IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan hasil penelitian ini secara umum dibagi menjadi lima bagian yaitu pengujian mekanik beton, pengujian benda uji balok beton bertulang, analisis hasil pengujian, perhitungan secara teoritis dan analisis hasil pengujian dengan hasil perhitungan teoritis.

A. Pengujian Mekanik Beton

1. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari dari pengecoran. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tekan beton (f_c'), yaitu dengan membandingkan antara beban maksimum pada saat beton hancur terhadap luas penampang beton seperti pada Persamaan (1). Hasil dari pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan beton.

Sampel	Dimeter (mm)	Luas (mm^2)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tekan (N/mm^2)	Kuat Tekan Rata-rata (N/mm^2)
B U - 1	150	17662.5	410000	23,2	23,3
B U - 2	150	17662.5	420000	23,8	
B U - 3	150	17662.5	405000	22,9	
BB I - 1	150	17662.5	390000	22,1	21,9
BB I - 2	150	17662.5	475000	26,9	
BB I - 3	150	17662.5	295000	16,7	
BB II - 1	150	17662.5	390000	22,1	22,7
BB II - 2	150	17662.5	385000	21,8	
BB II - 3	150	17662.5	430000	24,3	

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa hasil pengujian kuat tekan beton rata-rata untuk BU, BB I dan BB II masing-masing adalah 23,3 MPa, 21,9 MPa dan 22,7 MPa. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa besarnya nilai kuat tekan beton untuk BU, BB I dan BB II lebih besar dari pada nilai kuat tekan beton rencana yaitu 20 MPa. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa nilai kuat tekan beton untuk ketiga benda uji sesuai dengan perencanaan kuat tekan beton.

2. Pengujian Kuat Tarik Lentur Beton

Pengujian kuat tarik lentur beton dilakukan pada umur 28 hari dari pengecoran. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kuat tarik lentur beton. Hasil pengujian kuat tarik lentur beton dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian kuat tarik lentur beton.

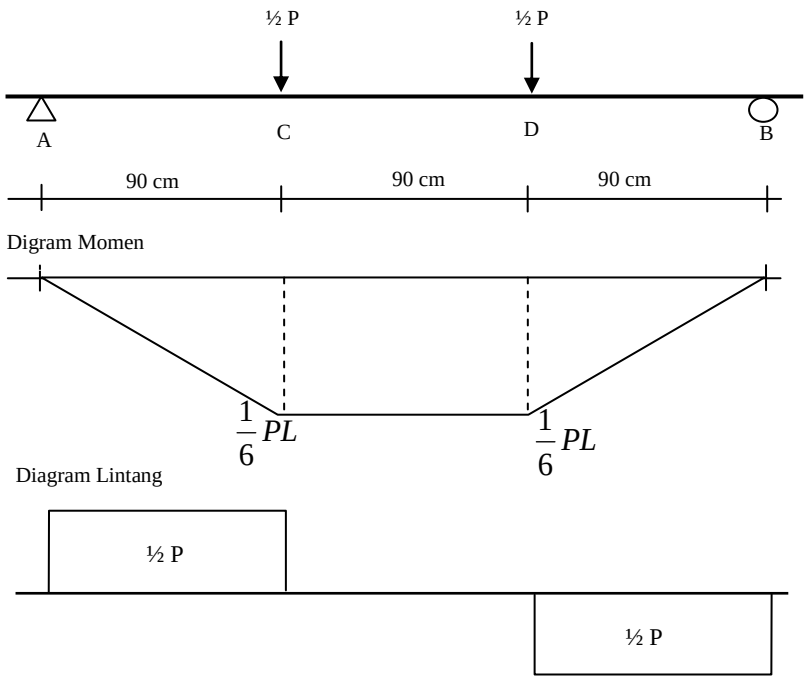
Nama Balok	Sampel	Beban (N)	Panjang bentang (mm)	Lebar balok (mm)	Tinggi balok (mm)	Kuat Tarik lentur (MPa)	Kuat tarik rata-rata (MPa)	Kuat Tarik berdasarkan teori (MPa)
BU	I	13038	300	100	100	3,91	3,82	3,38
	II	13038	300	100	100	3,91		
	III	27218	450	150	150	3,63		
BB I	I	9003	300	100	100	2,70	2,91	3,26
	II	11020	300	100	100	3,31		
	III	20494	450	150	150	2,73		
BB II	I	16400	300	100	100	4,92	3,72	3,34
	II	11693	300	100	100	3,51		
	III	20494	450	150	150	2,73		

Pada tabel di atas, nilai kuat tarik berdasarkan teori dihitung dari Persamaan (3) dengan nilai f'_c diambil dari hasil penelitian. Dari tabel dapat dilihat bahwa nilai kuat tarik rata-rata berdasarkan hasil penelitian untuk balok BU sebesar 3,82 MPa, balok BB I sebesar 2,91 MPa dan balok

BB II sebesar 3,72. Sedangkan besarnya kuat tarik rata-rata berdasarkan teori untuk BU, BB I dan BB II masing-masing sebesar 3,38 MPa, 3,26 MPa dan 3,34 MPa. Besarnya nilai kuat tarik berdasarkan penelitian dan berdasarkan teori hampir sama dan mempunyai selisih yang kecil. Selain itu hasil nilai kuat tarik berdasarkan penelitian mempunyai kecenderungan yang sama dengan hasil nilai kuat tarik berdasarkan teori, yaitu BU memiliki nilai kuat tarik paling besar, BB I memiliki kuat tarik paling kecil dan besarnya kuat tarik BB II terletak di antara kuat tarik BU dan BB I.

B. Pengujian Balok Beton Bertulang

Pengujian balok beton bertulang dilakukan dengan meletakkan balok uji pada tumpuan sendi dan rol sejarak 2700 mm, dimana balok tersebut menerima dua beban terpusat yang diberikan oleh *hydraulic jack*. Perletakan pengujian balok serta diagram momen dan gaya lintang dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Perletakan balok serta diagram momen dan lintang.

Besarnya momen maksimum yang terjadi pada ⅓ bagian tengah bentang yaitu sebesar 1/6 P L, pada ⅓ bagian tengah bentang ini balok beton bertulang hanya mengalami lentur murni tanpa adanya pengaruh dari gaya lintang. Sedangkan pada daerah AC dari tumpuan, balok beton bertulang memikul gaya lintang sebesar ½ P dan mengalami lentur secara bersamaan.

Pada penelitian ini dilakukan pengamatan terhadap lendutan yang terjadi di tengah bentang dan di bawah beban terpusat dengan cara membaca *dial gauge* yang dipasang di tengah bentang dan di bawah beban. Selain pengamatan lendutan, penelitian ini juga mengamati nilai regangan yang terjadi pada tulangan tarik dan serat atas balok beton. Pembacaan nilai regangan ini menggunakan alat *strain indicator*. Selanjutnya melakukan pengamatan terhadap lebar dan pola retak pada balok uji dengan cara menggambar pola retak pada setiap tahap pembebanan dan mengukur lebar retak pada saat beban maksimum. Balok beton bertulang diberi beban oleh *hydraulic jack* dan besarnya beban diketahui dari pembacaan *proving ring*.

Berdasarkan hasil pengamatan pada pengujian balok beton bertulang, didapatkan beban maksimum pada masing-masing balok, grafik hubungan antara beban terhadap lendutan dan grafik hubungan antara momen dan kurvatur. Berdasarkan pengujian tersebut juga akan diketahui besarnya beban pada saat balok mulai retak, pola retak serta lebar retak awal dan perkembangannya sampai mencapai beban maksimum. Hasil dari pengamatan pada pengujian setiap balok uji, disajikan pada Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 6. Beban, defleksi, dan regangan dari hasil pengujian balok BU.

No	Beban		Regangan		Lendutan (mm)	Retak	Keterangan
	Dial	Nilai (Kg)	ε_c	ε_s			
1	0	0	0	0	0		belum terjadi retak
2	2	221	-0,000001	0,000019	0,19		
3	4	358	-0,000011	0,000025	0,36		
4	6	495	-0,000029	0,000042	0,58		
5	8	633	-0,000037	0,000049	0,71		
6	10	770	-0,000050	0,000058	0,89		
7	12	907	-0,000063	0,000073	1,09		
8	14	1044	-0,000079	0,000094	1,38	1,5 divisi	retak pertama terjadi di daerah lentur
9	16	1181	-0,000096	0,000120	1,70		Retak melebar dan menyebar bukan hanya di daerah lentur akan tetapi juga ke daerah geser
10	18	1318	-0,000139	0,000403	2,14		
11	20	1455	-0,000174	0,000538	2,54		
12	22	1592	-0,000206	0,000650	2,95		
13	24	1729	-0,000227	0,000720	3,29		
14	26	1866	-0,000244	0,000788	3,60		
15	28	2004	-0,000266	0,000856	3,94		
16	30	2141	-0,000290	0,000940	4,32		
17	32	2278	-0,000311	0,001021	4,70		
18	34	2415	-0,000332	0,001088	5,04		
19	36	2552	-0,000359	0,001183	5,49		
20	38	2689	-0,000380	0,001262	5,89		
21	40	2826	-0,000406	0,001349	6,29		
22	42	2963	-0,000414	0,001411	6,58		
23	44	3100	-0,000446	0,001498	6,85		
24	46	3237	-0,000470	0,001582	7,26		
25	48	3374	-0,000489	0,001654	7,61		
26	50	3512	-0,000514	0,001743	7,98		
27	52	3649	-0,000543	0,001830	8,44		
28	53	3717	error	error	9,95	35 divisi	retak maksimum

Tabel 7. Beban, defleksi, dan regangan dari hasil pengujian balok BB I.

No	Beban		Regangan		Lendutan (mm)	Retak	Keterangan
	Dial	Nilai (Kg)	ε_c	ε_s			
1	0	0	0	0	0		Belum terjadi retak
2	2	221	-0,000014	0,000014	0,19		
3	4	358	-0,000022	0,000022	0,29		
4	6	495	-0,000037	0,000034	0,41		
5	8	633	-0,000054	0,000052	0,60		
6	10	770	-0,000060	0,000058	0,67		
7	12	907	-0,000076	0,000079	0,87		
8	14	1044	-0,000097	0,000128	1,05		
9	16	1181	-0,000120	0,000176	1,30	1 divisi	Retak pertama terjadi di daerah lentur
10	18	1318	-0,000160	0,000309	1,64		Retak melebar dan menyebar bukan hanya di daerah lentur akan tetapi juga ke daerah geser dan daerah sekitar lubang
11	20	1455	-0,000194	0,000406	1,98		
12	22	1592	-0,000220	0,000492	2,30		
13	24	1729	-0,000249	0,000586	2,69		
14	26	1866	-0,000277	0,000683	3,15		
15	28	2004	-0,000296	0,000752	3,44		
16	30	2141	-0,000317	0,000829	3,80		
17	32	2278	-0,000343	0,000914	4,17		
18	34	2415	-0,000369	0,001006	4,59		
19	36	2552	-0,000389	0,001080	4,92		
20	38	2689	-0,000409	0,001154	5,25		
21	40	2826	-0,000435	0,001248	5,69		
22	42	2963	-0,000456	0,001313	6,01		
23	44	3100	-0,000479	0,001394	6,39		
24	46	3237	-0,000498	0,001460	6,72		
25	48	3374	-0,000521	0,001544	7,10		
26	50	3512	-0,000546	0,001620	7,49		
27	52	3649	-0,000569	0,001698	7,87		
28	54	3786	-0,000588	0,001763	8,20		
29	56	3923	-0,000598	0,001768	9,00		
30	58	4060	-0,000620	0,001773	10,44	32 divisi	Retak maksimum

Tabel 8. Beban, defleksi, dan regangan dari hasil pengujian balok BB II.

No	Beban		Regangan		Lendutan (mm)	Retak	Keterangan
	Dial	Nilai (Kg)	ε_c	ε_s			
1	0	0	0	0	0		Belum terjadi retak
2	2	221	-0,000021	0,000022	0,27		
3	4	358	-0,000038	0,000035	0,41		
4	6	495	-0,000047	0,000043	0,51		
5	8	633	-0,000065	0,000062	0,68		
6	10	770	-0,000089	0,000103	0,92		
7	12	907	-0,000104	0,000136	1,10		
8	14	1044	-0,000161	0,000318	1,71	3 divisi	Retak Pertama di daerah lentur dan di daerah lubang
9	16	1181	-0,000197	0,000444	2,05		Retak melebar dan menyebar bukan hanya di daerah lentur dan lubang akan tetapi juga ke daerah geser
10	18	1318	-0,000239	0,000568	2,57		
11	20	1455	-0,000277	0,000665	3,10		
12	22	1592	-0,000307	0,000748	3,57		
13	24	1729	-0,000341	0,000850	4,20		
14	26	1866	-0,000371	0,000942	4,72		
15	28	2004	-0,000398	0,001018	5,18		
16	30	2141	-0,000435	0,001132	5,85		
17	32	2278	-0,000472	0,001248	6,52		
18	34	2415	-0,000505	0,001349	7,09		
19	36	2552	-0,000530	0,001424	7,48		
20	38	2689	-0,000576	0,001562	8,25		
21	40	2826	-0,000603	0,001628	8,66		
22	42	2963	-0,000625	0,001695	9,03		
23	44	3100	-0,000652	0,001782	9,48		
24	46	3237	-0,000673	0,001855	9,85		
25	48	3374	-0,000695	0,001955	10,23		
26	50	3512	-0,000727	0,002006	10,69		
27	52	3649	-0,001057	error	12,00	25 divisi	Retak maksimum

C. Analisis Hasil Pengujian

1. Beban Maksimum Pada Balok Beton Bertulang Berdasarkan Hasil Pengujian.

Berdasarkan hasil penelitian seperti terlihat pada Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8 balok beton bertulang tanpa lubang bukaan (BU) mampu menahan beban sebesar 3717Kg. Sedangkan pada balok berlubang dengan tulangan perkuatan (BB I) dan balok berlubang tanpa tulangan perkuatan (BB II) mampu menahan beban masing-masing sebesar 4060 Kg dan 3649 Kg. Dengan hasil ini dapat dikatakan bahwa terjadi peningkatan kekuatan sebesar 9,23 % untuk (BB I) dan terjadi penurunan kekuatan sebesar 1,83 % untuk (BB II) terhadap balok utuh (BU).

Data beban maksimum yang mampu dipikul setiap balok beton bertulang serta persentase peningkatan dan penurunan kekuatan balok berlubang dengan tulangan perkuatan dan tanpa tulangan perkuatan terhadap balok yang tidak diberi lubang dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Beban maksimum dan persentase peningkatan dan penurunan kapasitas balok beton bertulang.

Balok Beton Bertulang	Beban Maksimum Berdasarkan Penelitian (Kg)	Besar Peningkatan dan Penurunan Kapasitas Balok Terhadap BU Berdasarkan Penelitian (%)
BU	3717	-
BB I	4060	9,23
BB II	3649	-1,83

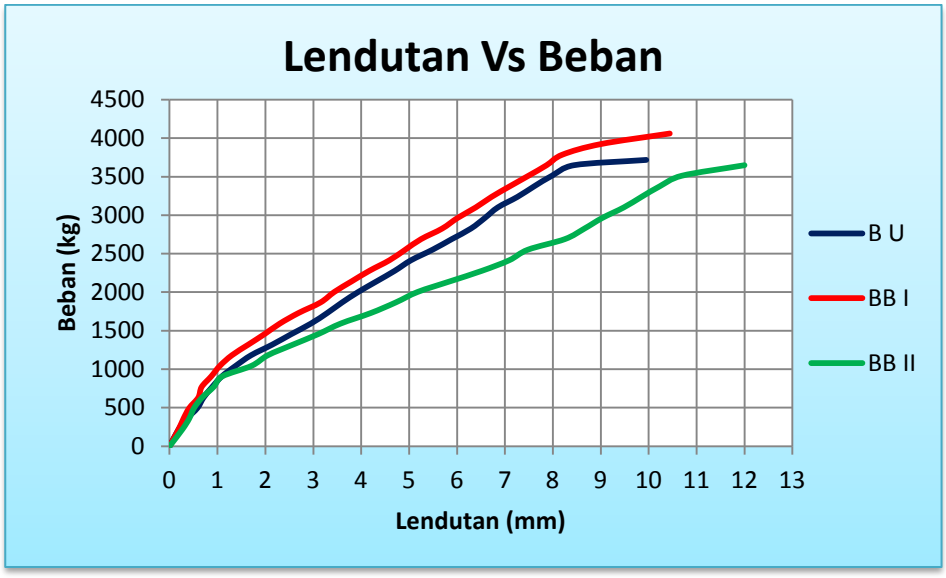
Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa kapasitas beban maksimum balok berlubang yang diberi tulangan perkuatan (BB I) dan balok berlubang tanpa tulangan perkuatan (BB II) tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan terhadap kapasitas beban balok utuh (BU). Dengan demikian

dapat dikatakan bahwa dengan adanya tulangan perkuatan dan tanpa adanya tulangan perkuatan di sekitar lubang pada bentang geser balok tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap nilai beban maksimum yang mampu ditahan oleh balok tersebut. Hal ini disebabkan karena momen paling besar pada ketiga balok tersebut terjadi di tengah bentang yaitu di antara beban terpusat dan pada bentang tersebut ketiga balok ini memiliki karakteristik penampang yang sama baik dari luas tulangan tarik maupun luas penampang betonnya sehingga ketiga balok tersebut memiliki kemampuan dalam menahan beban yang hampir sama.

2. Hubungan Beban dan Lendutan

Untuk mengetahui besarnya nilai lendutan/defleksi (Δ) digunakan alat *dial gauge,* yang diletakkan di tengah bentang. Pengukuran nilai lendutan dilakukan dengan mencatat perubahan nilai yang terdapat pada *dial gauge* setiap tahap pembebanan.

Dari hasil penelitian didapatkan bahwa lendutan maksimum balok BU sebesar 9,95 mm pada beban maksimum sebesar 3,717 Ton, lendutan maksimum balok BB I sebesar 10,44 mm pada beban maksimum sebesar 4,060 Ton dan lendutan maksimum balok BB II sebesar 12 mm pada beban maksimum sebesar 3,649 Ton. Grafik hubungan beban dan lendutan tengah bentang pada setiap balok dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Grafik hubungan antara beban dan lendutan tengah bentang

Dari grafik hubungan beban dan lendutan di atas menunjukkan bahwa tulangan perkuatan di sekitar lubang mampu meningkatkan nilai kekakuan dari balok walaupun tidak signifikan. Hal ini dapat dilihat dari grafik di atas, bahwa lendutan yang terjadi pada balok BB I lebih kecil dibandingkan dengan lendutan pada balok BU pada tingkat pembebanan yang sama.

Pada balok berlubang tanpa tulangan perkuatan (BB II) nilai kekakuannya menurun dibandingkan dengan nilai kekakuan BU. Hal ini disebabkan karena pada BB II terjadi pengurangan luas penampang beton oleh adanya lubang yang mengakibatkan nilai momen inersia (*I*) di daerah sekitar lubang pada BB II menurun. Besarnya lendutan pada balok berbanding terbalik dengan besarnya modulus elastisitas (*E*) dan momen inersia (*I*) balok itu sendiri. Pada penelitian ini BB II memiliki nilai *E* yang sama dengan nilai *E* pada BU, akan tetapi nilai *I* pada BB II lebih kecil

dibandingkan dengan nilai *I* pada BU sehingga menjadikan BB II mengalami defleksi yang lebih besar dibandingkan BU.

Dari grafik juga terlihat bahwa lendutan pada BB II lebih besar dari pada lendutan pada BB I walaupun kedua balok tersebut memiliki lubang dan momen inersia (*I*) yang sama. Hal ini terjadi karena pada BB I terdapat tulangan tambahan di atas dan di bawah lubang yang menjadikan nilai modulus elastisitas (*E*) pada BB I lebih besar dari pada nilai *E* pada BB II sehingga menjadikan BB I lebih kaku dibandingkan dengan BB II.

3. Hubungan Momen dan Kurvatur.

Momen adalah gaya dikali dengan jarak, dan momen yang diambil adalah momen maksimum yang berada di tengah bentang yaitu $M = 1/6\ P.L$. Sedangkan kurvatur (φ) adalah kelengkungan yang didapat dari hasil pembagian regangan pada serat atas beton dengan jarak serat tekan terluar ke garis netral seperti pada Persamaan (26).

Salah satu parameter untuk mengetahui kedaktilan suatu elemen struktur yaitu berdasarkan nilai kurvatur. Balok beton bertulang yang daktil adalah balok beton bertulang yang mampu mempertahankan momen yang terjadi pada saat tulangan baja mengalami leleh. Semakin besar nilai kurvatur pada suatu balok, maka kedaktilan balok tersebut semakin tinggi.

Hasil dari perhitungan momen dan kurvatur dapat dilihat pada Tabel 10, Tabel 11 dan Tabel 12. Sedangkan grafik hubungan momen dan kurvatur dapat dilihat pada Gambar 20 (hal 65).

Tabel 10. Beban, momen dan kurvatur balok BU.

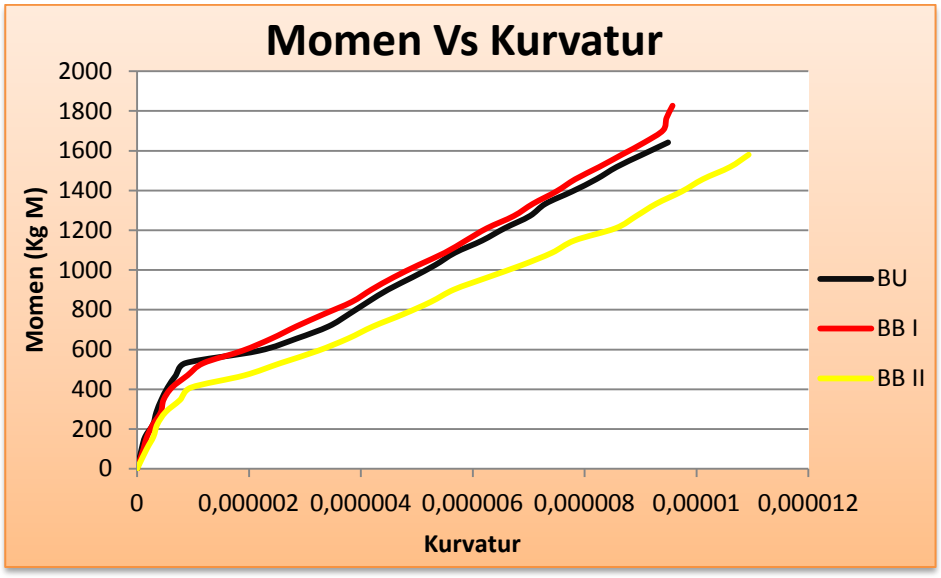
NO	Beban Proving Ring	Beban (kg)	Momen (kg m)	ε_c	ε_s	c	Kurvatur (ø)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	221	99,57	-0,000001	0,000019	12,50	-8,000E-08
3	4	358	161,26	-0,000011	0,000025	76,39	-1,440E-07
4	6	495	222,95	-0,000029	0,000042	102,11	-2,840E-07
5	8	633	284,65	-0,000037	0,000049	107,56	-3,440E-07
6	10	770	346,34	-0,000050	0,000058	115,74	-4,320E-07
7	12	907	408,03	-0,000063	0,000073	115,81	-5,440E-07
8	14	1044	469,73	-0,000079	0,000094	114,16	-6,920E-07
9	16	1181	531,42	-0,000096	0,000120	111,11	-8,640E-07
10	18	1318	593,11	-0,000139	0,000403	64,11	-2,168E-06
11	20	1455	654,81	-0,000174	0,000538	61,10	-2,848E-06
12	22	1592	716,50	-0,000206	0,000650	60,16	-3,424E-06
13	24	1729	778,19	-0,000227	0,000720	59,93	-3,788E-06
14	26	1866	839,89	-0,000244	0,000788	59,11	-4,128E-06
15	28	2004	901,58	-0,000266	0,000856	59,27	-4,488E-06
16	30	2141	963,27	-0,000290	0,000940	58,94	-4,920E-06
17	32	2278	1024,97	-0,000311	0,001021	58,37	-5,328E-06
18	34	2415	1086,66	-0,000332	0,001088	58,45	-5,680E-06
19	36	2552	1148,35	-0,000359	0,001183	58,20	-6,168E-06
20	38	2689	1210,05	-0,000380	0,001262	57,86	-6,568E-06
21	40	2826	1271,74	-0,000406	0,001349	57,83	-7,020E-06
22	42	2963	1333,43	-0,000414	0,001411	56,71	-7,300E-06
23	44	3100	1395,13	-0,000446	0,001498	57,36	-7,776E-06
24	46	3237	1456,82	-0,000470	0,001582	57,26	-8,208E-06
25	48	3374	1518,51	-0,000489	0,001654	57,05	-8,572E-06
26	50	3512	1580,21	-0,000514	0,001743	56,93	-9,028E-06
27	52	3649	1641,90	-0,000543	0,001830	57,21	-9,492E-06
28	53	3717	1672,74	error	error		

Tabel 11. Beban, Momen dan Kurvatur Balok BB I.

No	Beban proving ring	Beban (kg)	Momen (kgm)	ε_c	ε_s	c (mm)	Kurvatur (ø)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	221	99,57	-0,000014	0,000014	125,00	-1,120E-07
3	4	358	161,26	-0,000022	0,000022	125,00	-1,760E-07
4	6	495	222,95	-0,000037	0,000034	130,28	-2,840E-07
5	8	633	284,65	-0,000054	0,000052	127,36	-4,240E-07
6	10	770	346,34	-0,000060	0,000058	127,12	-4,720E-07
7	12	907	408,03	-0,000076	0,000079	122,58	-6,200E-07
8	14	1044	469,73	-0,000097	0,000128	107,78	-9,000E-07
9	16	1181	531,42	-0,000120	0,000176	101,35	-1,184E-06
10	18	1318	593,11	-0,000160	0,000309	85,29	-1,876E-06
11	20	1455	654,81	-0,000194	0,000406	80,83	-2,400E-06
12	22	1592	716,50	-0,000220	0,000492	77,25	-2,848E-06
13	24	1729	778,19	-0,000249	0,000586	74,55	-3,340E-06
14	26	1866	839,89	-0,000277	0,000683	72,14	-3,840E-06
15	28	2004	901,58	-0,000296	0,000752	70,61	-4,192E-06
16	30	2141	963,27	-0,000317	0,000829	69,15	-4,584E-06
17	32	2278	1024,97	-0,000343	0,000914	68,22	-5,028E-06
18	34	2415	1086,66	-0,000369	0,001006	67,09	-5,500E-06
19	36	2552	1148,35	-0,000389	0,001080	66,20	-5,876E-06
20	38	2689	1210,05	-0,000409	0,001154	65,42	-6,252E-06
21	40	2826	1271,74	-0,000435	0,001248	64,62	-6,732E-06
22	42	2963	1333,43	-0,000456	0,001313	64,44	-7,076E-06
23	44	3100	1395,13	-0,000479	0,001394	63,93	-7,492E-06
24	46	3237	1456,82	-0,000498	0,001460	63,59	-7,832E-06
25	48	3374	1518,51	-0,000521	0,001544	63,08	-8,260E-06
26	50	3512	1580,21	-0,000546	0,001620	63,02	-8,664E-06
27	52	3649	1641,90	-0,000569	0,001698	62,75	-9,068E-06
28	54	3786	1703,59	-0,000588	0,001763	62,53	-9,404E-06
29	56	3923	1765,28	-0,000598	0,001768	63,19	-9,464E-06
30	58	4060	1826,98	-0,000620	0,001773	64,77	-9,572E-06

Tabel 12. Beban, momen dan kurvatur balok BB II.

No	Beban Proving Ring	Beban (kg)	Momen (kg m)	ε_c	ε_s	c (mm)	Kurvatur (ø)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	2	221	99,57	-0,000021	0,000022	122,09	-1,720E-07
3	4	358	161,26	-0,000038	0,000035	130,14	-2,920E-07
4	6	495	222,95	-0,000047	0,000043	130,56	-3,600E-07
5	8	633	284,65	-0,000065	0,000062	127,95	-5,080E-07
6	10	770	346,34	-0,000089	0,000103	115,89	-7,680E-07
7	12	907	408,03	-0,000104	0,000136	108,33	-9,600E-07
8	14	1044	469,73	-0,000161	0,000318	84,03	-1,916E-06
9	16	1181	531,42	-0,000197	0,000444	76,83	-2,564E-06
10	18	1318	593,11	-0,000239	0,000568	74,04	-3,228E-06
11	20	1455	654,81	-0,000277	0,000665	73,51	-3,768E-06
12	22	1592	716,50	-0,000307	0,000748	72,75	-4,220E-06
13	24	1729	778,19	-0,000341	0,000850	71,58	-4,764E-06
14	26	1866	839,89	-0,000371	0,000942	70,64	-5,252E-06
15	28	2004	901,58	-0,000398	0,001018	70,27	-5,664E-06
16	30	2141	963,27	-0,000435	0,001132	69,40	-6,268E-06
17	32	2278	1024,97	-0,000472	0,001248	68,60	-6,880E-06
18	34	2415	1086,66	-0,000505	0,001349	68,10	-7,416E-06
19	36	2552	1148,35	-0,000530	0,001424	67,81	-7,816E-06
20	38	2689	1210,05	-0,000576	0,001562	67,35	-8,552E-06
21	40	2826	1271,74	-0,000603	0,001628	67,57	-8,924E-06
22	42	2963	1333,43	-0,000625	0,001695	67,35	-9,280E-06
23	44	3100	1395,13	-0,000652	0,001782	66,97	-9,736E-06
24	46	3237	1456,82	-0,000673	0,001855	66,55	-1,011E-05
25	48	3374	1518,51	-0,000695	0,001955	65,57	-1,060E-05
26	50	3512	1580,21	-0,000727	0,002006	66,50	-1,093E-05
27	52	3649	1641,90	-0,001057	error		



Gambar 20. Grafik hubungan antara momen dan kurvatur.

Dari grafik hubungan antara momen dan kurvatur seperti terlihat pada Gambar 20 di atas, menunjukkan bahwa balok BU mencapai momen maksimum sebesar 1641,9 kg-m saat kurvatur sebesar 9,49E-06, balok BB I mencapai momen maksimum sebesar 1826,98 Kg-m pada saat kurvatur sebesar 9,57E-06 dan balok BB II mencapai momen maksimum sebesar 1580,21 kg-m pada saat kurvatur sebesar 1,09E-05.

Selain itu dari grafik di atas terlihat bahwa dengan tingkat beban dan momen yang sama, BB I memiliki nilai kurvatur yang paling kecil bila dibandingkan dengan BU dan BB II, sedangkan BB II mempunyai nilai kurvatur terbesar dari ketiga balok tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa dengan adanya tulangan di atas dan di bawah lubang pada BB I menjadikan kekakuan BB I lebih besar dibandingkan BU dan BB II sehingga kurvatur pada BB I lebih kecil dibandingkan BU dan BB II pada tingkat pembebanan yang sama. Pada BB II tidak terdapat tulangan tambahan di sekitar lubang sehingga kekakuan balok BB II lebih kecil

dibandingkan kekakuan BB I. Selain itu, lendutan dan regangan yang terjadi pada BB II juga lebih besar dibandingkan BU dan BB I. Hal inilah yang mengakibatkan bahwa nilai kurvatur BB II lebih besar dibandingkan nilai kurvatur BU dan BB I.

4. Pengamatan Terhadap Lebar Retak serta Pola Retak.

Pengamatan retak dilakukan selama pengujian berlangsung yang bertujuan untuk mengetahui pola retak dan perkembangannya setiap tahapan pembebanan. Cara yang dilakukan dalam mengamati pola retak yaitu dengan mengukur lebarnya retak serta membuat gambar/sketsa pada benda uji tersebut. Pola retak pada balok BU, BB I dan BB II dapat dilihat pada Gambar 21, Gambar 22 dan Gambar 23 (hal 68).

Dari gambar tersebut dan dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa balok tanpa lubang (BU) mengalami retak pertama di daerah lentur pada saat beban *P* sebesar 1044 Kg dengan lebar retak 1,5’ (0,03 mm), kemudian balok tersebut hancur pada beban maksimum P_{maks} sebesar 3766 Kg dengan lebar retak 35’ (0,7 mm).

Pada balok berlubang dengan perkuatan (BB I), balok mengalami retak pertama di daerah lentur pada saat beban *P* sebesar 1181 Kg dengan lebar retak 1’ (0,02 mm), kemudian balok hancur dengan ditandai lebar retak sebesar 32’ (0,64 mm) pada beban maksimum P_{maks} sebesar 4060 Kg.

Untuk balok berlubang tanpa tulangan perkuatan (BB II) retak pertama tidak hanya terjadi di daerah lentur, akan tetapi juga terjadi di daerah

lubang pada saat balok dibebani dengan beban *P* sebesar 1044 Kg dengan lebar retak 3’ (0,06 mm) dan balok mengalami retak sebesar 25’ (0,5 mm) pada beban maksimum P_{maks} sebesar 3649 Kg yang menyebabkan balok hancur.

Secara umum retak terjadi pada daerah tengah bentang dan di sekitar lubang. Retak ini diawali di daerah tengah bentang dan kemudian retak bertambah dari tengah bentang hingga mendekati tumpuan. Retak yang terjadi juga semakin panjang dan lebar. Akan tetapi pada BB II, retak pertama tidak hanya di daerah tengah bentang, akan tetapi retak pertama juga terjadi di sudut lubang.

Dari gambar pola retak yaitu pada Gambar 21, gambar 22 dan Gambar 23 dapat dikatakan bahwa pola retak yang terjadi pada BB I dan BB II hampir sama dengan pola retak pada balok BU, hanya saja terdapat tambahan retak di sekitar lubang pada BB I dan BB II. Selain itu, dari gambar pola retak tersebut terlihat bahwa retak yang terjadi di sekitar lubang pada BB I dan BB II memiliki kesamaan, hanya saja retak pada sudut lubang BB II lebih panjang dan lebar dibandingkan dengan retak di sudut lubang pada BB I. Hal ini disebabkan karena pada BB I terdapat tulangan perkuatan di sekitar lubang yang mampu menahan tegangan tarik yang terjadi di sekitar lubang agar retak di sekitar lubang tidak memanjang dan melebar, sedangkan pada BB II tidak ada tulangan perkuatan di sekitar lubang sehingga retak dapat lebih panjang.

D. Hasil Perhitungan Secara Teoritis

Perhitungan secara teoritis dalam penelitian ini meliputi perhitungan besarnya beban saat balok mengalami retak pertama (P_{cr}) dan besarnya beban ultimit atau beban maksimum (P_{maks}) yang mampu ditahan oleh balok. Perhitungan ini menggunakan SNI-2874-2002.

1. Perhitungan Beban Retak (P_{cr})

Persamaan (2) pada tinjauan pustaka dapat menjadi persamaan dasar untuk menentukan persamaan dalam mencari nilai P_{cr} pada masing-masing balok dengan cara menjabarkan nilai variabel Persamaan (2) tersebut.

$$f_{ct} = \frac{M.c}{I}$$

Dengan pembebanan secara *third - point loading* pada balok beton dengan tumpuan sederhana dan besarnya beban masing-masing adalah ½ P, maka besarnya momen maksimum adalah :

$$M = \frac{1}{6}\,P.L$$

tinggi garis netral ke serat atas untuk penampang balok adalah :

$$c = \frac{h}{2}$$

besarnya momen inersia untuk balok persegi adalah :

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

maka besarnya f_{ct} adalah :

$$f_{ct} = \frac{P.L}{b.h^2}$$

Dari persamaan f_{ct} sebelumnya, maka dapat ditentukan nilai P_{cr} yaitu :

$$P_{cr} = \frac{f_{ct}.b.h^2}{L}$$

a. P_{cr} pada balok BU

Diketahui : f_{ct} hasil pengujian = 3,82 MPa

Lebar balok (b) = 150 mm

Tinggi balok (h) = 270 mm

Panjang bentang (L) = 2700 mm

$$P_{cr} = \frac{f_{ct}.b.h^2}{L}$$

$$P_{cr} = \frac{3{,}82\ .150\ .270^2}{2700}$$

$$P_{cr} = 15470\ N$$

$$P_{cr} = 1547\ kg$$

b. P_{cr} balok BB I

Diketahui : f_{ct} hasil pengujian = 2,91 MPa

Lebar balok (b) = 150 mm

Tinggi balok (h) = 270 mm

Panjang bentang (L) = 2700 mm

$$P_{cr} = \frac{f_{ct}.b.h^2}{L}$$

$$P_{cr} = \frac{2{,}91\ .150\ .270^2}{2700}$$

$$P_{cr} = 11780\ N$$

$$P_{cr} = 1178\ kg$$

c. P_{cr} Balok BB II

Diketahui : f_{ct} hasil pengujian = 3,72 MPa

Lebar balok (b) = 150 mm

Tinggi balok (h) = 270 mm

Panjang bentang (L) = 2700 mm

$$P_{cr} = \frac{f_{ct} . b . h^2}{L}$$

$$P_{cr} = \frac{3{,}72 \,.150 \,.270^2}{2700}$$

$$P_{cr} = 15060 \; N$$

$$P_{cr} = 1506 \; kg$$

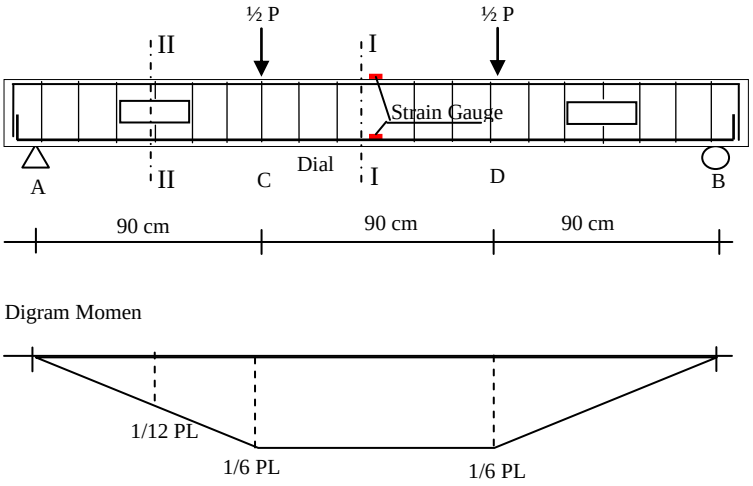
Hasil perhitungan P_{cr} dan f_{ct} dari ketiga sampel dapat dilihat pada Tabel 13 berikut.

Tabel 13. Hasil perhitungan P_{cr} teoritis

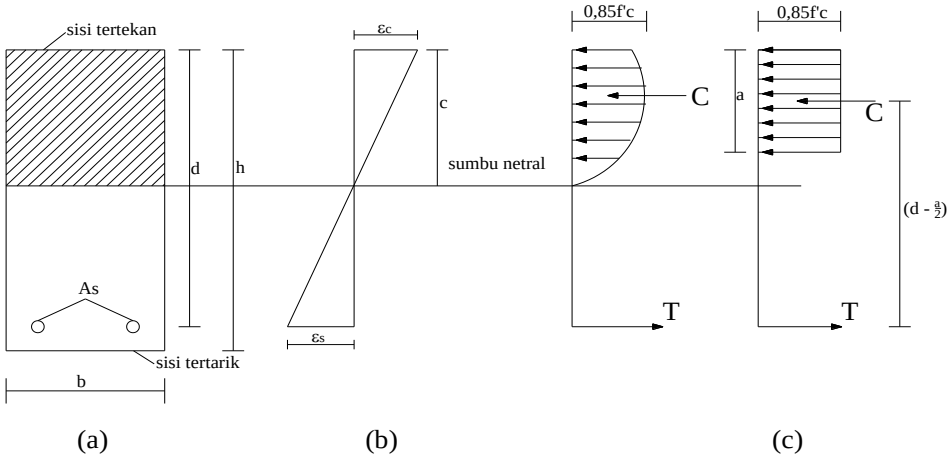
Benda Uji	P_{cr} (kg)	f_{ct} (MPa)
BU	1547	3.82
BB I	1178	2.91
BB II	1506	3.72

2. Perhitungan Beban Maksimum (P_{maks})

Besarnya P_{maks} teoritis diperoleh dengan persamaan keseimbangan gaya dan dari gambar diagram momen pengujian balok pada penelitian ini. Gambar pembebanan balok, diagram momen serta keseimbangan gaya dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 24. Perletakan balok serta diagram momen akibat beban terpusat.



Gambar 25. Distribusi tegangan dan regangan pada penampang balok : (a) penampang melintang; (b) regangan; (c) blok regangan ekuivalen yang diasumsikan.

Dari Gambar 25 di atas dan dari Persamaan (7), maka persamaan keseimbangan gaya pada balok adalah :

$$C = T$$

$$0{,}85\, f'c \,.\, b \,.\, a = A_s \,.\, f_y$$

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (a) :

$$a = \frac{A_s . f_y}{0{,}85\, f'_c . b}$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah

$$M_{maks} = T\ \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

dari diagram momen pada Gambar 24, maka P_{maks} dapat di tentukan dari:

$$M_{maks} = \frac{1}{6}\ P.L$$

$$P_{maks} = \frac{6\ M_{maks}}{L}$$

a. P_{maks} Pada Balok BU

P_{maks} pada balok BU dapat dicari hanya dengan meninjau keseimbangan gaya di potongan I pada Gambar 24.

Diketahui : f'_c pengujian = 23,3 MPa

f_y tulangan tarik = 350 MPa

lebar balok (b) = 150 mm

tinggi efektif (d) = 250 mm

A_s tulangan (2 D12,8) = $2\ .\ (\frac{1}{4}\ \pi\ 12{,}8^2\ )$ = 257,46 mm^2

Panjang bentang (L) = 2700 mm

Persamaan keseimbangan :

$$C = T$$

$$0{,}85\ f'c\ .\ b\ .\ a = A_s\ .\ f_y$$

$$0{,}85\ .\ 23{,}3\ .\ 150a = 257{,}46\ .\ 350$$

$$0{,}85\ .\ 23{,}3\ .\ 150a = 90112\ N$$

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (a) :

$$a = \frac{A_s.\ f_y}{0{,}85\ f'_c.\ b}$$

$$a = \frac{257{,}46 \,.\, 350}{0{,}85 \,.\, 23{,}3 \,.\, 150}$$

$$a = 30{,}33 \; mm$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = T \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 90112 \left(250 - \frac{30{,}33}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 21160502{,}5 \text{ Nmm}$$

besarnya beban maksimum (P_{maks}) adalah :

$$P_{maks} = \frac{6 \; M_{maks}}{L}$$

$$P_{maks} = \frac{6 \,.\, 21160502{,}5}{2700}$$

$$P_{maks} = 47023{,}3 \; N$$

$$P_{maks} = 4702{,}33 \; kg$$

b. P_{maks} Pada Balok BB I

P_{maks} pada balok BB I dapat dicari dengan meninjau keseimbangan gaya di potongan I dan potongan II pada Gambar 24.

Diketahui : f'_c pengujian = 21,9 MPa

f_y tulangan tarik = 350 MPa

lebar balok (b) = 150 mm

tinggi efektif (d) = 250 mm

A_s tulangan (2 D12,8) = $2 \,.\, (\frac{1}{4}\, \pi\, 12{,}8^2)$ = 257,46 mm^2

Panjang bentang (L) = 2700 mm

Persamaan keseimbangan pada potongan I :

$$C = T$$

$$0{,}85\, f'c \,.\, b \,.\, a = A_s \,.\, f_y$$

$$0{,}85 \,.\, 21{,}9 \,.\, 150a = 257{,}46 \,.\, 350$$

$$0{,}85 \,.\, 21{,}9 \,.\, 150a = 90112\ N$$

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (a) :

$$a = \frac{A_s . f_y}{0{,}85\, f'_c . b}$$

$$a = \frac{257{,}46 \,.\, 350}{0{,}85 \,.\, 21{,}9 \,.\, 150}$$

$$a = 32{,}31\ mm$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = T\ \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 90112\ \left(250 - \frac{32{,}31}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 21072086{,}7 \text{ Nmm}$$

besarnya beban maksimum (P_{maks}) adalah :

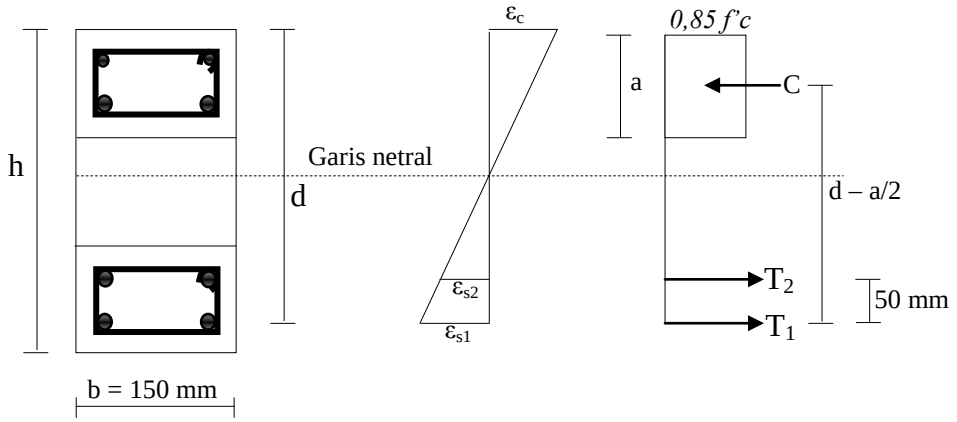
$$P_{maks} = \frac{6\ M_{maks}}{L}$$

$$P_{maks} = \frac{6\ .\ 21072086{,}7}{2700}$$

$$P_{maks} = 46826{,}9\ N$$

$$P_{maks} = 4682{,}69\ kg$$

Persamaan keseimbangan pada potongan II :



Gambar 26. Distribusi tegangan dan regangan di daerah lubang pada balok BB I

Pada potongan ini terdapat 2 tulangan perkuatan di bawah lubang sebanyak 2 D11,2 mm, sehingga luas tulangan (A_{s2}=197,12 mm^2) dan mutu baja (f_{y2}=240 MPa), sehingga persamaan keseimbangan gaya :

$$C = T_1 + T_2$$

$$0{,}85\, f'c \,.\, b \,.\, a = A_{s1} \,.\, f_{y1} + A_{s2} \,.\, f_{y2}$$

$$0{,}85 \,.\, 21{,}9 \,.\, 150a = 257{,}46 \,.\, 350 + 197{,}12 \,.\, 240$$

$$0{,}85 \,.\, 21{,}9 \,.\, 150a = 137420{,}8\ N$$

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (a) :

$$a = \frac{A_{s1}.f_{y1} + A_{s2}.f_{y2}}{0{,}85\, f'_c.b}$$

$$a = \frac{257{,}46\,.\,350 + 197{,}12\,.\,240}{0{,}85\,.\,21{,}9\,.\,150}$$

$$a = 49{,}22\ mm$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = T_1\left(d - \frac{a}{2}\right) + T_2\left(d - \frac{a}{2} - 50\right)$$

$$M_{maks} = 90112\left(250 - \frac{49{,}22}{2}\right) + 47309\left(250 - \frac{49{,}22}{2} - 50\right)$$

M_{maks} = 20310565,5 Nmm + 8297606,9 Nmm

M_{maks} = 28608172,34 Nmm

besarnya beban maksimum (P_{maks}) pada potongan II adalah :

$$M_{maks} = \frac{1}{12}\,P.L$$

$$P_{maks} = \frac{12\,M_{maks}}{L}$$

$$P_{maks} = \frac{12\,.\,28608172{,}34}{2700}$$

$$P_{maks} = 127147{,}4\ N$$

$$P_{maks} = 12714{,}74\ kg$$

Dari kedua nilai P_{maks} yang didapat, maka P_{maks} pada penampang tengah bentang atau pada potongan I adalah P_{maks} kritis pada BB I, yaitu sebesar 4682,69 kg.

c. P_{maks} Pada Balok BB II

P_{maks} pada balok BB II dapat dicari dengan meninjau keseimbangan gaya di potongan I dan potongan II pada Gambar 24.

Diketahui : f'_c pengujian = 22,7 MPa

f_y tulangan tarik = 350 MPa

lebar balok (b) = 150 mm

tinggi efektif (d) = 250 mm

A_s tulangan (2 Ø12,8) = $2\,.\,(\frac{1}{4}\,\pi\,12{,}8^2)$ = 257,46 mm^2

Panjang bentang (L) = 2700 mm

Persamaan keseimbangan pada potongan I :

$$C = T$$

$$0{,}85\, f'c \,.\, b \,.\, a = As \,.\, fy$$

$$0{,}85 \,.\, 22{,}7 \,.\, 150a = 257{,}46 \,.\, 350$$

$$0{,}85 \,.\, 22{,}7 \,.\, 150a = 90112\ N$$

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (a) :

$$a = \frac{A_s . f_y}{0{,}85\, f'_c . b}$$

$$a = \frac{257{,}46 \,.\, 350}{0{,}85 \,.\, 22{,}7 \,.\, 150}$$

$$a = 31{,}11\ mm$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = T\ \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 92950\ \left(250 - \frac{30{,}33}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 21126456{,}9 \text{ Nmm}$$

besarnya beban maksimum (P_{maks}) adalah :

$$P_{maks} = \frac{6\ M_{maks}}{L}$$

$$P_{maks} = \frac{6\ .\ 21126456{,}9}{2700}$$

$$P_{maks} = 46947{,}7\ N$$

$$P_{maks} = 4694{,}77\ kg$$

Persamaan keseimbangan pada potongan II :

$$C = T$$

$$0{,}85\, f'c \,.\, b \,.\, a = As \,.\, fy$$

0,85 . 22,7 . 150a = 257,46 . 350

0,85 . 22,7 . 150a = 90112 N

tinggi blok tegangan persegi ekivalen (*a*) :

$$a = \frac{A_s . f_y}{0{,}85\, f'_c . b}$$

$$a = \frac{257{,}46\,.\,350}{0{,}85\,.\,22{,}7\,.\,150}$$

$$a = 31{,}11\ mm$$

besarnya momen maksimum (M_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = T\ \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 92950\ \left(250 - \frac{30{,}33}{2}\right)$$

$$M_{maks} = 21126456{,}9 \text{ Nmm}$$

besarnya beban maksimum (P_{maks}) adalah :

$$M_{maks} = \frac{1}{12}\ P . L$$

$$P_{maks} = \frac{12\ M_{maks}}{L}$$

$$P_{maks} = \frac{12\,.\ 21126456{,}9}{2700}$$

$$P_{maks} = 93895{,}4\ N$$

$$P_{maks} = 9389{,}54\ kg$$

Dari kedua nilai P_{maks} yang didapat, maka P_{maks} pada penampang tengah bentang atau pada potongan I adalah P_{maks} kritis pada BB II, yaitu sebesar 4694,77 kg.

Hasil perhitungan P_{maks} dan M_{maks} dari ketiga sampel dapat dilihat pada Tabel 14 berikut.

Tabel 14. Hasil perhitungan P_{maks} dan M_{maks} teoritis

Benda Uji	P_{maks} (kg)	M_{maks} (kg m)
BU	4702.33	2116.05
BB I	4682.69	2107.21
BB II	4694.77	2112.65

E. Analisis Data

Dari data-data yang diperoleh dari penelitian dan perhitungan teoritis didapat hasil yang berbeda. Analisis data pada subbab ini yaitu perbandingan antara hasil pengujian di laboratorium dengan hasil perhitungan teoritis.

1. Analisis Data Nilai P_{cr} Pengujian dengan P_{cr} Teoritis.

Data hasil pengujian laboratorium dan hasil perhitungan teoritis ditampilkan dalam Tabel 15. Dari Tabel 15 tersebut terlihat bahwa untuk balok tanpa lubang (BU) dan balok dengan lubang tanpa tulangan perkuatan (BB II) hasil teoritis lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian. Pada hasil perhitungan teoritis, nilai P_{cr} untuk BU dan BB II masing-masing adalah sebesar 1547 kg dan 1506 kg dan hasil P_{cr} pengujian BU dan BB II masing-masing sebesar 1044 kg. Hal ini dapat disebabkan karena pada perhitungan teoritis, besarnya P_{cr} berbanding lurus dengan nilai f_{ct} beton dan hanya nilai f_{ct} yang berpengaruh terhadap nilai P_{cr} teoritis. Sedangkan pada hasil pengujian, besarnya P_{cr} tidak hanya dipengaruhi besarnya f_{ct} beton saja, tetapi ada pengaruh lain seperti

pembebanan awal yang tidak terekam datanya oleh *proving ring*, selain itu penentuan besarnya beban oleh *proving ring* tidak bisa dilakukan dengan tepat karena dilakukan secara manual.

Pada balok berlubang dengan tulangan perkuatan (BB I), besarnya P_{cr} hasil teoritis hampir sama dibandingkan dengan P_{cr} hasil pengujian dan tidak memiliki perbedaan yang signifikan, yaitu sebesar 1181 kg untuk hasil pengujian dan 1178 kg untuk hasil perhitungan teoritis.

2. Analisis Data Nilai P_{maks} Pengujian dengan P_{maks} Teoritis

Data hasil pengujian laboratorium dan hasil perhitungan teoritis ditampilkan dalam Tabel 16. Dari Tabel 16 tersebut terlihat bahwa nilai yang didapat dari hasil pengujian lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan teoritis. Besarnya nilai P_{maks} untuk BU, BB I dan BB II berdasarkan hasil pengujian masing-masing adalah 3717 kg, 4060 kg dan 3649 kg. Sedangkan besarnya nilai P_{maks} hasil perhitungan teoritis untuk BU, BB I dan BB II masing-masing adalah 4702 kg, 4683 kg dan 4695 kg. Perbedaan ini dapat dikarenakan tidak dilakukan pengujian kuat tarik baja, akan tetapi hanya melihat angka yang terdapat pada tulangan baja untuk menentukan besarnya tegangan lelehnya yaitu 350 Mpa. Oleh sebab itu baja yang dipakai untuk tulangan tarik tidak diketahui persis berapa tegangan lelehnya, sedangkan pada perhitungan teoritis mutu baja yang digunakan adalah 350 Mpa. Selain itu luas penampang tulangan tarik baja mengalami pengurangan pada daerah kritisnya akibat dari pemasangan *strain gauge*, sedangkan pada perhitungan teoritis hal ini diabaikan dan

luas penampang tulangan tidak mengalami pengurangan. Faktor lain yang juga menyebabkan hasil perhitungan teoritis lebih besar dari hasil pengujian adalah pada pelaksanaan pengujian yaitu sebelum perekaman data dilakukan, ketiga sampel balok tersebut sudah mengalami pembebanan awal yang tidak terekam oleh *proving ring*.

Tabel 15. Perbandingan data antara hasil pengujian dengan hasil teoritis berdasarkan nilai P_{cr}

Benda Uji	***P_{cr} teoritis (kg)***	***P_{cr} pengujian (kg)***	***f_{ct} teoritis (MPa)***	***f_{ct} pengujian (MPa)***
BU	1547	1044	3,38	3,82
BB I	1178	1181	3,26	2,91
BB II	1506	1044	3,34	3,72

Tabel 16. Perbandingan data antara hasil pengujian dengan hasil teoritis berdasarkan nilai P_{maks}.

Benda Uji	***P_{maks} teoritis (kg)***	***M_{maks} teoritis (kg m)***	***P_{maks} pengujian (kg)***	***M_{maks} pengujian (kg m)***
BU	4702	2116	3717	1673
BB I	4683	2107	4060	1827
BB II	4695	2113	3649	1642