

Penambahan Lebar Balok: Antisipasi Keruntuhan Dini Akibat Gaya Geser Horizontal Pada Balok Beton Tulang Berongga

Increasing the Width of the Beam: Anticipating Premature Collapse Due to Horizontal Shear Forces in Hollow Reinforced Concrete Beams

Syahrul Sariman^{1*}, Eko Yuniarto¹, Syahlendra Syahrul², Rismawati Razak², Nurhaliza Nazaruddin²

Email: syahrul.sariman@universitasbosowa.ac.id

¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bosowa

²Program Studi Teknik Konstruksi Sipil Politeknik Negeri Ujung Pandang

Diterima: 18 Mei 2024 / Disetujui: 30 Agustus 2024

ABSTRAK

Penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa terdapat Gaya geser horizontal yang dapat mengakibatkan keruntuhan dini pada balok berongga. Penelitian ini bertujuan untuk mengantisipasi keruntuhan dini dengan cara menambah lebar balok dari 150 mm menjadi 175 mm, sedangkan dimensi lain tidak berubah, seperti panjang balok : 3300 mm, tinggi balok 350 mm, tulangan tarik 3D16 mm dan tulangan tekan 2 \square 8 mm, tulangan sengkang pada tumpuan \square 8-100 mm dan di lapangan \square 8-200 mm. Benda uji balok sebanyak berupa sebuah balok normal, dan 3 buah balok berongga yang terdiri dari balok dengan tinggi rongga 60 mm (BR1), 120 mm (BR2) dan 180 mm (BR3), panjang rongga ketiga benda uji : 2640 mm. Mutu beton f_c 27,09 Mpa dan mutu baja f_s = 481,77 Mpa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur teoritis dan eksperimental semua benda uji tidak berbeda signifikan. Sementara itu, kapasitas lentur balok, hubungan antara beban dan lendutan serta pola retak antara balok berongga dan balok normal juga menunjukkan hal yang sama. Hanya saja kekakuan balok normal lebih baik daripada balok berongga sedangkan daktilitas balok berongga lebih tinggi daripada balok normal. Penambahan lebar balok menunjukkan bahwa tidak terjadi keruntuhan dini pada balok berongga.

Kata Kunci: Lebar Balok, Balok Beton Tulang Berongga, Gaya Geser Horizontal, Keruntuhan Dini

ABSTRACT

Previous studies have shown that there is horizontal shear force that can cause premature collapse in Hollow beams. This study aims to anticipate premature collapse by increasing the beam width from 150 mm to 175 mm, while other dimensions remain unchanged, such as beam length: 3300 mm, beam height 350 mm, tensile reinforcement 3D16 mm and compression reinforcement 2 ϕ 8 mm, stirrup reinforcement at the support ϕ 8-100 mm and in the field ϕ 8-200 mm. The beam test specimens were in the form of a normal beam, and 3 hollow beams consisting of beams with cavity heights of 60 mm (BR1), 120 mm (BR2) and 180 mm (BR3), the cavity length of the three test specimens was 2640 mm. The concrete quality f_c 27.08 Mpa and the steel quality f_s = 587.12 Mpa. The test results showed that the theoretical and experimental flexural capacities of all test specimens did not differ significantly. Meanwhile, the flexural capacity of the beam, the relationship between load and deflection and the crack pattern between the hollow beam and the normal beam also show the same thing. It's just that the stiffness of the normal beam is better than the hollow beam while the ductility of the hollow beam is higher than the normal beam. The addition of the beam width shows that there is no premature collapse in the hollow beam.

Keywords: Beam Width, Reinforced Concrete Hollow Beam, Horizontal Shear Force, Premature Collapse



This work is licensed under Creative Commons Attribution License 4.0 CC-BY International license

A. PENDAHULUAN

Beton merupakan bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia untuk pembangunan rumah, gedung, jembatan, pelabuhan, dan terowongan (Setyowati, 2019). Beton telah dikenal ribuan tahun lalu baik pada masa Romawi Kuno, China, Mesir, maupun Roma pada 600 SM dan lebih berkembang setelah ditemukannya semen oleh Yoseph Aspdin pada tahun 1824. Selanjutnya diperkirakan pembangunan bangunan gedung dan infrastruktur jalan di dunia akan memproduksi 4,4 miliar ton beton setiap tahun yang menyumbang sekitar 8 % dari emisi CO₂ global (Hilburg, 2019). Menurut Gutenberg, Untuk produksi dunia tahunan sekitar 4,5 miliar ton semen, turut ditimbulkan 2,7 miliar ton CO₂ (Gutenberg, 2021), Sedangkan Lehne et al, dalam Chatham House, menegaskan bahwa produksi beton diperkirakan akan meningkat menjadi lebih dari 5,5 miliar ton pada tahun 2050. Kondisi tersebut erat kaitannya dengan urbanisasi besar-besaran yang terjadi pada dunia ketiga khususnya pada negara-negara miskin (Lehne, 2018). Perjanjian Paris menegaskan bahwa kenaikan suhu global akibat emisi gas CO₂ yang merupakan hasil produksi semen dibatasi sampai 1.50C (Falkner, 2016).

Dengan demikian pemakaian beton untuk keperluan struktur sangat penting untuk dikurangi guna mengantisipasi dampak lingkungan yang dihasilkan mulai dengan memperbaiki campuran dan sistem pelaksanaan sampai diperoleh struktur beton yang efektif berdasarkan kriteria kinerja, kekuatan dan daya tahan terhadap beban (Obe, 2018). Mekanisme bekerjanya tegangan pada balok beton bertulang yang terletak pada dua tumpuan sederhana. akibat beban lentur, adalah tegangan tekan dipikul oleh penampang beton sedangkan pada bagian tarik beton sama sekali tidak diperhitungkan untuk menyumbangkan kekuatan, tegangan tarik yang terjadi sepenuhnya dipikul oleh baja tulangan.

F.I. Olmedo, F.I. et al, 2016 meneliti perlakuan lentur balok beton bertulang berlapis dengan menggunakan mutu beton yang berbeda, yaitu Lightweight Concrete (LC) dan Normal Concrete (NC). Hasil pengujian Olmedo et al., membuktikan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan pada beban ultimate untuk balok homogen dan balok multilayer (Olmedo, 2017). Rahardyanto, melakukan penelitian dengan obyek 6 (enam) balok rongga berukuran 200x400x3850 mm dengan mutu beton yang berbeda yaitu K-300 dan K-400, dengan 3 botol plastik yang

disusun pada tengah bentang (Sariman, 2021). Penelitian lainnya yang menyangkut pemanfaatan botol plastik sebagai pembentuk rongga pada balok, dilakukan oleh Mathew, I et al (2016) dengan menempatkan rangkaian botol plastik pada garis netral balok (N0B), dibawah garis netral (N10B0), dan sekaligus dibawah garis netral dan pada garis netral (N10B10). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku lentur relatif sama untuk semua balok. Bila dibandingkan kemampuan balok dengan pengurangan berat sendiri setiap balok uji, maka balok N10B0 yang paling efektif kemudian balok N10B10 (Mathew, 2016).

Penelitian ini merupakan rangkaian penelitian sebelumnya. Pada penelitian terdahulu mengenai balok beton bertulang berongga botol plastik, akibat beban lentur diperoleh data bahwa dari 18 (delapan belas) spesimen yang diuji terdapat 7 (tujuh) balok yang mengalami keruntuhan dini dari berbagai variasi tinggi dan panjang rongga (Sariman, 2020). Hasil analisis dari fenomena tersebut diperoleh data bahwa kegagalan dini tersebut terjadi umumnya di perempat bentang, pada titik berat tinggi rongga. Hal itu disebabkan oleh gaya geser horisontal yang mengakibatkan tegangan utama melampaui tegangan izin yang

besarnya adalah $3.5\sqrt{f_c}$ (Sariman, 2020). Pengaruh kuat tarik tulangan juga sudah diteliti dan memang perbedaan kuat tarik tulangan juga menyebabkan kapasitas lentur balok beton bertulang juga tidak sama (Sariman, 2021). Penelitian ini mengadopsi penelitian sebelumnya dengan menambah lebar balok dari 150 mm menjadi 175 mm.

Penelitian ini bertujuan untuk mengantisipasi keruntuhan dini dengan cara menambah lebar balok dari 150 mm menjadi 175 mm, sedangkan dimensi lain tidak berubah, seperti panjang balok : 3300 mm, tinggi balok 350 mm, tulangan tarik 3D16 mm dan tulangan tekan 2 \square 8 mm, tulangan sengkang pada tumpuan \square 8-100 mm dan di lapangan \square 8-200 mm.

B. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berupa pengujian eksperimental dengan melakukan serangkaian pengujian yang dilakukan pada Laboratorium bahan dan Struktur beton Program studi Teknik Sipil Universitas Bosowa. Spesimen berupa balok uji dengan ukuran 3300mm x 175 mm x 350mm, menggunakan tulangan tarik 3D16 dan tulangan tekan 2f8 mm. Tulangan sengkang menggunakan f8-100 mm di tumpuan sepanjang 75 cm dan f8-200mm dilapangan. Hasil pengujian awal diperoleh kuat tekan beton karakteristik

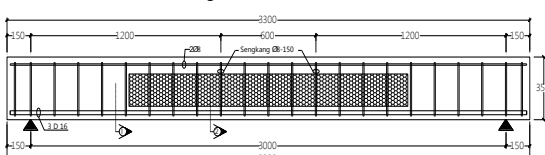
$f'_c=27.09$ Mpa, dan kuat tarik leleh baja = 481.78 Mpa dan kuat tarik ultimate $f_s = 524,78$ Mpa. Untuk membentuk rongga digunakan ex kemasan minuman botol plastik : 600 ml, dengan panjang 2640 mm (12 botol) dengan tinggi yang bervariasi yakni BR1 : 60 mm (1 lapis botol), BR2 : 120 mm (2 lapis botol) dan BR3 : 180 mm (3 lapis botol) sebagaimana gambar 4. Notasi dan jumlah sampel uji dapat dilihat pada tabel 1

Tabel 1. Notasi dan jumlah sampel

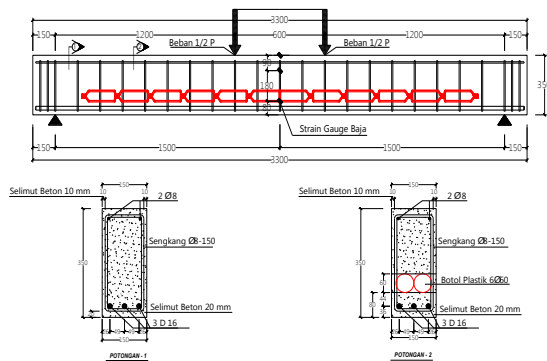
No	Notasi	Panjang Rongga	Tinggi Rongga	Jumlah Sampel
1	BN	-	-	1
2	BR1	2460 mm	60 mm (1 botol)	1
3	BR2	2460 mm	120 mm (2 botol)	1
4	BR3	2460 mm	180 mm (1 botol)	1

Pengecoran dimulai dari dasar balok dan dibuat merata dengan tebal 8 cm, kemudian botol dimasukkan satu persatu sesuai dengan posisi yang telah ditentukan. Setelah botol terpasang semuanya, pengecoran dilanjutkan sampai balok penuh. Sambil dicor dilakukan pemadatan dengan menggunakan vibrator. Setelah itu dilakukan perawatan (curing) dengan karung yang dibasahi setiap saat apabila mulai kering. Perawatan dilakukan selama sebulan.

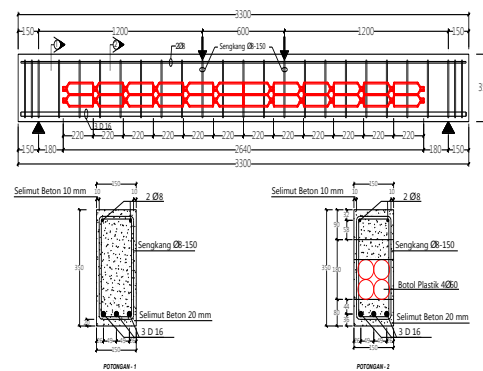
Sketsa Balok Uji



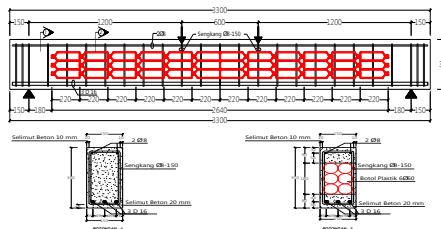
a. BN



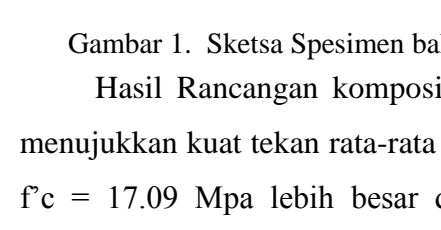
b. BR1



c. BR2



d. BR3



Gambar 1. Sketsa Spesimen balok uji

Hasil Rancangan komposisi beton menunjukkan kuat tekan rata-rata benda uji $f'_c = 17.09$ Mpa lebih besar dari yang diperkirakan. Tabel berikut memperlihatkan hasil pengujian karakteristik beton.

Tabel 2. Hasil Pengujian karakteristik beton

No	Uraian	Satuan	Hasil Uji
1	Kuat tekan: f'_c	Mpa	27.09
2	Modulus Elastisitas : E	Mpa	24,403.54
3	Kuat Lentur : f_l	Mpa	3.31

Sedangkan hasil pengujian kuat tarik baja untuk 2 macam diameter tulangan yang berbeda dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian karakteristik baja

Uraian	Satuan	Hasil Uji	Uraian
Diameter benda Uji	mm	15.9972	8.00
Luas Penampang,	mm ²	200.99	50.26
Kekuatan Leleh,	MPa	324.86	259.95
kekuatan Tarik Max,	MPa	481.77	361.41
Regangan izin	mm/mm	0.00239	0.00129
Modulus Elastisitas	MPa	206691.07	202111.3

Setelah mencapai umur 28 hari, balok kemudian diangkat ke tempat pengujian dengan menggunakan kaki tiga, distel lurus. Kemudian aktuator dengan kapasitas load cell 1500 kN dipasang ditengah bentang diatas stang penerus beban yang untuk pengujian lentur berjarak 60 cm. Tiga buah dial pengukur lendutan yang telah diberi dudukan diletakkan pada bagian bawah balok pada tengah bentang dan 2 lainnya dibawah beban

Semua balok diuji dengan 4 titik pembebanan menggunakan aktuator dengan beban maksimum 1500 kN. Suatu load cell dengan kapasitas 200 kN capacity digunakan untuk mengukur besarnya beban. Pemberian beban dilakukan 5 kN per step sampai terjadi beban 50 kN, pemberian beban selanjutnya dilakukan dengan 10 kN per step sampai beban maksimum. Ketiga dial lendutan dibaca pada setiap pemberian beban.

Selain itu digambarkan pula retakan yang terjadi setiap beban yang diberikan.



Gambar 2. Pelaksanaan Pengujian Balok

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Penelitian

a. Analisis

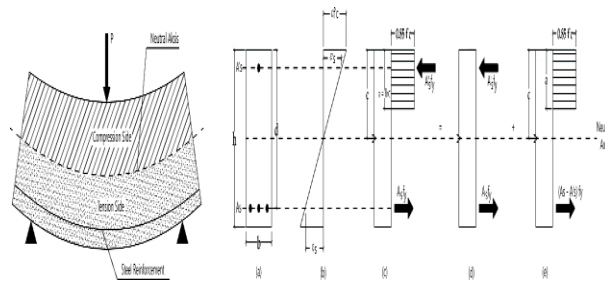
Menghitung.

Tabel 1 Tingkat

Sumber Data: Analisa Data, 2023

Berdasarkan.

Mekanisme bekerjanya tegangan pada balok beton bertulang yang terletak pada dua tumpuan sederhana. akibat beban lentur, adalah tegangan tekan dipikul oleh penampang beton sedangkan pada bagian tarik beton sama sekali tidak diperhitungkan untuk menyumbangkan kekuatan, tegangan tarik yang terjadi sepenuhnya dipikul oleh baja tulangan. Karakteristik balok yang memikul beban lentur dan diagram gaya yang menunjukkan fungsi bagian beton yang memikul gaya tekan (C) dan fungsi tulangan yang memikul gaya tarik (T) disajikan pada Gambar 3.

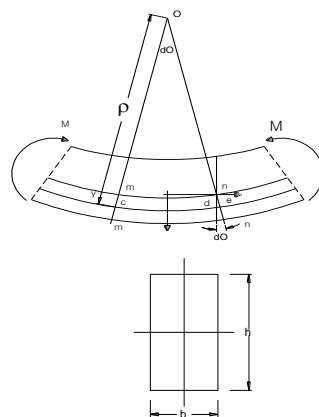


Gambar 3. Karakteristik Balok Yang Mengalami Beban Lentur

Sumber: Park & Paulay, 1933

Dalam kondisi seimbang, baja tulangan yang memikul gaya tarik dibuat sama dengan gaya tekan yang dipikul oleh bagian beton. Gaya tarik dan gaya tekan tersebut dipisahkan oleh Garis netral, dengan demikian ada bagian beton dibawah garis netral (daerah tarik) yang tidak diperhitungkan memikul gaya tekan, sehingga bagian tersebut dapat dibuat dengan mutu beton yang lebih rendah atau dibuat berlobang atau dikurangi volumenya (berongga).

Menurut Park & Paulay (1933), apabila suatu beban bekerja pada balok maka kondisi seimbang antara tegangan – regangan akan lenyap dan diagram tegangan tekan pada penampang balok beton akan berbentuk setara dengan kurva tegangan – regangan tekan. Momen lentur akan mengakibatkan serat bawah mengalami penambahan panjang (tarik) dan serat atas memendek (tekan).



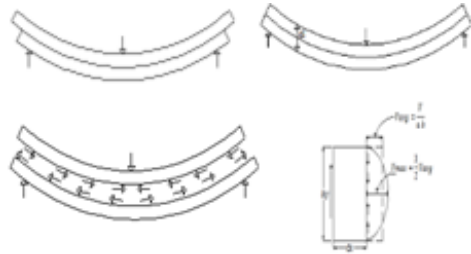
Gambar 4. Batang Lentur

Besar tegangan baik pada serat atas (tegangan tekan) maupun pada serat bawah (tegangan tarik) yang besarnya.

$$f = \frac{M \cdot y}{I}$$

Menurut Winter (1993), pada setiap penampang, terdapat gaya-gaya dalam yang dapat diuraikan menjadi komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Komponen

yang tegak lurus merupakan tegangan lentur tarik pada satu sisi dari sumbu netral dan tegangan lentur tekan pada sisi lainnya (Gambar 3) (Enrico, 2021).

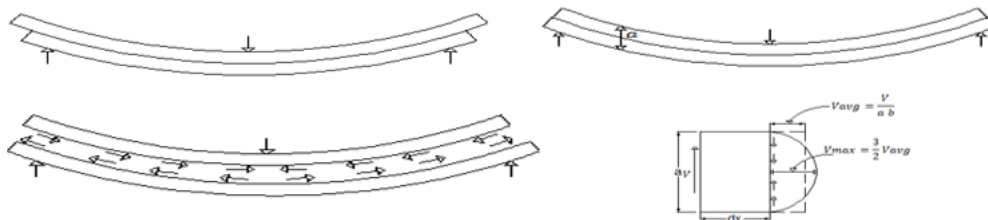


Gambar 5. Geser pada balok persegi

Menurut Winter, dkk (1993) tegangan geser (yang memanjang sama besar dengan yang melintang) pada sembarang titik yang terdapat di dalam penampang tersebut diberikan oleh persamaan

$$v = \frac{V \cdot G}{I \cdot b}$$

Intensitas geser sepanjang penampang vertikal pada gelagar persegi, dengan nilai nol pada serat paling luar dari



Gambar 6. Geser Pada Balok Persegi

Pemberian beban dilakukan secara bertahap sampai beton hancur dan tidak dapat lagi memikul beban. Beban dan lendutan dicatat kemudian beratnya diukur dengan menggunakan timbangan

gelagar dan maksimum pada sumbu netral. Karena adanya aksi kombinasi dari tegangan geser (horizontal dan vertikal) dan tegangan lentur, maka pada sembarang titik dari suatu gelagar terdapat tegangan-tegangan miring dengan nilai terbesarnya saling membentuk sudut 90o. antara satu dengan lainnya. Tegangan utama pada sembarang titik dapat dinyatakan dengan persamaan

$$t = \frac{f}{2} \pm \sqrt{\frac{f^2}{2} + v^2}$$

Besar tegangan tarik diagonal bervariasi dari $3\sqrt{f \cdot c}$ sampai $5\sqrt{f \cdot c}$. Menurut Winter (1993), berdasarkan evaluasi yang dilakukan terhadap sejumlah besar percobaan pada gelagar bahwa pada area dengan gaya geser besar dan momen kecil, retak tarik diagonal terbentuk pada tegangan geser rata-rata sebesar $= 3.5 \sqrt{f \cdot c}$.

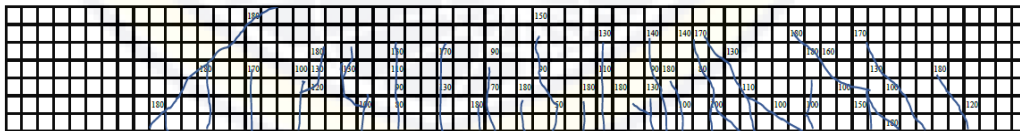
digital. Tabel 4. dibawah ini menunjukkan hasil pengujian berat, beban dan lendutan.

Tabel 4. Hasil Pengujian Berat, Beban Dan Lendutan

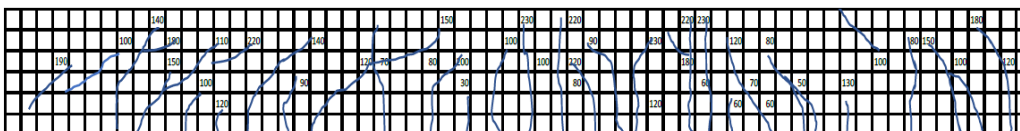
URAIAN BERAT HASIL UJI	SPESIMEN							
	BN 452 kg		BR1 422 kg		BR2 395,6 kg		BR3 349,8 kg	
	Beban (kN)	Lendutan (0.1mm)	Beban (kN)	Lendutan (0.1mm)	Beban (kN)	Lendutan (0.1mm)	Beban (kN)	Lendutan (0.1mm)
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	5	10	5	13	5	12	5	16
3	10	15	10	18	10	22	10	25
4	15	78	15	84	15	96	15	103
5	25	250	25	278	25	281	25	283
6	35	450	35	498	35	548	35	475
7	45	600	45	672	45	709	45	650
8	50	738	50	748	50	811	50	758
9	60	850	60	888	60	994	60	890
10	70	1085	70	1130	70	1165	70	1210
11	80	1305	80	1305	80	1347	80	1315
12	90	1568	90	1598	90	1608	90	1700
13	100	1973	100	1973	100	1985	100	2120
14	110	2222	110	2222	110	2227	110	2356
15	120	2378	120	2478	120	2405	120	2570
16	130	2695	130	2695	130	2748	130	2725
17	135	2800	135	2800	135	2840	135	2865
18	137	2900	137	2920	137	2950	137	3050
19	136	3120	136	3132	136	3290	136	3320
20	65	3280	65	3380	65	3390	65	3450

Gambar Pola Retak

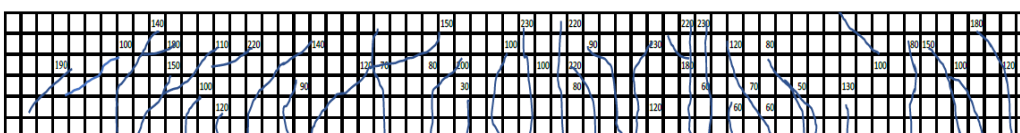
a. Balok BN



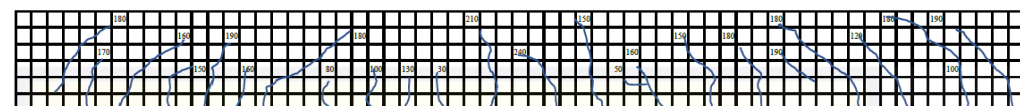
b. Balok BR1



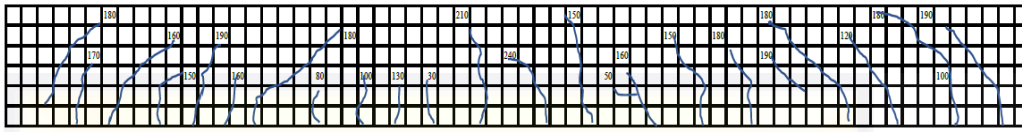
c. Balok BR2



d. Balok BR3

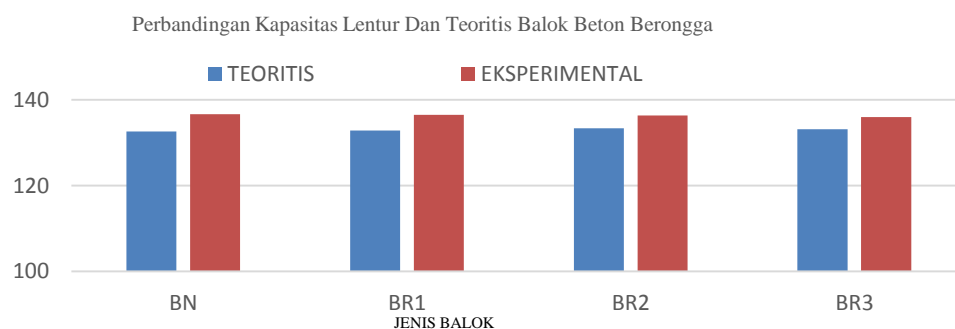


c. Benda Uji Balok Berongga 3 (BR3)



Gambar 7. Pola retak Balok

Telah dilakukan analisis kapasitas lentur dan teoritis balok beton lentur balok beton berongga. Gambar berongga. dibawah ini menunjukkan perbandingan



Gambar 8. Perbandingan Kapasitas Lentur Perhitungan Teoritis Dan Hasil Uji Eksperimen Balok

Dari Gambar 8, Kemampuan memikul beban hasil uji eksperimen semata - mata ditentukan oleh tercapainya tegangan leleh, sedangkan secara teoritis masih ditentukan oleh jarak garis netral. Secara umum dapat dikatakan bahwa hasil perhitungan teoritis mendekati hasil pengujian eksperimen. Hal ini mengidentifikasi bahwa perhitungan teoritis kapasitas momen ultimate menggunakan diagram tegangan whitney cukup konservatif. Secara umum penelitian ini bersesuaian dengan penelitian Dhinesh.N.P, at al (2017),

Djamaluddin R, dkk (2014), dan Jadhav, K at al, (2017).

Kinerja specimen dapat dilihat dari perbandingan kapasitas memikul momen dengan berat balok (M_u/W). Perbandingan ratio momen maksimum dan berat benda uji disajikan pada tabel 5 berikut :

Tabel 5. Ratio Momen Ultimate / Berat Balok

Spesimen	Kapasitas Momen Ultimate (M_u)	Berat Spesimen (W)	M_u/W
	kN m	kg	
BN	82.40	452.0	0.182
BR1	82.00	422.0	0.194
BR2	82.46	395.6	0.208
BR3	83.00	349.8	0.237

Tabel 5 memperlihatkan nilai ratio momen – berat balok (M_u/W) BN,

BR2 dan BR3. Nilai Mu/W Ultimate Perbandingan momen dan berat balok beton uji menunjukkan peningkatan terhadap balok normal. Peningkatan ratio Mu/W pada balok BR2 sebesar 14,34 % terhadap balok beton normal dan peningkatan ratio Mu/W pada balok BR3 sebesar 30,01 % terhadap balok beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja balok berongga dengan variasi tinggi rongga cukup baik.

Selanjutnya hasil perhitungan kekakuan balok dapat dilihat pada tabel 6 berikut

Tabel 6. Perhitungan Kekakuan Balok

Spesimen	Pcr N	Dcr mm	K N/mm
BN	12800	0.528	25457.44
BR1	12400	0.496	24959.74
BR2	11800	0.486	24259.87
BR3	11600	0.500	23218.57

Tabel 6 dapat dihitung bahwa nilai kekakuan BR1, BR2 dan BR3 berturut-turut adalah sebesar 98.04 %, 95.25 % dan 91.21 % terhadap kekakuan balok normal.

Hasil perhitungan daktilitas balok ditunjukkan pada tabel 7

Tabel 7. Perhitungan Daktilitas Setiap Balok

Spesimen	Δm mm	Δy mm	μm
BN	2.378	2.966	0.801753
BR1	2.495	3.026	0.824521
BR2	2.645	3.154	0.838618
BR3	2.609	3.104	0.840528

Dari Tabel 7 dapat dihitung bahwa nilai daktilitas BR1, BR2 dan BR3 berturut-turut adalah sebesar 102.84%, 104.60 % dan 104.84 % terhadap kekakuan balok normal

Dari penelitian terdahulu (Syahrul Sariman, dkk, 2020), dengan lebar balok 150 mm, ternyata terdapat 7 buah balok dari 18 sampel uji, yang mengalami kerusakan dini akibat tergesernya botol pembentuk rongga pada saat pemadatan balok. Hal ini disebabkan oleh adanya Gaya geser horisontal yang terjadi pada perempat bentang dengan nilai maksimum di tengah tinggi penampang yang mengakibatkan kegagalan dini karena lebar balok sisa < 15 mm. Oleh karena itu dalam penelitian ini digunakan lebar balok 175 mm. Perhitungan Gaya geser horisontal yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 9.

KONDISI			BALANCE	Keruntuhan tarik diagonal pada badan balok		
URAIAN		SATUA	BN	BR1	BR2	BR3
f _c	Kuat tekan beton	Mpa	27.09	27.09	27.09	27.09
f _y	Kuat leleh baja tarik	Mpa	481.7777	481.7777	481.78	481.78
f _y	Kuat leleh baja tekan	Mpa	259.9500	259.9500	259.95	259.95
b	lebar balok	mm	175.0000	175.0000	175.0000	175.0000
b	lebar balok sisa	mm	175.0000	55.0000	55.0000	55.0000
h	Tinggi balok	mm	350.0000	350.0000	350.00	350.00
d	Tinggi efektif	mm	314.0000	314.0000	314.00	314.00
d'	Jarak serat tekan ke tul. Tarik	mm	32.0000	32.0000	32.00	32.00
E _c	Modulus Elastisitas beton	Mpa	24463.9402	24463.9402	24463.94	24463.94
E _S	Modulus Elastisitas baja tarik	Mpa	206027.3978	206027.3978	206027.40	206027.40
E _S	Modulus Elastisitas baja tekan	Mpa	202111.3043	202111.3043	202111.30	202111.30
n'	E _s /E _c		8.2616	8.2616	8.2616	8.2616
n'			8.4217	8.4217	8.4217	8.4217
D	Diameter tulangan tarik	mm	15.95	15.95	15.95	15.95
A _s	Luas Tulangan tarik 3 D 16	mm ²	602.97	602.97	602.97	602.97
A _s '	Luas Tulangan tekan 2 φ 8	mm ²	100.53	100.53	100.53	100.53
A _{total}	Luas Penampang	mm ²	61250.0000	61250.0000	61250.00	61250.00
A _{rongga}	Luas Rongga	mm ²	0.0000	7200.0000	14400.00	21600.00
A _{beton}	Luas Penampang beton	mm ²	61250.0000	54050.0000	46850.0000	39650.0000
A _t '	(n'-1) A _s '	mm ²	730.0157	730.0157	730.02	730.02
A _t	(n-1) A _s	mm ²	4475.0795	4475.0795	4475.08	4475.08
A _c	Luas beton = A _{tot} -A _{rongga} +(n'-1)(A _s ')+(n-1)A _s	mm ²	66455.0952	59255.0952	52055.0952	44855.0952
y _{atas}		mm	182.7877	175.8358	183.56	213.02
I _{total}	Momen Inertia gabungan	mm ⁴	722,597,802.10	694,006,711.04	647,185,231.74	538,117,428.09
P	Gaya luar pada saat retak	kN	137.0000	136.8120	136.00	136.20
M	0.6034 + 0.345 P	kN m	47.8684	47.8035	47.5234	47.5924
y	Jarak dari garis netral terhadap tdk yang ditinjau	mm	7.7877	64.1642	73.5589	93.0239
f	tegangan lentur : M _y / I	Mpa	0.5159	4.4197	5.4015	8.2273
V	Gaya geser yang terjadi = 0.7636 + 0.5 P		69.2636	69.1696	68.7636	68.8636
G	Momen statis penampang terhadap grs netral	mm ³	3,121,130.79	2,839,280.26	2,580,291.88	1,357,034.13
v	Tegangan geser titik yang ditinjau = V.G / I.b	Mpa	1.7096	5.1451	4.9847	3.1575
t	f/2 + √((f/2) ² + v)	Mpa	1.9868	7.8095	8.3700	9.2993
tizin	tegangan izin batas : 3.5 √ f _c	Mpa	18.2178	18.2178	18.2178	18.2178
	Rekomendasi t ? Tizin		SAFE	SAFE	SAFE	SAFE
	Gaya Lentur		137.0000	136.8120	136.0000	136.2000

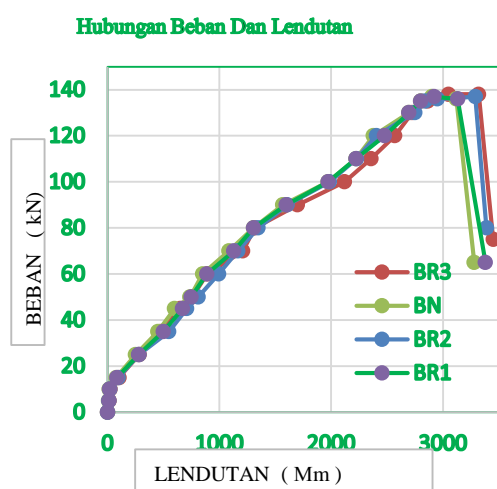
Gambar 9. Perhitungan Gaya Geser Horizontal

Dapat disimpulkan bahwa dengan Analisis data beban dan lendutan penambahan lebar balok tidak terjadi pada kondisi Retak Awal, tulangan leleh keagalan dini dan tulangan ultimate.

Tabel 10. Analisis Data Beban Dan Lendutan Pada Kondisi Retak Awal, Tulangan Leleh Dan Tulangan Ultimate

Jenis Balok	Retak Awal			Tulangan Leleh			Ultimate		
	P _{cr} kN	M _{cr} kN m	D mm	P _y kN	M _y kN m	D mm	P _u kN	M _u kN m	D mm
BN	12.0	8.60	0.312	120.0	73.42	2.378	136.7	82.40	2.966
BR1	12.4	8.66	0.353	120.8	73.88	2.495	136.5	82.00	3.026
BR2	11.8	8.48	0.346	121.9	74.54	2.645	136.4	82.46	3.154
BR3	11.6	8.36	0.329	122.5	74.90	2.609	136.0	83.00	3.104

Hubungan beban dan lendutan ke empat balok uji dapat dilihat pada gambar berikut



Gambar 12. Hubungan beban – Lendutan keempat spesimen

Hubungan beban – lendutan, keempat spesimen menunjukkan bentuk yang sama karena semua benda uji gagal pada kondisi yang sama yakni akibat tercapainya kapasitas tarik tulangan. Hal ini sesuai dengan penelitian Joy, Jain et al. 2014 dan Kumar, M.L.A., 2014.

Apabila diperhatikan pola retak pada gambar 2 dapat ditarik kesimpulan bahwa pola retak keempat spesimen tidak berbeda signifikan. Keempat Benda uji mengalami retak pertama pada saat beban

sebesar 12 kN. Setelah itu benda uji dalam kondisi tulangan mulai leleh pada beban sebesar 120. kN hingga gagal pada beban maksimum 136 kN dengan sebaran retakan yang merambat setinggi 3/4 bentang balok. Hal ini sesuai dengan penelitian Parthiban et al (2017).

D. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penambahan lebar balok khususnya pada balok beton bertulang berongga telah terbukti dapat menanggulangi terjadinya keruntuhan dini pada balok. Kemudian penambahan lebar balok tidak mengakibatkan berkurangnya kapasitas balok beton bertulang berongga dalam memikul beban lentur. Termasuk tidak memberi perbedaan yang signifikan terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang normal dan balok beton bertulang berongga. Kuantitas rongga tidak mempengaruhi kemampuan balok memikul beban baik pada kondisi retak, kondisi tulangan leleh maupun pada saat beban ultimate. Namun adanya rongga mengakibatkan turunnya kekakuan tapi

daktilitas meningkat. Hubungan beban - lendutan pada keempat spesimen menunjukkan pola yang cenderung sama.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Ketua dan segenap jajaran Yayasan Aksa Mahmud yang telah menyiapkan dana untuk pelaksanaan penelitian ini. Rektor dan segenap civitas Akademika Universitas Bosowa yang telah memberi spirit dan dukungan untuk pelaksanaan penelitian ini. Kepala Laboratorium Struktur dan Perkuatan Departemen Teknik sipil dan segenap teknisi Laboratorium yang telah memberi izin dan membantu pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Enrico Souhuwat, N., & Dita Saputro, C. (2021). Analisis Perbandingan Biaya Pekerjaan Kolom Antara Metode Beton Konvensional Dengan Precast (Studi kasus Proyek Pembangunan Gedung Laboratorium Vokasi Kampus Wates Tahap 1) Comparative Analysis Of Column Work Costs Using Conventional And Precast Concrete Methods (Case study of Wates Campus Vocational Laboratory Building Construction Project Phase 1) (Doctoral dissertation, University Technology Yogyakarta).
- Falkner, R. (2016). The Paris Agreement and the new logic of international climate politics. *International Affairs*, 92(5), 1107-1125.
- Gutenberg, J. (2021). Long-term carbon dioxide emissions from cement production can be drastically reduced. *Science Daily*.
- Hilburg, J. (2019). Concrete production produces eight percent of the world's carbon dioxide emissions. *The Architect's Newspaper*, 2.
- Jadav, K., Angalekar, S. S., & Taware, A. A. (2017). Study on Influence of Polyethylene Teraphthalate (PET) bottles in concrete. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 6(7), 1178-81.
- Lehne, J., & Preston, F. (2018). Making concrete change. *Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*.
- Mathew, I., & Varghese, S. M. (2016). Experimental study on partial replacement of concrete in and below neutral axis of beam. *International Journal of Innovative Research In Technology (IJIRT)*, 3(4), 188-92.
- OBE, R. K. D., Lye, C. Q., Lynn, C. J., & Elgalhud, A. A. (2018, November). Sustainable construction materials for concrete: A question of responsible use. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 442, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
- Olmedo, F. I., Valivonis, J., & Cobo, A. (2017). Experimental study of multilayer beams of lightweight concrete and normal concrete. *Procedia Engineering*, 172, 808-815.
- Parthiban, N., & Neelamegam, M. (2017). Flexural behavior of reinforced concrete beam with hollow-core in shear section. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(4), 2263-2274.
- Sariman, S., & Irmawaty, R. (2021). Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Tulang Berongga Akibat Perbedaan Kuat Tarik Tulangan.
- Sariman, S., & Irmawaty, R. (2021). Analisis Kapasitas Lentur Balok Beton Tulang Berongga Akibat Perbedaan Kuat Tarik Tulangan.
- Sariman, S., Djamaludin, R., Irmawaty, R., & Parung, H. (2020). Effect of hollow core using plastic bottle to the flexural behaviour of RC beam. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 419, No. 1, p. 012047). IOP Publishing.
- Sariman, S., Parung, H., Djamaluddin, R., & Irmawaty, R. (2020). Flexural

- Charachteristics of RC Beam with Hollow Core Variation in Tension Area.
- Setyowati, M. (2019). Perkembangan Penggunaan Beton Bertulang di Indonesia Pada Masa Kolonial (1901-1942). *Berkala Arkeologi*, 39(02), 201-220.
- VS, S. Flexural Behaviour of Hollow Square Beam.