

ANALISIS DAYA DUKUNG BEBAN BALOK BETON BERTULANG TAMPANG T DENGAN PERKUATAN *WIRE ROPE* PADA DAERAH MOMEN NEGATIF MENGGUNAKAN PROGRAM *RESPONSE-2000* DAN METODE PIAS

Yanuar Haryanto¹, Iman Satyarno² dan Djoko Sulisty³

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Jenderal Soedirman, Jl. Mayjen Sungkono KM 5, Blater, Purbalingga
e-mail: yanuar_haryanto@yahoo.com

²Jurusa Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta
e-mail: iman@tsipil.ugm.ac.id

³Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika No. 2, Yogyakarta
e-mail: djokosulistyo@tsipil.ugm.ac.id

Abstract: *Response-2000* is a program that can be used to analyze the elements of reinforced concrete as a result of axial load, moment, shear, or a combination of these so that the load-deflection response can be predicted and the strength can be determined. This paper discusses the comparison of the load carrying capacity of experiment and of analysis using *Response-2000* and discrete element method on the T section reinforced concrete beams strengthened by wire rope in the negative moment region. Discrete element method is done by dividing the cross section into a number of layers with a certain thickness, and then analyzing the forces to achieve an equilibrium so that it can be determined its capacity. Analysis was performed on three model of T section beams, 1 beam without strengthening, 1 beam strengthened by 2 wire ropes, and 1 beam strengthened by 4 wire ropes. Type of wire rope used is Independent Wire Rope Core (IWRC) with a diameter of 10 mm. The analysis showed that the load-deflection curve for all beam based on analysis of *Response-2000* has the similar pattern with the load-deflection curve of experiment results. However there is a difference in the slope of the curve where it can be caused by perfect bond assumption in *Response-2000*. The same also applies to the analysis of discrete element method. Load carrying capacity of the results of *Response-2000* shows the ratio of 1.05; 0.95; and 0.89 compared to the experiment results, for the beam without strengthening, the beam strengthened by 2 wire ropes, and the beam strengthened by 4 wire ropes, respectively. While the load carrying capacity of the results of the analysis of discrete element method shows the ratio of 1.05; 0.85; and 0.76 compared to the experiment results.

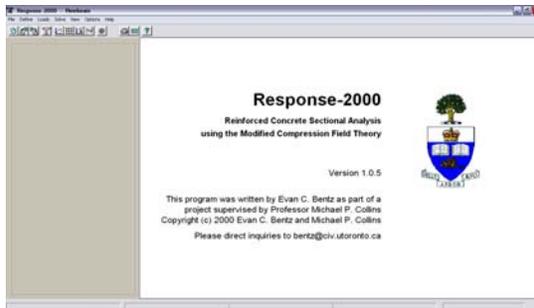
Keywords: beam, load carrying capacity, discrete element method, *Response-2000*, wire rope

Abstrak: *Response-2000* adalah suatu program yang dapat digunakan untuk menganalisis elemen beton bertulang akibat beban aksial, momen, geser, maupun kombinasi ketiganya sehingga respon beban-lendutan dapat diprediksi dan kekuatannya dapat diketahui. Makalah ini membahas perbandingan kapasitas daya dukung beban hasil pengujian balok bertulang tampang T yang diperkuat *wire rope* pada daerah momen negatif dengan analisis menggunakan *Response-2000* dan metode pias. Metode pias dilakukan dengan cara membagi penampang menjadi sejumlah pias dengan ketebalan tertentu, kemudian menganalisis gaya-gaya yang bekerja sampai tercapai keseimbangan sehingga dapat ditentukan kapasitasnya. Analisis dilakukan terhadap 3 model balok tampang T, masing-masing 1 balok tanpa perkuatan, 1 balok diperkuat dengan 2 *wire rope*, dan 1 balok diperkuat dengan 4 *wire rope*. Jenis *wire rope* yang digunakan adalah *Independent Wire Rope Core (IWRC)* dengan diameter 10 mm. Hasil analisis menunjukkan bahwa kurva hubungan beban-lendutan untuk semua balok berdasarkan analisis *Response-2000* memiliki pola yang mendekati kurva hubungan beban-lendutan hasil pengujian. Namun demikian terdapat perbedaan pada kemiringan kurva di mana hal tersebut dapat disebabkan oleh adanya anggapan lekatan sempurna (*perfect bond*) pada program *Response-2000*. Hal yang sama juga berlaku pada analisis metode pias. Daya dukung beban hasil *Response-2000* menunjukkan rasio sebesar 1,05; 0,95; dan 0,89 terhadap hasil pengujian, masing-masing untuk balok tanpa perkuatan, balok diperkuat dengan 2 *wire rope*, dan balok diperkuat dengan 4 *wire rope*. Sedangkan kapasitas daya dukung beban hasil analisis metode pias menunjukkan rasio sebesar 1,05; 0,85; dan 0,76 terhadap hasil pengujian.

Kata kunci: balok, daya dukung beban, metode pias, *Response-2000*, *wire rope*

LATAR BELAKANG

Salah satu tujuan dilakukannya perkuatan elemen struktur adalah untuk meningkatkan kapasitas sehingga kemungkinan terjadinya keruntuhan oleh karena adanya penambahan beban dari alih fungsi bangunan dapat dihindari. Makalah ini membahas perbandingan kapasitas daya dukung beban hasil pengujian balok bertulang tampang T yang diperkuat *wire rope* pada daerah momen negatif dengan analisis menggunakan program *Response-2000* dan metode pias. *Response-2000* (Bentz, 2000) adalah suatu program yang dibuat berdasarkan *Modified Compression Field Theory (MCFT)* untuk elemen beton bertulang prismatic. Program ini dapat digunakan untuk melakukan analisis terhadap elemen beton bertulang akibat pembebanan aksial, momen, geser, maupun kombinasi ketiganya sehingga respon beban-lendutan dapat diprediksi dan kekuatan dari elemen beton bertulang yang dianalisis dapat diketahui. Tampilan awal program *Response-2000* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Tampilan awal *Response-2000*

Program *Response-2000* dan program lainnya yang dikembangkan oleh Bentz (2000) dapat diunduh secara gratis melalui internet dengan alamat sebagai berikut:

Response-2000

<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>

Membrane-2000

<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/m2k.htm>

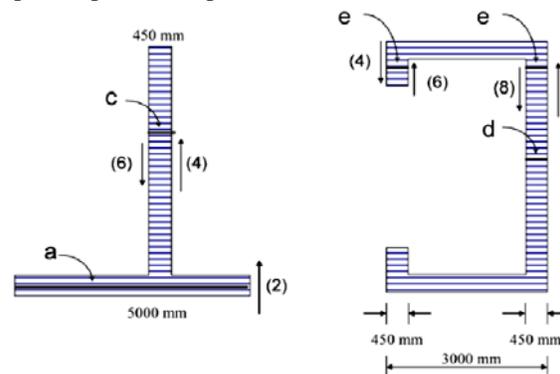
Triax-2000

<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/t2k.htm>

Shell-2000

<http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/s2k.htm>

Menurut Park dan Paulay (1975) analisis metode pias dapat digunakan untuk menentukan kapasitas penampang elemen beton bertulang berdasarkan model kurva tegangan-regangan dari bahan-bahan penyusunnya. Metode pias dilakukan dengan cara membagi penampang elemen beton bertulang menjadi sejumlah pias dengan ketebalan tertentu. Prosedur selanjutnya adalah menentukan *target strain* untuk kondisi tertentu dan mengasumsikan kedalaman garis netral sehingga regangan pada tiap pias dapat ditentukan menggunakan perbandingan segitiga. Dari nilai regangan yang telah ditentukan untuk masing-masing pias dapat dihitung tegangan dan gaya yang bekerja. Prosedur dilakukan sampai tercapai keseimbangan gaya, selanjutnya dapat ditentukan kapasitas momen dari gaya-gaya yang bekerja pada tiap-tiap pias. Contoh pembagian penampang elemen menjadi pias-pias dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Contoh pembagian pias penampang elemen (Lam dkk, 2011)

Lam dkk (2011) pada kajiannya tentang pemodelan perilaku gaya-deformasi pada berbagai penampang dinding beton bertulang dengan metode pias menggunakan program *Ms. Excel* dan *Response-2000* menyimpulkan bahwa hasil analisis hubungan momen-kurvatur menunjukkan tingkat kecocokan yang relatif tinggi. Sementara itu Atmajayanti (2013) yang melakukan kajian mengenai analisis balok beton bertulang tampang T yang diperkuat dengan *wire rope* menggunakan program *Response-2000* dan metode pias, melaporkan bahwa rasio peningkatan kapasitas lentur hasil analisis *Response-2000* dan metode pias terhadap hasil eksperimen untuk balok kontrol adalah 1,01 dan 1,04, sedangkan rasio

penurunan untuk balok perkuatan hasil analisis terhadap hasil eksperimen adalah 0,84 dan 0,87 untuk analisis *Response-2000* dan metode pias. Indeks daktilitas balok kontrol hasil analisis *Response-2000* dan metode pias mengalami penurunan terhadap hasil eksperimental dengan rasio 0,31 dan 0,60. Indeks daktilitas balok perkuatan hasil analisis program *Response-2000* dan metode pias mengalami peningkatan terhadap hasil eksperimental dengan rasio 1,19 dan 1,92. Rasio peningkatan *initial stiffness* untuk *equivalent stiffness* adalah sebesar 3,16 dan 2,75 hasil analisis *Response-2000* dan metode pias terhadap hasil eksperimental untuk balok kontrol adalah 2,85 dan 3,33, sedangkan peningkatan *equivalent stiffness* hasil analisis *Response-2000* dan metode pias adalah 1,62 dan 1,42. Peningkatan balok perkuatan hasil analisis *Response-2000* dan metode pias terhadap hasil eksperimental untuk nilai *initial stiffness* adalah sebesar 3,70 dan 5,26 sedang

untuk *equivalent stiffness* adalah sebesar 3,16 dan 2,75

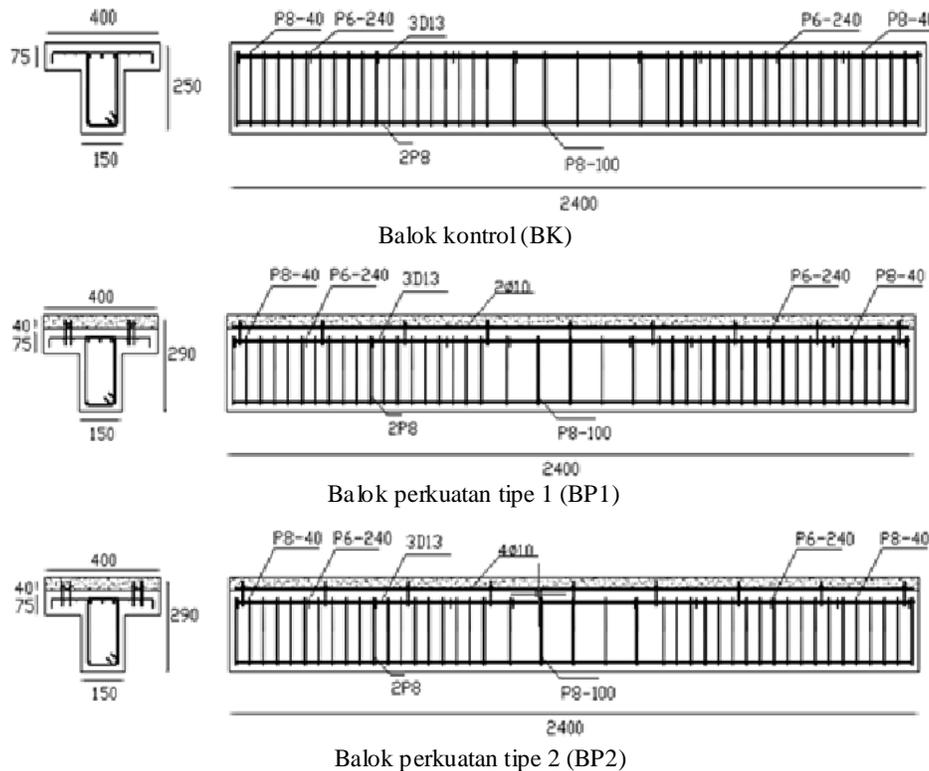
METODE

Model Benda Uji

Model benda uji yang digunakan berdasarkan kajian eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya (Haryanto, 2011) berupa balok beton bertulang tampang T dengan bentang 2,4 m yang terdiri dari balok kontrol (BK) yang merupakan balok tanpa perkuatan, balok perkuatan tipe 1 (BP1) yang merupakan balok dengan perkuatan dua buah *Wire Rope* dan balok perkuatan tipe 2 (BP2) yang merupakan balok dengan perkuatan empat buah *Wire Rope*. Pada balok perkuatan dilakukan pengecoran kembali dengan komposit mortar pada blok tarik. Spesifikasi model benda uji disajikan dalam Tabel 1 sedangkan penampang benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Spesifikasi model benda uji

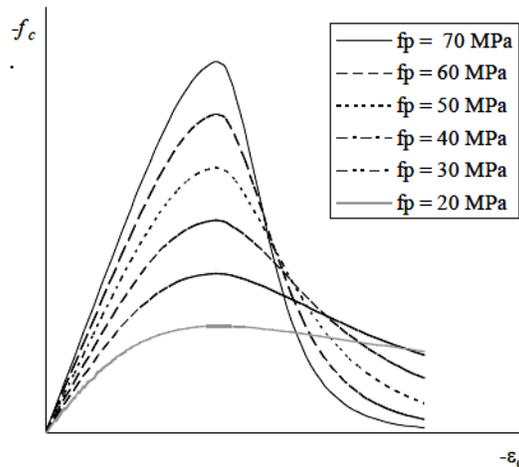
KODE	L (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	b_w (mm)	t_w (mm)	Tul. Utama		Tul. Geser	Wire Rope (Atas)
						Atas	Bawah		
BK	2400	400	75	150	175	3D13	2P8	P8-40	-
BP1	2400	400	115	150	175	3D13	2P8	P8-40	2 ϕ 10
BP2	2400	400	115	150	175	3D13	2P8	P8-40	4 ϕ 10



Gambar 3. Penampang model benda uji (Haryanto, 2011)

Model Konstitutif dan Karakteristik Bahan

Model konstitutif atau model hubungan tegangan-regangan beton yang digunakan pada *Response-2000* adalah Model Popovics (Bentz, 2000) seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan tegangan-geganan beton Model Popovics (Bentz, 2000)

Persamaan yang digunakan untuk menggambarkan hubungan tegangan-regangan beton menggunakan Model Popovics adalah sebagai berikut:

$$f_{ci} = - \frac{\frac{\sigma}{\sigma_p} \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_p}}{\frac{\sigma}{\sigma_p} \frac{\dot{\sigma}}{\dot{\sigma}_p}} f_p \cdot \frac{n}{n - 1 + (\frac{\sigma_{ci}}{\sigma_p})^{n \cdot k}} \text{ untuk } \sigma_{ci} < 0$$

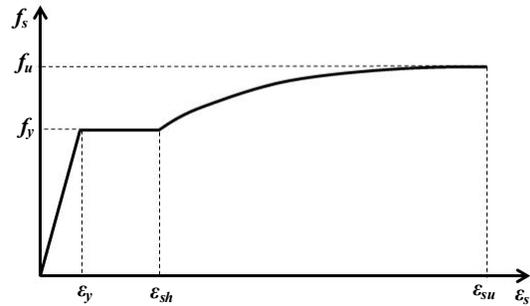
$$n = 0,8 + \frac{f_p}{17}$$

$$k = \begin{cases} 1,0 & \text{untuk } \sigma_p < \sigma_{ci} < 0 \\ 0,67 + \frac{f_p}{62} & \text{untuk } \sigma_{ci} < \sigma_p < 0 \end{cases}$$

dimana:

- f_p = tegangan ultimit dari pengujian silinder beton (MPa)
- σ_p = regangan yang bersesuaian dengan tegangan ultimit
- n = parameter penyesuai
- k = faktor yang merupakan parameter kehilangan daktilitas pasca ultimit dari beton mutu tinggi

Hubungan tegangan-regangan baja pada program *Response-2000* dimodelkan sebagai kurva parabolik pada daerah *strain hardening* seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan tegangan-regangan baja Model Parabolik

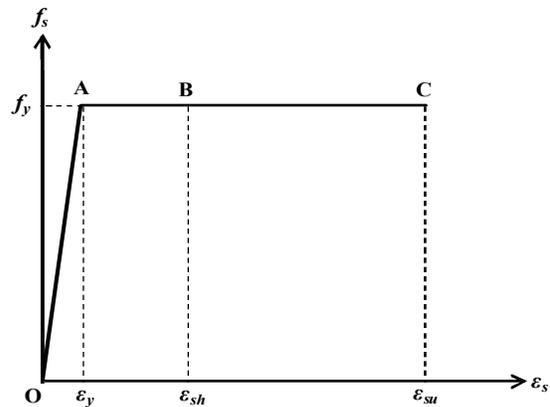
Persamaan yang digunakan untuk menggambarkan hubungan tegangan-regangan baja menggunakan model parabolik adalah sebagai berikut:

$$f_s = \begin{cases} E_s \cdot \epsilon_s & \text{untuk } |\epsilon_s| \leq \epsilon_y \\ f_y & \text{untuk } \epsilon_y < |\epsilon_s| \leq \epsilon_{sh} \\ f_u - (f_u - f_y) \frac{\frac{\sigma}{\sigma_u} - \frac{\sigma}{\sigma_y}}{\frac{\sigma}{\sigma_u} - \frac{\sigma}{\sigma_{sh}}} & \text{untuk } \epsilon_{sh} < |\epsilon_s| \leq \epsilon_u \end{cases}$$

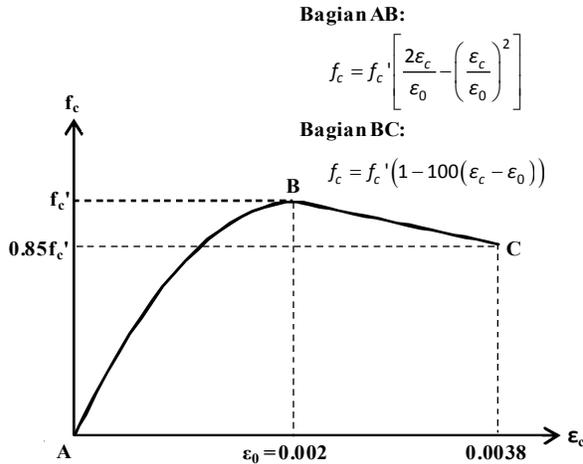
dimana:

- ϵ_s = regangan kerja
- ϵ_y = regangan leleh
- ϵ_{sh} = regangan *strain hardening*
- ϵ_{su} = regangan ultimit
- E_s = modulus elastis (MPa)
- f_y = tegangan leleh (MPa)
- f_u = tegangan ultimit (MPa)

Model hubungan tegangan-regangan baja untuk metode pias menggunakan Model Bilinear seperti terlihat pada Gambar 6, sedangkan model hubungan tegangan-regangan beton menggunakan Model Hognestaad (Park dan Pauly, 1975) seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Hubungan tegangan-regangan baja Model Bilinear (Park dan Pauly, 1975)



Gambar 7. Hubungan tegangan-regangan beton Model Hognestaad

Model hubungan tegangan-regangan *wire rope* baik untuk *Response-2000* maupun metode pias ditentukan menggunakan persamaan Ramsberg-Osgood (Wong dan Vecchio, 2002) dikarenakan persamaan ini sudah dikenal dengan baik dan menunjukkan prediksi yang cukup akurat terhadap tegangan-regangan dari bahan dengan titik leleh yang tidak jelas.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \left[A + \frac{1-A}{\frac{C}{\varepsilon_s} + (B \varepsilon_s)^C} \right] f_u$$

$$A = \frac{E_{sh}}{E_s}$$

$$B = \frac{E_s (1-A)}{f_s^*}$$

C = koefisien transisi

dimana:

ε_s = regangan pada *wire rope*

E_s = modulus elastik awal (MPa)

f_u = tegangan ultimit (MPa)

f_u^* = nilai yang bersesuaian dengan pertemuan bagian linier kedua pada sumbu axis tegangan (pada saat regangan nol)

C = 10 (Benz, 2000)

Spesifikasi karakteristik untuk bahan *wire rope* disajikan pada Tabel 2 sedangkan spesifikasi karakteristik bahan beton dan baja tulangan konvensional masing-masing disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 2. Spesifikasi karakteristik *wire rope*

Parameter	Pemodelan <i>Wire Rope</i>		
	Model 1	Model 2	Model 3
Koefisien A	0	0	0
Koefisien B	43,79	268,91	17,51
Koefisien C	10	10	10
E (MPa)	32568	200000	32568
f_u (MPa)	743,73	743,73	1860
ε_u (mm/m)	28,5	28,5	100

dimana:

Model 1 : Seluruh karakteristik (E_w , f_u dan ε_u) sesuai hasil pengujian pendahuluan.

Model 2 : Nilai modulus elastisitas *wire rope* diambil sebesar nilai modulus elastisitas baja ($E_w = E_s$), karakteristik yang lain sesuai hasil pengujian pendahuluan.

Model 3 : Nilai modulus elastisitas *wire rope* sesuai hasil pengujian pendahuluan, sedangkan nilai f_u diambil sebesar 1860 MPa dengan nilai ε_u diambil sebesar 100 mm/m (modifikasi *default value* program *Response-2000*)

Tabel 3. Spesifikasi karakteristik beton

Parameter	Jenis Bahan	
	Beton	Mortar
f_c (MPa)	32,39	49,85
f_t (MPa)	3,239	4,985
* ε_o (mm/m)	1,99	2,24
Ukuran Agregat (mm)	10	0

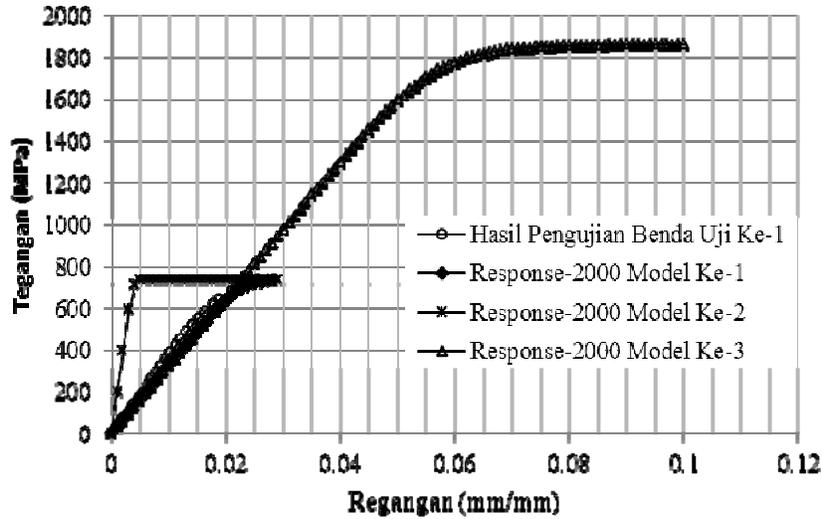
Keterangan: *Regangan puncak mengikuti nilai otomatis dari *Response-2000*

Tabel 4. Spesifikasi karakteristik baja

Parameter	Jenis Tulangan	
	Tul. P8	Tul. D13
E (MPa)	200000	200000
f_y (MPa)	373,85	479,71
ε_{sh} (mm/m)	63,64	63,64
ε_u (mm/m)	209,1	245,5
f_u (MPa)	525,33	742,52

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 8 berikut menunjukkan bahwa hasil pengujian *wire rope* dan hasil pemodelan dari persamaan Ramsberg-Osgood memiliki tingkat kecocokan yang tinggi. Selanjutnya analisis yang digunakan sebagai perbandingan adalah hasil dari model ke-1 dikarenakan model tersebut menggunakan nilai-nilai karakteristik bahan yang sama sesuai hasil pengujian.

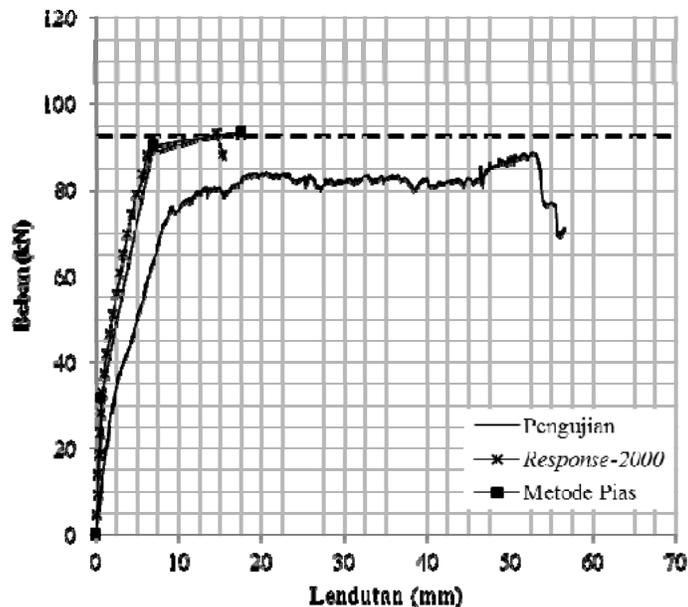


Gambar 8. Perbandingan hubungan tegangan-regangan *wire rope* hasil pengujian dan pemodelan

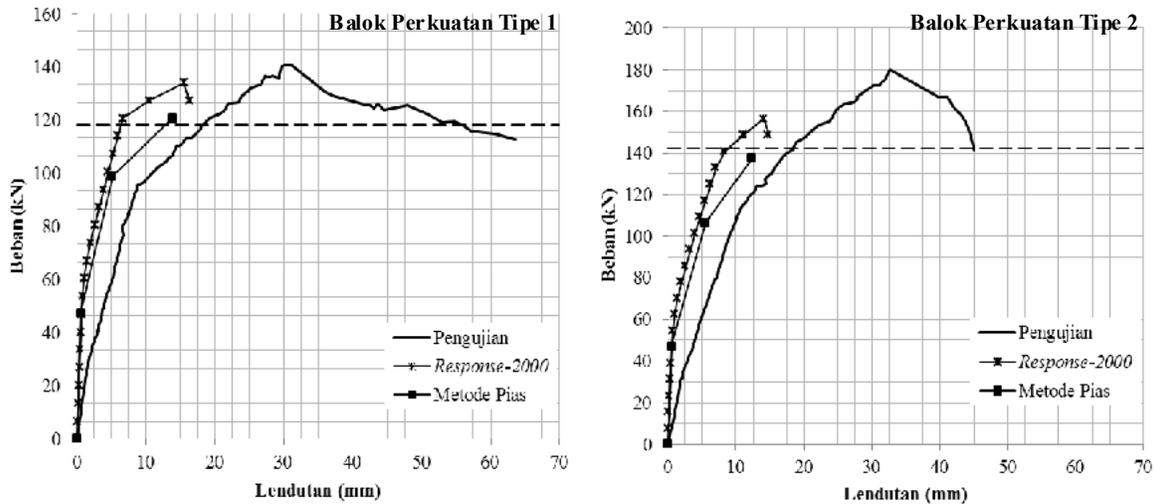
Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan

Hubungan beban-lendutan untuk semua benda uji berdasarkan analisis program *Response-2000* secara umum memiliki pola yang mendekati kurva hubungan beban-lendutan hasil pengujian. Namun demikian terdapat perbedaan pada kemiringan kurva di mana hal tersebut dapat disebabkan oleh adanya anggapan lekatan sempurna (*perfect bond*) dari bahan-bahan yang berbeda pada program *Response-2000*. Hal yang sama juga berlaku untuk analisis metode pias. Penentuan regangan leleh baja tulangan tarik sebagai *target strain*

pada analisis metode pias untuk balok perkuatan dapat menyebabkan perbedaan awal kemiringan kurva daerah *post serviceability*. Analisis metode pias dibatasi sampai dengan kondisi ultimit dengan regangan beton ditetapkan sebesar 0,003 sehingga tidak terdapat bagian penurunan kurva setelah tercapai beban maksimum. Perbandingan hubungan beban-lendutan dari hasil pengujian dengan hasil analisis program *Response-2000* dan metode pias dapat dilihat pada Gambar 9 untuk balok kontrol dan Gambar 10 untuk balok perkuatan.



Gambar 9. Perbandingan hubungan beban-lendutan balok kontrol



Gambar 10. Perbandingan hubungan beban-lendutan balok perkuatan

Perbandingan Daya Dukung Beban

Perbandingan daya dukung beban hasil pengujian, hasil analisis menggunakan program *Response-2000*, dan hasil analisis metode pias dapat dilihat pada Tabel 5. Dari Tabel 5 dapat diketahui bahwa daya dukung beban untuk balok kontrol (BK) hasil pengujian dengan hasil analisis menggunakan program *Response-2000* dan analisis metode pias menunjukkan tingkat kecocokan yang tinggi ditandai dengan rasio yang ada mendekati 1.

Anggapan adanya lekatan yang sempurna (*perfect bond*) antara bahan-bahan yang berbeda pada analisis menggunakan *Response-2000* dan metode pias secara *engineering* akan menghasilkan daya dukung beban yang lebih tinggi dibandingkan hasil pengujian. Namun demikian terdapat faktor lain yang dapat mempengaruhi misalnya adalah kemungkinan perbedaan karakteristik bahan pada benda uji balok beton bertulang secara keseluruhan dengan karakteristik bahan yang digunakan se-

Tabel 5. Perbandingan daya dukung beban

Benda Uji	Daya Dukung Beban (kN)				
	Hasil Pengujian	Hasil Analisis			
		<i>Response-2000</i>	*Rasio	Metode Pias	*Rasio
BK	88,5	92,82	1,05	93,27	1,05
BP1	140,8	134,07	0,95	120,63	0,85
BP2	180,0	156,45	0,89	137,49	0,76

Keterangan: *Dihitung terhadap hasil pengujian

Demikian juga daya dukung beban untuk balok perkuatan tipe 1 (BP1), memiliki tingkat kecocokan yang tinggi antara hasil pengujian dan hasil analisis menggunakan program *Response-2000* (rasio mendekati 1). Di luar hal tersebut terlihat bahwa daya dukung beban hasil pengujian untuk balok perkuatan tipe 1 (BP1) dan balok perkuatan tipe 2 (BP2) bernilai lebih tinggi dibandingkan dengan hasil analisis

bagai input pada *Response-2000* dan metode pias. Pada kajian ini, pengaruh puntiran dan gesekan antar kawat pembentuk bahan *wire rope* yang terjadi pada pengujian pendahuluan menyebabkan nilai modulus elastisitas menjadi rendah, kurang dari nilai modulus elastisitas teoritis menurut Raof dan Kraincanic (1995). Hal yang berbeda dapat terjadi pada pengujian balok perkuatan dikarenakan adanya bahan mortar sebagai perekat.

KESIMPULAN

Dari uraian yang telah disampaikan di atas dapat ditarik kesimpulan untuk kajian ini bahwa hasil pengujian *wire rope* dan hasil pemodelan dari persamaan Ramsberg-Osgood memiliki tingkat kecocokan yang tinggi. Hubungan beban-lendutan untuk semua model benda uji berdasarkan analisis program *Response-2000* dan metode pias secara umum memiliki pola yang mendekati hubungan beban-lendutan hasil pengujian. Daya dukung beban untuk benda uji balok kontrol berdasarkan hasil pengujian, hasil analisis program *Response-2000* dan metode pias menunjukkan tingkat kecocokan tinggi terlihat dari rasio yang mendekati 1. Pengaruh puntiran dan gesekan antar kawat pembentuk bahan *wire rope* yang terjadi pada pengujian pendahuluan berbeda dengan kondisi pengujian benda uji balok perkuatan dikarenakan adanya bahan mortar sebagai perekat. Hal tersebut dapat menyebabkan daya dukung beban benda uji balok perkuatan hasil pengujian bernilai lebih tinggi dibanding hasil analisis program *Response-2000* dan metode pias.

DAFTAR PUSTAKA

- Atmajayanti, A. T. 2013. *Analisis Balok Beton Bertulang Tampang T Yang Diperkuat Dengan Wire Rope Menggunakan Program Response 2000 Dan Metode Pias*. Jurnal Dinamika Rekayasa. Vol. 9 No. 1. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto.
- Bentz, E. 2000. *Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members. Ph.D Thesis. Departement of Civil Engineering, University of Toronto, Kanada*.
- Haryanto, Y. 2011. *Efektifitas Wire Rope Sebagai Perkuatan Pada Daerah Momen Negatif Balok Beton Bertulang Tampang T*. Jurnal Dinamika Rekayasa. Vol. 7 No. 2. Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto.
- Lam, N., Wilson, J. dan Lumantarna, E. 2011. *Force-Deformation Modelling of Cracked Reinforced Concrete by EXCEL Spreadsheet. Computers and Concrete, Vol. 8, No. 1*.
- Park, R. dan Paulay, T. 1975. *Reinforced Concrete Structure*. John Wiley & Sons Inc, Kanada.
- Raof, M., dan Kraincanic, I. 1995. *Analysis Of Large Diameter Wire Ropes. ASCE J. Engng Mechanics, Vol. 121 No. 5, pp 667-675*.
- Wong, P. S. dan Vecchio, F. J. 2002. *Vector2 & Formworks User's Manual. Departement of Civil Engineering, University of Toronto, Kanada*.