

Analisis Lentur Balok Penampang T Berlubang Memanjang Menggunakan Metode Elemen Hingga Non-linier

(Flexural Analysis of Longitudinal Hollow Core Reinforced Concrete T Beam Using Nonlinear Finite Element Method)

PRAGANIF SUKARNO, MUSLIKH, DJOKO SULISTYO

ABSTRACT

Numerical analysis is a time-, cost- and equipment-effective method to study the behavior of structures. ATENA is one of the available software-based on finite element method. Hollow cross section is one way to reduce the weight of concrete beam. The effect of holes on beam may reduce the bending resistance. The hollow beam was numerically modeled which and subsequently analyzed using the ATENA v.2.10 software. Material parameters being used as input data was obtained from laboratory tests, assuming that steel-concrete bond was perfect, and the steel reinforcement was modeled as discrete. The results of numerical analysis of the ATENA were then compared with experimental test results on the flexural behavior and serviceability limit state of reinforced concrete hollow beams lengthwise (Amir, 2010), then study the variation of quality parameters of concrete and the hole size variations. The results shows that the collapse load of hollow beam reached only 96.71% and deflection reached 135.96%. Stiffness of hollow concrete beam was also showed a higher stiffness of the experiment. The crack pattern is flexural fracture and very much agree with that of the experiments. Test parameters of concrete quality variations as well as the hole size variation showed higher concrete quality/size of the hole will reduce the ductility of beam.

Keywords: reinforced concrete, longitudinal hollow beam, flexure, ductility, crack

PENDAHULUAN

Didasarkan pada tujuan peningkatan kemampuan komponen struktural dan optimasi hasil perancangan sering dijumpai balok beton bertulang dengan penampang I, khususnya pada struktur jembatan. Dibandingkan dengan penampang persegi, penampang ini dapat mengurangi berat sendiri cukup signifikan, sehingga beban yang bekerja pada beton bertulang dapat diperkecil tanpa mengurangi kekuatannya.

Beton bertulang dengan bentuk penampang I pada pelaksanaannya tidak sederhana atau cukup rumit dilihat dari segi pemasangan dan pengerjaan sengkang dan bekestingnya. Kerumitan ini dapat diatasi dengan penampang persegi berlubang memanjang yang ekuivalen dengan penampang I. Diharapkan penampang persegi berlubang ekuivalen dengan penampang

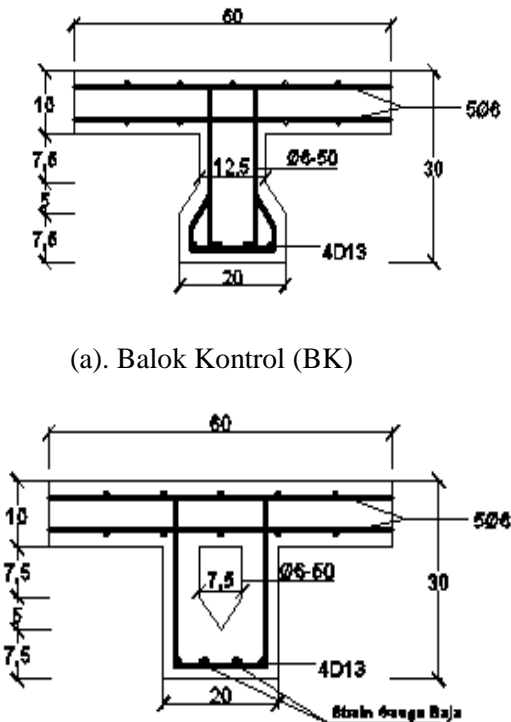
I, berdasarkan dimensi dan kekuatan nominalnya.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis balok beton bertulang tampang T berlubang memanjang hasil eksperimen Amir (2010) dengan metode elemen hingga menggunakan *software ATENA Versi 2.1.10 dan GID* sebagai *Pre-Processor*. Analisis dilakukan terhadap model balok beton bertulang tampang T berlubang memanjang dan balok beton bertulang tampang I.

Amir (2010) melakukan pengujian eksperimental mengenai perilaku lentur pada keadaan layan dan ultimit balok beton bertulang berlubang. Benda uji terdiri 2 jenis, yaitu 1 buah balok kontrol (BK) dan 3 buah balok berlubang (BB) dengan ukuran tinggi 300 mm, lebar 200 mm dan panjang 3500 mm.

Hasil analisis dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas baik BK maupun BB dari segi kekuatan lentur tidak jauh berbeda,

secara berturut-turut BB1 2,03%, BB2 2,49% dan BB3 3,96% terhadap BK. Kekakuan lentur hasil eksperimen berturut-turut mengalami penurunan sebagai berikut BB1 -62,88 %; BB2 -63,58 %, dan BB3 -22,70 % terhadap BK, sedangkan daktilitas berturut-turut juga mengalami penurunan sebagai berikut BB1 -50,106 %; BB2 -46,398 %; BB3 -58,543 % terhadap BK. Untuk pola retak BK maupun BB dimulai di daerah tengah bentang dan pada beban maksimum pola retak saat runtuh mengalami kegagalan lentur.

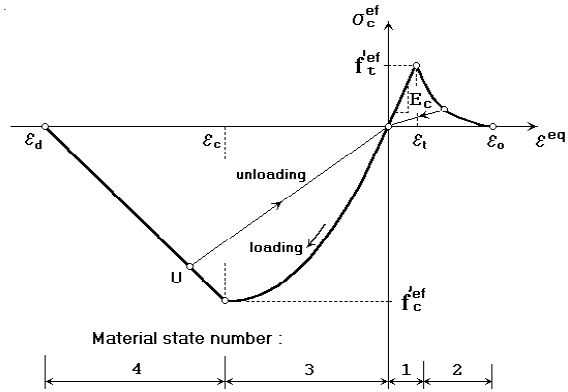


GAMBAR 1. Dimensi penampang balok eksperimen (Amir, 2010)

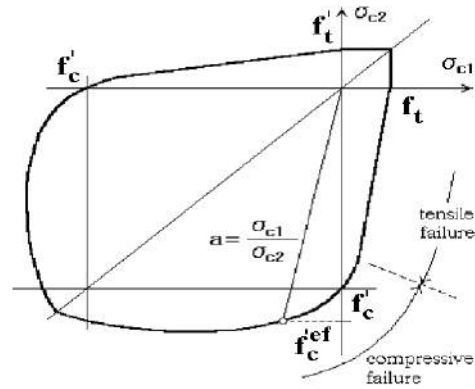
Pemodelan Konstitutif pada Beton Bertulang

Beton merupakan material yang sangat heterogen sehingga bersifat sangat nonlinear. Dasar-dasar model konstitutif beton dalam ATENA menggunakan konsep *smearred crack* dan pendekatan kerusakan (*fracture mechanics*). Reaksi tegangannya berdasarkan konsep kerusakan dengan *uniaxial stress-strain law*. Hukum ini menjelaskan kerusakan beton akibat pembebanan *monotonic* yang ditunjukkan pada Gambar 2. Tegangan puncak pada perilaku uniaksial f_t^{ef} dan f_c^{ef}

ditentukan berdasarkan *biaxial failure surface* yang ditunjukkan dalam Gambar 3 (Kupfer et al., 1969 dalam Cervenka, 2007).

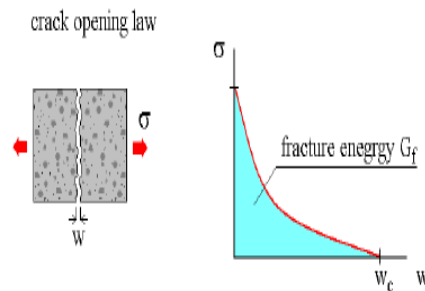


GAMBAR 2. Hukum regangan dan tegangan uniaxial untuk beton (Kupfer et al., 1969 dalam Cervenka, 2007)



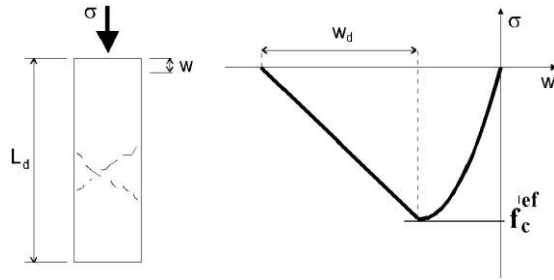
GAMBAR 3. Fungsi kegagalan biaxial untuk beton (Kupfer et al., 1969 dalam Cervenka, 2007)

Fictitious crack model digunakan dalam perilaku tarik beton berdasarkan *crack-opening law* dan *fracture energi* yang dikombinasikan dengan *crack band*. Pada program ATENA, *crack opening law* yang terlihat pada Gambar 4 menggunakan fungsi eksponensial yang diambil berdasarkan eksperimen Hordijk (1991).



GAMBAR 4. *Stress-crack opening law* menurut Hordijk (1991, dalam Cervenka, 2007)

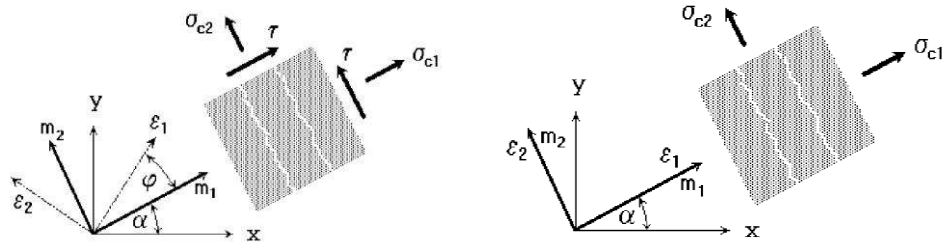
Untuk kondisi tekan setelah tegangan puncak (*compression after peak stress*) menggunakan *fictitious compression model* sebagai asumsi dasar yang diambil berdasarkan eksperimen Van Mier (1986, dalam Cervenka, 2007). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5, bahwa keruntuhan tekan terlokalisasi pada bidang yang tegak lurus terhadap arah tegangan utama.



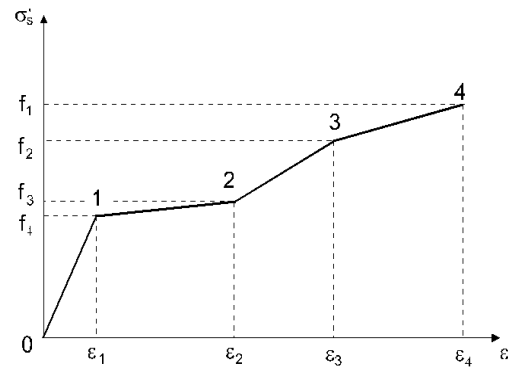
GAMBAR 5. Softening displacement law pada kondisi tekan (Cervenka, 2007)

Dua model retak dikenal dalam program ATENA yaitu *fixed crack* dan *rotated crack*. Pada *fixed crack* (Gambar 6), arah retak identik dengan arah regangan utama dan berubah jika arah regangan berubah.

Di dalam ATENA model hubungan tegangan-regangan untuk tulangan baja dengan *multi-line law* ditunjukkan pada Gambar 7.



GAMBAR 6. Fixed Crack Model dan Rotated Crack Model (Cervenka, 2007)



GAMBAR 7. Hukum tegangan regangan multilinier untuk tulangan. (Cervenka, 2007)

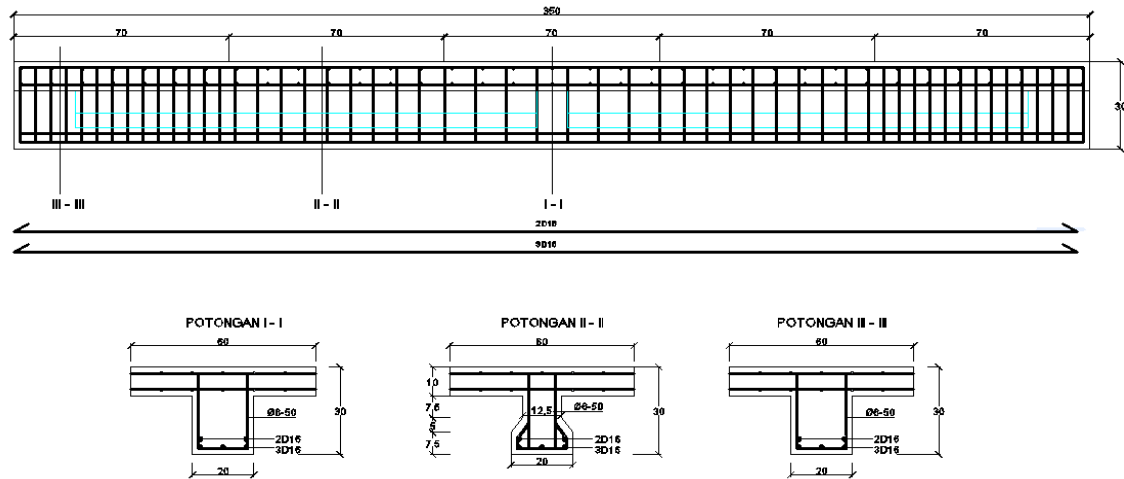
METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dimodelkan 2 jenis balok BK dan BB untuk meninjau perilaku lentur dari balok tersebut. Benda uji yang digunakan berupa balok beton bertulang yang berukuran sesuai dengan yang ditunjukkan dalam Gambar 8 dan Gambar 9. Tumpuan balok adalah sendi dan rol dengan pembebanan berupa beban terpusat manatonic yang diberikan secara bertahap sebesar 1 KN yang dilimpahkan pada dua titik hingga mencapai beban ultimitnya. Spesifikasi benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

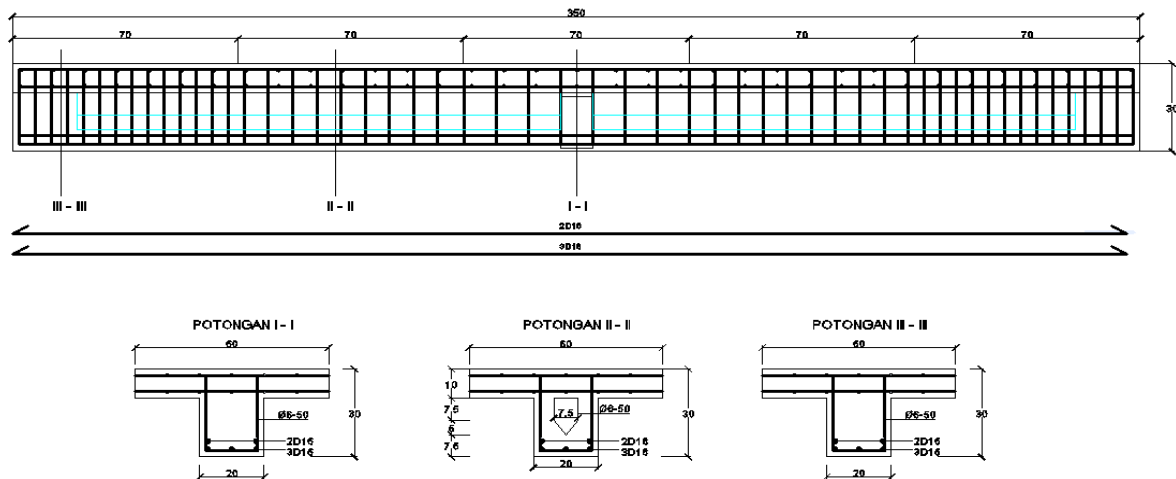
TABEL 1. Spesifikasi benda uji

Kode	Jumlah	Panjang (mm)	Lflens (mm)	L web (mm)		Tinggi (mm)		Tul.Utama		Tul. Sengkang
				Bersih	Kotor	Balok	Lubang	Atas	Bawah	
BK	1	3500	600	125	200	300	125	10D6	2D16-3D16	P6-50
BB	3	3500	600	125	200	300	125	10D6	2D16-3D16	P6-50

Keterangan : BK : Balok kontrol
BB : Balok uji dengan perlakuan terjadi keruntuhan lentur



GAMBAR 8. Penampang balok I sebagai balok kontrol

GAMBAR 9. Penampang balok T berlubang (*hollow*) sebagai balok uji

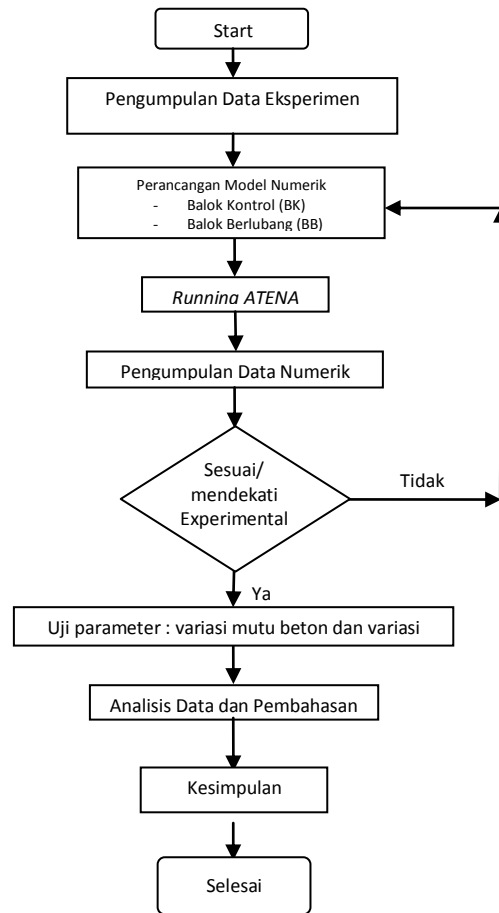
Pemodelan

Pada pemodelan elemen hingga non linier ini hanya dibuat 2 buah model yang mewakili sebagai pembanding, yaitu sebuah model balok kontrol (BK) dan sebuah balok berlubang (BB). Pemodelan elemen hingga dilakukan secara *Graphical User Interface* (GUI) dengan bantuan program GID, yang dapat berinteraksi dengan program ATENA. Dalam hal ini program GID dipakai untuk melakukan gambar geometri, input material, kondisi batas (*boundary condition*) dan *mesh* elemen hingga untuk analisis nonlinier tiga dimensi. Input data yang dihasilkan GID selanjutnya akan diproses oleh ATENAWin. Model elemen hingga non linier ini menggunakan pendekatan *smeared cracking model* dengan model solid 3 dimensi (3D). Selanjutnya hasil elemen hingga dibandingkan dengan eksperimen Amir (2010).

Input material beton dalam penelitian ini dimodelkan dengan *reinforced concrete* dengan *Material Prototype CC3DnonLinCementitious*. Secara umum, material beton yang dimodelkan pada penelitian ini menggunakan kuat tekan beton sebesar 33,786 MPa yang seragam di seluruh balok. Khusus untuk uji parameter mutu dipakai mutu beton dengan $f_c' = 20$ MPa dan $f_c' = 50$ MPa, yaitu berada di bawah dan di atas benda uji eksperimen.

Tulangan dimodelkan menggunakan *linier element CCIsoTuss(xx_x)*. Jenis material yang dipilih dari ATENA adalah *CCReinforcement*. Semua tulangan digambarkan secara *discrete*.

Meshing untuk balok BK menghasilkan 2888 elemen dan balok BB menghasilkan 2868 elemen (Gambar 11 dan Gambar 12).



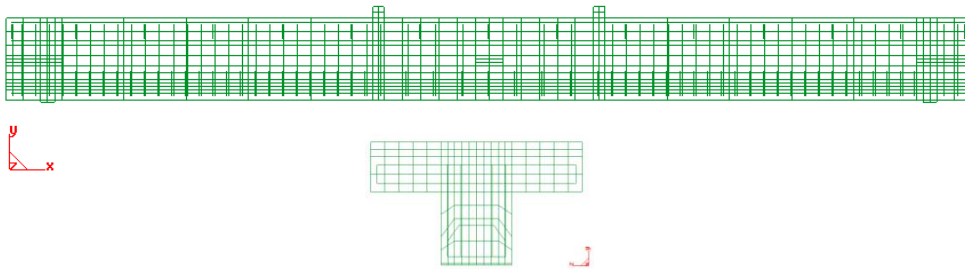
GAMBAR 10. Bagan alir penelitian

TABEL 2. Data material beton

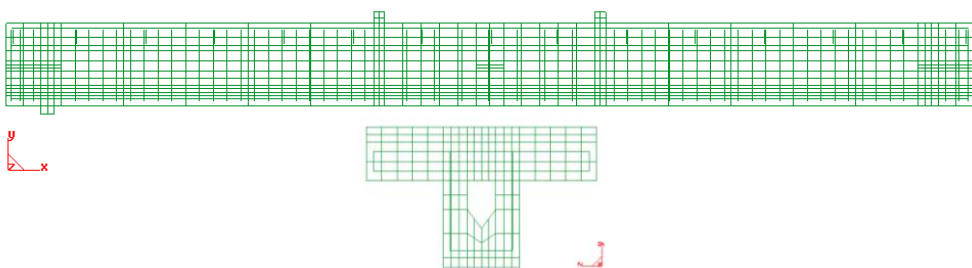
Jenis Parameter Beton dalam S-BETA Material	Input Material balok		
	BK BB	BK BB	BK BB
Modulus Elastisitas (Es)	27319,09113	21019,03899	33234,01872
Poisson Rasio (ν)	0,2	0,2	0,2
Kuat tarik beton (f_t)	4,068800806	3,130495168	4,949747468
Kuat tekan beton (f_c') MPa	-33,786	-20	-50
Fracture Energy (GF)	0,00010172	7,82624E-05	0,000123744
Fixed Crack	0,7	0,7	0,7
Plastic Strain (ϵ_{cp})	-0,002473435	-0,001903037	-0,003008965
f_{c0} (MPa)	-22,524	-13,33333333	-33,33333333
Critical comp disp wd	-0,0005	-0,0005	-0,0005
Excentricity-EXC	0,52	0,52	0,52
Dir. of pl flow-Beta	0	0	0
Density (Rho)	0,023	0,023	0,023
Thermal Expansion-Alpha	0,000012	0,000012	0,000012

TABEL 3. Data material baja tulangan

Parameter	Tulangan Pokok	Tulangan Sengkang dan Tulangan Bagi
	D 13 mm	Ø6 mm
Kode Material	BK BB	BK BB
Jenis Material ATENA	CCReinforcement	CCReinforcement
Modulus Elastisitas (MPa)	200.000	200.000
Tegangan Leleh (f_y) MPa	421,2511973	349,82
ε_2	0,02	0,04005
f_2 MPa	461,8161274	357,03
ε_3	0,06	0,07005
f_3 MPa	567,9090215	420,14
ε_4	0,10	0,11005
f_4 MPa	605,3535724	452,60
ε_5	0,12	0,17005
f_5 MPa	614,7147101	476,04
Luasan (mm ²)	0,000120763	0,0000273



GAMBAR 11. Meshing balok kontrol (BK)

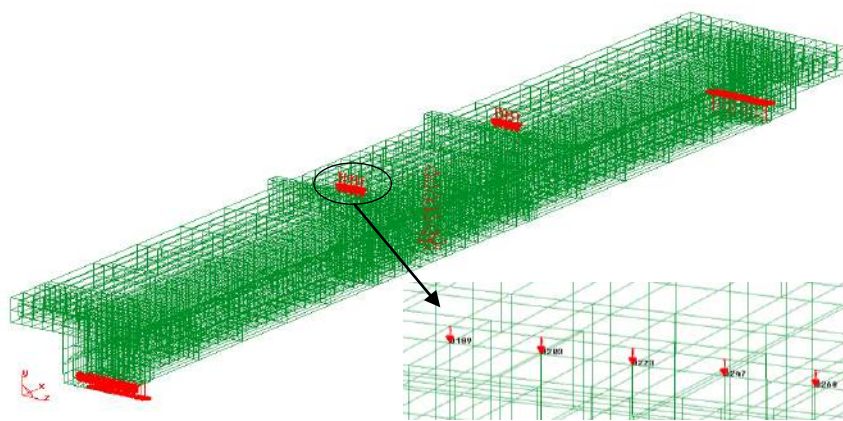


GAMBAR 12. Meshing balok berlubang (BB)

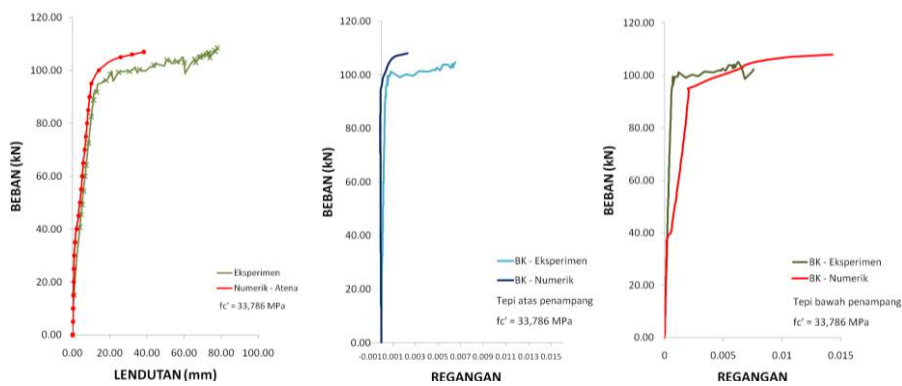
Kondisi batas pada tumpuan sendi menahan arah pergerakan translasi arah sumbu x dan sumbu y, sedang sumbu z bebas. Pada tumpuan rol arah pergerakan translasi yang ditahan hanya arah y, arah x dan z bebas.

Agar diperoleh hasil yang konvergen maka dalam memodelkan benda uji tersebut,

ditempatkan beberapa *monitor point* yang berfungsi untuk memonitor *displacement* yang ingin diketahui. Pemasangan *monitor point* diletakkan pada sepanjang node tengah bentang dan tepat pada sumbu y di titik berat penampang.



GAMBAR 13. Pembebanan, kondisi batas dan monitor



GAMBAR 14. Perbandingan hubungan beban-lendutan dan beban-regangan hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik balok kontrol.

PEMBAHASAN

Analisis Balok Kontrol (BK)

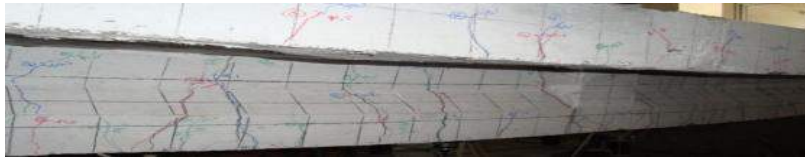
Dari Gambar 14 hasil numerik dibandingkan dengan hasil dari eksperimen Amir (2010). Beban ultimit dari hasil numerik adalah 107 KN (98,53% hasil eksperimen) dengan

lendutan sebesar 38,27 mm (49,19% hasil eksperimen). Beban ultimit dari hasil eksperimen Amir (2010) didapat sebesar 108,6 KN dengan lendutan sebesar 77,80 mm (disajikan pada Tabel 4).

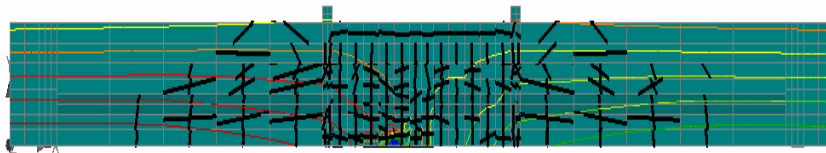
Gambar 15 dan Gambar 16 memperlihatkan pola retak lentur yang terjadi pada hasil numerik walaupun tidak sama bentuk pola retaknya dengan hasil eksperimen.

TABEL 4. Perbandingan hasil beban-lendutan dan beban regangan antara eksperimen Amir (2010) dan numerik

Hasil	Retak awal		Runtuh		Ket.
	Beban (KN)	Lendutan (mm)	Beban (KN)	Lendutan (mm)	
Numerik	29	0,79	107	38,27	-
Eksperimen	16,5	0,65	108,6	77,797	-



GAMBAR 15. Pola retak balok kontrol (BK) hasil eksperimen Amir (2010)



GAMBAR 16. Pola retak balok kontrol (BK) hasil numerik

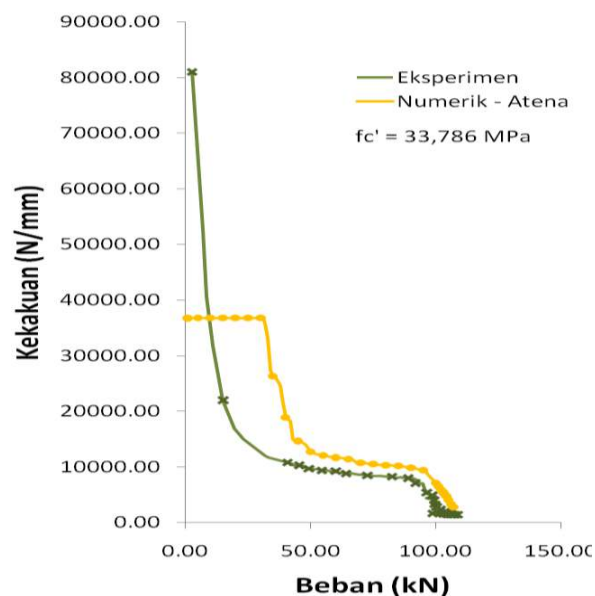
TABEL 5. Perbandingan retak hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

Hasil	Retak awal		Retak Akhir		Keterangan
	Lebar retak (mm)	Beban (KN)	Lebar retak (mm)	Beban (KN)	
Numerik	0,00003746	29	1,625	107	-
Eksperimen	0,08	16,5	2,1	108,6	-

Gambar 17 menunjukkan perbedaan hasil perhitungan numerik dengan hasil eksperimen. Pada tahap awal sudah terjadi penurunan kekakuan pada hasil eksperimen yang disebabkan oleh interlock antar material pembentuk beton itu sendiri dan rongga akibat tidak sempurnanya pelaksanaan pengecoran. Sedangkan pada hasil numerik (garis mendatar) belum terjadi penurunan kekakuan karena secara teoritis material beton dianggap

homogen dan memang belum terjadi retak. Pada tahap berikutnya nilai kekakuan yang terjadi memiliki bentuk yang mirip. Secara numerik nilai kekakuannya melebihi nilai hasil eksperimen. Hasilnya disajikan pada Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8.

Hubungan beban-lendutan dan beban-regangan balok kontrol (BK) untuk mutu beton bervariasi ditunjukkan pada Gambar 18. Hasilnya disajikan dalam Tabel 9.



GAMBAR 17. Perbandingan kekakuan hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik balok kontrol (BK)

TABEL 6. Perbandingan kekakuan pada kondisi retak awal hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

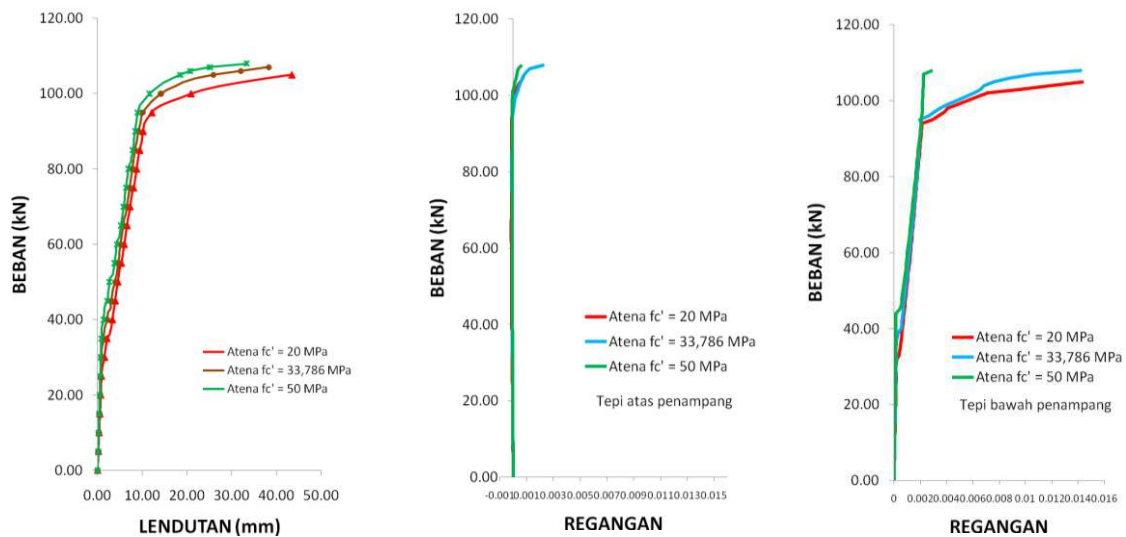
Hasil	Beban (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/ mm)	Keterangan
Numerik	29.000	0,79	36.778.694	+ 145,09 %
Eksperimen	16.500	0,65	25.384,615	-

TABEL 7. Perbandingan kekakuan pada kondisi leleh hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

Hasil	Beban (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/ mm)	Keterangan
Numerik	95.000	10,09	9.415,26	+ 131,69 %
Eksperimen	98.900	13,833	7.149,4	-

TABEL 8. Nilai daktilitas balok BK

Hasil	δy (mm)	δu (mm)	Daktilitas $u = \delta u / \delta y$	Keterangan
Numerik	10,09	38,27	3,793	-19,28 %
Eksperimen	13,833	65,004	4,699	-



GAMBAR 18. Hubungan beban-lendutan dan beban-regangan balok kontrol (BK) untuk mutu beton bervariasi.

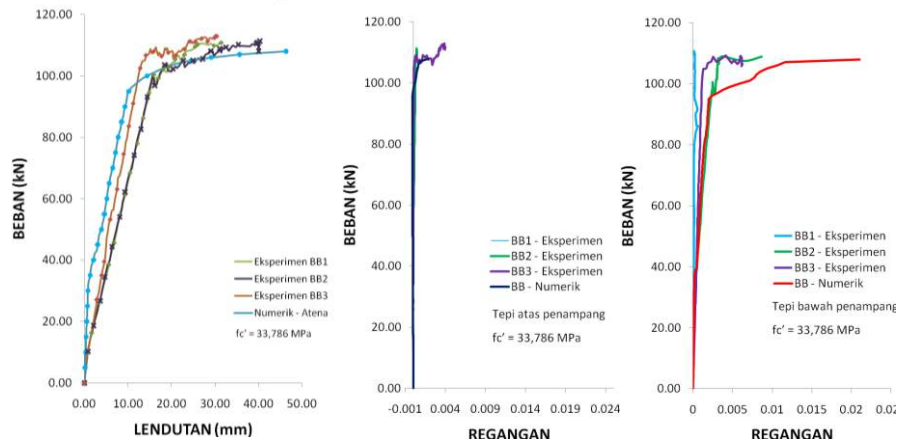
TABEL 9. Rangkuman hasil dari uji parameter variasi mutu beton balok kontrol

Mutu Beton (fc')	Retak awal			Leleh (Yield)			Runtuh (ultimate)			Daktilitas	
	Beban (KN)	Lebar retak (mm)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/ mm)	Beban (KN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/ mm)	Beban (KN)	Lebar retak (mm)		Lendutan (mm)
20 MPa	23	$5,780 \cdot 10^{-6}$	0,79	29.113,92	94	11,42	8.231,17	105	1,562	43,44	3,803
33,786 MPa	29	$3,746 \cdot 10^{-5}$	0,79	36.778.694	95	10,09	9.415,26	107	1,625	38,27	3,793
50 MPa	34	$1,543 \cdot 10^{-5}$	0,78	43.589,74	95	8,94	10.626,40	108	2,200	33,343	3,730

Analisis Balok Berlubang (BB)

Dari Gambar 19 beban ultimit dari hasil numerik adalah 108 KN dengan lendutan

sebesar 46,31 mm, sedangkan beban ultimit hasil eksperimen Amir (2010) dapat dilihat pada Tabel 10.



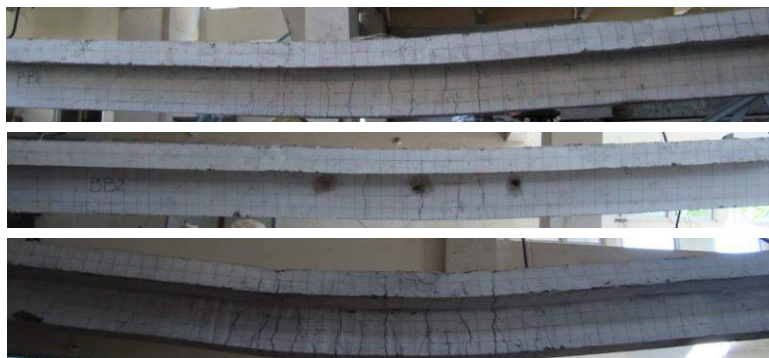
GAMBAR 19. Perbandingan hubungan beban-lendutan dan beban-regangan hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik balok berlubang (BB).

TABEL 10. Perbandingan hasil beban-lendutan antara eksperimen Amir (2010) dan numerik

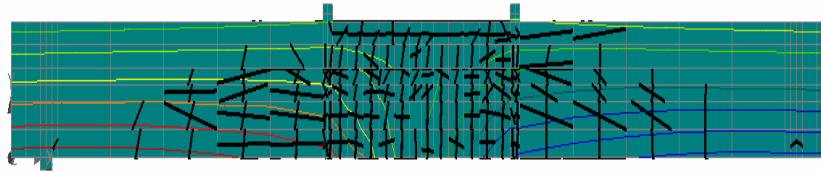
Hasil	Retak awal		Runtuh		Keterangan
	Beban (KN)	Lendutan (mm)	Beban (KN)	Lendutan (mm)	
Eksperimen BB1	16,9	1,793	110,8	31,4	-
Eksperimen BB2	15,9	1,720	111,3	40,307	-
Eksperimen BB3	15,6	0,795	112,9	30,48	-
Numerik	31	0,84	108	46,31	-

TABEL 11. Perbandingan retak hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

Hasil	Retak awal		Retak Akhir		Keterangan
	Lebar retak (mm)	Beban (KN)	Lebar retak (mm)	Beban (KN)	
Eksperimen BB1	0,03	16,9	2,5	110,8	-
Eksperimen BB2	0,04	15,9	3,2	111,3	-
Eksperimen BB3	0,02	15,6	4,1	112,9	-
Numerik	$2,681 \cdot 10^{-4}$	31	1,771	108	-



GAMBAR 20. Pola retak balok berlubang (BB) hasil eksperimen Amir (2010) berurutan BB1, BB2 dan BB3



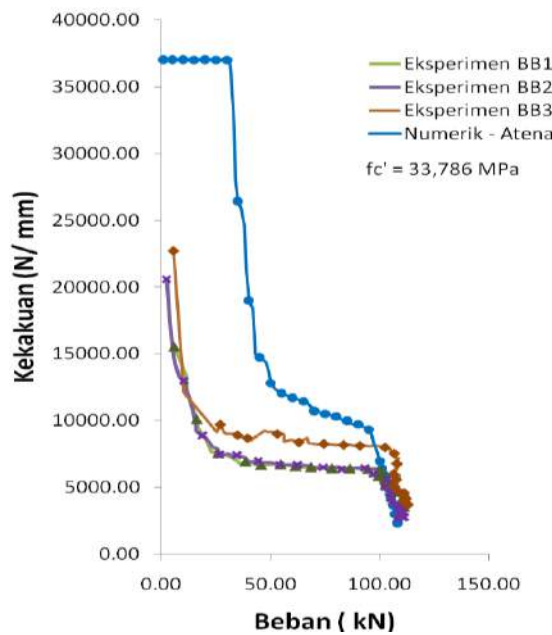
GAMBAR 21. Pola retak balok berlubang (BB) hasil numerik

Gambar 20 dan Gambar 21 memperlihatkan pola retak lentur yang terjadi pada hasil numerik walaupun tidak sama bentuk pola retaknya dengan hasil eksperimen.

Gambar 22 menunjukkan perbedaan hasil perhitungan numerik dengan hasil eksperimen, pada tahap awal sudah terjadi penurunan kekakuan pada hasil eksperimen yang disebabkan oleh interlock antar material pembentuk beton itu sendiri dan rongga akibat tidak sempurnanya pelaksanaan pengecoran. Sedangkan pada hasil numerik (garis mendatar) belum terjadi penurunan kekakuan

karena secara teoritis material beton dianggap homogen dan memang belum terjadi retak. Pada tahap berikutnya nilai kekakuan yang terjadi memiliki bentuk yang mirip, secara numerik nilai kekakuannya melebihi nilai hasil eksperimen. Hasilnya disajikan pada Tabel 12, Tabel 13 dan Tabel 14.

Hubungan balok BB dengan variasi mutu beton dapat dilihat pada Gambar 23. Hasilnya disajikan dalam Tabel 15. Hubungan balok BB dengan variasi ukuran lubang dapat dilihat pada Gambar 24. Hasilnya disajikan dalam Tabel 16.



GAMBAR 22. Perbandingan kekakuan hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik balok berlubang (BB)

TABEL 12. Perbandingan kekakuan pada kondisi retak awal hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

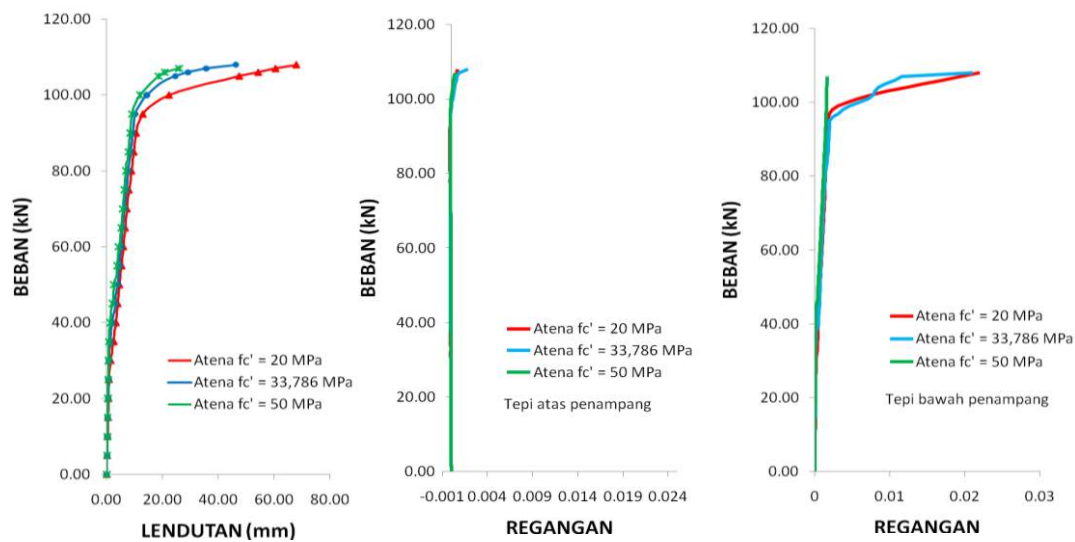
Hasil	Beban (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/ mm)	Keterangan
Eksperimen BB1	16.900	1,793	9.423,792	-
Eksperimen BB2	15.900	1,72	9.244,186	-
Eksperimen BB3	15.600	0,795	19.622,642	-
Numerik	31.000	0,84	36.904,76	-

TABEL 13. Perbandingan kekakuan pada kondisi leleh hasil eksperimen Amir (2010) dan numerik

Hasil	Beban (N)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Keterangan
Eksperimen BB1	98.200	15,487	6.340,94	-
Eksperimen BB2	98.800	15,47	6.386,55	-
Eksperimen BB3	102.500	12,823	7.993,24	-
Numerik	94.000	9,91	9.485,37	-

TABEL 14. Daktilitas benda uji balok berlubang (BB)

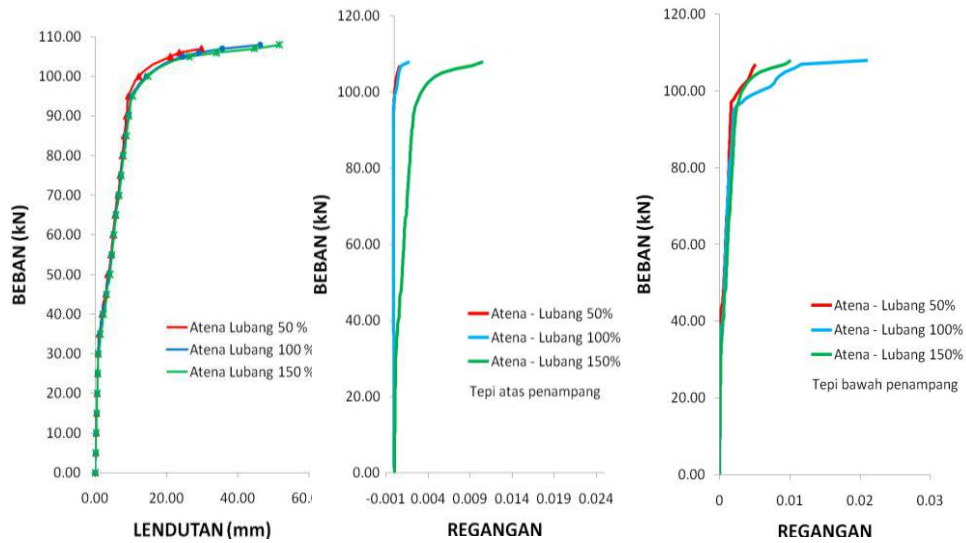
Hasil	$\delta\gamma$ (mm)	δu (mm)	Daktilitas $u = \delta u / \delta\gamma$	Keterangan
Eksperimen BB1	15,487	32,433	2,094	
Eksperimen BB2	15,47	34,843	2,252	
Eksperimen BB3	12,823	26,949	2,102	
Numerik	9,91	46,31	4,673	



GAMBAR 23. Hubungan beban-lendutan dan beban-regangan balok berlubang untuk mutu beton bervariasi

TABEL 15. Rangkuman hasil dari uji parameter variasi mutu beton balok berlubang (BB)

Mutu Beton (f_c')	Retak awal			Leleh (Yield)			Runtuh (ultimate)			Daktilitas	
	Be-ban (KN)	Lebar retak (mm)	Lendutan (mm)	Be-ban (KN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Be-ban (KN)	Lebar retak (mm)	Lendutan (mm)		
20 MPa	25	$3,246 \cdot 10^{-4}$	0,85	29.411,76	94	9,91	9.485,37	105	2,67	68,07	6,869
33,786 MPa	31	$2,681 \cdot 10^{-4}$	0,84	36.904,76	94	9,91	9.485,37	108	1,771	46,31	4,673
50 MPa	36	$1,190 \cdot 10^{-4}$	0,82	43.902,44	94	8,99	10.456,06	107	1,007	68,07	2,892



GAMBAR 24. Hubungan beban-lendutan dan beban-regangan balok berlubang untuk ukuran lubang penampang beton bervariasi

TABEL 16. Rangkuman hasil dari uji parameter variasi ukuran lubang penampang beton balok berlubang (BB)

Ukuran lubang penampang beton	Retak awal			Leleh (Yield)			Runtuh (ultimate)			Daktilitas	
	Beban (KN)	Lebar retak (mm)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Beban (KN)	Lendutan (mm)	Kekakuan (N/mm)	Beban (KN)	Lebar retak (mm)		Lendutan (mm)
50 %	31	$1,333.10^{-7}$	0,82	37.804,88	96	9,75	9.846,15	107	1,617	29,80	3,056
100 %	31	$2,681.10^{-4}$	0,84	36.904,76	94	9,91	9.485,37	108	1,771	46,31	4,673
150 %	29	$5,697.10^{-7}$	0,82	35.365,85	93	9,93	9.365,56	108	3,103	51,69	5,205

KESIMPULAN

Dari hasil analisis lentur balok penampang-T berlubang memanjang dengan menggunakan program ATENA dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Analisis dengan program ATENA untuk balok berlubang (BB) dan balok kontrol (BK) memberikan hasil hubungan beban-lendutan yang hampir sama baik. Kekakuan model numerik hasil analisis ATENA lebih kaku dari eksperimen Amir.
2. Dari kurva hubungan beban-lendutan, beban ultimit model numerik balok BB 96,71 % dari model eksperimen, sedangkan lendutan 135,96 % dari model eksperimen.
3. Pada pemodelan yang bersifat parametrik untuk balok kontrol (BK) terhadap mutu beton yang bervariasi, menunjukkan bahwa semakin tinggi mutu beton yang dipakai semakin getas.
4. Perbandingan hasil analisis numerik dengan hasil uji eksperimen untuk balok berlubang (BB), hasil numerik menunjukkan pada daerah elastis berada di atas dari ketiga benda uji eksperimen, tetapi pada daerah *hardening* hasil numerik menunjukkan berada diantara ketiga benda uji eksperimen.
5. Pemodelan yang bersifat parametrik untuk balok berlubang (BB) terhadap mutu beton yang bervariasi menunjukkan hasil yang sama seperti balok kontrol (BK), yaitu semakin tinggi mutu beton yang dipakai semakin getas.
6. Pemodelan yang bersifat parametrik untuk balok berlubang (BB) terhadap ukuran lubang yang ada pada penampang balok beton yang bervariasi menunjukkan hasil kebalikan terhadap variasi mutu beton yaitu

semakin luas lubang yang dipakai semakin daktail.

7. Baik balok BK maupun balok BB menunjukkan pola keruntuhan yang dihasilkan adalah keruntuhan lentur serupa dengan keruntuhan eksperimen.

UCAPAN TERIMA KASIH

Diucapkan terima kasih yang tulus kepada semua pihak yang telah membimbing, mengajarkan dan berdiskusi dalam penggunaan program ATENA, serta atas saran dan masukan yang diberikan selama penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Amir, M.Y. (2010). *Perilaku Lentur Pada Keadaan Layan dan Batas Balok beton Bertulang Berlubang Memanjang*, Tesis, UGM, Yogyakarta.
- Cervenka J, Bazant P. Z, Wierer M. (2004). Equivalent Localization element for Crack Band Approach to Mesh – Sensitivity in Microplane Model, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 62, pp. 700 – 726.
- Cervenka V, Jendele L, Cervenka J. (2007). *Atena Theory.*, Praha, Czech Republic.

PENULIS:

Praganif Sukarno✉

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. Dr. GA Siwabesi, Kampus UI Depok 16425.

✉Email: sipil_pnj@yahoo.com

Muslikh, Djoko Sulistyono

Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika no. 2, Yogyakarta.