

## PERILAKU STRUKTUR BALOK BETON BERONGGA BOLA *Structural Behaviour of Spherical Hollow Concrete Beam*

Maskimi\*, Suryawan Murtiadi\*\*, Akmaluddin\*\*

\* Dinas Pekerjaan Umum Kab. Lombok Barat, Jl. TGH. Ibrahim Al Khalidy Bengkel

\*\* Jurusan Teknik Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram, Jl Majapahit 62 Mataram

Email : kimibant@gmail.com, s.murtiadi@yahoo.co.uk, akmaluddin@unram.ac.id

### Abstrak

Beton merupakan material bangunan yang sangat populer di dunia konstruksi karena mempunyai kekuatan menahan gaya tekan yang tinggi. Namun beton mempunyai kelemahan yaitu kuat tariknya yang rendah sehingga perlu dikombinasikan dengan baja tulangan. Kelemahan yang lain adalah berat sendirinya yang cukup besar sehingga perlu diupayakan inovasi struktur dengan mengurangi berat sendirinya. Elemen struktur beton bertulang dengan rongga merupakan struktur yang cukup efektif untuk mengurangi berat sendirinya. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan memahami perilaku struktur balok beton bertulang berongga bola. Sepuluh balok beton berongga diuji dengan variasi jumlah bola dan posisi bola dalam penampang balok beton bertulang. Jumlah bola terdiri atas lima variasi yaitu sejumlah 1, 3, 5, 7, dan 9 bola menghasilkan rasio volume balok masing-masing sebesar 99%, 98%, 97%, 95% dan 94% terhadap volume balok beton solid. Penampang balok berupa empat persegi panjang dengan lebar,  $b = 200$  mm dan tinggi  $h = 300$  mm serta bentang efektif 3000 mm. Tulangan tarik dipakai 3D13 dan tulangan tekan 2D10 dengan sengkang  $\emptyset 10-20$  mm. Mutu beton adalah  $f_c' 22$  MPa sedangkan tulangan baja dipakai mutu  $f_y = 390$  MPa. Untuk pembandingan, sebuah balok solid tanpa lobang dengan ukuran dan tulangan yang sama juga diuji sebagai balok standar. Pembebanan statis lentur dilaksanakan mengikuti standar pengujian SNI dengan dua titik pembebanan. Load cell ditempatkan pada tengah bentang dan didistribusikan ke dua titik melalui profil baja. Hidrolik jack kapasitas 50 ton sebagai sumber beban dihubungkan dengan load cell. Pengukuran lendutan vertikal pada bagian tengah bentang dicatat dengan LVDT. Dari pengujian ini didapatkan hubungan beban-lendutan sampai benda uji runtuh. Hasil penelitian menunjukkan pola retak yang terjadi pada seluruh benda uji merupakan ciri retak lentur dengan arah retak yang tegak lurus sumbu penampang. Momen retak yang terjadi tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara balok berlobang dengan tanpa lobang. Momen retak tertinggi terjadi pada balok tanpa lobang sebesar 10,09 MPa sedangkan yang terendah terjadi pada balok dengan lobang 7 bola sebesar 8,42 MPa atau terjadi penurunan sekitar 83%. Rata-rata besarnya momen retak eksperimen ini lebih tinggi sekitar 22% disbanding momen retak teoritis. Hal ini disebabkan karena secara teoritis momen retak hanya ditahan oleh beton saja sedangkan dalam kenyataan hadirnya baja tulangan cukup mempengaruhi kekuatan struktur terhadap momen retak. Besarnya momen ultimit struktur juga tidak terdapat perbedaan yang signifikan, untuk beton tanpa lobang  $M_u = 47,25$  MPa sedangkan yang terlemah pada beton dengan 9 lobang  $M_u = 44,78$  MPa atau hanya terjadi penurunan menjadi 95%. Meskipun terjadi juga penurunan daktilitas pada beton dengan lobang namun besarnya daktilitas masih bisa diterima karena masih  $\geq 2$ . Dengan demikian direkomendasikan pemakaian balok beton bertulang 9 lobang dengan posisi lobang di bawah garis netral atau di bagian penampang yang menahan momen lentur positif struktur balok.

Kata kunci : Balok beton, Rongga bola, Perilaku struktur, Momen ultimit, Daktilitas

### PENDAHULUAN

Beton merupakan material bangunan yang sangat populer di dunia konstruksi karena mempunyai kekuatan menahan gaya tekan yang tinggi. Namun beton mempunyai kelemahan yaitu kuat tariknya yang rendah sehingga perlu dikombinasikan dengan baja tulangan. Kelemahan yang lain adalah berat sendirinya yang cukup besar sehingga perlu diupayakan inovasi struktur dengan mengurangi berat

sendirinya. Elemen struktur beton bertulang dengan rongga merupakan struktur yang cukup efektif untuk mengurangi berat sendirinya. Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Bahan dan Bangunan Jurusan Teknik Sipil Universitas Mataram. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan memahami perilaku struktur balok beton bertulang berongga bola. Sedangkan tujuan khusus penelitian ini adalah untuk mendapatkan bentuk pemodelan geometri rongga penampang yang mendukung terhadap daktilitas suatu elemen struktur konstruksi beton bertulang.

## TINJAUAN PUSTAKA

Konsumsi dunia untuk beton sekitar 8,8 juta ton setiap tahun. Kebutuhan material ini terus meningkat dari tahun ke tahun sejalan dengan meningkatnya kebutuhan sarana dan prasarana dasar manusia. Dari meningkatnya penggunaan material beton, terdapat dua aspek penting yang harus diperhatikan yakni *durabilitas* (keawetan) material beton itu sendiri dan gangguan lingkungan akibat produksi semen Portland. Selain itu abrasi dan longsor oleh penggunaan material agregat kasar, pasir secara berlebihan juga merupakan masalah yang harus dicegah. Oleh sebab itu optimasi dan pembatasan penggunaan material beton merupakan suatu hal yang harus dilakukan.

Pelat dengan system Bubble Deck dikembangkan oleh Netherlands (1997) merupakan inovasi elemen pelat beton berongga bola palstik tanpa balok (*flat plate*) dan kepala kolom (*drop panel*). Sistem ini dapat dipergunakan sebagai pelat lantai, dak atap dan pelat lantai dasar. Salah satu keuntungan struktural dari sistem ini adalah memiliki kapasitas menahan beban yang sama baiknya dengan dengan pelat masif, namun dengan ketebalan yang lebih kecil. Hal ini membawa keuntungan penghematan material konstruksi pelat hingga 40% sampai 50%. Dengan adanya pengurangan berat sendiri pelat, maka elemen struktur lain akan juga akan menahan berat pelat yang lebih sedikit, dan kemudian akan mengurangi dimensi kolom dan pondasi yang dibutuhkan, sehingga menghasilkan penghematan material untuk keseluruhan bangunan bisa mencapai 50%.

Rahadyanto (2013) melakukan eksperimental balok berongga dengan pemanfaatan limbah botol PET. Benda uji dibagi menjadi tiga jenis, balok solid K-400, balok rongga K-400 dan balok rongga K-300. Beban maksimum yang cukup stabil terjadi pada balok solid K-400 dengan balok rongga K-300 sebesar 77,33 KN dan momen maksimum yang mampu ditahan sebesar 46.40 KNm. Rasio kekuatan solid K-400 dan balok rongga K-300 terhadap balok rongga K-400 sebesar 1,017. Sementara Ali dan Wahid (2008) menyatakan bahwa balok *massive* mencapai retak pada beban yang lebih tinggi dibandingkan dengan balok berongga. Balok rongga mengalami kegagalan tekan dengan beban rencana sedangkan balok *massive* mampu menahan beban lebih besar dari beban rencana.

Sandaker (2008), membagi bentuk struktural dalam dua tingkatan yaitu: *Global-form* (bentuk keseluruhan) dan *local-form* (bentuk elemen/komponen detail struktur). Pada tingkatan *global-form* efisiensi struktural dihasilkan oleh struktur *form-active* sedangkan pada tingkatan *local-form* efisiensi struktural diperoleh melalui pembentukan konfigurasi penampang melintang komponen struktural dibentuk agar menghasilkan momen inersia ( $I$ ) yang sebesar mungkin dengan jumlah material seminimal mungkin. Untuk struktural yang menerima momen efisiensi dapat dilakukan dengan menempatkan

material terbanyak di sisi paling luar dari penampang komponen struktural agar diperoleh inersia yang maksimal. Sejalan dengan itu, Canonica (2013) mempunyai pemikiran untuk melubangi penampang balok dengan tujuan mengurangi berat sendiri tanpa mengurangi kekuatan lenturnya.

Untuk menjamin penampang balok beton bertulang memiliki pola keruntuhan daktail, maka penulangan dengan baja harus *underreinforced*. SNI 03-2847-2002 menetapkan batasan rasio baja tulangan ( $\rho$ ) sebagai berikut:

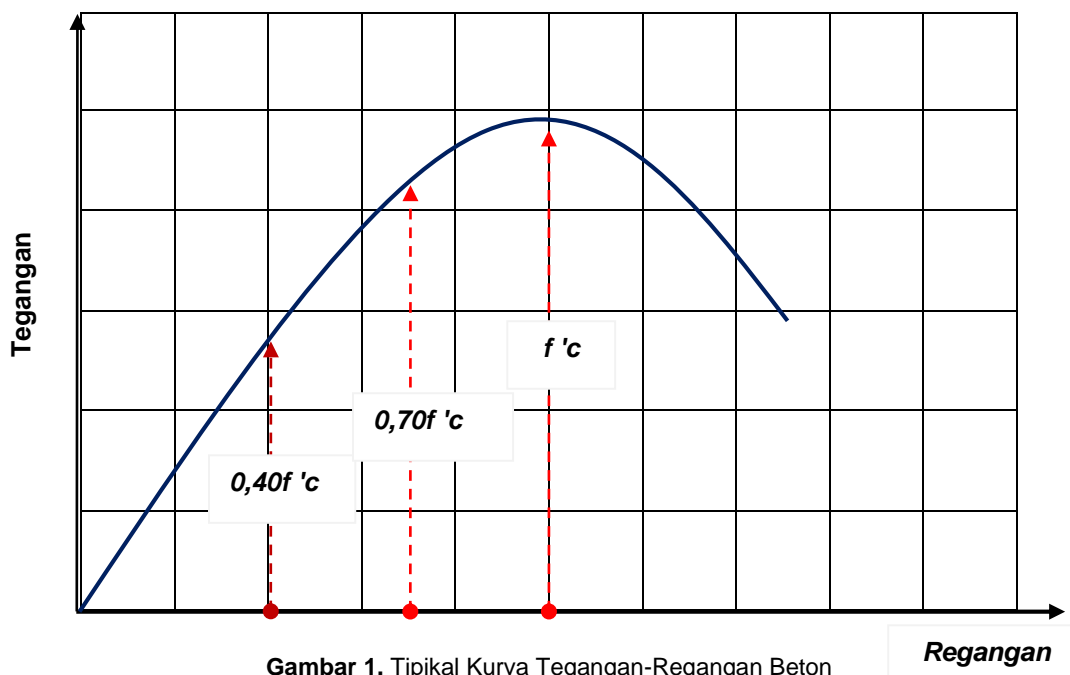
$$\text{Rasio maksimum } (\rho_{\text{maks}}) = 0,75 \rho_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Rasio berimbang } (\rho_b) = 0,85 \beta_1 \left( \frac{f_c'}{f_y} \right) \left( \frac{600}{600+f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Rasio minimum } (\rho_{\text{min}}) = \left( \frac{1,4}{f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

Batasan minimum ini berlaku untuk tulangan positif atau momen positif, kecuali luas baja tulangan minimum yang dipasang lebih besar daripada satu sepertiga luas yang dibutuhkan menurut analisis. Dan perkuatan kurang (*underreinforced*) termasuk keruntuhan tarik (*tension failure*) maka pembatasan rasio baja tulangannya berlaku adalah  $\rho_{\text{min}} < \rho < \rho_{\text{maks}}$ .

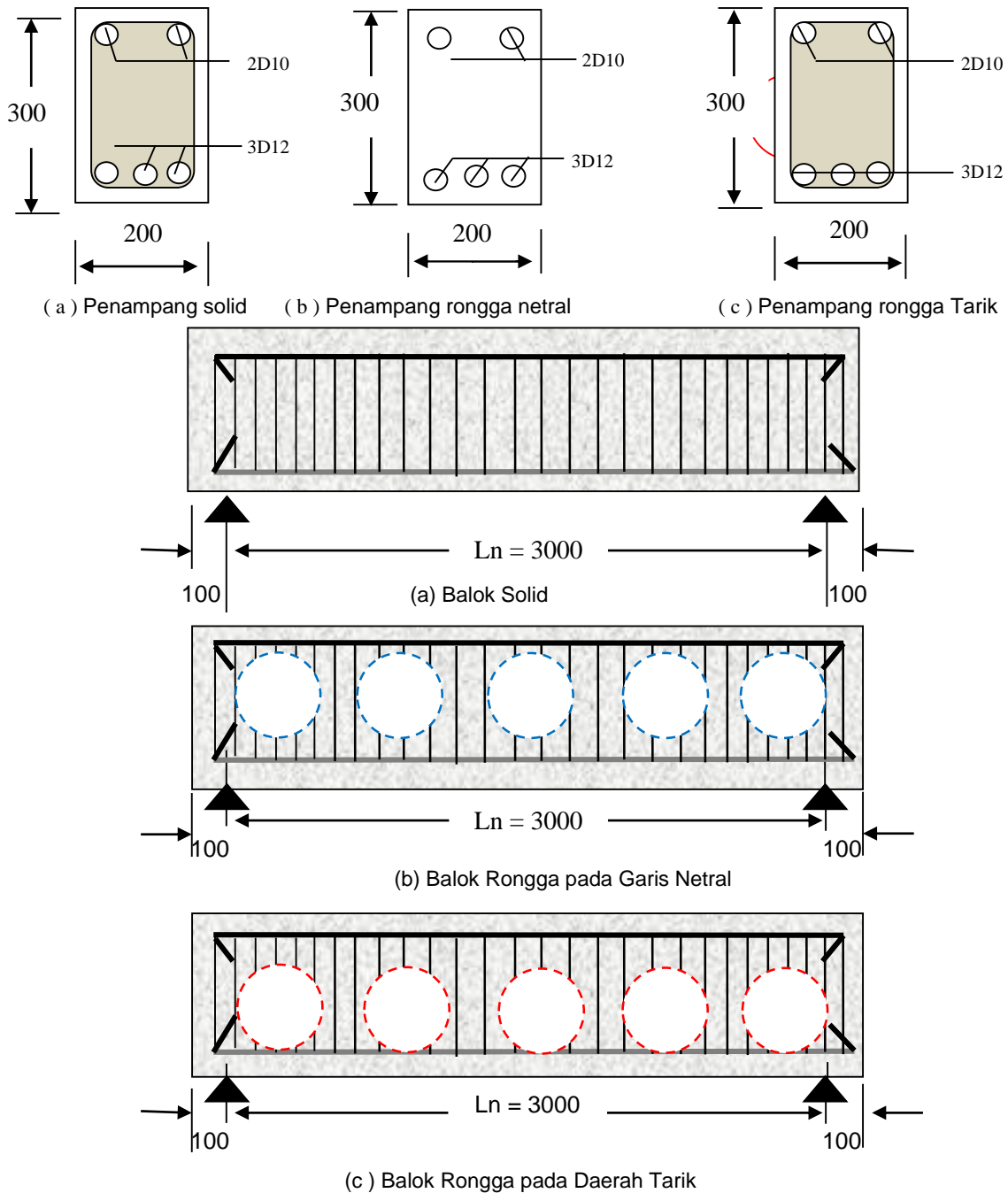
SNI pada Gambar 1 menunjukkan suatu kurva tegangan-regangan tipikal yang didapat dari suatu tes menggunakan benda uji silinder yang dibebani tekan uniaksial selama beberapa menit. Pada awal kurva sampai 40% dari kekuatan ultimate  $f_c$  dapat dianggap linier. Setelah 70% dari kegagalan, material sudah mulai kehilangan sebagian besar kekuatannya. Akhirnya struktur akan runtuh pada beban  $f_c$ .



## METODE PENELITIAN

Semua balok memiliki penampang 200 mm x 300 mm dengan panjang balok 3200 mm dan diletakkan pada perletakan sederhana dengan bentang bersih 3000 mm. Balok direncanakan untuk

gagal memikul beban melalui kegagalan lentur (*flexurel mode failure*). Tiga jenis pemodelan yang digunakan pada benda uji balok dengan rasio tulangan perkuatan kurang (*under reinforced*). Selimut beton antara tulangan dengan tepi luar beton 22,5 mm untuk semua permukaan. Geometri dan detail penampang balok dan baja tulangan ditunjukkan pada Gambar 2 dan detail benda uji ditunjukkan pada Tabel 1.



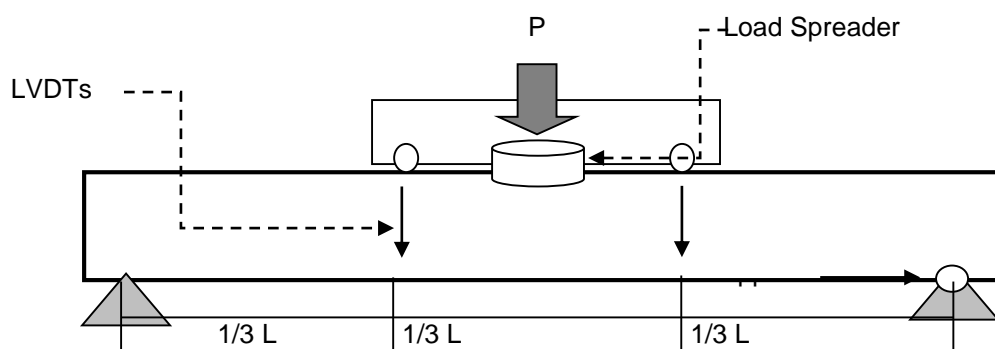
**Gambar 2.** Geometri balok dan detail penulangan

**Tabel 1.** Detail balok uji

Seri	Tipe Balok	Mutu Beton (MPa)	Tulangan Longitudinal		Jumlah Bola (buah)	Volume Rongga (mm <sup>3</sup> )
			Tarik	Tekan		
1	V- 0AB	23	3D13	2D10	0	0
	V - 2A	22	3D13	2D10	2	20 614 662
	V - 3A	22	3D13	2D10	3	30 921 993
	V - 5A	23	3D13	2D10	5	51 536 655
2	V - 7A	22	3D13	2D10	7	72 151 317
	V - 9A	22	3D13	2D10	9	92 765 979
	V - 2B	23	3D13	2D10	2	20 614 662
	V - 3B	22	3D13	2D10	3	30 921 993
3	V - 5B	24	3D13	2D10	5	51 536 655
	V - 7B	24	3D13	2D10	7	72 151 317
	V - 9B	22	3D13	2D10	9	92 765 979

### Instrumen dan Pengujian

Sepuluh balok beton berongga diuji dengan variasi jumlah bola dan posisi bola dalam penampang balok beton bertulang. Jumlah bola terdiri atas lima variasi yaitu sejumlah 1, 3, 5, 7, dan 9 bola menghasilkan rasio volume balok masing-masing sebesar 99%, 98%, 97%, 95% dan 94% terhadap volume balok beton solid. Penampang balok berupa empat persegi panjang dengan lebar,  $b = 200$  mm dan tinggi  $h = 300$  mm serta bentang efektif 3000 mm. Tulangan tarik dipakai 3D13 dan tulangan tekan 2D10 dengan sengkang  $\emptyset 10$ -20 mm. Mutu beton adalah  $f_c' 22$  MPa sedangkan tulangan baja dipakai mutu  $f_y = 390$  MPa. Untuk pembandingan, sebuah balok solid tanpa lobang dengan ukuran dan tulangan yang sama juga diuji sebagai balok standar. Pembebanan statis lentur dilaksanakan mengikuti standar pengujian SNI dengan dua titik pembebanan. Load cell ditempatkan pada tengah bentang dan didistribusikan ke dua titik melalui profil baja. Hidrolik jack kapasitas 50 ton sebagai sumber beban dihubungkan dengan load cell. Pengukuran lendutan vertikal pada bagian tengah bentang dicatat dengan LVDT. Dari pengujian ini didapatkan hubungan beban-lendutan sampai benda uji runtuh. Posisi balok dan pembebanannya saat pengujian diperlihatkan pada Gambar 2.

**Gambar 3.** Balok Diatas Dua Perletakan Sederhana

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perilaku Lentur Balok

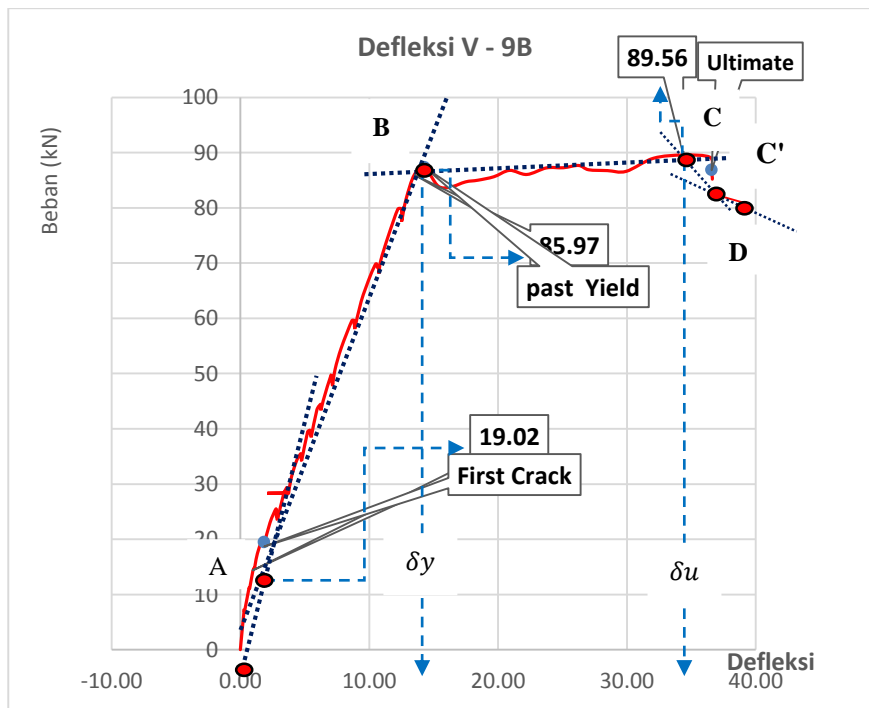
Perilaku balok saat diberi beban menunjukkan bahwa pada saat beban masih kecil balok relatif kuat menahan beban yang ditandai dengan kecilnya defleksi yang terjadi. Semakin beban ditingkatkan mengakibatkan retak mulai muncul pada bagian ekstrim balok beton. Retak tersebut terus merambat

ke arah vertikal seiring dengan penambahan beban. Semakin lama, jumlah retak yang terjadi juga bertambah yang mana tidak hanya retak yang lama membesar dan memanjang tetapi juga muncul retak-retak baru yang bergeser dari posisi retak awal ke arah luar. Pola retak yang terjadi juga merupakan ciri retak lentur yaitu arah retak yang tegak lurus sumbu penampang. Akhirnya setelah retak muncul semakin banyak maka balok kehilangan kekuatannya untuk menahan beban luar atau dikatakan balok sudah mengalami failure.

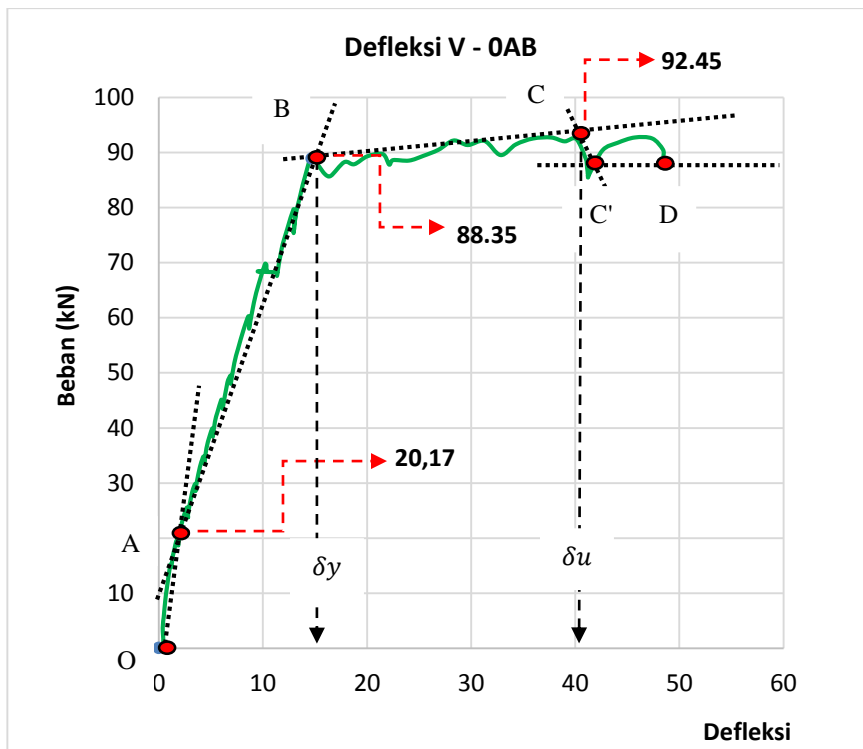
### Diagram *Load-Deflection*

Terlihat pada diagram *Load-Deflection* dalam pengujian di laboratorium bahwa semua benda uji memiliki perilaku struktur dan kapasitas tahanan yang tidak jauh berbeda. Juga terlihat bahwa balok solid (tanpa rongga) mempunyai kemampuan dalam menahan beban yang paling baik. Kurva yang menanjak pada awal pengujian menunjukkan *slope* yang merupakan kekakuan balok sebelum retak pertama terjadi. Karenanya nilai retak pertama sangat menentukan perilaku benda uji lentur. Disamping mendapatkan nilai-nilai momen retak, momen layan dan momen ultimit, diagram ini juga berguna untuk menentukan daktilitas balok.

Diagram *load-deflection* hasil pengujian balok dengan 9 (sembilan) rongga bola dan balok solid tanpa rongga disajikan masing-masing pada Gambar 3 dan Gambar 4. Sedangkan nilai-nilai hasil pengujian pada seluruh benda uji selengkapnya ditampilkan dalam Tabel 2 yang menunjukkan hubungan *load-deflection* pada beban layan dan beban runtuh (ultimit) masing-masing benda uji.



**Gambar 4.** Diagram Load-Deflection Balok dengan Sembilan Rongga



**Gambar 5.** Diagram Load-Deflection Balok Solid Tanpa Rongga

**Tabel 2.** Deflection pada Beban Layan ( $P_y$ ) dan Beban Runtuh ( $P_u$ )

Seri	Balok	$F_c'$ (MPa)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	Daktilitas $\Delta u/\Delta y$
1	V-0AB	22,43	90,08	94,49	14,04	38,98	2,78
2	V-2A	21,57	85,56	90,82	14,36	35,80	2,49
3	V-3A	23,21	79,11	92,71	15,36	37,76	2,46
4	V-5A	22,08	84,37	91,49	15,14	36,76	2,41
5	V-7A	22,42	86,93	90,67	15,74	36,50	2,32
6	V-9A	22,68	85,74	92,71	16,50	37,68	2,28
7	V-2B	22,31	89,19	93,56	12,08	31,23	2,58
8	V-3B	21,95	85,67	90,71	12,42	30,06	2,42
9	V-5B	22,91	85,89	93,79	12,32	31,36	2,55
10	V-7B	21,11	85,26	91,23	12,65	33,05	2,61
11	V-9B	22,49	85,97	89,56	13,50	34,40	2,55

Tampak dari Tabel 2 daktilitas balok dengan rongga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Namun demikian penurunan ini dianggap tidak signifikan. Daktilitas terendah yang dialami balok dengan rongga terjadi pada benda uji dengan 9 rongga sebesar 2,28. Dibanding balok tanpa rongga dengan daktilitas 2,78 balok dengan rongga mengalami penurunan sebesar 82%.

### Perilaku Struktur

Besarnya momen retak pertama ( $M_r$ ), momen layan ( $M_y$ ) dan momen ultimit ( $M_u$ ) hasil eksperimen ditampilkan dalam Tabel 3. Dalam tabel tersebut juga dibandingkan hasil perhitungan momen-momen tersebut secara teoritis. Terlihat dalam tabel tersebut bahwa hasil eksperimen lebih besar dibanding perhitungan teoritis. Hal ini disebabkan dalam perhitungan teoritis kemampuan beton dianggap nol pada saat beton mulai retak. Rata-rata rasio nilai eksperimen terhadap nilai teoritis  $M_r(\text{exp})/M_r(\text{th})$ ,  $M_y(\text{exp})/M_y(\text{th})$  dan  $M_u(\text{exp})/M_u(\text{th})$  berturut-turut adalah 1,28; 1,22 dan 1,05.

Dapat dilihat juga pada Tabel 3, terjadi penurunan kekuatan balok berongga dibanding balok tanpa rongga. Dibandingkan dengan balok tanpa rongga, kemampuan balok berongga dengan 9 bola dalam memikul beban mengalami penurunan sebesar 94%, 95%, dan 95% berturut-turut untuk Mr, My dan Mu. Besarnya penurunan ini dianggap tidak signifikan sehingga pemakaian balok berongga bola ini dapat direkomendasikan untuk diaplikasikan di lapangan.

**Tabel 3.** Momen Retak, Momen Layan dan Momen Ultimit Eksperimen vs Teori

Seri	Balok	Fc' (MPa)	Mr (Exp) (kN.m)	Mr (Th) (kN.m)	My (Exp) (kN.m)	My (Th) (kN.m)	Mu (Exp) (kN.m)	Mu (Th) (kN.m)
1	V-0AB	22,43	10,085	8,24	45,04	36,51	47,25	46,49
2	V-2A	21,57	8,628	7,845	42,78	34,76	45,41	44,26
3	V-3A	23,21	10,415	7,762	44,60	35,95	46,78	45,78
4	V-5A	22,08	8,970	8,356	39,56	37,02	46,36	45,85
5	V-7A	22,42	9,210	7,622	42,84	35,01	45,36	44,59
6	V-9A	22,68	9,785	7,868	42,19	34,86	45,75	44,39
7	V-2B	22,31	9,165	8,164	42,95	36,17	46,90	46,06
8	V-3B	21,95	8,783	7,825	43,47	34,67	45,34	44,15
9	V-5B	22,91	9,915	7,367	42,63	34,19	45,62	43,57
10	V-7B	21,11	8,424	7,832	42,87	34,70	46,36	44,19
11	V-9B	22,49	9,51	7,44	42,99	34,41	44,78	41,17

## SIMPULAN DAN SARAN

### Simpulan

Dari rangkaian pembahasan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan kekuatan balok beton bertulang dengan adanya rongga-rongga bola. Daktilitas balok dengan rongga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Namun penurunan ini dianggap tidak signifikan. Daktilitas terendah yang dialami balok dengan rongga terjadi pada benda uji dengan 9 rongga sebesar 2,28. Dibanding balok tanpa rongga dengan daktilitas 2,78 balok dengan rongga mengalami penurunan sebesar 82%. Daya dukung balok berongga juga mengalami penurunan dibanding balok tanpa rongga. Dibandingkan dengan balok tanpa rongga, kemampuan balok berongga dengan 9 bola dalam memikul beban Mr, My dan Mu berturut-turut mengalami penurunan sebesar 94%, 95%, dan 95%.

### Saran

Disarankan rongga bola pada struktur balok beton bertulang diletakkan pada posisi di bawah garis netral balok atau pada bagian penampang yang menerima tegangan lentur positif. Pada posisi ini semua beban yang bekerja akan dipikul sepenuhnya oleh baja tulangan sehingga kehadiran rongga tidak mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan struktur balok. Selanjutnya dapat direkomendasikan pemakaian balok berongga ini untuk diaplikasikan di lapangan karena besarnya penurunan kekuatan yang tidak signifikan, yaitu masih sekitar 95% dari kekuatan balok solid.

## DAFTAR PUSTAKA

Ali, K. dan Wahid, A, 2008, "**Studi Daktilitas balok massive K-400 dengan Balok Berongga K-400 dan K-300**", Edisi Kedua, Erlangga, Ciracas, Jakarta.



- Andriono dan Kesuma, 1993, "**Desain Rangka Beton Bertulang di Daerah Rawan Gempa**", Edisi Kedua, Erlangga, Ciracas, Jakarta.
- Canonica, 2013, "**Memahami Beton Bertulang**", Edisi Revisi, Rekayasa Sain, Bandung.
- Netherlands, B.V., 1997, "**Inovasi Struktur Sistem Bubble Deck untuk elemen plat beton berongga bola plastik**", [http://www.afgruppen.com/Building-Services-Methods/Bubble-Deck-/http://en.wikipedia.org/wiki/Voided biaxial slab](http://www.afgruppen.com/Building-Services-Methods/Bubble-Deck-/http://en.wikipedia.org/wiki/Voided_biaxial_slab)).
- Rahadyanto, 2013 "**Studi Eksperimental Balok Berongga Dengan Pemanfaatan Limbah Botol**", PET, Universitas Indonesia, Jakarta.
- SNI 03-2847-2002, "**Tatacara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung**", Standar Nasional Indonesia, Departemen Kimpraswil, Jakarta.