

**FLEXURAL CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH
CIRCULAR OPENINGS AND REINFORCEMENT DETAILING IN TENSION ZONES**

**Ghalib Setyo Budi¹, Mohamad Galuh Khomari², Dadang Dwi Pronowo³,
M. Shofi'ul Amin⁴, Eva Olivia Hutasoit⁵**

^{1,2,3,4,5} Department of Civil Engineering, Politeknik Negeri Banyuwangi, Banyuwangi, Indonesia,
Jl. Raya Jember Km 13, Banyuwangi, 68461
Email address: mohamadgaluh@poliwangi.ac.id

ABSTRAK

Pada gedung bertingkat pipa-pipa air, pembuangan kotoran, instalasi AC, listrik, telepon, dan jaringan computer ditempatkan dibawah balok yang mengakibatkan mengurangi tinggi efektif elevasi plafond. Salah satu alternative rencana untuk melewati instalasi perpipaan di atas dengan membuat bukaan pada balok. bukaan diberi detailing perkuatan di daerah tarik tujuannya menambah kekuatan pada balok. Pengujian yang dilakukan pada lentur balok dengan tumpuan sederhana. Balok beton sebagai benda uji lentur berukuran (10 x 15 x 100) cm. Pada variasi penelitian jumlah bukaan dan penempatan bukaan di daerah tarik dengan nama balok bukaan 1 di daerah tekan (BBTE1), balok bukaan 2 di daerah tekan (BBTE2), balok bukaan 1 di daerah tarik (BBTA1), balok bukaan 2 di daerah tarik (BBTA2) dan balok tanpa bukaan (BN). Hasil menunjukkan kapasitas balok mengalami peningkatan akibat adanya bukaan di daerah tarik. Dalam presentase, jika dibandingkan dengan balok kontrol, peningkatan kapasitas lentur untuk BBTE1 sebesar 13%, untuk BBTE2 sebesar 4.425%, untuk balok BBTA1 sebesar 6.667%, dan untuk balok BBTA2 sebesar 5.607%.

Kata Kunci: Bukaan Lingkaran, Daerah Tekan dan Daerah Tarik, *Detailing* Perkuatan, Kapasitas Lentur

ABSTRACT

In multi-story buildings, water pipes, sewage systems, AC installations, electrical wiring, telephone lines, and computer networks are placed below the beams, which reduces the effective elevation height of the ceiling. One alternative plan to route the plumbing installations above the beams is by creating openings in the beams. These openings are detailed with reinforcements in the tension region to increase the strength of the beams. The testing conducted focused on the flexural behavior of the beams with simple supports. The test specimens were concrete beams measuring (10 x 15 x 100) cm. The research involved variations in the number and placement of openings in the tension region, referred to as: Beam with one opening in the compression region (BBTE1), beam with two openings in the compression region (BBTE2), beam with one opening in the tension region (BBTA1), beam with two openings in the tension region (BBTA2), and beam without openings (BN). The results showed that the beam capacity increased due to the presence of openings in the tension region. In percentage terms, when compared to the control beam, the increase in flexural capacity for BBTE1 was 13%, for BBTE2 was 4.425%, for BBTA1 was 6.667%, and for BBTA2 was 5.607%.

Keywords: *Bending Capacity, Circular Holes, Reinforcement Detailing, Tensile Area*

PENDAHULUAN

Dalam konstruksi bangunan – bangunan modern, instalasi perpipaan dibutuhkan untuk mengakomodasi kebutuhan mekanikal dan elektrikal (Allam, 2005; Al-sheikh, 2014; M.K, H.A. and M.S, 2018; El Ame, Mwero and Kabubo, 2020). Biasanya pipa – pipa tersebut ditempatkan di bawah balok untuk alasan keindahan dan ditutup dengan langit – langit sehingga menghasilkan ruang yang tidak terpakai. Salah satu alternative rencana untuk melewati instalasi perpipaan tersebut untuk melewati instalasi perpipaan tersebut adalah dengan membuat bukaan (opening) pada balok. Alternatif ini memberikan reduksi volume ruang yang signifikan dan memberikan desain yang rapi dan ekonomis (Mansur, 2006). Akan tetapi perlu adanya perkuatan tulangan yang dipasang di sekitar bukaan untuk mereduksi lendutan akibat adanya bukaan (Allam, 2005; Mansur, 2006; Sarah, Farzad and Nima, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah bukaan terhadap kapasitas dan kekakuan lentur balok beton bertulang khususnya di daerah tarik dengan acuan lubang sesuai dengan SNI 2847:2013 (Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2013).

Momen kapasitas penampang balok beton dihasilkan dari perkalian resultan gaya tekan (C) dari beton dan lengan (Jd). Sedangkan gaya tekan pada penampang beton dipengaruhi oleh kuat tekan beton (f_c'), lebar penampang (b) dan tinggi blok tegangan tekan ekuivalen (a) (Wijaya, 2017). Dengan mengacu pada teori tersebut, hubungannya dengan bukaan pada balok adalah jika bukaan diberikan di daerah bagian Tarik penampang, maka tidak ada reduksi kapasitas momen penampang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jumlah bukaan terhadap kekuatan dan kekakuan lentur balok beton bertulang di daerah tarik.

Untuk menghitung kapasitas ultimit menggunakan teori Whitney adalah dengan rumus sebagai berikut:

$$T = A_s \times f_y$$

$$C = 0,85 \times f'_c \times b \times a$$

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

$$j_d = d - 0,5 a$$

Momen tahanan penampang (M_n) dapat ditulis sebagai berikut:

$$M_n = T \times J_d = C \times J_d$$

Menurut penelitian terdahulu (Wijaya, 2017) hubungan beban-defleksi pada balok bertulang dapat ditunjukkan dengan grafik trilinear yaitu daerah 1 (praktek), daerah 2 (pasca retak) dan daerah 3 (pasca *serviceability*).

Kemiringan grafik antar daerah dikarenakan momen inersia terus berkurang dengan penambahan beban yang terus diberikan. Rumus ledutan maksimal di setengah bentang untuk balok dengan pembebanan 2 titik adalah:

$$\Delta_{max} = \frac{P \cdot a}{24 \cdot E \cdot I} (3L^2 - 4a^2)$$

Dari rumus di atas, karena terjadi reduksi momen inersia dari bukaan, maka momen inersia akan semakin kecil dan akibatnya lendutan akan semakin besar.

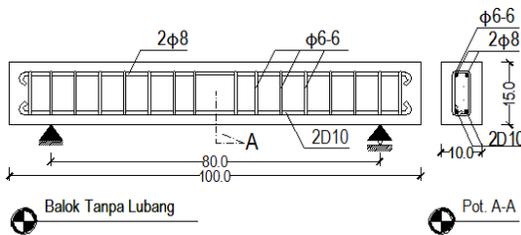
Kekakuan di definisikan sebagai gaya yang di perlukan untuk memperoleh satu unit displacement. Nilai kekakuan merupakan sudut kemiringan dari hubungan antara beban dari lendutan. Makin kaku suatu struktur makin besar nilai kekakuannya (Wijaya, 2017). Jadi kekakuan di rumuskan sebagai berikut:

$$k = \frac{P}{\Delta}$$

Dari rumus diatas, karena balok dengan bukaan mempunyai lendutan lebih besar, maka kekakuannya akan semakin kecil.

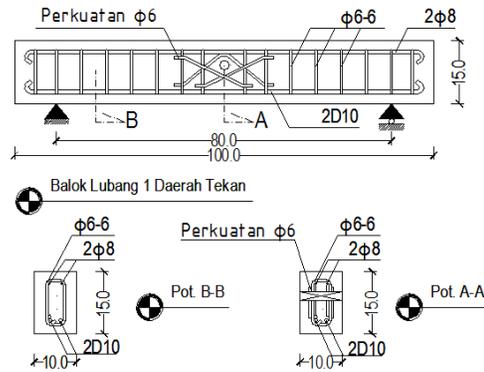
METODE

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian lentur dengan tumpuan sederhana. Benda uji ng dibuat sebanyak 15 buah untuk variasi Balok Normal (BN), Balok Berlubang 1 di Daerah Tekan (BBTE1), Balok Berlubang 2 di Daerah Tekan (BBTE2), Balok Belubang 1 Daerah Tarik (BBTA1), Balok Berlubang 2 di Daerah Tarik (BBTA2). Ukuran balok semua variasi sama yaitu (100 x 10 x 15) cm. Diameter bukaan dari balok dibuat sama yaitu 5 cm yang dipasang di bagian tarik beton dari balok. Gambar Balok Normal (BN) lebih detail bisa dilihat pada Gambar 1.



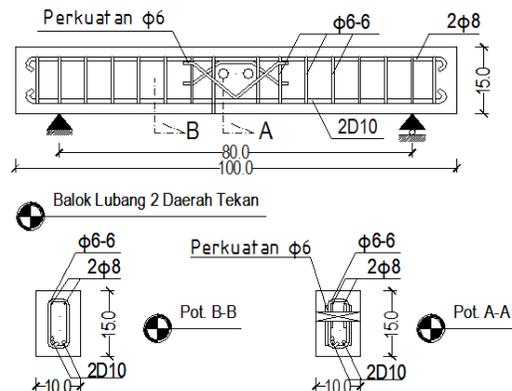
Gambar 1. Balok Normal (BN)

Gambar Balok Berlubang 1 di Daerah Tekan (BBTE1) lebih detail bisa dilihat pada Gambar 2.



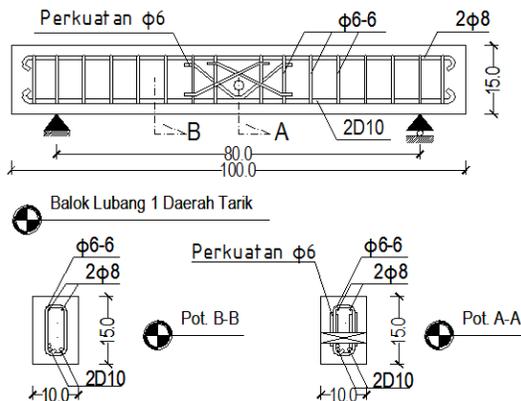
Gambar 2. Balok Berlubang 1 di Daerah Tekan (BBTE1)

Untuk gambar Balok Berlubang 2 di Daerah Tekan (BBTE2) lebih detail bisa dilihat pada Gambar 3.



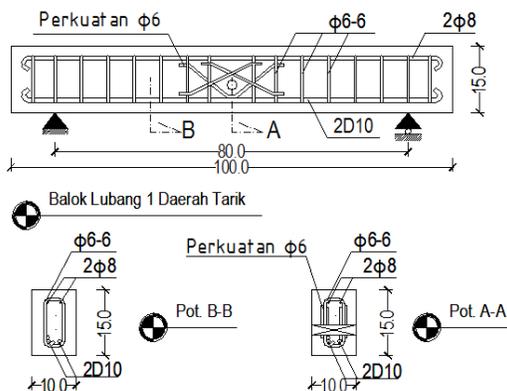
Gambar 3. Balok Berlubang 2 di Daerah Tekan (BBTE2)

Untuk gambar Untuk gambar Balok Belubang 1 Daerah Tarik (BBTA1) lebih detail bisa dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Balok Belubang 1 Daerah Tarik (BBTA1)

Untuk gambar Untuk gambar Balok Berlubang 2 di Daerah Tarik (BBTA2) lebih detail bisa dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Balok Berlubang 2 di Daerah Tarik (BBTA2)

Untuk campuran seluruh variasi di buat sama yaitu 1 PC : 2,68 pasir : 3,15 kerikil. Potongan melintang penampang dapat dilihat pada gambar di atas. Setelah menyiapkan semua material, maka dapat dilakukan proses perawatan benda uji selama 28 hari, dapat dilakukan pengujian

terhadap benda uji tersebut. Pengujian pembebanan pada balok dilakukan seperti

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada umur 28 hari sebagai sampel pengecoran untuk mendapatkan karakteristik campuran beton mendapatkan karakteristik campuran beton. Pengujian kuat tekan beton sesuai dengan (SNI 1974, 2011) silinder menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 17,322 Mpa. Nilai ini akan digunakan sebagai nilai kuat tekan dalam hitungan teoritis pada penelitian ini.

Pengujian Kuat Tarik Tulangan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik baja tulangan menggunakan mesin UTM (*Universal Testing Machine*) sesuai dengan (SNI 2052-4841, 2014) didapatkan nilai tegangan leleh (f_y) dan tegangan *ultimate* untuk diameter 10 mm, 8 mm, dan 6 mm. Hasil yang didapat dari ketiga baja tulangan ini beragam. Tulangan dengan diameter 10 mm memiliki tegangan leleh antara lain $\phi 10-1 = 563,97$ Mpa, $\phi 10-2 = 571,92$ Mpa, dan $\phi 10-3 = 563,97$ Mpa. Tulangan dengan diameter 8 mm memiliki tegangan leleh antara lain $\phi 8-1 = 536,60$ Mpa, $\phi 8-2 = 574,06$ Mpa, dan $\phi 8-3 = 563,29$ Mpa. Sedangkan tulangan dengan diameter 6 mm memiliki tegangan leleh antara lain $\phi 6-1 = 530,10$ Mpa, $\phi 6-2 = 537,93$ Mpa, dan $\phi 6-3 = 535,49$ Mpa.

Untuk tegangan ultimit pada tulangan dengan diameter 10 mm antara lain $\phi 10-1 = 820,59$ Mpa, $\phi 10-2 = 822,48$ Mpa, dan $\phi 10-3 = 803,94$ Mpa. Tulangan dengan diameter 8 mm memiliki tegangan ultimit antara lain $\phi 8-1 = 730,26$ Mpa, $\phi 8-2 = 767,72$ Mpa, dan $\phi 8-3 = 761,38$ Mpa. Dan

tulangan dengan diameter 6 mm memiliki tegangan ultimit antara lain $\phi 6-1 = 734,21$ Mpa, $\phi 6-2 = 737,94$ Mpa, dan $\phi 6-3 = 737,15$ Mpa.

Dengan demikian dapat dilihat bahwa hasil pengujian kuat tarik baja tulangan diameter 10 mm memiliki nilai rata-rata tegangan leleh (f_y) sebesar 566,62 Mpa, diameter 8 mm memiliki nilai rata-rata sebesar 564,65 Mpa, dan diameter 6 mm memiliki nilai rata-rata sebesar 534,51 Mpa. sedangkan tegangan ultimit diameter 10 mm memiliki rata-rata 815,67 Mpa, diameter 8 mm memiliki rata-rata 753,12 Mpa, dan diameter 6 mm memiliki rata-rata 731,77 Mpa. Sehingga berdasarkan hasil tersebut SNI 03-1729-2002 Tata Cara Perencanaan Struktur Baja Untuk Bangunan Gedung, maka hasil uji kuat tarik tulangan diameter 10 mm, 8 mm, dan 6 mm masuk dalam kategori jenis baja BJ 55.

Hubungan Beban dan Lendutan

Penelitian Terdahulu menyatakan selama beban bertambah lendutan pada balok akan bertambah juga (Ade Lisantono, 2007; Wijaya, 2017). Awalnya beban akan proposional dengan lendutan. Tetapi dengan adanya pertambahan beban, nilai lendutan tidak lagi proporsional dengan peningkatan beban yang dilakukan. Karena semakin tinggi beban maka material akan sedikit demi sedikit kehilangan elastisitas dan akhirnya menuju tahap plastis. Oleh karena itu dengan grafik beban-lendutan, akan memprediksi kekuatan dan kekakuan balok dengan mengetahui lendutan dan nilai-nilai bebannya.

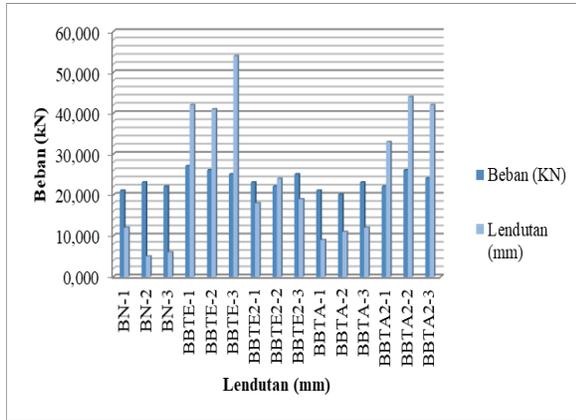
Hubungan Beban dan Lendutan Pada Kondisi Praretak

Akibat adanya perkuatan dalam lubang di daerah tekan dan daerah tarik, untuk beban yang sama terdapat perbedaan dalam lendutan yang terjadi di setengah bentang pada kondisi praretak baik untuk balok tanpa lubang maupun balok dengan lubang. Untuk kondisi praretak beban-lendutan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Nilai Beban dan Lendutan dari Benda Uji Balok Pada Kondisi Praretak

No	Type Balok	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kalibrasi	Rata-Rata Beban (kN)	KET.
1	BN-1	21.100	0.120	13.1	9.000	Retak Awal
	BN-2	23.100	0.050			
	BN-3	22.100	0.060			
2	BBTE -1	27.100	0.420	13.1	13.000	Retak Awal
	BBTE -2	26.100	0.410			
	BBTE -3	25.100	0.540			
3	BBTE 2-1	23.100	0.180	13.1	10.333	Retak Awal
	BBTE 2-2	22.100	0.240			
	BBTE2-3	25.100	0.190			
4	BBTA -1	22.100	0.150	13.1	9,667	Retak Awal
	BBTA -2	23.100	0.300			
	BBTA -3	23.100	0.120			
5	BBTA 2-1	22.100	0.330	13.1	11.000	Retak Awal
	BBTA 2-2	26.100	0.440			
	BBTA 2-3	24.100	0.420			

Grafik antara beban dan lendutan pada Tabel 1 dapat di tunjukan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Grafik Beban dan Lendutan

Ditengah bentang pada kondisi praretak menurut Pangestuti & Effendi (2010) melakukan penelitian dengan hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 1600 kg dan lendutan yang terjadi 2,95 mm. Untuk balok BLKLBO1 terjadi kenaikan beban retak pertama menjadi 1800 kg, tetapi terjadi penurunan lendutan menjadi 1,22 mm. untuk balok BLKLBO2 terjadi penurunan beban retak pertama menjadi 1200 kg dan lendutan menjadi 1 mm. Sedangkan dalam penelitian ini hasil beban dan lendutan berbeda dimasing-masing variasi, untuk balok BN beban yang dihasilkan retak pertama kali rata-rata adalah sebesar 9 kN dengan lendutan sebesar 0,767 mm, pada balok BBTE1 sebesar 13.000 kN dengan lendutan 4,567 mm, untuk balok BBTE2 sebesar 10.333 kN dengan lendutan 2,033 mm, sedangkan balok BBTA1 sebesar 8.333 kN dengan lendutan 1,9 mm, dan terakhir balok BBTA2 sebesar 11.000 kN dengan lendutan 3,967 mm.

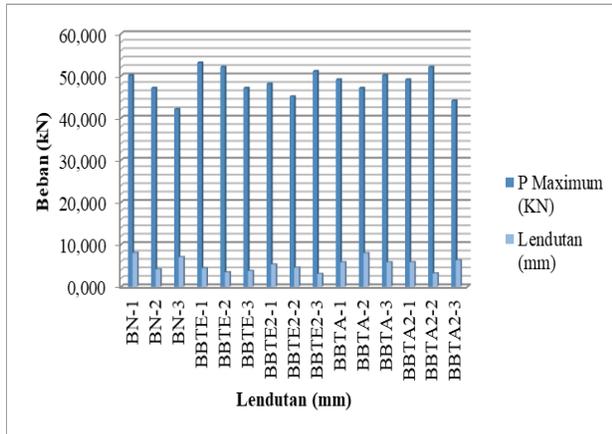
Hubungan Beban dan Lendutan Pada Kondisi Ultimit (Maksimum)

Daerah praretak diakhiri dengan mulainya retak pertama yang bergerak menuju daerah II dan dilanjutkan pada daerah III yang berpuncak pada beban maksimum. Untuk balok dengan tumpuan sendi dan rol, retak akan semakin lebar dan semakin dalam pada daerah lapangan khususnya pada saat beban maksimum (Wijaya, 2017). Dalam penelitian ini hubungan beban dan lendutan pada saat kondisi maksimum di berikan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Beban dan Lendutan Pada Kondisi Ultimit

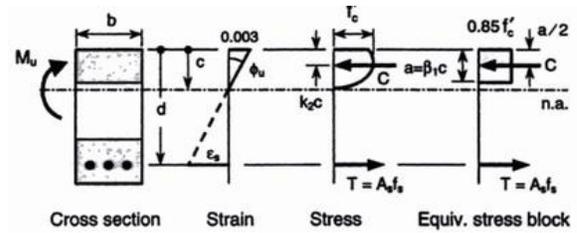
No	Tipe Balok	P Max (kN)	Lendutan (mm)	Kalibrasi (kN)	P Max Rata-Rata (kN)	Rata-Rata Lendutan (mm)
1	BN-1	50.100	8.000	13.100	33.333	6.367
	BN-2	47.100	4.100			
	BN-3	42.100	7.000			
2	BBTE-1	53.100	4.350	14.100	36.667	3.817
	BBTE-2	52.100	3.390			
	BBTE-3	47.100	3.710			
3	BBTE-1	48.100	5.260	15.100	33.000	4.253
	BBTE-2	45.100	4.500			
	BBTE2-3	51.100	3.000			
4	BBTA-1	49.100	5.760	16.100	32.667	6.480
	BBTA-2	47.100	7.920			
	BBTA-3	50.100	5.760			
5	BBTA-1	49.100	5.800	17.100	31.333	5.060
	BBTA-2	52.100	3.130			
	BBTA-3	44.100	6.250			

Grafik beban dan lendutan dari Tabel 2 lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Grafik Beban dan Lendutan Ditengah Bentang Pada Kondisi Ultimit

Dari hasil diatas dapat dianalisis bahwa dengan pemberian perkuatan tulangan pada lubang, beban dan lendutan yang terjadi pada kondisi praretak juga mengalami perbedaan. Misalnya pada kondisi praretak pada balok BBTE1, BBTE2, BBTA1, dan BBTA2 rata-rata beban lebih besar dari pada balok balok kontrol. Menurut teoritis dalam (Mansur, 2006) penempatan lubang tidak berpengaruh ketika diletakan di daerah tarik karena pada dasarnya tegangan beton seluruhnya ditahan oleh tulangan tarik pada saat kondisi praretak Untuk gambar diagram tegangan dan regangan pada balok berlubang visualisasinya dapat dilihat pada Gambar 8 dibawah ini.



Sumber: (Mansur, 2006)

Gambar 8. Diagram Tegangan dan Tegangan Balok Lubang yang Dikenakan Beban Lentur

Tetapi dalam penelitian ini, hasil yang di dapat bertolak belakang dengan pendapat atau teori dari penelitian tersebut. Hal ini diperkuat oleh penjelasan bahwa pemasangan tulangan diagonal di atas dan di bawah lubang akan meningkatkan kekuatan utama dari balok. Sehingga pada daerah tarik, maupun di daerah tekan dalam penelitian ini, tetap dapat menambah kekuatan pada balok, meskipun balok tersebut terlubangi. Jadi bedasarkan hasil penelitian tersebut dapat di analisis bahwa tegangan pada balok beton hampir semua ditahan *detailing* perkuatan yang dipasang diagonal di sekitar lubang.

Kekakuan Lentur Pada Kondisi Praretak

Dari hasil pengujian didapatkan kekakuan lentur untuk kondisi praretak dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah ini.

Tabel 3. Kekakuan Balok Pada Saat Kondisi Praretak

No	Tipe Balok	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kalibrasi	Kekakuan (kN/mm)	Rata-Rata Kekakuan (kN/mm)
1	BN-1	21.100	1.200	13.1	6.667	13.889
	BN-2	23.100	0.500		20.000	
	BN-3	22.100	0.600		15.000	
2	BBTE -1	27.100	4.200	13.1	3.333	2.909
	BBTE -2	26.100	4.100		3.171	
	BBTE -3	25.100	5.400		2.222	
3	BBTE 2-1	23.100	1.800	13.1	5.556	5.207
	BBTE 2-2	22.100	2.400		3.750	
	BBTE2 -3	25.100	1.900		6.316	
4	BBTA -1	22.100	1.500	13.1	6.000	5.889
	BBTA -2	23.100	3.000		3.333	
	BBTA -3	23.100	1.200		8.333	
5	BBTA 2-1	22.100	3.300	13.1	2.727	2.767
	BBTA 2-2	26.100	4.400		2.955	
	BBTA 2-3	24.100	4.200		2.619	

Kurva beban dan lendutan di tengah bentang dari hasil eksperimen diatas menunjukkan kekakuan lentur dari penampang. Kekakuan dirumuskan dengan P/δ . Ujianto (2006) menyatakan kekakuan balok dapat dilihat dari kemiringan kurva hubungan beban dan lendutan. Dari tabel 3 di atas, hasil kekakuan balok BN rata-rata sebesar 13.889 kN/mm, untuk balok dengan BBTE1 sebesar 2.909 kN/mm, untuk balok dengan BBTE2 sebesar 5.207 kN/mm, untuk balok dengan BBTA1 sebesar 5.889 kN/mm, dan untuk balok BBTA2 sebesar 2.767 kN/mm.

Kekakuan Lentur Pada Kondisi Ultimit (Maksimum)

Dari hasil pengujian didapatkan kekakuan lentur untuk kondisi ultimit dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4. Kekakuan Balok Pada Saat Kondisi Ultimit

No	Tipe Balok	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Kalibrasi	Kekakuan (kN/mm)	Rata-Rata Kekakuan (kN/mm)
1	BN-1	50.100	8.000	13.100	4.625	5.687
	BN-2	47.100	4.100		8.293	
	BN-3	42.100	7.000		4.143	
2	BBTE -1	53.100	4.350	13.100	9.195	9.955
	BBTE -2	52.100	3.390		11.504	
	BBTE -3	47.100	3.710		9.164	
3	BBTE 2-1	48.100	5.260	13.100	6.654	8.811
	BBTE 2-2	45.100	4.500		7.111	
	BBTE2 -3	51.100	3.000		12.667	
4	BBTA -1	49.100	5.760	13.100	6.250	5.656
	BBTA -2	47.100	7.920		4.293	
	BBTA -3	50.100	5.760		6.424	
5	BBTA 2-1	49.100	5.800	13.100	6.207	7.876
	BBTA 2-2	52.100	3.130		12.460	
	BBTA 2-3	44.100	6.250		4.960	

Dari Tabel 4 di atas, dapat dilihat bahwa kekakuan balok BN rata-rata sebesar 5.687 kN/mm, untuk balok dengan BBTE1 sebesar 9.955 kN/mm, untuk balok dengan BBTE2 sebesar 8.811 kN/mm, untuk balok dengan BBTA1 sebesar 5.656 kN/mm, dan untuk balok BBTA2 sebesar 7.876 kN/mm. Dalam penelitian ini kekakuan yang besar terletak pada balok BBTE1.

Penelitian terdahulu menyebutkan bahwa untuk mengetahui kapasitas lentur dan geser balok beton bertulang dengan lubang ganda pada badan balok dengan tinjauan terhadap variasi lokasi lubang (Ade Lisantono, 2007). Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa balok dengan lubang yang ditempatkan pada daerah lentur rendah-geser tinggi mempunyai kekakuan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan balok dengan lubang yang ditempatkan pada daerah lentur tinggi-geser tinggi. Hasil penelitian mereka juga menunjukkan bahwa balok dengan lubang yang ditempatkan di daerah lentur tinggi-geser tinggi secara umum menunjukkan kecenderungan adanya penurunan kapasitas beban apabila dibandingkan dengan balok dengan lubang yang ditempatkan di daerah lentur rendah-geser tinggi. Jika dikaitkan dengan penelitian ini, maka kekakuan jauh lebih besar di daerah lentur rendah-geser. Hal ini dibuktikan dengan nilai kekakuan yang cukup tinggi dibandingkan kekakuan di daerah lentur rendah-geser. Dan adanya *detailing* perkuatan diagonal di sekitar lubang juga mengakibatkan kapasitas balok yang menjadi lebih tinggi.

Kapasitas Dalam Menahan Beban Maksimum

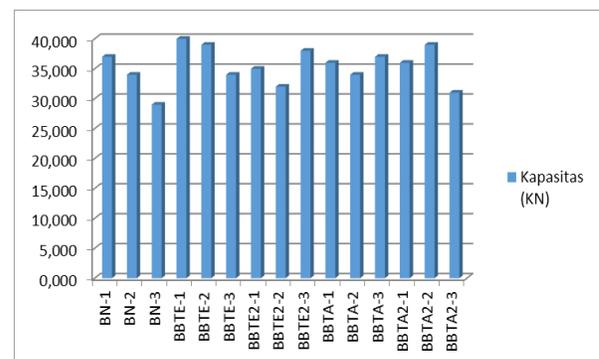
Kekuatan ultimit dari balok dalam menahan beban maksimum ditunjukkan oleh hasil pembacaan beban yang menunjukan

tidak adanya perlawanan balok pada saat beban puncak yang terus ditambahkan. Dari hasil penelitian beban puncak yang mampu ditahan oleh variasi balok kontrol lebih kecil dari pada balok dengan lubang di daerah tekan dan daerah tarik. Sedangkan hasil dari kekuatan ultimit masing-masing variasi dapat ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini.

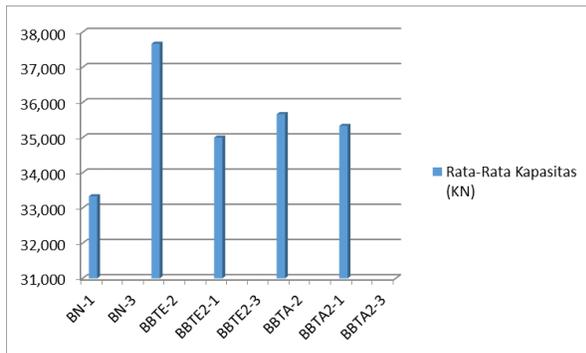
Tabel 5. Kapasitas Beban Maksimum Balok

No	Tipe Balok	Kapasitas (kN)	Rata-Rata Kapasitas (kN)
1	BN-1	37.000	33.333
	BN-2	34.000	
	BN-3	29.000	
2	BBTE-1	40.000	37.667
	BBTE-2	39.000	
	BBTE-3	34.000	
3	BBTE2-1	35.000	35.000
	BBTE2-2	32.000	
	BBTE2-3	38.000	
4	BBTA-1	36.000	35.667
	BBTA-2	34.000	
	BBTA-3	37.000	
5	BBTA2-1	36.000	35.333
	BBTA2-2	39.000	
	BBTA2-3	31.000	

Untuk lebih jelasnya, Tabel 5 di atas digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Beban Ultimit Masing-Masing Variasi Balok
Sedangkan rata-rata grafik kapasitas beban maksimum masing-masing variasi dapat dilihat pada Gambar 10 berikut ini.



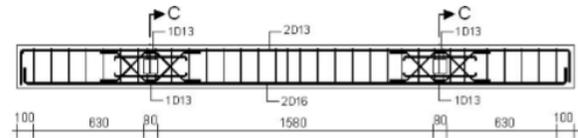
Gambar 10. Rata-Rata Beban Ultimit Balok

Dari gambar diatas, dapat dianalisis bahwa terdapat penambahan kekuatan dalam menahan beban jika dibandingkan dengan balok kontrol (BN) masing-masing 13 % untuk balok berlubang 1 didaerah tekan (BBTE1), 5 % untuk balok berlubang 2 didaerah tekan (BBTE2), 7 % untuk balok berlubang 1 didaerah tarik (BBTA1), 6 % untuk balok berlubang 1 didaerah tarik (BBTA1). Dalam penelitiannya lubang pada badan balok juga diberi *detailing* perkuatan tulangan di sekitar lubang. Sedangkan untuk hasil penelitian kapasitas dan salah satu visual potongan baloknya, dapat dilihat pada Tabel 6 dan pada Gambar 11 dibawah ini.

Tabel 6. Kapasitas Balok Uji Lubang Ganda

Balok	Beban Maksimum (kg)
BSD	3199.68
BOD1	2999.7
BOD2	3199.68
BOD3	3399.66

Sumber: (Ade Lisantono, 2007)



Sumber: (Ade Lisantono, 2007)

Gambar 11. Balok Berlubang Persegi Ganda

Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa letak lubang di daerah lentur tinggi-geser dapat menurunkan kapasitas balok dibandingkan dengan balok tanpa lubang. Jika ditinjau letak lubang, maka penelitian ini sangatlah berpengaruh terhadap kapasitas balok beton dibandingkan dengan penelitian terdahulu. Hal ini dikarenakan letak penelitian ini di daerah lentur rendah-geser, sedangkan penelitian terdahulu diletakan pada daerah geser seperti pada gambar 1.6. Untuk pemilihan lubang lingkaran juga dapat mempengaruhi kapasitas balok, jika dibandingkan dengan lubang persegi. Hal ini dikarenakan lubang lingkaran memiliki penyebaran tegangan yang merata kesegala sudut, dibandingkan penyebaran tegangan pada lubang persegi yang memiliki banyak sudut tajam.

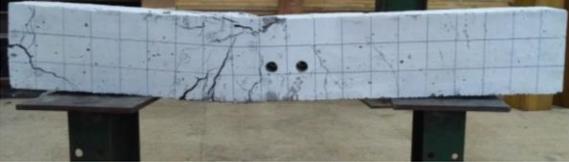
Pola Retak

Sehubungan dengan kecilnya kuat tarik beton, maka retakan dianggap terjadi pada beban kerja oleh karena itu retakan akan terjadi pada daerah tarik dianggap suatu hal yang wajar, tetapi bila retakan terjadi pada daerah sepanjang konstruksi merupakan suatu hal yang harus diperhitungkan (Prihantono, 2012). Pengamatan pola retak mengacu pada 3 kategori retak, yakni retak lentur, retak geser, dan retak lentur geser (Muhammad Wildan Ubaidillah and Djati, 2022). Berdasarkan pada pengujian balok beton bertulang yang telah dilakukan, dapat

diamati bahwa pola retak lentur yang rata-rata terjadi pada balok BN, BBTE1, BBTE2, dan BBTA1, sedangkan balok BBTA2 mengalami retak lentur geser. Untuk keterangan pola retak masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 7 berikut ini.

Tabel 7. Pola Retak

No	Nama	Keterangan	Gambar
1	BN	Benda uji BN pada saat rata-rata beban sebesar 9 kN. Retak pertama terjadi di daerah tarik tengah balok beton. Keretakan tersebut ditandai dengan adanya retak vertical pada bagian tengah balok. Retak pada balok ini termasuk dikategorikan dalam retak lentur.	
2	BBTE1	Benda uji BBTE1 pada saat rata-rata beban sebesar 13 kN. Retak pertama terjadi di daerah tarik tengah balok beton. Keretakan tersebut ditandai dengan adanya retak vertical pada bagian tengah balok. Kemudian dilanjutkan dengan retak diagonal yang dominan, serta retak itu merambat menuju pusat pembagi beban seiring dengan penambahan beban. Dalam pola retak ini keretakanya dikategorikan dalam retak lentur-geser.	
3	BBTE2	Benda uji BBTE2 pada saat beban sebesar 10.333 kN. Retak pertama terjadi di daerah tarik tengah balok beton. Keretakan tersebut ditandai dengan adanya retak	

No	Nama	Keterangan	Gambar
		<p>vertikal pada bagian tengah balok. Kemudian dilanjutkan dengan sedikit retak diagonal yang merambat menuju pusat pembagi beban seiring dengan penambahan beban. Dalam pola retak ini keretakanya dikategorikan dalam retak lentur.</p>	
4	BBTA1	<p>Benda uji BBTA1 pada saat rata-rata beban sebesar 9.667 kN. Retak pertama terjadi di daerah tarik tengah balok beton. Keretakan tersebut ditandai dengan adanya retak vertikal yang dominan pada bagian tengah balok. Retak pada balok ini termasuk dikategorikan dalam retak lentur.</p>	
5	BBTA2	<p>Benda uji BBTA2 pada saat beban sebesar 11 kN. Retak pertama terjadi di daerah tarik tengah balok beton. Keretakan tersebut ditandai dengan adanya retak vertikal pada bagian tengah balok. Kemudian dilanjutkan dengan retak diagonal yang dominan, serta retak itu merambat menuju pusat pembagi beban seiring dengan penambahan beban. Dalam pola retak ini keretakanya dikategorikan dalam retak lentur-geser, sehingga perlu dirapatkan jarak sengkangnya, dengan tujuan agar dapat memaksimalkan dalam keruntuhan lentur pada balok</p>	

Dari semua benda uji retak yang muncul adalah retak lentur dan retak lentur geser di sekitar momen lentur. Untuk balok BN, BBTE1, BBTE2, dan BBTA1, retak lentur dimulai dari daerah tarik beton yang tegak lurus terhadap *bending*, sedangkan balok BBTA2 retak lentur dimulai dari daerah tarik, tetapi kemudian dilanjutkan geser di luar daerah momen lentur yang arah retaknya menjalar menuju *bending* (pembagi beban). Dan semakin besar nilai a/d keruntuhan yang dominan yakni runtuh lentur, sebaliknya lebih kecil keruntuhan yang dominan yakni runtuh geser. Jika dikaitkan dalam penelitian a/d dari balok penelitian ini adalah 2,94 lebih besar dari $1/3 a/d$ bentang efektif yakni 2,5. Sehingga keruntuhan yang dominan yang terjadi pada penelitian ini adalah runtuh lentur.

ANALISIS DATA

Setelah dilakukan penelitian dan pembahasan peneliti dapat menganalisis data menggunakan uji statistik *Anava One Way*. Data yang digunakan pada uji ini yakni kekakuan pada kondisi praretak, kekakuan pada kondisi ultimit, dan kapasitas balok.

Uji Hipotesis Untuk Kapasitas Balok

H_0 = Ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang.

H_1 = Tidak ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kapasitas lentur balok bertulang.

Karena nilai F hitung $< F$ tabel ($1.597 < 5.14$), maka H_0 gagal ditolak, sehingga, secara statistik terdapat pengaruh yang signifikan mengenai penambahan lubang pada balok beton bertulang terhadap

terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang.

Uji Hipotesis untuk Kekakuan Pada Kondisi Praretak

H_0 = Ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kekakuan lentur balok beton pada kondisi praretak.

H_1 = Tidak ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kekakuan lentur balok beton pada kondisi praretak.

Karena nilai F hitung $> F$ tabel ($13.862 > 5$), maka H_0 ditolak, sehingga, secara statistik terdapat tidak ada pengaruh yang signifikan mengenai penambahan lubang pada balok beton bertulang terhadap kekakuan balok beton pada kondisi praretak.

Uji Hipotesis Untuk Kekakuan Pada Kondisi Ultimit

H_0 = Ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kekakuan lentur balok beton pada kondisi ultimit.

H_1 = Tidak ada pengaruh yang signifikan antara jumlah lubang terhadap kekakuan lentur balok beton pada kondisi ultimit.

Karena nilai F hitung $< F$ tabel ($3.662 < 5$), maka H_0 gagal ditolak, sehingga, secara statistik terdapat pengaruh yang signifikan mengenai penambahan lubang pada balok beton bertulang terhadap kekakuan balok beton pada kondisi ultimit.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang dipaparkan dapat ditarik kesimpulan berikut yaitu kapasitas lentur mengalami peningkatan akibat adanya

detailing perkuatan pada balok lubang di daerah tekan. Dalam presentase, jika dibandingkan balok kontrol, peningkatan kapasitas lentur BBTE1 sebesar 13 %, dan BBTE2 sebesar 4.425 %. Dalam uji statistik, penambahan lubang daerah tekan balok berpengaruh terhadap kapasitas balok beton bertulang.

Kapasitas lentur mengalami peningkatan akibat detailing perkuatan pada balok lubang di daerah tarik. Dalam presentase, jika dibandingkan dengan balok kontrol, peningkatan kapasitas lentur balok BBTA1 mengalami peningkatan sebesar 6.667 %, dan balok BBTA2 sebesar 5.607 %. Dalam uji statistik, penambahan lubang daerah tarik pada balok memiliki pengaruh terhadap kapasitas balok beton bertulang.

Hasil pengamatan pola retak menunjukkan keruntuhan terjadi pada balok BBTE1 dan BBTE2 adalah keruntuhan lentur. Hasil pengamatan pola retak menunjukkan keruntuhan terjadi pada balok BBTA1 adalah keruntuhan lentur, sedangkan keruntuhan terjadi pada balok BBTA2 adalah keruntuhan geser.

SARAN

Dalam penelitian selanjutnya diharapkan lebih mempertajam perbedaan pada kekuatan ultimit antara balok tanpa lubang dengan balok yang berlubang. Serta pemberian variasi ukuran dengan penambahan perkuatan, khususnya lubang lingkaran. Dan untuk balok BBTA2 perlu dirapatkan jarak sengkangnya, sehingga

dapat memaksimalkan dalam keruntuhan lentur pada balok.

Dari penelitian diatas, disarankan menggunakan kontruksi balok dengan satu lubang di daerah tekan (BBTE1) dari pada balok yang lain, karena peningkatan dalam kapasitas lentur dan kekakuan pada balok beton.

DAFTAR PUSTAKA

Ade Lisantono, H.Y.W. (2007) 'Pengaruh Dimensi Bukaannya Terhadap Kuat Lentur dan Geser Balok Beton Bertulang Dengan Bukaannya Ganda', *Jurnal Teknik Sipil*, Volume 8(No. 1), pp. 37–52.

Al-sheikh, S.A. (2014) 'Flexural Behavior of Rc Beams With Opening', *Concrete Research Letters*, 5(2), pp. 812–824.

Allam, S.M. (2005) 'Strengthening of RC beams with large openings in the shear zone', *AEJ - Alexandria Engineering Journal*, 44(1), pp. 59–78.

El Ame, F., Mwero, J.N. and Kabubo, C.K. (2020) 'Openings Effect on the Performance of Reinforced Concrete Beams Loaded in Bending and Shear', *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 10(2), pp. 5352–5360.

Badan Standarisasi Nasional Indonesia (2013) 'SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung', *Bsn*, p. 265.

M.K, E.-S., H.A., E.-El. and M.S, E. (2018) 'Experimental and Analytical Study of Strengthening Reinforced Concrete Beams with Openings', 13(7), pp. 4934–4950.

Mansur, M.A. (2006) 'Design of Reinforced Concrete Beams with Web Openings',

Proceedings of the 6th Asia-Pacific Structural Engineering and Construction Conference, (September), pp. 5–6.

Muhammad Wildan Ubaidillah and Djati, E. walujo (2022) ‘Eksperimen Uji Lentur Balok Beton dengan Bundel Tulangan’, *Jurnal Konstruksi*, 20(1), pp. 202–213.

Prihantono (2012) ‘Studi Perbandingan Sambungan Balok $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ Bentang Dan Utuh Pada Saat Pengecoran Terhadap Kekuatan Balok Beton Prihantono’, *Jurnal Menara Teknik Sipil*, VII(1), pp. 126–144.

Sarah, J., Farzad, H. and Nima, O. (2019) ‘Effect of Using High-Strength Concrete and Ultra-High-Performance Concrete Material on Reinforced Concrete Beam with Opening under Flexural Load’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1).

SNI 1974 (2011) ‘SNI 1974-2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder’, *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, p. 20.

SNI 2052-4841 (2014) ‘SNI 2052-4841-2014 Baja tulangan beton’, p. 15.

Wijaya, H.S. (2017) ‘Pengaruh Buka-an (Opening) Terhadap Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang’, *Jurnal Media Teknik Sipil*, 15(1), p. 42.