



Pemodelan dan Analisis Perilaku Balok Beton Bertulang yang Berbeda Diameter Akibat Variasi Tata Letak Tulangannya

Yohanes Laka Suku

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Flores
mayokonco@yahoo.co.id

Received: 20 Januari 2018 Revised: 25 Mei 2018 Accepted: 31 Mei 2018

Abstract

Analysis of the effect of the layout of reinforcement in reinforced concrete beams with different diameters to understand behavior and layout position of reinforcement produces the maximum of load capacity and ductility. Modeling and analysis using ANSYS program, the experimental test beam type OAI and AI from the University of Toronto (Vichio & Shim, 2004) was used as a benchmark and models which varies in layout of reinforcement. The number of models analyzed is a total of fourteen models consisting of seven models without stirrups and seven with stirrups. Beam behavior observed in the form of load capacity, deflection, ductility, stiffness and crack patterns. Results showed that: the layout of reinforcement affects the behavior of reinforced concrete beam; on the same width of reinforcedment, one layer reinforcement has greater load capacity and rigidity but smaller ductility than two layers; the layout of reinforcement in general does not affect the pattern of cracks; the collapse of the beam without stirrups is caused by the diagonal tension and the beam with stirrups by shear and rupture due to the press; the layout of reinforcement produces the largest load capacity and ductility of the largest is model OAI and OAI,4 on the beams without stirrups and models AI and AI,5 on beam with stirrups.

Keywords: Concrete beam, layout of reinforcement, ANSYS

Abstrak

Analisis pengaruh tata letak tulangan pada balok beton bertulang dengan diameter berbeda bertujuan untuk mengetahui perilaku dan posisi tata letak tulangan yang menghasilkan kapasitas beban dan daktilitas yang maksimum. Pemodelan dan analisis menggunakan program ANSYS, balok uji eksperimental tipe OAI (tanpa sengkang) dan AI (dengan sengkang) dari Universitas Toronto (Vichio & Shim, 2004) digunakan sebagai acuan (benchmark) dan model yang divariasikan tata letak tulangannya. Jumlah model yang dianalisis sebanyak empat belas model, terdiri dari tujuh model tanpa sengkang dan tujuh model yang bersengkang. Perilaku balok yang diamati berupa kapasitas beban, defleksi, daktilitas, kekakuan dan pola retak. Hasil analisis diperoleh bahwa: tata letak tulangan mempengaruhi perilaku balok beton bertulang; tulangan satu lapis mempunyai kapasitas beban dan kekakuan lebih besar tetapi daktilitasnya lebih kecil dari tulangan dua lapis; tata letak tulangan secara umum tidak mempengaruhi pola retak; keruntuhan balok tanpa sengkang disebabkan oleh tegangan tarik diagonal sedangkan balok bersengkang oleh geser dan pecah akibat tekan; posisi tata letak tulangan sesuai jumlah lapis yang menghasilkan kapasitas beban dan daktilitas yang terbesar adalah model OAI dan OAI,4 pada balok tanpa sengkang dan model AI dan AI,5 pada balok bersengkang.

Kata kunci: Balok beton, tata letak tulangan, ANSYS

Pendahuluan

Balok beton bertulang merupakan salah satu bagian dari elemen struktur beton bertulang yang berfungsi memikul beban lentur, geser dan normal. Material beton mempunyai kemampuan yang baik

di dalam menahan gaya tekan tetapi lemah di dalam menahan gaya tarik, oleh karenanya dipasang tulangan baja guna menambah kemampuan dalam menahan gaya tarik pada daerah yang mengalami tarik. Dalam perencanaan dan pelaksanaan sering digunakan baja dengan

diameter yang berbeda yang dipasang pada suatu balok beton bertulang.

Memahami perilaku balok beton bertulang yang tulangan pokoknya dipasang dengan diameter yang berbeda dengan memvariasikan tata letak tulangannya sangat penting, karena memberikan informasi mengenai tipe tata letak yang baik dalam pemasangan tulangan baja dengan diameter yang berbeda pada beton. Pada penelitian ini akan dianalisis balok beton bertulangan dengan dua jenis diameter yang berbeda. Balok beton yang digunakan sebagai acuan (*benchmark*) dan model adalah balok uji eksperiment tipe OA1 dan A1 yang dilakukan di Universitas Toronto (Vichio & Shim, 2004).

Perilaku struktur balok sesuai dengan keadaan nyata dapat diketahui dengan melakukan pengujian eksperimental di laboratorium. Namun pengujian di lobaratorium memerlukan waktu yang lama dan biaya yang mahal, selain itu tidak semua data atau informasi bisa didapatkan karena keterbatasan alat dan metode pengujian yang digunakan. Dengan kemajuan teknologi pada bidang rekayasa komputer, memungkinkan dilakukan analisis numerik dengan metode elemen hingga, meh (*finite element analysis, fea*) (Sallam *et al.*, 2013; Al-Eyssawi & Jabbar, 2015; Smarzewski, 2016). Analisis numerik meh ini digunakan untuk mendapatkan informasi tentang perilaku struktur dan berbagai data yang mungkin tidak didapat dari uji eksperimental di laboratorium. Salah satu program simulasi berbasis meh yang sering digunakan dalam pemodelan dan analisis untuk solusi linier, nonlinier, pemindahan panas, fluida, akustik, elektromagnetik dan analisis dinamika adalah ANSYS (ANSYS, 2017). Program ANSYS juga digunakan sebagai alat analisis dalam penelitian ini, karena hasil analisisnya menunjukkan perilaku yang relatif sama dengan hasil percobaan di laboratorium dan hal ini terlihat dari berbagai hasil penelitian tentang analisis perilaku struktur beton bertulang yang telah dilakukan antara lain oleh Wolanski (2004), Dahmani *et al* (2010), Sucharda & Brozovsky (2011), Subramani *et al* (2014), Badiger & Malipatil (2014), Pawar (2016) dan Chandramohanmouli & Kumar (2017).

Metode Penelitian

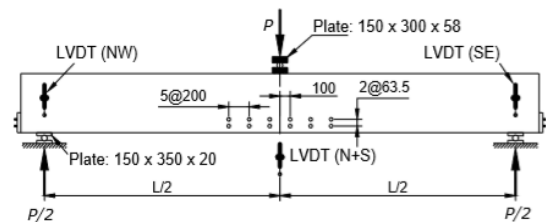
Prosedur penelitian yang dilakukan adalah melakukan verifikasi program, yakni dengan

melakukan pemodelan dan analisis balok *benchmark* tipe OA1 dan A1 dari Universitas Toronto (Vichio & Shim, 2004), dan membandingkan hasil analisisnya berupa beban maksimum dan lendutan maksimum.

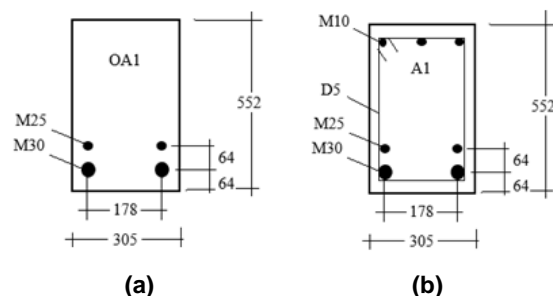
Kemudian setelah hasilnya konvergen atau mendekati hasil uji laboratorium balok Universitas Toronto, lalu dibuat enam model balok untuk setiap tipe dengan memvariasikan tata letak tulangannya, dengan dimensi, panjang bentang, properti material, dan setingan numeris dan pembebanan yang sama. Dilanjutkan dengan menganalisis perilaku balok berupa, beban, defleksi saat leleh dan maksimum, daktilitas, kekakuan dan pola retak.

Data balok *benchmark* dan balok model

Vichio & Shim (2004) mengadakan pengujian laboratorium dan analisis meh terhadap 12 buah balok beton bertulang yang konfigurasiya sama seperti balok uji eksperimen yang dilakukan oleh Bresler & Scordelis (1963). Balok tipe OA1 tanpa menggunakan sengkang dan A1 menggunakan sengkang diambil sebagai balok *benchmark*, kedua balok tersebut menggunakan jumlah tulangan tarik yang sama dan dengan 2 jenis diameter yang berbeda. Data balok *benchmark* dan balok model disajikan pada Gambar 1 dan 2 serta Tabel 1.



Gambar 1. Setup pengujian balok Toronto (Vichio & Shim, 2004).



Gambar 2. Penampang balok *benchmark* (Vichio & Shim, 2004)

Tabel 1. Data balok *Benchmark* (Vichio & Shim, 2004)

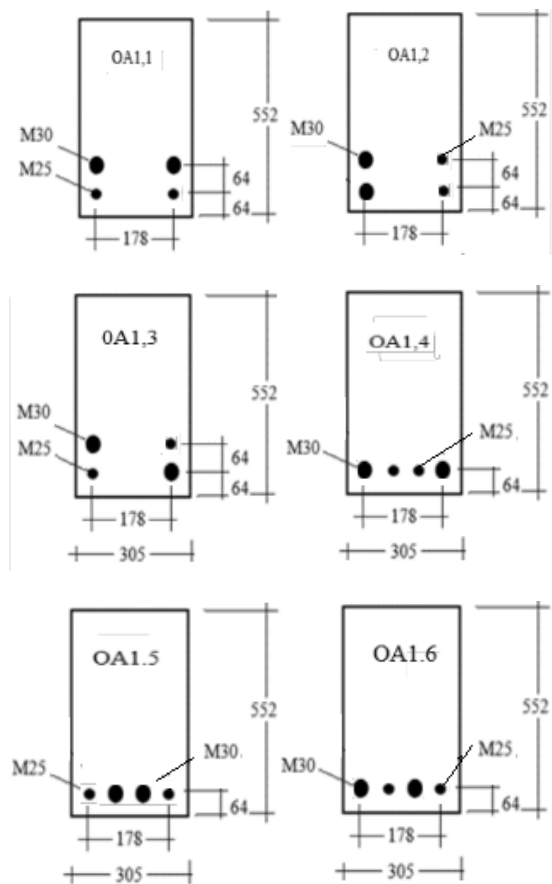
No. Balok	b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	Span (mm)	Tulangan bawah	Tulangan atas	Sengkang
OA1	305	552	457	4100	3660	2M30, 2M25	-	-
A1	305	552	457	4100	3660	2M30, 2M25	3M10	D5@210

Adapun properti material baja dan beton *Benchmark* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Properti material balok *Benchmark* (Vichio & Shim, 2004)

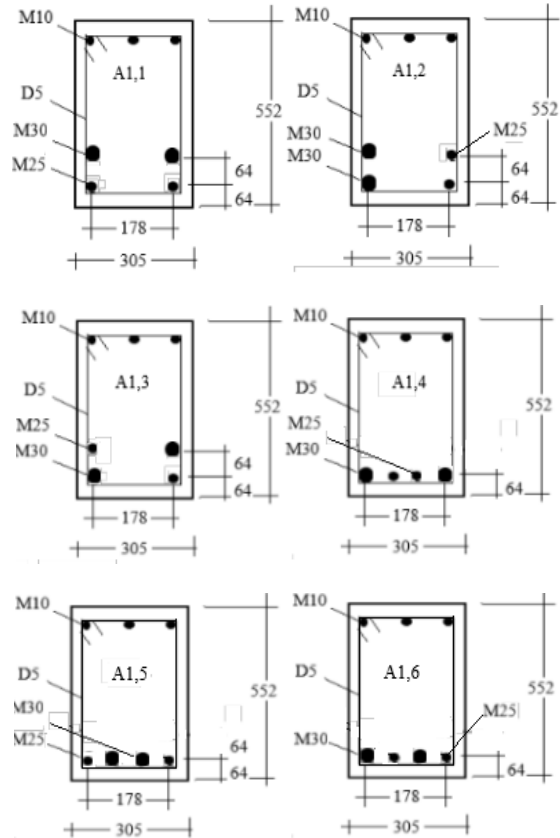
Properti tulangan				
Ukuran baja	Dia (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)
M10	11,3	315	460	200.000
M25	25,2	440	616	210.000
M30	29,9	436	700	200.000
D5	6,4	600	649	200.000
Properti beton				
No. balok	f'_c (Mpa)	ϵ_o (mm/mm)	E_c (Mpa)	f_{sp} (Mpa)
OA1	22,6	0,0016	36.500	2,37
A1	22,6	0,0016	36.500	2,37

Balok model adalah balok *benchmark* yang divariasikan tata letak tulangnya. Yang pertama balok tanpa sengkang dimodelkan dengan memvariasikan tata letak tulangnya sebanyak enam buah model, tiga model untuk variasi tulangan yang dipasang dua lapis dan tiga model untuk variasi tulangan yang dipasang satu lapis. Model balok tanpa sengkang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Penampang model balok tanpa sengkang

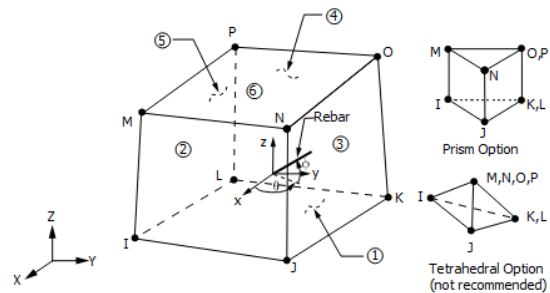
Lalu balok dengan sengkang dimodelkan dengan memvariasikan tata letak tulangnya sebanyak enam buah model, tiga model untuk variasi tulangan yang dipasang dua lapis dan tiga model untuk variasi tulangan yang dipasang satu lapis. Model balok dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Penampang model balok bersengkang

Pemodelan elemen hingga dengan program ANSYS

Secara garis besar tahapan analisis pada program ANSYS terdiri dari tiga tahap yaitu: 1) pra-proses (*pre-process*) 2) solusi (*solution*) dan 3) *post processing*. Dalam penelitian ini elemen beton dimodelkan dengan elemen delapan *node solid65* (ANSYS, 2017) seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Solid65

Elemen ini mempunyai kemampuan untuk memprediksi perubahan bentuk maupun kerusakan pada kondisi plastis, retak arah x, y dan z sampai beton hancur (Adheem, 2013; Musmar *et al.*, 2014) dan model kurva tegangan dan regangan tekan beton yang digunakan adalah model tegangan dan regangan tekan beton menurut Kent-Park (Park & Paulay, 1975), yakni:

1. Regangan beton ($\epsilon_c \leq 0,0016$)

$$f_c = f'_c \cdot \left[\frac{2 \cdot \epsilon_c}{0,0016} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,0016} \right)^2 \right] \quad (1)$$

2. $0,0016 \leq$ Regangan beton ($\epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$)

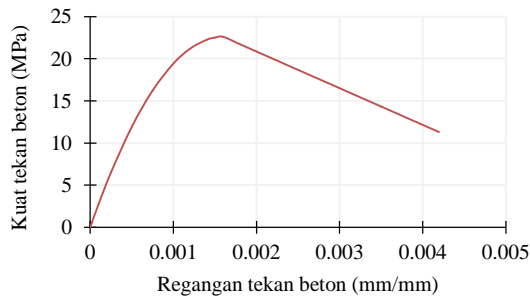
$$f_c = f'_c \cdot [1 - z \cdot (\epsilon_c - 0,0016)] \quad (2)$$

Dimana:

$$z = \frac{0,5}{\frac{3 + 0,0016 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} + \epsilon_{cu} - 0,0016} \quad (3)$$

$$\epsilon_{cu} = \frac{3 + 0,0016 \cdot f'_c}{f'_c - 1000} \quad (4)$$

Tegangan tarik beton diambil sebesar 2,37 MPa sesuai properti material balok *benchmark* (lihat Tabel 2) data material beton *solid65* dan grafik hubungan tegangan dan regangan tekan beton terlihat pada Tabel 3 dan Gambar 6.



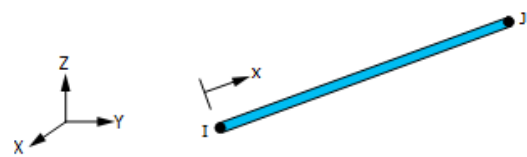
Gambar 6. Grafik hubungan tegangan dan regangan beton

Elemen tulangan digunakan elemen solid dua *nodelink180*, terlihat pada Gambar 7. Model hubungan tegangan dan regangan digunakan adalah model *bilinear isotropic hardening* (ANSYS, 2017), dimana modulus elastisitas paska leleh (E_{sy}) diambil 1% dari modulus elastisitasnya (E_s), nilai E_s dapat dilihat pada Tabel 2. Contoh grafik hubungan tegangan dan regangan baja ukuran M25 terlihat pada Gambar 8. Penggunaan elemen solid 2 *nodelink180* ini didasarkan pada hasil penelitian Al-Shimmari *et al* (2011), Vasudevan & Kothandaraman (2011), Srinivasan & Sathiya (2010) dan Uma *et al* (2012) yang menyatakan bahwa karakteristik elemen ini sama

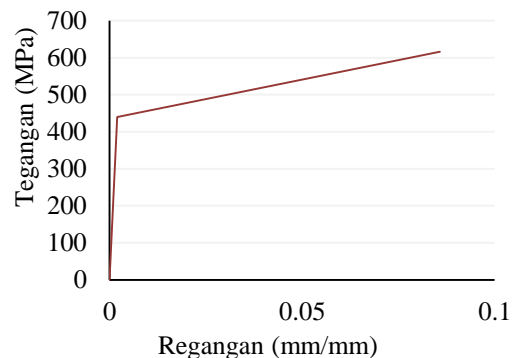
seperti tulangan aslinya. Pemodelan hubungan bidang kontak antara elemen tulangan dan beton diasumsikan terjadi lekatan yang sempurna (*bonded*).

Tabel 3. Data material beton *solid65*

<i>Linear - elastic - isotropic</i>	
Modulus Elastisitas Beton, E_c	36500 MPa
poisson rasio, ν	0,20
<i>Nonlinear - multilinear kinematic hardening</i>	
Regangan (ϵ_c)	Tegangan (f_c)
0	0
0,00010	2,737
0,00025	6,511
0,00050	11,918
0,00075	16,222
0,00100	19,422
0,00120	21,188
0,00140	22,247
0,00150	22,512
0,00160	22,600
0,00180	21,729
0,00200	20,859
0,00250	18,682
0,00300	16,506
0,00350	14,329
0,00420	11,299
<i>Nonlinear - inelastic - non-metal plasticity - concrete65</i>	
<i>Open shear transfer coefficient</i>	0,107
<i>Closed shear transfer coefficient</i>	1,00
<i>Uniaxial cracking stress</i>	2,37 MPa
<i>Uniaxial crushing stress</i>	22,60 MPa
<i>Tensile crack factor</i>	1,00

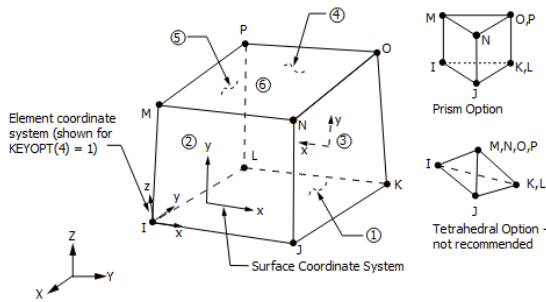


Gambar 7. Link180



Gambar 8. Grafik hubungan tegangan dan regangan baja M25

Elemen plat baja digunakan elemen *solid45* kondisi linier (ANSYS, 2017), terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. *Solid45*.

Elemen tersebut mempunyai tiga derajat kebebasan pada tiap nodenya berupa translasi arah x, y dan z. Elemen ini digunakan sebagai dasar tumpuan agar beton tidak mengalami konsentrasi tekanan lokal yang berlebihan yang dapat menyebabkan program ANSYS berhenti berproses (Srinivasan & Sathiya, 2010). Kondisi batas ke-2 tumpuan dimodelkan sebagai sendi dengan syarat batasnya yakni translasi ke arah sumbu x, y dan z terkekang dan rotasi ke arah sumbu batang yakni z bebas. Pemodelan hubungan bidang kontak antara pelat baja dan beton diasumsikan terjadi lekatan yang sempurna (*bonded*). Data material pelat baja *solid45* terlihat pada Tabel 4.

Gambar pemodelan dan *meshing* elemen balok dan tulangan untuk balok A1 dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel 4. Data material plat baja *solid45*

<i>Linear - elastic - isotropic</i>	
Modulus elastisitas baja, E_s	$2,0 \times 10^5$ MPa
Poisson rasio, ν_s	0,30
Tegangan leleh baja, f_y	400 MPa

Hasil dan Pembahasan

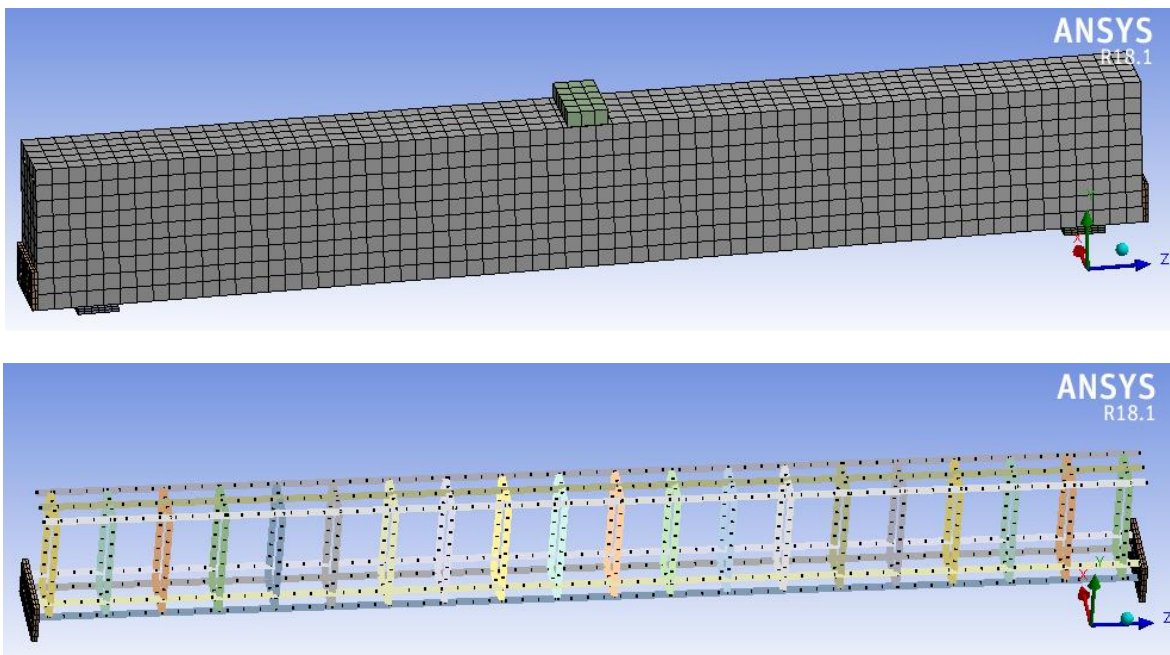
Balok *Benchmark*

Perbandingan hasil analisis meh dengan program ANSYS dan percobaan laboratorium balok Universitas Toronto tipe OA1 dan A1 disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan beban dan defleksi

No. Balok	Balok Toronto (<i>Benchmark</i>)		ANSYS	
	P_{UBM} (MPa)	δ_{UBM} (mm)	P_{UAn} (MPa)	δ_{UAn} (mm)
OA1	331	9,1	332,38	10,45
A1	459	18,8	456,83	14,05

Dari Tabel 5 terlihat bahwa besarnya beban dan defleksi maksimum balok hasil analisis meh program ANSYS mendekati atau relatif sama dengan hasil balok Toronto, dengan perbedaan selisihnya untuk tipe OA1: $P_U = 0,4\%$, $\delta_U = 14,8\%$ dan tipe A1: $P_U = -0,47\%$, $\delta_U = -25,27\%$. Dengan demikian setingan analisis meh dengan program ANSYS ini akan digunakan untuk analisis model balok tanpa dan dengan sengkang dengan variasi tata letak tulangan.



Gambar 10. *Meshing* elemen balok beton dan tulangan pada balok A1

Tabel 6. Beban dan defleksi balok saat leleh dan maksimum

No. balok	Tanpa sengkang, dua lapis				Tanpa sengkang, satu lapis		
	OA1	OA1,1	OA1,2	OA1,3	OA1,4	OA1,5	OA1,6
Beban leleh, P_y (KN)	112,67	111,30	111,86	111,98	117,95	117,74	117,58
Beban maksimum, P_u (KN)	332,38	324,41	326,36	323,31	355,59	349,70	349,72
Defleksi leleh, δ_y (mm)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Defleksi maksimum, δ_u (mm)	10,45	10,84	10,45	10,86	9,65	9,24	9,24
No. balok	Dengan sengkang, dua lapis				Dengan sengkang, satu lapis		
	OA1	OA1,1	OA1,2	OA1,3	OA1,4	OA1,5	OA1,6
Beban leleh, P_y (KN)	114,55	112,30	113,51	113,32	118,25	118,24	118,33
Beban maksimum, P_u (KN)	456,83	437,13	456,07	454,24	474,88	481,37	475,68
Defleksi leleh, δ_y (mm)	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Defleksi maksimum, δ_u (mm)	14,05	13,65	14,45	14,05	11,63	13,26	11,66

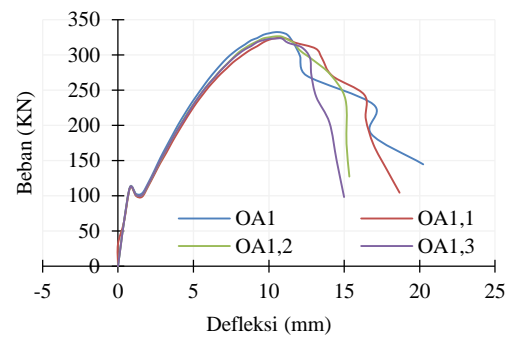
Beban dan defleksi akibat variasi tata letak tulangan

Hasil analisis besarnya beban dan defleksi akibat perubahan tata letak tulangan tampak pada Tabel 6. Dari Tabel 6 terlihat bahwa perubahan tata letak tulangan menyebabkan terjadinya perubahan besarnya beban dan defleksi, baik pada balok tanpa sengkang maupun pada balok dengan sengkang. Pada kondisi leleh perubahan beban yang terjadi sangat kecil sedangkan defleksinya tidak terjadi perubahan.

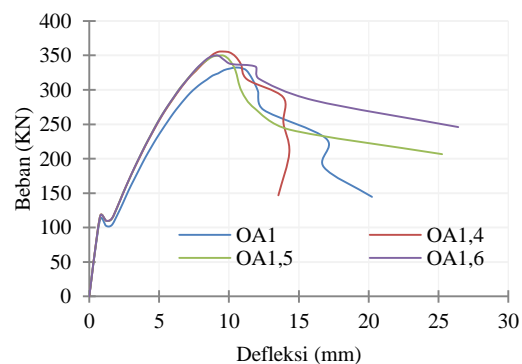
Pada kondisi beban maksimum perubahan beban yang terjadi adalah sebagai berikut, pada tulangan dua lapis terjadi pengurangan kapasitas beban maksimum dimana untuk balok tanpa sengkang sebesar 1,8% - 2,8% sedangkan untuk balok bersengkang sebesar 0,1% - 4,5%. Pada pemasangan tulangan satu lapis terjadi peningkatan kapasitas beban maksimum, dimana untuk balok tanpa sengkang sebesar, 5% - 6,5%, sedangkan untuk balok bersengkang sebesar 1,4% - 4%. Peningkatan kapasitas beban ini dikarenakan bertambah besar ukuran tinggi efektif (d) dari balok tersebut. Secara umum nampak bahwa pada tata letak tulangan yang sama, balok bersengkang mempunyai kapasitas bebannya lebih besar dari balok tanpa sengkang, peningkatan kapasitas bebannya sebesar 33,6% - 40,5%. Peningkatan kapasitas ini dikarenakan perubahan perilaku pada balok, perubahan perilaku ini ditunjukkan pada grafik hubungan beban dan defleksi pada Gambar 11 dan 12.

Dari Gambar 11 terlihat bahwa kelengkungan sudut grafik pada saat beban maksimum lancip, hal ini menyatakan bahwa pada balok tanpa sengkang terjadi keruntuhan secara tiba-tiba. Keruntuhan ini disebabkan karena gaya geser yang terjadi hanya ditahan oleh beton sehingga kegagalan terjadi akibat gaya tarik diagonal (*diagonal tension*) yang terjadi secara tiba-tiba (Vichio & Shim, 2004).

Dengan dipasang sengkang maka gaya geser tersebut ditahan oleh sengkang dan beton sehingga menambah kemampuan balok menahan geser dan lebih bersifat daktil, hal ini nampak pada grafik Gambar 12 dimana kelengkungan pada kondisi beban maksimum lebih tumpul bila dibandingkan dengan Gambar 11. Dari analisis hubungan beban dan defleksi seperti tampak pada Tabel 6, diperoleh tata letak tulangan yang menghasilkan kapasitas untuk menahan beban terbesar untuk tulangan dua lapis adalah balok model OA1 (tanpa sengkang) dan A1 (bersengkang) sedangkan untuk tulangan satu lapis adalah model OA1,4 (tanpa sengkang) dan A1,5 (bersengkang).

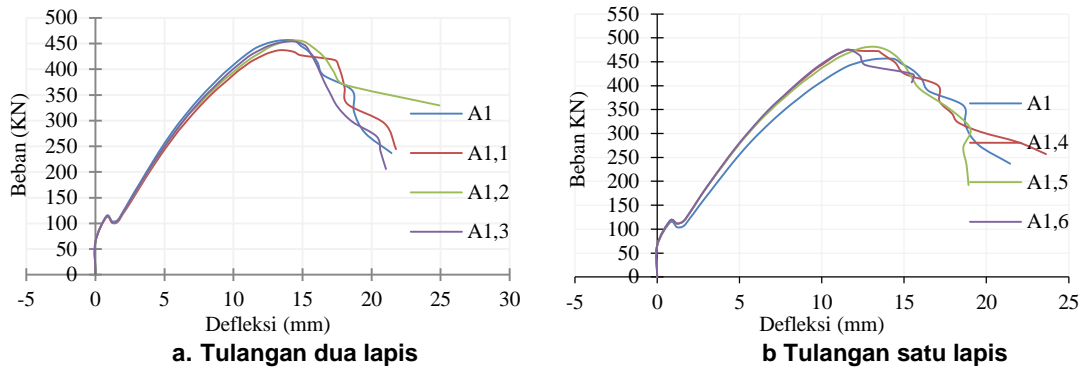


a. Tulangan dua lapis

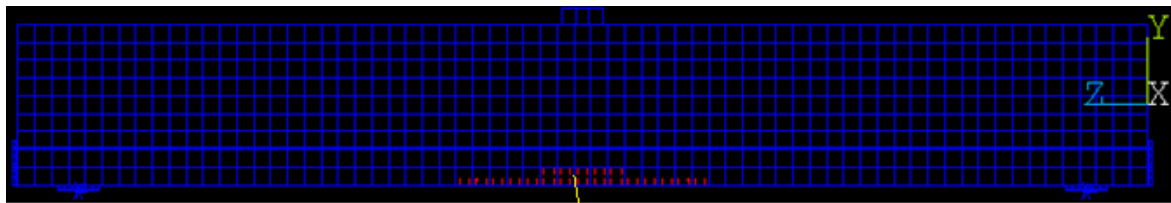


a. Tulangan satu lapis

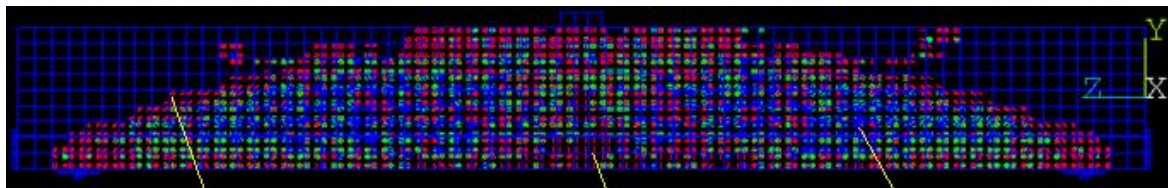
Gambar 11. Grafik hubungan beban dan defleksi balok tanpa sengkang



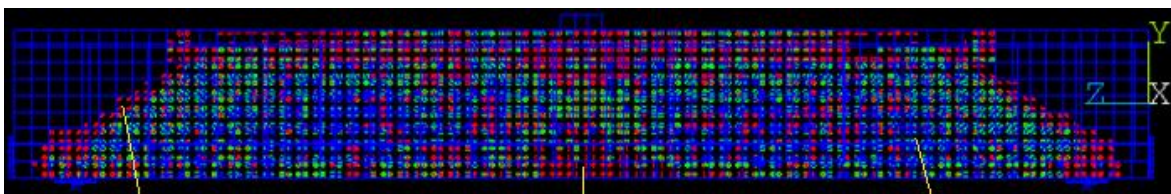
Gambar 12. Grafik hubungan beban dan defleksi balok bersengkang



Retak Lentur
 a. Retak awal balok



Tarik Diagonal Retak Lentur Hancur (crushing)
 b. Pola retak balok tanpa sengkang pada beban maksimum



Retak Geser Retak Lentur Hancur/crushing
 c. Pola retak balok bersengkang pada beban maksimum

Gambar 13. Pola retak balok model

Tabel 7. Daktilitas dan kekakuan balok

No. Balok	Tanpa sengkang, dua lapis				Tanpa sengkang, satu lapis		
	OA1	OA1,1	OA1,2	OA1,3	OA1,4	OA1,5	OA1,6
Daktilitas	13,06	13,55	13,06	13,57	12,06	11,55	11,55
Kekakuan (KN/mm)	31,81	29,93	31,23	29,77	36,85	37,85	37,85
No. Balok	Dengan sengkang, dua lapis				Dengan sengkang, satu lapis		
	A1	A1,1	A1,2	A1,3	A1,4	A1,5	A1,6
Daktilitas	17,06	17,06	18,06	17,56	14,54	16,58	14,58
Kekakuan (KN/mm)	32,46	32,02	31,56	32,33	40,83	36,30	40,80

Daktilitas, kekakuan dan pola retak

Daktilitas (μ) merupakan kemampuan struktur mengalami defleksi paska elastis, yang nilainya ditentukan berdasarkan perbandingan antara defleksi maksimum (δ_u) dan defleksi saat paska elastis atau leleh (δ_y). Sedangkan kekakuan struktur (K) adalah kemampuan struktur untuk berdeformasi di bawah pengaruh beban, besarnya kekakuan ditentukan berdasarkan perbandingan antara beban maksimum (P_u) dan defleksi maksimum (δ_u). Adapun besarnya daktilitas dan kekakuan balok dapat dilihat pada Tabel 7.

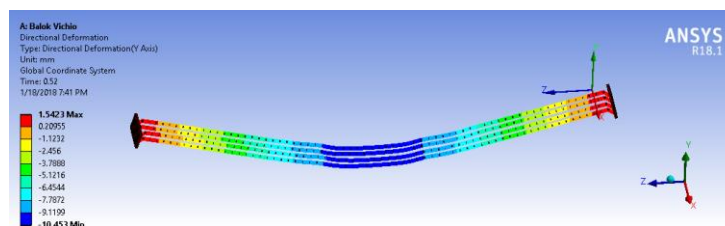
Berdasarkan data pada Tabel 7 terlihat bahwa pada posisi tata letak tulangan yang sama, secara umum balok bersengkang mempunyai nilai daktilitas dan kekakuan yang lebih besar daripada balok tanpa sengkang. Perubahan tata letak tulangan juga menyebabkan perubahan nilai daktilitas dan kekakuan, perubahan secara signifikan terjadi pada perubahan jumlah lapis tulangan. Dimana pada tulangan satu lapis baik untuk balok tanpa sengkang maupun balok bersengkang nilai daktilitasnya menurun sedangkan kekakuannya meningkat.

Pola retak balok tanpa dan dengan sengkang dapat dilihat pada Gambar 13. Pola retak pada saat retak awal untuk semua model balok relatif sama yakni terjadi di tengah bentang dan merupakan retak akibat lentur terlihat pada Gambar 13a. Dengan bertambahnya beban, retak yang terjadi bertambah dan semakin lebar menjalar pada sebagian besar badan balok sampai beban maksimum yang menyebabkan balok runtuh. Pada balok tanpa sengkang keruntuhan terjadi akibat tegangan tarik diagonal, terlihat pada Gambar 13b, sedangkan pada balok bersengkang keruntuhan terjadi akibat geser, terlihat pada Gambar 13 c. Perbedaan tipe

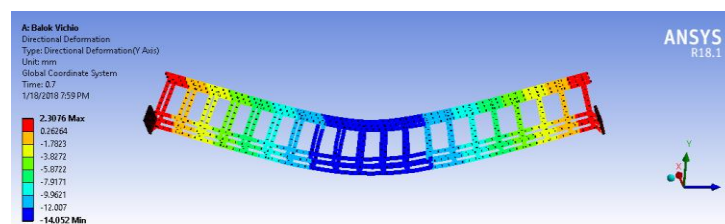
keruntuhan pada Gambar 13b dan 13c dikarenakan adanya sengkang yang menahan tegangan tarik diagonal yang semula hanya ditahan oleh beton. Gambar 14a dan 14b memperlihatkan perilaku defleksi tulangan balok tanpa sengkang dan yang bersengkang saat kondisi beban maksimum. Dari gambar tersebut terlihat sengkang ikut berdefleksi bersama dengan tulangan dalam menahan gaya-gaya dalam yang bekerja pada balok beton tersebut, sehingga balok yang bersengkang mempunyai nilai daktilitas dan kekakuan yang lebih besar dari balok tanpa sengkang, hal ini dapat dilihat pada Tabel 7.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah diuraikan di atas, maka kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini bahwa tata letak tulangan pada balok beton bertulang yang tulangan pokoknya menggunakan diameter yang berbeda mempengaruhi besarnya kapasitas beban, defleksi, daktilitas dan kekakuan balok. Pada jumlah luas tulangan yang sama, tata letak tulangan yang dipasang satu lapis mempunyai kapasitas beban dan kekakuan lebih besar dari tulangan dua lapis tetapi daktilitasnya lebih kecil. Tata letak tulangan yang menghasilkan kapasitas beban dan daktilitas terbesar, pada tulangan dua lapis adalah model OA1 (tanpa sengkang) dan A1 (dengan sengkang), dan pada tulangan satu lapis adalah model OA1,4 (tanpa sengkang) dan A1,5 (bersengkang). Secara umum tata letak tulangan tidak mempengaruhi pola retak dan model keruntuhan pada balok tanpa sengkang dan balok bersengkang. Keruntuhan pada balok tanpa sengkang disebabkan oleh tegangan tarik diagonal sedangkan balok bersengkang akibat geser dan pecah (*crushing*) akibat tekan.



a. Balok tulangan satu lapis tanpa sengkang



b. Balok balok tulangan satu lapis bersengkang

Gambar 14. Perilaku defleksi tulangan balok

Daftar Pustaka

- ANSYS. (2017). *Ansys user's manual revision 18.1*. USA: ANSYS Inc.
- Adheem, A. H. (2013). Nonlinear analysis of reinforced concrete beams strengthened in shear with NSM FRP rods. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 21(1).
- AL-Eyssawi, & Jabbar, T. A. (2015). Comparative study on the required tension reinforcement for singly reinforced concrete rectangular beams according to different codes. *Journal of Babylon University/Engineering Sciences*, 23(2).
- Al-Shimmari, I. K., Hamad, N. T., & Waryosh, W. A. (2011). Investigation of the behavior for reinforced concrete beam using non-linear three-dimensional finite elements model. *Eng. & Tech. Journal*, 29(10).
- Badiger, N. S., & Malipatil, K. M. (2014). Parametric study on reinforced concrete beam using ansys. *Civil and Environmental Research*, 6(8), 88-94.
- Bresler, B., & Scordelis, A. C. (1963). Shear strength of reinforced concrete beam. *Journal American Concrete Institute*, 60(1), 51-72.
- Chandramohanmouli, K., & Kumar, N. H. (2017). Finite element modelling of composite steel-concrete beams with external pressurising. *International Journal of Engineering Development and Research*, 5(2), 1889-1907.
- Dahmani, L., Khennane, A., & Kaci, S. (2010). Crack identification in reinforced concrete beams using ansys software. *Strength of Materials*, 42(2), 232-240.
- Musmar, M. A., Rjoub, M. I., & Abdel Hadi, M. A. (2014). Nonlinear finite element analysis of shallow reinforced concrete beams using solid65 element. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(2).
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced concrete structures*. John Wiley & Sons Inc.
- Pawar, P. S., & Pawar, P. M. (2016). Nonlinear analysis of reinforced concrete column with ansys. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3(6), 2290-2296.
- Sallam, H. E., Badawy, A. A., & El-Emam, H. M. (2013). Numerical simulation of the performance of strengthened RC beams using smeared crack approach. *Journal of Jazan University-Applied Sciences Branch*, 2(2).
- Smarzewski, P. (2016). Numerical solution of reinforced concrete beam using arc-length method. *Biuletyn WAT*, 65(1).
- Srinivasan, R., & Sathiya, K. (2010). Flexural behavior of reinforced concrete beams using finite element analysis (elastic analysis). *Buletinul Institutului Politehnic Din Iasi*, 56(60).
- Subramani, T., Manivannan, R., & Kavitha, M. (2014). Crack identification in reinforced concrete beams using ansys software. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), 133-141.
- Sucharda, O., & Brozovsky, J. (2011). Models for reinforcement in final finite element analysis of structures. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava*, 11(2).
- Uma, K., Anuradha, R., & Venkatasubramani, R. (2012). Experimental investigation and analytical modeling of reinforced geopolymer concrete beam. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(3), 817-827.
- Vasudevan, G., Kothandaraman, S. (2011). Parametric study on nonlinear finite element analysis on flexural behavior of RC beams using ansys. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(1).
- Vecchio, F. J., & Shim, W. (2004). Experimental and analytical re-examination of classic concrete beam tests. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130(3), 460-469.
- Wolanski, A. J. (2004). Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis. *Thesis*. Wisconsin: Marquette University.