BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Bahan

Pengujian utama penelitian ini adalah pengujian pembebanan balok dengan beban terpusat untuk mendapatkan retak lentur dan dua beban terpusat simetris *L/3* untuk mendapatkan retak geser. Beberapa pengujian lain diperlukan sebagai penunjang untuk melengkapi data utama. Diantaranya adalah pengujian agregat halus, agregat kasar dan uji tarik baja tulangan yang diambil dari penelitian terdahulu, pengujian kuat tekan, pengujian kuat lentur balok beton dan tentunya pengamatan terhadap retak yang terjadi.

4.1.1 Semen

Dalam penelitian ini semen yang digunakan adalah Semen Gresik Tipe 1. Semen ini merupakan semen yang umum digunakan untuk pengecoran sehingga tidak perlu dilakukan pengujian khusus.

4.1.2 Air

Dalam penelitian ini air yang digunakan adalah air PDAM Kota Malang yang sudah tersedia di Laboratorium dan tidak dilakukan pengujian terhadap air.

4.1.3 Agregat Halus

Agregat halus berupa pasir alami yang berasal dari kota Malang. Pengujian yang dilakukan pada agregat halus adalah uji analisis saringan dan uji sifat fisis. Dari hasil analisis saringan didapatkan bahwa pasir tersebut termasuk daerah gradasi nomor 2 berdasarkan ASTM. Setelah dilakukan uji analisis saringan dan uji sifat fisis didapat hasil pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Agregat Halus

No	Keterangan	Hasil Penelitian
1	Modulus Halus	4.149
2	Berat Jenis SSD	1.153
3	Berat Isi (gr/cc)	2137.933
4	Absorpsi (%)	2.041

(Sumber: Hasil Penelitian)

4.1.4 Agregat Kasar

Agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran 10 mm yang berasal dari kota Malang. Pengujian yang dilakukan pada agregat kasar adalah uji analisis saringan dan uji sifat fisis. Dari hasil analisis saringan didapatkan bahwa batu pecah tersebut termasuk daerah bergradasi maksimum 20 mm. Setelah dilakukan uji analisis saringan dan uji sifat fisis didapatkan hasil pada tabel terlampir.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Agregat Kasar

No	Keterangan	Hasil Penelitian
1	Modulus Halus	8.753
2	Berat Jenis SSD	4.574
3	Berat Isi (gr/cc)	2199.576
4	Absorpsi (%)	6.415

(Sumber: Hasil Penelitian)

4.1.5 Baja Tulangan

Pemeriksaan tegangan leleh rata-rata baja tulangan dilakukan di Laboratorium Struktur Jurusan Sipil Universitas Brawijaya Malang. Pengujian yang dilakukan pada baja tulangan adalah uji tarik baja. Setelah dilakukan uji tarik didapat hasil pada tabel berikut.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tarik Baja (fy)

No	Diameter	Kekuatan Tarik		fy rata-rata
		P (KN)	fy (MPa)	
1	4,82 (f6)	8000	438.658	438.658
2		7000	383.826	
3		8000	438.658	
1	6,24 (f8)	12000	392.593	392.593
2		12000	392.593	
3		15000	490.741	
Fy				415.626

(Sumber: Hasil Penelitian)

Dari uji statistik Keragaman Varians data tegangan baja termasuk homogen maka digunakan nilai tegangan baja tulangan rata-rata (fy) 415.626 MPa.

4.2 Hasil Pengujian

4.2.1 Kuat Tekan Beton

Pengujian awal yang dilakukan adalah pengujian kuat tekan beton pada benda uji berupa silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui mutu beton yang telah dibuat. Pada penelitian ini terdapat 36 sampel benda uji silinder. Pengujian dilakukan sesuai variasi umur perendaman yang telah ditentukan. Hasil dari pengujian kuat tekan secara lengkap dapat disajikan pada tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil Uji Kuat Tekan Beton (f'c)

Prosentase Bottom Ash (%)	Lama Perendaman (Hari)	P (KN)	f´c (MPa)	f´c rata-rata (MPa)
0	7	312	17,6556	17,2406
		295	16,6936	
		307	17,3726	
	14	302	17,0897	16,3163
		278	15,7316	
		285	16,1277	
	28	306	17,3161	18,5610
		320	18,1083	
		358	20,2587	
10	7	345	19,5230	19,2967
		355	20,0889	
		323	18,2781	
	14	354	20,0323	19,8437
		345	19,5230	
		353	19,9757	
	28	345	19,5230	18,8062
		335	18,9571	
		317	17,9385	
20	7	290	16,4106	15,7504
		277	15,6750	
		268	15,1657	
	14	284	16,0711	16,0522
		280	15,8448	
		287	16,2409	
	28	317	17,9385	17,6933
		279	15,7882	
		342	19,3532	

(Sumber: Hasil Penelitian Dan Perhitungan)

Tabel 4.4 Lanjutan

Prosentase Bottom Ash (%)	Lama Perendaman (Hari)	P (KN)	f´c (MPa)	f´c rata-rata (MPa)
25	7	277	15,6750	15,5430
		278	15,7316	
		269	15,2223	
	14	281	15,9013	15,1846
		250	14,1471	
		274	15,5052	
	28	289	16,3541	16,8256
		288	16,2975	
		315	17,8254	

(Sumber: Hasil Penelitian Dan Perhitungan)

Perhitungan kuat tekan berdasarkan rumus tegangan dimana :

$$Tegangan(f) = \frac{P(kN)}{A(cm^2)}$$

Keterangan : f = Tegangan (kN/cm^2)

P = Beban maksimum yang dapat ditahan (kN)

A = Luas penampang yang ditekan (cm^2)

Contoh perhitungan:

diketahui:

Benda uji = Silinder 0% Bottom Ash umur 7 hari perendaman sampel 1

d = 15 cm

t = 30 cm

Berat = 11, 2 kg

Luas penampang (A) $= \frac{1}{4}\pi d^2 = \frac{1}{4} . \pi . 15^2 = 176{,}71$ cm^2 = 1,7671 . 10^4 mm^2

Kuat tekan, f'_c $= P_{max} / A$

= 312/ 176,71

= 176,6556 kg/cm^2

= 17,665 MPa

Dengan cara yang sama seperti contoh perhitungan di atas didapatkan nilai f'_c untuk masing-masing benda uji. Kemudian dapat diambil nilai rata-rata untuk tiap variabel yang ada.

4.2.2 Kuat Lentur Balok Beton

Pengujian kali ini memiliki 2 tipe pembebanan, yaitu pengujian pembebanan balok dengan satu beban terpusat di tengah bentang dengan jarak 45 cm dari tumpuan untuk balok dengan keruntuhan lentur dan dengan dua beban terpusat simetris dengan jarak 40 cm dan 70 cm dari ujung balok untuk balok dengan keruntuhan geser.

Uji pembebanan dilakukan dengan pemberian tekanan oleh dongkrak hidrolik yang tekanannya disesuaikan dengan pembacaan pada *load cell*. Selain itu balok berdimensi 7 x 10 x 110 cm diuji dengan jarak antar tumpuan 90 cm.

4.3 Pengamatan Retak

4.3.1 Pengamatan Pola Retak

Pengamatan pola retak pada balok beton dimulai dengan memberi skala pada tiap benda uji balok beton. Hal ini dilakukan untuk mempermudah penggambaran maupun pengamatan atas pola retak yang terjadi. Skala yang kami gunakan disini adalah 2,5 cm.

Langkah selanjutnya adalah melakukan penomoran untuk tiap retak yang terjadi. Penomoran yang diberikan disini berupa huruf alfabet, urutannya menunjukkan retak-retak mana yang muncul terlebih dahulu. Sedangkan pewarnaan menggunakan kapur yang berbeda pada satu retakan yang sama bertujuan untuk menunjukkan retak lanjutan dari suatu retak awal. Urutannya adalah warna merah untuk retak ke-1, warna biru untuk retak ke-2, warna kuning untuk retak ke-3 dan hijau untuk retak ke-4. Dan urutan warna berulang kembali dari warna merah untuk retak ke-5 dan seterusnya. Tetapi dari hasil pengujian jarang sekali didapatkan retak lanjutan ke-5(atau lebih) sehingga tidak mempersulit pengamatan yang harus dilakukan.

Seluruh hasil dokumentasi maupun penggambaran pola retak yang terjadi dapat dilihat pada LAMPIRAN.

4.3.2 Pengamatan Lebar Retak

Pengamatan lebar retak pada balok beton dilakukan setiap interval pembebanan 100 kg dengan bantuan alat *crack detector microscope*. Lebar retak yang diamati dimulai ketika retak mulai terlihat, hingga lebar retak ketika beton runtuh. Data hasil pengamatan lebar retak beton ditabelkan sebagai berikut :

Tabel 4.6 Lebar Retak Durasi Perendaman 7 Hari untuk Keruntuhan Lentur (mm)

No	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02
4	300	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.02	0.04	0.04	0.04
5	400	0.04	0.04	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.10	0.04	0.08	0.08	0.08
6	500	0.06	0.06	0.08	0.08	0.08	0.10	0.08	0.10	0.12	0.14	0.14	0.18	0.06	0.10	0.10	0.10
7	600	0.10	0.08	0.08	0.10	0.12	0.14	0.10	0.12	0.16	0.16	0.18	0.18	0.10	0.14	0.12	0.14
8	700	0.10	0.10	0.10	0.14	0.14	0.18	0.12	0.14	0.18	0.20	0.20	0.20	0.22	0.18	0.14	0.16
9	800	0.10	0.10	0.14	0.18	0.20	0.20	0.14	0.16	0.24	0.24	0.34	0.34	0.30	0.26	0.18	0.20
10	825									1.20	0.94						
11	830											2.50	2.90				
12	900	0.12	0.14	0.24	0.28	0.24	0.22	0.20	0.18					0.40	0.40	0.30	0.26
13	945													0.80	0.60		
14	960			5.00	5.00												
15	980							1.00	0.80								
16	990															0.42	0.48
17	1000	0.20	0.16			0.30	0.32										
18	1050					3.50	2.25										

(Sumber: Hasil Penelitian)

Keterangan :

: Lebar retak 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan

: Lebar retak maksimum saat balok runtuh (100%)

Tabel 4.7 Lebar Retak Durasi Perendaman 14 Hari untuk Keruntuhan Lentur (mm)

No	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.02	0.02	0	0	0	0
4	300	0.06	0.08	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.04	0	0.06	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
5	400	0.14	0.10	0.08	0.10	0.08	0.08	0.06	0.10	0.04	0.08	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.08
6	500	0.20	0.16	0.12	0.14	0.10	0.10	0.08	0.14	0.06	0.10	0.10	0.10	0.08	0.10	0.14	0.12
7	600	0.24	0.22	0.16	0.20	0.14	0.14	0.10	0.18	0.08	0.14	0.12	0.14	0.14	0.14	0.20	0.18
8	700	0.30	0.28	0.18	0.22	0.18	0.20	0.12	0.22	0.10	0.16	0.16	0.16	0.14	0.22	0.24	0.20
9	760			0.48	0.42												
10	800	0.34	0.40			0.28	0.22	0.12	0.28	0.12	0.22	0.20	0.22	0.18	0.30	0.30	0.26
11	840															0.86	0.80
12	900	0.40	0.44			0.44	0.36	0.16	0.36	0.26	0.32	0.24	0.30				
13	910													0.68	0.92		
14	930									0.80	0.94	0.60	0.82				
15	945					0.82	0.90										
16	950	0.80	0.80														
17	1000							0.18	0.40								
18	1060							0.60	0.60								

(Sumber: Hasil Penelitian)

Tabel 4.8 Lebar Retak Durasi Perendaman 28 Hari untuk Keruntuhan Lentur (mm)

No	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0.02	0	0	0	0	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0	0	0.02	0.02
4	300	0.06	0.06	0.04	0.04	0.02	0.02	0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
5	400	0.10	0.08	0.08	0.06	0.04	0.04	0.10	0.08	0.06	0.08	0.06	0.06	0.06	0.08	0.06	0.06
6	500	0.12	0.14	0.12	0.08	0.04	0.08	0.14	0.12	0.08	0.10	0.08	0.08	0.08	0.10	0.08	0.10
7	600	0.16	0.18	0.18	0.12	0.06	0.08	0.18	0.16	0.10	0.16	0.10	0.10	0.16	0.14	0.10	0.12
8	700	0.20	0.20	0.24	0.18	0.08	0.10	0.20	0.20	0.14	0.20	0.12	0.12	0.20	0.16	0.14	0.18
9	800	0.24	0.24	0.30	0.24	0.12	0.12	0.30	0.26	0.18	0.24	0.14	0.16	0.22	0.20	0.18	0.26
10	840							0.48	0.42								
11	870															0.80	1.00
12	900	0.30	0.34	0.66	0.62	0.14	0.22			0.30	0.36	0.18	0.20	1.08	1.10		
13	910					0.60	0.82										
14	950									1.12	1.60						
15	980	0.90	1.00														
16	1000											0.28	0.32				
17	1100											0.80	0.80				

(Sumber: Hasil Penelitian)

Keterangan :

: Lebar retak 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan
: Lebar retak maksimum saat balok runtuh (100%)

Tabel 4.9 Lebar Retak Durasi Perendaman 7 Hari untuk Keruntuhan Geser (mm)

No.	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	600	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	700	0	0	0	0.06	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0
9	800	0	0	0	0.12	0	0	0	0	0	0.06	0	0.06	0	0	0	0
10	900	0	0	0.08	0.14	0.04	0	0	0	0.04	0.10	0.04	0.10	0	0.04	0.04	0
11	1000	0	0	0.12	0.20	0.08	0.06	0	0	0.08	0.16	0.10	0.18	0.04	0.08	0.04	0.06
12	1100	0	0	0.30	0.44	0.10	0.10	0	0	0.24	0.30	0.24	0.28	0.06	0.10	0.06	0.14
13	1200	0	0.04	5.50	5.50	0.16	0.14	0.06	0	1.30	1.20	0.38	0.46	0.14	0.30	0.10	0.28
14	1260	0				2.60	3.00		0			0.86	1.00				
15	1270	0							0							0.80	2.00
16	1275	0							0					2.20	2.00		
17	1300	0	0.04					0.10	0.06								
18	1400	0.04	0.06					0.20	0.18								
19	1500	0.08	0.12					7.00	6.00								
20	1600	0.14	0.14														
21	1700	0.22	0.26														
22	1800	0.30	0.36														
23	1900	0.54	0.48														
24	2000	0.68	0.76														
25	2100	0.88	1.04														
26	2200	4.00	3.50														

(Sumber: Hasil Penelitian)

Keterangan :

: Lebar retak 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan

: Lebar retak maksimum saat balok runtuh (100%)

Tabel 4.10 Lebar Retak Durasi Perendaman 14 Hari untuk Keruntuhan Geser (mm)

No.	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	400	0.04	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	500	0.06	0.02	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	600	0.10	0.06	0.12	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	700	0.12	0.10	0.22	0	0.06	0.04	0	0	0	0.04	0.06	0	0	0	0	0
9	800	0.16	0.12	0.30	0.08	0.08	0.08	0	0	0	0.08	0.14	0.06	0	0	0	0
10	900	0.20	0.14	0.38	0.20	0.12	0.10	0	0	0.04	0.10	0.22	0.12	0.06	0.03	0.1	0
11	1000	0.28	0.18	1.10	0.66	0.16	0.16	0.04	0	0.10	0.20	0.30	0.20	0.12	0.08	0.1	0
12	1100	0.34	0.22			0.18	0.20	0.08	0	0.26	0.36			0.40	0.14	0.2	0
13	1110								0			1.30	1.24				0
14	1160								0					1.10	1.06		0
15	1200	0.40	0.28			0.22	0.28	0.14	0.04	1.00	1.00					0.32	0.08
16	1245	1.10	0.52														
17	1300					6.50	9.00	0.18	0.10							0.80	0.74
18	1390							1.70	1.12								

Tabel 4.11 Lebar Retak Durasi Perendaman 28 Hari untuk Keruntuhan Geser (mm)

No.	P (Kg)	Kadar BA 0%				Kadar BA 10%				Kadar BA 20%				Kadar BA 25%			
		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2		Balok 1		Balok 2	
		D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B	D	B
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	600	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	700	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0
9	800	0	0.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0.06
10	900	0.08	0.18	0.06	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14	0.1
11	1000	0.30	0.34	0.14	0.20	0	0	0	0	0.08	0.06	0	0.08	0.08	0	0.22	0.18
12	1100	0.56	0.72	0.28	0.32	0	0	0	0	0.22	0.16	0.14	0.30	0.18	0.08	0.36	0.30
13	1170	1.50	3.40			0	0	0	0								
14	1180					0	0	0	0							1.16	1.20
15	1200			0.42	0.60	0	0	0	0	1.40	1.00	0.38	0.68	0.36	0.20		
16	1210			2.50	2.50	0	0	0	0								
17	1300					0	0	0	0			0.88	1.48	0.52	0.46		
18	1400					0	0	0	0					3.50	2.80		

(Sumber: Hasil Penelitian)

Keterangan :

: Lebar retak 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan
: Lebar retak maksimum saat balok runtuh (100%)

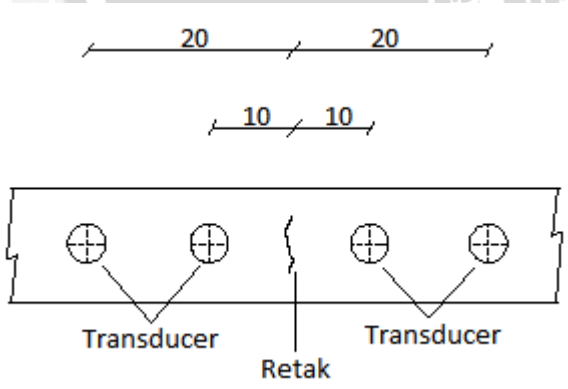
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Pada pembebanan sebuah balok, balok akan mengalami tegangan dan regangan. Melewati 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan, materialnya banyak kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram (Nawy, 1985). Dengan kata lain lebar retak yang digunakan di sini adalah lebar retak yang ≤ 70% dari beban maksimum saat balok mengalami keruntuhan. Dan dapat kita ketahui dari tabel-tabel di atas bahwa baris yang berwarna kuning merupakan data lebar retak yang akan kami gunakan. Sedangkan baris berwarna merah menunjukkan lebar retak maksimum yang terjadi saat balok mengalami keruntuhan.

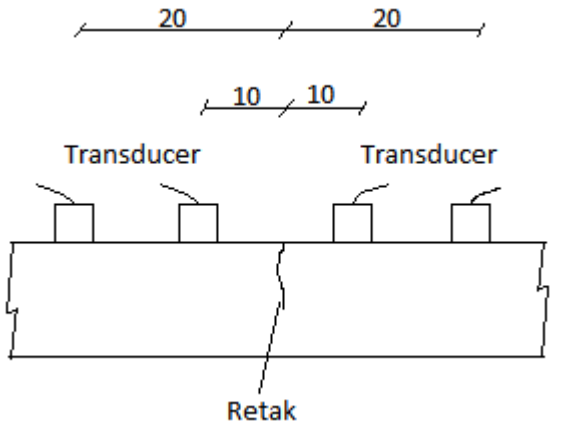
4.3.3 Pengamatan Kedalaman Retak

Pada pengamatan kali ini penelitian yang dilakukan lebih bertujuan pada aplikasi alat. Seperti telah dijelaskan pada Bab II pengukuran kedalaman retak sangat bergantung pada kemampuan alat uji. Alat uji yang digunakan disini adalah *Ultrasonic Pulse Velocity* atau yang biasa disebut dengan UPV. UPV sendiri merupakan suatu alat yang menggunakan gelombang ultrasonik yang didasari pengukuran waktu tempuh gelombang. Waktu tempuh gelombang dibaca oleh pengukur waktu pada UPV dan ditampilkan dalam bentuk kecepatan gelombang.

Untuk pengukuran kedalaman retak digunakan UPV dengan metode *Indirect Transmission.* Aplikasinya adalah dengan meletakkan transmitter dan receiver hanya diantara **satu retakan** pada satu bidang permukaan. Pada penelitian ini jarak efektif *transducer* UPV yang digunakan adalah 10 cm. Pengambilan data dilakukan pada retak utama(retakan dengan lebar retak terbesar) seperti pada gambar berikut:



Gambar 4.1 Tampak Atas



Gambar 4.2 Tampak Samping

Akan tetapi, alat ini memiliki keterbatasan yang cukup signifikan. Seperti yang sudah digaris bawahi pada paragraf sebelumnya, yaitu hanya dapat mengukur satu retakan saja pada satu bidang permukaan. Untuk mendapatkan hasil yang valid, pada saat pengukuran suatu retak **tidak diperbolehkan** adanya retakan lain selain retak yang ingin diukur kedalamannya. Hal ini menyebabkan tidak bisa didapatkannya data yang baik dari setiap pengukuran karena keterbatasan alat. Sehingga pengamatan kedalaman retak tidak dibahas lebih lanjut pada penelitian kali ini.

4.4 Pembahasan

Sesuai dengan perencanaan awal, penelitian kali ini bertujuan untuk memperoleh retak lentur dan retak geser. Untuk mendapatkan hasil tersebut maka balok beton dibagi menjadi 2 jenis yang berbeda, yaitu balok beton yang akan mengalami keruntuhan lentur untuk mendapatkan retak lentur dan balok beton dengan keruntuhan geser untuk mendapatkan retak geser.

Selain itu untuk pengujian sampel balok beton dengan keruntuhan lentur digunakan pembebanan balok dengan satu beban terpusat di tengah bentang dengan jarak 45 cm dari tumpuan dan untuk pengujian sampel balok beton dengan keruntuhan geser digunakan dua beban terpusat simetris dengan jarak 40 cm dan 70 cm dari ujung balok.

Hasil pengamatan retak pada balok beton dengan keruntuhan lentur sudah sesuai dengan perencanaan. Selama pemberian beban pada balok telah terjadi retak lentur dengan arah tegak lurus sumbu balok. Jika dilihat secara keseluruhan, retak mulai terjadi pada awal-awal pembebanan pada tengah bentang karena daerah tersebut memikul momen paling besar. Retak yang terjadi pada awal-awal pembebanan berupa retak halus yang hampir tidak terlihat, namun seiring pertambahan beban, retak yang terjadi semakin lebar dan jelas terlihat memanjang ke arah vertikal mendekati sumbu netral beton. Hal ini disebabkan oleh kuat lentur balok yang tidak mampu menahan pembebanan, sehingga balok beton runtuh lebih dulu akibat kuat lentur sebelum mengalami tegangan geser maksimum.

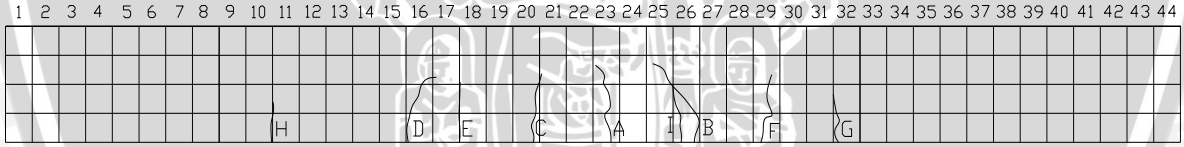
Tetapi untuk balok beton dengan keruntuhan geser, retak geser cukup sulit untuk didapatkan. Retak yang sering diperoleh adalah retak lentur-geser. Retak lentur-geser dapat terjadi karena balok beton dibebani melampaui kekuatan lenturnya hingga

kemudian melampaui kekuatan gesernya. Penyebab retak geser sulit untuk didapatkan ada beberapa hal, antara lain adalah proses perencanaan yang kurang tepat, akibatnya validitas hasil uji tidak begitu baik. Kemudian dapat disebabkan juga oleh *human error* pada saat pembuatan. Ketidak fokusan peneliti bisa menjadi awal dari sebuah kelalaian dan kelalaian dapat menjadi kesalahan pada saat pembuatan. Selain itu faktor alat yang kurang lengkap maupun yang tidak berfungsi dengan baik juga dapat menjadi penyebab tidak bisa didapatkannya benda uji balok beton yang baik sehingga tidak dapat menghasilkan retak geser murni.

4.4.1 Pembahasan Pola Retak

Seperti yang telah diketahui penelitian kali ini bertujuan untuk mencari retak lentur dan retak geser. Kali ini akan disajikan sampel yang mewakili tiap-tiap variasi yang ada untuk dibahas lebih lanjut.

(Sumber: Hasil Dokumentasi)

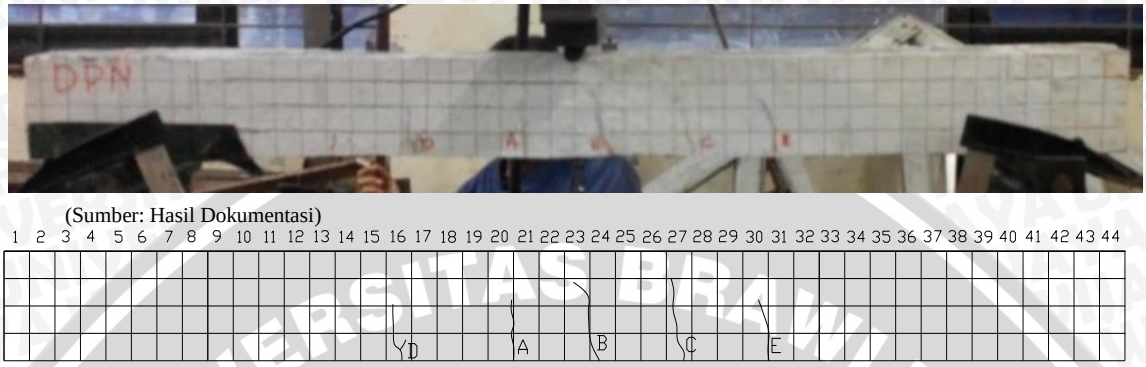


Gambar 4.3 Balok Runtuh Lentur Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 0%

Seperti yang dapat kita lihat pada gambar sebelumnya balok tersebut mengalami retak lentur, yaitu retak yang tegak lurus daerah tarik beton. Retak yang terjadi pada awal-awal pembebanan berupa retak halus yang hampir tidak terlihat, namun seiring pertambahan beban, retak yang terjadi semakin lebar dan jelas. Retak yang muncul pertama kali adalah retak A, B, C, D. Seiring bertambahnya pembebanan, retak-retak yang lain mulai muncul. Tentunya juga diikuti pertumbuhan retak-retak yang sudah ada sebelumnya.

Terlihat dengan jelas bahwa retak A memiliki lebar retak paling besar. Bahkan cenderung terlihat tidak normal. Ini disebabkan ketidak mahiran pengaku dalam menguji sampel ini. Sampel benda uji diatas merupakan sampel yang diuji awal-awal oleh peneliti. Minimnya pengetahuan tentang alat membuat peneliti tetap

memompa tuas hidrolik setelah balok mengalami keruntuhan, hingga akhirnya membuat lebar retak yang begitu besar. Jika pada retak B tampak seperti mengalami kemiringan pada ujungnya, hal tersebut menunjukkan bahwa tegangan geser yang bekerja di dekat ujung atas retak lentur cukup besar.

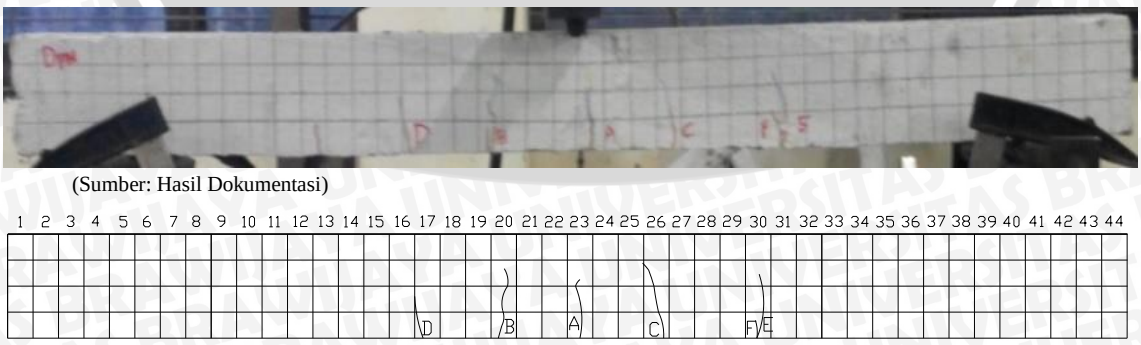


(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.4 Balok Runtuh Lentur Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 10%

Dapat kita lihat pada sampel diatas bahwa pengujian telah dilaksanakan dengan lebih baik. Pada sampel yang diambil kali ini peneliti sudah memahami bagaimana cara kerja dongkrak hidrolik berikut cara pembacaannya pada *load cell*. Sehingga bisa mendapatkan beban maksimum berikut lebar retak maksimum yang sesuai saat balok mengalami keruntuhan.

Pada sampel kali ini didapatkan 5 retak yang diberi penamaan dengan huruf A-E. Diawali dengan retak A dan B, retak terakhir yang muncul adalah retak E. Retak B menjadi retak utama yang dibahas lebih lanjut pada sub-bab Lebar Retak karena memiliki lebar retak yang paling besar. Pada ujungnya retak B sedikit mengalami kemiringan, dikarenakan disaat menjelang balok mengalami keruntuhan retak B mendapat tegangan geser yang cukup besar. Akan tetapi setelah itu balok beton mengalami keruntuhan akibat kuat lenturnya tidak mampu menahan pembebanan yang terjadi.

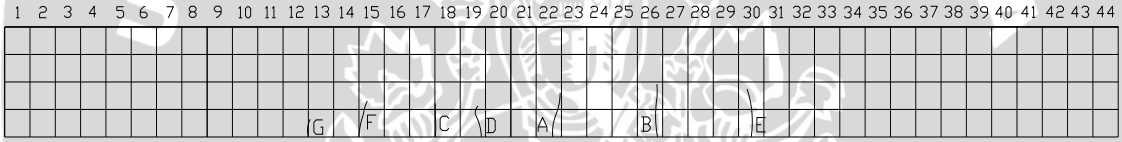


(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.5 Balok Runtuh Lentur Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 20%

Pada benda uji balok beton dengan kadar *Bottom Ash* 20% ini retak lentur kembali bisa didapatkan. Retak pertama yang muncul di A bisa menjadi retak dengan lebar maksimum pada saat runtuh. Campuran kadar BA 20% sendiri merupakan campuran paling lemah berdasar pada pembebanannya. Jika Rata-rata pembebanan maksimum balok beton dengan keruntuhan lentur pada variasi perendaman 7 hari adalah 1000 kg, balok-balok dengan kadar campuran *Bottom Ash* 20% sudah runtuh pada pembebanan 800 kg.

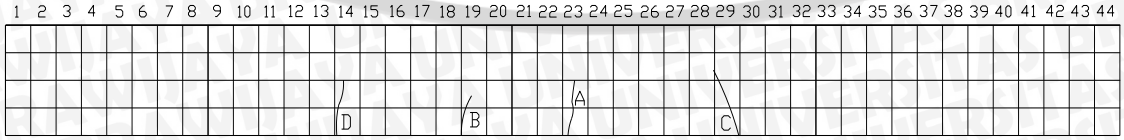
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.6 Balok Runtuh Lentur Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 25%

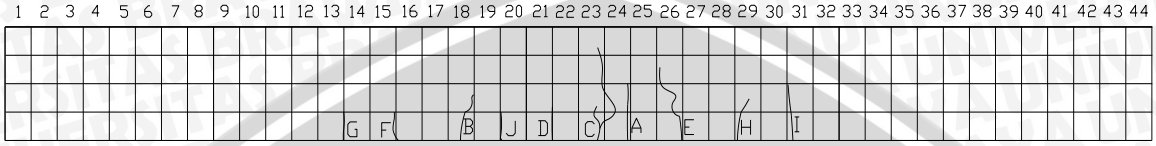
Berikutnya dapat kita lihat pada **Gambar 4.6**. Dimana kecepatan pertumbuhan tinggi dan lebar retak yang terjadi cukup stabil. Besarnya nilai lebar retak bertambah perlahan-lahan hingga saat mencapai beban maksimumnya. Dan tidak terjadi lonjakan penambahan lebar retak pada titik pembebanan tertentu. Hal ini membuktikan bahwa pertambahan lebar retak yang terjadi pada suatu beton bertulang akan bervariasi dan tidak dapat diperkirakan secara tepat.

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.7 Balok Runtuh Lentur Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 0%

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.8 Balok Runtuh Lentur Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 10%

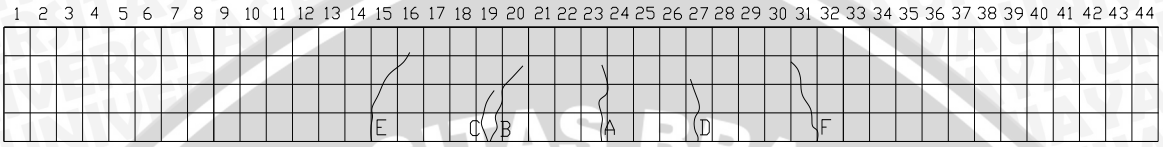
Beralih ke balok beton runtuh lentur dengan variasi perendaman 14 hari, di sini dapat kita lihat perbedaan jumlah retak yang cukup signifikan pada variasi kadar campuran BA 0% dan 10%. Pada **Gambar 4.7** dapat dilihat bahwa hanya terdapat 4 jumlah retak yang dinomori dengan huruf A-D. Retak pertama yang hanya muncul di A muncul pada interval awal pembebanan, yaitu pada pembebanan 200 kg. Dikarenakan retak awal yang muncul hanya sendiri maka bisa diperoleh kedalaman retaknya dengan menggunakan alat UPV. Retak A juga merupakan retak yang lebar retaknya digunakan sebagai acuan pada pembahasan lebar retak. Tetapi jumlah retak yang sedikit bukan merupakan acuan untuk menentukan apakah suatu balok beton layak dipergunakan atau tidak. Karena pada retak perhatian lebih ditujukan pada besarnya celah retak(lebar retak).

Pada **Gambar 4.8** terjadi hal yang sebaliknya. Melalui penomoran retak dapat kita ketahui bahwa terdapat 10 jumlah keretakan. Di 5 interval awal pembebanan hanya muncul 5 notasi retak. Retak-retak baru lainnya bermunculan di sekitaran interval akhir pembebanan balok. Secara kasat mata dapat dilihat pertumbuhan tinggi retak hanya terjadi pada A, C dan E. Selain itu pada retak C terdapat pola retak yang bercabang. Retak awal yang muncul tidaklah menjadi retak akhir yang memiliki lebar retak paling besar. Melainkan pada cabang yang muncul pada pembebanan selanjutnya. Cabang retak yang pertama dari retak C juga tidak menunjukkan adanya pertumbuhan tinggi maupun lebar retak baik secara perlahan maupun tiba-tiba.

Pada dua sampel balok beton dengan keruntuhan lentur perendaman 14 hari ini, retak yang terjadi merupakan retak lentur. Hal ini mengindikasikan bahwa balok

beton tersebut runtuh karena kuat lenturnya tidak mampu menahan pembebanan yang terjadi sebelum mengalami tegangan geser maksimum.

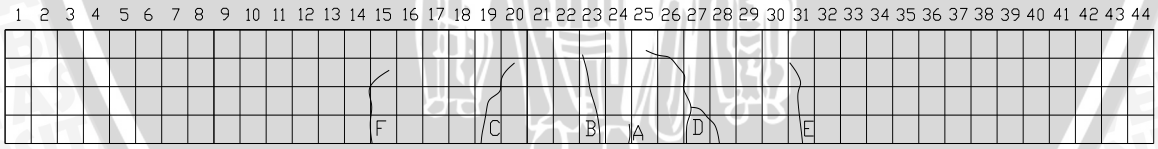
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.9 Balok Runtuh Lentur Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 20%

Gambar 4.9 memperlihatkan tidak adanya perbedaan bentuk pola retak yang terlalu mencolok untuk setiap hasil uji sampel balok beton dengan keruntuhan lentur. Pola retak yang mendominasi masih retak lentur. Pola retak lentur ini sendiri terdiri dari retak yang arahnya tegak lurus bentang, dimulai dari bagian tarik menuju ke daerah tekan beton. Retak B dan C bermula dari retak yang sama. Karena disetiap pembebanan pertumbuhannya cukup signifikan maka diberi notasi yang berbeda.

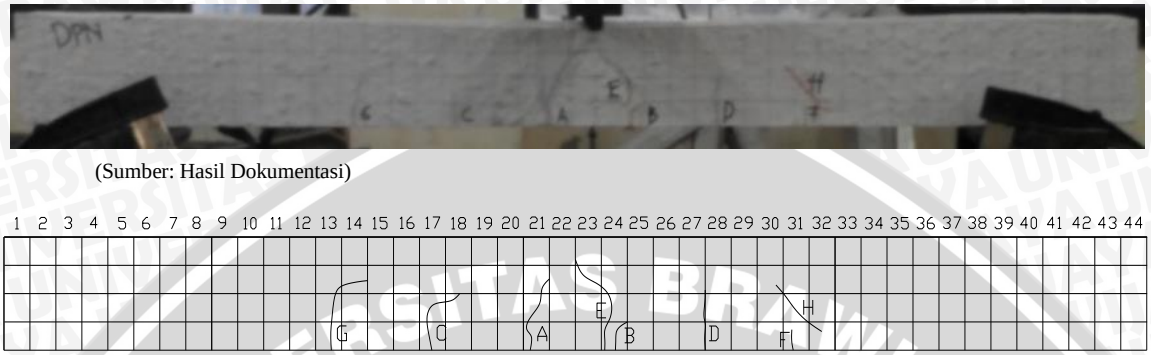
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.10 Balok Runtuh Lentur Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 25%

Balok dengan kadar campuran *Bottom Ash* 25% pada gambar merupakan variasi campuran terakhir untuk perendaman 14 hari. Bentuk pola retak yang sedikit berbeda dapat kita lihat disini. Tepatnya pada retak D. Pada permulaan pembebanan retak D diawali hanya dengan adanya 1 retakan saja. Seiring dengan bertambahnya pembebanan pertumbuhan tinggi retaknya terjadi dengan cukup baik, hingga di suatu titik pembebanan di sebelah retak D yang awal muncul sebuah retak baru. Pertumbuhannya mengarah ke retak D, hingga pada akhirnya menyatu pada retakan

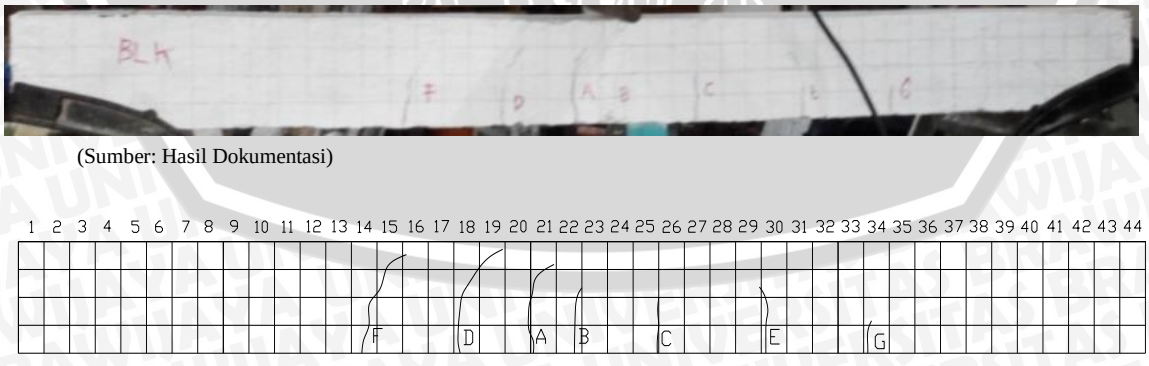
ke-2 dari retak D. Sekilas retak D tampak seperti retak lentur-geser, tetapi dikarenakan cabang retak D yang bermula dari serat tarik beton, maka retak D masih belum dapat dikelompokkan ke dalam retak lentur-geser.



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.11 Balok Runtuh Lentur Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 0%

Masuk pada balok runtuh lentur perendaman 28 hari. Pola retak yang terbentuk disini tampak sedikit berbeda dengan pola retak-pola retak yang telah dijelaskan sebelumnya. Dapat kita lihat dari retak C dan G. Kesemuanya menunjukkan arah miring menuju beban pada tiap ujung retakannya. Bahkan hal yang sama terjadi pada retak E, retak yang maksimum saat balok runtuh. Selain itu juga terdapat retak lentur-geser pada retak H. Penyebaran retak ke arah diagonal dan tidak dimulai dari bagian tarik beton memastikan bahwa retakan ini adalah retak lentur-geser. Sampel uji ini juga menjadi satu-satunya sampel balok beton dengan keruntuhan lentur yang mengalami retak lentur-geser. Hal ini membuktikan bahwa retak yang terjadi pada suatu beton bertulang akan bervariasi dan tidak dapat diperkirakan secara tepat.

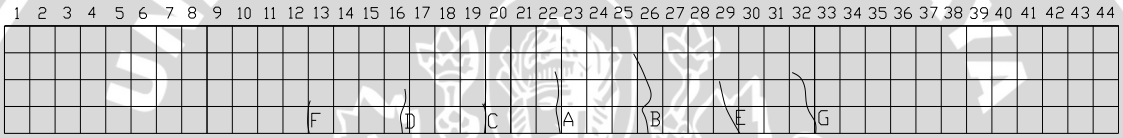


(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.12 Balok Runtuh Lentur Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 10%

Sisi belakang dari balok sampel pertama untuk runtuh lentur perendaman 28 hari dengan kadar BA 10% ini mengalami retak vertikal yang arahnya menuju titik beban atau yang biasa disebut retak lentur. Retak ini biasanya disebabkan karena beban yang melebihi kemampuan balok beton. Retak yang rapat pada bentang sebelah kiri titik pembebanan menunjukkan lebih rendahnya kekuatan lentur pada bagian ini. Ini menunjukkan bahwa proses pengerjaan yang kurang baik dapat menimbulkan hal-hal seperti ini.

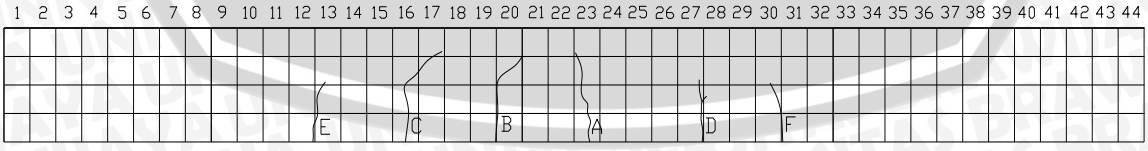
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.13 Balok Runtuh Lentur Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 20%

Tidak ada yang bisa diamati secara khusus pada Gambar 4.13. Sesuai dengan perencanaan awal yang diperoleh adalah retak lentur. Walaupun pertumbuhan tinggi retak A di bawah retak B, retak A tetap menjadi retak dengan lebar maksimum saat runtuh. Ini dikarenakan lokasi retak A yang berada persis dibawah titik beban, dimana momen maksimum balok berada.

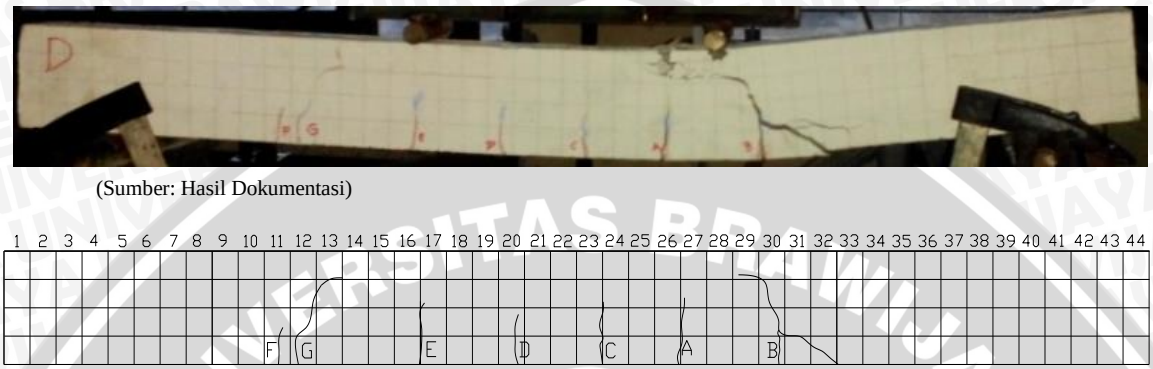
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.14 Balok Runtuh Lentur Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 25%

Semua retak yang terjadi pada balok beton di atas masih tergolong retak lentur. Retak yang tegak lurus tulangan tarik. Retak maksimum berada di A, yang juga merupakan retak yang pertama kali terjadi. Retak B dan C mengalami kemiringan

pada ujungnya. Retak yang terjadi terjadi pada bentang balok kiri pembebanan memiliki pertumbuhan yang lebih besar daripada yang terjadi pada benang balok kanan. Pertumbuhan disini mencakup semua aspek baik tinggi maupun lebar retaknya.



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.15 Balok Runtuh Geser Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 0%

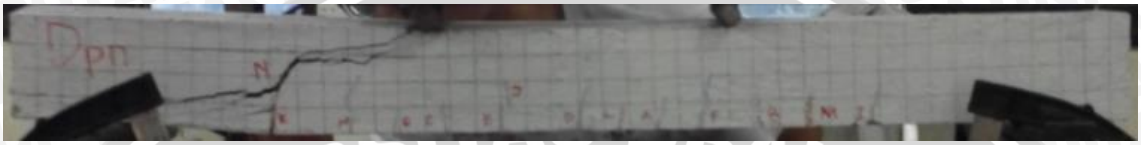
Berikutnya pembahasan pola retak beralih pada balok beton dengan keruntuhan geser. Sesuai dengan variasi perendamannya balok uji perendaman 7 hari dengan kadar BA 0% di atas merupakan balok beton yang diuji awal-awal oleh peneliti. Sehingga dapat kita lihat pada foto dan gambar di atas tampak balok mengalami lendutan yang cukup besar. Hal ini disebabkan karena pengaku yang masih kurang memahami cara kerja alat pengujian pembebanan balok dengan baik. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya diawal pembahasan pola retak, pada balok runtuh lentur perendaman 7 hari dengan kadar BA 0% penguji yang belum memahami dengan benar cara penggunaan dongkrak hidrolik dan pembacaan *load indicator* tetap memberi tekanan sesaat setelah balok mengalami keruntuhan. Hingga dapat kita lihat sendiri pada gambar keruntuhan yang dialami oleh balok tersebut.

Dan seperti yang sudah dijelaskan pula sebelumnya retak yang bisa didapatkan disini bukanlah retak geser, melainkan retak lentur-geser. Retak lentur-geser sendiri merupakan retak yang tegak lurus tulangan balok yang disertai dengan retak miring di ujung retak tersebut. Retak ini terjadi karena balok beton mendapatkan beban yang melebihi kekuatan lentur dan pada akhirnya melampaui kekuatan gesernya.

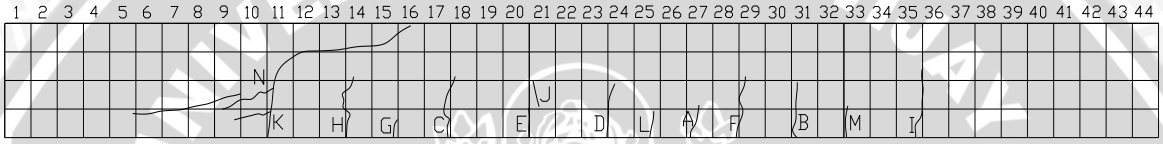
Menurut Wang dan Salmon (1986), kecepatan perubahan dari retak lentur awal menjadi retak lentur-geser tergantung dari percepatan pertumbuhan dan tinggi dari

suatu retak lentur, disamping dari besarnya tegangan geser yang bekerja di dekat ujung atas retak lentur.

Pada balok dengan keruntuhan geser, retak yang terjadi adalah retak yang muncul secara tiba-tiba pada titik pembebanan tertentu, sedangkan pada balok beton dengan keruntuhan lentur terjadi retak yang muncul secara perlahan seiring dengan bertambahnya pembebanan.



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

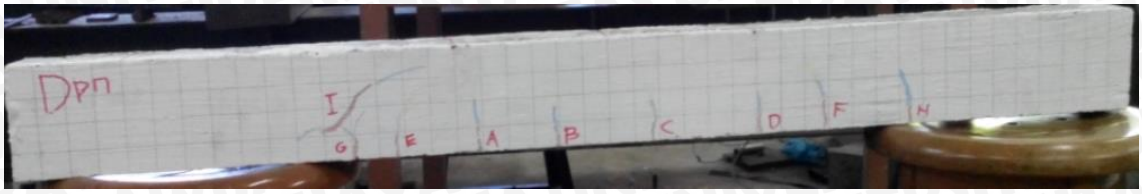


Gambar 4.16 Balok Runtuh Geser Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 10%

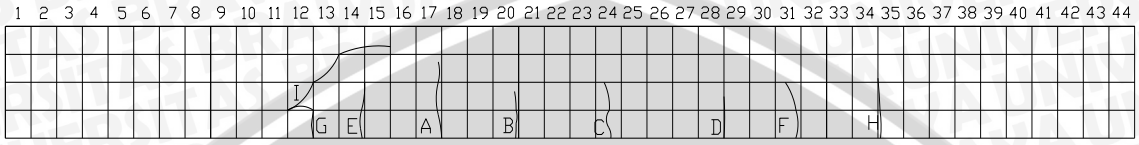
Berbeda dengan yang terjadi pada balok runtuh lentur, menurut hasil dokumentasi dapat kita lihat bahwa terdapat banyak sekali retak yang terjadi. Yang membuat hal ini terjadi adalah perbedaan jarak sengkang(s) yang dipasang pada balok ini berikut tipe pembebanan yang digunakan.

Tipe pembebanan yang digunakan pada balok beton dengan runtuh geser adalah pembebanan dengan dua titik simetris L/3. Pada tipe pembebanan ini akibat menggunakan 2 titik pembebanan terpusat, distribusi pembebanan yang terjadi lebih merata, sehingga retak yang ditimbulkan menjadi lebih banyak.

Retak terbesar yang terjadi merupakan retak yang muncul tiba-tiba pada titik pembebanan tertentu. Dapat kita lihat pada notasi N retak yang terjadi tidak berasal dari bagian tarik balok. Walaupun retak N tampak seperti berasal dari retak K tapi pada ujungnya secara kasat mata dapat dilihat lebar retak yang terjadi pada retak K lebih kecil daripada yang dialami retak N.



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

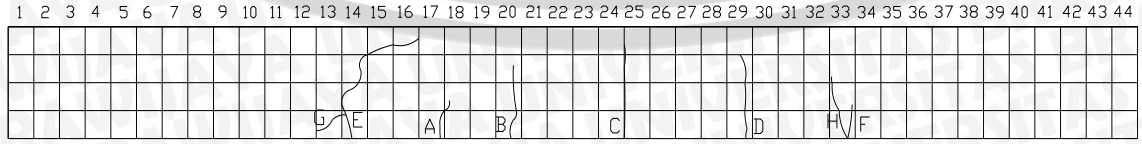


Gambar 4.17 Balok Runtuh Geser Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 20%

Kembali retak lentur-geser didapatkan dari hasil pengujian balok beton runtuh geser perendaman 7 hari dengan kadar *Bottom Ash* 20%. Retak yang terjadi pada notasi I muncul sesaat menjelang balok mengalami keruntuhan. Retak yang arahnya diagonal ini tidak menyatu dengan retak yang muncul dari retak G. sehingga retak I dapat digolongkan menjadi retak lentur-geser.

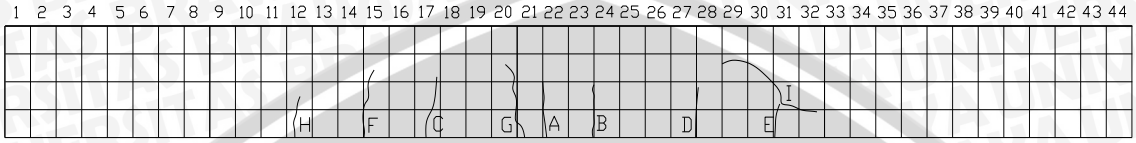
Gambar 4.18 pada halaman berikutnya merupakan variasi campuran terakhir dari balok beton runtuh geser dengan perendaman 7 hari. Pada gambar dapat kita lihat juga retak G mengalami retak lentur-geser. Selain itu retak G juga menjadi retak utama dengan lebar retak maksimum pada akhir pembebanan. Hampir seperti pada penjelasan **Gambar 4.16**, retak G yang tampak seperti berawal dari retak E secara kasat mata dapat dilihat bahwa keduanya tidak berhubungan. Karena pada ujung retak E lebar retaknya berbeda dengan yang terjadi pada retak G.

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.18 Balok Runtuh Geser Perendaman 7 Hari dengan Kadar BA 25%

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



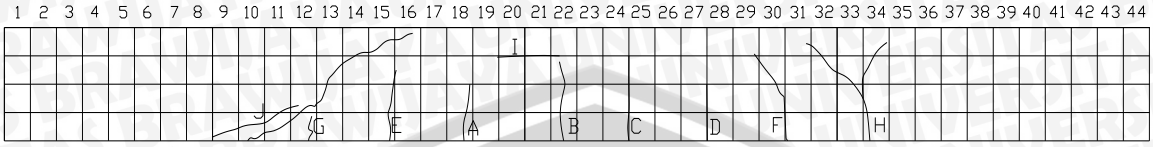
Gambar 4.19 Balok Runtuh Geser Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 0%

Selanjutnya pada balok beton dengan keruntuhan geser perendaman 14 hari masih didapatkan hasil yang serupa. Pada balok beton tanpa kadar *Bottom ash* ini retak lentur-geser J muncul pada titik pembebanan menjelang balok mengalami keruntuhan. Retak yang terjadi secara diagonal pada awal kemunculan retak J menunjukkan gejala akan munculnya retak lentur-geser. Hingga akhirnya pada saat balok runtuh retak J dapat menjadi retak utama dengan lebar retak yang maksimum.

Dari variasi yang ada balok dengan campuran kadar BA 10% merupakan balok dengan kekuatan terbaik. Pada balok ini dapat kita lihat banyaknya retak yang terjadi berikut dengan variasinya. Akan tetapi karena pembahasan lebih terfokus pada retak geser, retak-retak lentur yang bercabang tidak dibahas lebih lanjut disini.

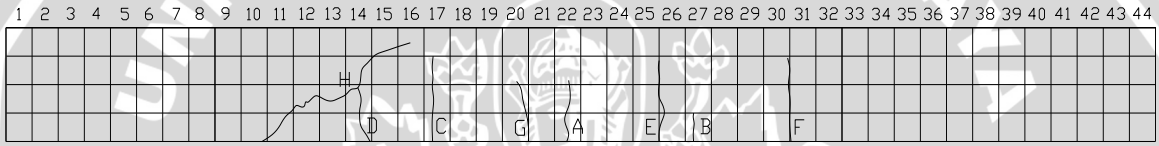
Pada retak I terdapat retak yang muncul secara horizontal, tetapi karena terjadi di dalam bentang pembebanan maka belum bisa dianggap sebagai retak geser. Retak maksimum terdapat pada retak G. Karena diatas retak G diperkirakan akan muncul retak lentur-geser maka pada kali ini tidak diberikan penamaan yang baru. Walaupun retak G berasal dari serat tarik beton, tetapi karena kemiringannya yang mengarah pada beban, retak ini dapat dikategorikan sebagai retak lentur-geser. Hasil dokumentasi dapat dilihat pada gambar berikut:

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.20 Balok Runtuh Geser Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 10%

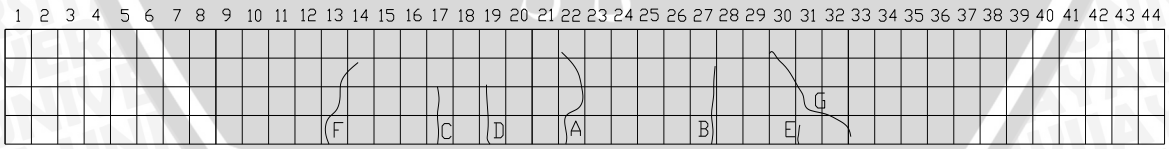
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.21 Balok Runtuh Geser Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 20%

Pada gambar di atas retak H menunjukkan terjadinya retak lentur-geser. Dimulai dari bagian tarik balok beton retak ini terjadi akibat percepatan retak dan ketinggian lentur yang rendah yang akhirnya menyebar kearah diagonal menuju titik beban.

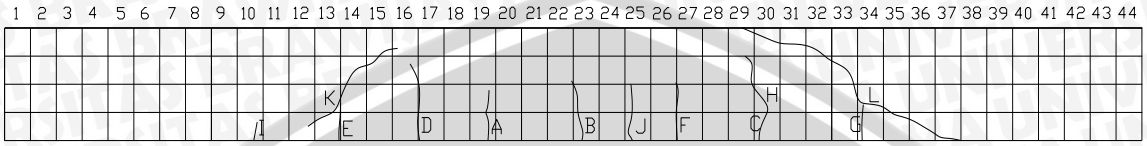
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.22 Balok Runtuh Geser Perendaman 14 Hari dengan Kadar BA 25%

Pada **Gambar 4.22** di halaman sebelumnya, retak G menjadi retak utama yang dibahas lebih lanjut lebar retaknya. Retak G yang terjadi tidak berawal dari bagian tarik beton merupakan retak lentur-geser. Pada kemunculan awalnya retak tersebut berada di atas retak E.

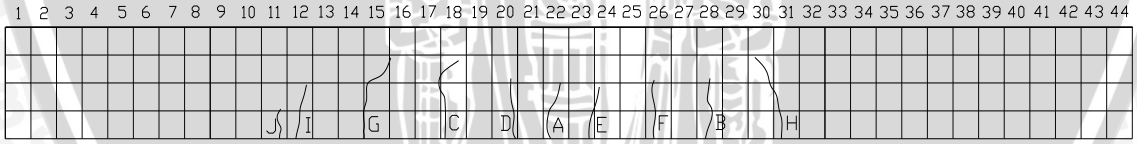
(Sumber: Hasil Dokumentasi)



Gambar 4.23 Balok Runtuh Geser Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 0%

Pembahasan yang berikutnya beralih pada pembahasan balok beton runtuh geser dengan perendaman 28 hari. Pada gambar dapat kita lihat terjadi 2 retak lentur-geser pada notasi K dan L. Keduanya tidak menyatu dengan retak di bawahnya(yang merupakan retak lentur) dan berawal dari serat tarik balok beton. Karena memiliki lebar retak yang lebih besar, retak L digunakan sebagai acuan utama dalam pembahasan selanjutnya.

(Sumber: Hasil Dokumentasi)



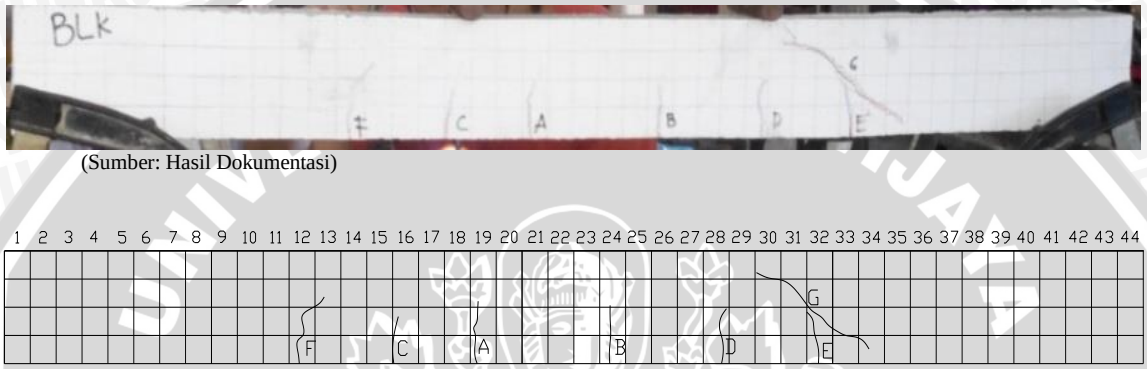
Gambar 4.24 Balok Runtuh Geser Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 10%

Seperti sudah dijelaskan sebelumnya, variasi campuran dengan kadar BA 10% merupakan kadar variasi campuran terbaik dibandingkan berbagai variasi campuran yang lainnya. Campuran dengan kadar BA 10% ini dapat menghasilkan balok beton dengan kekuatan yang tinggi. Diperkuat lagi dengan hasil pengujian kali ini.

Pada gambar yang disajikan dapat kita lihat bahwa hingga mengalami keruntuhan(bahkan dengan lendutan yang terjadi) retak geser maupun retak lentur geser tidak bisa didapatkan. Pada retak H yang pertumbuhan retak lentur yang cukup tinggi pada akhir-akhir pembebanan mengalami tegangan geser pada

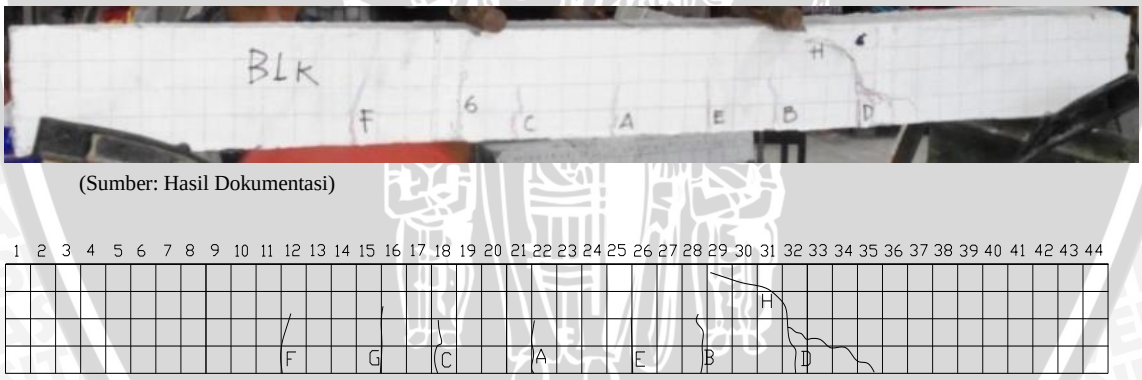
ujungnya sehingga mengalami kemiringan ke arah beban. Akan tetapi sebelum tegangan gesernya mencapai maksimum, balok beton sudah runtuh terlebih dahulu akibat dari kuat lenturnya yang tidak mampu menahan pembebanan.

Hal yang sama terjadi pada tiap sampel benda uji balok beton dengan keruntuhan geser perendaman 28 hari untuk kadar campuran BA 10%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa seluruh sampel variasi ini mengalami kegagalan geser.



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.25 Balok Runtuh Geser Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 20%



(Sumber: Hasil Dokumentasi)

Gambar 4.26 Balok Runtuh Geser Perendaman 28 Hari dengan Kadar BA 25%

Untuk pembahasan selanjutnya tidak terdapat perbedaan yang cukup mencolok pada pola retak yang terjadi pada gambar terhadap balok beton keruntuhan geser secara keseluruhan. Pada **Gambar 4.25** dan **Gambar 4.26** dapat kita lihat terjadi pola retak yang hampir serupa. Retak lentur-geser terjadi pada sisi bentang kanan di luar pembebanan dengan notasi G untuk kadar campuran 20% dan penomoran H untuk balok beton dengan kadar campuran BA 25%.

Seluruh uraian di atas menunjukkan bahwa pola retak pada hasil uji dapat menunjukkan pada kita perilaku beton ketika mendapatkan pembebanan. Pada balok beton dengan runtuh lentur secara keseluruhan hasil yang muncul adalah retak lentur. Retak utamanya berada di tengah bentang, tepat di sekitar titik pembebanan. Hal ini terjadi karena di daerah tersebut mengalami momen maksimum.

Sedangkan pada balok beton dengan runtuh geser secara keseluruhan hasil yang muncul adalah retak lentur-geser. Retak ini merupakan retak diagonal yang berawal dari daerah luar pembebanan menuju ke titik pembebanan terdekat. Pada balok beton dengan runtuh geser jumlah retak yang terjadi juga lebih banyak daripada balok beton dengan runtuh lentur. Ini dikarenakan karena pada balok beton dengan runtuh geser digunakan pembebanan dengan 2 titik terpusat simetris yang mengakibatkan retak terdistribusi secara merata.

4.4.2 Pembahasan Lebar Retak

Pada poin 4.3.2 telah diberikan hasil pengamatan lebar retak dari tiap pengujian sampel yang ada. Hasil pengamatannya dapat dilihat kembali pada **Tabel 4.6 – Tabel 4.11**. Dari tabel-tabel tersebut terdapat baris berwarna kuning yang merupakan lebar retak yang ≤ 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan. Karena pada pembebanan sebuah balok, balok akan mengalami tegangan dan regangan. Melewati 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan, materialnya banyak kehilangan kekakuannya sehingga menambah ketidaklinieran diagram (Nawy, 1985). Maka dari itu lebar retak yang akan dianalisis di sini adalah lebar retak pada baris berwarna kuning tersebut.

Berikutnya akan disajikan tabel retak aktual rata-rata untuk balok beton dengan keruntuhan lentur dan geser.

Tabel 4.12 Retak Aktual Rata-Rata Untuk Balok dengan Keruntuhan Lentur

Kadar BA	Lama Perendaman (hari)		
	7 (mm)	14 (mm)	28 (mm)
0%	0.095	0.180	0.160
10%	0.135	0.130	0.100
20%	0.145	0.120	0.125
25%	0.125	0.135	0.130

Tabel 4.13 Retak Aktual Rata-Rata Untuk Balok dengan Keruntuhan Geser

Kadar BA	Lama Perendaman (hari)		
	7 (mm)	14 (mm)	28 (mm)
0%	0.080	0.125	0.015
10%	0.000	0.055	0.000
20%	0.030	0.035	0.000
25%	0.000	0.015	0.035

Karena lebar retak yang terjadi pada suatu struktur beton bertulang akan bervariasi dan tidak dapat diperkirakan secara tepat. Maka syarat pembatasan yang

harus dipenuhi adalah lebar retak yang terjadi tidak boleh melebihi lebar retak maksimum. Harga maksimum lebar retak itu sendiri tergantung pada kondisi lingkungan sekitar beton. Kemudian dapat diketahui mana-mana retak aktual yang sesuai syarat pembatasan yang ada.

Berikut akan diberikan rumus empiris untuk menghitung lebar retak maksimum yang terjadi, juga contoh perhitungannya.

$W = 11 \times 10^{-6} \beta . fs (dc . A)^{1/3}$

(SNI 03-284-2002 pasal 12.6 ayat 4)

Dimana:

W = Lebar retak maksimum (inch atau mm)

Fs = Tegangan maksimum pada tulangan untuk taraf beban kerja yang apabila tidak dihitung dapat digunakan 0,6 fy

β = Perbandingan jarak dan permukaan tarik dari pusat tulangan terhadap sumbu netral

$\beta = \frac{h-c}{d-c}$ (h – c) dengan β = 1,2

dc = Tebal selimut beton sampai pusat tulangan

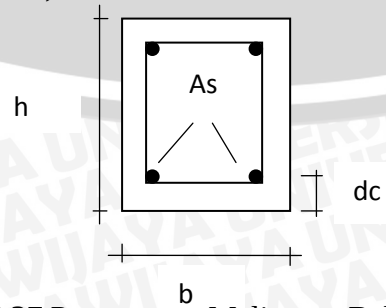
A = Luas penampang beton yang mengelilingi suatu tulangan

Contoh Perhitungan:

Benda uji = Balok beton dengan keruntuhan lentur perendaman 7 hari kadar campuran *Bottom Ash* 0%

Data-data yang diketahui:

f'c	= 17,2493 MPa	= 2501,81 psi	;	b = 7 cm	= 2,76 in
fy	= 415,626 MPa	= 60281,4391 psi	;	h = 10 cm	= 3,94 in
E_s	= 200000 MPa	= 29 x 10^6 psi	;	ln = 45 cm	= 2,95 ft
P	= 650 kg	= 1433 lb	;	yt = 1,97 in	
w	= 14,7519 kg/m	= 9,91 lb/ft			



Gambar 4.27 Penampang Melintang Balok Beton

Momen Inersia Bruto

$$I_g = \frac{1}{12} b\, h^3$$

$$= \frac{1}{12} 2{,}76.\ 3{,}94^3$$

$$= 14{,}01 \text{ in}^4$$

Modulus Rapture

$$f_r = 7{,}5\sqrt{f'_c}$$

$$= 7{,}5\sqrt{250{,}.81}$$

$$= 375{,}14 \text{ psi}$$

$$= 2{,}59 \text{ MPa}$$

Momem Retak

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

$$= \frac{375{,}14.\ 14{,}01}{1.97}$$

$$= 2670{,}75 \text{ lb.in}$$

Momen Maksimum Balok

$$Ma = \frac{\text{wln}^2}{8} + \frac{\text{Pln}}{4} = \frac{9{,}91.\ 2{,}95^2}{8} + \frac{1433.\ 2.95}{4} = 1068{,}63 \text{ lb.ft} = 12823{,}6 \text{ lb.in}$$

Tinggi garis Netral c

$$\frac{\text{bc}^2}{2} + \text{nAsc} - \text{nAsd} = 0$$

$A_s = 2{,}01 \text{ cm}^2 = 0{,}314 \text{ in}^2$

$$Ec = 5700\sqrt{\text{f'c}} = 5700\sqrt{2501{,}81} = 2851029{,}367 \text{ psi} = 19655 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{\text{Es}}{\text{Ec}} = \frac{29000000}{2851029{,}367} = 10{,}2$$

$$\frac{2{,}76\,.\,\text{c}^2}{2} + 10{,}2\,.\,0{,}314.\,\text{c} - 10{,}2\,.\,0{,}314\,.\,3{,}54 = 0$$

c = 0,89 in

Momen Inersia Retak

$$Icr = \frac{bc^3}{3} + nAs(d-c)^2 = \frac{2{,}76.0{,}89^3}{3} + 10{,}2.0{,}314\,(3{,}54-0{,}89)^2$$

$I_{cr} = 23{,}12\ in^4$

Tegangan Baja

$$fs = \frac{Ma}{Icr}.(d-c)n = \frac{12823{,}6}{23{,}12}.(3{,}54-0{,}89).10{,}2 = 20742{,}93\ psi = 20{,}74293\ ksi$$

$$\beta = \frac{(h-c)}{(d-c)} = \frac{(3{,}94-0{,}89)}{(3{,}54-0{,}89)} = 1{,}148$$

$$A = \frac{b.2dc}{\sum tulangan} = \frac{2{,}76.2.0{,}39}{2}$$

$A = 1{,}09\ in^2$

Lebar Retak Maksimum

$$\omega = 11.10^{-6}\,\beta fs\sqrt[3]{dcA}\ x10^{-3} = 11.10^{-6}.1{,}148.20{,}743\ \sqrt[3]{0{,}39.1{,}09}\ x\,10^{-3} = 0{,}0034\ in = 0{,}085\ mm$$

Hasil dari perhitungan rumus teoritis di atas kemudian ditabelkan seperti di bawah ini:

Tabel 4.14 Lebar Retak Perhitungan Untuk Balok dengan Keruntuhan Lentur

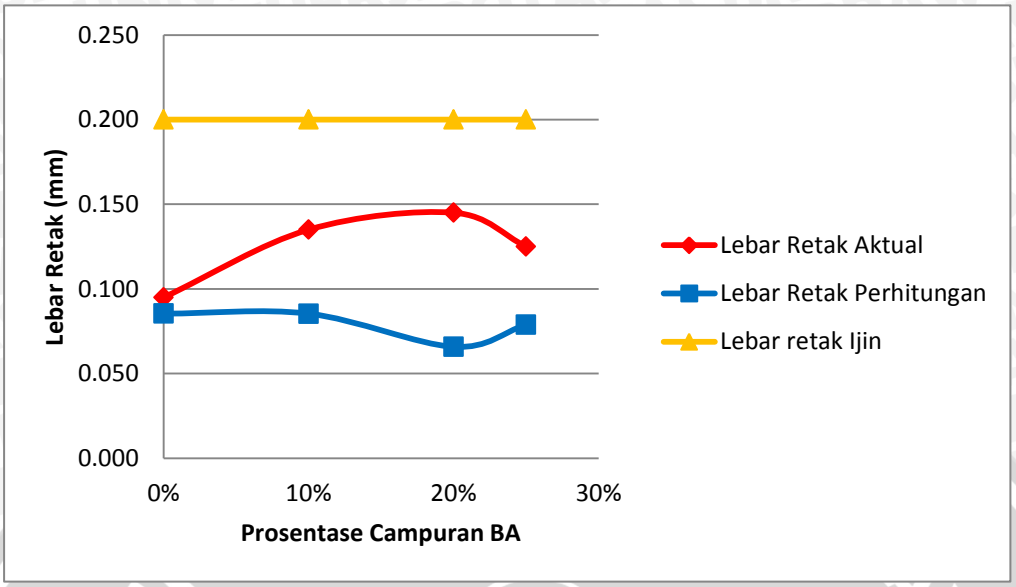
Kadar BA	Lama Perendaman (hari)		
	7	14	28
0%	0.0854	0.0723	0.0789
10%	0.0854	0.0853	0.0723
20%	0.0658	0.0789	0.0854
25%	0.0788	0.0723	0.0789

Tabel 4.15 Lebar Retak Perhitungan Untuk Balok dengan Keruntuhan Geser

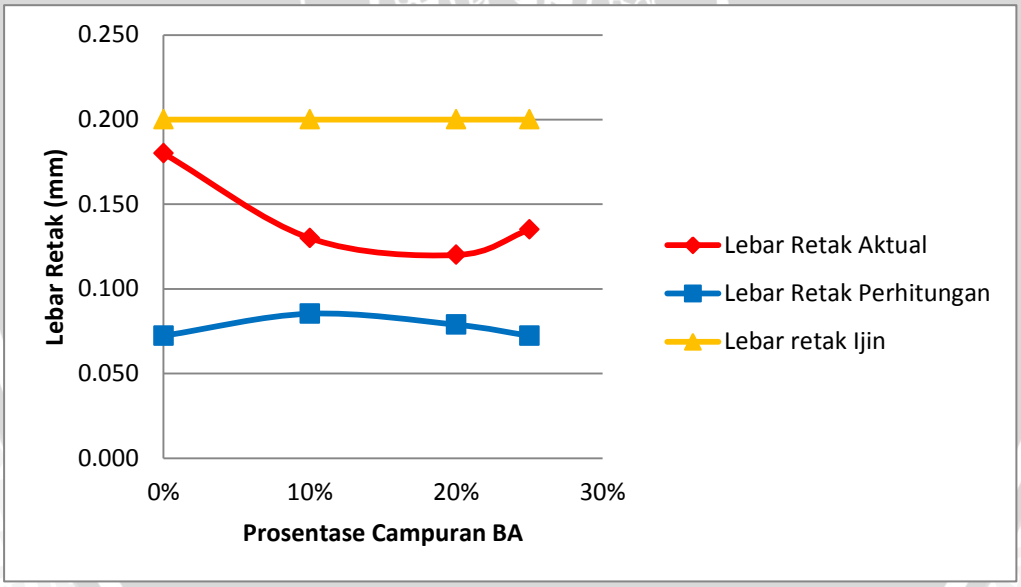
Kadar BA	Lama Perendaman (hari)		
	7	14	28
0%	0.1506	0.0984	0.1049
10%	0.1180	0.1179	0.0006
20%	0.1049	0.0984	0.1115
25%	0.1049	0.1114	0.1115

Selain akan membandingkan antara lebar retak aktual dan perhitungan, peneliti juga akan membandingkan dengan retak ijin untuk beton yang berada di lingkungan laut. Dalam hal ini lebar retak maksimum yang diijinkan oleh ACI Code untuk daerah basah khususnya dalam lingkup air laut pada tabel yang sudah dicantumkan pada Bab 2 yaitu 0.15 mm dan sering dibulatkan menjadi 0.20 mm.

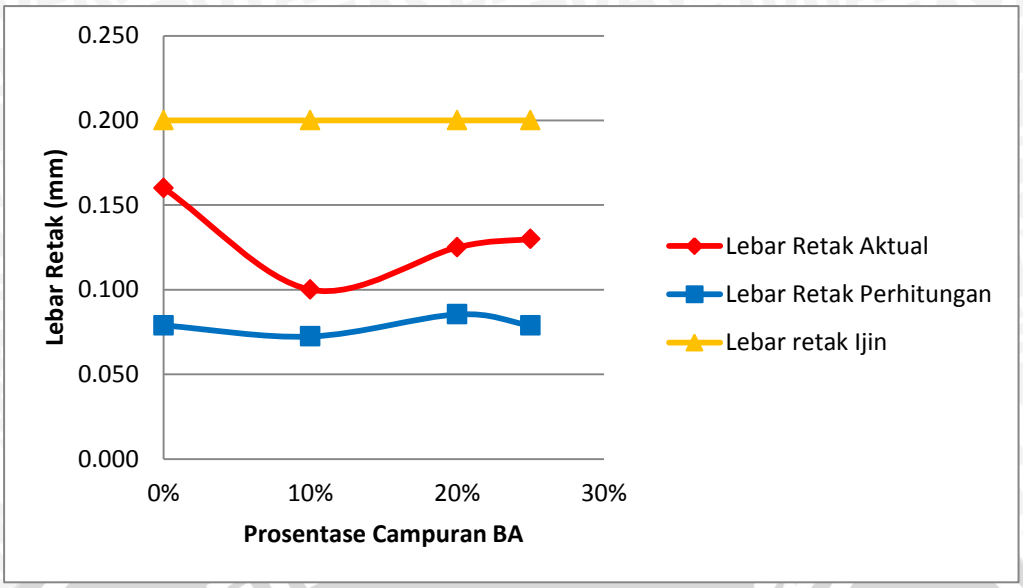
Dan berikut adalah grafik yang dapat disajikan melalui perbandingan ketiganya:



Grafik 4.1 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Lentur Perendaman 7 Hari

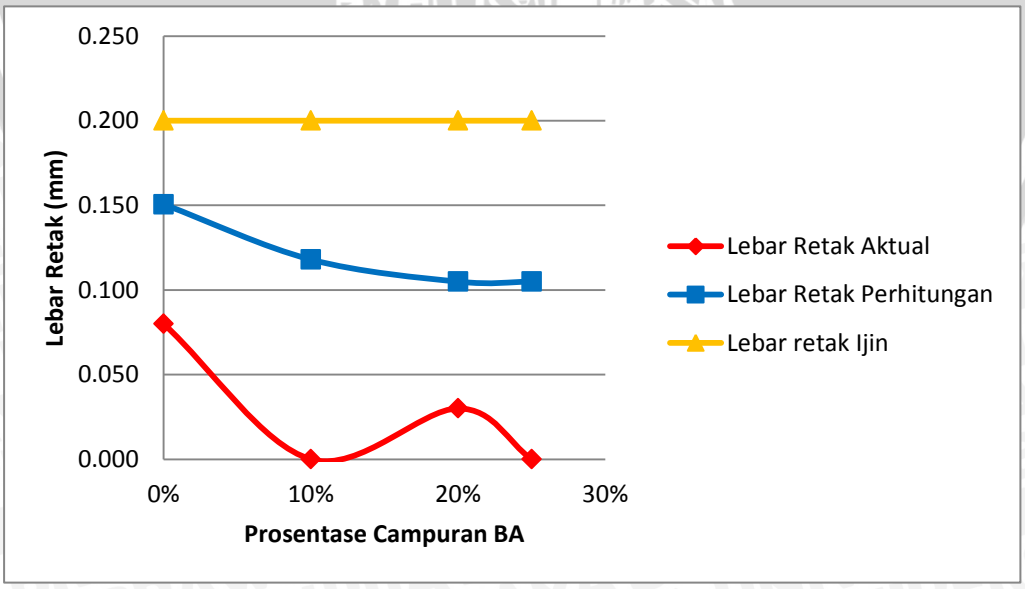


Grafik 4.2 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Lentur Perendaman 14 Hari

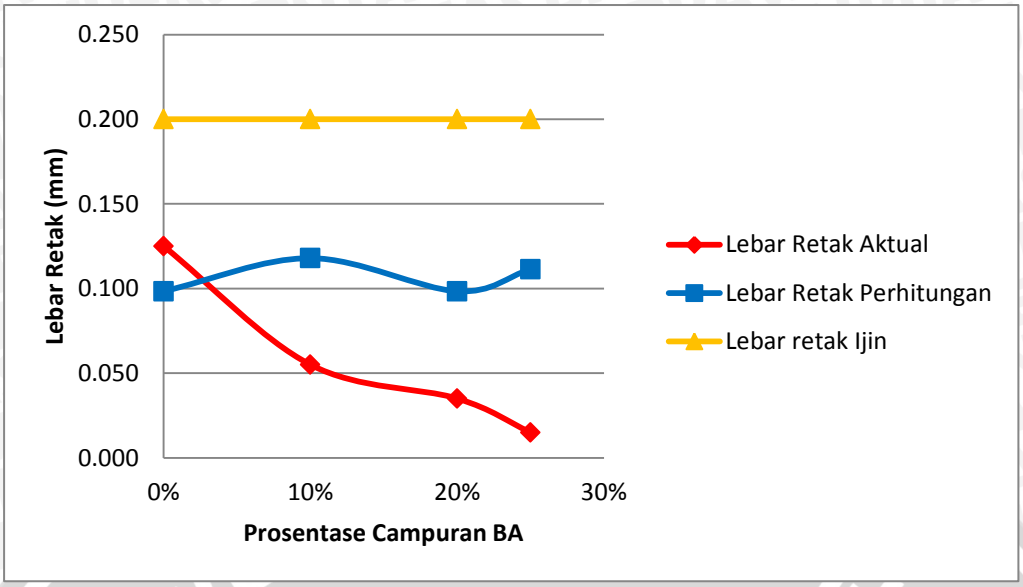


Grafik 4.3 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Lentur Perendaman 28 Hari

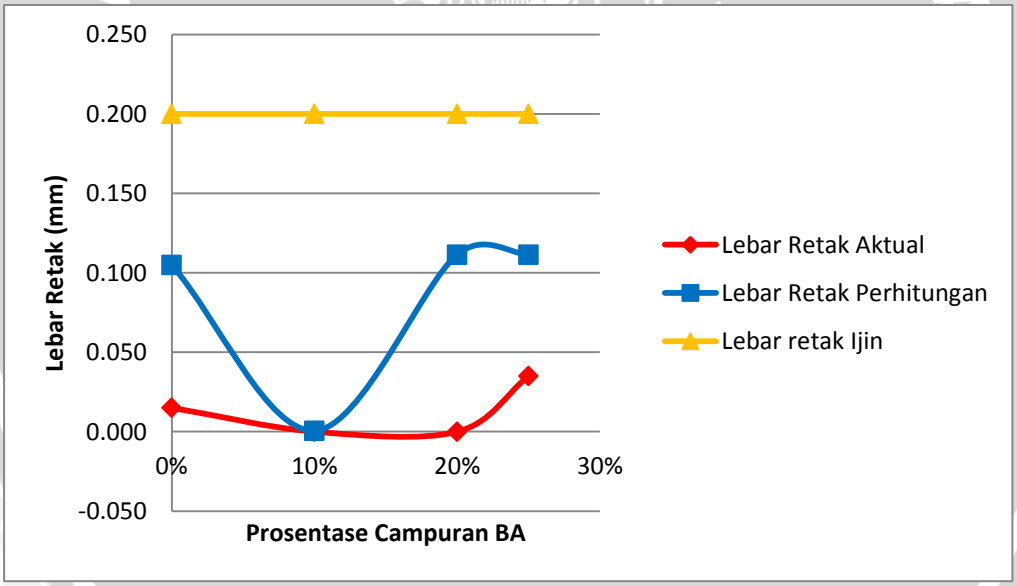
Dari ketiga grafik perbandingan diatas dapat kita ketahui bahwa kadar campuran 10% merupakan kadar campuran terbaik dari penelitian kali ini. Hal ini didasari oleh tren kadar campuran 10% yang lebih stabil jika dibandingkan kadar campuran lainnya. Pada kadar 0% dan 20%, tren yang ditunjukkan oleh retak aktual hanya baik pada satu variasi perendaman saja. Sedangkan untuk kadar 25% tren yang terjadi sudah cukup baik, tetapi pada variabel perendaman 28 hari kadar 10% mengalami lebar retak aktual yang lebih baik.



Grafik 4.4 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Geser Perendaman 7 Hari



Grafik 4.5 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Geser Perendaman 14 Hari



Grafik 4.6 Perbandingan Lebar Retak pada Balok Runtuh Geser Perendaman 28 Hari

Pada balok beton dengan keruntuhan geser, retak aktual yang terjadi berada di bawah retak perhitungan. Hal ini disebabkan karena retak lentur-geser pada balok runtuh geser yang muncul tiba-tiba pada pembebanan tertentu. Tidak secara gradual seperti retak lentur yang terjadi pada balok runtuh lentur. Disamping itu, kemunculan awal retak lentur-geser juga terjadi di sekitaran akhir interval pembebanan balok beton uji.

Kadar campuran BA 10% kembali menjadi kadar campuran yang optimum pada balok runtuh geser. Seperti yang sudah dijelaskan pada pembahasan pola retak, kadar campuran 10% bahkan mengalami kegagalan dalam menimbulkan retak geser/lentur geser pada variabel perendaman 28 hari. Dapat dilihat juga pada grafik bahwa kadar campuran 10% belum mendapatkan retak geser maupun lentur geser pada pembebanan ≤ 70% dari beban maksimum pada variabel perendaman 7 dan 28 hari. Sebetulnya hal ini juga terjadi pada kadar campuran *Bottom Ash* 20% dan 25%, akan tetapi masing-masingnya hanya mengalami hal tersebut pada satu variabel perendaman saja. Hal ini menyebabkan kadar 10% kembali menjadi kadar yang optimum balok keruntuhan geser ini.

Dapat dilihat secara keseluruhan bahwa retak yang terjadi tidak berselisih jauh dengan retak perhitungan dan juga tidak melewati batas yang diberikan retak ijin. Bahkan pada retak dengan runtuh geser, retak aktual berada di bawah retak perhitungan. Dan karena semua retak aktual pada ≤ 70% dari beban saat balok mengalami keruntuhan masih berada dibawah retak ijin, maka penelitian ini masih bisa dimanfaatkan.