

ANALISIS DEFORMASI STRUKTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN LUBANG HOLLOW CORE PADA TENGAH BALOK

Mustofa Alaydrus, Siti Nurlina, Christin Remayanti N

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

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

Email: musidrus20@gmail.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.

Dalam penelitian ini, akan diuji deformasi struktur balok beton bertulang dengan lubang *hollow core* di tengah balok. Pengujian ini difokuskan pada struktur balok. Dalam penelitian ini, digunakan benda uji balok penampang persegi dengan tiga buah lubang persegi dengan arah memanjang balok di tengah badan balok. Untuk memudahkan dalam proses pembuatan benda uji, maka lubang diisi dengan *styrofoam* yang diletakkan dibawah garis batas pemisah bagian tarik dan tekan penampang (garis netral). Dengan asumsi, penggunaan beton di bagian tarik struktur balok hanya untuk mendistribusikan gaya yang diterima oleh struktur balok tersebut akibat beban.

Hasil dari penelitian menunjukkan berat volume balok beton dengan lubang 5 x 10 x 60 cm, balok beton dengan lubang 7 x 10 x 60 cm, dan balok beton dengan lubang 9 x 10 x 60 cm berturut-turut mengalami penurunan sebesar 14,10%; 15,17%; dan 18,47% dibandingkan dengan balok beton tanpa lubang. Deformasi balok beton mengalami naik turun di nilai deformasinya karena beban maksimum yang dapat diterima berbeda, sehingga nilai deformasi pada balok beton dengan lubang 7 x 10 x 60 cm yang mengalami nilai deformasi paling besar diantara balok beton dengan lubang lainnya. Nilai rata-rata terbesar deformasi balok beton berlubang 5 x 10 x 60 cm, 7 x 10 x 60 cm, dan 9 x 10 x 60 cm berturut-turut sebesar 4 mm; 5,16 mm; dan 3,14 mm. Nilai deformasi ini tidak signifikan dibandingkan dengan penurunan berat volume yang terjadi.

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

ABSTRACT

Human's needs for the building and infrastructure every year increasing. This things directly have an impact to the needs of raw material's building that also increasing. Efficiency, Enhancement and Innovation about it has been something to be concern about. Construction development in the past few decades has ben very rapid. On progress, this makes concrete to be building materials most in demand. Most of the building made from concrete on every part of the structure. Concrete is obtained from the mixture of the sand, gravel and cement. If the using of it is not well controlled, feared would occur environmental damage caused by excessive explorations.

On this Study, will be tested abput Deformation Structure reinforced concrete beams with Hollow Core at the middle of beams. This test focused on beams's structure by the way, used a square cross-section beam specimen with three square holes and longitudinal direction beams in middle of the body beams. To getting the easy way, then the hole is filled with Styrofoam, placed under tensile boundaries and hit a cross-section. Assuming, the use of concrete in parts of pull beam structure only to distribute the force received by the beam structure due to the load.

Result from the Study, showing that volume weight of concrete beams with the hole 5 x 10 x 60 cm, concrete beams with the hole 7 x 10 x 60 cm and concrete beams with the hole 9 x 10 x 60 cm has been successively decreased by 14,10% ; 15,17% ; and 18,47% compared with concrete beams with no holes. Concrete beams deformation experienced ups and downs in the value of the deformation because the maximum load that can be received differently. So that, Deformation Values on concrete beams with the hole 7 x 10 x 60 cm experienced the largest deformation values among the other concrete beams with the others hole. The average value of the Deformation of hollow concrete beams is 5 x 10 x 60 cm, 7 x 10 x 60 cm and 9 x 10 x 60 cm respectively for 4 mm; 5,16 mm; and 3,14 mm. This deformation values is unsignificant if compared with weight volume that occurred before.

Keywords : Beams, Weight Volume, Concrete, Hollow Core, Deformation

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Balok sebagai salah satu elemen struktur mempunyai fungsi yang sangat penting, yaitu menahan beban-beban di atasnya berupa beban plat lantai, beban hidup, beban mati dan berat sendiri balok. Pembuatan lubang segi empat dibadan balok beton bertulang akan mengurangi luasan beton sehingga akan mengurangi kekuatan dalam menahan beban. Pengurangan luas tersebut menuntut analisis yang baik sehingga dapat direncanakan sebuah balok berlubang yang mampu menahan beban-beban rencana, pelaksanaan serta ketika struktur dalam keadaan existing (Muhammad Ujianto: 2006).

Balok dengan lubang (balok hollow core) memiliki berat yang lebih ringan daripada balok tanpa lubang, maka deformasi yang muncul pada balok berlubang akan lebih besar dibandingkan dengan balok yang tanpa lubang karena lendutan yang terjadi pada balok berlubang lebih besar daripada balok tanpa lubang.

Dilihat dalam hal ini, pengaruh berat struktur bangunan sangat tinggi. Terutama dalam perencanaan anggaran dan biaya. Maka untuk mengefisiensikan berat struktur bangunan dilakukan dengan mengurangi volume beton pada beberapa struktur. Sehingga berkurangnya berat struktur bangunan tersebut. Akan tetapi, dengan mengurangi volume beton juga mengakibatkan berkurangnya kekuatan struktur tersebut.

Dalam penelitian ini, pengujian difokuskan pada struktur balok. Dalam pengujian ini, digunakan benda uji balok beton penampang persegi dengan tiga buah lubang persegi dengan arah memanjang balok di tengah struktur balok beton. Lubang ini diisi oleh *styrofoam*, diletakkan dibawah garis netral penampang, tepatnya pada bagian tarik. Dengan asumsi, penggunaan beton pada bagian tarik kurang efisien, penggunaan bahan beton pada bagian tarik hanya untuk mendistribusikan gaya yang diterima oleh struktur balok tersebut.

Rumusan Masalah

Dalam tugas akhir ini, akan diuji penggunaan struktur beton ringan dengan

membuat lubang *hollow core* di dalam balok. Pengujian difokuskan pada struktur balok. Dalam pengujian ini, digunakan benda uji balok beton penampang persegi dengan tiga buah lubang persegi dengan arah memanjang balok di tengah struktur balok beton. Lubang ini diisi oleh *styrofoam*, diletakkan dibawah garis netral penampang, tepatnya pada bagian tarik. Hal ini dilakukan dengan asumsi, penggunaan beton pada bagian tarik kurang efisien dan penggunaan bahan beton pada bagian tarik hanya untuk mendistribusikan gaya yang diterima oleh struktur balok tersebut.

- Bagaimana deformasi yang terjadi pada benda uji dengan lubang searah memanjang balok tersebut dan dibandingkan dengan balok yang tidak dilubangi.
- Bagaimana perbandingan berat volume yang terjadi pada balok dengan lubang hollow core terhadap balok normal.

Tujuan Penelitian

- Mengetahui perbandingan berat volume balok persegi beton bertulang dengan lubang *hollow core* pada tengah penampang balok terhadap balok normal.
- Mengetahui perbandingan deformasi balok beton bertulang dengan lubang *hollow core* pada tengah penampang balok terhadap balok normal.

Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain :

1. Balok ditumpu oleh 2 tumpuan, yaitu sendi dan rol.
2. Panjang balok yang digunakan 2,4 m, dan penampang balok adalah persegi.
3. Pengujian dilakukan untuk mengetahui deformasi balok.
4. Penggunaan mutu beton K- 225
5. Penempatan lubang berada di tiga titik balok, yaitu pada 40 cm dari tiap tumpuan ke arah tengah bentang balok, dan di tengah bentang balok.
6. Untuk membentuk *hollow core*, beton diisi dengan *styrofoam*, yang diasumsikan sebagai lubang pada balok beton bertulang.
7. Lubang diisi styrofoam, yang diasumsikan sebagai lubang pada balok beton bertulang

TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan Umum

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang telah umum digunakan untuk bangunan gedung, jalan, jembatan, dan lain-lain. Beton merupakan satu kesatuan yang *homogen*. Beton didapat dengan cara mencampur agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), atau jenis agregat lain dan air, dengan semen portland atau semen hidrolik yang lain, kadang-kadang dengan bahan tambahan (*additif*) yang bersifat kimiawi ataupun fisikal pada perbandingan tertentu, sampai menjadi satu kesatuan yang *homogen*. Campuran tersebut akan mengeras seperti batuan. Pengerasan terjadi karena peristiwa reaksi kimia antara semen dengan air. (ilmusipil.com).

Beton adalah suatu campuran yang berisi pasir, kerikil atau agregat lainnya yang dicampurkan menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air yang akan membentuk campuran itu menjadi mirip seperti batu. Dapat digunakan untuk pondasi, balok, plat lantai, plat cangkang dan lain-lain. (ilmu-konstruksi.blogspot.com).

Hollow Core

Analisis bagian berongga pada balok beton bertulang dengan hollow core ekuivalen dengan analisis flens untuk menghitung momen nominalnya. Sehingga, dalam perencanaan momen nominal benda uji sebelumnya, garis netral balok terletak pada flens balok atau di atas lubang. Untuk perhitungan momen nominalnya, diasumsikan sebagai balok persegi biasa. (MacGregor, 1987)

Deformasi

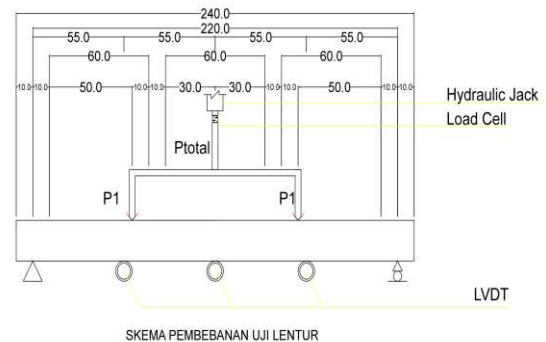
Deformasi adalah salah satu kontrol kestabilan suatu elemen balok terhadap kekuatannya. Biasanya deformasi dinyatakan sebagai perubahan bentuk elemen struktur dalam bentuk lengkungan (q) dan perpindahan posisi dari titik di bentang balok ke titik lain, yaitu defleksi (v) akibat beban di sepanjang bentang balok tersebut (Dody Brahmantyo).

Deformasi pada balok sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi.

Konfigurasi yang diasumsikan dengan deformasi permukaan netral dikenal sebagai kurva elastis dari balok

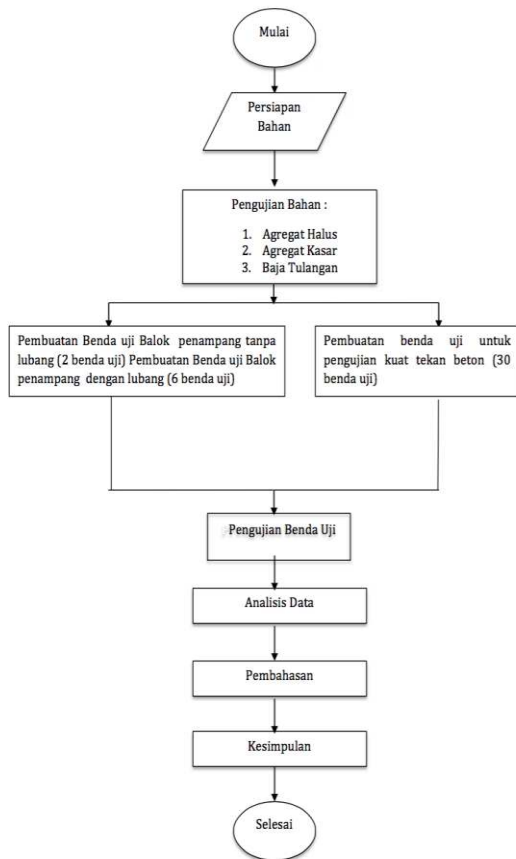
METODE

Metode dalam penelitian ini adalah eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Penelitian ini menggunakan balok beton bertulang dengan lubang *hollow core* ukuran 5 x 10 x 60 cm, 7 x 10 x 60 cm dan 9 x 10 x 60 cm sebagai benda uji dan balok normal sebagai pembanding. Balok benda uji diletakkan diatas dua buah tumpuan sendi-rol dengan bentang 2,2 m. Beban terpusat simetris diletakkan pada 0,6 m dari masing - masing tumpuan ke arah tengah bentang. Pengujian balok ini akan dilakukan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Pembebanan

Pembebanan dilakukan untuk mengetahui beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji, sehingga dapat diketahui kuat lentur maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyerapan Agregat Halus

Untuk agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir yang berasal dari daerah Blitar, Jawa Timur. Setelah dilakukan pengujian, pasir ini termasuk kedalam zona 2 ASTM dan didapatkan hasil pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Penyerapan Agregat Halus

Penyerapan Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah yang didapatkan dari daerah Ngantang, Kabupaten Malang. Hasil analisis gradasi ayakan agregat kasar ini termasuk ke dalam zona agregat maksimal 10 mm. Setelah dilakukan pengujian didapatkan hasil pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Penyerapan Agregat Kasar

Keterangan	Hasil Penelitian
Modulus Kehalusan	3.59
Absorpsi	3.22
Berat Jenis SSD	2.07

Kuat Tekan Beton

Pembuatan benda uji untuk pengujian kuat tekan beton, diambil 2 buah sampel dari tiap pengecoran. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Untuk perawatan benda uji beton atau *curing* dilakukan dengan cara direndam dalam air selama 7 hari. Setelah itu, dilakukan pengujian kuat tekan beton. Pengujian ini dilakukan pada 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Uji

Keterangan	Hasil Penelitian
Modulus Kehalusan	7.28
Absorpsi	2.038
Berat Jenis SSD	2.213

kuat tekan beton terlampir pada lampiran dan didapatkan hasil pada Tabel 4

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Berat Rata-Rata	Volume Rata-Rata	Berat Volume Rata-Rata	f'c
Kg	m ³	Kg/m ³	N/mm ²
11.166	0.00530	2105.356	23.067

Berdasarkan Tabel 4, didapatkan berat volume rata – rata beton sebesar 2105.356 Kg/m³. Hal ini dikarenakan penggunaan agregat kasar dengan ukuran maksimum 10 mm, sehingga berat volume yang dihasilkan tidak mencapai 2400 Kg/m³

Pengukuran Balok Beton Bertulang

Setelah dilakukan pengukuran terhadap dimensi balok beton bertulang. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan berat volume eksperimen dari balok beton bertulang. Data hasil pengukuran diperlihatkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengukuran Balok

Benda Uji	Berat (kg)	Rata-Rata (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Angka Koreksi (%)
N/1	226	219	2.4	0.2	0.2	0
N/2	212		2.4	0.2	0.2	0
L5/1	182.23	188.11	2.4	0.2	0.2	7.5
L5/2	194		2.4	0.2	0.2	0
L7/1	189.15	185.78	2.4	0.2	0.2	2.5
L7/2	182.4		2.4	0.2	0.2	5
L9/1	175.75	178.55	2.4	0.2	0.2	5
L9/2	181.35		2.4	0.2	0.2	2.5

Keterangan:

- N.1 = Benda uji balok normal ke-1
- N.2 = Benda uji balok normal ke-2
- L5.1 = Benda uji balok hollow core 5 x 10 x 60 cm ke-1
- L5.2 = Benda uji balok hollow core 5 x 10 x 60 cm ke-2
- L7.1 = Benda uji balok hollow core 7 x 10 x 60 cm ke-1
- L7.2 = Benda uji balok hollow core 7 x 10 x 60 cm ke-2
- L9.1 = Benda uji balok hollow core 9 x 10 x 60 cm ke-1
- L9.2 = Benda uji balok hollow core 9 x 10 x 60 cm ke-2

Berat Volume Balok Beton Bertulang

Setelah data berat dan dimensi balok beton didapatkan, selanjutnya dilakukan analisa berat volume balok beton. Untuk menganalisa berat volume balok beton dibagi menjadi empat 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 6, Tabel 7, Tabel 8 dan Tabel 9 berikut:

Tabel 6. Analisa Berat Volume Balok Normal

No	Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m ³)	Berat Volume (kg/m ³)
1	N/1	226	2.4	0.2	0.2	0.096	2354.17
2	N/2	212	2.4	0.2	0.2	0.096	2208.33
Berat Volume Rata-Rata							2281.3

Tabel 7. Analisa Berat Volume Balok hollow core 5 x 10 x 60 cm

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m ³)	Berat Volume (kg/m ³)
L5/1	182.23	2.4	0.2	0.2	0.096	1898.18
L5/2	194	2.4	0.2	0.2	0.096	2020.83
Berat Volume Rata-Rata						1959.5

Tabel 8. Analisa Berat Volume Balok hollow core 7 x 10 x 60 cm

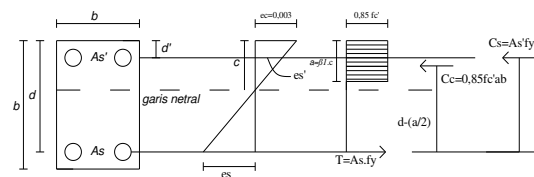
Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m ³)	Berat Volume (kg/m ³)
L7/1	189.15	2.4	0.2	0.2	0.096	1970.31
L7/2	182.4	2.4	0.2	0.2	0.096	1900.00
Berat Volume Rata-Rata						1935.2

Tabel 9. Analisa Berat Volume Balok hollow core 9 x 10 x 60 cm

Benda Uji	Berat (kg)	Panjang (m)	Lebar (m)	Tinggi (m)	Volume (m ³)	Berat Volume (kg/m ³)
L9/1	175.75	2.4	0.2	0.2	0.096	1830.73
L9/2	181.35	2.4	0.2	0.2	0.096	1889.06
Berat Volume Rata-Rata						1859.9

Kuat Lentur Teoritis

Untuk perhitungan beban maksimum balok, dilakukan dengan perhitungan penampang baloknya dengan mempertimbangkan kuat lentur balok yang terjadi. Balok menggunakan tulangan tunggal, maka dari itu, berlaku keseimbangan gaya, yaitu gaya tarik = gaya tekan. Di mana gaya tarik (*tension* = T) diberikan oleh baja tulangan, sedangkan gaya tekan (*compression* = C) diberikan oleh beton didaerah tekan (*compression concrete* = Cc).



$$T = As \cdot fy \longrightarrow T = (453) \cdot (311) = 14075 \text{ kg}$$

$$Cc = (0.85) \cdot f'c \cdot a \cdot b : Cc = 0.85 \cdot (230.8) \cdot 200 \cdot a = 3923.6 a$$

$$Cc = T$$

$$3923.6 a = 14075$$

$$a = 38.378 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1 \cdot c \longrightarrow c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{38.378}{0.85} = 45.151 \text{ mm}$$

dimana :

c = jarak serat tekan terluar ke garis normal

β_1 = konstanta yang merupakan fungsi dari

kelas kuat beton

Standar SNI 03-2847-2002 menetapkan nilai β diambil 0,85 untuk $f'c < 30$ Mpa. Untuk beton dengan nilai kuat tekan diatas 30 Mpa maka harus direduksi 0,005 untuk setiap kelebihan 7 Mpa di atas 30 Mpa, tetapi tidak boleh kurang dari 0.65

Karena garis netral berada pada flens, maka perhitungan momen nominalnya menggunakan

perhitungan momen nominal balok persegi biasa.

Kontrol :

$$d = 168 \text{ mm}$$

$$d' = 32 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s = c \cdot \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{168 - 45.15}{45.15} = 0.0089$$

Maka :

$$E_s = 200.000 \text{ Mpa} = 200.000 \text{ N/mm}^2$$

(Modulus Elastisitas Baja = 2×10^5 Mpa)

$$f_s = \epsilon_s \cdot E_s = 0.0089 \cdot 200.000 =$$

1788.453 Mpa > 311 Mpa (baja sudah leleh)

$$C_c = 0,85 \cdot (23.08) \cdot (200) \cdot (38.378)$$

$$= 140794 \text{ kg}$$

$$M_n = C_c \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 140794 \cdot \left(168 - \frac{45.15}{2} \right)$$

$$= 20951772.716 \text{ Nmm}$$

$$= 2095.117 \text{ kgm}$$

$$M_u = M_n$$

$$M_u = 2095.117 \text{ kgm}$$

$$P_u = M_u / l_p = 2095.117 \text{ kgm} / 0.3 \text{ m} =$$

$$6983.924 \text{ kg}$$

Perhitungan kapasitas lentur dapat dilihat pada Tabel 10

Tabel 10. Tabel Perhitungan Kapasitas Lentur Teoritis

Benda Uji Balok	M nominal Kgm	P Nominal Kg
Normal	2095.117	6983.924
Hollow Core 5 x 10 x 60 cm	2095.117	6983.924
Hollow Core 7 x 10 x 60 cm	2095.117	6983.924
Hollow Core 9 x 10 x 60 cm	2095.117	6983.924

Kuat Lentur Eksperimen

Setelah didapatkan data beban maksimum dari hasil pengujian maka dapat dilakukan perhitungan momen yang terjadi pada benda uji. Perhitungan momen menggunakan analisis statis tertentu dengan perhitungan statika

gelagar sederhana. Berikut adalah perhitungan momen maksimum :

$$\Sigma M_A = 0$$

$$(-R_B)(L) + 0.5P(l_1+l_2) + 0.5P(l_3) = 0$$

$$(-R_B)(2.2) + 0.5P(1.6) + 0.5P(0.6) = 0$$

$$R_B = \frac{0.5P(1.6+0.6)}{2.2}$$

$$R_B = 0.5P$$

$$\Sigma V = 0$$

$$R_A + R_B = P$$

$$R_A = P - 0.5P$$

$$R_A = 0.5P$$

Setelah didapat R_A dari statika sederhana yang tercantum di atas, maka perhitungan momen maksimum yang terjadi pada balok adalah :

$$M_{Maks} = R_A l_l$$

$$M_{Maks} = 0.5 P (0.6)$$

$$M_{Maks} = 0.3 P$$

Setelah itu, dilakukan perbandingan antara momen maksimum saat runtuh teoritis (M_u teoritis) dengan pengujian yang menggunakan *hydraulic jack* (M_u eksperimen). Momen maksimum teoritis didapat dari perhitungan. Momen maksimum dari hasil penelitian dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$M_u = 0.3 P$$

dengan :

$$M_u = \text{Momen maksimum}$$

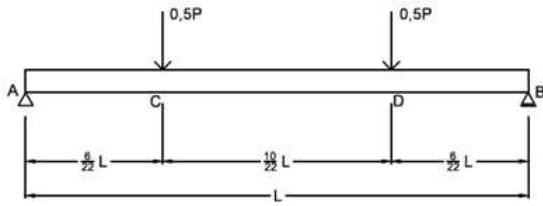
$$P = \text{Beban maksimum}$$

Deformasi Aktual Retakan Pertama Balok Beton

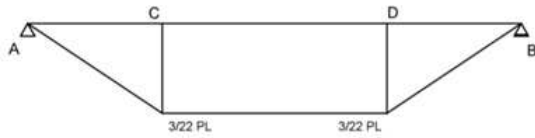
Deformasi retakan pertama jauh lebih kecil dibandingkan dengan Deformasi maksimum yang terjadi pada balok, Deformasi pada saat retakan pertama yang terjadi pada balok menjadi acuan perhitungan. Deformasi balok yang sebenarnya didapat saat balok masih dalam keadaan elastis.

Deformasi Teoritis Balok Beton

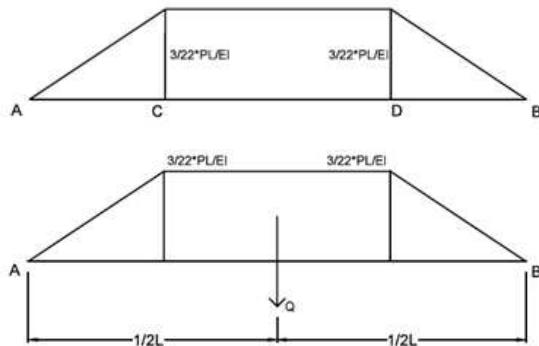
Deformasi teoritis balok beton didapat dari perhitungan dengan menggunakan metode *conjugate beam*. Perhitungan tersebut dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 3. Pemodelan pembebanan balok beton



Gambar 4. Bidang momen balok



Gambar 5. Bidang conjugate balok

$$Q = 2 \times \left(\frac{1}{2} \times \frac{6}{22} L \times \frac{3}{22} PL \right) + \left(\frac{1}{2} L \times \frac{3}{22} PL \right)$$

$$= \left(\frac{9}{242} PL^2 \right) + \left(\frac{15}{242} PL^2 \right)$$

$$= \frac{12}{121} PL^2$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$R_A' \times L - Q \times \frac{1}{2} L = 0$$

$$R_A' \times L - \left(\frac{12}{121} PL^2 \right) \times \frac{1}{2} L = 0$$

$$R_A' = \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI}$$

$$\theta_A = R_A' = \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI}$$

$$\Sigma M_A = 0$$

$$R_B' \times L - Q \times \frac{1}{2} L = 0$$

$$R_B' \times L - \left(\frac{12}{121} PL^2 \right) \times \frac{1}{2} L = 0$$

$$R_B' = \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI}$$

$$\theta_B = R_B' = \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI}$$

$$Q_1 = \left(\frac{1}{2} \times \frac{6}{22} L \times \frac{3}{22EI} PL \right)$$

$$= \frac{9}{484EI} PL^2$$

$$M_C' = R_A' \times \frac{6}{22} L - Q_1 \times \frac{6}{22} L \times \frac{1}{3}$$

$$= \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI} \times \frac{6}{22} L - \frac{9}{484EI} PL^2 \times \frac{1}{11} L$$

$$= \frac{18}{1331} \frac{PL^3}{EI} - \frac{9}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$= \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$\Delta_C = M_C' = \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$Q_2 = \left(\frac{1}{2} \times \frac{6}{22} L \times \frac{3}{22EI} PL \right)$$

$$= \frac{9}{484EI} PL^2$$

$$M_D' = R_B' \times \frac{6}{22} L - Q_2 \times \frac{6}{22} L \times \frac{1}{3}$$

$$= \frac{6}{121} \frac{PL^2}{EI} \times \frac{6}{22} L - \frac{9}{484EI} PL^2 \times \frac{1}{11} L$$

$$= \frac{18}{1331} \frac{PL^3}{EI} - \frac{9}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$= \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$\Delta_D = M_D' = \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

Untuk Δ di tengah bentang, dihitung dengan menggunakan rumus berikut.

$$\Delta_T = \frac{\frac{1}{2} P \left(\frac{6}{22} L \right)}{24EI} \times \left(3L^2 - 4 \left(\frac{6}{22} L \right)^2 \right)$$

$$= \frac{PL}{176EI} \times \left(3L^2 - \frac{36}{121} L^2 \right)$$

$$= \frac{PL}{176EI} \times \frac{327}{121} L^2$$

$$= \frac{327}{21296} \frac{PL^3}{EI}$$

Sedangkan untuk menghitung modulus elastisitas beton (E), karena berat volume (w_c) benda uji berkisar diantara 1500-2500 kg/m³ maka sesuai SNI 03-2847-2013 menggunakan persamaan:

$$E = W_c^{1.5} \times 0,043 \sqrt{f'c}$$

dengan:

E = Modulus elastisitas beton (MPa)

w_c = Berat volume beton (kg/m³)

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

Tabel 4.11 Hasil perhitungan modulus elastisitas balok beton

Benda Uji	E	
	w_c (kg/m ³)	$f'c$ (MPa)
N/1	2354.17	2358.96
N/2	2208.33	2143.19
L5/1	1898.18	1707.93
L5/2	2020.83	1876.12
L7/1	1970.31	1806.20
L7/2	1900.00	1710.39
L9/1	1830.73	1617.71
L9/2	1889.06	1695.64

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:

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

Keterangan:

- I_e : momen inersia efektif
- I_{cr} : momen inersia penampang retak transformasi
- I_g : momen inersia penampang utuh
- M_a : momen maksimum pada komponen struktur saat lendutan dihitung
- M_{cr} : momen pada saat timbul retakan yang pertama kali

Inersia penampang utuh (I_g) balok dihitung dengan (Dipohusodo, 1996) menggunakan rumus berikut.

$$I_{Balok} = I_{Pejal} - I_{Lubang}$$

$$I_{Balok} = \frac{1}{12} \cdot b_P \cdot h_P^3 - \frac{1}{12} \cdot b_L \cdot h_L^3$$

Benda Uji	Pejal		Lubang		I_g (I Balok)		ΣI
	b	h	b	h	I_{Pejal}	I_{Lubang}	
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm ⁴)	(mm ⁴)	
Normal	200	200	0	0	133333333.33	0	133333
Hollow Core 5	200	200	100	50	133333333.33	1041666.67	132291
Hollow Core 7	200	200	100	70	133333333.33	2858333.33	13047
Hollow Core 9	200	200	100	90	133333333.33	6075000.00	127258

Setelah itu, dilakukan perhitungan momen inersia penampang kritis (I_{cr}) untuk beton bertulangan tunggal menggunakan rumus:

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b y^3 + n \cdot A_s (d - y)^2$$

Keterangan:

- I_{cr} : momen inersia penampang retak transformasi
- b : lebar penampang
- y : jarak garis netral dengan serat tepi desak
- n : jumlah tulangan tarik pada penampang
- A_s : luas tulangan tarik

Rumus perhitungan momen kritis (M_{cr}):

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

Keterangan:

- M_{cr} : momen pada saat timbul retakan yang pertama kali
- f_r : modulus retak beton
- I_g : inersia penampang utuh

y_t : jarak antara garis netral penampang utuh dan serat tepi tarik

Rumus perhitungan modulus retak beton (f_r):

$$f_r = 0.7 \sqrt{f'_c}$$

Keterangan:

- f_r : modulus retak beton
- f'_c : kuat tekan beton

Tabel 4.12 Momen inersia efektif penampang balok

Benda Uji	M_a (Nmm)	f_r (MPa)	M_{cr} (Nmm)	I_g (mm ⁴)	I_{cr} (mm ⁴)	I_e (mm ⁴)
N/1	9141000		2567422.81	133333333.33	10295402.24	13021554
N/2	8487000		2567422.81		10295402.24	13701590
L5/1	7205100		2547364.81		10295402.24	15686782
L5/2	7464000	3.36	2547364.81	132291666.67	10295402.24	15144992
L7/1	7529400		2512383.68	130475000.00	10295402.24	14760258
L7/2	7166400		2512383.68		10295402.24	15473681
L9/1	6717000		2450444.60		10295402.24	15974206
L9/2	6948600		2450444.60	127258333.33	10295402.24	15425090

Tabel 4.13 Beban Retakan Pertama Teoritis

Benda Uji	M_{cr} (Nmm)	M_{cr} (Kgm)	P_{cr} (Kg)
N/1	2567422.81	256.74	855.81
N/2	2567422.81	256.74	855.81
L5/1	2547364.81	254.74	849.12
L5/2	2547364.81	254.74	849.12
L7/1	2512383.68	251.24	837.46
L7/2	2512383.68	251.24	837.46
L9/1	2450444.60	245.04	816.81
L9/2	2450444.60	245.04	816.81

Setelah I_e didapat, selanjutnya dilakukan perhitungan deformasi teoritis balok dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta_1 = \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

$$\Delta_2 = \frac{327}{21296} \frac{PL^3}{EI}$$

$$\Delta_3 = \frac{63}{5324} \frac{PL^3}{EI}$$

dengan:

- P = Beban Retakan Pertama (kg)
- L = Panjang bentang balok (mm)
- E = Modulus elastisitas balok (kg/mm²)
- I = Inersia penampang balok (mm⁴)

Berikut merupakan hasil perhitungan lendutan teoritis balok :

Tabel 4.14 Hasil perhitungan Deformasi teoritis balok

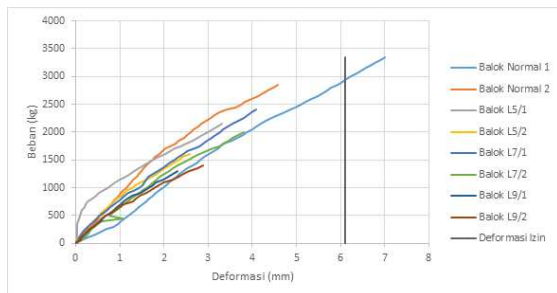
Benda Uji	Panjang Balok (mm)	E (kg/mm ²)	I _e (mm ⁴)	Deformasi Teoritis		
				1 (mm)	2 (mm)	3 (mm)
N/1	2200	2358.96	13021554.30	3.51	4.56	3.51
N/2		2143.19	13701590.10	3.67	4.76	3.67
L5/1		1707.93	15686782.10	3.99	5.18	3.99
L5/2		1876.12	15144992.85	3.77	4.89	3.77
L7/1		1806.20	14760258.97	3.96	5.14	3.96
L7/2		1710.39	15473681.90	3.99	5.17	3.99
L9/1		1617.71	15974206.05	3.98	5.17	3.98
L9/2		1695.64	15425090.51	3.93	5.11	3.93

Tabel 4.15 Perbandingan Deformasi aktual dan Deformasi teoritis balok pada saat keadaan elastis

Benda Uji	Beban Maksimum Elastis (kg)	Deformasi Teoritis			Deformasi Aktual			Lendur Izin L/36 (mm)
		Titik 1 (mm)	Titik 2 (mm)	Titik 3 (mm)	Titik 1 (mm)	Titik 2 (mm)	Titik 3 (mm)	
		N/1	3350	3.51	4.56	3.51	7.01	
N/2	2850	3.67	4.76	3.67	4.59	5.84	3.63	
L5/1	2150	3.99	5.18	3.99	3.31	4.88	3.67	
L5/2	1600	3.77	4.89	3.77	2.49	3.13	1.94	
L7/1	2400	3.96	5.14	3.96	4.08	5.6	3.34	
L7/2	2000	3.99	5.17	3.99	3.81	4.73	2.75	
L9/1	1300	3.98	5.17	3.98	2.3	2.89	1.56	
L9/2	1400	3.93	5.11	3.93	2.89	3.39	2.06	

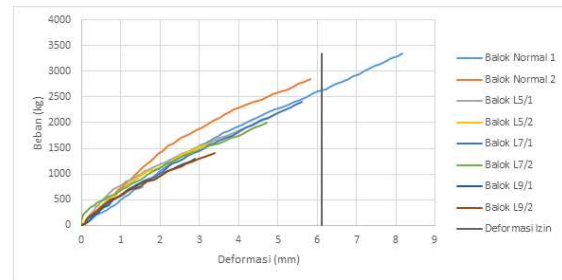
Hubungan Beban dan Deformasi Aktual pada tiap Titik Tinjau

Titik 1



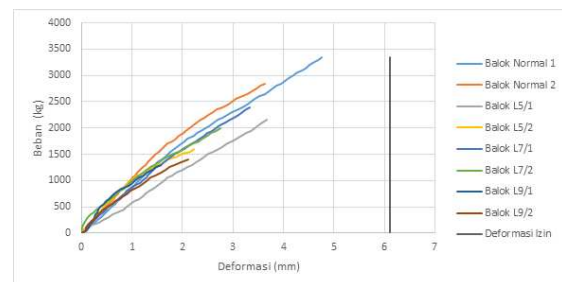
Gambar 6 Hubungan Beban dan Deformasi Aktual pada titik tinjau 1

Titik 2



Gambar 7 Hubungan Beban dan Deformasi Aktual pada titik tinjau 2

Titik 3



Gambar 8 Hubungan Beban dan Deformasi Aktual pada titik tinjau 3

Dari Gambar 6, Gambar 7, Gambar 8, dapat dilihat bahwa nilai deformasi aktual pada balok normal 1 di titik tinjau 1 dan 2 melebihi batas deformasi yang diizinkan, hal tersebut dikarenakan kualitas beton yang kurang bagus, sebab saat proses mencampur bahan material terjadi kesalahan. Hal ini berbanding terbalik dengan balok lainnya, nilai deformasi pada balok normal 2 dan balok berlubang dibawah nilai deformasi yang diizinkan.

Pembahasan

Pada dasarnya hubungan beban dan deformasi dari balok beton bertulang dapat diidealisasikan menjadi bentuk tiga garis lurus. Hubungan tiga garis lurus ini meliputi tiga tahap sebelum terjadinya kondisi runtuh. Tiga tahap tersebut antara lain tahap praretak di mana elemen struktural masih belum retak, tahap pascaretak di mana elemen struktural sudah mengalami retak namun masih dapat ditoleransi, dan tahap pasca-serviceability di mana tulangan tarik pada elemen struktural tersebut sudah mencapai tegangan leleh.

Hasil yang berbeda ditunjukkan oleh hasil pengujian, dimana deformasi balok

normal, lebih besar dibandingkan balok balok *hollow core* lainnya, dan nilai deformasi balok *hollow core* 7 x 10 x 60 lebih besar daripada nilai deformasi balok *hollow core* 5 x 10 x 60. 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, serta terjadinya perpindahan letak *styrofoam* sebagai bahan pengisi rongga pada badan beton karena kesalahan saat pengikatan *styrofoam*, terkenanya air hujan bahan material menyebabkan campuran beton kelebihan air sehingga campuran beton menjadi encer. 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.

KESIMPULAN DAN SARAN

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 (*hollow core*).
 - a) Dari pengujian di laboratorium balok beton dengan lubang (*hollow core*) menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan balok beton normal tanpa lubang.
 - b) Dari hasil perhitungan teoritis balok beton dengan lubang (*hollow core*) kecuali balok beton dengan lubang 9x10x 60 menghasilkan lendutan yang lebih kecil dibandingkan dengan balok beton normal tanpa lubang.
 - c) Balok beton normal tanpa lubang dapat menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan balok beton dengan lubang (*hollow core*).

- d) Besar nilai deformasi aktual balok rata-rata cenderung lebih kecil dibandingkan dengan besar nilai deformasi teoritis balok. Hal ini dikarenakan beban yang ditahan balok saat secara aktual lebih besar daripada beban yang ditahan balok saat perhitungan teoritis.

Saran

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

1. Perencanaan dimensi balok direncanakan dengan baik agar lebih ekonomis dan efisiensi waktu penelitian saat dilaksanakan.
2. Variasi lubang bisa dirubah dari segi jumlah, ukuran, maupun dari jaraknya.
3. Bahan material yang dipakai bisa memakai bahan material yang kualitas lebih baik agar mendapat campuran (*mix design*) yang diinginkan sesuai perencanaan.
4. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan pengamatan terhadap deformasi dengan jalan mentransformasikan perubahan posisi ke dalam bentuk parameter-parameter deformasi meliputi translasi, rotasi dan dilatasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Brahmantyo, Dody, *MEKANIKA REKAYASA III MK*, Unnar.
- Dipohusodo, I. (1996). *Struktur Beton Bertulang* (Vol. 2). Jakarta, DKI Jakarta, Indonesia: PT. Gramedia Pustaka Utama
- Nawy, E. G. (2010). *Beton Bertulang: Suatu Pendekatan Dasar* (Vol. 4). (B. Suryoatmono, Trans.) Bandung, Jawa Barat, Indonesia: PT. Refika Aditama.
- Nugraha, P., & Antoni. (2007). *Teknologi Beton: Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*. (F. S. Suyantoro, Ed.) Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia: CV. Andi Offset.
- Nurlina, Siti. (2008). *Struktur Beton*. Malang, Jawa Timur, Indonesia: Barge Media.

SNI 03-2847-2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*.

Ujianto, Muhammad. 2006. *Lendutan Dan Kekakuan Balok Beton Bertulang Dengan Lubang Segi Empat Di Badan*, Jurnal Eco Rekayasa, Teknik Sipil UMS. Semarang.

Wight, MacGregor, *Reinforce Concrete-Mechanics and Design*, Pearson Education, 2012