

## **ANALISIS KEKAKUAN STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN LUBANG HOLLOW CORE PADA TENGAH BALOK**

Rizky Fajar Pratama, Sugeng P. Budio, Ming Narto Wijaya

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167 Malang 65145, Jawa Timur – Indonesia

Email: rizky.fajarpratama@icloud.com

### **ABSTRAK**

Kebutuhan manusia untuk bangunan dan infrastruktur tiap tahun mengalami peningkatan. Hal ini secara langsung membuat kebutuhan akan bahan baku bangunan juga meningkat. Efisiensi, peningkatan dan inovasi bahan baku menjadi hal yang perlu diperhatikan. Perkembangan konstruksi beberapa dekade belakangan ini sudah sangat pesat, dalam perkembangannya ini menjadikan beton sebagai bahan bangunan yang sangat diminati. Hampir sebagian besar bangunan dibuat menggunakan beton di berbagai bagian strukturnya. Beton didapat dari campuran pasir, kerikil dan semen. Jika penggunaan bahan pembuat beton ini tidak terkontrol dengan baik, ditakutkan akan terjadi kerusakan alam yang ditimbulkan oleh kegiatan eksplorasi yang berlebihan.

Penelitian ini menguji kekakuan struktur balok beton bertulang dengan lubang (*hollow core*) di tengah balok. Pengujian ini terfokuskan pada struktur balok. Penelitian menggunakan benda uji balok berpenampang persegi dengan tiga buah lubang persegi dengan arah memanjang balok terletak di tengah badan balok. Untuk memudahkan dalam proses pembuatan benda uji, maka lubang diisi dengan *styrofoam* diletakkan dibawah garis batas pemisah bagian tarik dan tekan penampang (garis netral). Dengan asumsi, penggunaan beton di bagian tarik struktur balok kurang efisien karena beton sangat lemah terhadap tarik dan hanya untuk menyalurkan gaya yang diterima oleh struktur balok tersebut akibat beban.

Penelitian ini menunjukkan hasil berat volume balok beton dengan lubang dimensi  $5 \times 10 \times 60$  cm, balok beton dengan lubang dimensi  $7 \times 10 \times 60$  cm, dan balok beton dengan lubang dimensi  $9 \times 10 \times 60$  cm berturut-turut mengalami penurunan sebesar 13,92%; 15,04%; dan 18,34% dibandingkan dengan berat volume balok beton tanpa lubang. Kekakuan balok beton mengalami penurunan dikarenakan lendutan yang terjadi pada balok beton dengan lubang lebih besar dibandingkan dengan balok beton tanpa lubang. Nilai kekakuan balok beton berlubang  $5 \times 10 \times 60$  cm,  $7 \times 10 \times 60$  cm, dan  $9 \times 10 \times 60$  cm berturut turut sebesar 580,66 kg/mm; 568,62 kg/mm; dan 566,79 kg/mm. Penurunan ini tidak signifikan dibandingkan dengan penurunan berat volume yang terjadi.

**Kata kunci:** balok, berat volume, beton, *hollow core*, kekakuan.

## ***ABSTRACT***

Human's needed for infrastructure and building is increasing each year. These things, directly make a high demand to building's materials too. Efficiency, improvement and materials's innovation are the things need to be recked. Construction development in these decades has been developing quickly, in this construction development era concrete has been as the most favourite materials among all. Most of the building made by concrete on some parts of its structure. Concrete made of sand, gravel and cement. If the using of concrete's materials is uncontrolled nicely, probably the nature's damage that happened because of exploration activity will happen.

In this research, stiffness of concrete beam with hollow core in central sectional will be tested. This test focuses on beam structure. In this research, three square holes in longitudinal direction was set in the middle of the concrete beam structure will be used. To simplify process of the prototype, then the hollow was filled with styrofoam that was set below the neutral line of cross-section. With assumption, the use of concrete in tensile area only distributes the force that received by concrete beam because of the load.

The result of this experience show that density of concrete beam with  $5 \times 10 \times 60$  cm hollow core, of concrete beam with  $7 \times 10 \times 60$  cm hollow core, of concrete beam with  $9 \times 10 \times 60$  cm hollow core, in sequence has decreased by 13,92%; 15,04%; and 18,34% compared to concrete beam without hollow core. Stiffness of concrete beam has decreased because the deflection that was occurred to the concrete beam with hollow core are bigger than concrete beam without hollow core. The value of concrete beam's stiffness with  $5 \times 10 \times 60$  cm hollow core, of concrete beam with  $7 \times 10 \times 60$  cm hollow core, of concrete beam with  $9 \times 10 \times 60$  cm hollow core, in sequence are 580,66 kg/mm; 568,62 kg/mm; dan 566,79 kg/mm. This decreasing is not significant compared to decreasing of its density that occurred.

**Keywords:** beam, density, concrete, hollowcore, stiffness.

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Kebutuhan manusia meningkat seiring dengan perkembangan zaman, pembangunan terjadi di segala bidang ikut meningkat untuk memenuhi berbagai kebutuhan manusia. Terutama pembangunan infrastruktur dengan segala macam penggunaannya.

Bahan yang banyak digunakan dalam pembangunan tersebut adalah beton. Beton banyak digunakan untuk segala macam struktur bangunan, seperti balok, kolom, pelat, dan pondasi. Namun, dalam perjalannya, pembuatan beton yang berasal dari campuran kerikil, semen dan pasir mengakibatkan dampat pada lingkungan. Bahan dasar pembuatan beton yang diambil dan diproses dari alam semakin lama permintaannya semakin banyak seiring peningkatan kebutuhan manusia akan pembangunan. Hal ini menimbulkan kekhawatiran akan terjadinya perusakan lingkungan akibat kegiatan eksplorasi yang berlebihan dan cenderung tidak terkendali dengan baik. Eksplorasi akan pasir dan kerikil yang diambil dari alam untuk pemenuhan permintaan akan bahan bangunan menimbulkan banyak masalah abrasi pada daerah pesisir dan longsor yang terjadi di daerah tambang batu akibat batuan yang dikeruk secara tidak terkontrol.

Berawal dari permasalahan tersebut, perlu adanya inovasi beton ramah lingkungan namun memiliki kinerja yang sama dengan beton pada umumnya. Pengurangan volume beton untuk menghasilkan kinerja beton yang sama diharapkan bisa mengurangi penggunaan bahan campuran beton namun dengan kinerja yang sama dengan beton pada umumnya dan dimungkinkan untuk mengurangi berat struktur beton itu sendiri. Dengan berat struktur bangunan yang lebih kecil sangat memungkinkan untuk memperkecil penggunaan beton pada struktur penyangga bagian bawah bangunan itu sendiri.

Oleh karena itu, perlu adanya penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan lubang pada badan beton terhadap kinerja beton itu sendiri. Hal ini diperkuat dengan keadaan di masyarakat umum yang menjadikan beton sebagai bahan bangunan yang paling diminati.

### Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah teruraikan di atas, maka dapat dirumuskan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut:

- 1) Bagaimana perbandingan berat volume yang terjadi pada balok dengan lubang (*hollow core*) terhadap balok normal tanpa lubang?
- 2) Bagaimana perbandingan kekakuan yang terjadi antara balok dengan lubang (*hollow core*) terhadap balok normal yang tidak dilubangi?

### Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Mengetahui perbandingan berat volume yang terjadi pada balok dengan lubang hollow core terhadap balok normal.
- 2) Mengetahui perbedaan kekakuan yang terjadi antara balok dengan lubang terhadap balok yang tidak dilubangi.

### Batasan Masalah

Agar tujuan dari penelitian ini tercapai secara tepat, maka dilakukan pembatasan masalah sebagai berikut:

- 1) Balok ditumpu oleh 2 tumpuan, yaitu sendi dan rol.
- 2) Pengujian dilakukan di laboratorium untuk mengetahui kekakuan pada balok beton
- 3) Menggunakan mutu beton 20 MPa
- 4) Penempatan lubang berada di tiga titik balok pada badan balok, yaitu pada 40 cm dari tiap tumpuan ke arah tengah bentang balok, dan di tengah bentang balok.

- 5) Styrofoam diisikan ke dalam lubang dalam balok beton yang diasumsikan tidak mempengaruhi kinerja beton dan sebagai pengganti lubang pada balok
- 6) Terdapat tiga lubang yang terletak memanjang badan balok dan berada di bagian tarik beton.

## TINJAUAN PUSTAKA

### Tinjauan Umum

Beton diperoleh dari campuran pasir, kerikil, semen, dan air. Penambahan semen dan air pada pembuatan beton guna untuk merekatkan agregat dan pasir melalui proses reaksi kimia. Untuk mencapai nilai kekuatan dan durabilitas beton yang sesuai dengan perencanaan dipengaruhi oleh banyak faktor yang membentuk suatu fungsi.

Dalam aplikasinya, penggunaan beton pada elemen struktur bangunan diwujudkan dalam banyak komponen, antara lain, balok, kolom, plat, dan pondasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penempatan lubang (*hollow core*) pada badan balok beton terhadap kekakuan balok.

#### Hollow Core

Pengertian hollow core adalah rongga yang terdapat di dalam badan struktur beton. Rongga ini tidak nampak dari luar balok, dalam arti dari penampang luar balok terlihat pejal. Perhitungan analisis kekuatan nominal balok beton berlubang (*hollow core*) ekivalen dengan perhitungan analisis *flens* pada balok, sehingga dapat diasumsikan sebagai balok penampang persegi (Gregor, 1987).

#### Kekakuan

Kekakuan (*stiffness*) merupakan adalah ukuran tegangan yang dibutuhkan untuk mengubah satuan bentuk suatu bahan. Besaran kekakuan suatu bahan adalah modulus elastisitasnya, yang didapat dengan membagi tegangan satuan yang diterima bahan dengan

perubahan satuan bentuk bahan tersebut. Sehingga didapat rumus:

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (1)$$

dimana:

$K$  : Kekakuan

$P$  : Beban

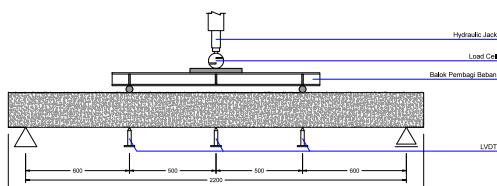
$\delta$  : Lendutan

Menurut SNI 03-2847-2013, momen inersia untuk perencanaan balok beton menggunakan inersia efektif ( $I_e$ ), dimana nilainya diantara  $I_g$  dan  $I_{cr}$ .

#### METODE

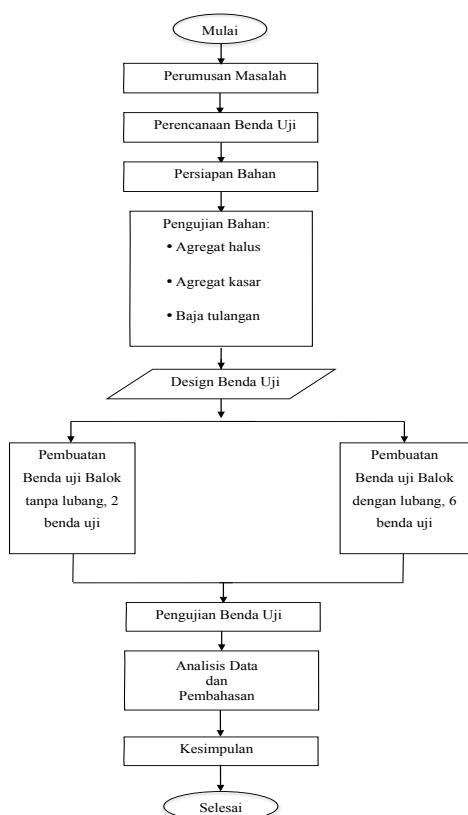
Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Penelitian ini menggunakan benda uji berupa balok beton bertulang dengan perletakan tiga lubang terpisah memanjang badan balok dan balok normal sebagai pembanding atau kontrol. Dengan lubang *hollow core* yang berdimensi 5 x 10 x 60 cm; 7 x 10 x 60 cm; dan 9 x 10 x 60 cm. Benda uji diletakkan diatas dua buah tumpuan sendi dan rol dengan jarak antar tumpuan 2,2 m, tumpuan berada pada jarak 0,1 m dari masing-masing ujung balok beton. Pada jarak 0,6 m dari masing-masing letak tumpuan ke arah tengah bentang balok diletakkan beban terpusat simetris terbagi dua.

Pengujian ini menggunakan tiga buah alat pengukur lendutan (LVDT) untuk mengukur lendutan yang terjadi pada balok yang di pasang dibawah balok sejajar dengan letak beban terpusat simetris, dan satu lagi berapa tepat di tengah bentang balok Pengujian benda uji balok ini akan dilakukan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2 Skema pembebaan benda uji

Pengujian pembebaan dilakukan untuk mendapatkan data beban dan lendutan retakan pertama pada balok yang digunakan untuk mencari nilai kekakuan balok beton menggunakan Persamaan 1.



Gambar 3 Diagram alir penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan diawali dengan pembuatan benda uji untuk pengujian kuat tekan beton berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Beton silinder dibuat dengan mengambil dua buah sampel dari tiap pengecoran.

Setelah itu, beton silinder dilakukan perawatan pasca pengecoran (*curing*) dengan cara direndam dalam air selama 7 hari. Setelah itu, dilakukan pengujian

kuat tekan beton. Pengujian ini dilakukan pada 7 hari dan 28 hari. Uji kuat tekan beton didapatkan hasil pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil pengujian kuat tekan beton

Umur Benda Uji (hari)	Berat Rata-Rata (kg)	Volume Rata-Rata (cm³)	Berat Volume Rata-Rata (kg/m³)	f <sub>c</sub> Terkoreksi Umur 28 Hari (N/mm²)
7	11.166	5303.57	2105.356	23.067
28				22.522

### Angka Pantul Beton

Dalam penelitian ini, dilakukan pula pengujian angka pantul beton dengan menggunakan alat uji *Hammer Test* untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton yang lebih realistik. Berikut merupakan hasil pengujian menggunakan *hammer test*.

Tabel 5 Hasil pengujian angka pantul beton (*hammer test*)

Titik	Kuat Tekan Aktual (N/cm²)	Faktor Koreksi	Kuat Tekan Aktual Terkoreksi (N/mm²)
a	245		20.335
b	270	0.83	22.410
c	265		21.995
<b>Rata-rata</b>			21.580

Berdasarkan Tabel 4 dan 5, didapatkan kuat tekan beton rata – rata beton sebesar  $22,522 \text{ N/mm}^2$  dan  $21,58 \text{ N/mm}^2$ . Maka kuat tekan beton yang digunakan sebagai acuan dalam proses analisis selanjutnya adalah  $21,58 \text{ N/mm}^2$  karena dianggap lebih realistik kepada nilai acuan perencanaan benda uji.

### Pengukuran Balok Beton Bertulang

Sebelum benda uji balok beton melalui proses pengujian pembebaan, dilakukan pengukuran terhadap dimensi dan berat benda uji terlebih dahulu. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan berat volume eksperimen dari balok beton bertulang. Data hasil pengukuran diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Hasil pengukuran dimensi dan berat benda uji balok beton bertulang

Benda Uji	Berat (kg)	Rata-Rata (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)
N/1	226	219	2.4	0.2	0.2
N/2	212		2.4	0.2	0.2
L5/1	197	195.5	2.4	0.205	0.21
L5/2	194		2.4	0.2	0.2
L7/1	194	193	2.4	0.2	0.205
L7/2	192		2.4	0.21	0.2
L9/1	185	185.5	2.4	0.21	0.2
L9/2	186		2.4	0.205	0.2

#### Keterangan:

- N/1 : Benda uji penelitian balok normal ke-1
- N/2 : Benda uji penelitian balok normal ke-2
- L5/1 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 5 x 10 x 60 cm ke-1
- L5/2 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 5 x 10 x 60 cm ke-2
- L7/1 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 7 x 10 x 60 cm ke-1
- L7/2 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 7 x 10 x 60 cm ke-2
- L9/1 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 9 x 10 x 60 cm ke-1
- L9/2 : Benda uji penelitianbalok *hollow core* dimensi 9 x 10 x 60 cm ke-2

#### Berat Volume Balok Beton Bertulang

Setelah didapatkan data dimensi dan berat balok beton, selanjutnya dilakukan analisis berat volume balok beton. Analisis berta volume balok beton dikelompokan menjadi empat sesuai varian lubang pada benda uji yaitu balok beton normal, balok beton dengan lubang *hollow core* 5 cm x 10 cm x 60 cm, balok beton dengan lubang *hollow core* 7 cm x 10 cm x 60 cm, dan balok beton dengan lubang *hollow core* 9 cm x 10 cm x 60 cm. Perhitungan berat volume balok beton diperlihatkan pada Tabel 7, Tabel 8, Tabel 9 dan Tabel 10 berikut:

Tabel 7 Analisis berat volume balok normal

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Berat Volume (kg/m <sup>3</sup> )
N/1	226	2.4	0.2	0.2	0.096	2354.17
N/2	212	2.4	0.2	0.2	0.096	2208.33
<b>Berat Volume Rata-Rata</b>						<b>2281.3</b>

Tabel 8 Analisis berat volume balok *hollow core* dimensi 5 x 10 x 60 cm

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Berat Volume (kg/m <sup>3</sup> )
L5/1	197	2.4	0.205	0.21	0.103	1906.70
L5/2	194	2.4	0.2	0.2	0.096	2020.83
<b>Berat Volume Rata-Rata</b>						<b>1963.8</b>

Tabel 9 Analisis berat volume balok *hollow core* dimensi 7 x 10 x 60 cm

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Berat Volume (kg/m <sup>3</sup> )
L7/1	194	2.4	0.2	0.205	0.098	1971.54
L7/2	192	2.4	0.21	0.2	0.101	1904.76
<b>Berat Volume Rata-Rata</b>						<b>1938.2</b>

Tabel 10 Analisis berat volume balok *hollow core* dimensi 9 x 10 x 60 cm

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Berat Volume (kg/m <sup>3</sup> )
L9/1	185	2.4	0.21	0.2	0.1008	1835.32
L9/2	186	2.4	0.205	0.2	0.0984	1890.24
<b>Berat Volume Rata-Rata</b>						<b>1862.8</b>

#### Kekakuan Teoritis

Kekakuan dapat dihitung dengan memasukkan nilai modulus elastisitas dan momen inersia penampang ke dalam rumus Persamaan 1 dengan kondisi tumpuan sendi-rol dan beban terpusat di  $\frac{6}{22}$  panjang bentang dan  $\frac{1}{2}$  panjang bentang. Persamaan lendutan yang digunakan, didapat menggunakan metode *conjugate beam*. Rumus perhitungan nilai kekakuan teroritis balok titik 1 dan 3 adalah:

$$k_{1 \& 3} = \frac{P}{\Delta} \quad (2)$$

$$k_{1 \& 3} = \frac{63 \cdot PL^3}{5324 EI_e}$$

$$k_{1 \& 3} = \frac{5324 EI_e}{63 L^3}$$

Rumus perhitungan nilai kekakuan teroritis balok titik 2 adalah:

$$k_2 = \frac{P}{\Delta}$$

$$k_2 = \frac{327 \cdot PL^3}{21296 EI_e}$$

$$k_2 = \frac{21296 EI_e}{327 L^3} \quad (3)$$

Keterangan:

$k_{1\&3}$  : kekakuan pada titik 1 dan 3 pada bentang balok

$k_2$  : kekakuan pada tengah bentang balok

P : beban yang bekerja

L : panjang bentang balok

E : modulus elastisitas beton

$I_e$  : momen inersia penampang efektif

Sedangkan menurut SNI 03-2847, untuk benda uji berkisar diantara 1500-2500 kg/m<sup>3</sup> maka menghitung modulus elastisitas beton (E), karena berat volume ( $w_c$ ) menggunakan Persamaan 4.

$$E = W_c^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'c} \quad (4)$$

dengan:

E = Modulus elastisitas beton (MPa)

$w_c$  = Berat volume beton (kg/m<sup>3</sup>)

$f'c$  = Kuat tekan beton (MPa)

Untuk perhitungan lendutan pada saat kondisi lentur disyaratkan menggunakan Inersia penampang efektif ( $I_e$ ) sesuai dengan SNI-03-2847-2013. Digunakannya  $I_e$  dalam perhitungan lendutan dimaksudkan agar bisa mendapatkan lendutan yang lebih realistik. Dikatakan lebih realistic karena lendutan yang nantinya didapat setelah analisis merupakan lendutan yang terjadi pada keadaan elastis. Rumus perhitungan  $I_e$  adalah sebagai berikut:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \times I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] \times I_{cr} \quad (5)$$

keterangan:

$I_e$  : momen inersia penampang efektif

$I_{cr}$  : momen inersia penampang *crack* transformasi

$I_g$  : momen inersia pernampang gross

$M_a$  : momen maksimum pada komponen struktur balok saat lendutan dihitung

$M_{cr}$  : momen pada saat timbul *crack* yang pertama kali

Setelah didapatkan nilai  $E$  dan  $I_e$  masing-masing balok selanjutkan dihitung nilai kekakuan masing-masing balok beton menggunakan Persamaan 2 dan Persamaan 3. Berikut merupakan hasil perhitungan kekakuan teoritis balok beton.

Tabel 11 Hasil perhitungan kekakuan teoritis balok beton

Benda Uji	Panjang Balok (mm)	E (kg/mm <sup>2</sup> )	$I_e$ (mm <sup>4</sup> )	Kekakuan Teoritis		
				1	2	3
N/1		2281.655	11868787.82	214.92	165.63	214.92
N/2		2072.961	12115885.08	199.33	153.61	199.33
L5/1		1663.094	13556188.66	178.93	137.89	178.93
L5/2	2200	1814.638	13173294.11	189.72	146.21	189.72
L7/1		1748.655	12981690.72	180.16	138.84	180.16
L7/2		1660.562	13189635.58	173.83	133.96	173.83
L9/1		1570.583	12964771.92	161.61	124.54	161.61
L9/2		1641.614	12843831.78	167.34	128.96	167.34

### Kekakuan Eksperimen

Setelah didapatkan data beban dan lendutan dari hasil pengujian maka dapat dilakukan perhitungan kekakuan balok beton. Perhitungan kekakuan balok beton menggunakan beban dan lendutan saat balok mengalami retakan pertama kali. Kekakuan merupakan perbandingan antara beban dengan lendutan pada saat balok beton dalam keadaan elastis penuh atau dapat diidentifikasi sebagai kemiringan garis grafik hubungan beban dan lendutan pada tahap praretak. Perhitungan kekakuan eksperimen balok menggunakan rumus Persamaan 1. Tabel 12 berikut menampilkan hasil perhitungan kekakuan eksperimen balok beton.

Tabel 12 Hasil perhitungan kekakuan eksperimen balok beton

Benda Uji	Beban Maksimum Elastis (kg)	Lendutan Eksperimen			Kekakuan Eksperimen		
		Titik 1 (mm)	Titik 2 (mm)	Titik 3 (mm)	Titik 1 (kg/mm)	Titik 2 (kg/mm)	Titik 3 (kg/mm)
N/1	3350	7.01	8.17	4.76	477.889	410.037	704.522
N/2	2850	4.59	5.84	3.63	620.915	488.014	785.124
L5/1	2150	3.31	4.88	3.67	649.547	440.574	586.630
L5/2	1600	2.59	3.39	2.23	617.761	471.976	717.489
L7/1	2400	4.08	5.60	3.34	588.235	428.571	718.563
L7/2	2000	3.81	4.73	2.75	524.934	422.833	728.597
L9/1	1300	2.30	2.89	1.58	565.217	449.827	825.397
L9/2	1400	2.89	3.39	2.11	484.429	412.979	662.879

## Pembahasan

Hasil perhitungan dari kekakuan teoritis dan kekakuan eksperimen selanjutnya dilakukan pengambilan rata-rata untuk mendapatkan nilai perbandingan.

Tabel 13 Hasil kekakuan teoritis rata-rata dan kekakuan eksperimen rata-rata

Benda Uji	Kekakuan Teoritis			Kekakuan Aktual			Rata-Rata (kg/mm)
	1 (kg/mm)	2 (kg/mm)	3 (kg/mm)	1 (kg/mm)	2 (kg/mm)	3 (kg/mm)	
N/1	225,23	173,57	225,23	197,77	477,889	410,037	704,522
N/2	203,06	156,49	203,06	620,915	488,014	785,124	581,08
L5/1	188,36	145,16	188,36	178,59	649,547	440,574	586,630
L5/2	198,38	152,88	198,38	617,761	471,976	717,489	580,66
L7/1	186,71	143,89	186,71	169,67	588,235	428,571	718,563
L7/2	180,71	139,27	180,71	524,934	422,833	728,597	568,62
L9/1	166,15	128,04	166,15	565,217	449,827	825,397	
L9/2	172,02	132,57	172,02	156,16	484,429	412,979	662,879
							566,79

Pada Tabel 14 berikut menunjukkan persentase perbandingan kekakuan teoritis rata-rata dengan kekakuan eksperimen rata-rata balok beton. Kekakuan rata-rata ini didapat dengan melakukan perhitungan rata-rata terhadap kekakuan setiap titik tinjau pada masing-masing benda uji yang kemudian dicari persentase perbandingannya terhadap balok normal sebagai kontrol menggunakan rumus persamaan:

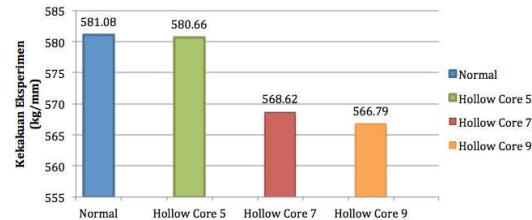
$$\text{Nilai Perbandingan}(\%) = \frac{k_{\text{normal}} - k_{\text{hollow core}}}{k_{\text{normal}}} \times 100\% \quad (6)$$

Tabel 14 Persentase perbandingan kekakuan rata-rata

Benda Uji	Kekakuan Teoritis Rata-Rata (kg/mm)	Perbandingan Selisih (%)	Kekakuan Aktual Rata-Rata (kg/mm)	Perbandingan Selisih (%)
	Rata-Rata (kg/mm)		(%)	
N/1	197,77	-	581,08	-
N/2	178,59	9,699	580,66	0,072
L5/1	178,59	9,699	580,66	0,072
L5/2	169,67	14,212	568,62	2,144
L7/1	169,67	14,212	568,62	2,144
L7/2	156,16	21,040	566,79	2,460
L9/1	156,16	21,040	566,79	2,460
L9/2	156,16	21,040	566,79	2,460

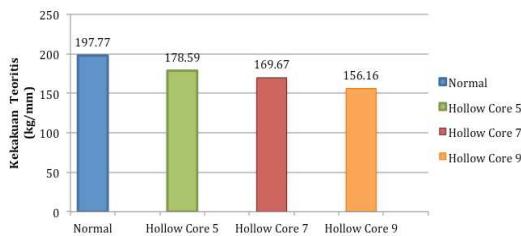
Berdasarkan Tabel 14 diatas dapat diketahui rata-rata kekakuan eksperimen balok beton normal adalah sebesar 581,08 kg/mm, sedangkan rata-rata kekakuan eksperimen balok hollow core 5 x 10 x 60 adalah sebesar 580,66 kg/mm, rata-rata kekakuan eksperimen balok hollow core 7 x 10 x 60 sebesar 568,62 kg/mm, dan rata-rata kekakuan eksperimen balok hollow core 9 x 10 x 60 adalah sebesar 566,79 kg/mm. Sehingga pada Tabel 13 dapat diketahui bahwa balok beton normal memiliki kekakuan paling besar dibanding balok hollow core 5 x 10 x 60, balok hollow core 7 x 10 x 60 dan balok hollow core

9 x 10 x 60. Persentase selisih nilai kekakuan rata-rata balok dengan lubang (*hollow core*) dengan balok normal tanpa lubang relatif sangat kecil, 0,072%, 2,144% dan 2,460%. Terjadinya pengurangan berat volume tersebut terjadi karena adanya pengurangan volume beton akibat lubang yang ada di dalam balok tersebut.Untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Kekakuan eksperimen rata-rata balok beton

Nilai kekakuan balok beton dari hasil perhitungan teoritis memiliki nilai yang lebih kecil daripada hasil pengujian eksperimen. Berdasarkan hasil perhitungan teoritis nilai kekakuan balok normal sebesar 191,29 kg/mm, nilai kekakuan teoritis balok hollow core 5 x 10x60 sebesar 170,23 kg/mm, nilai kekakuan teoritis balok beton hollow core 7 x 10x60 sebesar 163,46 kg/mm dan, besaran nilai kekakuan teoritis balok beton hollow core 9 x 10x60 adalah 151,90 kg/mm. Secara teoritis, dapat dilihat bahwa nilai kekakuan balok normal merupakan yang terbesar dibandingkan nilai kekakuan teoritis balok hollow core. Untuk nilai kekakuan dari yang terbesar selanjutnya didapat oleh balok hollow core 5 x 10x60, balok hollow core 7 x 10x60 dan yang terkecil balok hollow core 9 x 10x60. Hasil perhitungan teoritis ini menunjukkan volume lubang (*hollow core*) pada badan balok mempengaruhi besaran nilai kekakuan balok. Semakin besar volume lubang, semakin kecil kekakuan balok dibandingkan dengan balok normal tanpa lubang.



Gambar 5 Kekakuan eksperimen rata-rata balok beton

Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh hasil pengujian, dimana kekakuan balok normal, lebih kecil dibandingkan balok balok *hollow core* 5 x 10x60, dan nilai kekakuan balok balok *hollow core* 9 x 10x60 lebih besar dri pada nilai kekakuan balok *hollow core* 7 x 10x60. Hal ini disebabkan hasil pembuatan benda uji balok tidak mencapai kondisi ideal sesuai perencanaan. Pada tahap perencanaan struktur balok ini dianggap balok bersifat monolit, sedangkan pada pelaksanaan pembuatan benda uji balok, struktur balok ini tidak dapat dipastikan bersifat monolit, dan pada saat pelaksanaan eksperimen mutu beton tidak sesuai dengan mutu yang direncanakan, serta terjadinya perpindahan letak *styrofoam* sebagai bahan pengisi rongga pada badan beton. Selain itu pada saat perawatan beton benda uji mendapat tekanan dari gaya luar sehingga beton sudah mendapatkan gaya terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian, gaya luar yang diterima balok disaat umur beton belum cukup matang berpengaruh pada struktur beton yang selanjutnya mempengaruhi kinerja beton itu sendiri.

## PENUTUP

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Balok beton dengan lubang (*hollow core*) memiliki berat volume yang lebih kecil dibandingkan dengan balok beton normal tanpa lubang.
2. a) Dari pengujian di laboratorium balok beton dengan lubang (*hollow core*) menghasilkan lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan

balok beton normal tanpa lubang. Pada perhitungan lendutan secara teoritis balok beton dengan lubang (*hollow core*) dimensi 5 x 10 x 60 cm menghasilkan nilai lendutan yang lebih tinggi dibandingkan balok beton normal tanpa lubang. hal yang berbeda ditunjukkanbeton dengan lubang (*hollow core*) dengan dimensi 7 x 10 x 60 cm, dan balok beton dengan lubang (*hollow core*) berdimensi 9 x 10 x 60 cm menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan beton normal tanpa lubang.

- b) Balok beton normal tanpa lubang rata-rata dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan rata-rata balok beton dengan lubang (*hollow core*).
- c) Beban yang diperlukan untuk menghasilkan retakan pertama pada badan balok paling besar terjadi pada balok normal tanpa lubang, dibandingkan dengan beton dengan lubang (*hollow core*). Hal yang sama terjadi pada lendutan saat retakan pertama terjadi.
- d) Akibat lendutan pada saat retakan pertama balok beton dengan lubang (*hollow core*) lebih besar daripada lendutan retakan pertama balok beton normal tanpa lubang menyebabkan adanya pengaruh terhadap kekakuananya. Kekakuan balok beton dengan lubang (*hollow core*) lebih kecil dibandingkan kekakuan balok beton normal tanpa, namun perbedaan tidak signifikan..

### Saran

Dalam pelaksanaan penelitian ini peneliti menyadari masih banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik pada penelitian selanjutnya, peneliti memberikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Melakukan penelitian pengamatan mengenai pengaruh waktu

- pembebaan terhadap kekakuan balok dengan lubang (*hollow core*).
2. Apabila penggunaan *styrofoam* sebagai bahan pengisi rongga *hollow core* masih dirasa memungkinkan, perlu diperhatikan untuk penempatannya. Pengikatan pada badan *styrofoam* ketika pemasangan sangat dianjurkan untuk menjaga *styrofoam* yang digunakan tidak berpindah posisi.
  3. Perencanaan dan pelaksanaan campuran beton (*mix design*) perlu diperhatikan lebih teliti agar campuran yang diperoleh sesuai dengan keperluan dan lebih efisien.
  4. Perencanaan dimensi benda uji agar lebih diperhatikan kembali demi efisiensi waktu dan usaha saat penelitian dilaksanakan
  5. Perlakuan terhadap bahan material pembuatan benda uji lebih dimaksimalkan untuk mengurangi potensi faktor pengganggu campuran beton, misalnya hujan.
  6. Pengawasan saat kegiatan pembesian dan pembuatan beesting perlu diperhatikan secara seksama agar mutu benda uji terkontrol dengan baik
  7. Proses pengecoran, terutama pemanasan perlu diperhatikan dengan jeli untuk menghindari beton yang kurang sempurna (terdapat ronggarongga yang tidak terjangkau campuran beton segar)
  8. Pelaksanaan kegiatan perawatan (*curing*) pasca-pengecoran agar lebih dimaksimalkan, untuk mencegah timbul retak pada badan beton sebelum memulai pengujian.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amanto, dan Daryanto. 1999. *Ilmu Bahan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). C/270/2004 dan C-780. *Standard Pengujian Kuat Tekan Benda Uji*. USA.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). C/00/2005. *Standard Pengujian Benda Uji*. USA.

- American Society for Testing and Materials (ASTM). C/20/2005. *Standard Pengujian Penyerapan air Benda Uji*. USA.
- Amri, Sjafei. 2005. *Teknologi Beton A-Z*. Yayasan John Hi-Tech Idetama Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 1996. *Metode Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Balok Uji Sederhana yang Dibebani Terpusat Langsung* (SNI 03-4154-1996). Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. *Spesifikasi Agregat Ringan Untuk Beton Ringan Struktural* (SNI 03-2461-2002). Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. 1996. *Metode Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Balok Uji Sederhana yang Dibebani Terpusat Langsung* (SNI 03-4154-1996). Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. (2013). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*. 2013.
- Nawy, Edward G. *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar*. Dialihbahasakan oleh Bambang Suryoatmono. Vol. 4. 4 vol. Bandung, Jawa Barat: PT. Refika Aditama, 2010.
- Nugraha, Paul, dan Antoni. *Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*. Disunting oleh Fl. Sigit Suyantoro. Yogyakarta, Yogyakarta: CV. Andi Offset, 2007.
- Dipohusodo, Istimawan. *Struktur Beton Bertulang*. Vol. 2. Jakarta, DKI Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 1996.

- Nurlina, Siti. *Struktur Beton*. Malang, Jawa Timur: Bargie Media, 2008.
- Indrawahyuni, Ir. Herlin, Prof. Dr. Ir. Sri Murni Dewi, dan Prastumi, Ir. MT. *Mekanika Bahan Untuk Teknik Sipil*. Malang, Jawa Timur: Bargie Media, 2010.
- Rahadyanto. 2013. *Studi Eksperimental Balok Berongga dengan Pemanfaatan Limbah Botol Pet.* Jurnal Penelitian Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Jakarta
- Susanto, Yamin. 2013. *Prediksi Nilai Kekakuan Lentur pada Balok Beton Bertulang*. Jurnal Konstruksi Volume 4 Nomor 2 Universitas Tarumanagara: Jakarta
- Ujianto, Muhammad. 2006. *Lendutan Dan Kekakuan Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Segi Empat Di Badan*, Jurnal Eco Rekayasa, Teknik Sipil UMS: Semarang.
- Wang, Salmon, Chu-Kia., Charles G. 1993. *Disain Beton Bertulang, Jilid 1*. Jakarta: Erlangga
- Wang, Salmon, Chu-Kia., Charles G.. 1993. *Disain Beton Bertulang, Jilid 2*. Jakarta: Erlangga