

4.3.1. Persiapan bahan

Kegiatan persiapan meliputi : uji sifat-sifat teknis bahan penyusun beton (pasir, agregat, dan semen), perencanaan adukan beton, uji kuat desak silinder beton, uji kuat tarik baja tulangan. Sedangkan uji sifat-sifat teknis bahan penyusun beton dan uji pendahuluan yang perlu dilakukan antara lain :

1. Uji pasir

Uji pasir bertujuan memperoleh berat jenis keadaan SSD dan modulus kehalusan pasir, didapat berat jenis SSD 2,6 dan berat volume SSD 2,6.

2. Uji Agregat (batu pecah)

Uji batu pecah bertujuan mendapatkan berat jenis dan berat volume batu pecah keadaan SSD. Didapat berat jenis SSD 2,59 dan berat volume SSD 1,5 ton/m³.

3. Perencanaan campuran adukan beton

Perencanaan campuran adukan beton menggunakan cara yang direkomendasikan oleh *British Standard* (DOE), hasil perhitungannya

dilampirkan pada lampiran 1. Kuat desak rencana diperlukan bahan penyusun sebagai berikut (1 m^3): semen 285,536 Kg, pasir 889,327 Kg, batu pecah 1065,238 Kg, dan air 160 liter.

4.3.2. Pembuatan sampel

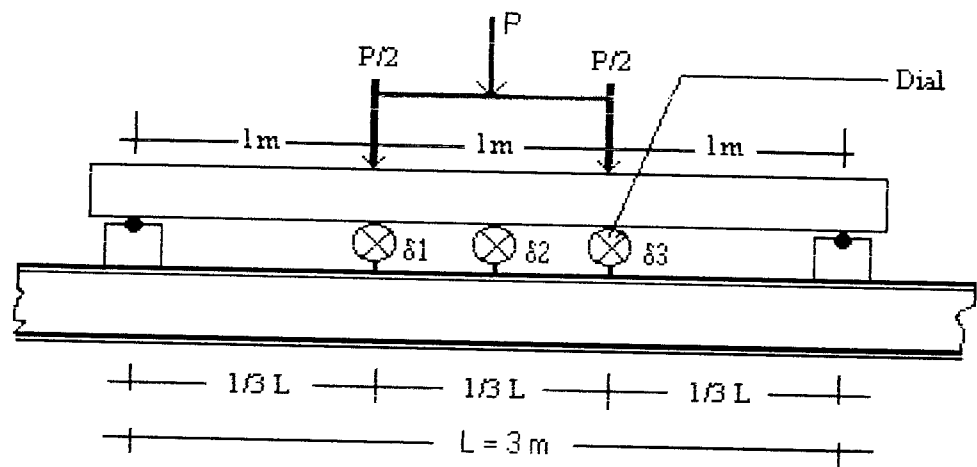
Dibuat 5 buah sampel balok dengan variasi ukuran h/b 2, 3, 4, 5, 6 dengan luas tampang 29400 mm^2 dan luas tulangan tarik (A_s) $201,062 \text{ mm}^2$. Ukuran sampel dibuat seperti pada Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Pada setiap pembuatan satu buah sampel balok dibuat juga 2 buah sampel silinder beton, dengan tujuan diketahui kuat desak karakteristik silinder (f'_c) masing-masing sampel balok yang telah dibuat. Setelah sampel dibuat akan dilakukan kegiatan perawatan beton, dilakukan dengan cara menyelimuti sampel dengan karung basah dan dikontrol dengan membasahi dengan air setiap harinya. Pengujian kekuatan lentur dilakukan setelah sampel berumur 28 hari.

4.3.3. Pengujian kuat lentur

Pelaksanaan pengujian kuat lentur dilakukan dengan cara sebagai berikut :

1. Benda uji diletakkan pada mesin pemberi gaya transversal dengan kekuatan maksimum 30 ton dengan perletakan sendi dan rol. Perletakan benda uji ditunjukkan oleh Gambar 4.4.
2. Pengujian siap dilakukan. Gaya/beban diberikan secara perlahan-lahan, beban konstan dan beban dinaikkan secara berangsur-angsur hingga pada batas tertentu sampai pada tegangan maksimum, sehingga benda uji akan mengalami retak, lendutan maksimum dan patah.

3. Retak yang terjadi ditandai pada benda uji saat pengujian berlangsung. Sehingga retakan yang terjadi dapat terekam dengan baik menurut jenjang-jenjang prosesi pemberian beban yang dilakukan. Lendutan dan beban-beban dicatat agar bisa diperoleh hubungan dengan retakan yang terjadi.



Gambar 4.4 Prosedur Pengujian

Variabel-variabel yang di ukur dalam proses pengujian :

1. Beban, (P). Pemberian beban-beban pada pengujian dari beban awal hingga beban patah
2. Lendutan (*deflection*), δ . Lendutan didapat dengan pencatatan pembacaan tiga buah dial pada masing-masing jenjang pemberian beban dari setiap titik-titik tinjau yang sudah ditentukan seperti tergambar pada Gambar 4.4.

Dari hasil pengujian didapat momen, M :

$$M = \frac{1}{6} PL \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana :

M = Momen (kN.m)

P = Beban (kN)

L = Panjang bentang (m)

4.3.4. Pengujian kuat tekan beton

Langkah pengujian kuat desak beton adalah sebagai berikut :

1. Pengujian diawali dengan pengukuran diameter rata-rata benda uji, kemudian benda uji diletakkan pada alas pembebanan mesin uji kuat desak beton.
2. Mesin uji desak dihidupkan, pembebanan akan diberikan berangsur-angsur, sehingga benda uji hancur pada beban maksimal, kemudian mesin dimatikan, besar beban dicatat sesuai jarum pembebanan.

Kuat desak beton dapat diketahui dengan cara membagi beban ultimit yang dicapai dengan luas permukaan bagian yang didesak, secara matematis dapat ditulis sebagai berikut :

$$f_c' = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(4.2)$$

dengan :

f_c' = Kuat desak beton (MPa)

P = Beban ultimit (N)

A = Luas penampang benda uji (m^2)

4.3.5 Pengujian kuat tarik baja tulangan

Data yang diambil pada pengujian kuat tarik baja tulangan adalah beban maksimum, beban patah dan batas luluh awal. Tegangan tarik tulangan baja dapat diketahui dengan cara membagi batas luluh awal dengan luas rata-tara dari diameter baja tulangannya.

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian dimaksudkan untuk mendapatkan data primer berupa kuat tekan beton, kuat tarik baja tulangan, beban-lendutan pada berbagai rasio h/b penampang balok. Data-data yang diperoleh kemudian dianalisa untuk memperoleh grafik Beban-Lendutan ($P-\Delta$) dan grafik Momen-Kelengkungan ($M-\Phi$) serta angka kekakuan (k).

5.1. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton diketahui dari uji tekan 10 buah silinder beton ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan pada umur beton 28 hari, dengan sebelumnya sampel mendapatkan perawatan perendaman.

Dari hasil uji kuat tekan beton didapatkan kuat tekan rata-rata adalah 20,294 MPa, sehingga memenuhi kuat tekan beton yang disyaratkan. Hasil uji 10 silinder beton disajikan pada lampiran 1e, sedangkan rangkuman hasil uji kuat tekan silinder beton adalah sebagai berikut :

$$\text{Kuat tekan rata-rata (fcr')} = 20,294 \text{ MPa}$$

$$\text{Standart deviasi (sd)} = 4,120 \text{ MPa}$$

Jika penyimpangan maksimum yang diijinkan adalah 5% dari kuat tekan karakteristik silinder beton , maka :

$$f_c' = f_{cr}' - 1,64 \text{ sd} \dots\dots\dots(5.1)$$

$$f_c' = 20,294 - 1,64 (4,120)$$

Didapat Kuat Tekan Silinder Beton :

$$f_c' = 13,5 \text{ MPa}$$

Berdasar pada hasil pengujian, didapat kuat tekan beton (f_c') adalah 13,5 MPa

5.2. Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan

Uji kuat tarik baja tulangan dilakukan untuk mengetahui kualitas baja tulangan yang terpasang dalam benda uji yang telah dibuat. Hasil dari pengujian kuat tarik baja tulangan yang terpasang ditunjukkan pada lampiran 1g, rangkuman hasil pengujian kuat tarik baja tulangan ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan

Diameter (mm)	Kuat Leleh (MPa)	Kuat Tarik (MPa)
8.133	279,088	422.481
5,467	279.233	430.986

5.3. Hasil Uji Lentur Balok dan Pembahasan

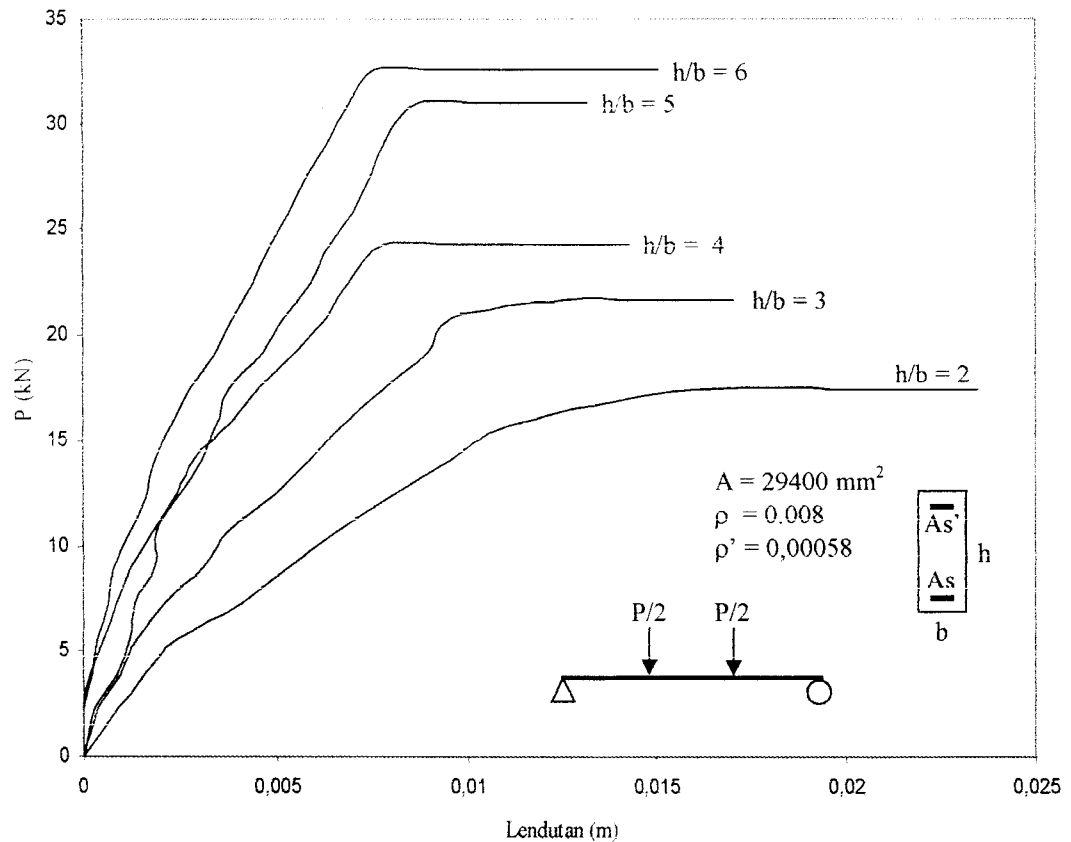
5.3.1. Hubungan beban dengan lendutan balok

1. Hubungan beban dengan lendutan hasil pengujian

Pengujian kuat lentur balok dilakukan setelah umur beton mencapai 28 hari. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban dengan metode *the third point loading*, secara bertahap balok diberi beban dengan kenaikan sebesar 2,3 kN, kemudian pada setiap tahap pembebanan lendutan yang terjadi diukur, maka didapat data hubungan Beban (P) dengan Lendutan (Δ). Data (P- Δ) hasil

pengujian pada berbagai variasi h/b penampang balok disajikan pada Lampiran 3aa, 3ba, 3ca, 3da, 3ea.

Hubungan Beban – Lendutan ($P-\Delta$) hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Grafik hubungan Beban Lendutan berbagai variasi h/b balok

2. Kuat lentur balok

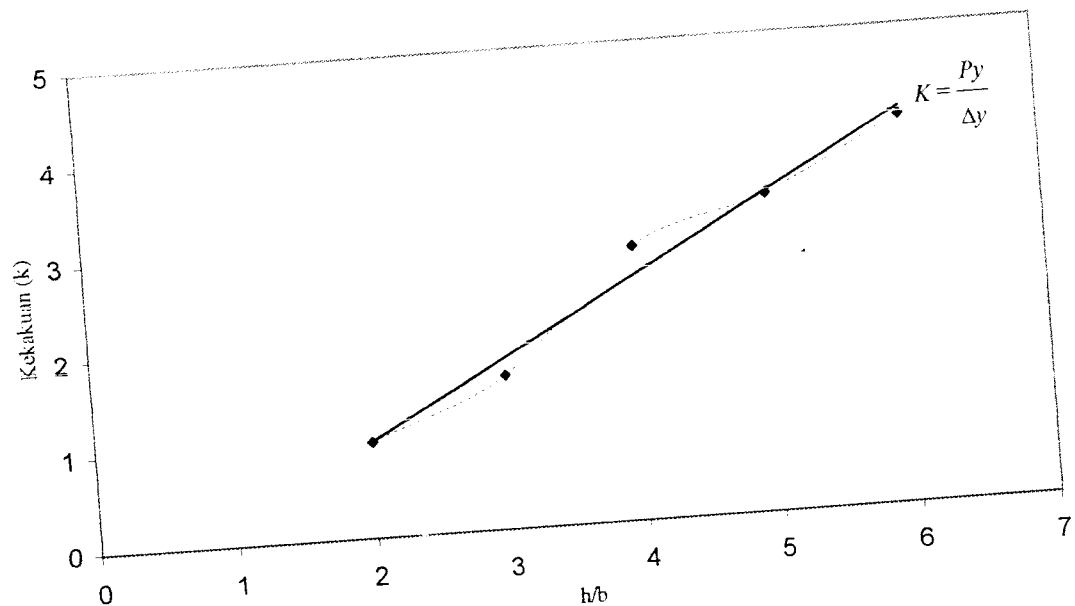
Kekakuan balok (k) diketahui dari nilai banding beban leleh (P_y) dan lendutan leleh (Δy). Kekakuan balok dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$k = \frac{P_y}{\Delta y} \dots\dots\dots (5.4)$$

Dengan mengambil nilai $k = 1$ pada balok h/b penampang = 2, maka angka kekakuan balok variasi h/b yang lain dapat diketahui dan hasilnya disajikan pada Tabel 5.2 dan Gambar 5.2 sebagai berikut :

Tabel 5.2 Kekakuan Balok (K)

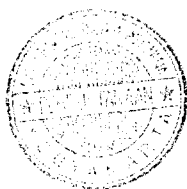
h/b	P_y (kN)	Δy (m)	K	K (%)
2	17,24	0,01600	1,0000	100,00
3	21,55	0,01249	1,6013	160,13
4	24,14	0,00783	2,8613	286,13
5	31,04	0,00870	3,3112	331,12
6	32,76	0,00753	4,0404	404,04



Gambar 5.2 Hubungan h/b dengan Kekakuan (k)

3. Pembahasan kekakuan balok (k)

Dari hasil pengujian didapatkan hubungan beban-lendutan ($P-\Delta$) pada masing-masing variasi h/b penampang balok, yang kemudian dapat diketahui



kekakuan balok. Dari hasil pengujian, angka kekakuan ($k = P_y/\Delta y$) balok meningkat dengan membesarnya nilai rasio h/b penampang, hal ini dapat dilihat pada grafik beban lendutan yang diperoleh dari hasil pengujian dan analisa data pada Tabel 5.2. dan Gambar 5.2.

Menganggap balok dengan rasio tinggi terhadap lebar (h/b) penampang = 2 dengan nilai $k = 1$, maka nilai kekakuan penampang balok dengan h/b variasi yang lain dapat diketahui. Terlihat pada Gambar 5.2 semakin tinggi rasio h/b penampang balok maka akan semakin tinggi kekakuannya, karena semakin tinggi rasio h/b penampang maka momen inersia terhadap sumbu x (I_x) juga akan menjadi besar. Dengan kata lain semakin besar rasio h/b penampang balok maka balok akan semakin kaku.

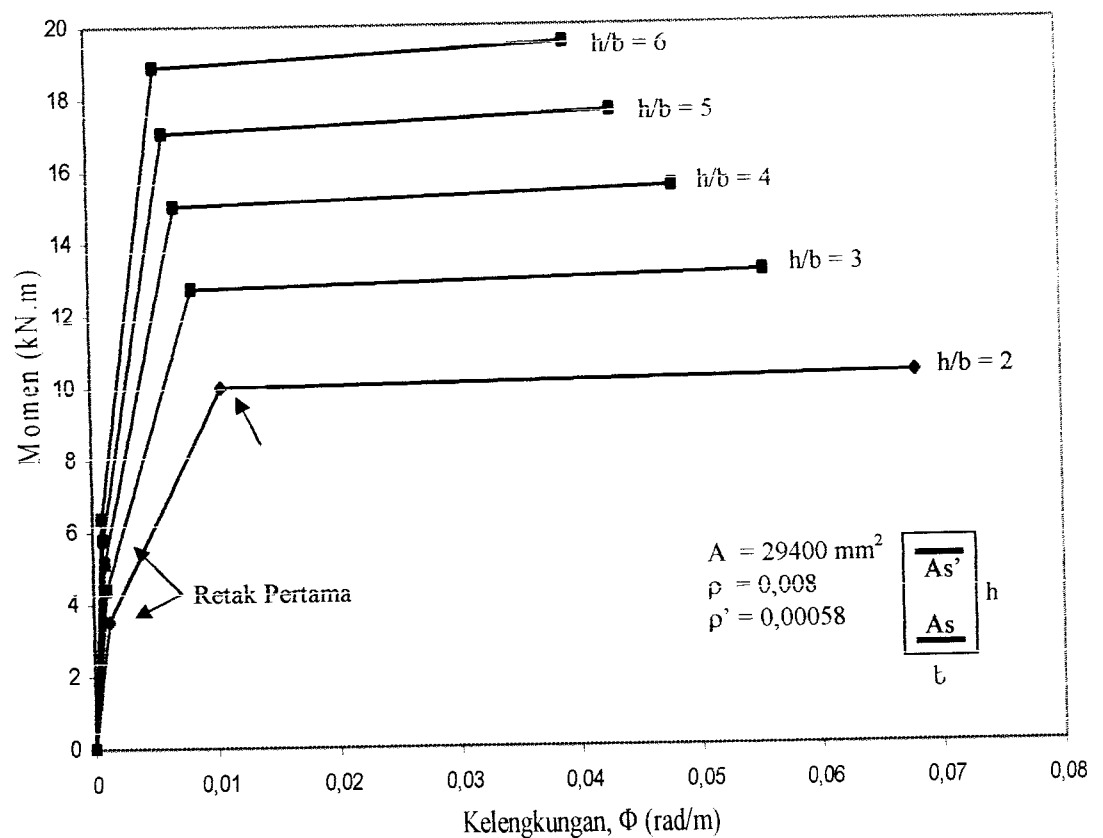
5.3.2. Hubungan momen dengan kelengkungan

1. Momen kelengkungan teoritis

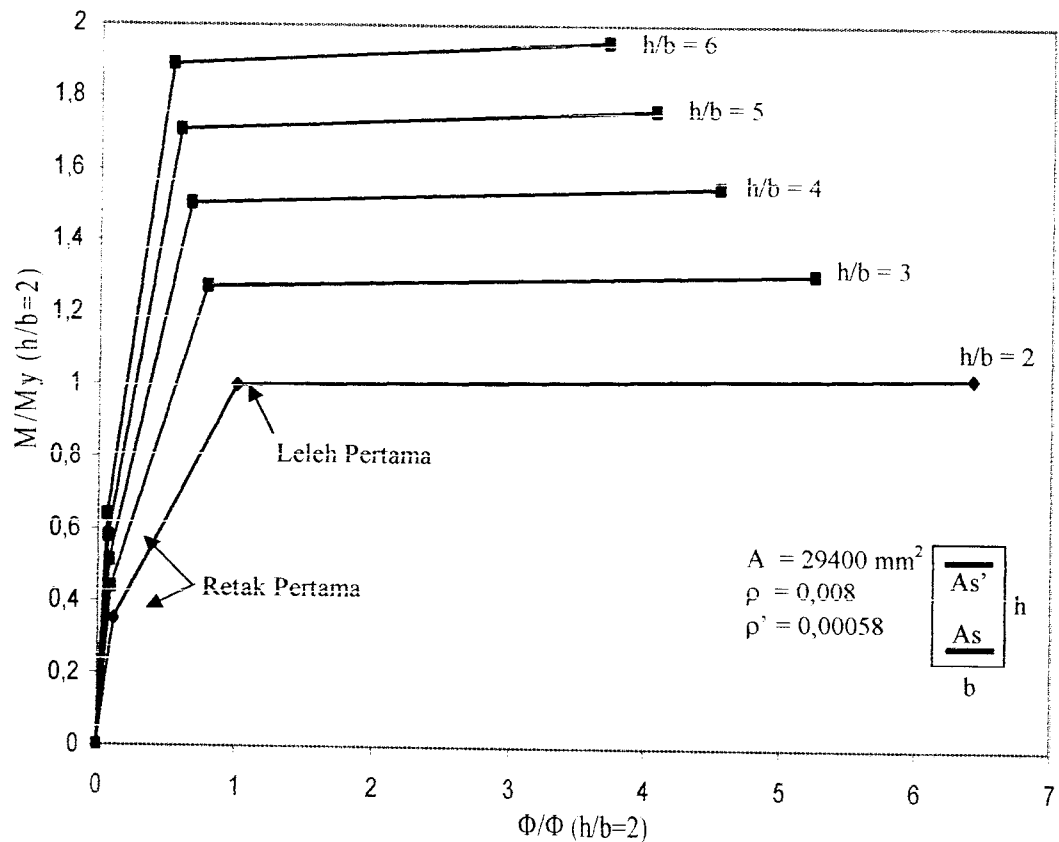
Mengacu pada Park and Paulay (1975), nilai momen dan kelengkungan dapat dicari dengan perhitungan teoritis. Dengan menggunakan Persamaan (3.28), (3.31), (3.33), dan (3.35) besar momen dan kelengkungan pada masing-masing rasio h/b penampang dapat diketahui. Hasil perhitungan hubungan momen dengan kelengkungan secara teoritis disertakan pada Lampiran 2a-2e, sedang hasilnya dapat dilihat pada Tabel 5.3 dan Gambar 5.3.

Tabel 5.3 Hasil Perhitungan Momen Kelengkungan Teoritis

Sampel	h/b	M_{rt} (kN.m)	Φ_{rt} $\times 10^{-4}$ (rad/m)	M_y (kN.m)	Φ_y $\times 10^{-4}$ (rad/m)	M_u (kN.m)	Φ_u $\times 10^{-4}$ (rad/m)
1	2	3,52	12,80	9,996	106,000	10,269	680,000
2	3	4,396	10,50	12,725	82,889	13,107	555,300
3	4	5,138	9,112	15,025	69,960	15,499	480,800
4	5	5,795	8,165	17,053	61,510	17,608	430,100
5	6	6,389	7,463	18,885	55,450	19,510	392,600

Gambar 5.3 Grafik hubungan Momen-Kelengkungan Teoritis variasi h/b

Untuk memenuhi gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh rasio h/b penampang balok dengan kurva momen-kelengkungan maka dibuat grafik non dimensional sebagai berikut :



Gambar 5.4 Grafik non dimensional hubungan $M/M_y (h/b=2)$ dengan $\Phi/\Phi (h/b=2)$ pada berbagai variasi h/b

2. Momen kelengkungan hasil pengujian

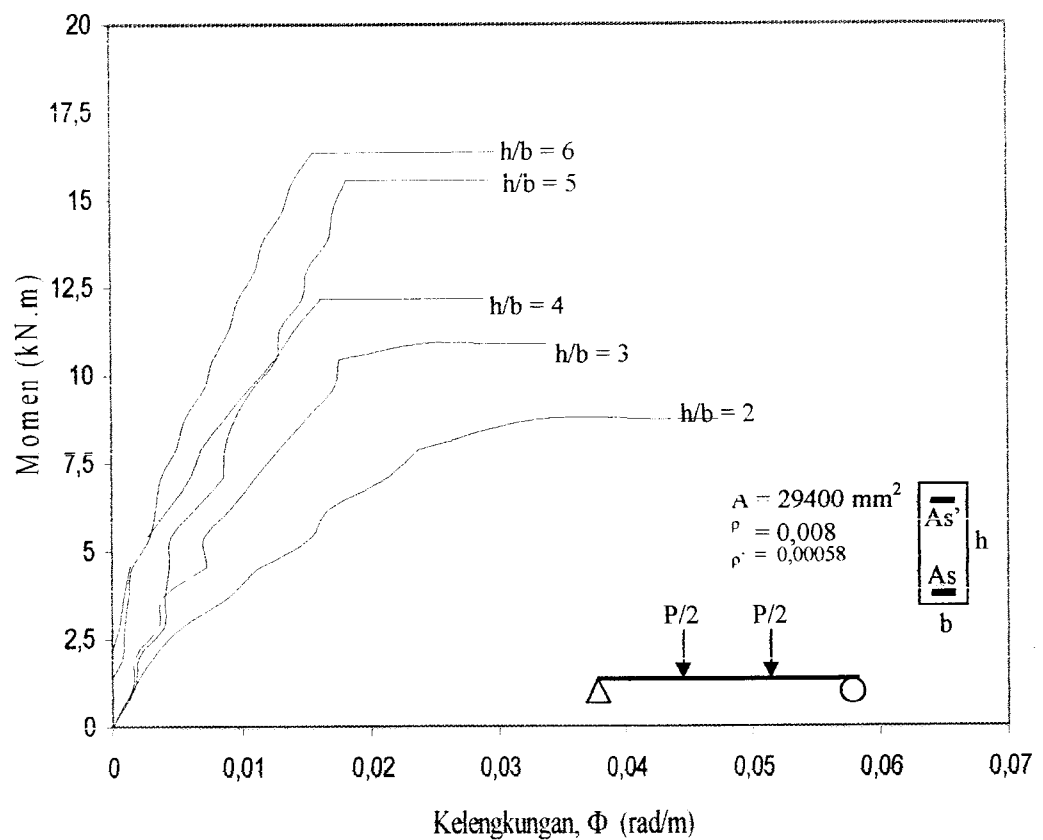
Dari hasil pengujian lentur didapat data primer berupa beban (P) dan lendutan (Δ) yang disajikan pada lampiran 3. Dari data tersebut dapat diketahui besar momen dan kelengkungan serta faktor kekakuan. Kelengkungan balok diturunkan dari data perpindahan dengan pendekatan *central differencia*.

Berdasarkan data hasil pengujian pada Lampiran 3aa-3ea, dapat diketahui momen dan kelengkungan masing-masing rasio h/b dengan menggunakan Persamaan (3.26) dan (4.1), dengan menggunakan kedua persamaan tersebut

dapat diketahui momen dan kelengkungan pada saat retak pertama, leleh, dan ultimit, hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5.4 dan Gambar 5.5.

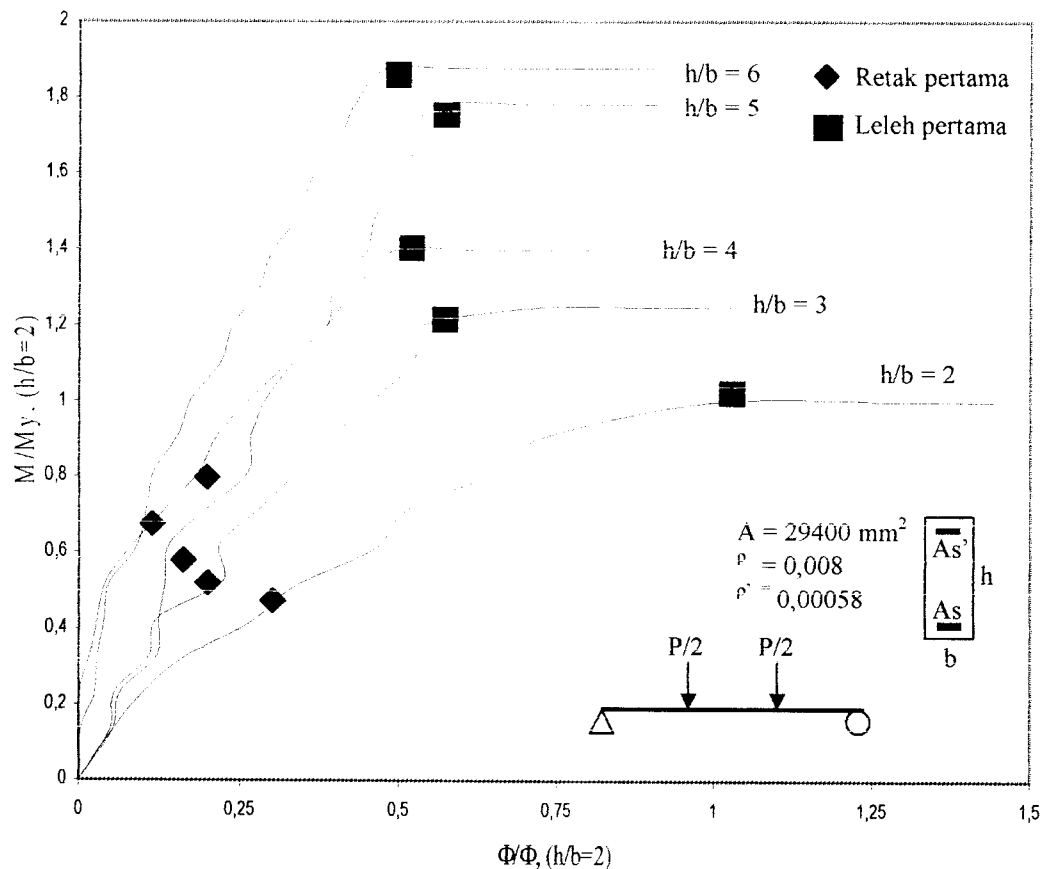
Tabel 5.4 Momen dan Kelengkungan Hasil Pengujian

h/b	M _{rt} (kN.m)	Φ_{rt} $\times 10^{-4}$ (rad/m)	M _y (kN.m)	Φ_y $\times 10^{-4}$ (rad/m)	M _u (kN.m)	Φ_u $\times 10^{-4}$ (rad/m)
2	4,495	1112	8,722	328,700	8,722	474,800
3	4,551	72,9	10,892	239,000	10,892	339,300
4	5,425	27,8	12,189	161,900	12,189	290,700
5	7,088	86,4	15,542	182,000	15,542	298,700
6	6,217	34,1	16,363	156,400	16,363	300,800



Gambar 5.5 Grafik Hubungan Momen Kelengkungan Hasil Pengujian

Untuk memenuhi gambaran yang lebih jelas mengenai pengaruh rasio h/b penampang balok dengan kurva momen-kelengkungan hasil pengujian maka dibuat grafik nondimensional sebagai berikut :

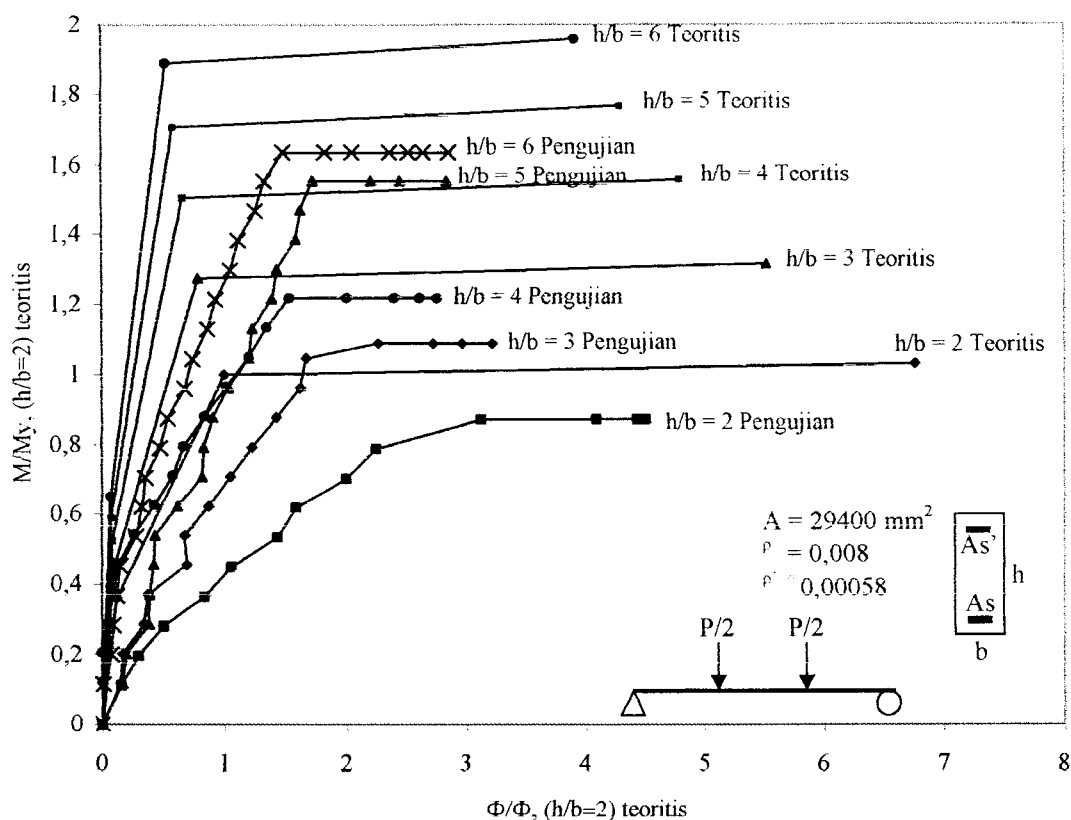


Gambar 5.6 Graffik non dimensional hubungan $M/M_y, (h/b=2)$ dengan $\Phi/\Phi, (h/b=2)$ pada berbagai variasi h/b

3. Momen-Kelengkungan teoritis dan Momen-Kelengkungan hasil pengujian

Rasio momen-kelengkungan teoritis dengan momen-kelengkungan hasil pengujian bertujuan untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan yang terjadi. Rasio momen-kelengkungan teoritis dengan momen-kelengkungan hasil

pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.7. Besar penyimpangan yang terjadi ditunjukkan pada Tabel 5.5.



Gambar 5.7 Grafik non dimensional $M/My, (h/b=2)$ dengan $\Phi/\Phi, (h/b=2)$ perbandingan teoritis dengan hasil pengujian

Tabel 5.5 Rasio Momen nominal pengujian dengan Momen nominal teoritis

Sampel	h/b	Mn Teoritis (kN.m)	Mn Pengujian (kN.m)	Rasio Mn pengujian dg Mn teoritis (%)
1	2	9,996	8,722	87,25
2	3	12,725	10,892	85,60
3	4	15,025	12,189	81,12
4	5	17,053	15,542	91,14
5	6	18,885	16,363	86,65
rata-rata				86,35

Tabel 5.6 Rasio kelengkungan (Φ) pengujian dengan kelengkungan (Φ) teoritis

Sampel	h/b	Φ Teoritis (rad/m)	Φ Pengujian (rad/m)	Rasio Φ pengujian dg Φ teoritis (%)
1	2	0,0106	0,0329	310,38
2	3	0,0082	0,0229	279,27
3	4	0,0070	0,0162	231,43
4	5	0,0061	0,0182	298,36
5	6	0,0055	0,0156	283,64
rata-rata				280,61

4. Pembahasan Momen-Kelengkungan balok (Faktor Kekakuan, EI)

Hubungan momen kapasitas dengan kelengkungan menunjukkan faktor kekakuan (EI). Faktor kekakuan merupakan rasio momen kapasitas balok dengan kelengkungan, atau M/Φ . Faktor kekakuan (EI) akan dipengaruhi oleh kondisi dukungan yang akan menentukan derajat pengekangan, mutu bahan (E), dan geometri penampang (I).

Faktor kekakuan balok dapat dianalisa dari grafik hubungan momen dan kelengkungan ($M-\Phi$) yang didapat dari hasil pengujian seperti ditunjukkan pada Tabel 5.5, Tabel 5.6 dan Gambar 5.6. Dari hasil analisa didapat, semakin tinggi nilai rasio h/b penampang balok, maka akan semakin besar faktor kekakuannya.

Pada Gambar 5.6 tampak bahwa momen kelengkungan hasil pengujian tidak sesuai dengan momen kelengkungan teoritis, bahkan grafik momen kelengkungan hasil pengujian lebih rendah dari momen kelengkungan teoritis. Hal ini mungkin disebabkan oleh kondisi dukungan, dan mutu bahan, serta ukuran geometri penampang yang tidak sesuai pada saat pengujian dengan teoritis.

Dari ketidak sesuaian grafik momen-kelengkungan teoritis dengan hasil pengujian yang ditunjukkan pada Gambar 5.6, dapat diketahui besar perbedaannya yang seperti di tunjukkan pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6. Reduksi untuk momen teoritis ke momen hasil pengujian rata-rata adalah 0,86. Sedangkan reduksi untuk kelengkungan (Φ) teoritis ke kelengkungan (Φ) hasil pengujian adalah 2,8.

Faktor kekakuan (EI) akan dipengaruhi oleh modulus elastisitas dan momen inersia. Hal ini disadari dari pengujian yang menghasilkan grafik momen kelengkungan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6. Dimana pada benda uji rasio h/b 5 terjadi penyimpangan kelandaian kurva, dibandingkan dengan rasio $h/b = 4$ dan $h/b = 6$. Hal ini dimungkinkan karena pengaruh kualitas atau mutu bahan yang tidak merata pada masing-masing benda uji, terutama material beton. Dalam pelaksanaan pekerjaan beton, kualitas atau mutu akan sangat dipengaruhi oleh ketelitian dan pencampuran, pemadatan dan rawatan keras (*curing*). Jika mutu pengerjaannya buruk, maka kualitas atau mutu akan menurun dan mempengaruhi modulus elastisitas dan kekuatan tariknya, yang akhirnya momen retak awal dan faktor kekakuan akan menurun. Mungkin karena mutu beton yang lebih rendah atau bahkan rendah sekali sehingga kekuatan tariknya menjadi sangat kecil, kurva momen-kelengkungan benda uji rasio h/b penampang = 5 menjadi bilinear.

Sebaliknya pada rasio h/b penampang = 4 kurva momen-kelengkungan terlihat lebih tajam walaupun dengan inersia yang lebih kecil, mungkin dikarenakan mutu beton yang lebih baik.

Hasil perbandingan hubungan momen-kelengkungan teoritis dengan momen-kelengkungan hasil pengujian mendapatkan penurunan kapasitas momen nominal yang hampir sama setiap variasi rasio h/b , dengan rasio M_n teoritis dengan M_n hasil pengujian rata-rata sebesar 14 %. Dari hasil rasio tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa momen arah lateral belum mempengaruhi momen nominal balok jika dianggap benda uji memiliki kesamaan mutu bahan, sebagai pertimbangan adalah nilai modulus elastis balok masing-masing sampel yang ditunjukkan pada Tabel 5.7.

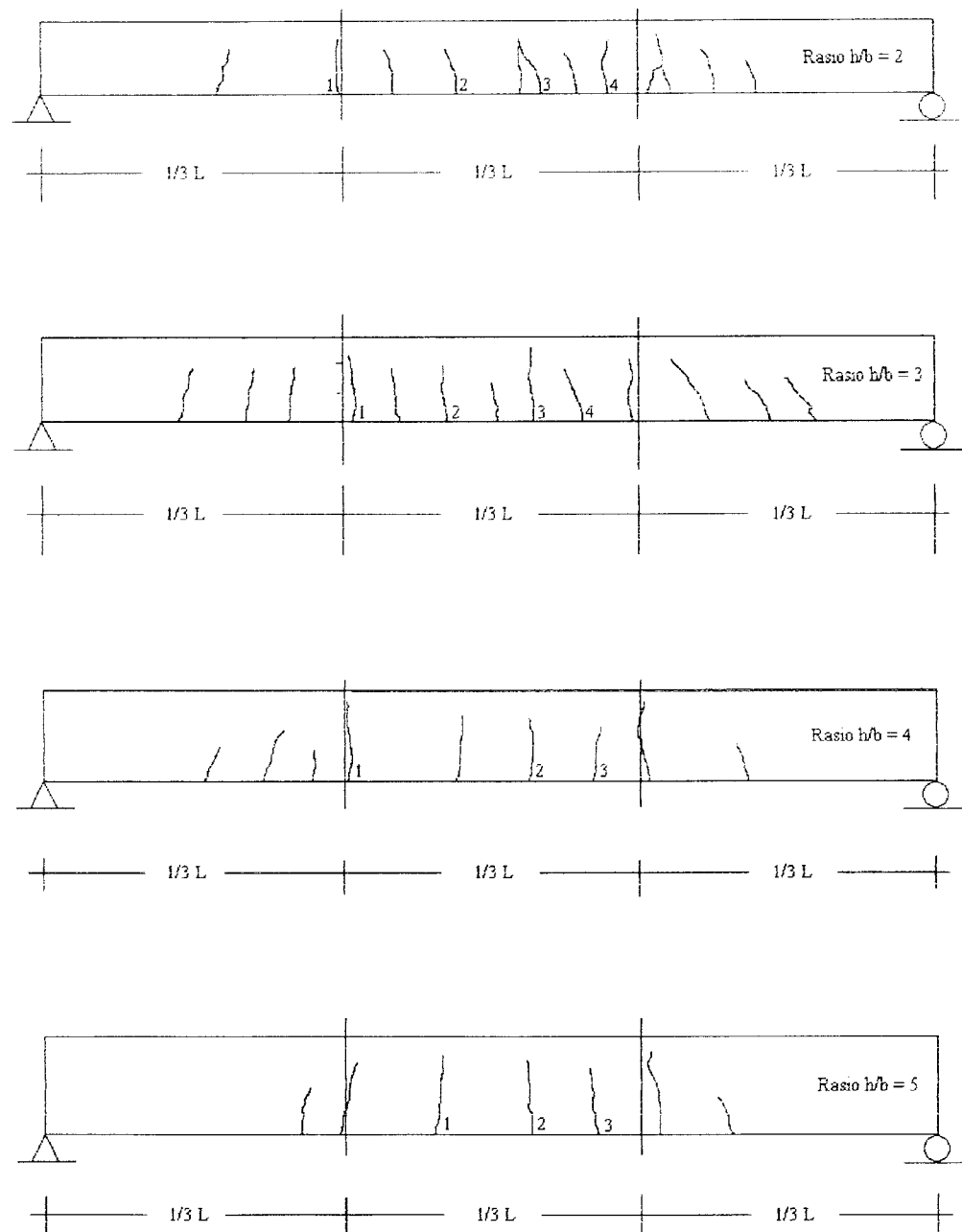
Tabel 5.7 Analisa Data Faktor Kekakuan

h/b	M_n (kN.m)	Φ (1/m)	Faktor kekakuan $EI=M/\Phi$ (kN.m ²)	EI/EI_2	E (Mpa)	E/E_2
2	8,722	0,033	265,348	1,00	14735,402	1,0
3	10,892	0,024	455,732	1,72	13775,811	0,9
4	12,189	0,016	752,872	2,84	21069,815	1,4
5	15,542	0,018	853,956	3,22	18968,905	1,3
6	16,363	0,016	1046,228	3,94	19366,516	1,3

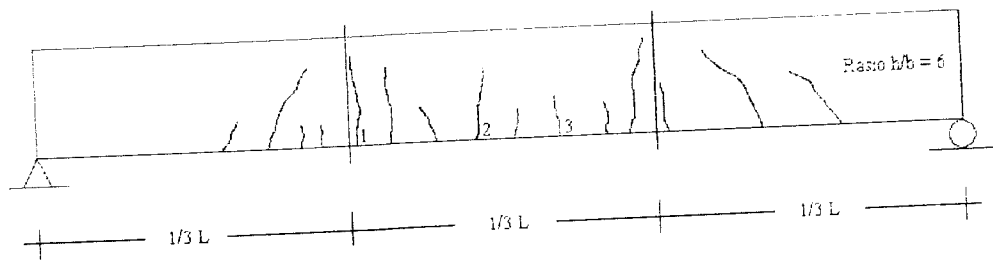
5.4. Analisa Retak

5.4.1. Pola retak hasil pengujian

Retak tegak lurus sumbu longitudinal akan terjadi ketika balok mendapat pembebanan. Hal ini diakibatkan regangan tarik yang terjadi pada sisi bawah penampang sudah melebihi regangan tarik beton. Pengujian mendapatkan data-data pembebanan, panjang, lebar, serta jarak retak. Retak yang terjadi pada saat pengujian pada masing-masing benda uji ditunjukkan pada Gambar 5.8 dan Gambar 5.9.

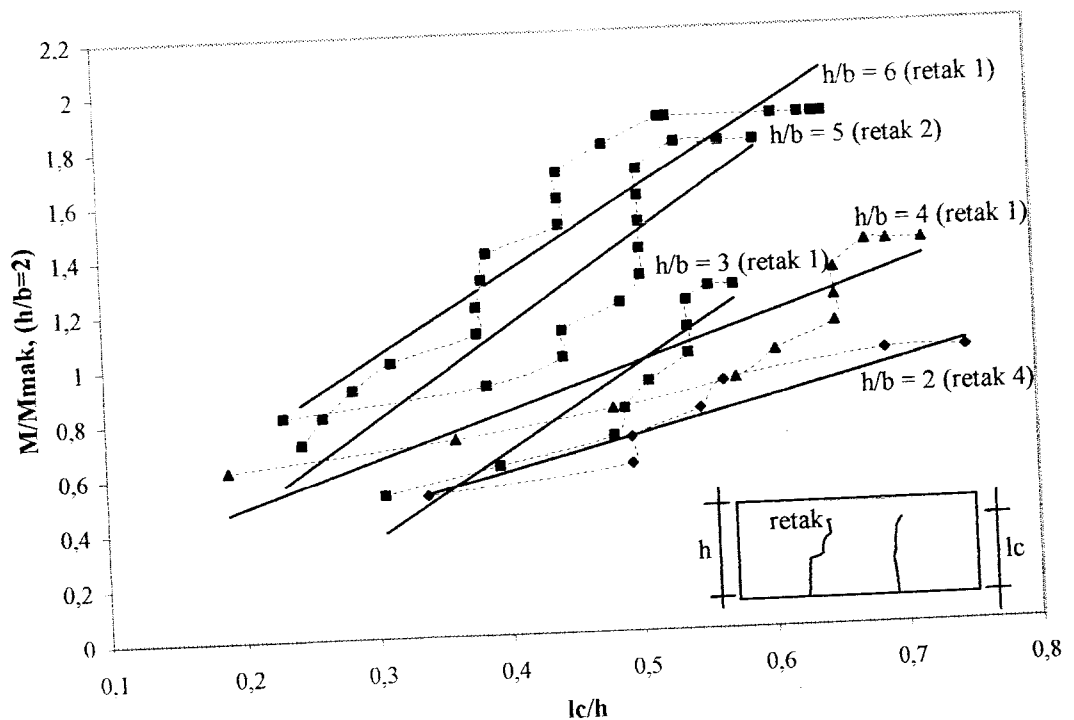


Gambar 5.8 Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok

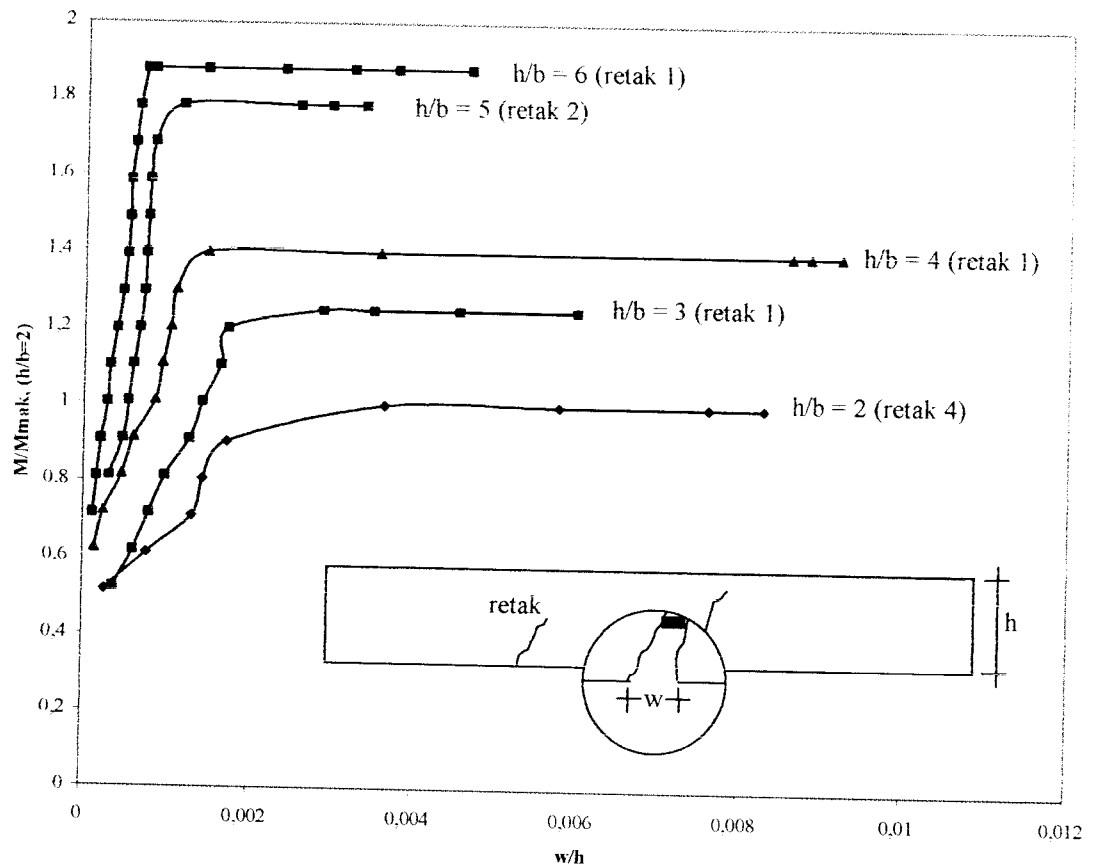


Gambar 5.9 Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok

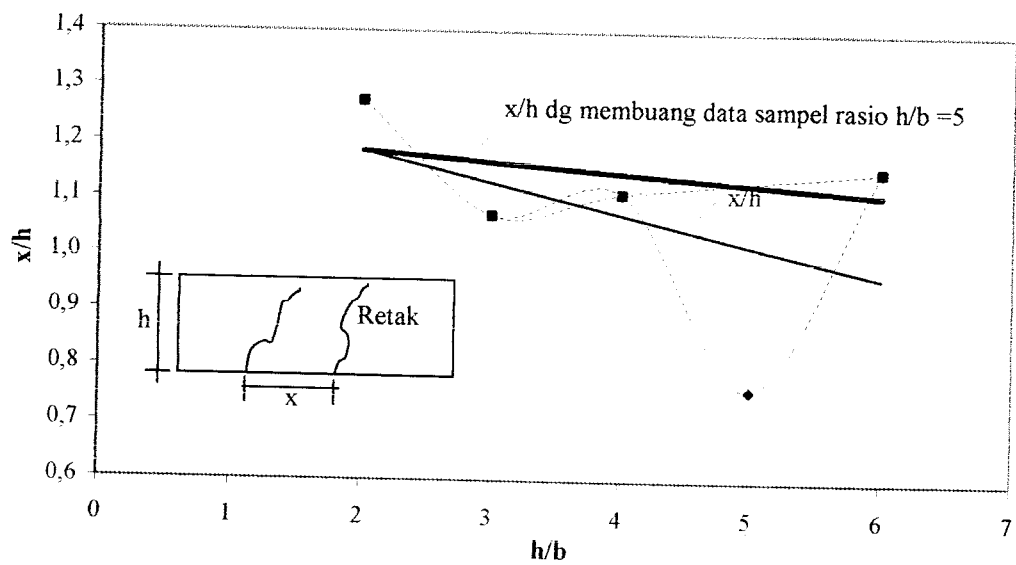
Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 menunjukkan retak yang terjadi pada pengujian lentur balok, nomor-nomor pada retak menunjukkan retak yang diukur dan selanjutnya akan dianalisa, data retak yang diperoleh disertakan dalam Lampiran 3ab, 3bb, 3cb, 3db, 3eb, sedang hasil dari pengukuran retak tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.10 dan Gambar 5.11 serta Gambar 5.12 sebagai berikut :



Gambar 5.10 Grafik non dimensional hubungan M/M_{mak} , ($h/b=2$) dengan a/h pada berbagai variasi h/b



Gambar 5.11 Grafik non dimensional hubungan M/M_{mak} , ($h/b=2$) dengan w/h pada berbagai variasi h/b



Gambar 5.12 Grafik non dimensional hubungan tinggi penampang dengan jarak retak pada berbagai variasi h/b

5.4.2. Pola retak lentur balok (pembahasan retak hasil pengujian)

1. Hubungan panjang retak dengan momen

Kegagalan lentur balok beton bertulang akan ditandai dengan retak tegak lurus sumbu longitudinal. Pengamatan retak pada pengujian lentur berguna untuk memperkirakan indikasi kerusakan atau evaluasi sisa kekuatan lentur balok.

Dari pengamatan retak benda uji di bawah pembebanan, didapat data seperti dilampirkan pada Lampiran 3ab, 3bb, 3cb, 3db, 3eb, dan Gambar 5.10, dapat diambil kesimpulan bahwa retak pertama terjadi pada momen antara $1/3$ sampai dengan $1/2$ dari momen lelehnya. Dapat diartikan bahwa setelah retak pertama terjadi, balok masih mempunyai kuat lentur yang cukup, yaitu antara $2/3$ sampai dengan $1/2$ dari kekuatan lentur nominalnya.

Ragam kegagalan dapat di tinjau dari hubungan rasio panjang retak dengan tinggi penampang (l_c/h). Dari pengamatan didapat bahwa kegagalan lentur balok akan terjadi pada rasio panjang retak dengan tinggi penampang (l_c/h) sama dengan $7/12$ sampai dengan $3/4$.

2. Hubungan lebar retak dengan momen

Setiap penambahan beban yang akan diikuti dengan meningkatnya momen maka lebar retak yang terjadi juga akan bertambah. Sebelum kapasitas lentur nominal tercapai, penambahan lebar retak akan sebanding dengan peningkatan momen, tetapi setelah kekuatan lentur nominal tercapai penambahan lebar retak tidak lagi sebanding dengan penambahan momennya, perilaku ini dapat dilihat pada Gambar 5.11.

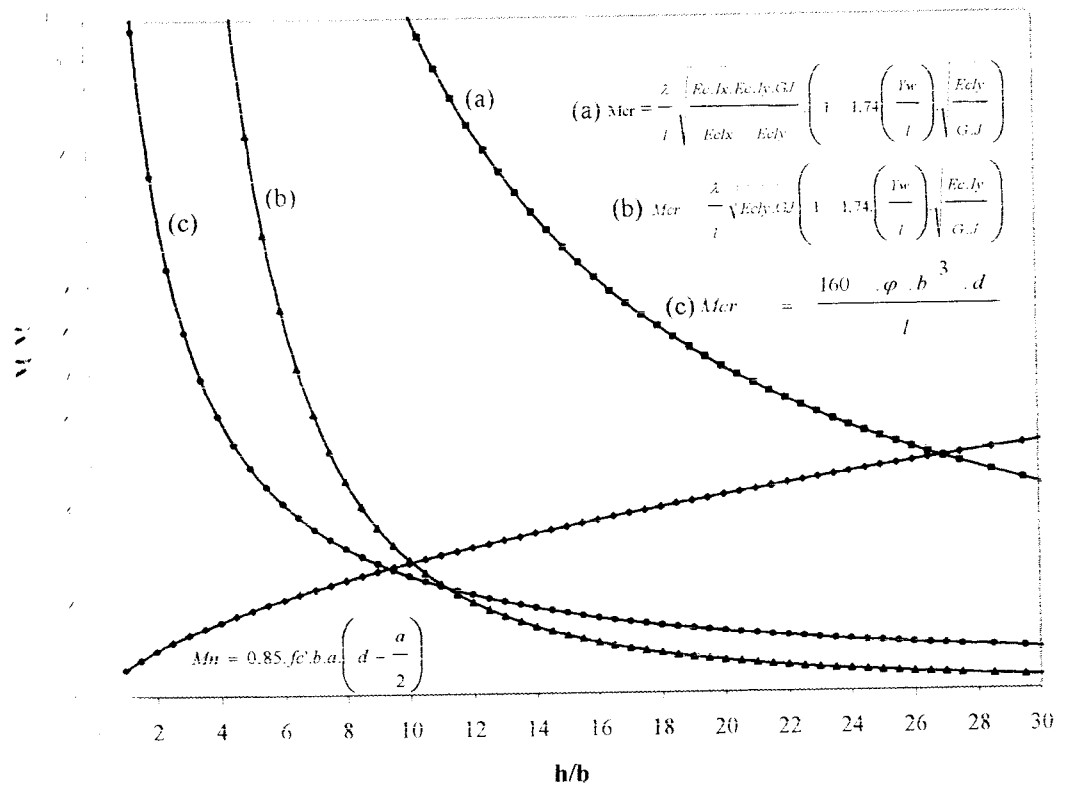
Dari hasil analisa hubungan lebar retak (w) dengan tinggi penampang (h), dapat diambil kesimpulan bahwa, balok akan mengalami kegagalan lentur pada rasio $w/h = 0,002$. Tetapi nilai tersebut menurun dengan bertambahnya rasio h/b penampang, hingga pada rasio $h/b = 6$ balok mengalami kegagalan pada rasio $w/h = 0.001$. Hal ini mungkin diakibatkan oleh pengaruh gaya geser yang tinggi pada semakin membesarnya rasio h/b .

3. Hubungan jarak retak dengan rasio tinggi terhadap lebar penampang

Pengamatan yang dilakukan terhadap jarak retak pertama yang terjadi pada masing-masing benda uji dengan rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) yang berdeda ditunjukkan pada Gambar 5.12. Grafik yang terbentuk dari data hasil pengamatan pada pengujian dengan mengabaikan data jarak retak pada rasio $h/b = 5$ dapat disimpulkan bahwa kenaikan rasio h/b penampang akan diikuti dengan turunnya rasio jarak retak terhadap tinggi penampang (x/h).

5.5. Stabilitas Arah Lateral

Kegagalan momen arah lateral mungkin terjadi pada balok berpenampang langsing karena inersia lateralnya yang kecil. Gambar 5.13 berikut memberikan gambaran mengenai besar pengaruh momen lateral pada berbagai variasi h/b penampang balok menurut Park dan Paulay (1975) dengan menggunakan persamaan (3.17), (3.18), dan (3.20), yang dapat digunakan untuk memperhitungkan besar pengaruh momen letral pada pengujian yang dilakukan.



Gambar 5.13 Grafik non dimensional hubungan M_n dengan M_{cr}

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari penelitian balok uji dapat diambil kesimpulan mengenai kapasitas lentur balok dengan variasi h/b penampang sebagai berikut :

1. Balok dengan f_c' , f_y , A_s , A_s' , d_s , d' , dan luas penampang tertentu, kekakuan (k) dan faktor kekakuan (EI) akan semakin besar bila rasio tinggi terhadap lebar penampang (h/b) semakin besar, sehingga kapasitas lentur nominal balok akan menjadi semakin besar.
2. Retak awal pada balok terjadi pada nilai M/M_{mak} $1/3$ sampai $1/2$. Ketika balok sudah mengalami retak pertama, balok masih memiliki kemampuan menahan momen 3 kali atau paling tidak 2 kalinya, hingga sampai pada kapasitas lentur nominal, dimana rasio panjang retak (l_c) dengan tinggi tampang (h) sama dengan $7/12$ sampai dengan $3/4$
3. Semakin tinggi rasio h/b penampang balok pada f_c' , f_y , A_s , A_s' , dan luas penampang yang sama, maka jarak 2 retak yang terjadi akan semakin menurun.

6.2 Saran

Untuk memperoleh hasil yang lebih baik dalam melakukan penelitian kapasitas lentur balok, dikemukakan saran sebagai berikut :

1. Dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan rasio h/b penampang balok lebih besar dari 6 dengan maksud untuk mengetahui rasio h/b penampang yang mengalami pengaruh momen arah lateral.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan penerapan beban di tengah bentang, dengan maksud mengetahui kapasitas lentur pada berbagai rasio h/b penampang dalam pengaruh geser dan lentur.
3. Dapat dilakukan penelitian lanjutan yang memfokuskan pada pola retak balok terlentur sehingga dapat dicari hubungan ukuran retak dengan rasio h/b penampang.

DAFTAR PUSTAKA

- Chu Kia Wang and Charles G. Salmon, 1993, **DISAIN BETON BERTULANG**, Erlangga , Jakarta.
- Edward G. Nawy, 1990, **BETON BERTULANG**, PT Eresco , Bandung.
- Edwin H. Gaylord Jr and Charles N. Gaylord, 1972, **DESIGN of STEEL STRUCTURES**, Mc Graw-Hill International Book Co., Tokyo
- Ferdinand L. Singer and Andrew Pytel, 1985, **KEKUATAN BAHAN**, Erlangga, Jakarta.
- George Winter and Arthur H. Nilson, 1993, **PERENCANAAN STRUKTUR BETON BERTULANG**, PT Pradnya Paranita, Jakarta.
- Ghosh S.K. and Rabbat B.G.,1990, **BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR REINFORCED CONCRETE**, ACI, USA.
- Istimawan Dipohusodo, 1999, **STRUKTUR BETON BERTULANG** , PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Kadir Aboe. A, 2000, **STRUKTUR BETON I** , FTSP-UH , Jogjakarta.
- Mosley W.H. and Bungey J. H., 1984, **PERENCANAAN BETON BERTULANG**, Erlangga, Jakarta.
- Park.R and Paulay. T, 1975, **REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**, John Wiley & Sons, New York.
- Phil M. Ferguson, 1981, **REINFORCED CONCRETE FUNDAMENTALS**, John Wiley & Sons, New York.
- Popov E.P., 1989, **MEKANIKA TEKNIK**, Erlangga, Jakarta
- Surendra P Shah, Stuart E. Swartz, Chengsheng Ouyang, 1995, **FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE: APPLICATIONS OF FRACTURE MECHANICS TO CONCRETE, ROCK, AND OTHER QUASI-BRITTLE MATERIALS**, John Willey & Sons Inc, New York.

Tim LPMB, 1991, **TATA CARA PERHITUNGAN STRUKTUR BETON
UNTUK BANGUNAN GEDUNG**, Yayasan LPMB, Bandung.

Wahyudi L. dan Syahril A. Rahim, 1997, **STRUKTUR BETON BERTULANG**,
PT Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.

LAMPIRAN



KARTU PESERTA TUGAS AKHIR

NO	N A M A	NO.MHS.	BID.STUDI
1.	Ferizal IB	96 310 133	Teknik Sipil
2.	Rusnapi	96 310 248	Teknik Sipil

JUDUL TUGAS AKHIR

Pengaruh perbandingan tinggi dan lebar balok terhadap kekuatan lentur

PERIODE KE : I (Sep 04 - Feb 05)
TAHUN : 2004 - 2005

No.	Kegiatan	Bulan Ke :					
		SEP	OKT.	NOP.	DES.	JAN.	FEB.
1	Pendaftaran						
2	Penentuan Dosen Pembimbing						
3	Pembuatan Proposal						
4	Seminar Proposal						
5	Konsultasi Penyusunan TA.						
6	Sidang - Sidang						
7	Pendadaran						

Dosen Pembimbing I : Suharyatmo,Ir,H,MT

Dosen Pembimbing II : Fatkhurrohman N,Ir,MT



Jogjakarta , 9-Sep-04
a.n. Dekan

(Signature)
Ir.H. Munadhir, MS

Catatan :

Seminar : _____
Sidang : _____
Pendadaran : _____



LABORATORIUM JALAN RAYA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UII

Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95330 Yogyakarta 55584

PEMERIKSAAN BERAT JENIS AGREGAT KASAR

Contoh dari : _____ Diperiksa Oleh : _____
 Jenis Contoh : _____
 Diperiksa tgl : _____

KETERANGAN	BENDA UJI	
	I	II
BERAT BENDA UJI DALAM KEADAAN BASAH JENUH (SSD) $\rightarrow$ (BJ)	1005 gr	
BERAT BENDA UJI DIDALAM AIR $\rightarrow$ (BA)	621 gr	
BERAT SAMPEL KERING OVEN (BK)	905 gr	
BERAT JENIS (BLUK) = $\frac{BK}{(BJ - BA)}$	2,56	
BERAT SSD = $\frac{BJ}{(BJ - BA)}$	2,62	
BJ SEMU = $\frac{BK}{(BK - BA)}$	2,706	
PENYERAPAN = $\frac{(BJ - BK)}{BK} \times 100\%$	2,03%	

Yogyakarta, 9 October 2004

Sukanto



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UII

Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 895707, 895042 Fax. (0274) 895330 Yogyakarta

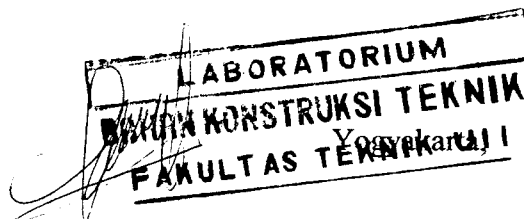
DATA PEMERIKSAAN MODULUS HALUS BUTIR PASIR

Jenis benda uji : _____ Diperiksa oleh :
 Nama benda uji : _____ 1. _____
 Asal : _____ 2. _____
 Keperluan : _____ Tanggal :

Saringan		Berat tertinggal (gram)		Berat tertinggal (%)		Berat Kumulatif	
No	Φ lubang (mm)	I	II	I	II	I	II
1	4,75	3	5,5	0,16	0,28	0,16	0,28
2	2,36	69	78	3,6	3,91	3,76	4,19
3	1,18	199	230	10,4	11,54	14,16	15,73
4	0,600	607	620	31,71	31,12	45,87	46,85
5	0,300	408	459	24,45	23,04	70,32	69,89
6	0,150	352	380	18,44	19,07	88,76	88,96
7	pan	215	220	11,23	11,04		
Jumlah						223,03	225,9

Jumlah rata-rata 224,47

$$\text{MODULUS HALUS BUTIR} = \frac{224,47}{100} \times 100\% = \boxed{2,25}$$



Mengetahui

Laboratorium BKT FTSP UII



LABORATORIUM JALAN RAYA

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UII

Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 95330 Yogyakarta 55584

Contoh dari : _____
 Pekerjaan : _____
 Jenis Agregat : _____
 Diterima tgl : _____
 Selesai Tgl : _____

ANALISA SARINGAN AGREGAT KASAR DAN HALUS

No. Saringan		BERAT TERTAHAN		JUMLAH PERSEN (%)		SPESIFIKASI	
mm	inch	tertahan	jumlah	tertahan	lolos	Min	Max
38.1	1 1/2"	0		0	100		
25.4	1"	0		0	100		
19.1	3/4"	0		0	100		
12.7	1/2"	414		41.4	58.6		
9.52	3/8"	555		90.9	3.1		
4.76	No. 4	31		100	0		
2.38	No. 8	0					
0.85	No. 30	0					
0.25	No. 60	0					
0.15	No. 100						
0.075	No. 200						
	pan						

Yogyakarta, 6 October 2004

Keterangan :

Tanggal :

Diperiksa Oleh :

(Sukanto)

PERENCANAAN ADUKAN BETON METODE DOE

1	Kuat tekan yang disyaratkan pada umur 28 hari	20	MPa
2	Deviasi Standart (s) Tabel 1	-	
3	Nilai tambah (m)	12	MPa
4	Kuat tekan rata-rata yang ditargetkan (f_{cr})	32	MPa
5	Jenis semen	1	
6	Jenis Kerikil	batu pecah	
7	Faktor air semen (Grafik 1.b)	0,56	
8	Faktor air semen Maksimum (Tabel 3.a)	0,6	
9	Niali Slam (Tabel 4)	9	Cm
10	Ukuran butir Maksimum kerikil	10	mm
11	Kebutuhan air (Tabel 5)	159,9	liter
12	Kebutuhan semen portland	285,5357143	Kg
13	Kebutuhan semen portland minimum (Tabel 6.a)	275	Kg
14	Penyesuaian jumlah air atau fas	tetap	
15	Pasir masuk golongan (tabel 7)	2	
16	Prosentase pasir terhadap agregat campuran (Grafik 2.a,b,c)	45,5	%
17	Berat jenis campuran	2,6	
18	Berat beton (Grafik 3)	2400	Kg/M3
19	Kebutuhan campuran pasir dan kerikil	1954,564286	Kg/M3
20	Kebutuhan pasir	889,32675	Kg/M3
21	kebutuhan kerikil	1065,237536	Kg/M3

Volume (M3)	Berat beton (Kg)	Air (Kg)	Semen (Kg)	Ag. Halus (Kg)	Ag. Kasar (Kg)
1	2400	159,900	285,536	889,327	1065,238
0,547	2400	87,465	156,188	486,462	582,685



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UII
 Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 895707, 895042 Fax. (0274) 895330 Yogyakarta

PENGUJIAN SILINDER BETON

Sampel	Diameter (Cm)	Diameter rata-rata (Cm)	Luas rata-rata (mm ²)	Tinggi (Cm)	Tinggi rata-rata (Cm)	Berat (Kg)	Berat Volume (Ton/m ³)	Beban (KN)	fc' (MPa)
ZR-2-1	15,03 14,96	14,995	175,597	30,11 30,13	30,120	12,499	2,350	345	19,536
ZR-2-2	15,10 15,02	15,060	178,131	30,04 30,04	30,040	12,358	2,309	260	14,596
ZR-3-1	15,07 15,06	15,065	178,249	30,43 30,36	30,395	12,662	2,337	300	16,830
ZR-3-2	15,01 15,06	15,035	177,540	29,8 30,01	29,905	12,480	2,351	265	14,926
ZR-4-1	15,05 15,05	15,05	177,895	29,86 29,88	29,870	12,431	2,339	435	24,453
ZR-4-2	15,03 15,09	15,060	178,131	29,92 30,12	30,020	12,510	2,339	400	22,455
ZR-5-1	14,92 14,94	14,930	175,069	30,13 30,22	30,175	12,768	2,417	360	20,563
ZR-5-2	15,19 15,09	15,140	180,029	30,28 30,17	30,225	12,747	2,343	327	18,164
ZR-6-1	15,20 15,03	15,115	179,435	30,36 30,23	30,295	12,801	2,355	420	23,407
ZR-6-2	15,09 15,06	15,075	178,486	30,29 30,25	30,270	12,728	2,356	500	28,013
fc' rata-rata =									20,294

Standard Deviasi

No.	Nilai Variabel	Deviasi Mean (x)	Deviasi Mean Kuadrat (x^2)
1	28,01	7,72	59,59
2	24,45	4,16	17,29
3	23,41	3,11	9,69
4	22,46	2,16	4,67
5	20,56	0,27	0,07
6	19,54	-0,76	0,57
7	18,16	-2,13	4,54
8	16,83	-3,46	12,00
9	14,93	-5,37	28,81
10	14,60	-5,70	32,47
Σ		0,00	169,71

Standard Deviasi, Sd

$$Sd = \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{N}}$$

Standard Deviasi, Sd = 4,120 MPa

$$\begin{aligned}
 f_c' &= f_{cr} - (1,64 \times Sd) \\
 &= 20,249 - (1,64 \times 4,120) \\
 &= 13,5 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

CATATAN KONSULTASI TUGAS AKHIR

NO	TANGGAL	KONSULTASI KE :	TANDA TANGAN
		<p>Tulis lambang dan konstanta yang diketahui Dik. $\frac{h}{b}$ dan $\frac{h}{b}$ lain Tulis lambang dan konstanta yang diketahui Tulis lambang dan konstanta yang diketahui</p> <p>- $M_{er} = ?$ } $\frac{h}{b}$ dan $\frac{h}{b}$ lain $M_{in} = ?$ } $M_{er} > M_{in}$ $M_{er} < M_{in}$</p> <p>$\cos(\theta) = \frac{a}{b} (2 - \frac{a}{b})$</p> <p>Buat grafik $\cos(\theta)$ untuk $\frac{h}{b}$ lain Lambang, As, As' lain.</p> <p>Semua lain, selain 12/12/04</p> <p>Sedangkan</p> <p>Buat grafik $\cos(\theta) = \frac{h}{b}$</p> <p>$\frac{h}{b} = 1,5 \rightarrow \frac{h}{b} = 1$</p> <p>Dibuat ke DFI</p> <p>28/12-2004</p> <p>30/12/04 Siaphan Sidang</p>	<p><i>[Signature]</i></p> <p>17/09 2005</p> <p>28/04 2007</p> <p><i>[Signature]</i></p> <p><i>[Signature]</i></p>

11/10/2004

12/11/05

12/11/05

12/11/05

Perbaikan pasca sidang

Ditanyakan selanjutnya

Siapha Dendadara

Perbaikan pasca sidang



LABORATORIUM BAHAN KONSTRUKSI TEKNIK

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UII

Jl. Kaliurang Km. 14,4 Telp. 895707, 895042 Fax. (0274) 895330 Yogyakarta

PENGUJIAN BAJA TULANGAN

1 Tulangan Tarik

Sampel	Diameter (mm)	Diameter rata-rata (mm)	Luas Tulangan rata-rata (mm ²)	Tegangan Leleh	Tegangan Maximum	Tegangan Putus
I	7,7	8,133	51,955	28,1013 Kg/mm ² 281,013 MPa	42,1519 Kg/mm ² 421,519 MPa	32,9131 Kg/mm ² 329,131 MPa
	8,3					
	8,4					
II	8,1	8,133	51,955	1440 Kg 27,7163 Kg/mm ² 277,163 MPa	2200 Kg 42,3444 Kg/mm ² 423,444 MPa	1740 Kg 33,4905 Kg/mm ² 334,905 MPa
	8,3					
	8,0					

Rata-rata 2 sampel

279,088 MPa

422,481 MPa

332,018 MPa

2 Tulangan Geser

Sampel	Diameter (mm)	Diameter rata-rata (mm)	Luas Tulangan rata-rata (mm ²)	Tegangan Leleh	Tegangan Maximum	Tegangan Putus
I	5,4	5,467	23,471	27,9066 Kg/mm ² 279,066 MPa	43,6706 Kg/mm ² 436,706 MPa	32,3801 Kg/mm ² 323,801 MPa
	5,5					
	5,5					
II	5,6	5,567	24,338	27,9401 Kg/mm ² 279,401 MPa	42,5265 Kg/mm ² 425,265 MPa	31,2272 Kg/mm ² 312,272 MPa
	5,6					
	5,5					

Rata-rata 2 sampel

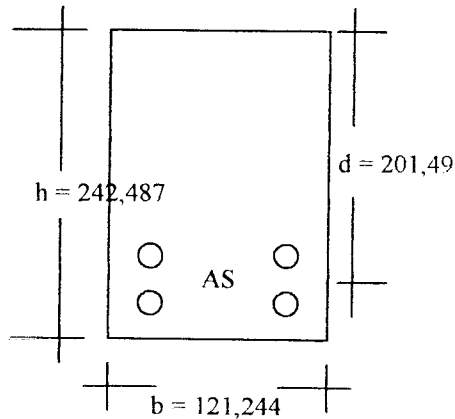
279,233 MPa

430,986 MPa

318,037 MPa

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS

Rasio $h/b = 2$



$$f_y = 279,088 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,00823$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = 0,00058$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 17268,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{17268,9} = 11,582$$

1. Sebelum Retak

$$A = bh + [(n-1)(A_s + A_s')] \\ = (121,244 \times 242,49) + [(11,582 - 1) \times (201,062 + 14,137)] = 31677,02 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{(121,244 \times 242,49 \times 121,244) + (10,582 \times 201,062 \times 201,49) + (10,582 \times 14,137 \times 15)}{31677,02}$$

$$= 126,132 \text{ mm}$$

$$\text{Sehingga, } y_{bottom} = 242,49 - 126,132 = 116,358 \text{ mm}$$

Momen Inersia :

$$I = \left[\left(\frac{1}{12} \times 121,244 \times 242,49^3 \right) + (29400 \times (4,886)^2) \right] + [100,531 \times 10,582 \times 91,858^2] \\ + [100,531 \times 10,582 \times 58,858^2] + [14,137 \times 10,582 \times 111,132^2] \\ = 1,592754879 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\text{Modulus Retak } f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 2,572 \text{ MPa}$$

$$h/b = 2$$

$$M_{retak} = \frac{f_r x I}{y_{bottom}} = \frac{2,572 \times 1,592754879 \cdot 10^8}{116,358} = 3,52059 \cdot 10^6 \text{ N.mm} = 3,52059 \text{ KN.m}$$

$$\Phi_{retak} = \frac{f_r}{E_c} = \frac{2,572 / 17268,9}{116,358} = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ rad/mm} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ rad/m}$$

2. Setelah Retak Pada Saat Leleh Pertama

Dengan menganggap beban elastis, maka :

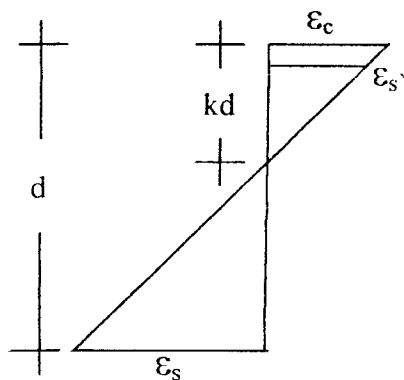
$$k = \sqrt{(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n} - (\rho + \rho') n$$

$$k = \sqrt{(0,00823 + 0,00058)^2 \times 11,582^2 + 2 \left(0,00823 + \left(\frac{0,00058 \times 15}{201,49} \right) \right) 11,582} - (0,00823 + 0,00058) \times 11,582$$

$$= 0,347$$

maka : $kd = 0,347 \times 201,49 = 69,917 \text{ mm}$

$$\epsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{279,088}{200000} = 1,395 \cdot 10^{-3}$$



Dari diagram didapat :

$$\epsilon_c = \epsilon_s \frac{kd}{d - kd} = 1,395 \cdot 10^{-3} \times \frac{69,917}{201,49 - 69,917}$$

$$\epsilon_c = 7,413 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{jadi : } f_c = \epsilon_c \times E_c = 7,413 \cdot 10^{-4} \times 1,72689 \cdot 10^4$$

$$= 12,831 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_c \frac{kd - 15}{kd} = 7,413 \cdot 10^{-4} \times \frac{69,917 - 15}{69,917}$$

$$= 5,838 \cdot 10^{-4}$$

$$f_s' = \epsilon_s' \times E_s = 5,838 \cdot 10^{-4} \times 200000 = 116,776 \text{ MPa}$$

$$C_c = \frac{1}{2} \times f_c \times b \times kd = \frac{1}{2} \times 12,831 \times 121,244 \times 69,917 = 57294,441 \text{ N} = 57,294 \text{ KN}$$

$$C_s' = A_s' \times f_s' = 14,137 \times 116,776 = 1650,714 \text{ N} = 1,65 \text{ kN}$$

$$h/b = 2$$

Jadi gaya tekan total yang bekerja pada kd dari serat atas adalah

$$N_d = 57,294 + 1,65 = 58,945 \text{ KN}$$

$$\text{Jadi } j_d = d - (k_d/3) = 201,49 - (69,917/3) = 178,150 \text{ mm}$$

Maka :

$$M_y = A_s \times f_y \times j_d$$

$$= 201,062 \times 279,088 \times 178,150 = 9996762,866 \text{ N.mm} = 9,996 \text{ KN.m}$$

$$\Phi_y = \frac{f_y/E_s}{d - k_d} = \frac{279,088/200000}{(201,49 - 69,917)} = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ rad/mm} = 1,06 \cdot 10^{-2} \text{ rad/m}$$

3. Setelah leleh pada saat beban maksimum (ultimit)

Dianggap tulangan tekan telah leleh

$$a = \frac{f_y(A_s - A_s')}{0,85 \times f_c' \times b} = \frac{279,088(201,062 - 14,137)}{0,85 \times 13,5 \times 121,244} = 37,497 \text{ mm}$$

$$\text{jadi } c = \frac{a}{0,85} = \frac{37,497}{0,85} = 44,114 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{44,114 - 15}{44,114} = 0,00197$$

Karena $\frac{f_y}{E_s} = 0,001395$ berarti baja tulangan tekan sudah leleh

$$\text{Jadi } f_s' = \epsilon_s' \times E_s = 0,00197 \times 200000 = 395,98 \text{ MPa} > 279,088 \text{ MPa (OK)}$$

Maka :

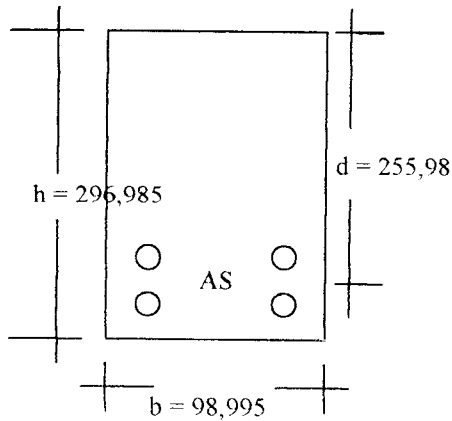
$$\begin{aligned} M_u &= \left[(0,85 \times f_c' \times b \times a) \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [(A_s' \times f_s') \times (d - d')] \\ &= \left[(0,85 \times 14,167 \times 121,244 \times 37,497) \times \left(201,49 - \frac{37,497}{2} \right) \right] + [(14,137 \times 279,088) \times (201,49 - 15)] \\ &= 10268981,05 \text{ N.mm} = 10,269 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\Phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{0,003}{44,114} = 6,800 \cdot 10^{-5} \text{ rad/mm} = 6,800 \cdot 10^{-2} \text{ rad/m}$$

$$h/b = 2$$

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS

Rasio $h/b = 3$



$$f_y = 279,088 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,00793$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = 0,00056$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 17268,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{17268,9} = 11,582$$

1. Sebelum Retak

$$A = bh + [(n-1)(A_s + A_s')] \\ = (98,995 \times 296,985) + [(11,582 - 1) \times (201,062 + 14,137)] = 31677,16 \text{ mm}^2$$

$$y = \frac{(98,995 \times 296,98 \times 148,49) + (10,582 \times 201,062 \times 255,98) + (10,582 \times 14,137 \times 15)}{31677,16} \\ = 155,082 \text{ mm}$$

$$\text{Sehingga, } y_{bottom} = 296,98 - 155,082 = 141,903 \text{ mm}$$

Momen Inersia :

$$I = \left[\left(\frac{1}{12} \times 98,995 \times 296,98^3 \right) + (29400 \times (6,587)^2) \right] + [100,531 \times 10,582 \times 117,403^2] \\ + [100,531 \times 10,582 \times 84,403^2] + [14,137 \times 10,582 \times 140,082] \\ = 2,4254304 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$\text{Modulus Retak } f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 2,572 \text{ MPa}$$

$$h/b = 3$$

$$M_{retak} = \frac{f_r x I}{y_{bottom}} = \frac{2,572 \times 2,4254304 \cdot 10^8}{141,903} = 4,396034 \cdot 10^6 \text{ N.mm} = 4,396 \text{ KN.m}$$

$$\Phi_{retak} = \frac{f_r}{E_c} = \frac{2,572 / 17268,9}{141,903} = 1,04956 \cdot 10^{-6} \text{ rad/mm} = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ rad/m}$$

2. Setelah Retak Pada Saat Leleh Pertama

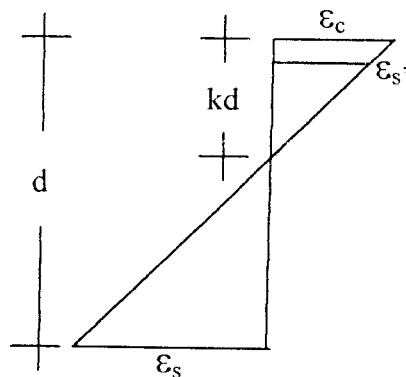
Dengan menganggap beban elastis, maka :

$$k = \sqrt{\left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right] - (\rho + \rho') n}$$

$$k = \sqrt{(0,00793 + 0,00056)^2 \times 11,582^2 + (2 \times (0,00793 + \frac{0,00056 \times 15}{255,98}) \times 11,582) - (0,00793 + 0,00056) \times 11,582} = 0,342$$

$$\text{maka : } kd = 0,342 \times 255,98 = 87,634 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{279,088}{200000} = 1,395 \cdot 10^{-3}$$



Dari diagram didapat :

$$\epsilon_c = \epsilon_s \frac{kd}{d - kd} = 1,395 \cdot 10^{-3} \times \frac{86,634}{255,98 - 86,634}$$

$$\epsilon_c = 7,264 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{jadi : } f_c = \epsilon_c \times E_c = 7,264 \cdot 10^{-4} \times 1,76289 \cdot 10^4$$

$$= 12,544 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_s' = \epsilon_c \frac{kd - 15}{kd} = 7,264 \cdot 10^{-4} \frac{86,634 - 15}{86,634}$$

$$= 6,021 \cdot 10^{-4}$$

$$f_s' = \epsilon_s' \times E_s = 6,021 \cdot 10^{-4} \times 200000 = 120,412 \text{ MPa}$$

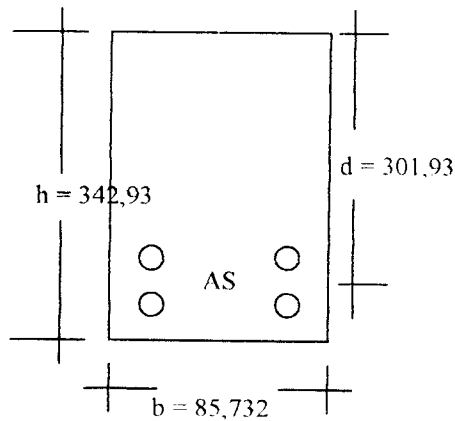
$$C_c = \frac{1}{2} \times f_c \times b \times kd = \frac{1}{2} \times 12,544 \times 98,995 \times 87,624 = 58558,667 \text{ N} = 58,558 \text{ KN}$$

$$C_s' = A_s' \times f_s' = 14,137 \times 120,412 = 1702,258 \text{ N} = 1,702 \text{ kN}$$

$$h/b = 3$$

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS

Rasio $h/b = 4$



$$f_y = 279,088 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,00776$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = 0,00055$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 17268,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{17268,9} = 11,582$$

1. Sebelum Retak

$$\begin{aligned} A &= bh + [(n-1)(A_s + A_s')] \\ &= (85,732 \times 342,93) + [(11,582 - 1) \times (201,062 + 14,137)] = 31677,034 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{(85,732 \times 342,93 \times 171,464) + (10,582 \times 201,062 \times 301,93) + (10,582 \times 14,137 \times 15)}{31677,034} \\ &= 179,488 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Schingga, } y_{\text{bottom}} = 342,93 - 179,488 = 163,440 \text{ mm}$$

Momen Inersia :

$$\begin{aligned} I &= \left[\left(\frac{1}{12} \times 85,732 \times 342,93^3 \right) + (29400 \times (8,024)^2) \right] + [100,531 \times 10,582 \times 138,94^2] \\ &\quad + [100,531 \times 10,582 \times 105,94^2] + [14,137 \times 10,582 \times 164,49^2] \\ &= 3,2653274 \times 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{Modulus Retak } f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 2,572 \text{ MPa}$$

$$h/b = 4$$

$$M_{retak} = \frac{f_r x I}{y_{bottom}} = \frac{2,572 \times 3,2653274 \cdot 10^8}{163,440} = 5,13844916 \cdot 10^6 \text{ N.mm} = 5,138 \text{ KN.m}$$

$$\Phi_{retak} = \frac{f_r}{E_c} = \frac{2,635/17268,9}{163,440} = 9,1125 \cdot 10^{-7} \text{ rad/mm} = 9,1125 \cdot 10^{-4} \text{ rad/m}$$

2. Setelah Retak Pada Saat Leleh Pertama

Dengan menganggap beban elastis, maka :

$$k = \sqrt{\left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right] - (\rho + \rho') n}$$

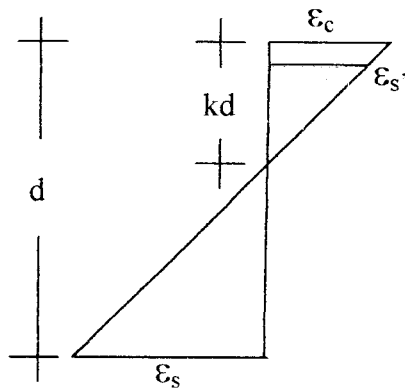
3.

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{(0,00776 + 0,00055)^2 \times 11,582^2 + 2 \left(0,00776 + \left(\frac{0,00055 \times 15}{301,93} \right) \right) 11,582} \\ &\quad - (0,00776 + 0,00055) \times 11,582 \\ &= 0,339 \end{aligned}$$

$$\text{maka : } kd = 0,339 \times 301,93 = 102,474 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s = \frac{f_y}{E_s} = \frac{279,088}{200000} = 1,395 \cdot 10^{-3}$$

Dari diagram didapat :



$$\epsilon_c = \epsilon_s \frac{kd}{d - kd} = 1,395 \cdot 10^{-3} \times \frac{102,474}{301,93 - 102,474}$$

$$\epsilon_c = 7,169 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \text{jadi : } f_c &= \epsilon_c \times E_c = 7,169 \cdot 10^{-4} \times 1,72689 \cdot 10^4 \\ &= 12,381 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s' &= \epsilon_c \frac{kd - 15}{kd} = 7,169 \cdot 10^{-4} \frac{102,474 - 15}{102,474} \\ &= 6,120 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

$$f_s' = \epsilon_s' \times E_s = 6,120 \cdot 10^{-4} \times 200000 = 122,398 \text{ MPa}$$

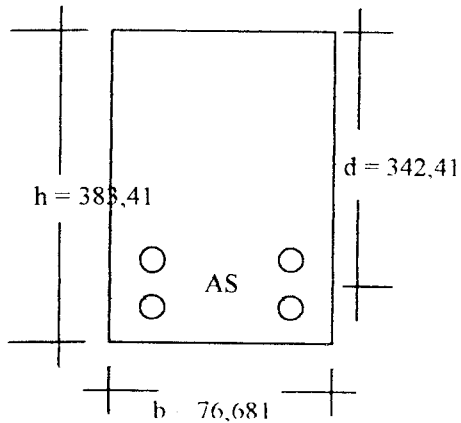
$$C_c = \frac{1}{2} \times f_c \times b \times kd = \frac{1}{2} \times 12,381 \times 85,732 \times 102,474 = 59300,503 \text{ N} = 59,300 \text{ KN}$$

$$C_s' = A_s' \times f_s' = 14,137 \times 122,398 = 1730,339 \text{ N} = 1,73 \text{ kN}$$

$$h/b = 4$$

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS

Rasio $h/b = 5$



$$f_y = 279,088 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,00765$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = 0,00054$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 17268,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{17268,9} = 11,582$$

1. Sebelum Retak

$$\begin{aligned} A &= bh + [(n-1)(A_s + A_s')] \\ &= (76,681 \times 383,41) + [(11,582 - 1) \times (201,062 + 10,137)] = 31677,009 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{(76,681 \times 383,41 \times 191,705) + (10,582 \times 201,062 \times 342,41) + (10,582 \times 14,137 \times 15)}{31677,009} \\ &= 200,99 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Sehingga, } y_{\text{bottom}} = 383,41 - 200,99 = 182,415 \text{ mm}$$

Momen Inersia :

$$\begin{aligned} I &= \left[\left(\frac{1}{12} \times 76,681 \times 383,41^3 \right) + (29400 \times (9,29)^2) \right] + [100,531 \times 10,582 \times 157,995^2] \\ &\quad + [100,531 \times 10,582 \times 124,915^2] + [14,137 \times 10,582 \times 185,995^2] \\ &= 4,1098389 \times 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{Modulus Retak } f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 2,572 \text{ MPa}$$

Jadi gaya tekan total yang bekerja pada kd dari serat atas adalah

$$N_d = 59,802 + 1,75 = 61,551 \text{ KN}$$

$$\text{Jadi } j_d = d - (k_d/3) = 342,41 - (115,539/3) = 303,892 \text{ mm}$$

Maka :

$$M_y = A_s \times f_y \times j_d$$

$$= 201,062 \times 279,088 \times 303,892 = 17052589,39 \text{ N.mm} = 17,053 \text{ KN.m}$$

$$\Phi_y = \frac{\frac{f_y}{E_s}}{d - k_d} = \frac{\frac{279,088}{200000}}{(342,41 - 115,539)} = 6,15095 \cdot 10^{-6} \text{ rad/mm} = 6,151 \cdot 10^{-3} \text{ rad/m}$$

3. Setelah leleh pada saat beban maksimum (ultimit)

Dianggap tulangan tekan telah leleh

$$a = \frac{f_y \times (A_s - A_s')}{0,85 \times f_c' \times b} = \frac{279,088 \times (201,062 - 14,137)}{0,85 \times 13,5 \times 76,732} = 59,288 \text{ mm}$$

$$\text{jadi } c = \frac{a}{0,85} = \frac{59,288}{0,85} = 69,751 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{69,751 - 15}{69,751} = 0,00235$$

Karena $\frac{f_y}{E_s} = 0,001395$ berarti baja tulangan tekan sudah leleh

$$\text{Jadi } f_s' = \epsilon_s' \times E_s = 0,00235 \times 200000 = 470,969 \text{ MPa} > 279,088 \text{ MPa (OK)}$$

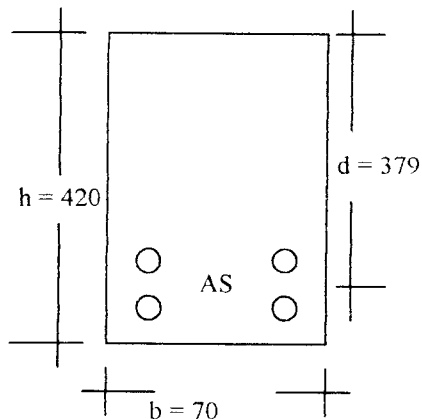
Maka :

$$\begin{aligned} M_u &= \left[(0,85 \times f_c' \times b \times a) \times \left(d - \frac{a}{2} \right) \right] + [(A_s' \times f_s') \times (d - d')] \\ &= \left[(0,85 \times 14,167 \times 76,681 \times 59,288) \times \left(342,41 - \frac{59,288}{2} \right) \right] + [(14,137 \times 279,088) \times (342,41 - 15)] \\ &= 17608040,9 \text{ N.mm} = 17,608 \text{ KN.m} \end{aligned}$$

$$\Phi_u = \frac{\epsilon_c}{c} = \frac{0,003}{69,751} = 4,30103 \cdot 10^{-5} \text{ rad/mm} = 4,301 \cdot 10^{-2} \text{ rad/m}$$

PERHITUNGAN MOMEN KELENGKUNGAN SECARA TEORITIS

Rasio $h/b = 6$



$$f_y = 279,088 \text{ MPa}$$

$$f_c' = 13,5 \text{ Mpa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$A_s = 201,062 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 14,137 \text{ mm}^2$$

$$\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,00757$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot d} = 0,00053$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} = 17268,9 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus rasio, } n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200000}{17268,9} = 11,582$$

1. Sebelum Retak

$$\begin{aligned} A &= bh + [(n-1) (A_s + A_s')] \\ &= (70 \times 420) + [(11,582 - 1) \times (201,062 + 14,437)] = 31677,130 \text{ mm}^2 \\ y &= \frac{(70 \times 420 \times 210) + (10,582 \times 201,062 \times 379) + (10,582 \times 14,137 \times 15)}{31677,130} \\ &= 220,430 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Sehingga, } y_{bottom} = 420 - 220,430 = 199,570 \text{ mm}$$

Momen Inersia :

$$\begin{aligned} I &= \left[\left(\frac{1}{12} \times 70 \times 420^3 \right) + (29400 \times (10,43)^2) \right] + [100,531 \times 10,582 \times 175,07^2] \\ &\quad + [100,531 \times 10,582 \times 142,07^2] + [14,137 \times 10,582 \times 205,43^2] \\ &= 4,9576626 \times 10^8 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\text{Modulus Retak } f_r = 0,7 \sqrt{f_c'} = 2,572 \text{ MPa}$$

$$h/b = 6$$

PENGARUH RASIO TINGGI DENGAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANGAN

Sampel 1
Rasio h/b = 2

Beban (Psi)	Beban (KN)	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0
100	2,226	42	29	89
200	3,917	102	102	156
300	5,608	184	230,5	239
400	7,299	361	425,5	408,5
500	8,990	486	531	533,5
600	10,680	519	720	659
700	12,371	766	840	801,5
800	14,062	824	1031,5	952
900	15,753	1077	1229	1111
1000	17,444	1653	1740	1600
1000	17,444	2120	2325,5	2055
1000	17,444	2321	2552,5	2221,5
1000	17,444	2581	2631	2349

Diameter Hidraulik Jack

Atas

5.6 (Cm)

2.2 (in)

Bawah

10.3 (Cm)

4.055 (in)

Luas

24,63008641 Cm²

3,801327111 In²

83,32289117 Cm²

12,91432164 In²

Jarak Retak

1

2

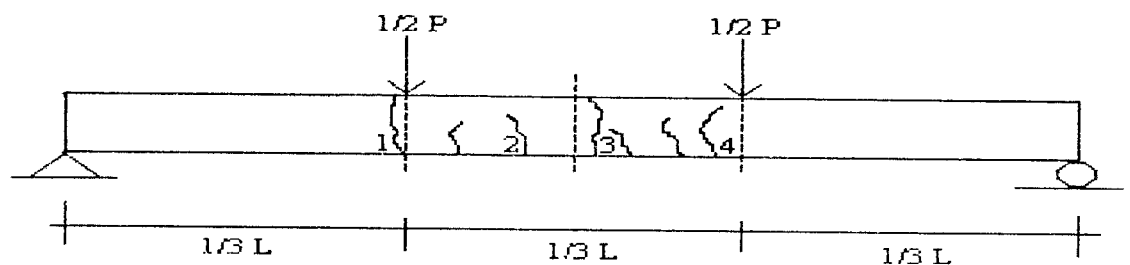
3

4

36,8

25

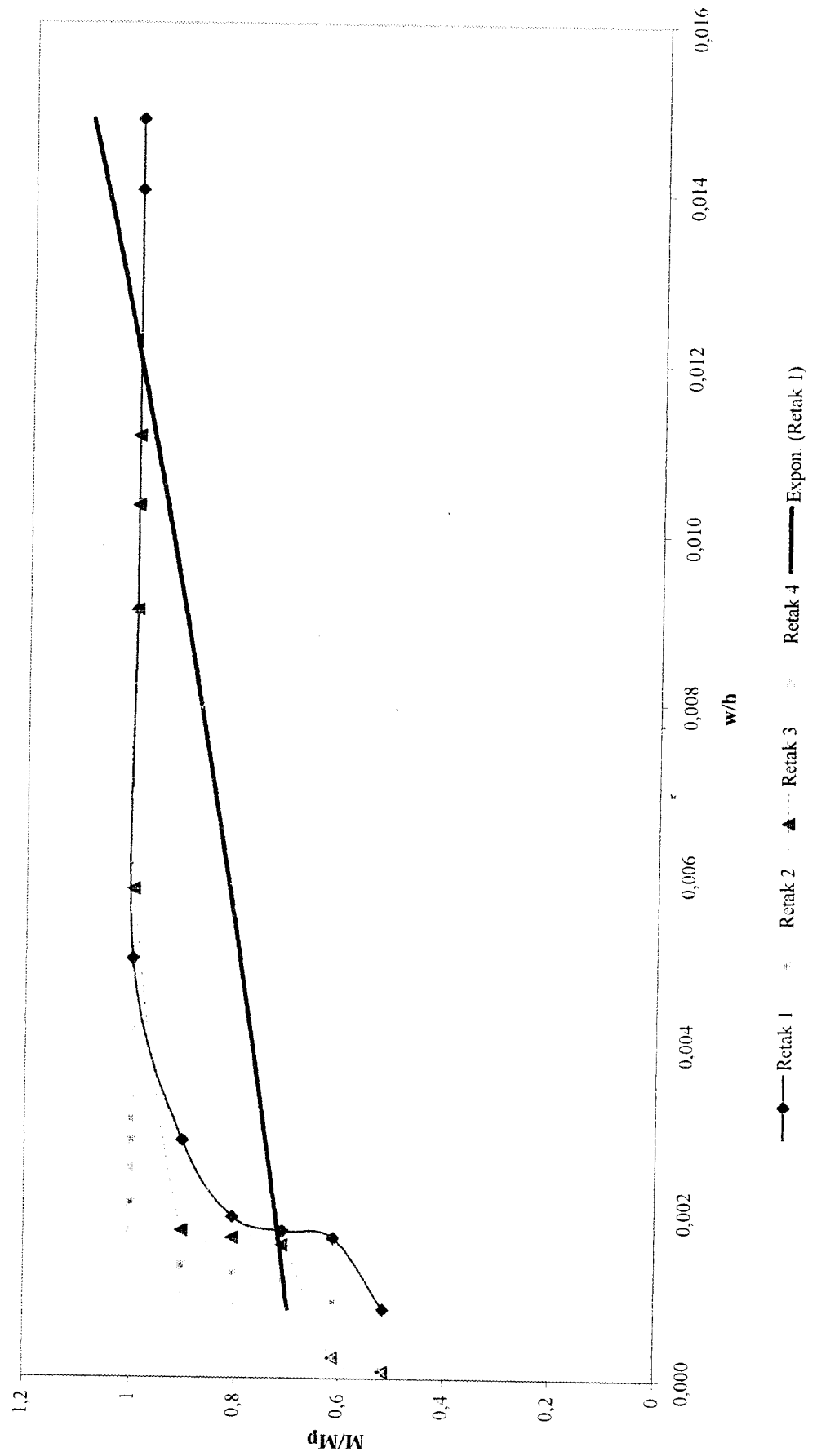
31,2 Cm



Tabel Hasil Pengamatan Retak Pengujian Lentur Balok Perbandingan $h/b = 2$

Beban (Psi)	Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	Lbr Retak 2 (mm)	Lbr Retak 3 (mm)	Lbr Retak 4 (mm)	Pjg Retak 1 (mm)	Pjg Retak 2 (mm)	Pjg Retak 3 (mm)	Pjg Retak 4 (mm)
0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
100	2,226	1,11	-	-	-	-	-	-	-	-
200	3,917	1,96	-	-	-	-	-	-	-	-
300	5,608	2,80	-	-	-	-	-	-	-	-
400	7,299	3,65	-	-	-	-	-	-	-	-
500	8,990	4,49	0,2	0,02	0,02	0,02	96	102	96	35
600	10,680	5,34	0,4	0,22	0,06	0,06	144	102	96	138
700	12,371	6,19	0,42	0,28	0,38	0,18	144	102	96	138
800	14,062	7,03	0,46	0,3	0,4	0,22	144	140	101	146
900	15,753	7,88	0,68	0,32	0,42	0,24	159	142	101	146
1000	17,444	8,72	1,2	0,5	1,4	0,42	188	159	174	146
1000	17,444	8,72	2,2	0,6	2,2	0,6	197	159	190	180
1000	17,444	8,72	3,4	0,68	2,5	0,8	197	159	190	180
1000	17,444	8,72	3,6	0,74	2,7	1	197	159	190	180

Grafik hubungan M/M_p dengan w/h pada $h/b = 2$



PENGARUH RASIO TINGGI DENGAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG

Sampel 2
Rasio h/b = 3

Beban (Psi)	Beban (Ton)	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0
100	2,339	32	35	79
200	4,030	93	95	89
300	5,721	129	137	174
400	7,412	201	209	193,5
500	9,103	305	311	361,5
600	10,793	444	373	392,5
700	12,484	555	492	493
800	14,175	639	584,0	583
900	15,866	731	673,5	678
1000	17,557	828	780	777,5
1100	19,248	924	892	874
1200	20,939	988	960,5	894
1250	21,784	1206	1249	1174
1250	21,784	1361	1450	1392
1250	21,784	1506	1649	1492
1250	21,784	1680	1705	1684

Diameter Hidraulik Jack

Atas

5.6 (Cm)

2.2 (in)

Bawah

10.3 (Cm)

4.055 (in)

Luas

24,63008641 Cm²

3,801327111 In²

83,32289117 Cm²

12,91432164 In²

Jarak Retak

1

2

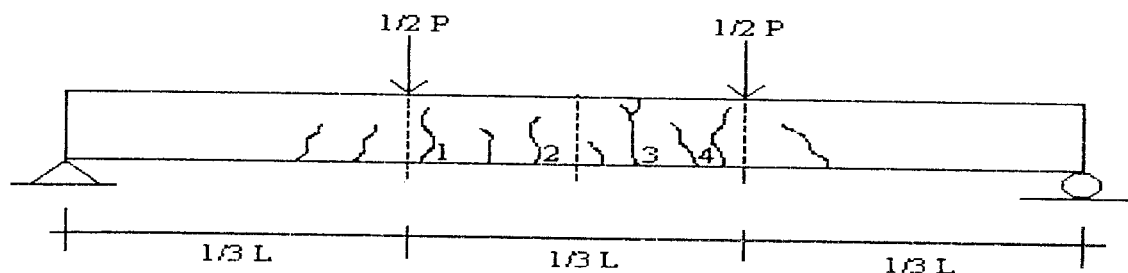
3

4

35,1

28,6

19,2 Cm



Tabel Hasil Pengamatan Retak Pengujian Lentur Balok Perbandingan $h/b = 3$

Beban (Psi)	Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	Lbr Retak 2 (mm)	Lbr Retak 3 (mm)	Lbr Retak 4 (mm)	Pjg Retak 1 (mm)	Pjg Retak 2 (mm)	Pjg Retak 3 (mm)	Pjg Retak 4 (mm)
0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
100	2,339	1,17	-	-	-	-	-	-	-	-
200	4,030	2,01	-	-	-	-	-	-	-	-
300	5,721	2,86	-	-	-	-	-	-	-	-
400	7,412	3,71	-	-	-	-	-	-	-	-
500	9,103	4,55	0,14	0,06	0,18	0,06	93	90	177	96
600	10,793	5,40	0,2	0,12	0,28	0,12	158	144	182	101
700	12,484	6,24	0,28	0,18	0,32	0,16	190	196	182	147
800	14,175	7,09	0,32	0,24	0,42	0,18	190	196	182	160
900	15,866	7,93	0,38	0,4	0,46	0,26	195	196	182	183
1000	17,557	8,78	0,46	0,44	0,5	0,28	217	196	205	183
1100	19,248	9,62	0,5	0,56	0,58	0,3	217	196	205	183
1200	20,939	10,47	0,52	0,58	0,6	0,34	217	196	205	183
1250	21,784	10,89	0,58	0,7	1,74	0,38	217	196	230	183
1250	21,784	10,89	0,6	0,74	2,4	0,4	217	196	258	183
1250	21,784	10,89	0,68	0,76	3,5	0,44	217	196	258	183
1250	21,784	10,89	0,8	0,8	5	0,5	217	196	258	183

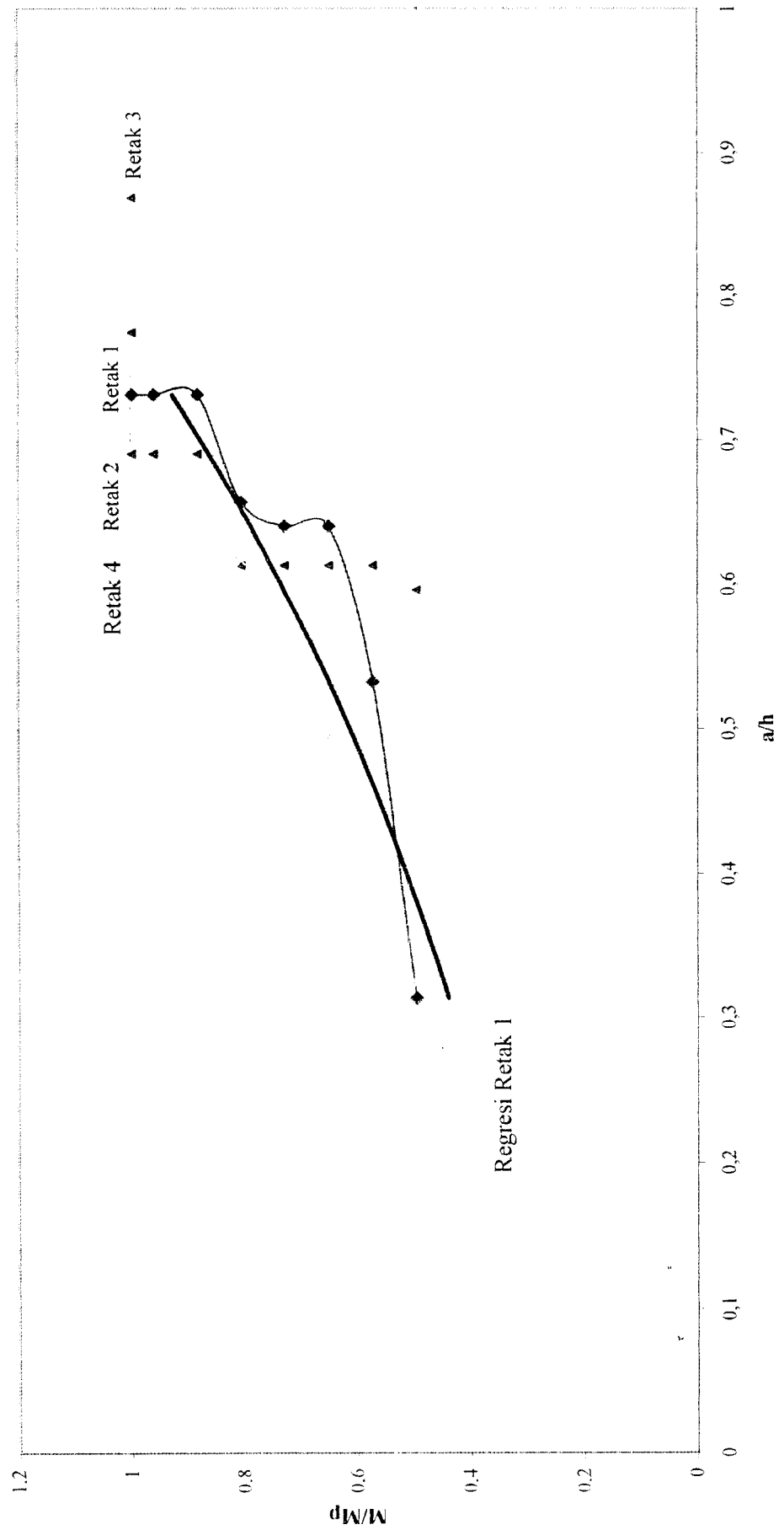
Hubungan Lebar Retak dengan Momen Pada Pengujian Balok $h/b = 3$

Tinggi Penampang (h)

296,985 mm

Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	w/h Retak 1	Lbr Retak 2 (mm)	w/h Retak 1	Lbr Retak 3 (mm)	w/h Retak 1	Lbr Retak 4 (mm)	w/h Retak 1	M/Mp
0,000	0,000	-		-		-		-		0
2,339	1,169	-		-		-		-		0,107
4,030	2,015	-		-		-		-		0,185
5,721	2,860	-		-		-		-		0,263
7,412	3,706	-		-		-		-		0,340
9,103	4,551	0,14	0,0005	0,06	0,0002	0,18	0,00061	0,06	0,0002	0,418
10,793	5,397	0,2	0,0007	0,12	0,0004	0,28	0,00094	0,12	0,0004	0,495
12,484	6,242	0,28	0,0009	0,18	0,0006	0,32	0,00108	0,16	0,0005	0,573
14,175	7,088	0,32	0,0011	0,24	0,0008	0,42	0,00141	0,18	0,0006	0,651
15,866	7,933	0,38	0,0013	0,4	0,0013	0,46	0,00155	0,26	0,0009	0,728
17,557	8,779	0,46	0,0015	0,44	0,0015	0,5	0,00168	0,28	0,0009	0,806
19,248	9,624	0,5	0,0017	0,56	0,0019	0,58	0,00195	0,3	0,0010	0,884
20,939	10,469	0,52	0,0018	0,58	0,0020	0,6	0,00202	0,34	0,0011	0,961
21,784	10,892	0,58	0,0020	0,7	0,0024	1,74	0,00586	0,38	0,0013	1
21,784	10,892	0,6	0,0020	0,74	0,0025	2,4	0,00808	0,4	0,0013	1
21,784	10,892	0,68	0,0023	0,76	0,0026	3,5	0,01179	0,44	0,0015	1
21,784	10,892	0,8	0,0027	0,8	0,0027	5	0,01684	0,5	0,0017	1

Grafik hubungan M/M_p dengan lc/h pada $h/b = 3$



**PENGARUH RASIO TINGGI DENGAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS
LENTUR BALOK BETON BERTULANG**

Sampel 3
Rasio h/b = 4

Beban (Psi)	Beban (kN)	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0
100	2,396	19	0	0
200	4,087	48	3	20,5
300	5,778	74	20	56
400	7,469	113	31	88
500	9,160	151	44	124
600	10,850	203,5	124,5	178,5
700	12,541	262	232	240
800	14,232	305,5	344,5	286,5
900	15,923	388	337,5	378
1000	17,614	458	433	453
1100	19,305	551	532	547
1200	20,996	629	639	629
1300	22,687	692,5	732	691
1400	24,378	788	841	783
1400	24,378	998	1153,5	980
1400	24,378	1212	1409	1168
1400	24,378	1385	1533	1302
1400	24,378	1590	1649	1424

Diameter Hidraulik Jack

Atas

5.6 (Cm)

2.2 (in)

Bawah

10.3 (Cm)

4.055 (in)

Luas

24,63008641 Cm²

3,801327111 In²

83,32289117 Cm²

12,91432164 In²

Jarak Retak

1

2

3

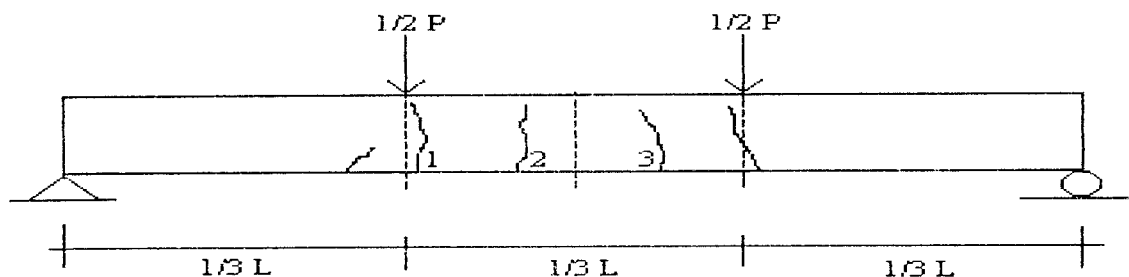
4

1

66,2

10

33 Cm



Tabel Hasil Pengamatan Retak Pengujian Lentur Balok Perbandingan $h/b = 4$

Beban (Psi)	Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	Lbr Retak 2 (mm)	Lbr Retak 3 (mm)	Pjg Retak 1 (mm)	Pjg Retak 2 (mm)	Pjg Retak 3 (mm)
0	0	0	-	-	-	-	-	-
100	2,396	1,20	-	-	-	-	-	-
200	4,087	2,04	-	-	-	-	-	-
300	5,778	2,89	-	-	-	-	-	-
400	7,469	3,73	-	-	-	-	-	-
500	9,160	4,58	-	-	-	-	-	-
600	10,850	5,43	0,08	0,02	-	70	60	-
700	12,541	6,27	0,2	0,04	0,02	141	168	62
800	14,232	7,12	0,24	0,14	0,1	196	168	131
900	15,923	7,96	0,28	0,22	0,12	196	230	165
1000	17,614	8,81	0,32	0,42	0,14	227	230	165
1100	19,305	9,65	0,34	0,46	0,16	244	230	195
1200	20,996	10,50	0,38	0,48	0,2	244	230	195
1300	22,687	11,34	0,4	0,5	0,22	244	230	195
1400	24,378	12,19	0,62	0,64	0,24	260	239	195
1400	24,378	12,19	2,7	0,7	0,26	277	239	195
1400	24,378	12,19	7,8	0,78	0,28	305	239	195
1400	24,378	12,19	8	0,8	0,3	305	239	195
1400	24,378	12,19	8,2	0,88	0,42	305	239	195

Hubungan Panjang Retak Dengan Momen Hasil Pengujian Benda Uji Rasio $h/b = 4$

Tinggi Penampang (h) 342,929 mm
 Rasio E_s/E_c 22,61

Beban (kN)	Momen (kN.m)	Pjg Retak 1 (mm)	lc/h Retak 1	Pjg Retak 2 (mm)	lc/h Retak 2	Pjg Retak 3 (mm)	lc/h Retak 3	M/Mp
0,000	0,000	-		-		-		0,00
2,396	1,198	-		-		-		0,10
4,087	2,043	-		-		-		0,17
5,778	2,889	-		-		-		0,24
7,469	3,734	-		-		-		0,31
9,160	4,580	-		-		-		0,38
10,850	5,425	70	0,20	60	0,17	-		0,45
12,541	6,271	141	0,41	168	0,49	62	0,18	0,51
14,232	7,116	196	0,57	168	0,49	131	0,38	0,58
15,923	7,962	196	0,57	230	0,67	165	0,48	0,65
17,614	8,807	227	0,66	230	0,67	165	0,48	0,72
19,305	9,653	244	0,71	230	0,67	195	0,57	0,79
20,996	10,498	244	0,71	230	0,67	195	0,57	0,86
22,687	11,343	244	0,71	230	0,67	195	0,57	0,93
24,378	12,189	260	0,76	239	0,70	195	0,57	1
24,378	12,189	277	0,81	239	0,70	195	0,57	1
24,378	12,189	305	0,89	239	0,70	195	0,57	1
24,378	12,189	305	0,89	239	0,70	195	0,57	1
24,378	12,189	305	0,89	239	0,70	195	0,57	1

Hubungan Lebar Retak dengan Momen Pada Pengujian Balok $h/b = 4$

Tinggi Penampang (h) 342,929 mm

Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	w/h Retak 1	Lbr Retak 2 (mm)	w/h Retak 1	Lbr Retak 3 (mm)	w/h Retak 1	M/Mp
0,000	0,000	-		-		-		0
2,396	1,198	-		-		-		0,098
4,087	2,043	-		-		-		0,168
5,778	2,889	-		-		-		0,237
7,469	3,734	-		-		-		0,306
9,160	4,580	-		-		-		0,376
10,850	5,425	0,08	0,0002	0,02	0,00006	-		0,445
12,541	6,271	0,2	0,0006	0,04	0,00012	0,02	0,00006	0,514
14,232	7,116	0,24	0,0007	0,14	0,00041	0,1	0,00029	0,584
15,923	7,962	0,28	0,0008	0,22	0,00064	0,12	0,00035	0,653
17,614	8,807	0,32	0,0009	0,42	0,00122	0,14	0,00041	0,723
19,305	9,653	0,34	0,0010	0,46	0,00134	0,16	0,00047	0,792
20,996	10,498	0,38	0,0011	0,48	0,00140	0,2	0,00058	0,861
22,687	11,343	0,4	0,0012	0,5	0,00146	0,22	0,00064	0,931
24,378	12,189	0,62	0,0018	0,64	0,00187	0,24	0,00070	1
24,378	12,189	2,7	0,0079	0,7	0,00204	0,26	0,00076	1
24,378	12,189	7,8	0,0227	0,78	0,00227	0,28	0,00082	1
24,378	12,189	8	0,0233	0,8	0,00233	0,3	0,00087	1
24,378	12,189	8,2	0,0239	0,88	0,00257	0,42	0,00122	1

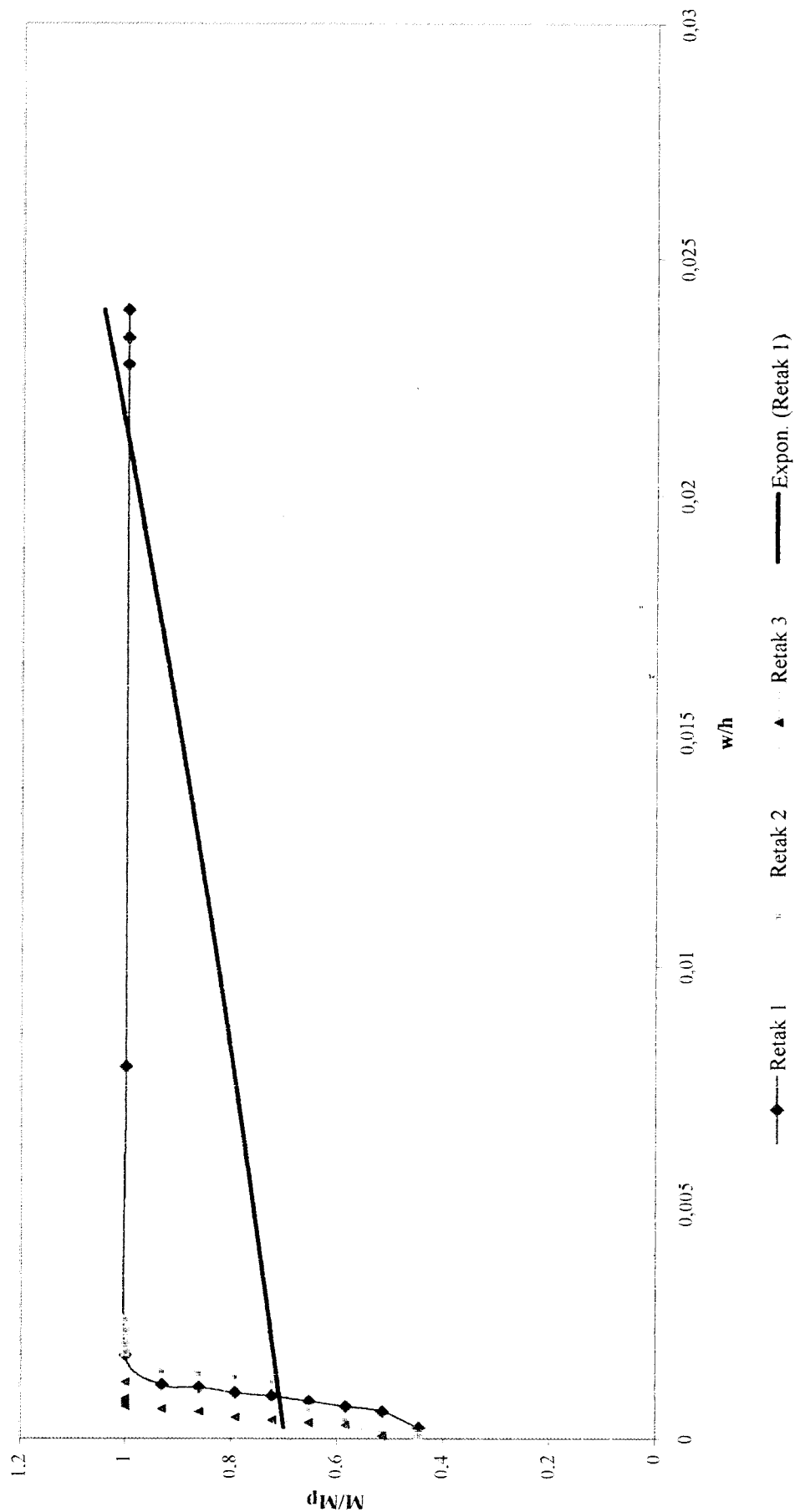
PENC

S
F

Di

Ja

Grafik hubungan M/M_p dengan w/h pada $h/b = 4$



Tabel Hasil Pengamatan Retak Pengujian Lentur Balok Perbandingan $h/b = 5$

Beban (Psi)	Beban (kN)	Momen (kN.m)	Lbr Retak 1 (mm)	Lbr Retak 2 (mm)	Lbr Retak 3 (mm)	Pjg Retak 1 (mm)	Pjg Retak 2 (mm)	Pjg Retak 3 (mm)
0	0	0	-	-	-	-	-	-
100	2,339	1,17	-	-	-	-	-	-
200	4,030	2,01	-	-	-	-	-	-
300	5,721	2,86	-	-	-	-	-	-
400	7,412	3,71	-	-	-	-	-	-
500	9,103	4,55	-	-	-	-	-	-
600	10,793	5,40	-	-	-	-	-	-
700	12,484	6,24	-	-	-	-	-	-
800	14,175	7,09	0,16	0,08	0,12	147	12	108
900	15,866	7,93	0,26	0,12	0,16	147	133	164
1000	17,557	8,78	0,28	0,16	0,18	156	175	180
1100	19,248	9,62	0,3	0,18	0,2	156	175	180
1200	20,939	10,47	0,32	0,22	0,22	156	209	198
1300	22,630	11,31	0,34	0,24	0,24	156	217	208
1400	24,321	12,16	0,36	0,24	0,24	156	217	208
1500	26,012	13,01	0,38	0,24	0,24	156	217	208
1600	27,703	13,85	0,4	0,24	0,24	156	217	208
1700	29,394	14,70	0,42	0,24	0,28	156	217	208
1800	31,084	15,54	0,76	0,24	0,32	190	217	208
1800	31,084	15,54	2,3	0,24	0,4	228	217	208
1800	31,084	15,54	2,64	0,24	0,5	244	231	208
1800	31,084	15,54	3,1	0,24	0,52	244	231	208

15,866	7,933	0,26	0,0007	0,12	0,00031	0,16	0,00042	0,510
17,557	8,779	0,28	0,0007	0,16	0,00042	0,18	0,00047	0,565
19,248	9,624	0,3	0,0008	0,18	0,00047	0,2	0,00052	0,619
20,939	10,469	0,32	0,0008	0,22	0,00057	0,22	0,00057	0,674
22,630	11,315	0,34	0,0009	0,24	0,00063	0,24	0,00063	0,728

Hubungan Panjang Retak Dengan Momen Hasil Pengujian Benda Uji Rasio $h/b = 5$

Tinggi Penampang (h)

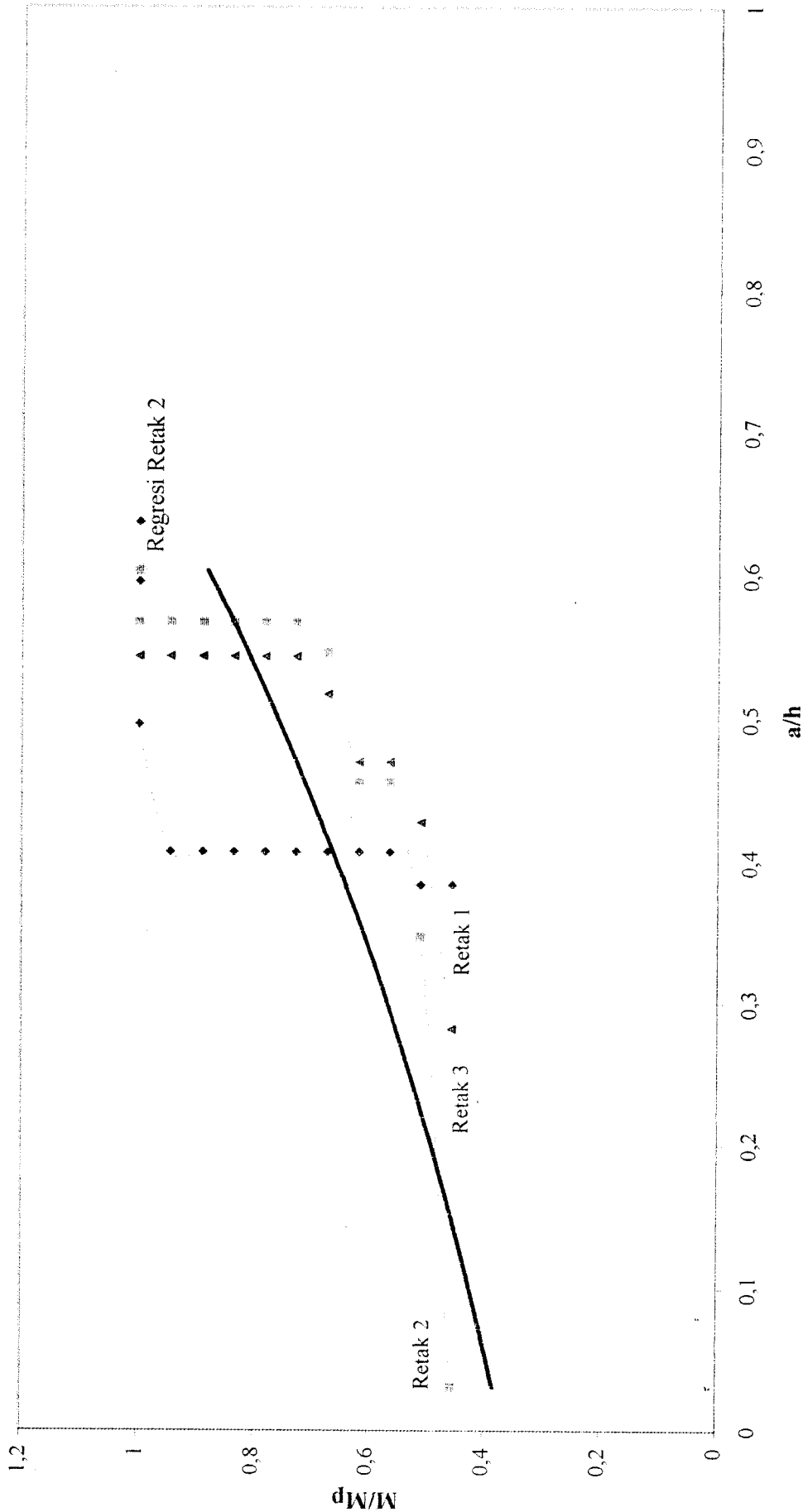
383,406 mm

Rasio E_s/E_c

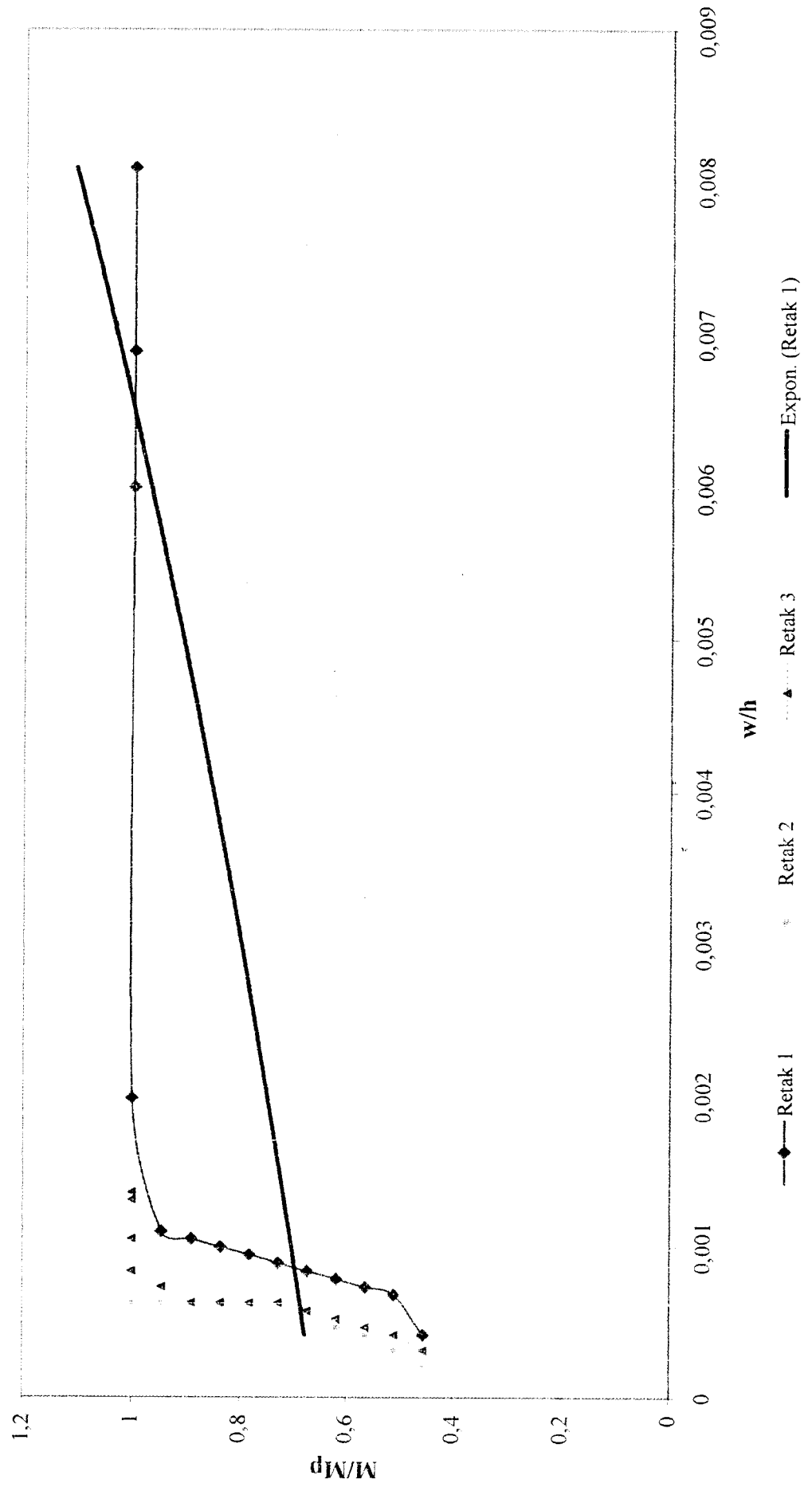
22,61

Beban (kN)	Momen (kN.m)	Pjg Retak 1 (mm)	lc/h Retak 1	Pjg Retak 2 (mm)	lc/h Retak 2	Pjg Retak 3 (mm)	lc/h Retak 3	M/Mp
0	0	-		-		-		0,00
2,339	1,169	-		-		-		0,08
4,030	2,015	-		-		-		0,13
5,721	2,860	-		-		-		0,18
7,412	3,706	-		-		-		0,24
9,103	4,551	-		-		-		0,29
10,793	5,397	-		-		-		0,35
12,484	6,242	-		-		-		0,40
14,175	7,088	147	0,38	12	0,03	108	0,28	0,46
15,866	7,933	147	0,38	133	0,35	164	0,43	0,51
17,557	8,779	156	0,41	175	0,46	180	0,47	0,56
19,248	9,624	156	0,41	175	0,46	180	0,47	0,62
20,939	10,469	156	0,41	209	0,55	198	0,52	0,67
22,630	11,315	156	0,41	217	0,57	208	0,54	0,73
24,321	12,160	156	0,41	217	0,57	208	0,54	0,78
26,012	13,006	156	0,41	217	0,57	208	0,54	0,84
27,703	13,851	156	0,41	217	0,57	208	0,54	0,89
29,394	14,697	156	0,41	217	0,57	208	0,54	0,95
31,084	15,542	190	0,50	217	0,57	208	0,54	1
31,084	15,542	228	0,59	217	0,57	208	0,54	1
31,084	15,542	244	0,64	231	0,60	208	0,54	1
31,084	15,542	244	0,64	231	0,60	208	0,54	1

Grafik hubungan M/M_p dg lc/h pada $h/b = 5$



Grafik hubungan M/M_p dengan w/h pada $h/b = 5$



PENGARUH RASIO TINGGI DENGAN LEBAR (h/b) TERHADAP KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG

Sampel 5
Rasio h/b = 6

Beban (Psi)	Beban (kN)	Dial 1	Dial 2	Dial 3
0	0	0	0	0
100	2,289	16	0	0
200	3,980	41	79	21
300	5,671	56	79,5	36
400	7,362	81	85	62,5
500	9,053	96	92	79
600	10,743	131	182	120
700	12,434	169	188	161
800	14,125	189	197,0	185
900	15,816	237	282	228
1000	17,507	279	297	274
1100	19,198	345	385	338
1200	20,889	389	406	382
1300	22,580	441	485	434
1400	24,271	486	502	482
1500	25,962	534	586	530,5
1600	27,653	577	603	577
1700	29,344	628	687	632
1800	31,034	672	710	684
1900	32,725	734	792,5	752,5
1900	32,725	942	1006,5	929
1900	32,725	1139	1182	1060
1900	32,725	1358	1473	1188
1900	32,725	1575	1600	1315
1900	32,725	1730	1698,5	1408
1900	32,725	1890	1887,5	1505,5

Diameter Hidraulik Jack

Atas

5.6 (Cm)

2.2 (in)

Bawah

10.3 (Cm)

4.055 (in)

Luas

24,63008641 Cm²

3,801327111 In²

83,32289117 Cm²

12,91432164 In²

Jarak Retak

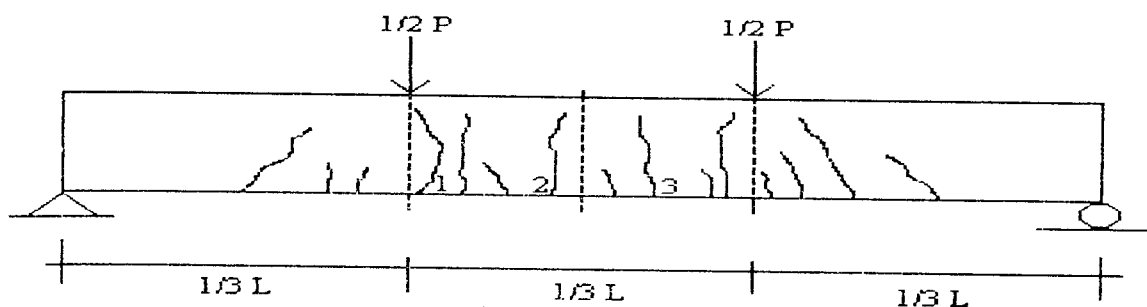
1

2

3

65,5

32 Cm



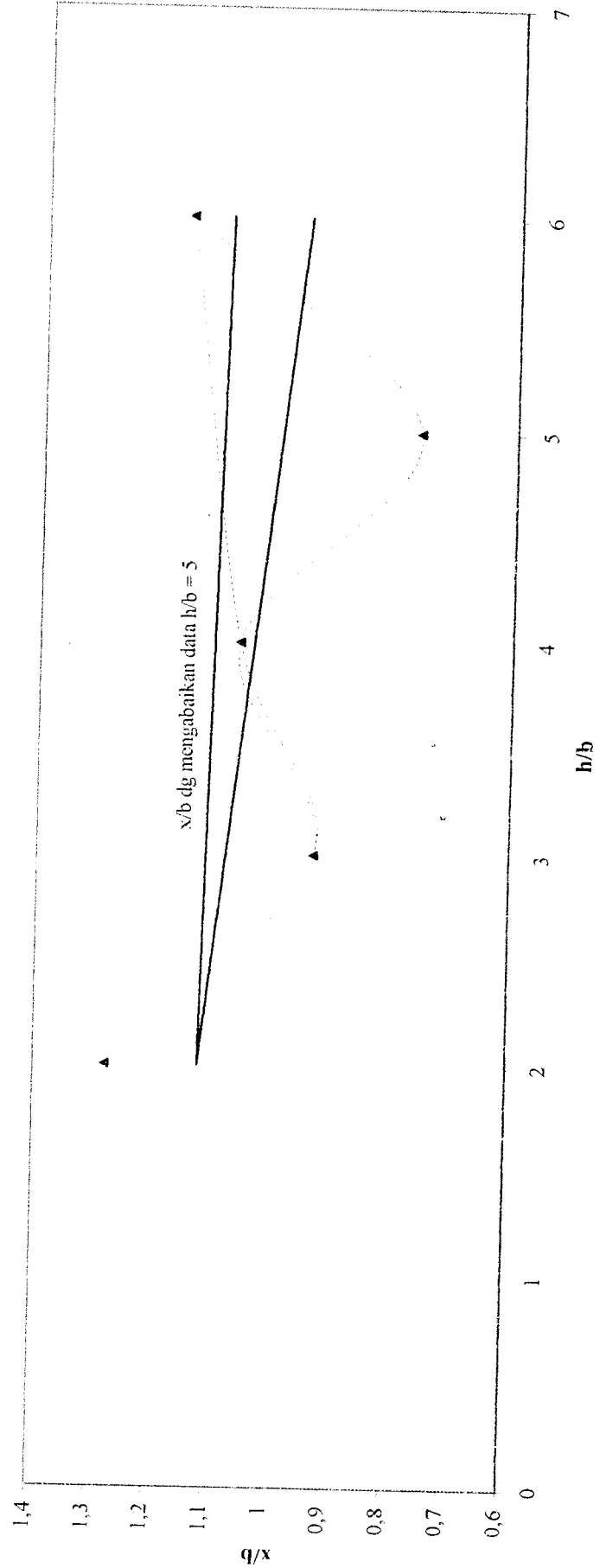
Hubungan Lebar Retak dengan Momen Pada Pengujian Balok $h/b = 6$

Tinggi Penampang (h)		420 mm						
Beban (kN)	Momen (kN.m)	Retak 1 (mm)	w/h Retak 1	Retak 2 (mm)	w/h Retak 2	Retak 3 (mm)	w/h Retak 3	M/Mp
0,000	0,000	-	-	-	-	-	-	0
2,289	1,144	-	-	-	-	-	-	0,070
3,980	1,990	-	-	-	-	-	-	0,122
5,671	2,835	-	-	-	-	-	-	0,173
7,362	3,681	-	-	-	-	-	-	0,225
9,053	4,526	-	-	-	-	-	-	0,277
10,743	5,372	-	-	-	-	-	-	0,328
12,434	6,217	0,04	0,00010	0,06	0,00014	-	-	0,380
14,125	7,063	0,06	0,00014	0,1	0,00024	0,04	0,00010	0,432
15,816	7,908	0,08	0,00019	0,12	0,00029	0,06	0,00014	0,483
17,507	8,754	0,1	0,00024	0,16	0,00038	0,1	0,00024	0,535
19,198	9,599	0,12	0,00029	0,18	0,00043	0,1	0,00024	0,587
20,889	10,444	0,14	0,00033	0,2	0,00048	0,16	0,00038	0,638
22,580	11,290	0,18	0,00043	0,24	0,00057	0,16	0,00038	0,690
24,271	12,135	0,18	0,00043	0,28	0,00067	0,18	0,00043	0,742
25,962	12,981	0,2	0,00048	0,28	0,00067	0,18	0,00043	0,793
27,653	13,826	0,2	0,00048	0,3	0,00071	0,18	0,00043	0,845
29,344	14,672	0,22	0,00052	0,32	0,00076	0,2	0,00048	0,897
31,034	15,517	0,24	0,00057	0,36	0,00086	0,2	0,00048	0,948
32,725	16,363	0,26	0,00062	0,42	0,00100	0,22	0,00052	1
32,725	16,363	0,34	0,00081	0,44	0,00105	0,24	0,00057	1
32,725	16,363	1,04	0,00248	0,5	0,00119	0,26	0,00062	1
32,725	16,363	2,2	0,00524	0,52	0,00124	0,26	0,00062	1
32,725	16,363	3,24	0,00771	0,54	0,00129	0,26	0,00062	1
32,725	16,363	3,9	0,00929	0,56	0,00133	0,26	0,00062	1
32,725	16,363	5	0,01190	0,58	0,00138	0,26	0,00062	1

Hubungan Jarak retak (x) dengan h/b Tampang Balok

h/b	h	Jarak 2 Retak (X)					X rata-rata	X/h (B)	X/h (K)	X rata-rata/h
		1	2	3	4	5				
2	242,487	368	250	312	-	-	310	1,518	1,031	1,278
3	296,985	351	286	192	-	-	276	1,182	0,646	0,930
4	342,929	662	100	330	-	-	364	1,930	0,292	1,061
5	383,406	372	213	-	-	-	292,5	0,970	0,556	0,763
6	420,000	650	320	-	-	-	485	1,548	0,762	1,155

Grafik hubungan h/b dengan x/h



Grafik Hubungan Momen Nominal (Mn) dan Instabilitas Lateral (Mcr) pada variasi h/b penampang balok

