

# STUDI DAKTILITAS DAN KUAT LENTUR BALOK BETON RINGAN DAN BETON MUTU TINGGI BERTULANG

**Ruddy Kurniawan, Pebrianti**

Laboratorium Material dan Struktur

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas

## ABSTRAK

Daktilitas merupakan salah satu parameter utama dalam kriteria disain balok beton bertulang disamping kekuatan dan kekakuan terutama didaerah rawan gempa. Berbagai usaha dilakukan para peneliti untuk mendapatkan balok beton bertulang yang kuat, kaku dan daktail. Makalah ini menampilkan hasil studi analitis terhadap daktilitas beton bertulang dengan menggunakan beton ringan dan beton mutu tinggi. Benda uji berupa balok sederhana diatas perletakan sendi-rol dengan beban merata diatasnya. Dimensi penampang dan panjang balok diambil tetap, sementara jumlah tulangan tarik dan tekan diambil sebagai variabel. Model konstitutif beton yang digunakan untuk analisa penampang diadopsi dari Model Almussalam. Sedangkan model konstitutif baja tulangan menggunakan bentuk bilinier elastoplastis dengan mengabaikan kondisi strain hardening. Daktilitas balok yang ditinjau berupa daktilitas kurvatur, translasi dan rotasi. Hasil pengujian pada balok beton mutu tinggi menunjukkan peningkatan daktilitas penampang dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tekan, sedangkan kekuatan lentur dipengaruhi oleh jumlah tulangan tarik. Pada beton ringan, hasil pengujian menunjukkan tulangan tarik dan tekan mempunyai kontribusi terhadap kekuatan lentur penampang, sedangkan daktilitas tercapai hanya jika jumlah tulangan tekan dan tarik sama banyak

KATA KUNCI : beton mutu tinggi, beton ringan, model konstitutif, daktilitas, kekakuan lentur.

## 1. PENDAHULUAN

Daktilitas merupakan salah satu aspek penting dalam perencanaan suatu elemen struktur disamping aspek kekuatan dan kekakuan. Pada saat terjadi gempa, elemen-elemen struktur yang mempunyai daktilitas besar akan menyerap energi lebih banyak dibandingkan dengan elemen-elemen struktur dengan daktilitas kecil atau getas. Daktilitas pada balok beton bertulang didefinisikan sebagai perbandingan suatu parameter deformasi struktur pada saat runtuh terhadap parameter deformasi pada saat tulangan tarik terluar penampang mengalami leleh pertama. Parameter deformasi tersebut dapat berupa perpindahan translasi, rotasi, kurvatur dan regangan.

Beton ringan dan beton mutu tinggi merupakan material yang getas. Disisi lain, baja tulangan merupakan material yang daktail. Kombinasi dari kedua material tersebut dapat menghasilkan jenis keruntuhan yang daktail, getas atau diantara keduanya, tergantung dari jumlah kontribusi masing-masing material terhadap kekuatan suatu beton bertulang.

Penelitian Park dan Paulay (1975) menunjukkan pada balok beton normal, peningkatan jumlah tulangan tarik dapat meningkatkan momen kapasitas penampang namun menurunkan daktilitas penampang. Sebaliknya peningkatan jumlah tulangan tekan relatif tidak memberikan kontribusi yang besar terhadap momen kapasitas penampang, namun sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas.

Berbagai usaha dilakukan para peneliti untuk mendapatkan balok beton bertulang yang kuat, kaku dan daktail.

Penggunaan material beton mutu tinggi dan beton ringan yang semakin banyak pada bangunan-bangunan sipil, menyebabkan penelitian terhadap model konstitutif kedua jenis tipe beton tersebut semakin berkembang. Efek lanjutnya adalah hasil studi analitis terhadap perilaku elemen-elemen struktur semakin dapat diterima oleh banyak peneliti.

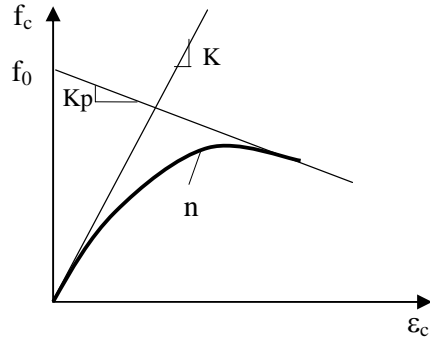
Pada makalah ini ditampilkan hasil studi analitis terhadap daktilitas balok beton bertulang dengan menggunakan beton ringan dan beton mutu tinggi. Asumsi-asumsi yang digunakan pada studi ini antara lain tidak terjadi slip antara beton dan baja (bond failure) saat keruntuhan, dengan kata lain hubungan beton dan baja lekat sempurna (perfectly bonded). Tujuan studi adalah untuk mendapatkan grafik hubungan antara momen kapasitas penampang dan kurvatur, daktilitas translasi dan rotasi untuk berbagai rasio tulangan tarik dan tekan secara analitis. Dari grafik-grafik tersebut dapat diketahui pengaruh tulangan terhadap daktilitas balok beton ringan dan beton mutu tinggi.

## 2. MODEL KONSTITUTIF MATERIAL

### 2.1. Model Konstitutif Beton

Model konstitutif beton ringan untuk kondisi tekan dalam penelitian ini mengadopsi model yang

diusulkan oleh Almusallam dan Alsayed (1995) seperti yang diperlihatkan pada gambar 1. Model ini mempunyai bentuk yang sederhana karena hanya membutuhkan satu parameter, yaitu mutu beton, dan dapat dipakai untuk beton ringan, beton normal dan beton mutu tinggi.



Gambar-1 Kurva Tegangan – Regangan Beton Tekan Almusallam dan Alsayed (1995)

Hubungan tegangan-regangan beton pada gambar 1 dinyatakan dalam bentuk :

$$f_c = \frac{(K - K_p) \epsilon_c}{\left[ 1 + \left( \frac{(K - K_p) \epsilon_c}{f_0} \right)^n \right]^{1/n}} + K_p \epsilon_c$$

dimana :

$$n = - \frac{\ln 2}{\ln \left( \frac{f_1}{f_0} - \frac{K_p}{K - K_p} \right)}$$

$$f_1 = f_c' \left[ 2 \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

Parameter-parameter untuk beton ringan diberikan oleh :

$$\epsilon_1 = \frac{0,65 f_0}{K - K_p}$$

$$f_0 = 19,1 + 1,3 f_c' - K_p \epsilon_0$$

$$K = E_c = 180,9 \sqrt{f_c'} + 7770,7$$

$$\epsilon_0 = (0,398 f_c' + 18,147) \times 10^{-4}$$

$$K_p = 1374,5 - 871,1 f_c' \quad \text{untuk } f_c' \geq 15 \text{ MPa}$$

Sedangkan parameter-parameter untuk beton mutu tinggi berupa :

$$\epsilon_1 = \frac{f_0}{K - K_p}$$

$$f_0 = 5.6 + 1.02 f_c' - K_p \epsilon_0$$

$$K_p = 5470 - 375 f_c' \rightarrow \text{for... } f_c' \leq 55 \text{ MPa}$$

$$K_p = 1639823 - 67682 f_c' \rightarrow \text{for... } f_c' > 55 \text{ MPa}$$

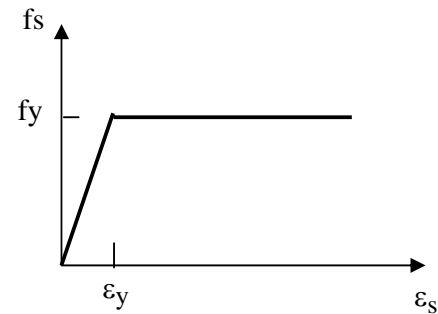
$$K = E_c = 180.9 f_c' + 7770.7$$

$$\epsilon_0 = (0.398 f_c' + 18.147) \times 10^{-4}$$

dimana \$f\_c\$ adalah kuat tekan beton, \$\epsilon\_c\$ regangan beton, \$K\$ kemiringan kurva awal, \$K\_p\$ kemiringan kurva akhir, \$f\_0\$ tegangan referensi dan \$n\$ adalah parameter bentuk kurva.

### 2.2. Model Konstitutif Baja

Model konstitutif untuk tulangan baja, dalam penelitian ini menggunakan kurva elasto-plastis biliner dengan mengabaikan fase strain hardening.



Gambar-2 Kurva tegangan-regangan tulangan baja

Bentuk hubungan tegangan-regangan pada gambar 2 dinyatakan dengan :

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad \text{untuk } \epsilon_t \leq \epsilon_y$$

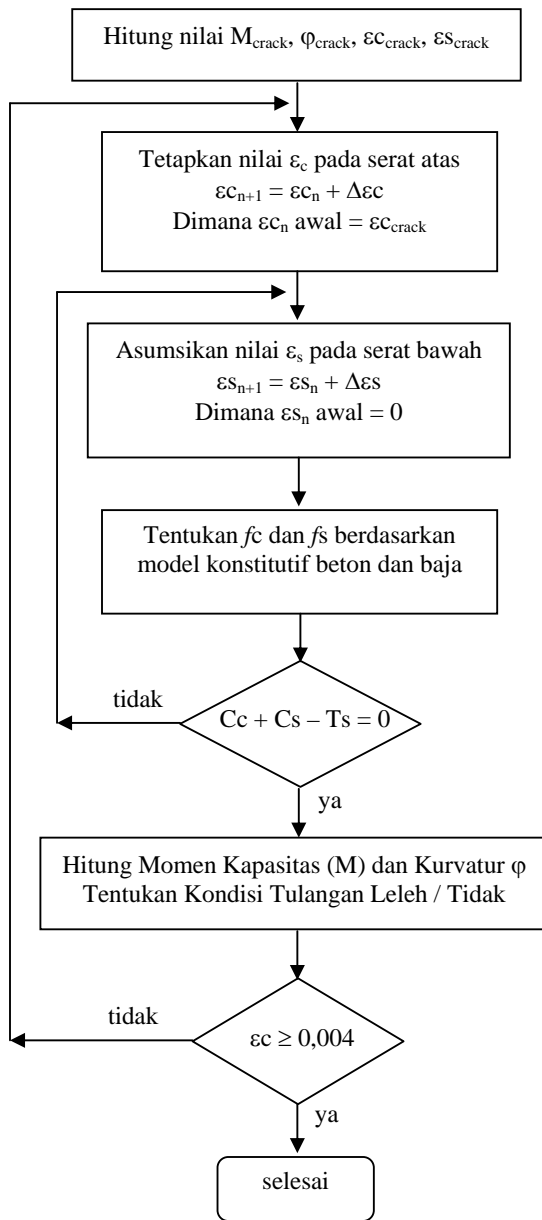
$$f_s = f_y \quad \text{untuk } \epsilon_t > \epsilon_y$$

dimana \$E\_s\$ = modulus elastisitas baja = 200.000 Mpa dan \$\epsilon\_y\$ = regangan leleh baja = 0,002

### 3. FORMULASI ANALISIS PENAMPANG

#### 3.1 Momen Kapasitas dan Kurvatur Penampang

Pada tahap awal saat suatu penampang balok beton bertulang dianggap belum mengalami retak, beban yang mampu dipikul penampang tersebut masih relatif kecil. Pada saat ini penampang diasumsikan masih berperilaku elastis linier, sehingga hubungan momen kapasitas dan kurvatur berbanding lurus. Kondisi ini berakhir sampai penampang beton mengalami retak pertama pada serat tarik terluar.



Gambar-3 Diagram Alir Prosedur Mendapatkan Momen-Kurvatur Penampang

Momen retak beton dan kurvatur retak beton dapat ditentukan dengan formula material elastis linier :

$$M_{crack} = \frac{f_r I}{(h - Y)}$$

$$\varphi_{crack} = \frac{f_r / E_c}{(h - Y)}$$

Regangan beton pada serat atas dan regangan baja pada serat bawah saat terjadi retak adalah :

$$\varepsilon_{crack} = Y \tan \varphi_{crack}$$

$$\varepsilon_{s_{crack}} = \varepsilon_{crack} \cdot (d - Y) / Y$$

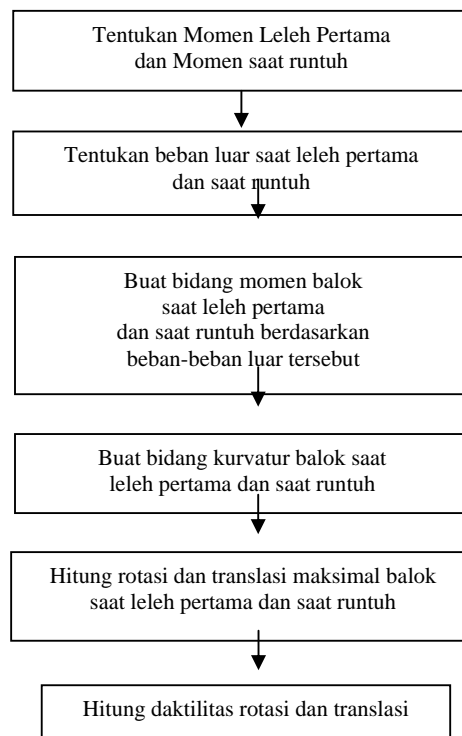
Dimana  $f_r$  adalah modulus *rupture* beton,  $I$  adalah momen inersia ekuivalen,  $h$  tinggi penampang dan  $Y$  posisi garis netral penampang yang diukur dari serat atas.

Perhitungan selanjutnya, regangan beton pada serat atas ditingkatkan dalam pertambahan yang sangat kecil. Nilai regangan baja pada serat bawah diambil bernilai nol terlebih dahulu. Berdasarkan distribusi regangan disepanjang penampang, model konstitutif beton dan baja diaplikasikan untuk mendapatkan tegangan beton dan baja. Selanjutnya diperiksa apakah syarat kesetimbangan gaya-gaya horizontal pada penampang telah terpenuhi. Jika belum, maka nilai regangan pada serat bawah ditingkatkan dengan pertambahan yang sangat kecil sekali. Iterasi ini dilakukan sampai syarat kesetimbangan gaya-gaya horizontal pada penampang terpenuhi (gambar-3).

Momen kapasitas ditentukan dari gaya-gaya horizontal yang telah setimbang terhadap suatu titik pada penampang. Sedangkan kurvatur ditentukan dari kemiringan diagram segitiga regangan pada penampang.

### 3.2 Daktilitas Kurvatur Penampang serta Daktilitas Tranlasi dan Rotasi Balok

Berdasarkan hubungan momen kapasitas dan kurvatur yang telah diperoleh sebelumnya, dapat diketahui momen saat tulangan leleh pertama kali dan momen saat kondisi runtuh. Dari kedua momen ini dapat ditentukan besarnya beban balok saat leleh pertama dan saat kondisi runtuh (gambar-4).



Gambar-4 Diagram Alir Perhitungan Daktilitas

Beban luar untuk masing-masing momen leleh pertama dan momen saat runtuh diperoleh dengan cara inversi analisis mekanika teknik. Setelah bidang momen untuk kedua beban luar tersebut diplot sepanjang balok, bidang kurvatur sepanjang balok dapat diperoleh dari hubungan momen-kurvatur yang telah diperoleh sebelumnya (sub bagian 3.1). Selanjutnya nilai rotasi dan translasi maksimum pada balok untuk kondisi leleh pertama dan kondisi runtuh ditentukan dengan menggunakan prinsip Metoda *Conjugate Beam*. Daktilitas kurvatur penampang, daktilitas rotasi dan translasi diperoleh dengan cara :

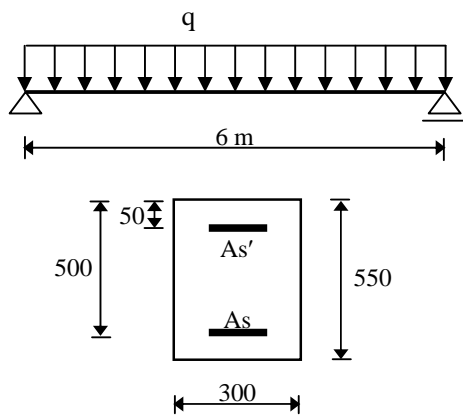
$$\text{Daktilitas kurvatur penampang} = \frac{\phi_{leleh}}{\phi_{runtuh}}$$

$$\text{Daktilitas rotasi balok} = \frac{\theta_{leleh}}{\theta_{runtuh}}$$

$$\text{Daktilitas translasi penampang} = \frac{\delta_{leleh}}{\delta_{runtuh}}$$

**4. MODEL BENDA UJI**

Benda uji pada studi ini adalah berupa balok sederhana (*simple beam*) dengan panjang bentang 6 m dan beban merata diatasnya. Penampang balok berbentuk segi empat seperti terlihat pada gambar 5.



Penampang Balok (satuan mm)

Data – data material beton dan baja tulangan :

- Mutu Beton Mutu Tinggi ( $f_c$ ) : 55 MPa
- Mutu Beton Ringan ( $f_c'$ ) : 22 MPa
- Mod. Elastisitas Beton Mutu Tinggi : 31522 MPa
- Mod. Elastisitas Beton Ringan : 11750 MPa
- Modulus *Rupture* Beton Mutu Tinggi : 4,62 MPa
- Modulus *Rupture* Beton Ringan : 2,92 MPa
- Mutu Baja Tulangan ( $f_y$ ): 320 MPa
- Mod. Elastisitas Baja Tulangan : 200.000 MPa

Asumsi regangan maksimum beton 0,004 dan regangan baja putus 0,05.

Balok beton ringan terlihat lebih getas (*brittle*) dibandingkan dengan balok beton mutu tinggi.

Benda uji terdiri dari 9 buah balok dengan data-data variasi jumlah tulangan tarik dan tekan sebagaimana ditampilkan pada tabel 1.

Tabel-1 Data variasi jumlah tulangan tarik dan tekan

Balok	$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$
1	0,0375	0,0375	1
2	0,0375	0,0250	0,667
3	0,0375	0,0125	0,333
4	0,0375	0	0
5	0,0250	0,0250	1
6	0,0250	0,0125	0,5
7	0,0250	0	0
8	0,0125	0,0125	1
9	0,0125	0	0

dimana :

$\rho = A_s / (b d)$ , yaitu rasio luas tulangan tarik dengan luas penampang efektif beton.

$\rho' = A_s' / (b d)$ , yaitu rasio luas tulangan tekan dengan luas penampang efektif beton.

**5. HASIL ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Hasil analisa momen-kurvatur diberikan pada tabel 2 – 5, dan gambar 6, 7 pada lampiran. Dari grafik terlihat retak awal yang terjadi baik pada balok beton mutu tinggi maupun pada balok beton ringan relatif tidak dipengaruhi oleh penambahan jumlah tulangan. Retak awal banyak dipengaruhi oleh kemampuan serat terluar penampang beton dalam menahan gaya tarik.

Pada balok beton mutu tinggi, penambahan jumlah tulangan tekan menyebabkan peningkatan daktilitas kurvatur penampang yang sangat signifikan (gambar 6). Sedangkan pada balok beton ringan, pengaruh tulangan tekan tidak terlihat meningkatkan daktilitas penampang, kecuali untuk kondisi jumlah tulangan tekan dan tarik sama banyak (gambar-7).

Penambahan tulangan tekan pada balok beton mutu tinggi tidak terlalu mempengaruhi kapasitas lentur penampang (tabel 4). Jika jumlah tulangan tarik tetap, setelah terjadi kelelahan baja tulangan tarik maka gaya tarik yang dapat ditahan oleh tulangan menjadi tetap yaitu sebesar luas penampang tulangan tersebut dikali dengan tegangan leleh baja ( $T_s = A_s f_y$ ). Disaat lain, penambahan tulangan tekan tidak terlalu mempengaruhi panjang lengan antara gaya tarik tulangan pada serat bawah dengan resultan gaya tekan tulangan dan beton pada serat atas, sehingga tidak terlalu mempengaruhi kekuatan lentur penampang. Namun penambahan tulangan tekan menyebabkan beton pada serat atas semakin ‘terbantu’ dalam menahan tekan, sehingga tinggi blok tegangan tekan beton semakin mengecil. Kondisi ini mengakibatkan posisi garis netral semakin naik ke atas, sehingga kelengkungan (*curvature*) balok semakin besar saat balok runtuh. Semua keruntuhan balok beton ringan disebabkan oleh tercapainya lebih dahulu regangan tekan hancur

beton sebesar 0,004 sebelum terjadi kelelahan tulangan tarik. Pada balok beton ringan, daktilitas tercapai hanya jika jumlah tulangan tarik dan tekan sama banyak.

Jumlah tulangan tarik dan tekan sangat berpengaruh terhadap kekuatan lentur balok beton ringan (tabel 5). Hal ini disebabkan karena tulangan tarik tidak mengalami kelelahan sampai balok beton hancur, sehingga untuk memenuhi kesetimbangan gaya horizontal penampang, kemampuan tulangan tarik akan terus meningkat ( $T_s = A_s f_s$ ) jika tulangan tekan bertambah banyak. Meskipun jarak antara lengan gaya tarik dan resultan gaya tekan pada penampang tidak terlalu banyak bertambah, namun peningkatan kemampuan gaya tarik ini mengakibatkan kapasitas lentur penampang menjadi naik dengan pertambahan jumlah tulangan tekan.

**6. KESIMPULAN**

Kesimpulan dari studi ini adalah:

1. Pengaruh jumlah tulangan tarik atau tekan terhadap retak awal pada penampang beton relatif sangat kecil sekali.
2. Pada balok beton mutu tinggi, peningkatan daktilitas penampang sangat dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tekan dan tidak terlalu dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tarik. Sedangkan pada balok beton ringan, penambahan tulangan tekan dan tarik

tidak dapat meningkatkan daktilitas penampang. Daktilitas terjadi hanya jika jumlah tulangan tekan sama dengan jumlah tulangan tarik.

3. Pada balok beton mutu tinggi, peningkatan kekuatan lentur penampang dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tarik, dan tidak terlalu dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tekan. Sedangkan pada balok beton ringan, peningkatan kekuatan lentur penampang dipengaruhi oleh peningkatan jumlah tulangan tarik dan juga oleh peningkatan jumlah tekan.
4. Balok beton mutu tinggi lebih daktil dibandingkan dengan balok beton ringan.

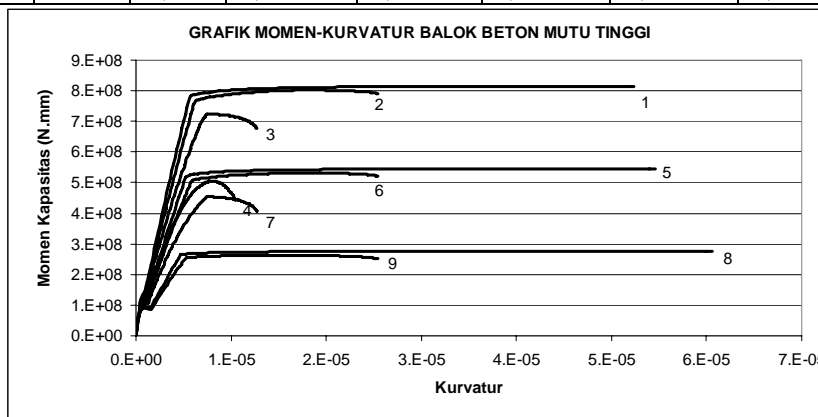
**DAFTAR PUSTAKA**

1. Park, R., and Paulay, T, *Reinforced Concrete Structures*, John Willey & Sons, New York, 1975
2. Almusallam, T. H., and Alsayed S. H., *Stress-Strain Relationship of Normal, High Strength and Light Weight Concrete*, Magazine of Concrete Research, Vol. 47, No. 170, pp 39-44, March 1995
3. Nawy, E.G., *Reinforced Concrete, A Fundamental Approach*, New Jersey, Prentice-Hall, 1985
4. SNI-03-2847-2002, *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, Badan Standarisasi Nasional, 2002

**LAMPIRAN**

Tabel-2 Hasil Momen Kapasitas dan Kurvatur pada Balok Beton Mutu Tinggi

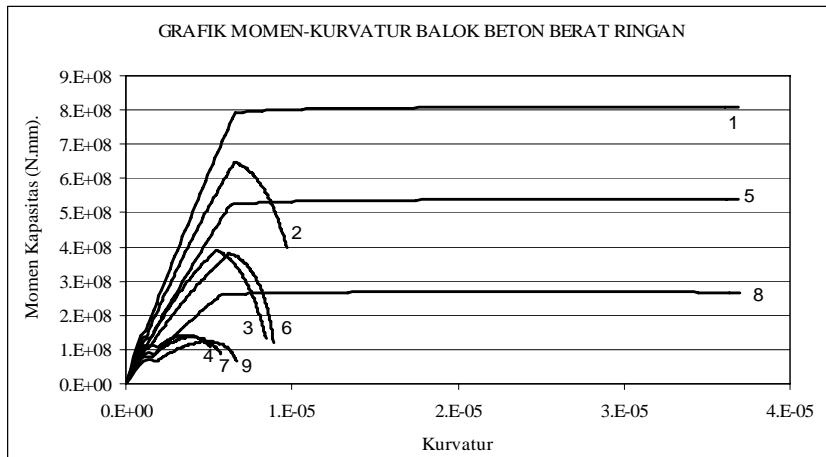
No. Balok	$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	Saat Retak Pertama		Saat Leleh Pertama		Saat Balok Runtuh	
				Momen	Kurvatur	Momen	Kurvatur	Momen	Kurvatur
1	0,0375	0,0375	1,000	1,21E+08	5,33E-07	7,84E+08	5,67E-06	8,13E+08	5,24E-05
2	0,0375	0,0250	0,667	1,17E+08	5,54E-07	7,68E+08	6,22E-06	7,91E+08	2,55E-05
3	0,0375	0,0125	0,333	1,11E+08	5,79E-07	7,24E+08	7,52E-06	6,76E+08	1,27E-05
4	0,0375	0	0,000	1,05E+08	6,10E-07	Belum leleh	Belum leleh	4,42E+08	1,05E-05
5	0,0250	0,0250	1,000	1,04E+08	5,33E-07	5,24E+08	5,30E-06	5,43E+08	5,47E-05
6	0,0250	0,0125	0,500	9,92E+07	5,56E-07	5,08E+08	5,90E-06	5,21E+08	2,55E-05
7	0,0250	0	0,000	9,34E+07	5,85E-07	4,54E+08	7,52E-06	4,06E+08	1,27E-05
8	0,0125	0,0125	1,000	8,69E+07	5,33E-07	2,66E+08	4,72E-06	2,74E+08	6,06E-05
9	0,0125	0	0,000	8,17E+07	5,59E-07	2,55E+08	5,27E-06	2,51E+08	2,55E-05



Gambar-6 Grafik Momen Kapasitas dan Kurvatur pada Balok Beton Mutu Tinggi

Tabe- 3 Hasil Momen Kapasitas dan Kurvatur pada Balok Beton Berat Ringan

No. Balok	$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	Saat Retak Pertama		Saat Leleh Pertama		Saat Balok Runtuh	
				Momen	Kurvatur	Momen	Kurvatur	Momen	Kurvatur
1	0,0375	0,0375	1,000	1,41E+08	9,04E-07	Belum leleh	Belum leleh	8,07E+08	3,68E-05
2	0,0375	0,0250	0,667	1,34E+08	9,80E-07	Belum leleh	Belum leleh	3,98E+08	9,68E-06
3	0,0375	0,0125	0,333	1,23E+08	1,09E-06	Belum leleh	Belum leleh	1,31E+08	8,44E-06
4	0,0375	0	0,000	1,06E+08	1,27E-06	Belum leleh	Belum leleh	1,07E+08	5,11E-06
5	0,0250	0,0250	1,000	1,09E+08	9,04E-07	Belum leleh	Belum leleh	5,37E+08	3,69E-05
6	0,0250	0,0125	0,500	1,00E+08	1,00E-06	Belum leleh	Belum leleh	1,22E+08	8,89E-06
7	0,0250	0	0,000	8,68E+07	1,16E-06	Belum leleh	Belum leleh	8,77E+07	5,73E-06
8	0,0125	0,0125	1,000	7,65E+07	9,04E-07	Belum leleh	Belum leleh	2,67E+08	3,69E-05
9	0,0125	0	0,000	6,62E+07	1,03E-06	Belum leleh	Belum leleh	6,67E+07	6,68E-06



Gambar-7 Grafik Momen Kapasitas dan Kurvatur pada Balok Beton Berat Ringan

Tabel-4 Daktilitas Balok Beton Mutu Tinggi

No. Balok	$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	Daktilitas Kurvatur	Daktilitas Rotasi	Daktilitas Translasi	Momen Kapasitas Maksimum (N.mm)
1	0,0375	0,0375	1,000	9,247	1,369E+00	1,664E+00	8,14E+08
2	0,0375	0,0250	0,667	4,0960	1,346E+00	1,486E+00	8,03E+08
3	0,0375	0,0125	0,333	1,6930	1,007E+00	1,011E+00	7,23E+08
4	0,0375	0	0,000	Tidak daktail	Tidak daktail	Tidak daktail	5,05E+08
5	0,0250	0,0250	1,000	10,307	1,567E+00	1,830E+00	5,44E+08
6	0,0250	0,0125	0,500	4,3210	1,396E+00	1,552E+00	5,33E+08
7	0,0250	0	0,000	1,6930	1,010E+00	1,015E+00	4,53E+08
8	0,0125	0,0125	1,000	12,839	1,732E+00	2,113E+00	2,76E+08
9	0,0125	0	0,000	4,8310	1,275E+00	1,382E+00	2,63E+08

Tabel-5 Daktilitas Balok Beton Ringan

No. Balok	$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$	Daktilitas Kurvatur	Daktilitas Rotasi	Daktilitas Translasi	Momen Kapasitas Maksimum (N.mm)
1	0,0375	0,0375	1,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	8,08E+08
2	0,0375	0,0250	0,667	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	6,47E+08
3	0,0375	0,0125	0,333	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	3,90E+08
4	0,0375	0	0,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	1,42E+08
5	0,0250	0,0250	1,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	5,38E+08
6	0,0250	0,0125	0,500	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	3,80E+08
7	0,0250	0	0,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	1,36E+08
8	0,0125	0,0125	1,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	2,68E+08
9	0,0125	0	0,000	Tidak daktil	Tidak daktil	Tidak daktil	1,24E+08