

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil Penelitian

Setelah semua pelaksanaan penelitian di laboratorium selesai, sebagai hasilnya didapatkan data untuk analisis hasil dan pembahasan meliputi tegangan leleh baja, tegangan desak beton, data pembebanan, pola retak, pola runtuh, kemiringan retak tarik diagonal, regangan beton berdasarkan analisis *strain gauge*, defleksi pada tiap interval pembebanan, dan akhirnya didapat kapasitas geser dan tegangan geser untuk masing-masing benda uji.

5.1.1 Hasil Uji Kuat Tarik Baja

Untuk mengetahui tegangan leleh, tegangan tarik maksimum, dan tegangan baja tulangan dilakukan uji tarik. Pengambilan benda uji dilakukan dengan memotong baja tulangan sepanjang 25 cm dari tiap baja tulangan yang dipakai. Pada penelitian ini diambil tiga sampel untuk diameter pengenal 13 mm dan tiga sampel untuk diameter pengenal 6 mm. Hasil dari kuat tarik baja dapat dilihat pada tabel 5.1. di bawah ini .

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan

Benda Uji	Diameter Pengenal (mm)	Diameter Nyata (mm)	Tegangan Leleh (Mpa)	Tegangan Tarik Maks (Mpa)	Regangan Leleh (%)	Regangan Maksimum (%)
1	6	5,8	386,625	494,881	6,138	23,733
2	6	6,1	382,47	489,563	7,301	29,205
3	6	6,1	363.909	470,050	7,712	32,991
Rata ²	6	6	377,668	484,831	7,050	28,643

Benda Uji	Diameter Pengenal (mm)	Diameter Nyata (mm)	Tegangan Leleh (Mpa)	Tegangan Tarik Maks (Mpa)	Regangan Leleh (%)	Regangan Maksimum (%)
4	13	12,8	404,953	626,531	3,92	13,395
5	13	12,8	453,83	703,437	3,222	14,662
6	13	12,8	425,39	630,492	3,064	11,289
Rata ²	13	12,8	428,057	653,486	3,402	13,115

5.1.2. Hasil Uji Kuat Desak Beton

Benda uji silinder beton dibuat bersamaan dengan balok beton. Setiap satu adukan beton dibuat 4 sampai 10 buah silinder, sehingga seluruhnya terdapat 31 buah. Pengujian kuat tekan silinder dilaksanakan pada umur beton 28 hari. Data hasil pengujian kuat desak beton dapat dilihat pada tabel 5.2. di bawah ini :

Tabel 5.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Tipe	Berat (kg)	Luas (mm ²)	Beban Maks (N)		Kuat tekan (Mpa)	
			P. Maks	Rata-rata	Kuat tekan	Rata-rata
A1	12,8	17662,5	980.000	952.500	55,485	84,834
A2	12,8	16963,065	920.000		54,235	
A3	12,6	17194,64	960.000		55,83	
A4	12,8	17662,5	950.000		53,786	
B1	12,8	16963,065	935.000	920.000	55,119	53,334
B2	12,8	17662,5	925.000		52,371	
B3	12,8	17194,64	900.000		52,342	
B4	12,8	17194,64	920.000		53,505	
C1	12,8	17427,785	975.000	933.750	55,945	54,3015
C2	12,8	16963,065	940.000		55,415	
C3	12,8	17194,64	885.000		51,469	
C4	12,8	17194,64	935.000		54,377	
D1	13	17194,64	940.000	930.000	54,668	52,821
D2	12,8	17662,5	970.000		54,918	
D3	13	17662,5	890.000		50,389	
D4	12,9	17662,5	940.000		53,22	
D5	12,8	17662,5	870.000		49,257	
D6	12,8	17662,5	930.000		52,654	
D7	13	18136,64	950.000		52,380	
D8	12,8	17194,64	950.000		55,249	
D9	12,8	17662,5	930.000		52,654	
E1	13	16963,065	920.000		929.500	
E2	13,1	17194,64	980.000	56,995		
E3	13,1	17194,64	940.000	54,668		
E4	13,2	17662,5	900.000	50,955		
E5	13	17662,5	920.000	52,088		
E6	13,2	17662,5	890.000	50,389		
E7	13	17427,785	940.000	53,937		
E8	13,2	17662,5	960.000	54,352		
E9	13,2	17662,5	925.000	52,371		
E10	12,8	17662,5	920.000	52,088		

Hasil perhitungan kuat tekan beton karakteristik adalah sebagai berikut :

Tipe A :

	f_c	$(f_c - f_{cr})$	$(f_c - f_{cr})^2$
A1	55,485	0,651	0,4238
A2	54,235	- 0,599	0,3588
A3	55,83	0,996	0,992
A4	53,786	- 1,048	1,0983
	219,336		2,8729

$$f_{cr}' = \frac{219,336}{4} = 54,834 \text{ Mpa}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_c - f_{cr})^2}{N-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{2,8729}{4-1}} = 0,9786$$

$$m = 1,34 \cdot S_d$$

$$= 1,34 \cdot 0,9786 = 1,3113$$

$$f_{cr}' = f_c' + 1,35 \cdot S_d$$

$$f_c' = f_{cr}' - 1,34 \cdot S_d$$

$$= 54,834 - 1,3113 = 53,5227 \text{ Mpa}$$

Tipe B

	Fc	(fc - fcr)	(fc - fcr) ²
B1	55,119	1,785	3,186
B2	52,371	-0,963	0,927
B3	52,342	-0,996	0,984
B4	53,505	0,171	0,029
	213,337		5,126

$$f_{cr}' = \frac{213,337}{4} = 53,334 \text{ Mpa}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{5,126}{4-1}} = 1,307$$

$$m = 1,34 \cdot S_d$$

$$= 1,34 \cdot 1,307 = 1,751$$

$$f_c' = 53,334 - 1,751 = 51,583 \text{ Mpa}$$

Tipe C

	Fc	(fc - fcr)	(fc - fcr) ²
C1	55,945	1,6435	2,701
C2	55,415	1,1135	1,2399
C3	51,469	- 2,8325	8,023
C4	54,377	0,0755	0,0057
	217,206		11,9696

$$f_{cr}' = \frac{217,206}{4} = 54,3015 \text{ Mpa}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{11,9696}{4-1}} = 1,9975$$

$$m = 1,34 \cdot 1,9975 = 2,677$$

$$f_c' = 54,3015 - 2,677 = 51,6245 \text{ Mpa}$$

Tipe D

	Fc	(fc - fcr)	(fc - fcr) ²
D1	54,668	1,847	3,4114
D2	54,918	2,097	4,397
D3	50,389	- 2,432	5,915
D4	53,22	0,399	0,1592
D5	49,257	- 3,564	12,702
D6	52,654	- 0,167	0,0279
D7	52,380	- 0,441	0,1945
D8	55,249	2,428	5,895
D9	55,645	- 0,167	0,0279
	475,389		11,9696

$$f_{cr}' = \frac{475,389}{9} = 52,821 \text{ Mpa}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{32,7299}{9-1}} = 2,0227$$

$$m = 1,34 \cdot 2,0227 = 2,7104$$

$$f_c' = 52,821 - 2,7104 = 50,1106 \text{ Mpa}$$

Tipe E

	fc	(fc - fcr)	(fc - fcr) ²
E1	54,235	1,0272	1,055
E2	56,995	3,7872	14,343
E3	54,668	1,4602	2,1322
E4	50,955	- 1,2528	5,075
E5	52,088	- 1,1198	1,254
E6	50,389	- 2,8188	7,9456
E7	53,937	0,7292	0,5317
E8	54,352	1,1442	1,3092
E9	52,371	- 0,8368	0,7002
E10	52,088	- 1,1198	1,2539
	532,078		35,5998

$$f_{cr}' = \frac{532,078}{10} = 53,2078 \text{ Mpa}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{35,5998}{10-1}} = 1,9889$$

$$m = 1,34 \cdot 1,9889 = 2,665$$

$$f_c' = 53,2078 - 2,665 = 50,5428 \text{ Mpa}$$

5.1.3. Hasil Uji Kuat Geser

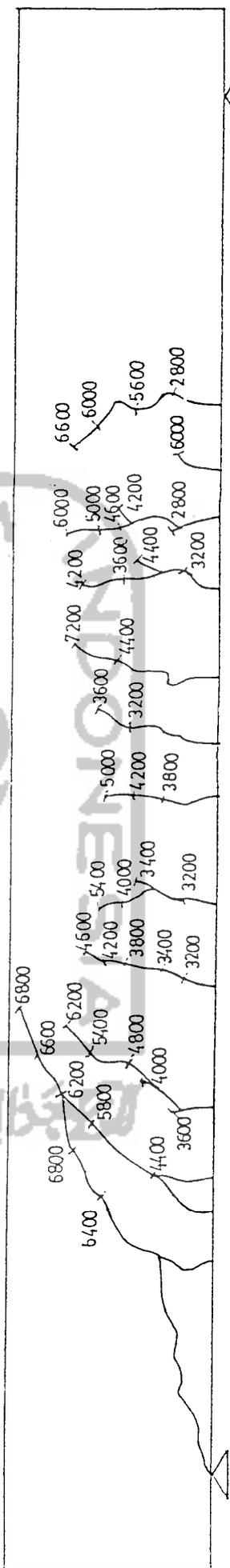
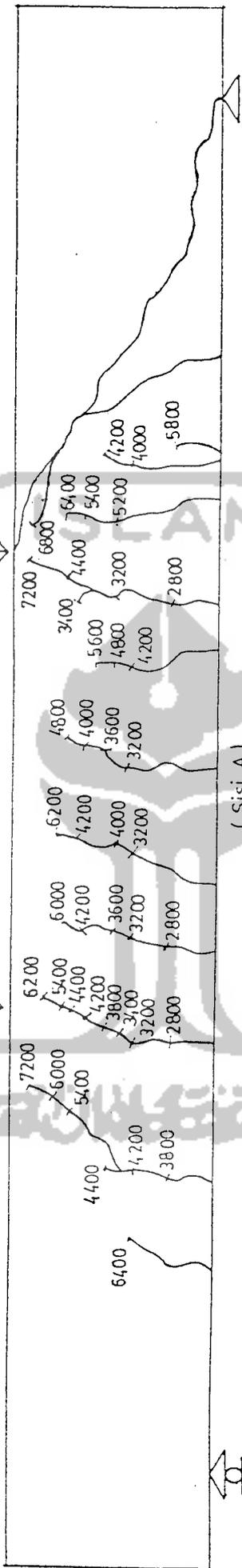
Penelitian dilakukan dengan menggunakan benda uji balok. Hasil penelitian geser dari masing-masing sampel dikelompokkan dalam bentuk tabel yang menunjukkan nilai defleksi pada setiap interval pembebanan serta kuat geser dari masing-masing sampel. Grafik hubungan antara beban dan defleksi, yang dapat dilihat pada gambar lampiran 9,12,13,16,18. Hasil pengujian balok dapat dilihat pada tabel lampiran 8,10,11,15,17. Pola retak yang terjadi pada setiap sampel dapat dilihat pada gambar 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9.

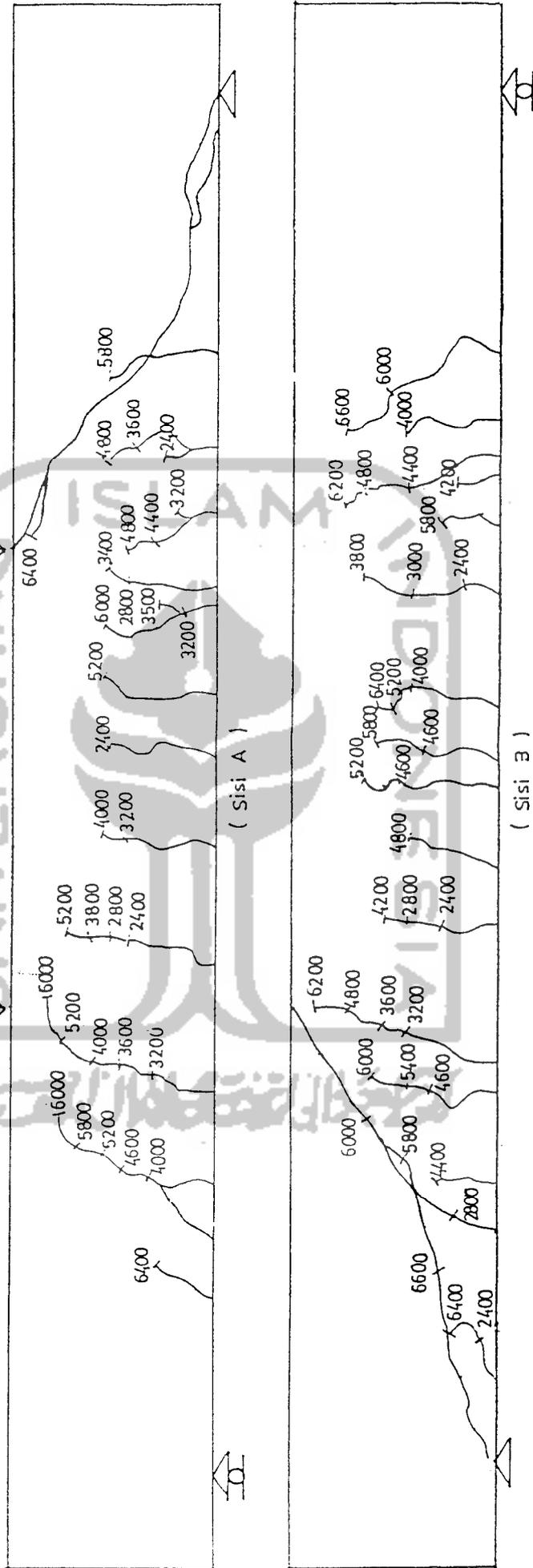
5.1.4. Hasil Pembacaan *Strain Gauge* Beton

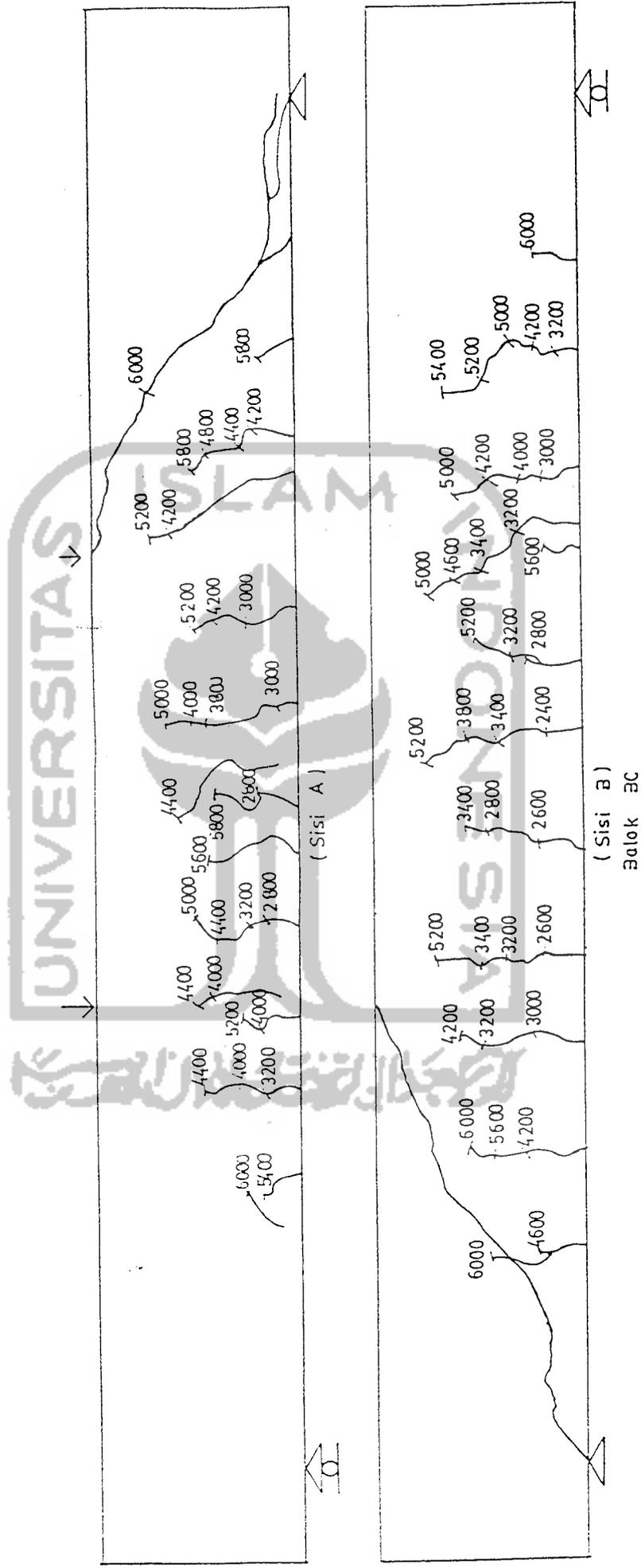
Pada penelitian ini, *strain gauge* di pasang di permukaan atas tengah bentang pada balok beton. Maksud dari pemasangan *strain gauge* ini adalah untuk mengetahui secara aktual regangan yang terjadi pada balok beton terutama yang diberi *strain gauge*, ketika balok secara bertahap dibebani hingga runtuh. Pemberian *strain gauge* pada beton terdapat pada balok D,E,F.

Penempatannya pada permukaan balok yang terletak tepat di tengah-tengah bentang balok uji, hal ini atas dasar asumsi awal bahwa balok akan runtuh geser pada lokasi di sekitar bentang geser. Hasil pembacaan *strain gauge* beton dapat dilihat pada tabel lampiran 18.

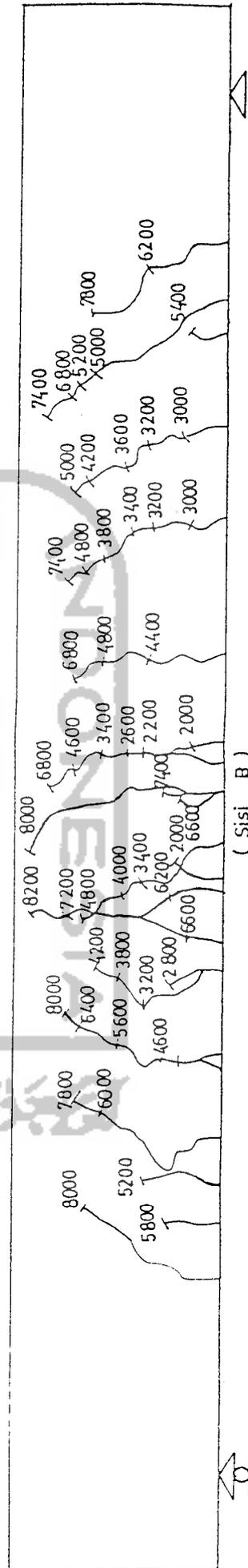
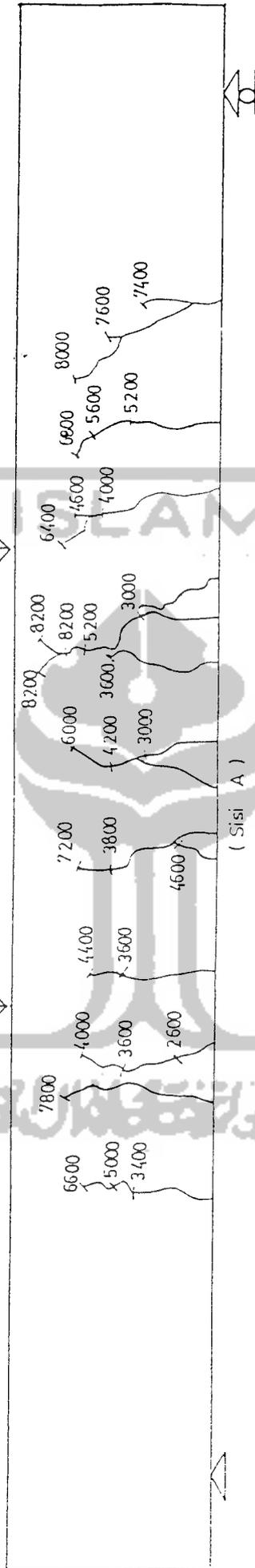
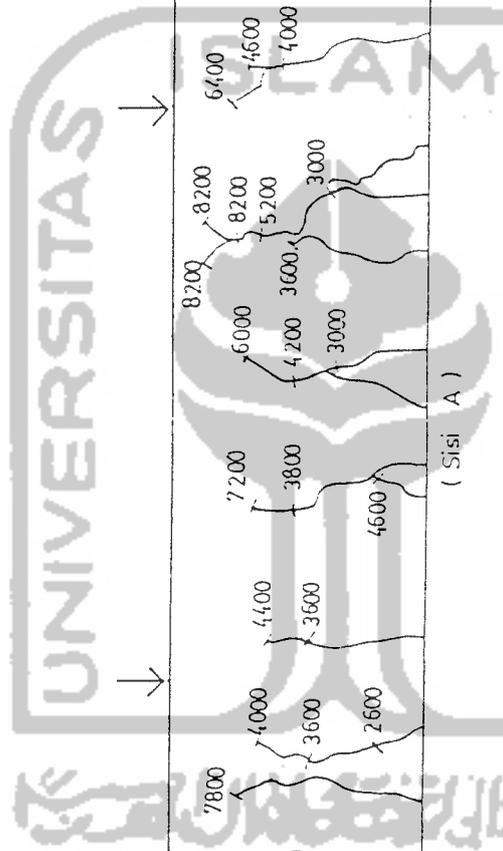


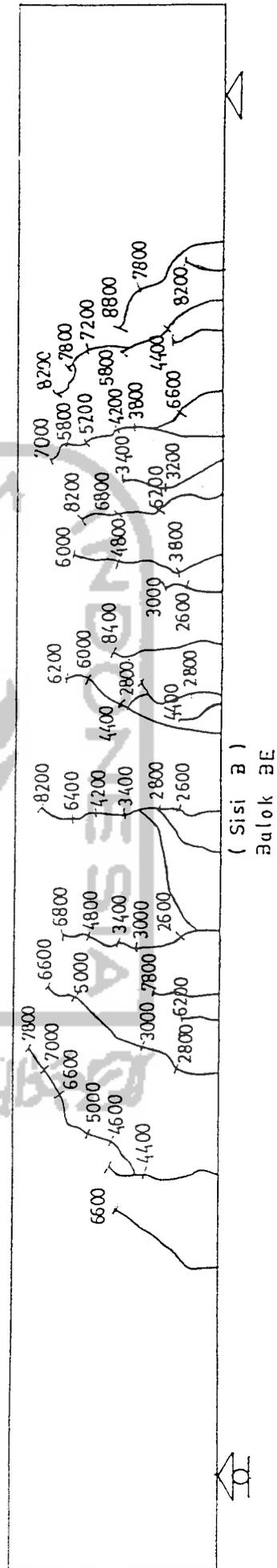
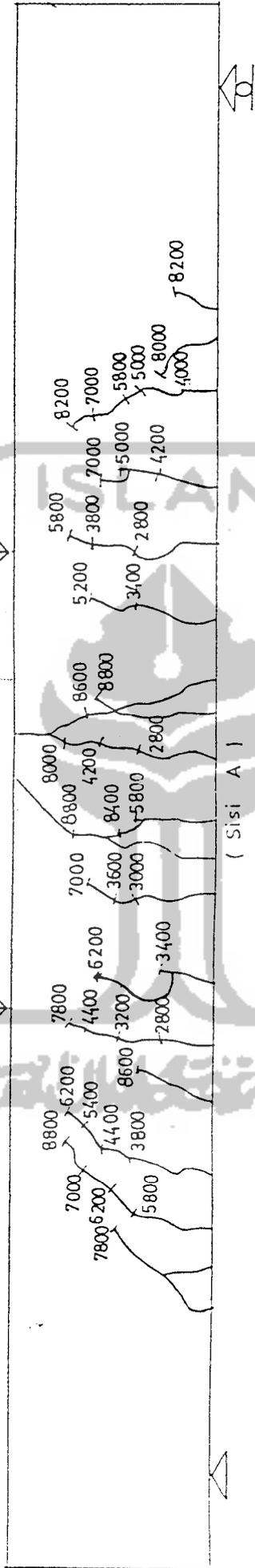
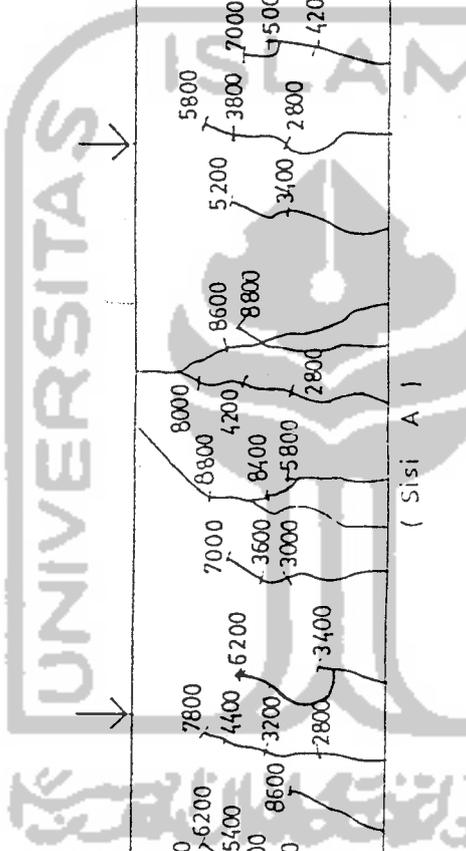


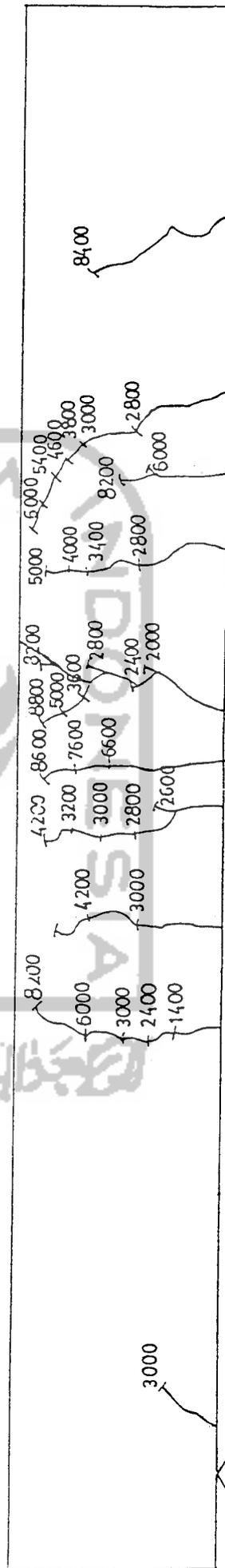
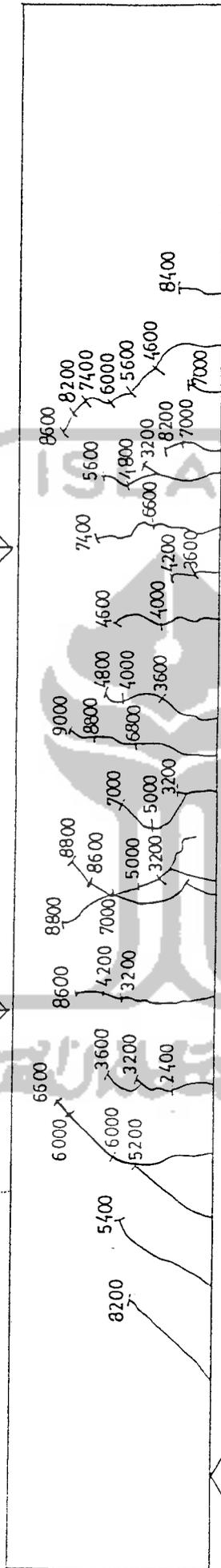


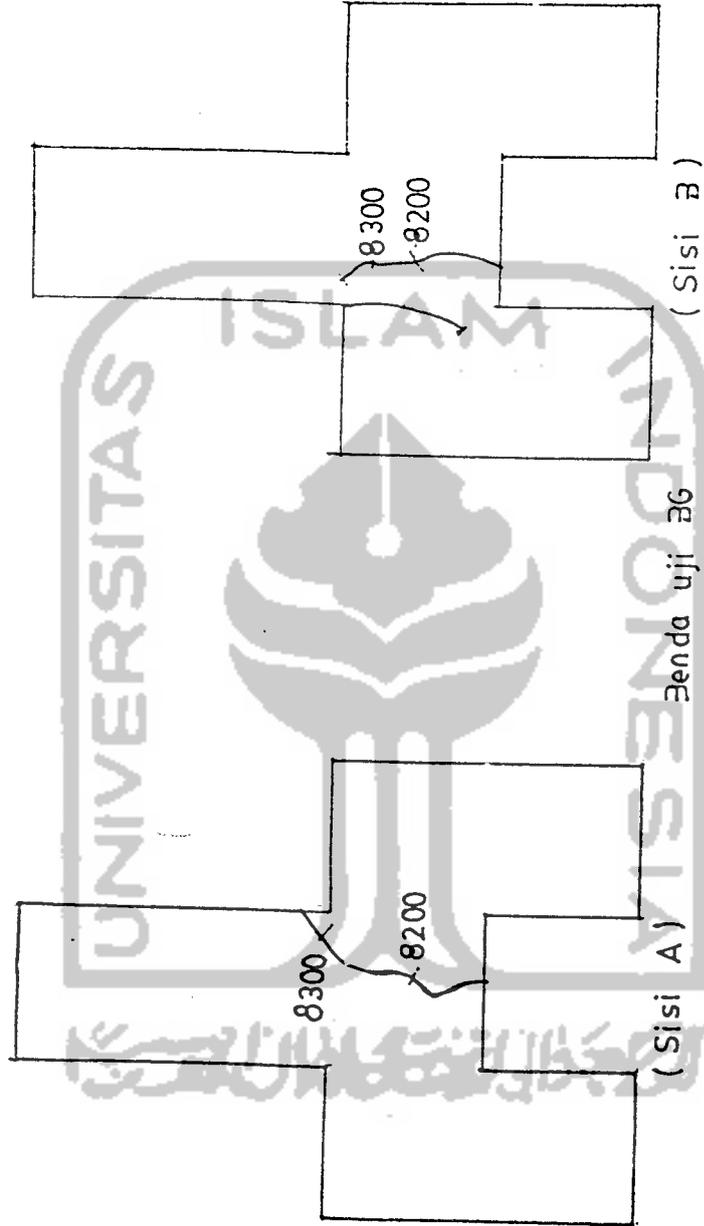


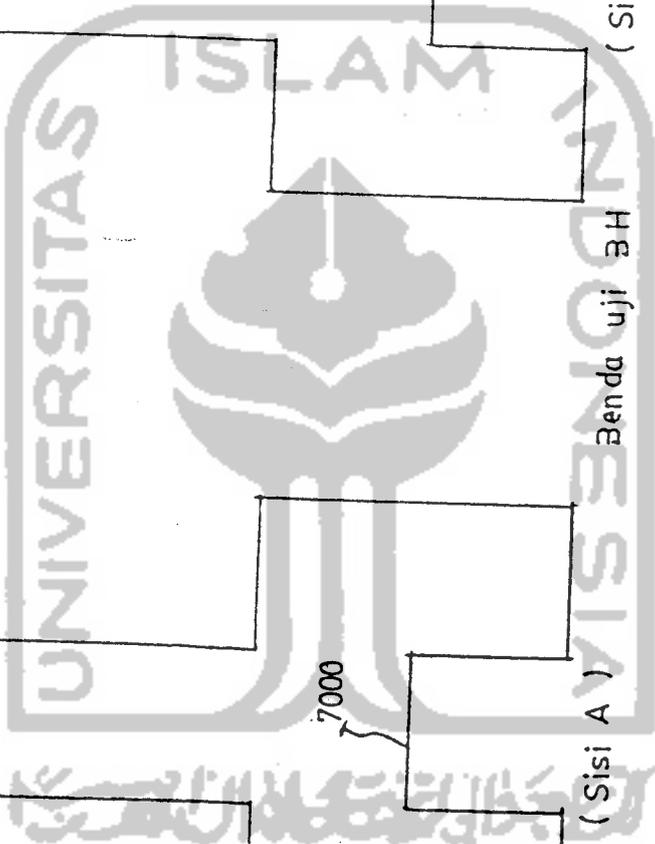
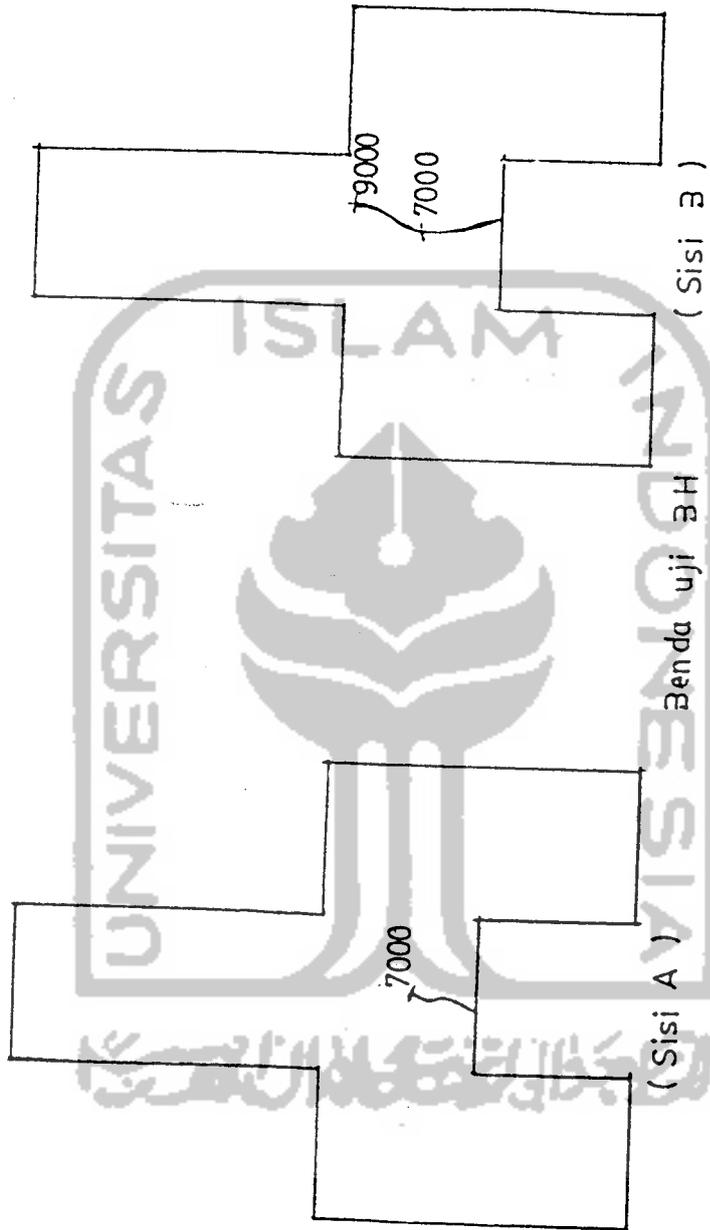
Gambar 5.3. Pola Retak dan Pola runtuh Balok C

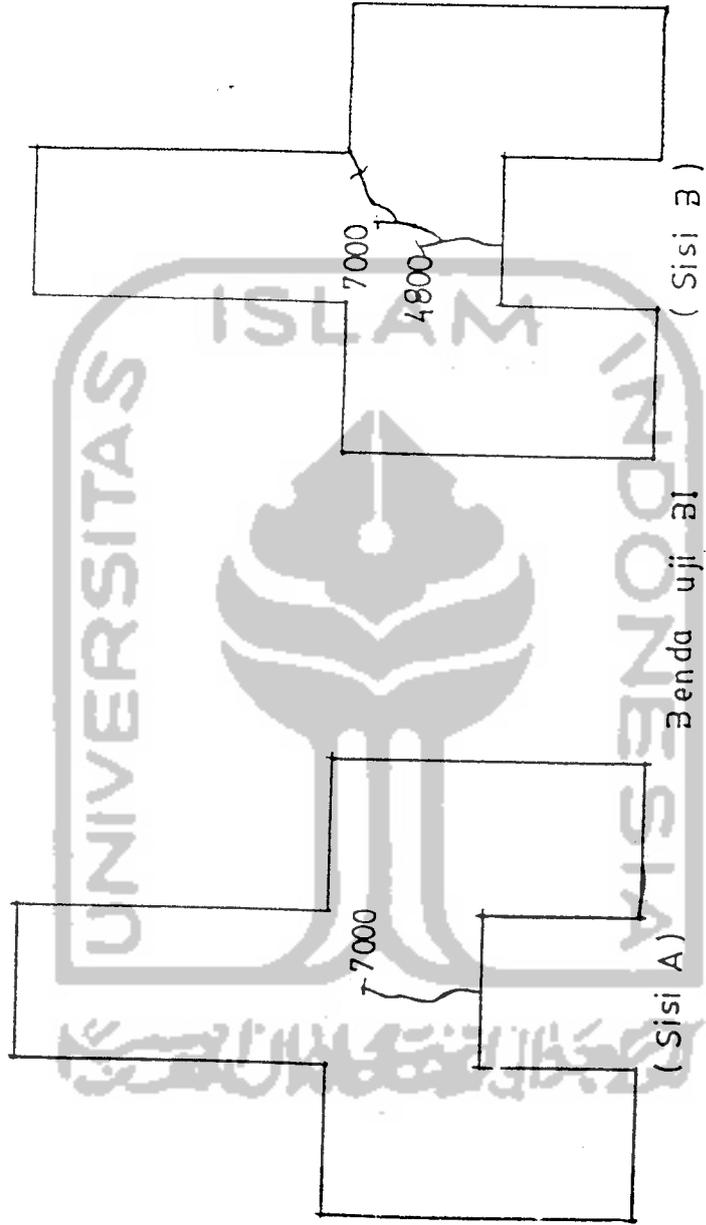












5.2. Pembahasan

Pembahasan ini didasarkan pada hasil yang didapat dari percobaan. Data dari hasil ini dapat diamati dan diteliti pengaruh pemakaian tulangan geser dan tanpa tulangan geser terhadap kemampuan balok beton bertulang mutu tinggi dalam menerima gaya geser serta perilaku geser yang terjadi pada benda uji.

5.2.1. Kuat Tekan Beton

Kekuatan desak ditentukan dengan uji silinder beton ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang dibuat bersamaan dengan balok beton dan dirawat dengan cara merendam di dalam bak air. Pengujian kuat tekan silinder dilaksanakan pada umur beton 28 hari. Kuat tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari adalah 45 Mpa.

Dari tabel 5.2, terlihat bahwa kuat tekan silinder beton rata-rata terutama yang mewakili balok BB sampai BI berada di atas kuat tekan rencana yaitu sebesar 45 Mpa dan lebih kecil dari kuat tekan rata-rata tujuan (*target mean strength*), hal ini terjadi kemungkinan karena nilai slump dari adukan beton berbeda-beda, yaitu berkisar antara 2,5 ; 3; dan 5 cm. Walaupun secara keseluruhan nilai slump untuk semua variasi memenuhi slump rencana seperti yang direkomendasikan dalam metode ACI untuk beton mutu tinggi yaitu antara 2,5 - 5 cm. Nilai *shump* yang berbeda-beda disebabkan karena kadar air dalam pencampuran beton dan kurang teraturan kelecakan beton.

5.2.2. Pola Retak Balok Beton Bertulang

Data pengamatan pada pengujian balok terdiri dari dua bagian, yaitu data pengamatan yang didapat secara visual meliputi rambatan retak, pola retak, pola runtuh balok, retak lentur awal, retak miring awal serta beban pada saat retak dan beban maksimum yang dapat didukung oleh balok.

Data pengamatan yang lain diperoleh dengan menggunakan alat ukur dial gauge yaitu lendutan yang terjadi pada balok uji, sedangkan pengukuran regangan beton menggunakan alat bantu *strain gauge*.

1. Retak Lentur Awal

Pada awal pembebanan hingga beban yang diperkirakan terjadi retak/balok bebas dari retak. Retak pertama merupakan retak lentur yang terjadi pada sisi serat tarik daerah momen terbesar yaitu di tengah bentang balok, dimana daerah ini diperkirakan terjadi lendutan maksimum. Untuk itu pengamatan retak dipusatkan pada kedua daerah yaitu pada daerah momen maksimum dan pada daerah bentang geser. Pada masing-masing daerah pengamatan retak, retak lentur terjadi pada beberapa tempat dengan jumlah dan jarak retak berbeda untuk masing-masing balok uji. Hal ini tampaknya dipengaruhi oleh jumlah tulangan geser yang terdapat dalam balok, sedangkan peningkatan retak sejalan dengan peningkatan beban, namun tidak menambah panjang retak tetapi juga menimbulkan retak baru. Retak miring sebagai retak geser merupakan pertanda bahwa tarik diagonal mulai terjadi dan seluruhnya merupakan kelanjutan dari retak lentur.

2. Penyebaran Pola Retak

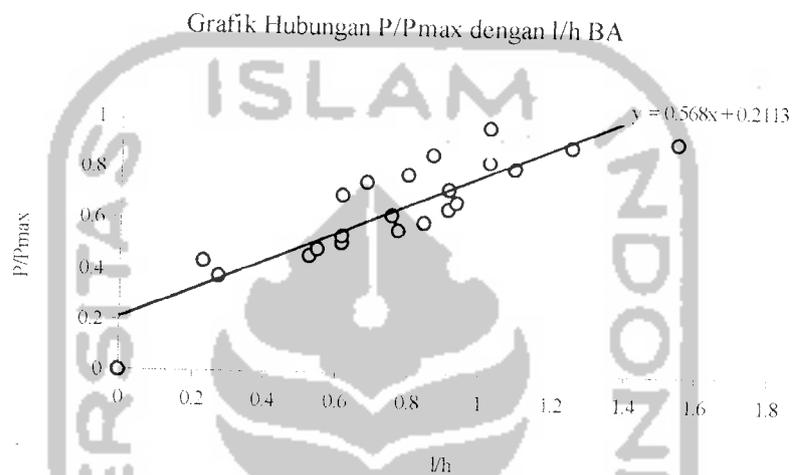
Perambatan retak yang digambarkan dengan besar beban yang menyebabkan retak dimulai ketika retak lentur awal terjadi sampai dengan retak yang menyebabkan keruntuhan balok. Dari gambar 5.1,5.2,5.3 pola retaknya semua menggambarkan pola retak yang hampir sama/di mana pada awal pembebanan, terjadi retak rambut yang arahnya vertikal arah tinggi balok yang dinamakan retak lentur.

Sejalan dengan peningkatan beban, arah retak rambut membelok horisontal, saat inilah permulaan terjadinya retak miring. Beban ditingkatkan lagi maka terjadilah keruntuhan secara tiba-tiba dan arahnya membentuk diagonal bidang tinggi balok, atau melintasi daerah tekan dan inilah yang dinamakan runtuh geser.

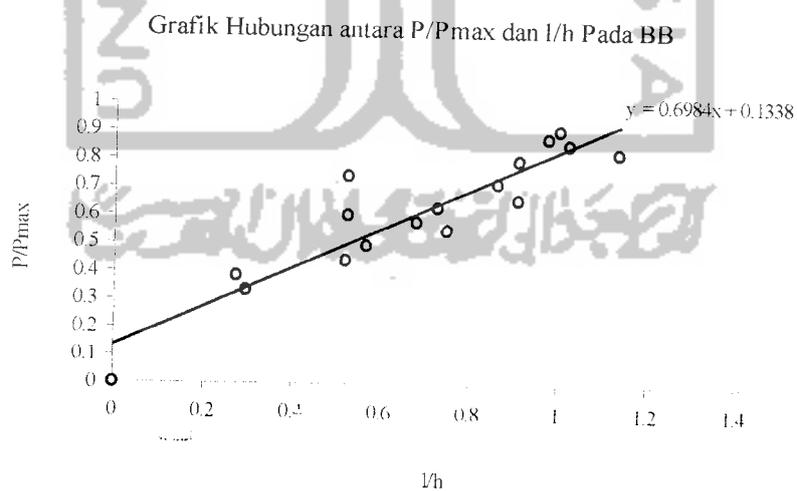
Pada Gambar 5.4, 5.5 dan 5.6 berbeda dari gambar sebelumnya. Pada awalnya pola retaknya sama yaitu terjadi retak rambut yang arahnya vertikal arah tinggi balok, tetapi arah retak sebagian ada yang terus menuju arah vertikal dan sebagian lagi ada yang membelok horisontal. Pertambahan retak dari keduanya terus meningkat seiring penambahan beban, tetapi yang arah vertikal lebih cepat daripada yang membelok arah horisontal.

Setelah mencapai beban runtuh, yakni letak lentur mencapai sisi atas atau ketinggian balok dan tidak terjadi pembelokan arah retakan, yang akhirnya hanya terjadi runtuh lentur. Runtuhnya terjadi tidak secara tiba-tiba, hanya ditandai dengan retakan mencapai ketinggian balok dan sudah tidak dapat meningkat lagi penambahan bebannya.

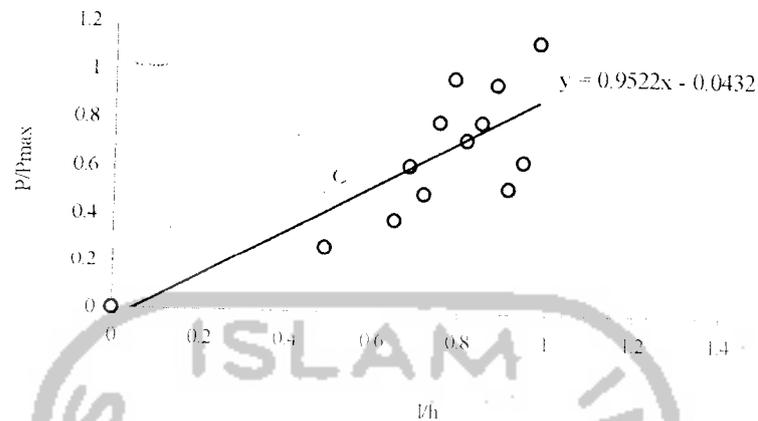
Untuk Gambar 5.7, 5.8, dan 5.9 retak yang terjadi pada benda uji berupa retak vertikal, dengan peningkatan beban, arah vertikal ini membelok horisontal menjadi retak miring. Pada penambahan beban yang lebih besar terjadi runtuh secara tiba-tiba dan arahnya membentuk diagonal bidang badan benda uji, sehingga keruntuhan ini membagi benda uji menjadi dua bagian.



Gambar 5.10. Grafik Regresi Linear BA

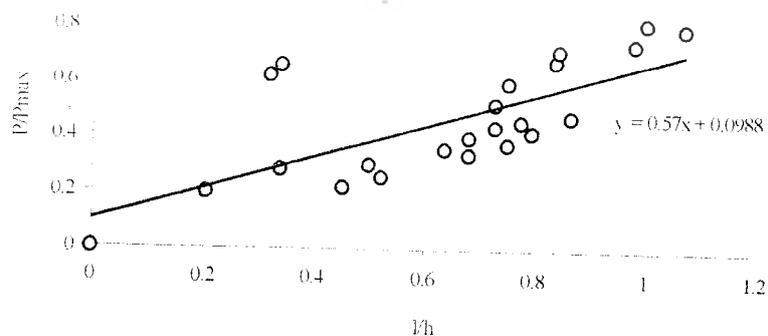


Gambar 5.11. Grafik Regresi Linear BB

Grafik Hubungan antara P/P_{max} dan l/h Pada BC

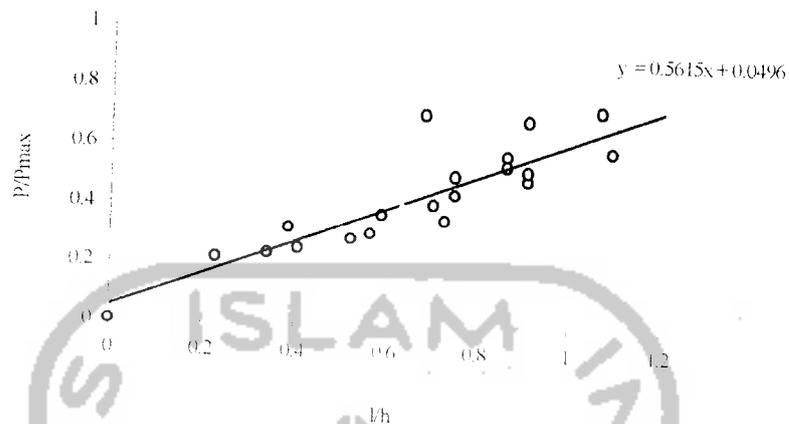
Gambar 5.12. Grafik Regresi Linear BC

Dari ke-3 grafik di atas yang tanpa menggunakan tulangan geser terlihat bahwa perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok berkecenderungan meningkat secara linear. Hal ini disebabkan setelah retak miring pertama terbentuk pada salah satu sisi daerah retak, yaitu dekat sendi, peningkatan beban berikutnya menyebabkan retak miring semakin masuk ke daerah tekan dengan panjang retak semakin besar.

Grafik Hubungan antara P/P_{max} dan l/h Pada BD

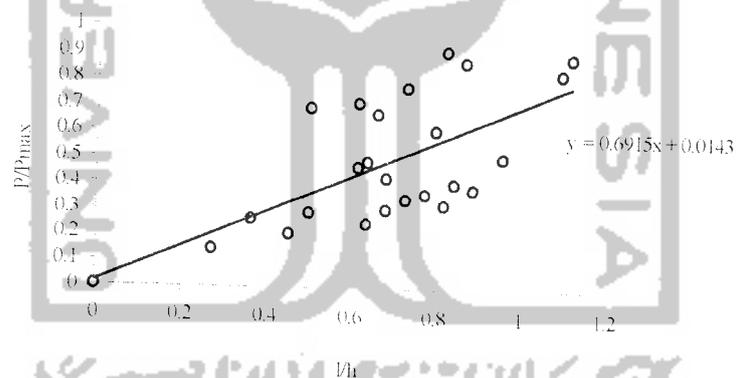
Gambar 5.13. Grafik Regresi Linear BD

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BE



Gambar 5.14. Grafik Regresi Linear BE

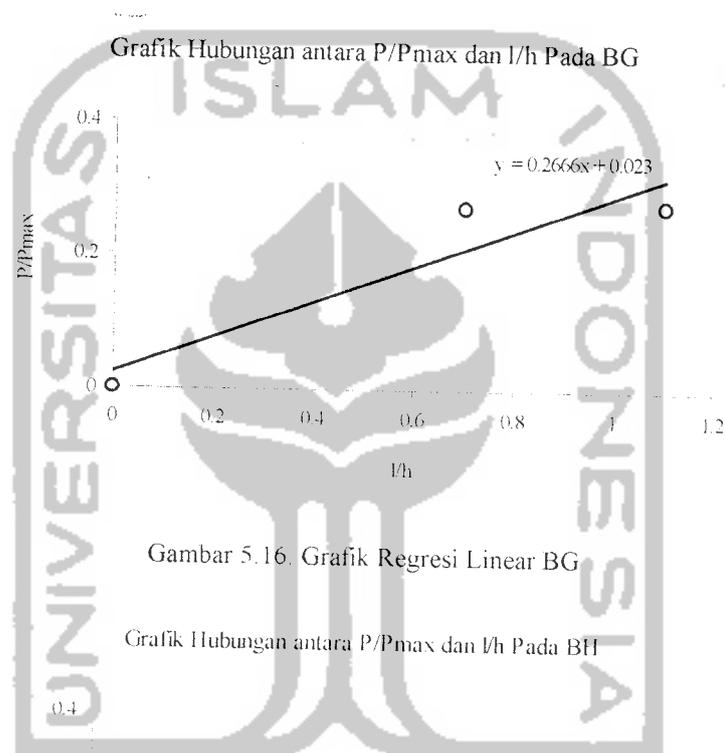
Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BF



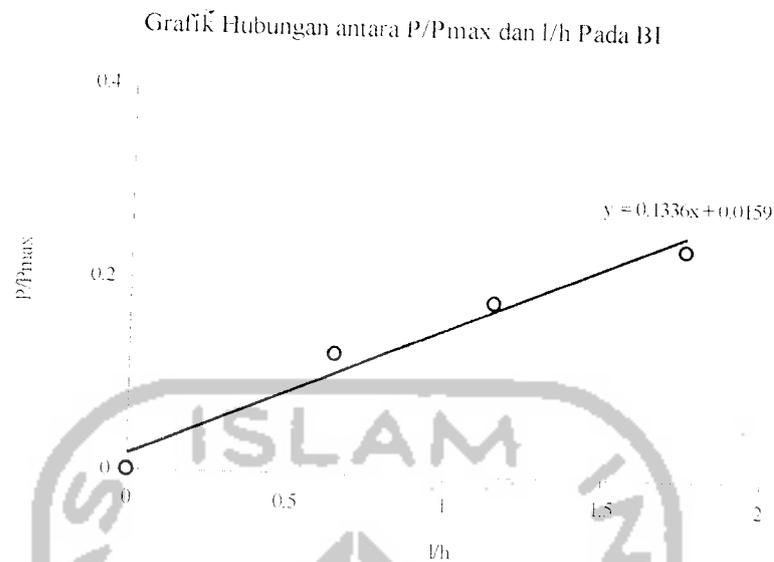
Gambar 5.15. Grafik Regresi Linear BF

Dari ke-3 grafik di atas yang menggunakan tulangan geser terlihat bahwa perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok berkecenderungan meningkat secara linear. Setelah retak miring pertama terbentuk pada daerah bentang geser, peningkatan beban berikutnya menyebabkan retak miring semakin bertambah

dengan panjang retak semakin besar, sementara retak pada daerah tengah bentang masih melanjutkan retak lentur. Dengan adanya tulangan tekan dan tulangan geser pada daerah bentang geser yang dapat meningkatkan kemampuan daya dukung balok terhadap keruntuhan geser, terlihat bahwa peningkatan beban yang menyebabkan bertambahnya panjang retak, semakin terjadi di tengah bentang.



Gambar 5.17. Grafik Regresi Linear BH



Gambar 5.18. Grafik Regresi Linear BI

Dari gambar grafik benda uji BG, BH, BI perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum mengalami peningkatan secara linear terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok. Dengan peningkatan beban, menyebabkan retak miring semakin menuju kepermukaan tekan, dengan panjang retak semakin bertambah.

3. Keruntuhan Balok

Balok A, B, C sebagai balok uji tanpa tulangan geser dijadikan kontrol untuk melihat perilaku balok terhadap geser tanpa diberi tulangan geser. Balok dengan bentang geser 50 cm runtuh dalam geser, di daerah bentang geser dari tumpuan yang ditandai oleh rambatan dan melebarnya retak miring.

Balok A, B, C sebagai balok uji tanpa tulangan geser dijadikan kontrol untuk melihat perilaku balok terhadap geser tanpa diberi tulangan geser. Balok

dengan geser 50 cm runtuh dalam geser, di daerah bentang geser dari tumpuan yang ditandai oleh rambatan dan melebarinya retak miring.

Balok D, E, F sebagai balok dengan tulangan geser mengalami keruntuhan di tengah bentang yaitu runtuh lentur. Keruntuhan lentur yang terjadi menampakkan daktilitas yang tinggi. Balok runtuh lentur setelah mengalami deformasi yang cukup besar, yaitu dengan lendutan lebih dari 8 mm pada tempat pembebanan.

Runtuhan geser yang terjadi pada benda uji G, H, I, menunjukkan bahwa retak miring yang akan menyebabkan runtuh geser adalah kelanjutan dari retak vertikal yang menuju pada benda uji.

5.2.3. Kuat Lentur Balok

Balok beton bertulang direncanakan bertulangan sebelah dan bertulangan rangkap. Pada penelitian ini balok direncanakan kuat terhadap lentur, tetapi masih memiliki sifat *under reinforced* dan daktilitas yang terjadi diusahakan tidak terlalu rendah/maka perbandingan luas tarik (A_s) terhadap luas penampang efektif (b.d) berada di bawah 75% dari perbandingan tulangan seimbang (ρ_b).

Tabel 5.3. Kuat Lentur Balok

Tipe Balok	ρ	ρ_b	ρ/ρ_b %	Kuat tekan Beton. f_c' (Mpa)	Tegangan Baja tekan f_s' (Mpa)	Kapasitas Momen Nominal (kNm)	Kapasitas gaya geser nominal (kN)
A	0,01246	0,0466	26,74	53,5227		20,5779	41,1558
B	0,01246	0,0453	27,5	51,583		20,5299	41,0598
C	0,01246	0,0454	27,4	51,6245		20,531	41,062
D	0,02479	0,044	63,4	50,1106	313,5598	21,0765	42,153
E	0,02479	0,0446	62,6	50,5428	311,5479	21,093	42,186
F	0,02479	0,0446	62,6	50,5428	311,5479	21,093	42,186

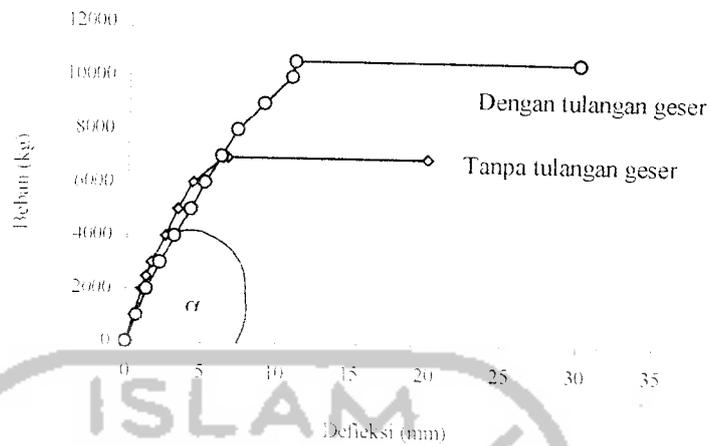
Dari tabel di atas memperlihatkan balok A, B, C mempunyai rasio luas penampang tulangan tarik terhadap luas efektif penampang balok (ρ) lebih kecil dari 75% rasio tulangan seimbang (ρ_b).

Untuk balok D, E, F mempunyai ρ tidak terlalu kecil, tetapi dekat dengan 75%, sehingga balok akan bersifat *under reinforced* dan daktilitas yang terjadi tidak terlalu rendah.

5.2.4. Lendutan Balok

Secara teoritis dengan analisis mekanika teknik, jika beban yang diberikan pada balok uji semakin besar, lendutan yang terjadi pada model balok juga semakin besar sehingga akan mengalami satu mode lendutan yang terjadi di tengah-tengah bentang. Lendutan pada balok A, B, C sejak awal pembebanan sampai beban maksimum memiliki kecenderungan yang semakin besar terutama di dekat tumpuan. Membesarnya lendutan ini kemungkinan disebabkan pengaruh semakin membesarnya retak miring pada daerah itu.

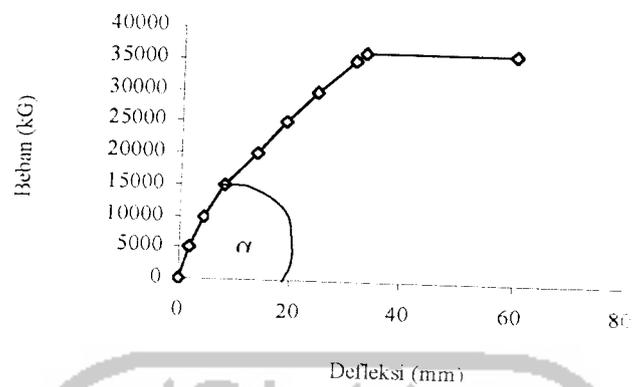
Sedangkan untuk balok D, E, F dengan semakin meningkatnya beban, lendutan semakin bertambah dan terjadi di tengah bentang. Bertambahnya lendutan ini mungkin disebabkan retak vertikal pada daerah ini semakin melebar. Pada benda uji BG, BH, BI, dari hasil pengamatan dengan bertambahnya beban, semakin meningkat lendutan di tengah benda uji. Hal ini menunjukkan bahwa benda uji mengalami retak dan runtuh pada daerah tengah benda uji tersebut.



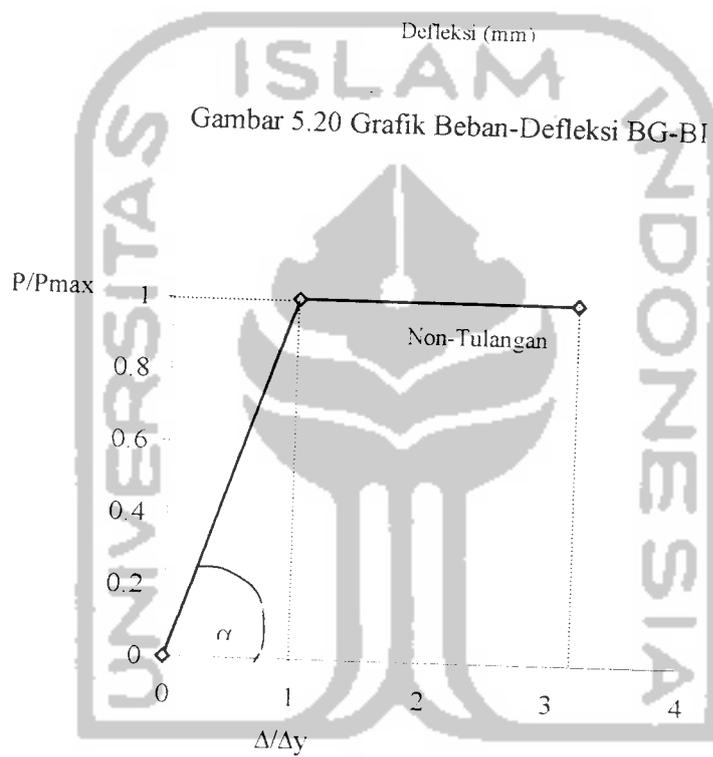
Gambar. 5.19 Grafik hubungan Beban Defleksi di tengah bentang

Dari grafik hubungan beban-defleksi di tengah bentang untuk balok tanpa tulangan geser dan balok dengan tulangan geser menunjukkan bahwa balok dengan tulangan geser lebih kaku dari balok tanpa tulangan geser. Kekakuan balok tanpa tulangan geser 71,9 % dari kekakuan balok dengan tulangan geser.

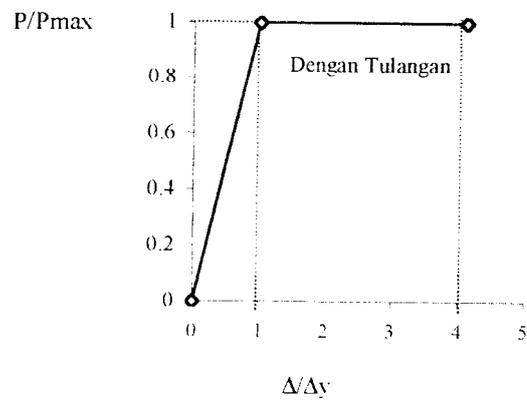
Hal ini menunjukkan penggunaan tulangan geser pada balok menampakkan daktilitas yang tinggi. Pada beban yang sama balok dengan tulangan geser perbandingan beban terhadap defleksi ($\tan \alpha$) lebih besar daripada tanpa tulangan geser, berarti tulangan geser lebih kaku, sehingga kelengkungan atau sudut rotasi (θ) yang dibentuk akibat beban pada balok dengan tulangan geser lebih kecil daripada balok tanpa tulangan geser.



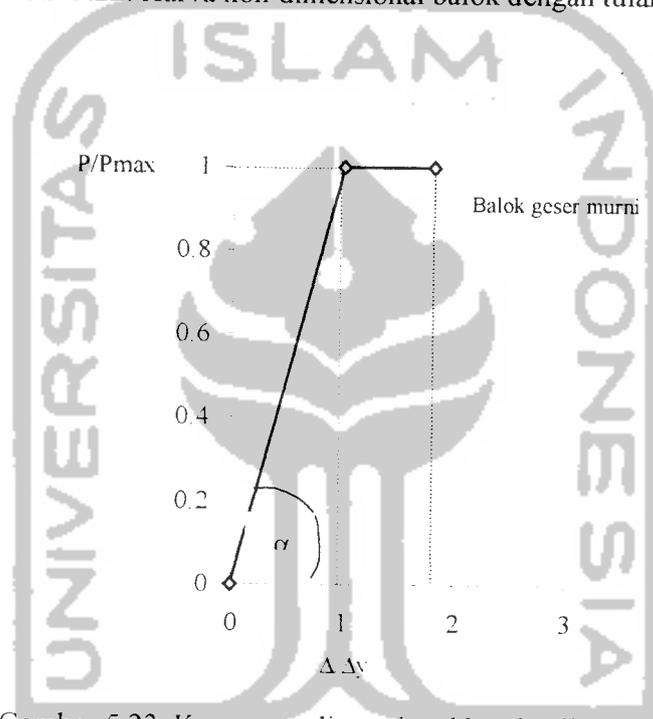
Gambar 5.20 Grafik Beban-Defleksi BG-BI



Gambar 5.21. Kurva non-dimensional balok tanpa tulangan geser

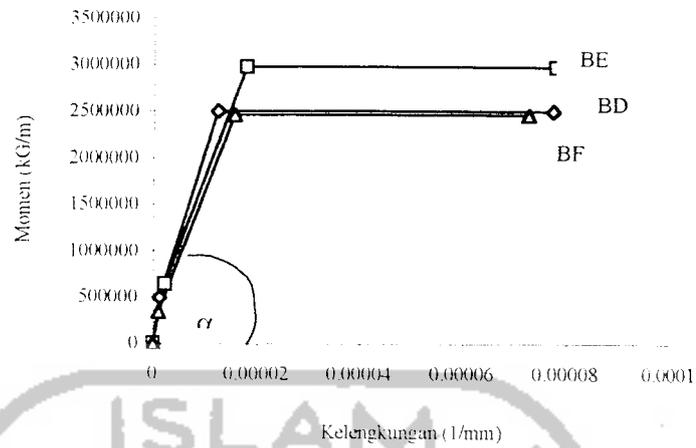


Gambar 5.22. Kurva non-dimensional balok dengan tulangan geser



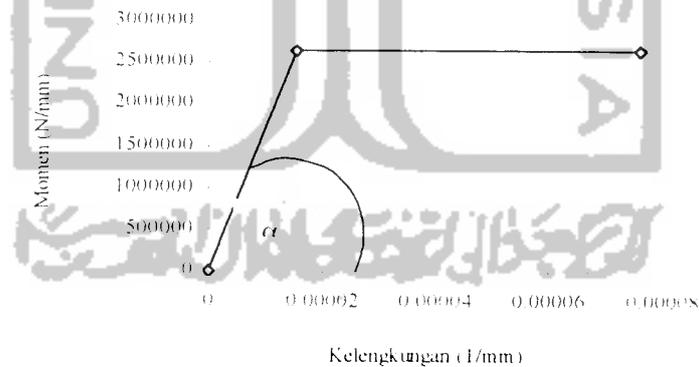
Gambar 5.23. Kurva non-dimensional benda uji geser murni

Dari grafik kekakuan gambar di atas dinyatakan dalam bentuk format kurva non-dimensional yang menyatakan P/P_{max} versus Δ/Δ_y . Dari grafik tersebut dapat dicari *displacement ductility*

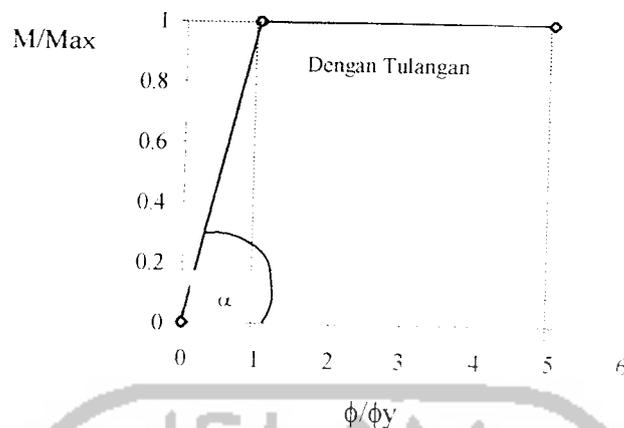


Gambar 5.24. Grafik Momen kelengkungan BD-BF

Dari grafik Momen-kelengkungan balok dengan tulangan geser di atas menghasilkan kurva linear $M-\phi$ pada momen yang besarnya sama dengan kelengkungan yang hampir sama dari ketiga balok. Setelah baja leleh terjadi peningkatan kelengkungan yang besar pada momen yang hampir konstan.



Gambar 5.25. Grafik Momen Kelengkungan Rata-rata Dengan Tulangan Geser



Gambar 5.26. Kurva non-dimensional

Dari grafik kekakuan gambar di atas dinyatakan dalam bentuk format kurva non-dimensional yang menyatakan M/M_{max} versus ϕ/ϕ_y . Dari grafik tersebut dapat dicari *curvature ductility*.

5.2.5. Kuat Geser

1. Gaya Geser Pada Retak Miring Pertama

Dari gambar pola retak, secara umum seluruh balok memiliki pola retak yang hampir sama, yaitu permulaan retak berupa retak lentur kemudian dilanjutkan retak miring yang terjadi di daerah bentang geser. Sebagai pedoman untuk menentukan retak miring pertama yaitu retak yang membentuk sudut 45° atau lebih kecil terhadap sumbu horisontal dan terjadi masih dibawah garis netral. Secara umum dapat dikatakan retak geser pertama akan terjadi pada daerah yang memiliki momen terkecil atau mendekati rol. Hasil pengukuran beban retak miring pertama dari semua benda uji disajikan dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Beban Retak Miring Pertama

Benda Uji	Berdasarkan pola retak		Beban Maksimum (kN)	Persen terhadap Beban Maks %
	No. Retak	Beban (kN)		
BA	10	48	74	64,9
BB	11	46	72,46	63,5
BC	10	44	61,4	71,7
BD	8	36	100	36
BE	11	46	119	38,6
BF	7	32	98,4	32,5
BG	2	83	300	27,6
BH	2	90	400	22,5
BI	2	70	390	17,9

Dari Tabel 5.4. terlihat bahwa balok masih mempunyai kuat sisa walaupun telah terjadi retak miring pertama sebelum runtuh gesernya. Gaya geser retak miring pertama pada balok BA, BB, BC tercapai pada beban 63,5% sampai 71,7% dari kapasitas runtuhnya. Sedang untuk balok BD, BE, BF tercapai pada beban 32,5% sampai 38,6% dari kapasitas runtuhnya.

Tabel 5.5. Tegangan Geser berdasarkan gaya geser pengujian

Benda Uji	Vc (N)	Tegangan Geser (N/mm ²)
		$V = \frac{3V}{2b.h}$
BA	24.000	1,4875
BB	23.000	1,4255
BC	22.000	1,3635
BD	18.000	1,115
BE	23.000	1,4255
BF	16.000	0,9915
BG	41.500	6,225
BH	45.000	6,75
BI	35.000	5,25

Tabel 5.6. Gaya Geser Pada Retak Miring Pertama

Benda Uji	Gaya Geser Pengujian (kN)	Rumus SNI		Nilai Perbandingan	
		Pers. (2.69)	Pers. (2.68)	1/2	1/3
		1	2	3	4
BA	24	25,953	24,004	0,925	0,999
BB	23	25,478	23,598	0,903	0,975
BC	22	25,488	23,607	0,863	0,932
BD	18	24,333	24,556	0,739	0,733
BE	23	24,438	24,646	0,941	0,933
BF	16	24,438	24,646	0,655	0,649

Benda Uji	Gaya Geser Pengujian (kN)	$V_c = 1/6 \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d$	$V_c = 1/3 f'_c \cdot b \cdot d$	Nilai Perbandingan	
				1/2	1/3
				1	2
BG	41,5	11,798	23,596	3,517	1,758
BH	45	11,798	23,596	3,814	1,907
BI	35	11,798	23,596	2,966	1,483

Dari Tabel 5.6. seluruh balok uji dari balok A sampai F menunjukkan kapasitas geser nominal pengamatan lebih kecil daripada hasil perhitungan dengan persamaan-persamaan pendekatan. Memperhatikan hasil perhitungan kedua persamaan tersebut, memberikan hasil yang relatif dekat dengan hasil pengamatan, sehingga persamaan tersebut dapat digunakan untuk memprediksikan kapasitas geser saat retak miring pertama pada balok. Jadi seluruh balok uji tersebut mempunyai kuat geser menyamai kapasitas retak miring pertama. Sedangkan untuk benda uji BG, BH, dan BI menunjukkan kapasitas geser nominal pengamatan lebih besar daripada hasil perhitungan gaya geser ijin.

2. Gaya Geser Ultimit/Runtuh

Penentuan beban runtuh didasarkan pada struktur patah/runtuh atau struktur sudah tidak dapat menahan peningkatan beban lagi. Yang ditandai hancurnya beton atau lelehnya tulangan baja. Dari hasil ini dibandingkan dengan kuat geser

pada retak miring pertama, untuk melihat masih berapa persen kemampuan geser pada saat runtuh, setelah terjadi retak miring pertama. Hasil analisis nilai banding kuat lentur atau momen nominal rencana, gaya geser total (V_n) berdasarkan jumlah V_c dan V_s serta gaya geser hasil pengamatan dapat dilihat pada tabel 5.7.

Tabel 5.7. nilai banding kuat batas, geser nominal, dan hasil pengamatan.

Tipe Balok	Mn Rencana (kNm)	Vn Rencana (kNm)	Vc Per. (2.69) (kNm)	Vs Per.(2.70) (kNm)	Vn Per (2.67) (kNm)	Penga- matan (kN)	Nilai Banding		
							6/3	7/3	7/6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BA	20,5779	41,1558	25,953	-	25,953	37	0,63	0,899	1,425
BB	20,529	41,0598	25,478	-	25,478	36,23	0,62	0,882	1,422
BC	20,531	41,062	25,488	-	25,488	30,7	0,62	0,747	1,204
BD	21,076	42,153	25,333	48,22	72,553	50	1,726	1,186	0,689
BE	21,093	42,186	25,438	48,22	72,658	59,5	1,727	1,41	0,819
BF	21,093	42,186	25,438	48,22	72,658	49,2	1,727	1,166	0,677

Nilai banding kuat geser yang tersaji pada kolom 8 menunjukkan kesesuaian dengan rencana awal bahwa balok diharapkan tidak runtuh lentur melainkan runtuh geser (kapasitas lentur lebih besar dari kapasitas geser), hal ini terjadi pada balok A, B dan C (balok bertulang tanpa tulangan geser). Sedangkan untuk balok D, E, dan BF (balok bertulang dengan tulangan geser) menunjukkan kapasitas lentur lebih kecil dari kapasitas gesernya, sehingga balok tersebut mengalami runtuh lentur.

Pada kolom 9, balok A, B, dan C memperlihatkan kuat geser yang terjadi lebih kecil dari kuat geser rencana. Sedang untuk balok D, E, dan F kuat geser yang terjadi lebih besar dari kuat geser rencana. Untuk kolom 10 memperlihatkan balok A, B, dan C mempunyai nilai banding lebih dari satu, ini berarti kuat gesernya secara efektif memberikan andil terhadap kekuatan geser balok dan tulangan tarik yang dilalui retak diperkirakan telah melampaui tegangan

lelehnya. Sedangkan balok D, E, dan F memiliki nilai banding yang relatif sama dan dibawah nilai satu, ini menunjukkan pengaruh pengempatan tulangan geser yang terdapat pada balok tersebut belum memberikan kontribusi yang berarti terhadap kekuatan geser balok, tetapi sudah mampu mencegah kegagalan balok di daerah bentangan geser.

Tabel 5.8. Nilai banding kuat geser nominal, dan hasil pengamatan

Benda uji	$V_c = 1/3 \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d$	V_s (KN)	$V_n = V_c$ (kN)	Pengamatan (kN)
BG	23,596	-	23,596	150
BH	23,596	-	23,596	200
BI	23,596	-	23,596	195

Pada tabel di atas benda uji BG, BH, dan BI memperlihatkan kuat geser pengujian lebih besar dari kuat geser ijin, ini berarti kuat gesernya secara efektif memberikan andil yang lebih besar dari kekuatan geser ijin benda uji.

5.2.6. Pengaruh Tulangan Geser

Pada balok A, B, dan C dimana balok tidak diberi tulangan geser, keruntuhan geser terjadi pada daerah bentang geser, sehingga sesuai dengan anggapan awal. Untuk balok D, E, F (balok dengan tulangan geser), keruntuhan yang terjadi pada daerah momen maksimum di sekitar tengah bentang. Maka retak diagonal dan lokasi keruntuhan yang terjadi pada balok tersebut memiliki hubungan dengan tulangan geser.

1. Pergeseran lokasi retak akibat pemberian tulangan geser.

Pada balok A, B, dan C balok tanpa tulangan geser pada dasarnya balok ini runtuh di daerah bentang geser. Lokasi retak geser membentang dari dukungan

sendi sampai mendekati titik pembebanan. Membentuk garis diagonal. Balok D, E, dan F secara fisik pola retaknya mirip dengan balok A, B, dan C, namun keruntuhan balok tersebut telah dipengaruhi adanya tulangan geser, ini dapat diketahui berdasarkan lokasi keruntuhan balok terjadi di tengah bentang, sehingga dengan demikian lokasi runtuh balok mengalami pergeseran tempat.

2. Pengaruh Letak tulangan geser

Dari hasil pengujian, seluruh balok yang diberi tulangan geser tidak mengalami kegagalan geser. Ini menunjukkan bahwa pada lokasi terlemah dari balok yang dibebani beban terpusat dapat dicegah terjadinya keruntuhan geser dengan menempatkan tulangan geser di sekitar bentang geser. Balok A, B, dan C seluruhnya mengalami keruntuhan dalam geser dan terletak dekat tumpuan, sedangkan panjang retak geser terhadap proyeksi sumbu horisontal semakin panjang dengan bertambahnya beban yang diberikan pada balok dan sudut kemiringan retak pada pola runtuh geser semakin curam, terutama sudut bukaan retak diagonal yang menuju ke arah titik pembebanan. Sudut kemiringan retak miring pertama dan sudut kemiringan retak saat beban runtuh serta panjang retak disajikan dalam Tabel 5.9.

Tabel 5.9. Sudut kemiringan retak miring pertama dan retak pada saat beban runtuh

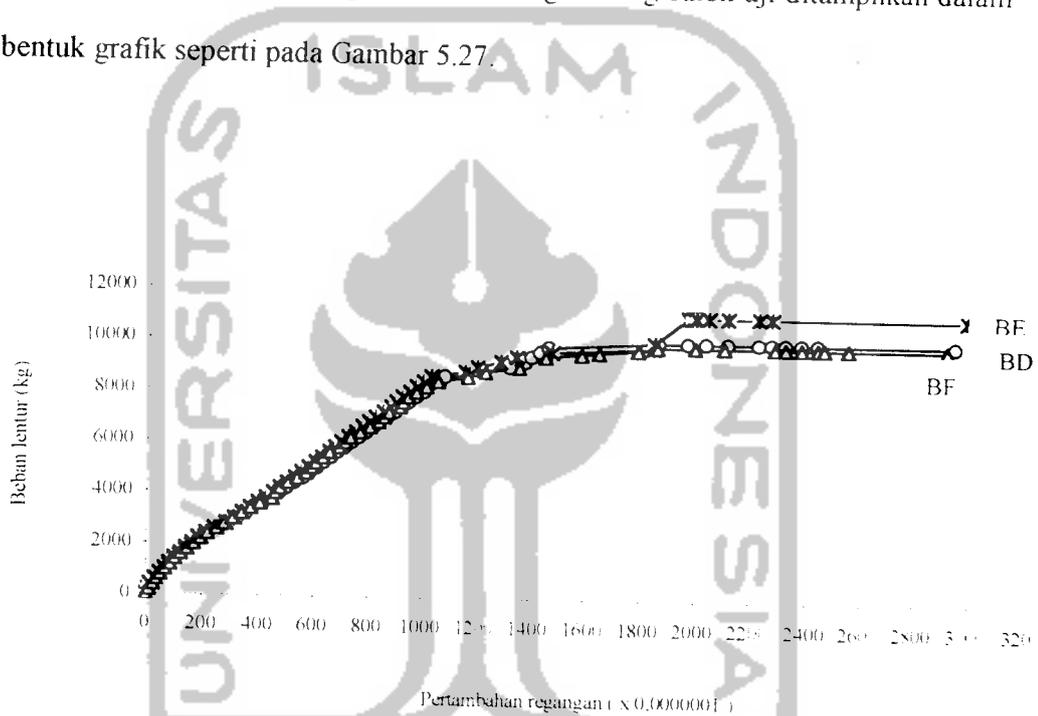
Benda Uji	Sudut Kemiringan retak miring pertama ($^{\circ}$)	Sudut kemiringan retak saat beban runtuh ($^{\circ}$)		Panjang retak saat beban maksimum (mm)
		Membuka ketumpuan	membuka ke tengah bentang	
BA	44 $^{\circ}$	18 $^{\circ}$		555
BB	49 $^{\circ}$	33 $^{\circ}$		540
BC	45 $^{\circ}$	8 $^{\circ}$		550
BD	47 $^{\circ}$		46 $^{\circ}$	220
BE	44 $^{\circ}$		49 $^{\circ}$	270
BF	46 $^{\circ}$		38 $^{\circ}$	255
BG	52 $^{\circ}$	52 $^{\circ}$		130
BH	68 $^{\circ}$	68 $^{\circ}$		110
BI	54 $^{\circ}$	45 $^{\circ}$		175

Pengaruh penempatan tulangan geser terhadap besar beban retak miring pertama memiliki kecenderungan meningkat. Hal ini menunjukkan daktilitas balok semakin baik untuk balok yang diberi tulangan penuh. Balok tanpa tulangan geser (A, B, dan C), setelah retak miring pertama terjadi, penambahan beban berikutnya menyebabkan balok kehilangan daya dukungnya dengan kuat sisa yang dimiliki sebelum mencapai beban maksimum rata-rata sebesar 33,3%. Peningkatan beban pada balok D, E, dan F dibanding dengan balok A, B, dan C menunjukkan peran tulangan geser dalam mendukung beban/retak miring pertama terjadi pada beban antara 32,5% sampai 38,6% terhadap beban maksimumnya. Dengan demikian balok masih memiliki kekuatan sisa kira-kira 64,3% setelah terjadi retak miring pertama. Hal ini memberikan indikasi adanya mekanisme dimana tulangan longitudinal tekan memberikan andil terhadap kekuatan balok.

5.2.7. Analisis data *strain gauge* beton

Dari hasil pengujian/data pembacaan regangan *strain gauge* pada beton di tengah-tengah bentang yang terjadi relatif kecil dan menyusut/regangannya negatif. Dilihat dari bentuk grafik penambahan regangan, ada kecenderungan untuk benda uji yang mengalami runtuh lentur, regangannya negatif atau menyusut, seperti yang terjadi pada balok D, E, dan F.

Hubungan beban dan regangan untuk masing-masing balok uji ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.27.



Gambar. 5.27. Grafik hubungan Beban-Regangan dari pembacaan *strain indicator*