

Studi Numerik Pengaruh Ukuran Penampang, Rasio Tulangan Lentur dan Jarak Tulangan Geser Terhadap Kekakuan Balok Beton Bertulang Menggunakan Program Response 2000

(Numerical Study of The Effect of Sectional Size, flexural reinforcement ratio and shear reinforcement distance to Stiffness of Reinforced Concretes Beam Using Response 2000 Program)

HAKAS PRAYUDA, FADILLAWATY SALEH, ISTIAWAN

ABSTRACT

One of the reinforced concrete beam behavior can be seen from the value of deflection, maximum load, the relationship between moment with curvature and stiffness of the beam. Response 2000 program is an approach program with numerical method that can be used to analyze the reinforced concrete beam. The results of this program include the value of deflection, maximum load, moment and curvature. This study aims to obtain numerical results in the form of stiffness of the beam, deflection value, maximum load, moment and curvature until the crack pattern occurs. This research was done by making 32 sample beam with variation of cross section of beam, flexural reinforcement ratio and shear reinforcement distance. The result of the analysis shows that the length of the span has a big effect on the deflection value, the maximum load and the stiffness but not the nominal moment. The results of the reinforcement ratio in this study greatly affect the deflection value, the maximum load, the nominal moment and the stiffness of the beam, while the shear reinforcement distance affects the beam behavior but only on some specimens.

Keywords: Response 2000, Reinforced Beam, Deflection, Stiffness

PENDAHULUAN

Balok merupakan elemen struktur yang sangat penting didalam suatu bangunan menggunakan beton. Dalam perencanaan konstruksi, balok direncanakan kuat dalam menahan gaya-gaya yang mungkin akan terjadi sesuai dengan perhitungan beban baik dari arah vertikal maupun horizontal. Balok juga terdiri dari struktur lentur yang sangat rumit karena banyaknya gaya-gaya yang diterima sehingga rawan terjadinya kerusakan.

Salah satu konstruksi yang sering digunakan dalam pembangunan suatu gedung adalah konstruksi beton bertulang. Konstruksi balok dengan menggunakan beton bertulang ini dimaksudkan agar balok dapat menahan gaya lentur dan mempunyai kekakuan sehingga dapat bekerja dengan balok pada konstruksi bangunan tersebut. Beton polos merupakan bahan yang memiliki kekuatan tekan yang sangat besar akan tetapi memiliki kekuatan tarik yang sangat rendah, sehingga dapat dikombinasikan dengan tulangan baja yang memiliki kekuatan tarik sangat baik yang lebih sering dikenal dengan

beton bertulang. Dengan masing-masing kelebihan yang ada pada elemen tersebut diharapkan menghasilkan konfigurasi yang baik antara beton dan tulangan baja dalam menahan gaya-gaya yang bekerja.

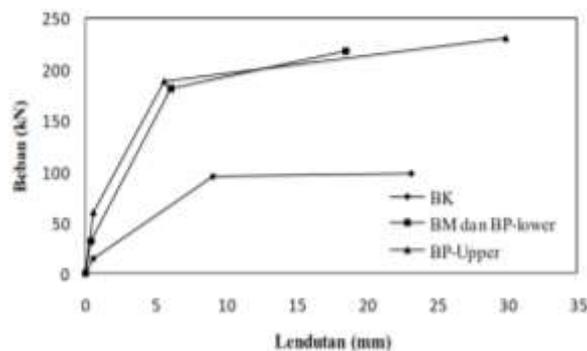
Suatu pembangunan tentunya mengharapkan konstruksi bangunan yang sesuai dengan peraturan keamanan sehingga perlu dianalisis terlebih dahulu bagian-bagian konstruksi ini agar memenuhi standar yang berlaku di Indonesia. Pada penelitian ini berpedoman pada peraturan SNI 03-2847-2002 dan SNI-2847-2013 tentang perhitungan struktur beton bertulang untuk bangunan gedung.

Tujuan dari penelitian studi numerik ini antara lain sebagai berikut.

- a. Mengetahui nilai lendutan (deflection), momen nominal, kelengkungan (curvature), kekakuan balok dan jenis pola retak (crack).
- b. Mengetahui pengaruh variasi ukuran penampang, rasio tulangan lentur dan jarak tulangan geser terhadap nilai lendutan, momen nominal, kelengkungan dan kekakuan balok.

Chairunnisa (2009) meneliti tentang penambahan tulangan longitudinal tarik dan tekan dengan selimut mortar mutu tinggi. Benda uji yang dibuat terdiri dari tiga tipe balok yaitu balok kontrol, balok monolit dan balok perkuatan. Balok kontrol di buat berukuran 150x250 mm, balok monolit dibuat dengan ukuran 190x330 mm sedangkan balok perkuatan adalah balok kontrol yang diperkuat dengan satu buah tulangan tekan dan dua buah tulangan tarik, masing-masing tulangan berukuran diameter 13 mm. Panjang bentang seluruh benda uji 2500 mm. Tulangan tarik di cor terpisah dengan perlakuan berupa bonding agent, perhitungan analisis teoritis untuk balok perkuatan diasumsikan dengan lower analyze dan upper analyze. Hal ini dilakukan karena ada perbedaan mutu beton balok kontrol sebesar $F_c' = 28,514$ Mpa dan mutu mortar sebesar $F_m' = 56,125$ Mpa. Dari Tabel 1 terlihat bahwa balok monolit (bm) dan balok perkuatan *lower estimate* (bp) menunjukkan peningkatan beban

maksimum sebesar 123,21 % terhadap balok kontrol (bk) dan balok perkuatan *upper estimate* (bp_{upper}) mengalami peningkatan beban maksimum sebesar 136,14 % terhadap balok kontrol (bk). Hubungan beban lendutan hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil analisis program *Response-2000* pada Tabel 2 diperoleh besarnya kenaikan beban dari balok monolit (bm) dan balok perkuatan *lower estimate* sebesar 115,72% terhadap balok kontrol (bk) dan perkuatan *upper estimate* meningkat sebesar 132,38% terhadap balok kontrol (bk). Hasil penelitian menyebutkan bahwa kekuatan lentur untuk balok perkuatan meningkat, tetapi peningkatan ini tidak linier karena terjadi pelepasan selimut mortar (*debonding*). Menunjukkan perkuatan *upper estimate* (bp_{upper}) memiliki nilai curvatur tertinggi dengan nilai 63,718, dan yang terendah adalah balok monolit (bm) dengan nilai kurvatur 47,824.



GAMBAR 1. Hubungan beberapa lendutan rata-rata benda uji (Chairunnisa, 2009)

TABEL 1. Hasil pengujian balok (Chairunnisa, 2009)

No	Benda Uji	Beban (kN)			Lendutan (mm)			Peningkatan Pmaks (%)
		Retak 1	Leleh	Maks	Retak 1	Leleh	Maks	
1	BK	14,302	94,249	97,50	0,515	9,08	23,20	0
2	BM	31,377	180,56	217,63	0,384	6,09	18,50	123,21
3	BP Lower	31,377	180,56	217,63	0,384	6,09	18,50	123,21
4	BP Upper	58,85	188,83	230,24	0,534	5,61	29,93	136,14

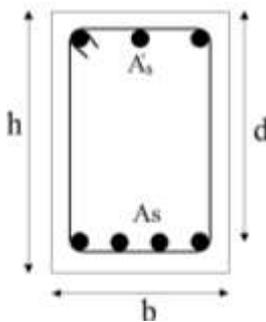
TABEL 2. Hasil analisis lentur balok uji (Chairunnisa, 2009)

No	Benda Uji	Beban (kN)			Lendutan (mm)			Lebar Retak (mm)			Peningkatan Pmaks (%)
		Retak 1	Leleh	Maks	Retak 1	Leleh	Maks	Retak 1	Leleh	Maks	
1	BK	11,65	95,76	99,90	0,529	12,33	24,47	0,02	0,45	1,07	0
2	BM	24,34	192,69	215,53	0,399	7,26	20,65	0,03	0,63	1,21	115,72
3	BP Lower	24,34	192,69	215,53	0,399	7,26	20,65	0,03	0,63	1,21	115,72
4	BP Upper	34,95	199,86	232,15	0,490	7,00	27,15	0,04	0,63	1,75	132,38

Jenis-Jenis Balok Beton Bertulang

Balok adalah elemen struktur yang menyalurkan beban-beban dari pelat ke kolom penyangga yang vertikal. Dalam konstruksi gedung biasanya balok dibagi menjadi tiga penampang yaitu balok L, T dan persegi.

1. Balok persegi



GAMBAR 2. Penampang balok persegi dengan tulangan rangkap

keterangan:

h = tinggi balok

b = lebar balok

d = tinggi balok diukur dari tepi serat yang tertekan sampai ke pusat tulangan tarik

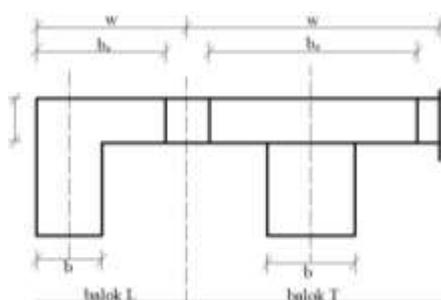
A_s = luas tulangan tarik

$A's$ = luas tulangan tekan

Untuk perencanaan lebar efektif dan tebal balok sudah diatur dalam SNI-03-2847-2002 tentang tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung. Tabel 8, SNI-03-2847-2002 menyajikan tinggi minimum balok sebagai berikut ini.

- Balok diatas dua tumpuan $h_{min} = L/16$.
- Balok dengan satu ujung penerus $h_{min} = L/18,5$.
- Balok dengan kedua ujung penerus $h_{min} = L/21$.
- Balok kantilever $h_{min} = L/8$, dengan L = panjang bentang dari tumpuan ke tumpuan.

2. Balok L/T



GAMBAR 3. Penampang balok T dan balok L

keterangan :

T_p = Tebal sayap

b = lebar balok

w = jarak bersih antar balok

b_e = lebar sayap

Sedangkan untuk ketentuan lebar balok T dan L, (SNI-2847-2013) sebagai berikut ini.

- Pada konstruksi balok T, sayap dan balok harus dibangun menyatu atau bila tidak harus dilekatkan bersama secara efektif.
- Lebar slab efektif sebagai sayap balok T tidak boleh melebihi seperempat panjang bentang balok, dan lebar efektif sayap yang menggantung pada masing-masing sisi badan balok tidak boleh melebihi :
 - Delapan kali tebal slab, dan
 - Setengah jarak bersih ke badan di sebelahnya.
- Untuk balok dengan slab pada suatu sisi saja, lebar efektif yang menggantung tidak boleh melebihi :
 - $\frac{1}{12}$ panjang bentang balok,
 - Enam kali tebal slab, dan
 - Setengah jarak bersih ke badan disebelahnya

Analisis Balok Beton Tulangan Rangkap

Balok merupakan struktur untuk menyalurkan beban dari plat ke kolom. Dari beban tersebut mengakibatkan gaya-gaya yang mengakibatkan kerusakan pada balok. Ada 3 kemungkinan jenis keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu:

1. Keruntuhan Tarik (*UnderReinforced*)

Keruntuhan Tarik terjadi bila jumlah tulangan baja tarik sedikit sehingga tulangan tersebut akan leleh terlebih dahulu sebelum betonnya pecah, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih besar dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu disebut penampang *under-reinforced*, perilakunya sama seperti yang dilakukan pada pengujian yaitu terjadi keretakan pada balok tersebut.

2. Keruntuhan Tekan (*Over-reinforced*)

Keruntuhan Tekan terjadi bila jumlah tulangan vertikal banyak maka keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) lebih kecil dari regangan beton (ϵ_y). Penampang seperti itu disebut penampang *over-reinforced*, sifat keruntuhannya adalah getas (non-daktail). Suatu kondisi yang berbahaya karena penggunaan bangunan tidak melihat adanya deformasi yang besar yang dapat dijadikan pertanda bilamana struktur tersebut mau runtuh,

sehingga tidak ada kesempatan untuk menghindarinya terlebih dahulu.

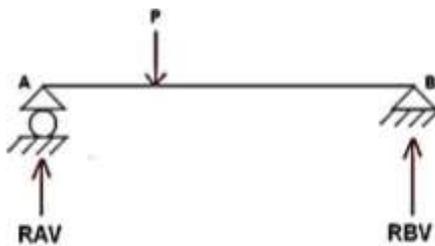
3. Keruntuhan *Balance*

Keruntuhan *Balance* terjadi jika baja dan beton tepat mencapai kuat batasnya, yaitu apabila regangan baja (ϵ_s) sama besar dengan regangan beton (ϵ_y). Jumlah penulangan yang menyebabkan keruntuhan *balance* dapat dijadikan acuan untuk menentukan apakah tulangan tarik sedikit atau tidak, sehingga sifat keruntuhan duktail atau sebaliknya.

Sedangkan kerusakan balok terjadi akibat pengaruh gaya luar dan gaya dalam.

1. Gaya luar

Gaya luar yaitu gaya yang ada di luar suatu konstruksi biasanya disebut gaya aksi-reaksi. Gaya aksi dapat diartikan gaya yang menghampiri konstruksi tersebut yang direspon oleh gaya reaksi.



GAMBAR 4. Reaksi perletakan akibat gaya luar

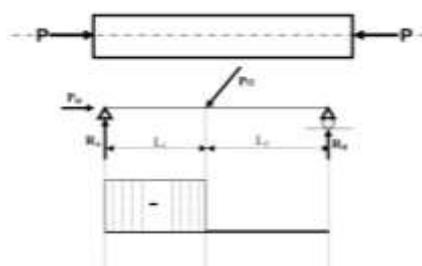
Beban P merupakan gaya aksi kedua tumpuan menimbulkan gaya reaksi yang biasa disebut reaksi tumpuan A vertikal (RAV) dan reaksi tumpuan B vertikal (RBV)

2. Gaya dalam

Gaya dalam yaitu gaya yang bekerja didalam suatu konstruksi. Dalam analisis gaya dalam ada 3 jenis gaya yang bekerja di suatu balok yaitu:

a. Gaya normal (*Normal Force Diagram*)

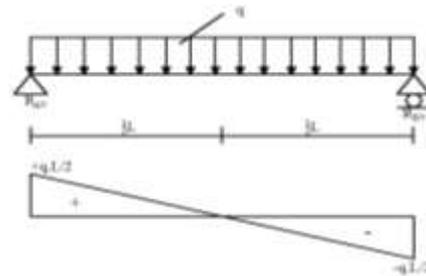
Gaya normal adalah suatu gaya yang garis kerjanya berhimpit atau sejajar dengan garis batang



GAMBAR 5. Normal Forces Diagram (NFD)

b. Gaya lintang (*Shear Forces Diagram*)

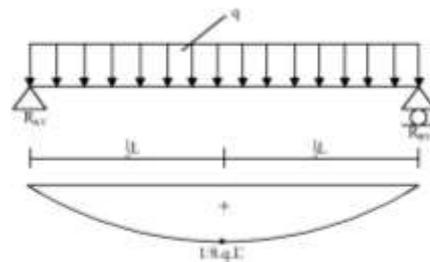
Gaya lintang adalah gaya dalam yang bekerja tegak lurus sumbu balok.



GAMBAR 6. Shear Forces Diagram (SFD)

c. Momen (*Bending Moment Diagram*)

Momen adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya gaya dalam yang bekerja pada sebuah benda sehingga mengakibatkan benda tersebut berotasi.



GAMBAR 7. Bending Moment Diagram (BMD)

Jadi dari jenis pembebanan dan momen yang terjadi pada balok diatas dapat dikatakan bahwa momen luar harus dilawan oleh momen dalam yang disumbangkan oleh kekuatan dari penampang balok itu sendiri. Besarnya momen ultimate diatur dalam SNI 03-2847-2002 sebagai hasil kombinasi terfaktor dari momen lentur akibat beban mati ($DL = Dead Load$) dan beban hidup ($LL = Live Load$) serta pengaruh beban – beban lainnya yang berhubungan dengan kondisi alam. Momen dalam yang harus dimiliki oleh penampang balok untuk menahan momen luar ultimate (M_u) yang terjadi dinyatakan dalam istilah Momen nominal (M_n). Hubungan M_n dengan M_u sebagai berikut

$$\phi M_n \geq M_u \tag{1}$$

Faktor reduksi (ϕ) merupakan faktor kekuatan untuk mengantisipasi terjadinya kekurangan kekuatan nominal yang direncanakan. Hal ini bisa terjadi akibat pelaksanaan pencampuran beton yang

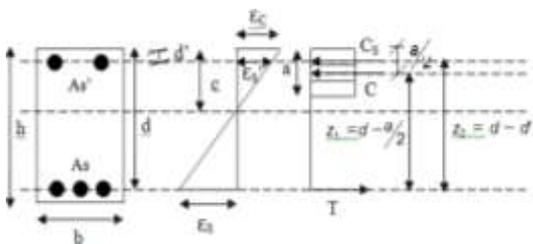
kurang sesuai spesifikasi, pengecoran yang kurang baik, cuaca saat pengecoran tidak mendukung maupun hal-hal yang lain yang berkaitan dengan pelaksanaan di lapangan. Untuk perencanaan terhadap kuat lentur besarnya faktor reduksi adalah untuk $f'c$ antara 17-28 Mpa β_1 sebesar 0,85, diatas 28 Mpa β_1 harus direduksi sebesar 0,05 untuk setiap kelebihan kekuatan sebesar 7 Mpa diatas 28Mpa. Tetapi tidak boleh diambil kurang dari 0,65. Sesuai dengan pasal 10.2.7.3, (SNI-2847-2013)

Setelah nilai momen nominal sudah diperoleh maka dapat dihitung banyaknya pembesian yang dibutuhkan untuk perencanaan tulangan lentur pada penampang balok. besarnya pembesian yang direncanakan dinyatakan dalam As yang menyatakan luas total pembesian yang diperlukan.

Dalam kontruksi bangunan hampir semua balok menggunakan tulangan rangkap, Tulangan rangkap sebenarnya hanya tulangan tambahan pada daerah tekan, dan memudahkan untuk pemasang sengkang. Fungsi dari tulangan tekan ini sebagai berikut ini.

- 1) Meningkatkan kekakuan penampang sehingga dapat mengurangi defleksi struktur.
- 2) Meningkatkan kapasitas rotasi penampang yang berkaitan dengan peningkatan daktilitas penampang.
- 3) Dapat menahan kemungkinan adanya momen yang berubah-ubah.
- 4) Meningkatkan momen tahanan penampang karena dimensi penampang.

Gambar dibawah ini menunjukkan konsep analisis tulangan rangkap balok.



GAMBAR 8. Diagram regangan dan tegangan balok tulangan rangkap (Adam, 2016)

Pembatasan Baja Tulangan Balok Persegi

SNI 2002 menetapkan bahwa jumlah tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,75 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan. Sehingga SNI -2002 menetapkan batasan untuk ρ sebesar:

$$\rho_{maks} = 0,75 \quad (2)$$

$$\rho' = 0,85 \beta \left(\frac{F_{c'}}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (3)$$

Dan batasan rasio untuk penulangan minimum adalah sebesar:

$$\rho_{min} = 1,4/f_y \quad (4)$$

Kelengkungan (Curvature)

Nilai kelengkungan dapat digunakan untuk mengetahui besarnya regangan pada saat terjadi lendutan (Popov, 1996) lendutan yang terjadi akan membentuk cekungan pada balok yang menerima beban.

Defleksi dan Deformasi

Setiadi (2015) Defleksi atau perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. Deformasi pada balok secara sangat mudah dapat dijelaskan berdasarkan defleksi balok dari posisinya sebelum mengalami pembebanan. Defleksi diukur dari permukaan netral awal ke posisi netral setelah terjadi deformasi. Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu sebagai berikut ini.

1. Kekakuan Batang

Semakin kaku suatu batang maka lendutan batang yang akan terjadi pada batang akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Besar-kecilnya gaya yang diberikan pada batang berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi. Dengan kata lain semakin besar beban yang dialami batang maka defleksi yang terjadipun semakin kecil.

3. Jenis tumpuan yang diberikan

Jumlah reaksi dan arah pada tiap jenis tumpuan berbeda-beda. Jika karena itu besarnya defleksi pada penggunaan tumpuan yang berbeda-beda tidaklah sama. Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi pada tumpuan rol lebih besar dari tumpuan pin (pasak) dan defleksi yang terjadi pada tumpuan pin lebih besar dari tumpuan jepit.

4. Jenis beban yang terjadi pada batang

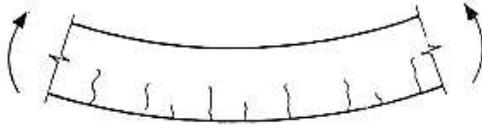
Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian batang yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan

pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja.

Pola Retak

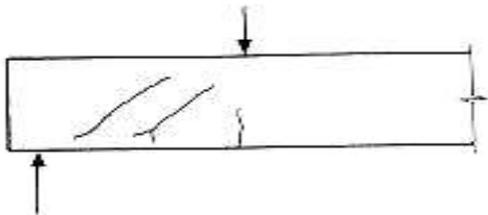
Faktor yang mengakibatkan retak pada balok adalah tegangan yang terjadi terutama tegangan tarik. Menurut McCormac (2001) pola retak untuk balok dan pelat suatu arah dibedakan menjadi 5 macam yaitu sebagai berikut ini.

1. Retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik yang mengarah keatas sampai daerah sumbu netral.



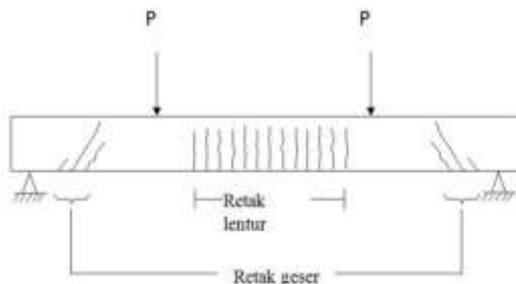
GAMBAR 9. Retak lentur murni (Mukahar dkk, 2009)

2. Retak miring karena geser dapat terjadi pada bagian badan balok sebagai retak bebas atau perpanjangan retak lentur. Kadang-kadang, retak miring akan berkembang secara bebas pada balok atau pelat satu arah meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut.



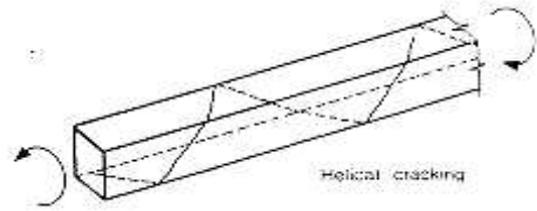
GAMBAR 10. Retak geser (Mukahar dkk, 2009)

3. Retak jenis ini adalah retak yang paling umum, retak geser-lentur merupakan perpaduan antara lentur dan retak geser.



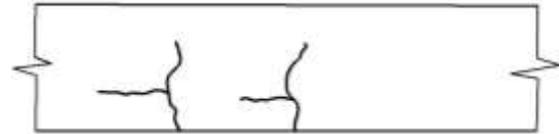
GAMBAR 11. Retak geser lentur (Mukahar dkk, 2009)

4. Retak puntir (*torsion crack*) cukup mirip dengan retak geser, tetapi retak puntir ini melingkar balok atau pelat satu arah, jika sebuah bentang beton tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan retak dan runtuh disepanjang garis 45° karena tarik diagonal yang disebabkan tegangan puntir.



GAMBAR 12. Retak torsi (Mukahar dkk, 2009)

5. Retak lekatan terjadi karena tegangan lekatan (*bond stress*) antara beton dan tulangan yang mengakibatkan pemisahan disepanjang tulangan.



GAMBAR 13. Retak lekatan (Mukahar dkk, 2009)

METODELOGI PENELITIAN

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan balok berbentuk persegi dan T, dengan mutu beton (f_c') 35 MPa, dan kuat tarik tulangan (f_y) 400 MPa. Benda uji balok persegi dengan dimensi 600 mm x 400 mm dan 400 mm x 400 mm menggunakan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$ dan ρ_{min} dengan kombinasi jarak sengkang 150 mm dan 200 mm, panjang bentang 4 m dan 5 m. Untuk dimensi benda uji balok T1 lebar sayap (b) 600 mm tinggi sayap (h_f) 300 mm, lebar balok (b_w) 400 mm dan tinggi balok (h) 600 mm. Dimensi balok T2 lebar sayap (b) 600 mm, tinggi sayap (h_f) 150 mm, lebar balok (b_w) 400 mm dan tinggi balok (h) 600 mm dengan kombinasi rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$ dan ρ_{min} dan kombinasi jarak sengkang 150 mm dan 200 mm, panjang bentang 4 m dan 5 m, Untuk spesifikasi benda uji balok T dapat dilihat pada Tabel 3, untuk variasi tulangan dan bentang balok T dapat dilihat pada Tabel 4. Untuk dimensi dan panjang bentang benda uji balok persegi dapat dilihat pada Tabel 5 dan untuk variasi tulangan benda uji balok persegi dapat dilihat pada Tabel 6.

Alat yang digunakan pada penelitian ini untuk analisis dan pembuatan benda uji, dengan uraian sebagai berikut.

- a) Program *response -2000* digunakan untuk menganalisis kekuatan balok.
- b) Program excel untuk menghitung kekuatan balok secara manual.
- c) Program *Auto CAD* untuk menggambar penampang balok.

TABEL 3. Dimensi benda uji balok T

Benda Uji	Tinggi Balok (mm)	Lebar Balok (mm)	Tinggi Sayap (mm)	Lebar Sayap (mm)
T1	600	400	150	600
T2	600	400	150	600
T3	600	400	150	600
T4	600	400	150	600
T5	600	400	150	600
T6	600	400	150	600
T7	600	400	150	600
T8	600	400	150	600
T9	600	400	300	600
T10	600	400	300	600
T11	600	400	300	600
T12	600	400	300	600
T13	600	400	300	600
T14	600	400	300	600
T15	600	400	300	600
T16	600	400	300	600

TABEL 4. Penulangan dan panjang benda uji balok T

Benda uji	diameter tulangan pokok	Rasio tulangan (ρ)	Tulangan sengkang (mm)	Panjang Balok (m)
T1	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150	4
T2	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150	5
T3	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150	4
T4	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150	5
T5	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200	4
T6	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200	5
T7	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200	4
T8	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200	5
T9	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150	4
T10	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150	5
T11	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150	4
T12	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150	5
T13	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200	4
T14	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200	5
T15	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200	4
T16	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200	5

TABEL 5. Dimensi benda uji balok persegi

Benda uji	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Panjang balok (m)
P1	400	600	4
P2	400	600	5
P3	400	600	4
P4	400	600	5
P5	400	600	4
P6	400	600	5
P7	400	600	4
P8	400	600	5
P9	400	400	4
P10	400	400	5
P11	400	400	4
P12	400	400	5
P13	400	400	4
P14	400	400	5
P15	400	400	4
P16	400	400	5

TABEL 6. Penulangan benda uji balok persegi

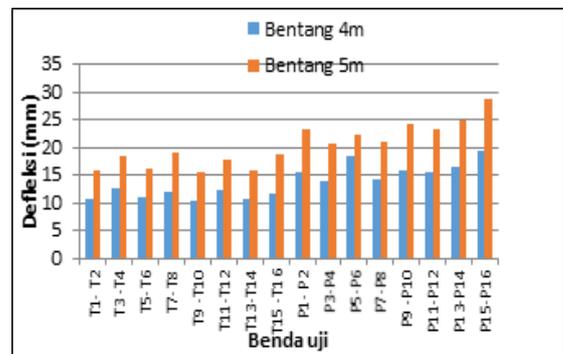
Benda uji	Diameter tulangan pokok	Rasio tulangan (ρ)	Tulangan sengkang (mm)
P1	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150
P2	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150
P3	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150
P4	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150
P5	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200
P6	5D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200
P7	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200
P8	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200
P9	4D19-5D13	ρ_{min}	D10-150
P10	4D19-5D13	ρ_{min}	D10-150
P11	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150
P12	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150
P13	4D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200
P14	4D19-5D13	ρ_{min}	D10-150-200
P15	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200
P16	8D22	$\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$	D10-150-200

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Defleksi

Defleksi merupakan perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan pada balok atau batang. Dari hasil analisis *Response-2000* bisa membandingkan nilai defleksi dari benda uji balok dengan variasi bentang. Gambar 5.1 dapat dilihat bahwa pada bentang 4 m benda uji T9 mempunyai nilai defleksi terkecil dengan nilai defleksi 10, 345 mm, sedangkan benda uji P15 mempunyai nilai defleksi terbesar dengan nilai 19, 435 mm. Benda uji T9 mempunyai defleksi terkecil karena benda uji ini mempunyai dimensi cukup besar yaitu berbentuk T berdimensi, tinggi balok (h) 600 mm, lebar balok (b_e) 400, lebar sayap (b) 600 dan tinggi sayap (h_f) 300 dengan tulangan pokok ρ_{min} dan jarak sengkang 150 mm. Benda uji P15 mempunyai nilai defleksi terbesar karena benda uji ini mempunyai dimensi yang kecil yaitu berbentuk persegi berdimensi tinggi (h) 400, lebar (b) 400 dengan tulangan pokok $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 120 mm. Benda uji bentang 5 m benda uji T10 mempunyai nilai defleksi terkecil dengan nilai defleksi 15,353 mm, sedangkan benda uji P16 mempunyai nilai defleksi terbesar dengan nilai 28,733 mm. Benda uji T10 mempunyai defleksi terkecil karena benda uji ini mempunyai

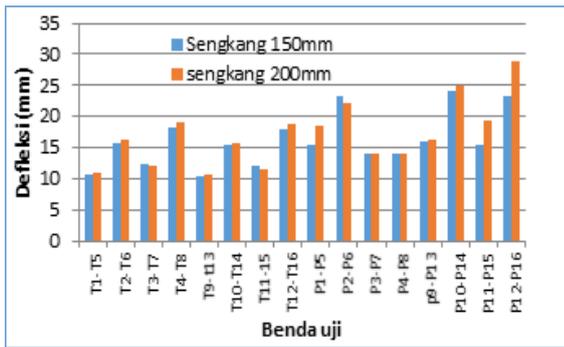
dimensi yang cukup besar yaitu berbentuk T berdimensi tinggi balok (h) 600 mm, lebar balok (b_e) 400, lebar sayap (b) 600 dan tinggi sayap (h_f) 300 dengan tulangan pokok ρ_{min} dan jarak sengkang 200 mm. Benda uji P16 mempunyai nilai defleksi terbesar karena benda uji ini berbentuk persegi berdimensi tinggi (h) 400, lebar (b) 400 dengan tulangan pokok $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 200 mm. Benda uji dengan selisih terkecil akibat bentang yang berbeda adalah benda uji P5 dan P6 dengan nilai selisih 3,754 dan benda uji P15 dan P16 mempunyai nilai selisih terbesar dengan nilai 9,298, ada kemungkinan selisih nilai defleksi akibat bentang yang berbeda dipengaruhi oleh ketebalan balok atau lebar balok. Bisa dilihat pada Gambar 14.



GAMBAR 14. Defleksi balok bentang 4m dan 5m

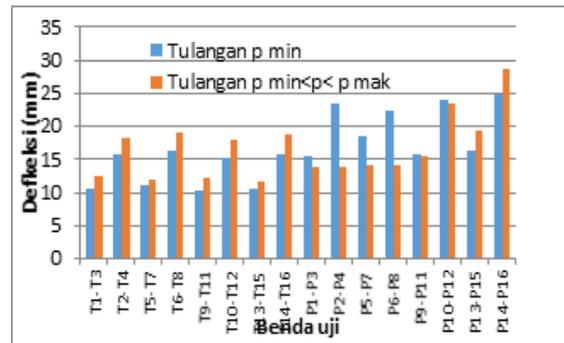
Gambar 15 menunjukkan selisih defleksi balok benda uji akibat variasi jarak tulangan

senggang, tetapi nilai selisih defleksi akibat variasi jarak tulangan senggang tidak terlalu signifikan. Dari hasil benda uji selisih terbesar yaitu benda uji P12-P16 dengan nilai selisih defleksi 5,41 mm. Sebagian besar data benda uji memiliki nilai min, hal ini menunjukkan bahwa benda uji dengan jarak senggang 150 mm mempunyai nilai defleksi lebih kecil dibandingkan benda uji dengan jarak senggang 200 mm atau sebaliknya.



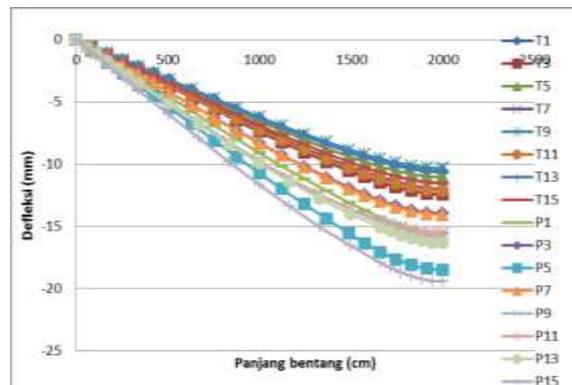
GAMBAR 15. Defleksi pengaruh variasi jarak senggang

Gambar 16 menunjukkan selisih defleksi balok benda uji akibat kombinasi rasio tulangan pokok. Dari hasil analisis besarnya defleksi tidak hanya disebabkan oleh kombinasi tulangan karena hasil analisis menunjukkan, sebagian benda uji yang menggunakan ρ_{min} mengalami defleksi lebih kecil dari benda uji dengan tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$. Dari hasil analisis nilai selisih terbesar adalah benda uji P2-P4 yaitu dengan selisih nilai defleksi 9,45 mm. Nilai defleksi terbesar yaitu benda uji P16 dengan nilai defleksi 28,778 mm. Dan nilai defleksi terkecil adalah benda uji T9 dengan nilai defleksi 10,345 mm. Benda uji berbentuk T dari hasil analisis menunjukkan nilai defleksi benda uji yang menggunakan tulangan pokok ρ_{min} mengalami defleksi lebih kecil dibandingkan dengan benda uji balok T dengan menggunakan tulangan pokok $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$, untuk benda uji bentuk persegi hampir semua menunjukkan bahwa benda uji yang menggunakan tulangan pokok ρ_{min} nilai defleksinya lebih besar dibandingkan benda uji yang menggunakan tulangan pokok $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$, hanya 4 jenis benda uji yang memiliki nilai min yaitu benda uji persegi dengan tinggi (h) 400 dan lebar (b) 400 dengan jarak senggang 200 mm.

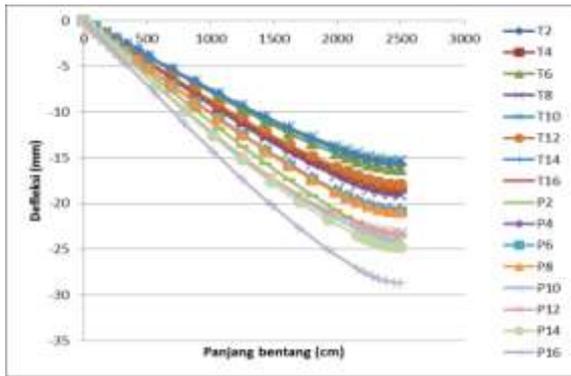


GAMBAR 16. Defleksi akibat kombinasi rasio tulangan pokok

Dari hasil kombinasi panjang bentang, rasio tulangan dan kombinasi jarak senggang ditunjukkan dalam bentuk grafik dan dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17 menunjukkan bahwa benda uji balok T9 mempunyai nilai defleksi terkecil dengan nilai defleksi 10,345 mm dan benda uji balok yang mempunyai nilai defleksi terbesar ialah P16 dengan nilai defleksi 28,773 mm. Benda uji T9 mempunyai defleksi terkecil karena benda uji ini berbentuk T berdimensi tinggi balok (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (hf) 300 dengan tulangan pokok ρ_{min} dan jarak senggang 150 mm. sedangkan benda uji P16 mempunyai nilai defleksi terbesar dengan nilai 28,733 mm. Benda uji T10 mempunyai defleksi terkecil karena benda uji ini berbentuk T berdimensi tinggi balok (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (hf) 300 mm dengan tulangan pokok ρ_{min} dan jarak senggang 200 mm. Hasil analisis benda uji dengan tebal beton yang kecil mempunyai defleksi terbesar.



GAMBAR 17. Nilai defleksi benda uji bentang 4 m

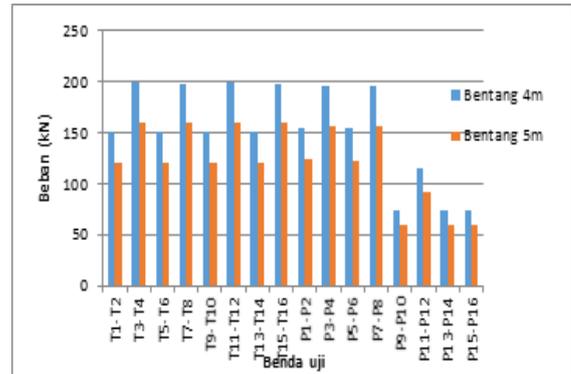


GAMBAR 18. Nilai defleksi benda uji bentang 5 m

2. Beban maksimum

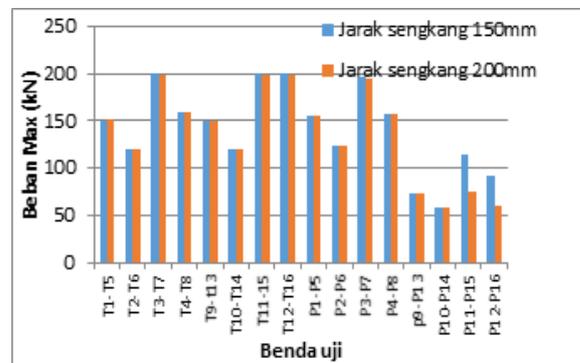
Akibat adanya pembebanan vertikal dari arah y pada benda uji balok maka akan menyebabkan terjadinya defleksi. Hasil analisis program *Response-2000*, beban ditampilkan dalam bentuk data dan grafik. Dari Tabel 5.5 dapat dilihat bahwa pada bentang 4 m benda uji yang memiliki nilai beban maksimum terbesar adalah benda uji T11 dengan nilai beban maksimal 200,343 kN, sedangkan benda uji yang memiliki beban maksimal terkecil adalah benda uji P13 dengan nilai 73,754 kN. Benda uji T11 mempunyai nilai beban maksimal terbesar dikarenakan benda uji ini memiliki dimensi yang cukup besar yaitu yaitu berbentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < P < P_{max}$ dan jarak sengkang 150 mm, sedangkan benda uji P13 mempunyai nilai beban maksimal yang kecil karena benda uji ini berbentuk persegi dengan dimensi tinggi balok (h) 400 mm dan lebar balok (b) 400 mm, dengan rasio tulangan P_{min} dengan jarak sengkang 200 mm. Benda uji balok bentang 5 m benda uji yang memiliki nilai beban maksimal terbesar adalah benda uji T12 dengan nilai beban maksimal 160,274 kN, sedangkan benda uji yang memiliki beban maksimal terkecil adalah benda uji P14 dengan nilai 59,003 kN. Benda uji T12 mempunyai nilai beban maksimal terbesar dikarenakan benda uji ini memiliki dimensi yang cukup besar yaitu yaitu berbentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < P < P_{max}$ dan jarak sengkang 150 mm, sedangkan benda uji P14 mempunyai nilai beban maksimal terkecil karena benda uji ini berbentuk persegi dengan dimensi tinggi balok (h) 400 mm dan lebar balok (b) 400 mm dengan rasio tulangan P_{min} dengan jarak

sengkang 200 mm. benda uji T11-T12 mempunyai selisih beban maksimal yang paling besar dibanding dari beberapa benda uji lainnya yaitu sebesar 40,09 kN, dan selisih nilai beban maksimal terkecil adalah benda uji P9-P10 dan P13-P14 dengan nilai selisih 14,741 kN, hal ini menunjukkan semakin panjang bentang maka kekuatan balok semakin berkurang. Bisa dilihat pada Gambar 19



GAMBAR 19. Nilai beban maksimum variasi bentang benda uji

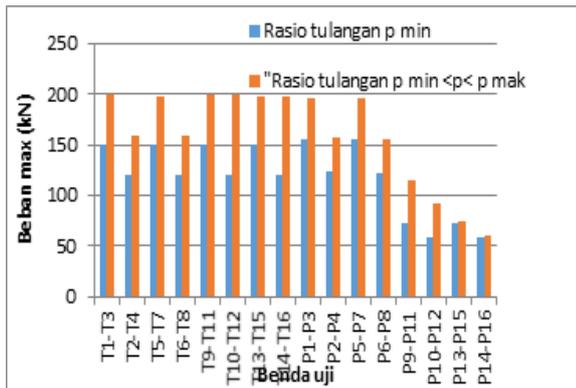
Gambar 20 menunjukkan variasi jarak sengkang tidak pengaruh signifikan terhadap beban maksimal dari sebagian banyak benda uji balok, hanya benda uji P11-P15 dan P12-P16 yang terlihat mempunyai nilai selisih beban maksimal yang cukup besar untuk benda uji P11-P15 sebesar 39,934 kN dan untuk benda uji P12-P16 sebesar 31,947 kN. Benda uji yang memiliki selisih nilai terbesar adalah benda uji berbentuk persegi dengan dimensi tinggi (h) 400 mm dan lebar (b) 400 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < P < P_{max}$. Nilai min menunjukkan nilai beban maksimum dengan jarak sengkang 150 mm memiliki nilai beban maksimal lebih kecil dibanding benda uji dengan jarak sengkang 200 mm.



GAMBAR 20. Beban maksimal variasi jarak sengkang

Gambar 21 menunjukkan variasi rasio tulangan pokok sangat berpengaruh terhadap beban maksimal suatu penampang balok, dari semua benda uji, hanya 2 benda uji yang selisih

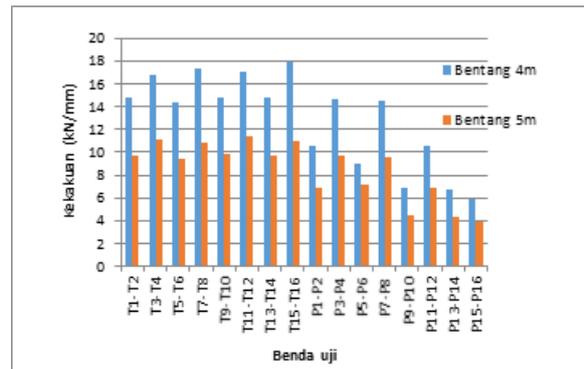
nilainya kecil, yaitu benda uji P13-P15 dengan nilai 0,819 kN dan benda uji P14-P16 0,655 kN. benda uji yang mempunyai selisih nilai beban maksimal tertinggi adalah benda uji T10-T12 yaitu sebesar 80,104 kN. Dua benda uji yang mempunyai selisih terkecil yaitu benda uji berbentuk persegi dengan dimensi tinggi (h) 400 mm dan lebar (b) 400 mm, dengan dengan jarak sengkang 200 mm. Perbedaan nilai benda uji T10 dan T12 menunjukkan semakin besar rasio tulangan maka semakin kuat balok menerima beban.



GAMBAR 21. Beban maksimal variasi rasio tulangan pokok

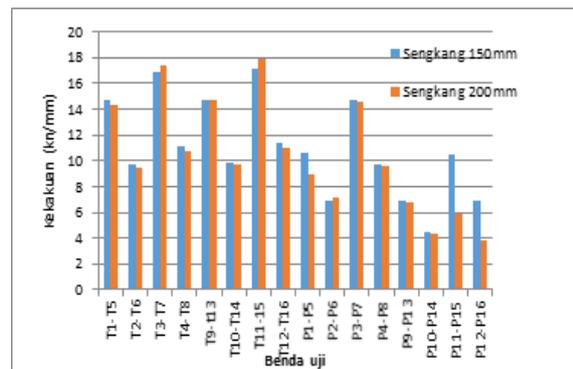
Gambar 22 dapat dilihat bahwa pada bentang 4m benda uji T15 memiliki nilai kekakuan terbesar dengan nilai kekakuan 17,9 kN/mm, sedangkan benda uji P15 memiliki kekakuan yang cukup kecil dengan nilai 5,826 kN/mm. Benda uji T15 mempunyai kekakuan yang besar dikarenakan dimensi balok yang cukup besar yaitu balok berbentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 200 mm, sedangkan P15 mempunyai kekakuan yang kecil karena benda uji ini dimensinya cukup kecil dibanding dengan benda uji lainnya yaitu balok persegi dengan dimensi tinggi (h) 400 mm dan lebar (b) 400 mm, dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 200 mm. Pada bentang 5 m benda uji T12 memiliki nilai kekakuan terbesar dengan nilai kekakuan 11,368 kN/mm, sedangkan benda uji P16 memiliki kekakuan yang cukup kecil dengan nilai 3,889 kN/mm. Benda uji T12 mempunyai kekakuan yang besar dikarenakan dimensi balok yang cukup besar yaitu balok berbentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 150 mm,

sedangkan P16 mempunyai kekakuan yang kecil karena benda uji ini dimensinya cukup kecil dibanding dengan benda uji lainnya yaitu balok persegi dengan dimensi tinggi (h) 400 mm dan lebar (b) 400 mm, dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ dan jarak sengkang 200 mm. Nilai selisih kekakuan terbesar adalah benda uji T15 –T16 dengan selisih nilai kekakuan 6,928 kN/m dan terkecil adalah benda uji P5-P6 dengan selisih nilai 1,8098 kN/m.



GAMBAR 22. Kekakuan benda uji balok dengan variasi bentang

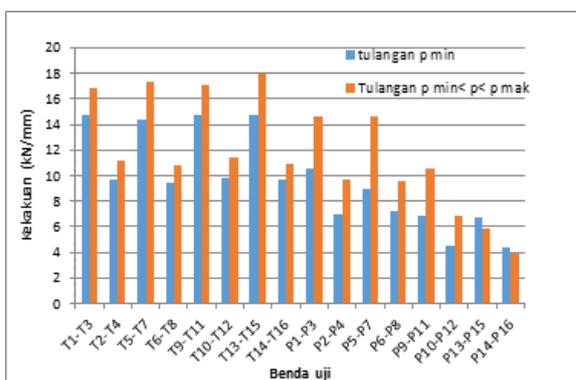
Gambar 23 menunjukkan variasi jarak sengkang tidak berpengaruh besar terhadap nilai kekakuan benda uji balok, bahkan ada beberapa benda uji yang jarak sengkangnya 150 mm nilai kekakuannya lebih kecil dibandingkan dengan jarak sengkang 200 mm. selisih nilai terbesar adalah benda uji balok P1-P5 dengan selisih nilai 1,6024 kN/mm.



GAMBAR 23. Kekakuan benda uji balok dengan variasi jarak sengkang

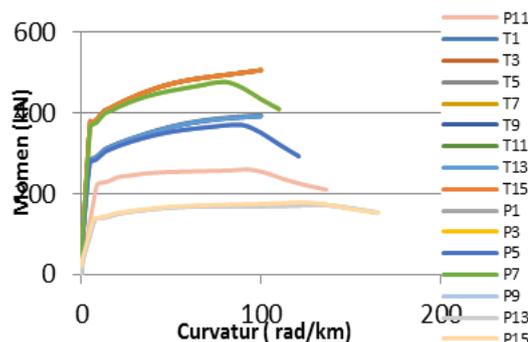
Gambar 24 menunjukkan variasi rasio tulangan sangat berpengaruh terhadap nilai kekakuan. Hasil analisis menunjukkan banyak dari benda uji yang memakai rasio tulangan minimum ρ_{min} nilai kekakuannya lebih kecil dibandingkan dengan benda uji dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$, tetapi ada juga jenis benda uji yang menggunakan tulangan ρ_{min} mempunyai kekakuan lebih besar dibanding benda dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{mak}$ yaitu benda uji

P13-P15 dan P14-P16. Selisih nilai kekakuan terbesar adalah benda uji P5 dan P7 dengan nilai selisih 5,571 kN/mm. Variasi rasio tulangan hanya berpengaruh kecil terhadap nilai kekakuan benda uji bentuk T dengan nilai selisih rata-rata 2.02 kN/mm, variasi rasio tulangan berpengaruh terhadap benda uji balok persegi dengan nilai selisih rata-rata 3,46 kN/mm. Benda uji bentuk persegi dimensi 400 mm x 400 mm dengan jarak sengkang 200 mm menunjukkan nilai kekakuan benda uji dengan menggunakan tulangan (P_{min}) nilai kekakuannya lebih besar dibandingkan dengan benda uji dengan menggunakan tulangan $P_{min} < \rho < P_{maks}$. Nilai kekakuan tertinggi yaitu benda uji P3 dengan nilai kekakuan 16,8499 kN/mm dan nilai kekakuan terkecil adalah benda uji P16 dengan nilai kekakuan 3,889 kN/mm.

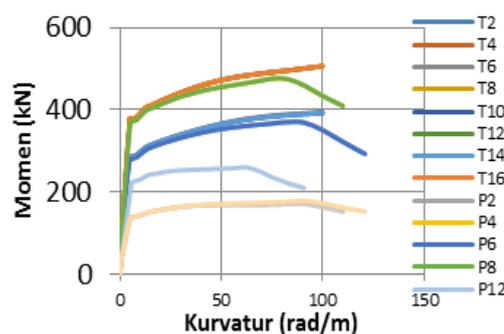


GAMBAR 24. Nilai kekakuan akibat variasi rasio tulangan

Dari Gambar 25 dan 26 hubungan beban dan defleksi memperlihatkan dari semua benda uji balok mempunyai nilai beban maksimal yang berbeda-beda. Benda uji T11 mempunyai nilai beban maksimal tertinggi dengan nilai 200,343 kN dan mengalami defleksi sebesar 12,141 mm, dan nilai beban maksimal terendah yaitu benda uji P16 dengan nilai beban maksimal 59,658 kN dan mengalami defleksi 28,733 mm. Benda uji T11 mempunyai nilai beban maksimal terbesar dikarenakan benda uji ini memiliki dimensi yang cukup besar yaitu berbentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < \rho < P_{maks}$ dan jarak sengkang 150 mm dengan panjang bentang 4 m, sedangkan benda uji balok P16 mempunyai dimensi 400 mm x 400 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < \rho < P_{maks}$ dan jarak sengkang 200 mm dengan bentang 5 m.



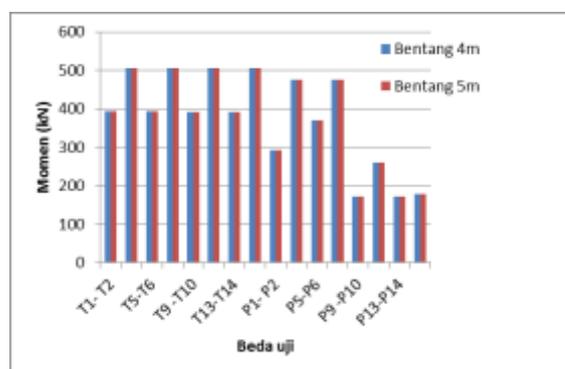
GAMBAR 25. Beban maksimum balok bentang 4m



GAMBAR 26. Beban maksimum balok bentang 5 m

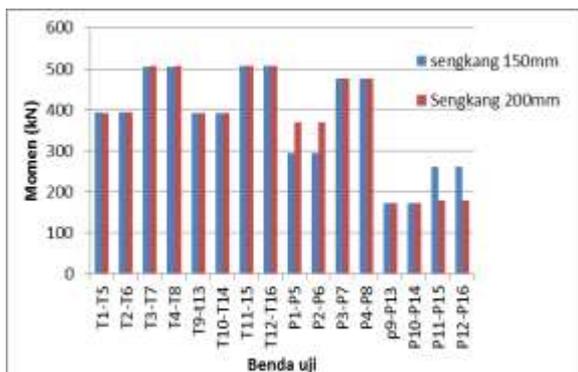
3. Momen Curvature

Nilai kelengkungan dapat digunakan untuk mengetahui besarnya regangan pada saat terjadi lendutan akibat momen. Hasil analisis program *Response-2000*, momen ditampilkan dalam bentuk data dan grafik. Dari hasil analisis kita bisa membandingkan perbedaan nilai momen dari benda uji balok dengan variasi bentang, jarak sengkang dan variasi rasio tulangan, kemudian dari hasil analisis berupa nilai beban akan dijadikan grafik hubungan momen dan curvatur. Hasil menunjukkan bahwa hasil analisis program *Response-2000* dengan variasi bentang tidak berpengaruh pada nilai momen, hal ini bisa dilihat pada Gambar 27.



GAMBAR 27. Nilai momen benda uji bentang 4 m dan 5 m

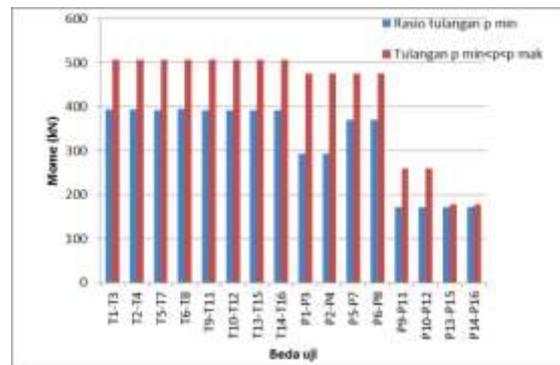
Gambar 28 menunjukkan bahwa variasi jarak sengkang hanya mempengaruhi nilai momen sebagian benda uji saja. Benda uji P1-P5 dan P2-P6 menunjukkan jarak sengkang 150 mm mempunyai nilai momen nominal lebih kecil dibandingkan jarak sengkang 200 mm yaitu dengan selisih nilai momen nominal -76,732 kN. Benda uji P1-P5 dan P2-P6 merupakan benda uji dengan dimensi tinggi (h) 600 mm dan lebar (b) 400 mm dan rasio tulangan ρ_{min} . Benda uji P11-P15 dan P12-P16 menunjukkan jarak sengkang 150mm mempunyai nilai momen nominal lebih besar dibandingkan jarak sengkang 200 mm dengan nilai selisih 81,591 kN. Benda uji P11-P15 dan P12-P16 merupakan benda uji dengan dimensi tinggi (h) 600 mm dan lebar (b) 400 mm dan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$. Benda uji T11-T15, T12-T16 dan benda uji P9-P13, P10-P14 tidak ada pengaruh nilai momen nominal akibat variasi jarak sengkang. Benda uji T11-T15, T12-T16 merupakan benda uji bentuk T dengan dimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$, sedangkan benda uji P9-P13, P10-P14 merupakan benda uji berbentuk persegi dengan dimensi 400 mm x 400 mm dengan rasio tulangan ρ_{min} . Hasil analisis dimensi dan rasio tulangan sangat berpengaruh terhadap nilai momen nominal akibat variasi jarak sengkang.



GAMBAR 28. Momen pengaruh variasi sekgang

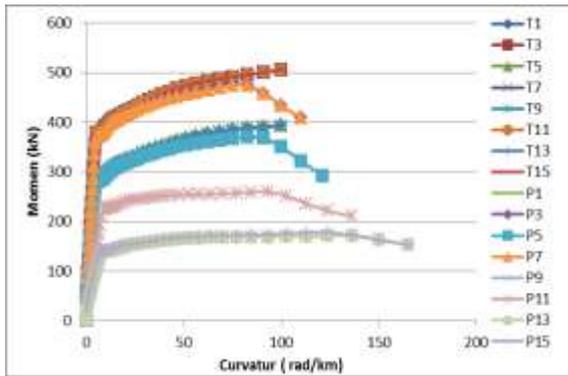
Gambar 29 menunjukkan hasil analisis benda uji balok dengan variasi rasio tulangan sangat berpengaruh pada momen maksimal. Selisih nilai momen maksimal Terbesar ditunjukkan pada benda uji P1-P3 dan P2-P4 dengan nilai selisih 182,606 kN. Benda uji yang nilai momen maksimal terbesar adalah benda uji T11, T12, T15 dan T16 dengan nilai momen maksimal 506,581kN. Benda uji yang nilai momen maksimalnya paling kecil adalah benda uji P9, P10, P13 dan P14 dengan nilai momen 172.074

kN. Hasil analisis dari semua benda uji memiliki nilai selisih yang hampir seragam hal ini menunjukkan bahwa variasi rasio tulangan sangat berpengaruh terhadap semua benda uji.

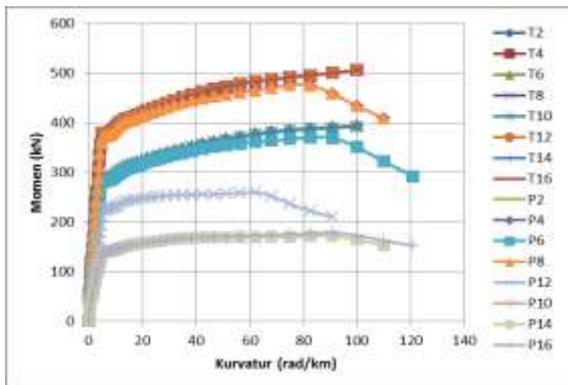


GAMBAR 29. Nilai momen dengan variasi rasio tulangan pokok

Gambar 30 dan 31 menunjukkan hubungan momen kurvatur hasil analisis program *Response-2000*. Gambar 30 hubungan momen kurvatur balok benda uji betang 4 m, menunjukkan nilai benda uji T11 dan T15 mempunyai nilai momen nominal yang tinggi dan nilai kurvatur yang cukup rendah yaitu dengan nilai kurvatur 99,93 rad/km dan nilai momen nominal 506,581 kN, bisa dibilang benda uji T11 dan T15 kualitas benda ujinya cukup baik dan benda uji P13 dan P15 mempunyai nilai momen nominal yang rendah dan nilai kurvatur tinggi dengan nilai kurvatur 181,378 rad/km dan nilai momen nominal 152,848 kN, hal ini menunjukkan bahwa benda uji P13 dan P15 kualitasnya paling rendah. Gambar 31 memperlihatkan hubungan momen curvatur balok benda uji bentang 5m, Menunjukkan nilai benda uji T12 dan T16 mempunyai nilai kurvatur 10,145 rad/km dan nilai momen nominal sebesar 393,335 kN, nilai ini menunjukkan momen nominal yang tinggi dan nilai kurvatur yang cukup rendah, bisa dibilang benda uji T12 dan T16 kualitas benda ujinya cukup baik dan benda uji P16 mempunyai nilai momen nominal yang rendah dan nilai kurvatur tinggi hal ini menunjukkan bahwa benda uji P16 kualitasnya paling rendah, yaitu dengan nilai kurvatur 120.916 rad/km dan nilai momen sebesar 152.848 kN. Dari semua sampel benda uji dengan bentuk T berdimensi tinggi (h) 600 mm, lebar balok (bw) 400 mm, lebar sayap (b) 600 mm dan tinggi sayap (tf) 300 mm dengan rasio tulangan $\rho_{min} < \rho < \rho_{maks}$, memiliki nilai momen nominal terbesar dan benda uji dengan bentuk persegi berdimensi 400 mm x 400 mm dengan jarak sengkang 200 mm memiliki nilai momen nominal yang rendah.

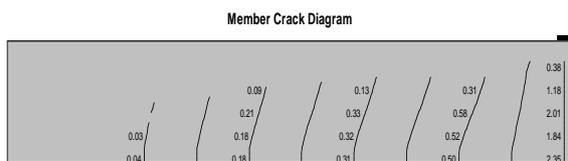


GAMBAR 30. Hubungan momen kurvatur balok benda uji bentang 4 m



GAMBAR 31. Hubungan momen kurvatur balok benda uji bentang 5 m

Dari analisis program *Response-2000* diambil satu gambar jenis pola retak. Jenis pola retak diambil dari benda uji beton dengan nilai defleksi tinggi, nilai curvatur tinggi dan mempunyai momen terkecil. Yaitu benda uji P16, jenis pola retak yang dialami ialah jenis retak lentur. Bisa dilihat pada Gambar 32.



GAMBAR 32. Pola retak benda uji P16

KESIMPULAN

Hasil analisis menggunakan program *Response-2000* dapat disimpulkan sebagai berikut ini.

- a) Benda uji T9 memiliki nilai defleksi terkecil yaitu 10,345 mm dan benda uji P16 memiliki nilai defleksi terbesar yaitu 28,773 mm. Benda uji T11 dan T15 mempunyai nilai beban maksimal terbesar dengan nilai beban 200,343 kN dan benda uji P10 mempunyai nilai beban maksimal terkecil

yaitu 59,003 kN. Benda uji P9, P10, P13 dan P14 mempunyai momen nominal terkecil dengan nilai 172,07 kN dan benda uji T11, T12, T15 dan T16 memiliki nilai momen maksimum sebesar 506,581 kN. Benda uji T7 memiliki kekakuan terbesar dengan nilai 17,384 kN/mm benda uji yang memiliki tingkat kekakuan terkecil adalah benda uji P16 dengan nilai 3,889 kN/mm. Dari semua benda uji mengalami jenis retak lentur.

- b) Jarak bentang mempengaruhi defleksi dengan nilai selisih rata-rata 6,69 mm, mempengaruhi nilai beban maksimal dengan nilai rata-rata 30,348 kN, mempengaruhi nilai kekakuan dengan nilai rata-rata 4,421 kN/mm. Variasi jarak sengkang tidak terlalu mempengaruhi nilai defleksi, ditunjukkan dengan selisih nilai defleksi rata-rata 0,9 mm, jarak sengkang mempengaruhi nilai beban maksimal tetapi hanya sebagian benda uji yang mempunyai pengaruh besar yaitu benda uji balok persegi dengan dimensi 400 mm x 400 mm dengan rasio tulangan $P_{min} < P < P_{max}$, nilai selisih terbesar yaitu 39,93 kN. Jarak sengkang mempengaruhi nilai kekakuan namun tidak terlalu besar, selisih kekakuan rata-rata benda uji yaitu 0,598 kN/mm. Jarak sengkang mempengaruhi momen nominal tetapi hanya beberapa benda uji yang memiliki selisih besar, yaitu benda uji bentuk persegi berdimensi 600 mm x 400 mm dengan tulangan P_{min} menunjukkan bahwa jarak sengkang 150 mm mempunyai nilai momen nominal lebih kecil dari pada benda uji dengan jarak tulangan 200 mm dengan nilai selisih 76,732 kN, dan untuk benda uji bentuk persegi berdimensi 400 mm x 400 mm dengan tulangan $P_{min} < P < P_{max}$ menunjukkan benda uji jarak sengkang 150 mm memiliki nilai momen nominal lebih besar dari pada benda uji jarak sengkang 200 mm dengan nilai selisih 81,591 kN. Variasi rasio tulangan berpengaruh terhadap nilai defleksi namun tidak begitu signifikan, tetapi rasio tulangan sangat mempengaruhi nilai beban maksimal dengan nilai selisih rata-rata 40,828 kN. Rasio tulangan tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai kekakuan hal ini ditunjukkan dengan nilai selisih rata-rata sebesar 2,226 kN/mm dan variasi rasio tulangan sangat berpengaruh besar terhadap nilai momen nominal yaitu dengan nilai rata-rata dari benda uji sebesar 104,707 kN.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam. 2016. *Modul Struktur Beton BAB 4*. Tersedia: [https://id.scribd.com/doc/294442381 / Modul - Struktur - Beton-Bab-4-0](https://id.scribd.com/doc/294442381/Modul-Struktur-Beton-Bab-4-0). Diakses 2Februari 2017.
- Amir F. 2009. *Analisis Perbandingan Pengujian Lentur Balok Terhadap Tampang Persegi Secara Eksperimental Dilaboratorium dengan Program Response-2000*. Thesis Pascasarjana Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. 2002. *Tata Cara Perhitungan Beton Untuk Bangunan Gedung*. (SNI-03-2847-2002). Bandung.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. (SNI-2847-2013). Jakarta.
- Chairunnisa. 2009. *Analisis Teoritis Layerd Method Dan Eksperimental Perkuatan Balok Beton Bertulang Menggunakan Longitudinal dengan Selimut Mortar*. Thesis Pascasarjana Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Popov, E. P. 1996. *Mekanika Teknik*”, cetakan keenam. Gelora Aksara Pratama. Jakarta.
- McCormac, J.C. 2001. *Desain Beton Bertulang*. Jilid I. Erlangga. Jakarta.
- Mukahar, Kholilul RR., Kristiawan SA. 2009. *Asesmen Kinerja Struktur Gedung Timbul Jaya Plaza Kota Madiun Pasca Alih Fungs*. Teknik Sipil Universitas Merdeka Madiun. Madiun.
- Setiadi. 2015. *Analisis Fakor Daktilitas Kurvatur Balok Beton Bertulang Mutu Normal (Pemanfaatan Open Source Response-2000)*. Thesis Pascasarjana Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

PENULIS:

Hakas Prayuda

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Email: hakas.prayuda@ft.umy.ac.id

Fadillawaty Saleh

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Email: dilla_vu@yahoo.com

Istiawan

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Yogyakarta.

Email: wawan.ziben@gmail.com