

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 Ie, 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 :

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

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

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

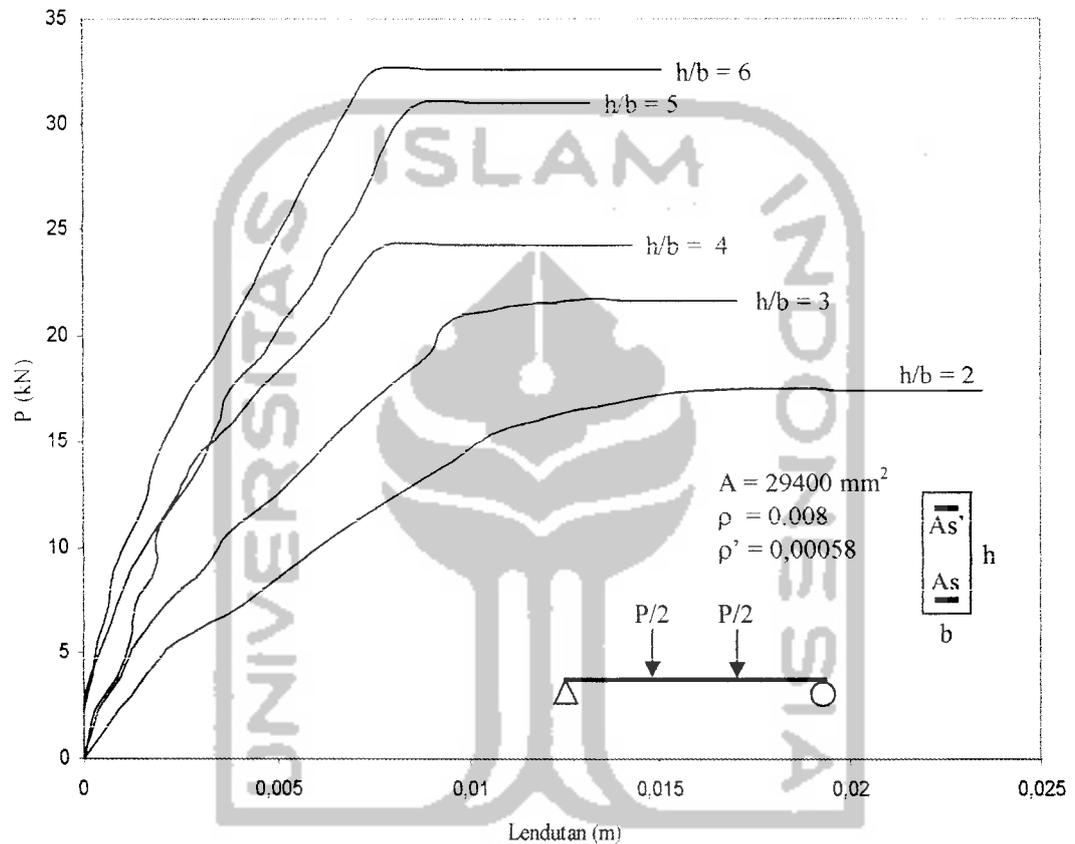
5.3.1. Hubungan beban dengan lendutan balok

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

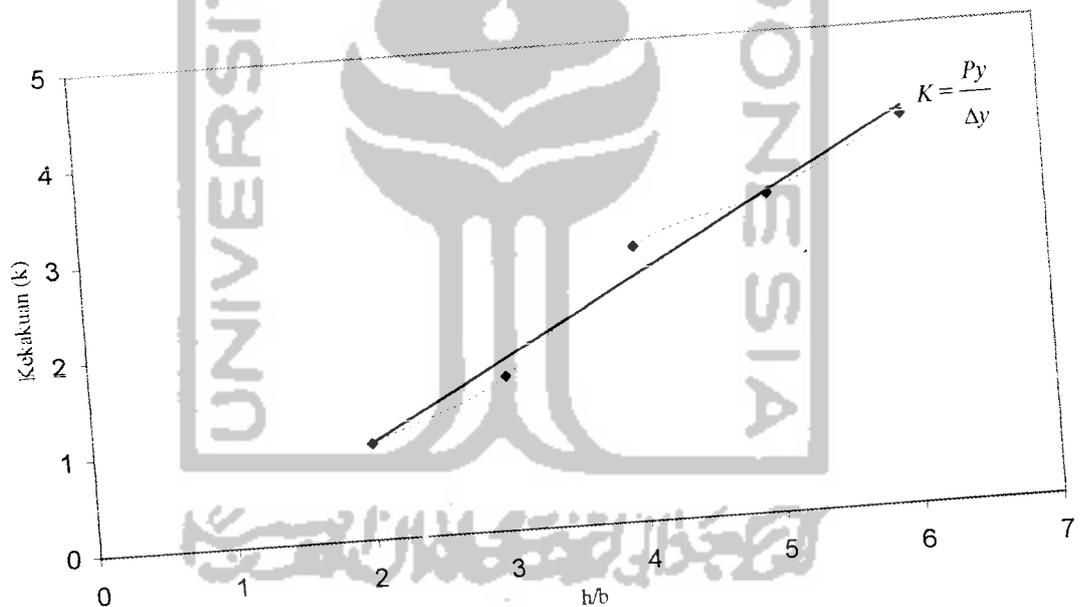
Kekakuan balok (k) diketahui dari nilai banding beban leleh (P_y) dan lendutan leleh (Δy). Kekakuan balok dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

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

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)

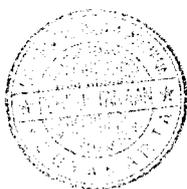
h/b	P_y (kN)	Δy (m)	K	K (%)
2	17,24	0,01600	1,0000	100,00
3	21,55	0,01249	1,6013	160,13
4	24,14	0,00783	2,8613	286,13
5	31,04	0,00870	3,3112	331,12
6	32,76	0,00753	4,0404	404,04



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.

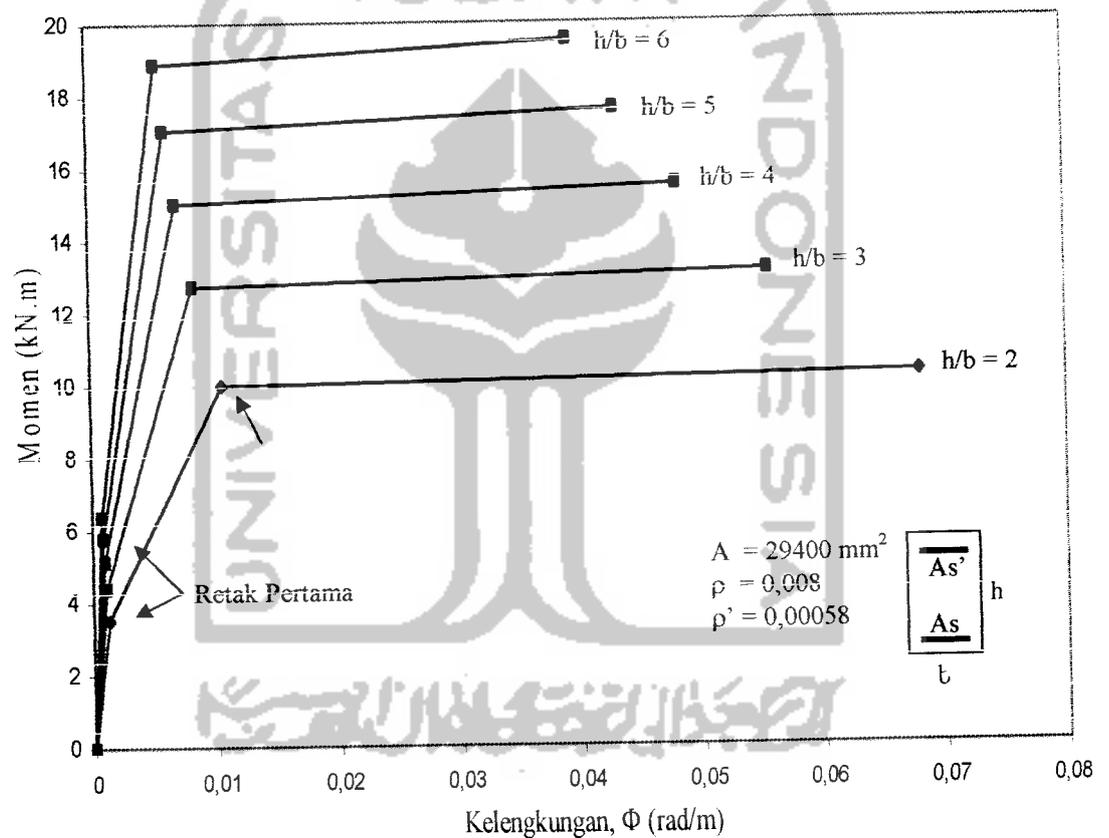
5.3.2. Hubungan momen dengan kelengkungan

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.

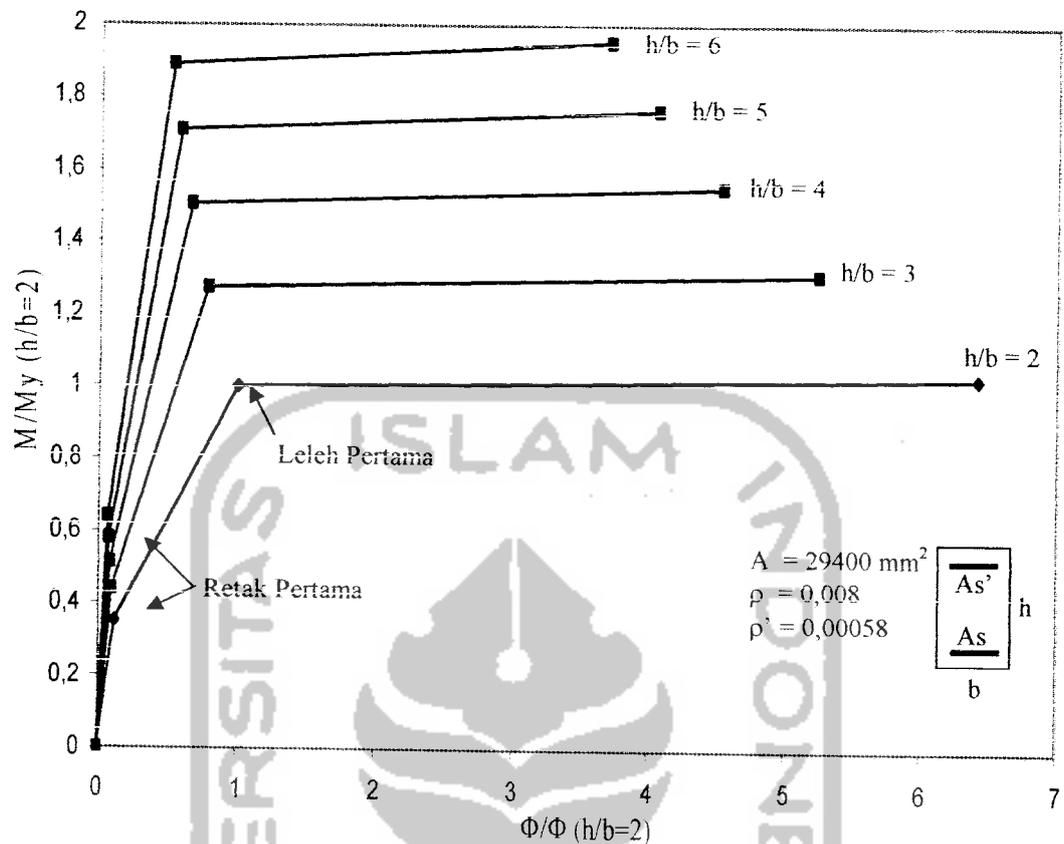
Tabel 5.3 Hasil Perhitungan Momen Kelengkungan Teoritis

Sampel	h/b	M _{rt} (kN.m)	Φ _{rt} x10 ⁻⁴ (rad/m)	M _y (kN.m)	Φ _y x10 ⁻⁴ (rad/m)	M _u (kN.m)	Φ _u x10 ⁻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

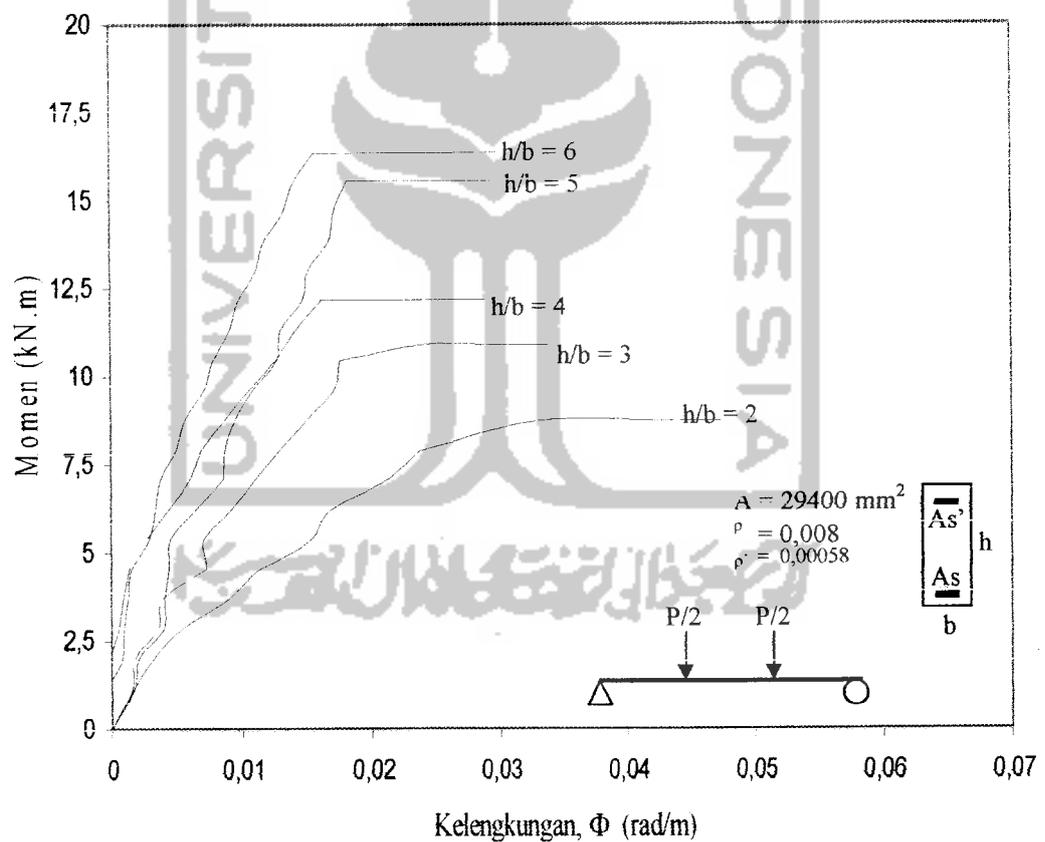
Dari hasil pengujian lentur didapat data primer berupa beban (P) dan lendutan (Δ) yang disajikan pada lampiran 3. Dari data tersebut dapat diketahui besar momen dan kelengkungan serta faktor kekakuan. Kelengkungan balok diturunkan dari data perpindahan dengan pendekatan *central differencia*.

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.

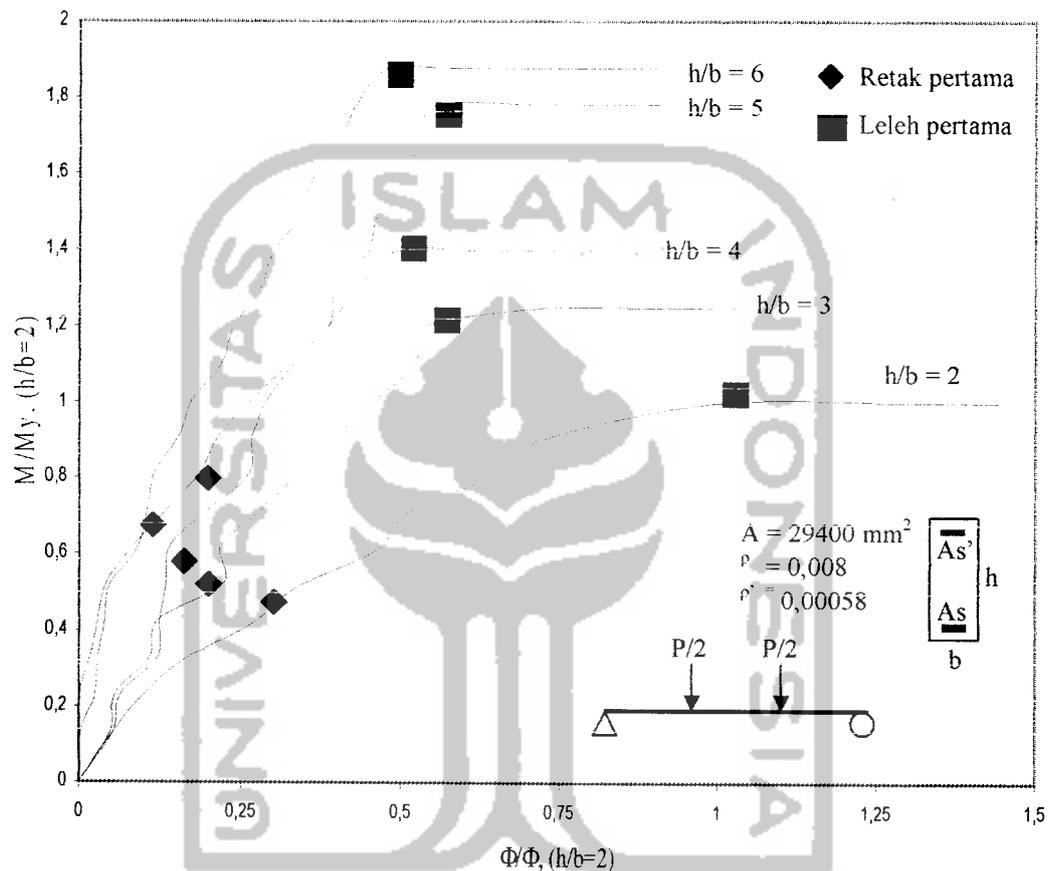
Tabel 5.4 Momen dan Kelengkungan Hasil Pengujian

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 :



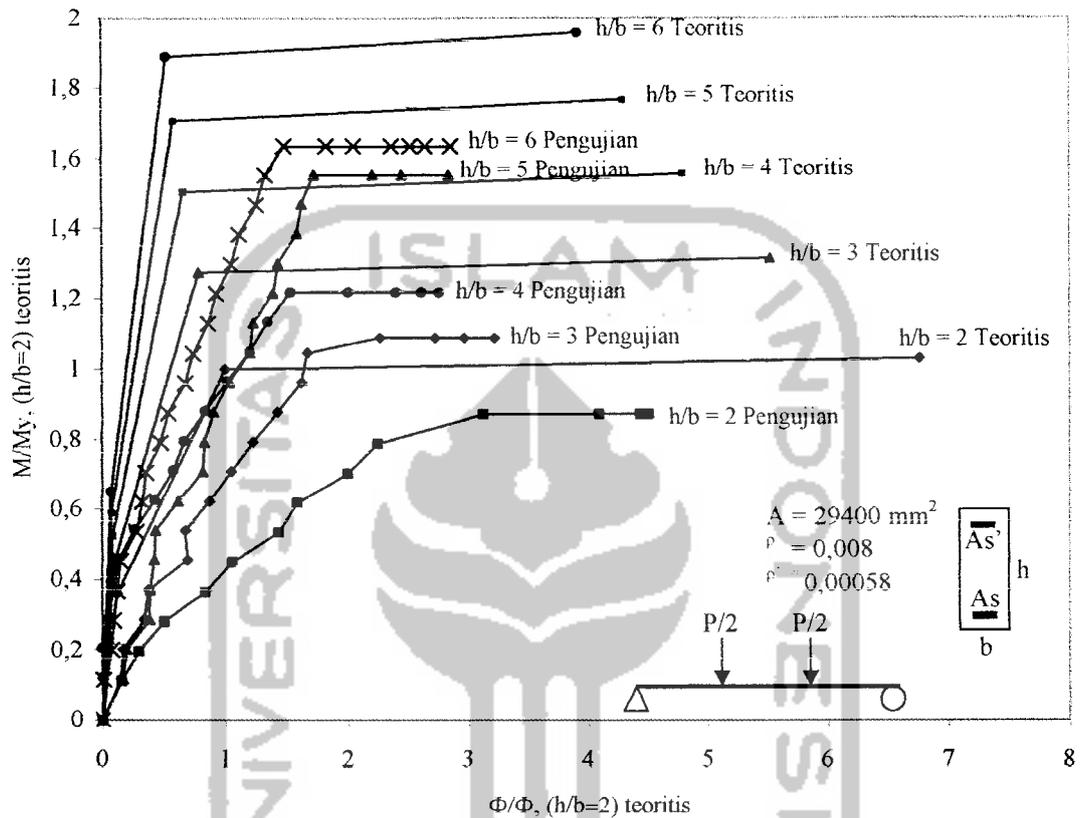
Gambar 5.6 Graffik non dimensional hubungan $M/My, (h/b=2)$ dengan $\Phi/\Phi, (h/b=2)$ pada berbagai variasi h/b

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.

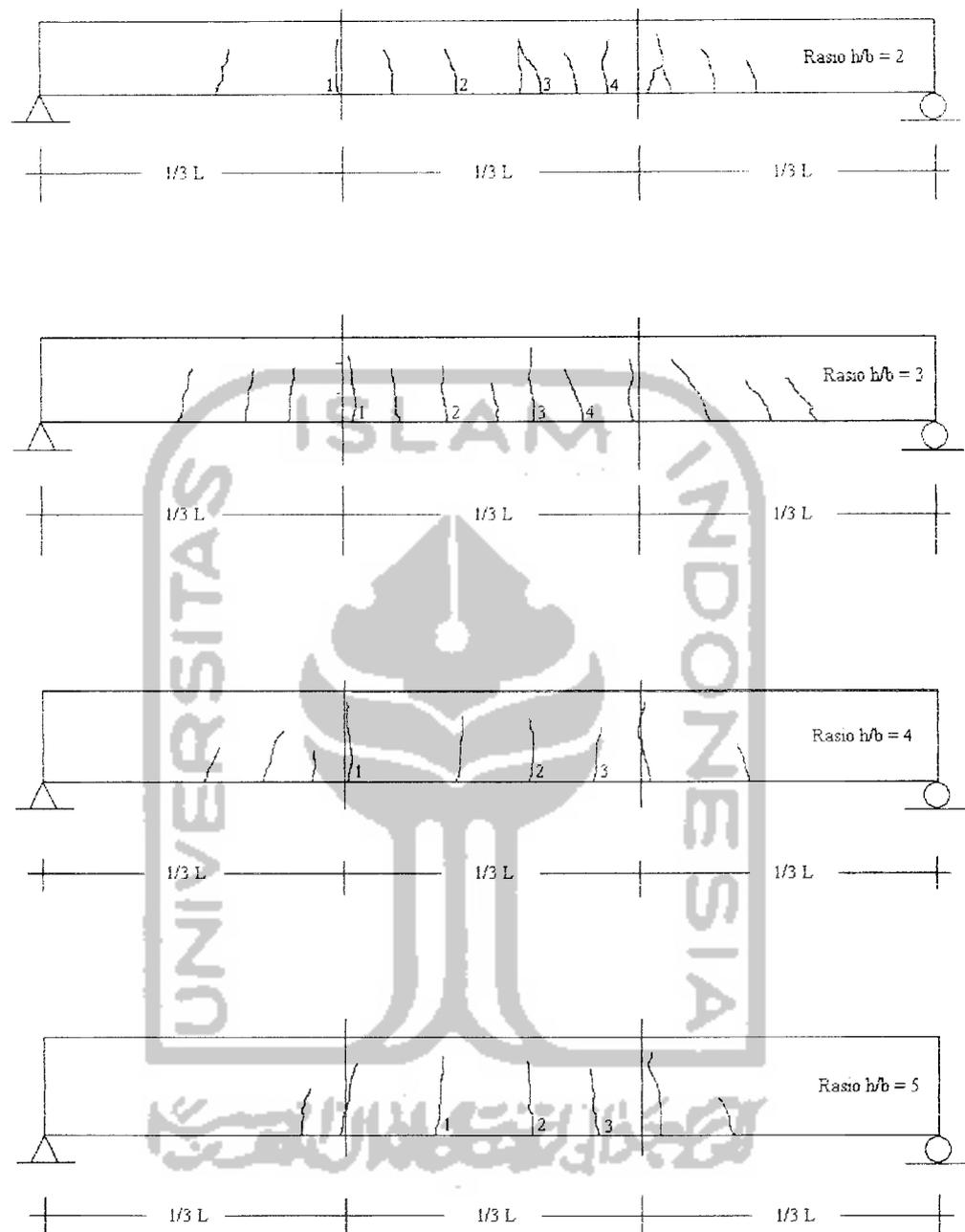
Tabel 5.7 Analisa Data Faktor Kekakuan

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

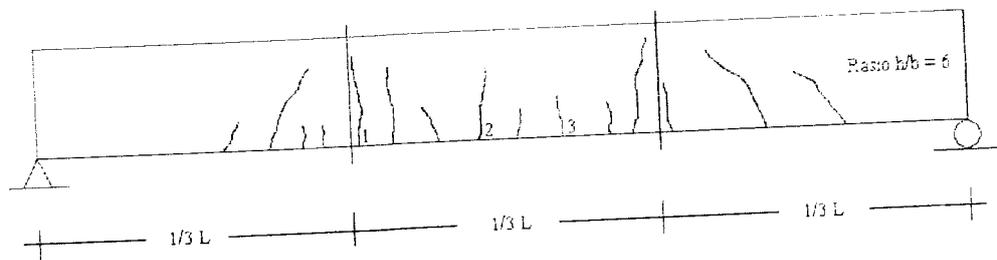
5.4. Analisa Retak

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.

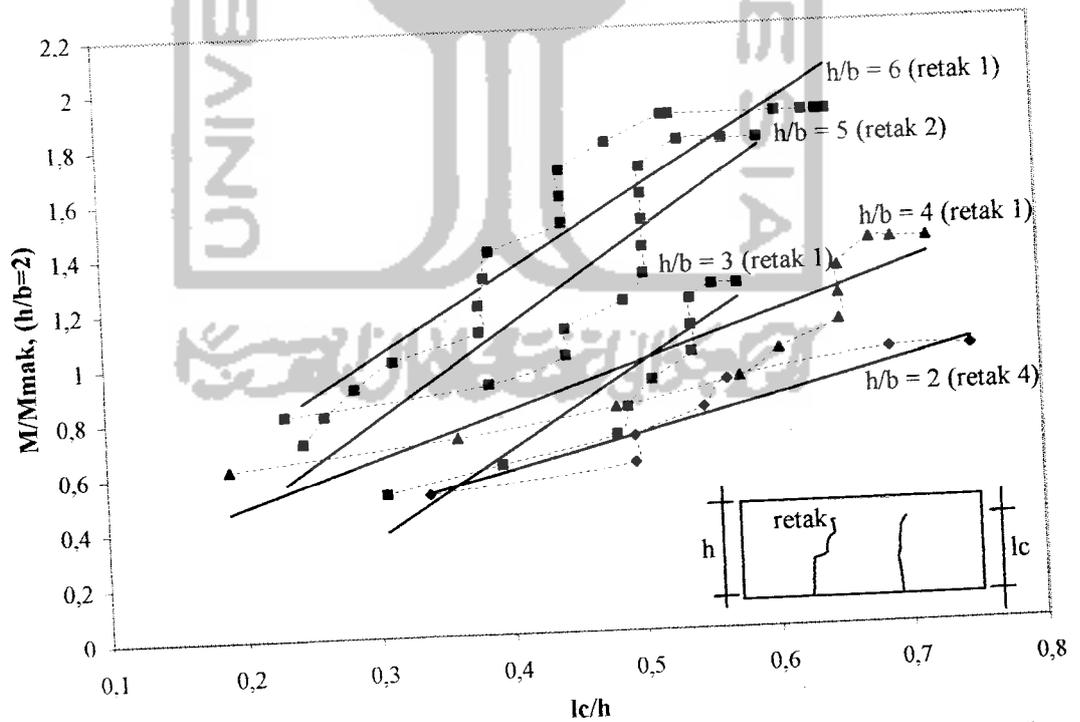


Gambar 5.8 Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok

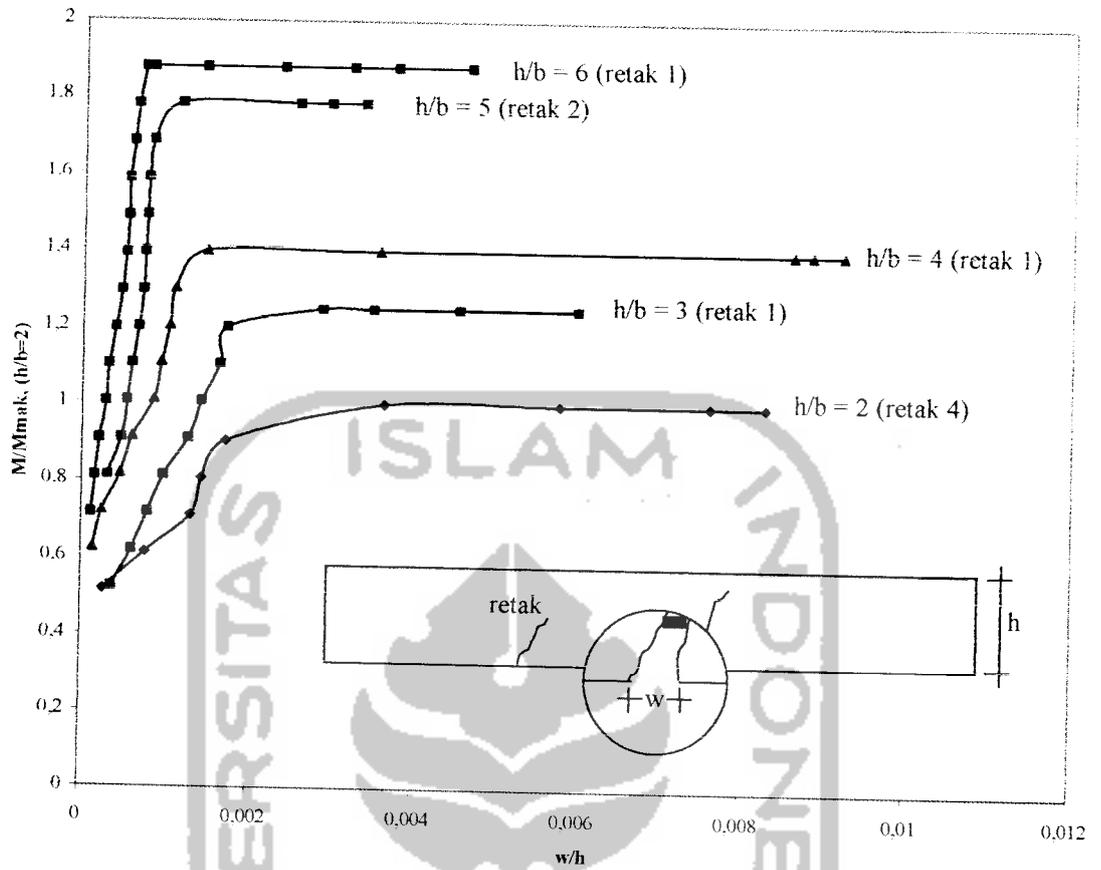


Gambar 5.9 Pola retak yang terjadi pada pengujian lentur balok

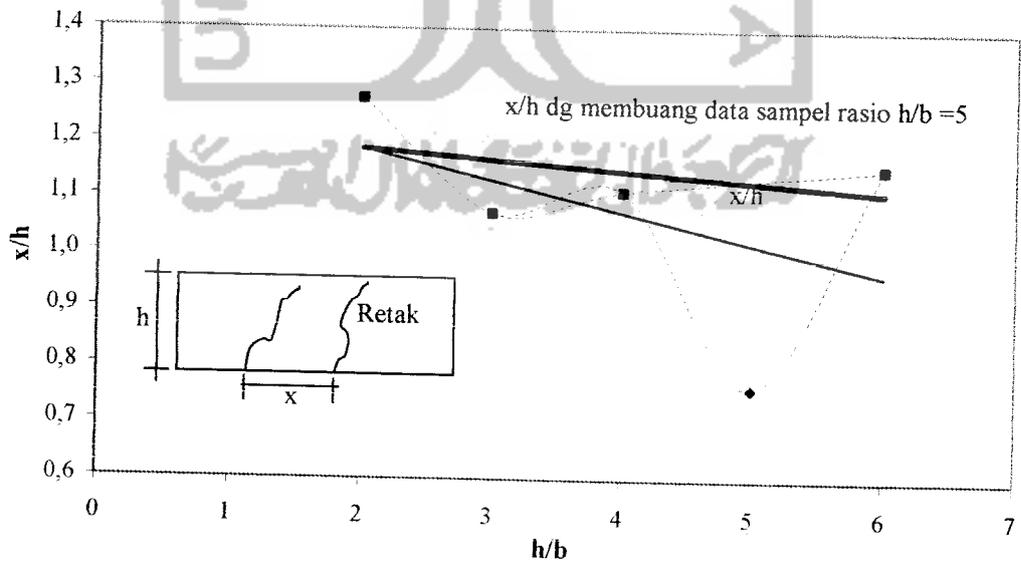
Gambar 5.8 dan Gambar 5.9 menunjukkan retak yang terjadi pada pengujian lentur balok, nomor-nomor pada retak menunjukkan retak yang diukur dan selanjutnya akan dianalisa, data retak yang diperoleh disertakan dalam Lampiran 3ab, 3bb, 3cb, 3db, 3eb, sedang hasil dari pengukuran retak tersebut ditunjukkan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

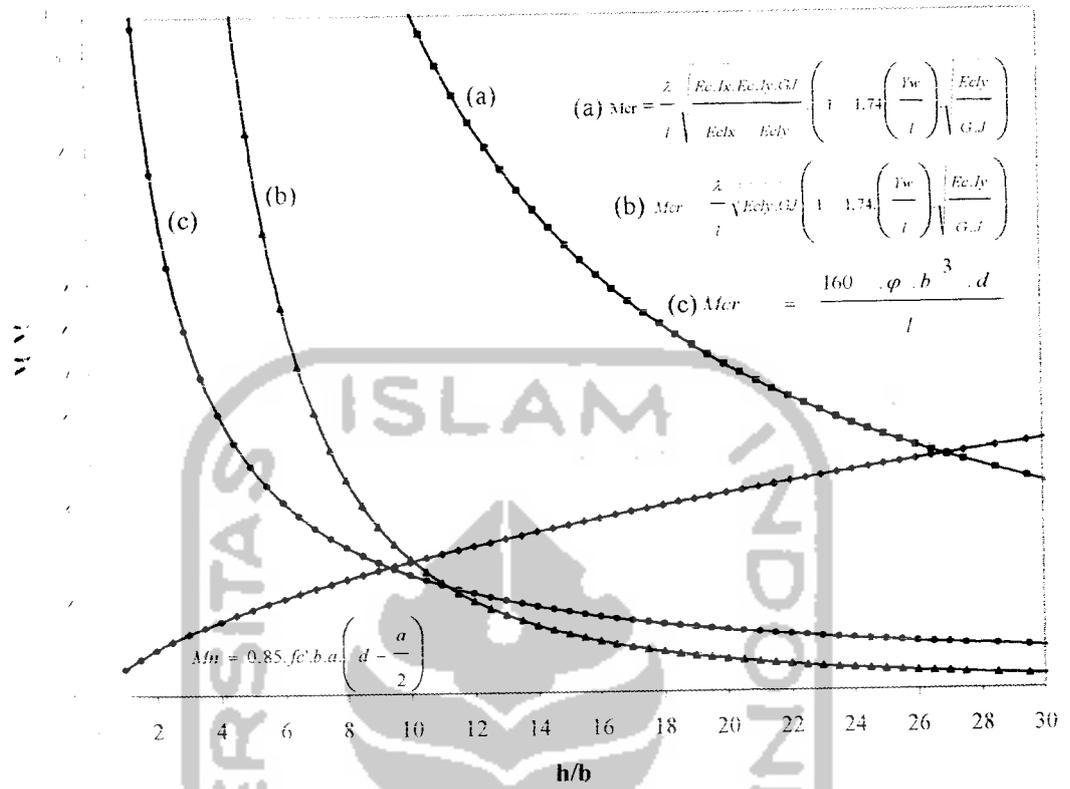
Dari hasil analisa hubungan lebar retak (w) dengan tinggi penampang (h), dapat diambil kesimpulan bahwa, balok akan mengalami kegagalan lentur pada rasio $w/h = 0,002$. Tetapi nilai tersebut menurun dengan bertambahnya rasio h/b penampang, hingga pada rasio $h/b = 6$ balok mengalami kegagalan pada rasio $w/h = 0.001$. 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 Mn dengan Mcr