

BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE L BEAMS WITH RECTANGLE HOLE DUE TO LOAD STATIC

PERILAKU BALOK L BETON BERTULANG DENGAN LUBANG PERSEGI PANJANG AKIBAT BEBAN STATIK

Mahmud Kori Effendi dan Endah Kanti Pangestuti

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang (UNNES)
Gedung E4, Kampus Sekaran Gunungpati Semarang 50229, Telp. (024) 8508102/0818262255.
E-mail: pak_kori@yahoo.com ; endahkp@gmail.com

ABSTRACT

Making openings at beam body recently is conducted by consultant for placing the AC cables, internet cables and sanitation pipe. Placing these utilities in openings at body is expected lessen high of the building and its result have high effect to reduce selfweight structure so that the building becomes more economic. Investigation on behavior of openings-beam reinforced concrete with the variation type of sided is conducted experimentally and numerical analytically using GID-ATENA software. Used specimens were reinforced concrete L-shaped beam designed with ultimate load 2600 N and having tension reinforcement 2D13 with roll and hinge support. Beam had 2 m span, 150 mm web width, 250 mm high, effective 317 mm width and slab 100 mm thick. To differentiate behavior of openings, a specimen without openings (BLK01), a specimen with openings 100 mm x 100 mm (BLKLB01), a specimen with openings 200 mm x 100 mm (BLKLB02) were made. An opening was 150 mm from right support. Pure moment was done with load 650 mm from support. To compare experiment, 3D model GID-ATENA was analyzed. The material model of concrete was CCCOMBINEDMATERIAL and CC1-DELASTLSOTROPIC for reinforcement. This analysis used geometric and material non linear analyses. Result of GID-ATENA analysis indicate that the first crack load were less than 42-62 %, ultimate load were less than 33-47%, mid-span displacement at first crack load were less than 55-86%, and mid-span displacement at ultimate load were less than 45-70% compared to the experiment result. First crack pattern of BLK01 occurred in the mid-span while BLKLB01 and BLKLB02 occurred below the hole. Result of analysis GID-ATENA get the different result of its first crack pattern.

Keywords: openings-beam, L-shaped beam, GID-ATENA

ABSTRAK

Membuat bukaan di badan balok baru-baru ini dilakukan oleh konsultan untuk menempatkan kabel AC, kabel internet dan pipa sanitasi. Menempatkan utilitas ini pada bukaan di badan diharapkan mengurangi tinggi bangunan dan hasilnya berpengaruh tinggi untuk mengurangi berat sendiri struktur sehingga bangunan menjadi ekonomis. Pengamatan pada perilaku bukaan-balok beton bertulang dengan jenis variasi sisi dilakukan secara eksperimental analitis dan numerik menggunakan perangkat lunak GID-Atena. Spesimen yang digunakan adalah beton bertulang berbentuk balok L dirancang dengan beban ultimit 2600 N tulangan 2D13 dengan tumpuan sendi rol. Balok mempunyai panjang 2 m, lebar 150 mm, dan tinggi 250 mm, lebar efektif 317 mm dan tebal plat 100 mm. Untuk membedakan perilaku bukaan, dibuat spesimen tanpa bukaan (BLK01), spesimen dengan bukaan 100 mm x 100 mm (BLKLB01), spesimen dengan bukaan 200 mm x 100 mm (BLKLB02). Lubang berjarak 150 mm dari dukungan sendi. Beban lentur murni diberikan pada 650 mm dari dukungan. Untuk membandingkan percobaan, dilakukan dianalisis 3D Model GID-Atena. Model bahan beton adalah CCCOMBINEDMATERIAL dan CC1-DELASTLSOTROPIC untuk penulangan. Analisis ini digunakan geometri dan bahan analisis non linier. Hasil analisis dari GID-Atena menunjukkan bahwa beban retak pertama kurang dari 42-62%, beban ultimit kurang dari 33-47%, lendutan ditengah bentang pada beban retak pertama kurang dari 55-86%, dan lendutan ditengah bentang pada beban ultimit kurang dari 45-70% dibandingkan dengan hasil laboratorium. Pola retak Pertama BLK01 terjadi dalam tengah bentang sementara BLKLB01 dan BLKLB02 terjadi di bawah lubang. Hasil analisis GID-Atena diperoleh hasil yang berbeda dari pola retak pertama.

Kata-kata Kunci: balok L, GID-Atena, lubang balok

PENDAHULUAN

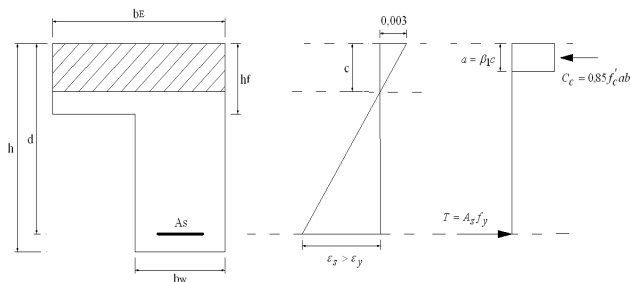
Penempatan lubang (openings) pada bagian badan beton bertulang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan pada tepi lubang, mengurangi kekakuan balok dan menyebabkan respon struktur menjadi lebih rumit. Pada bangunan, balok-balok mendukung beban mati dan hidup dari struktur lantai dan struktur lain di atasnya. Balok-balok tersebut terutama balok tepi sangat penting untuk dirancang dengan teliti dan detail. Sehingga dengan demikian, pengaruh pembuatan lubang (openings) terhadap kuat ultimit dan perilaku beban layan balok harus dipertimbangkan dengan baik dalam perancangan.

Banyak penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki perilaku balok beton bertulang dengan lubang akibat pembebanan statik (Barney et. al. 1977; Kennedy dan El-Laithy 1982; Kennedy dan Abdalla 1992). M.A. Mansur dan kawan-kawan juga telah melakukan banyak penelitian terhadap balok beton bertulang dengan lubang besar (M.A. Mansur, K.H. Tan dan S.L. Lee 1985; M.A. Mansur, L.M. Huang, K.H. Tan dan S.L. Lee 1992; K.H. Tan, M.A. Mansur 1996). Ujjianto, M. (2004) melakukan pene-

litian mengenai balok T beton bertulang dengan lubang segi empat akibat beban siklik.

Penelitian statik dengan metode fotoelastik dan elemen hingga yang dilakukan oleh Lopez dan Pool (1983), memperlihatkan bahwa lubang dengan bentuk ellips dan lingkaran menghasilkan konsentrasi tegangan yang lebih kecil, sementara lubang persegi empat menghasilkan konsentrasi tegangan dua kali lebih besar dari lubang. Silalahi (2008) menunjukkan bahwa kekuatan balok beton dengan lubang di daerah momen lentur murni bila dibandingkan dengan kekuatan teoritis balok utuh tidak jauh berbeda pada ukuran lubang dalam batas-batas tertentu.

Untuk mengetahui degradasi daktilitas dan kekakuan balok dengan adanya pembuatan lubang pada badan balok maka Darsono (2007) melakukan penelitian variasi penempatan lubang pada badan balok dengan jarak lubang dari tumpuan 150 mm dan 300 mm. Penelitian ini dengan memberikan beban siklik. Menurut SK SNI T-15-1991-03 desain balok T atau L bertulangan tunggal dapat diturunkan dengan menggunakan tegangan persegi ekuivalen seperti Gambar 1.



Gambar. 1 Distribusi Tegangan Persegi Penampang Balok

Berdasarkan gambar diatas maka :
Dengan mengasumsi besar nilai $a=h_f$, maka dihitung keseimbangan gaya – gaya dalam

$$C_c + C_s = T_s \quad (1)$$

$$C_c = 0,85 f'_c . a . b \quad (2)$$

$$T_s = A_s . f_y \quad (3)$$

$$M_n = C_c (d - a/2) \quad (4)$$

karena $M < M_u$, maka

$$k_{perlu} = \frac{M_u}{\phi b d^2} \quad (5)$$

$$k = f'_c \omega (1 - 0.59 \omega) \quad (6)$$

$$\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{\omega f'_c}{f_y} \quad (8)$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (9)$$

Jika $\rho = \frac{\omega f'_c}{f_y} < \rho_{min} = \frac{1.4}{f_y}$, maka dipakai

$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y}$ untuk menghitung tulangan tarik

$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \frac{600}{600 + f_y} \quad (10)$$

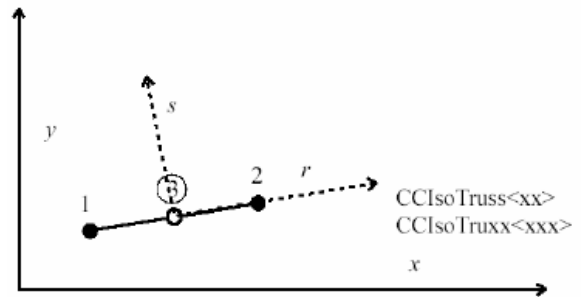
$$\rho_{maks} = 0.75 \rho_b < \rho \quad (11)$$

Analisis elemen hingga dipakai untuk membandingkan hasil eksperimen. Untuk perhitungan elemen hingga dipakai *software* demo GID-ATENA yang dibatasi 300 elemen. *Software* ini memfokuskan untuk analisis beton bertulang. Pada perhitungan elemen hingga ini untuk tulangan dipakai model truss 2D. Elemen *truss 2D* di dalam program GID-ATENA diberikan kode CCIsoTruss<xx_x>.

Pada Gambar 2, terdapat elemen isoparametrik yang diintegrasikan oleh integrasi Gauss pada titik integrasi 1 dan 2 untuk kasus interpolasi linier atau interpolasi kuadratik yakni untuk elemen dengan nodal elemen 2 atau 3.

Hipotesis yang dapat diambil dari uraian tinjauan pustaka di atas adalah sebagai berikut :

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah di atas maka dapat ditarik hipotesis bahwa perancangan balok berlubang dapat didekati dengan preancangan balok lurus tanpa mengurangi beban layan yang dapat ditahan oleh balok.



Gambar 2. Elemen Geometri CCIsoTruss<xx_x>

METODE PENELITIAN

Bahan

Benda uji berbentuk balok beton bertulang tampang L dengan ukuran tinggi 250 mm, lebar web 150 mm, lebar flens 167 mm, selimut beton 30 mm dan panjang 2000 mm. Besi tulangan yang digunakan mempunyai tegangan leleh 336 MPa dan 280 MPa dan mutu beton 28.29 MPa. Beton segar yang dipakai adalah beton adukan molen hasil *mix design* dengan mutu beton 30 MPa.

Alat

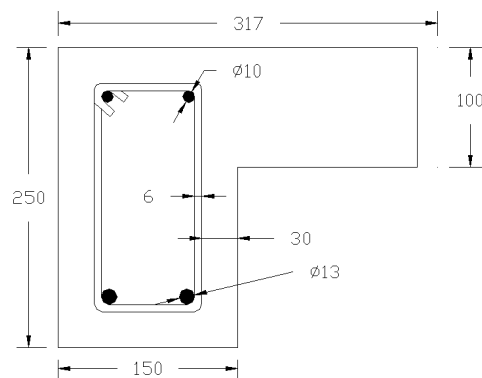
Alat yang digunakan sebagai berikut :

- Rangka baja di Laboratorium Bahan dan Struktur Teknik Sipil UNNES.
- Hydraulic jack*, untuk pembangkit beban statik pada saat pengujian lentur specimen balok beton.
- Dial gauge*, untuk mengukur lendutan yang terjadi pada model balok beton bertulang selama pembebanan berlangsung.

Benda Uji Eksperimen

Sebelum melakukan analisis numerik maka balok dirancang dengan mengacu kepada Peraturan SK-SNI T-15-1991-03. Pada perancangan balok pengaruh lubang tidak diperhitungkan, karena dalam peraturan tersebut dianggap bahwa balok adalah utuh tanpa lubang. Perancangan balok memakai beban titik ditengah bentang sebesar 2600 N.

Balok uji dibuat sebanyak 3 buah yaitu balok tanpa lubang (BLK01), balok dengan lubang 10x10 cm (BLKLB01), dan balok dengan lubang 10x20 cm (BLKLB02). Spesifikasi pengelompokan balok uji dapat di lihat pada Gambar. 3 dan Tabel 1.



Gambar 3. Dimensi dan posisi penulangan benda uji

Tabel 1. Spesifikasi benda uji

Kode	Panjang (mm)	Lebar badan (mm)	Tinggi (mm)	Lebar flange (mm)	Tulangan Pokok		Tulangan Senggang
					Atas	Bawah	
BLK 01	2000	150	250	317	2D13	2D10	$\phi 6$
BLKLB01	2000	150	250	317	2D13	2D10	$\phi 6$
BLKLB02	2000	150	250	317	2D13	2D10	$\phi 6$

Pelaksanaan Penelitian

1. Uji Tekan Silinder Beton dan Tarik Baja

Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan pada umur 28 hari, kemudian hasil kuat tekan beton digabungkan dengan hasil pengujian kuat leleh baja dipakai untuk menganalisis numerik balok beton sehingga dapat memperkirakan beban maksimum balok beton.

2. Pengujian Benda Uji

Model balok beton bertulang diuji dengan cara memberikan beban statik dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Model balok beton bertulang mempunyai tumpuan sendi - roll. Pembebanan dilakukan di dua titik dengan jarak 700 mm antar titik pembebanan dan sejauh 650 mm dari masing-masing tumpuan di kedua sisi. Untuk mengetahui pola retak yang terjadi pada model balok beton bertulang, permukaannya dilapisi cat putih dan diberi garis sesuai kontur pada GID-ATENA.

Pembebanan dilakukan dengan bantuan hydraulic jack yang mempunyai kapasitas 50 ton. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan akan dihentikan jika retak pada benda uji sudah merata. Setting alat dan pembebanan dari model balok beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 4. Tumpuan sendi dan rol di pengujian eksperimen dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 4. Setting up pengujian



Gambar 5. Tumpuan balok pada pengujian

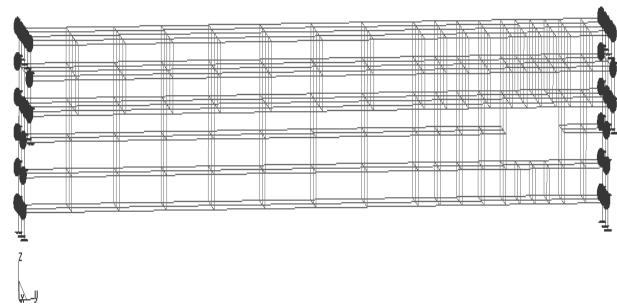
Pada analisis numerik ini maka balok dibagi menjadi elemen kecil-kecil. Software GID-ATENA yang dipakai dalam ana-

lisis adalah demo version, jadi hanya dibatasi 300 elemen. Pembagian elemen dapat dilihat pada Gambar 6.



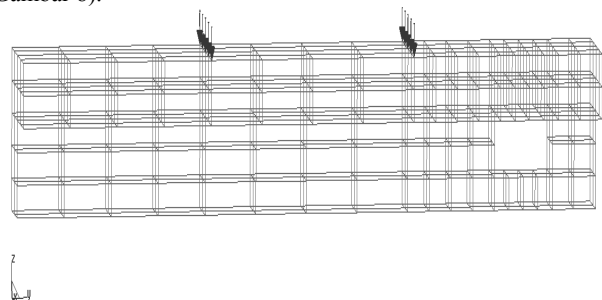
Gambar 6. Meshing balok

Pada percobaan di laboratorium balok ditumpu secara sederhana berupa sendi dan rol. Balok yang digunakan dalam penelitian adalah balok L. Untuk menyeimbangkan balok dari ketidakstabilan saat diuji maka dipasang klem agar balok tidak jatuh. Dalam pemodelan di GID-ATENA ini balok pada tumpuan bawah tidak boleh bergerak dalam arah x dan z, sedangkan untuk sisi samping dan atas (Gambar 7).



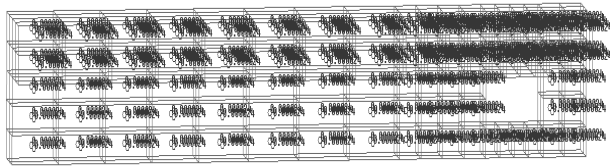
Gambar 7. Pemodelan Tumpuan pada Balok

Beban titik yang bekerja pada balok adalah beban yang menyebabkan balok berperilaku sebagai balok lentur murni. Pada penelitian ini beban titik terletak 65 cm dari tumpuan kanan dan kiri. Pada analisis ini balok pertama kali diberi beban 100 kg=1000 N dan beban ini terbagi ke 10 nodal sehingga setiap nodal mempunyai besar 100 N. Arah beban ini kearah sumbu -Z (Gambar 8).



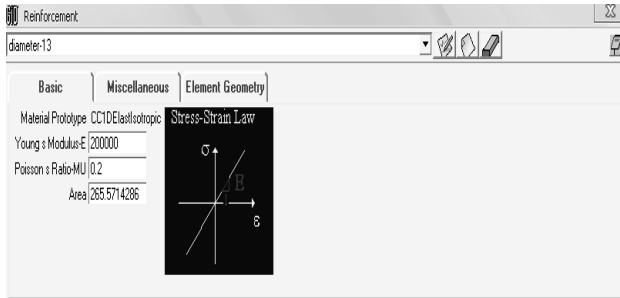
Gambar 8. Pemodelan Beban Titik pada Balok

Berat sendiri balok beton bertulang adalah 0.000024 N/mm^3 . Berat sendiri ini mempunyai arah ke sumbu -Z.

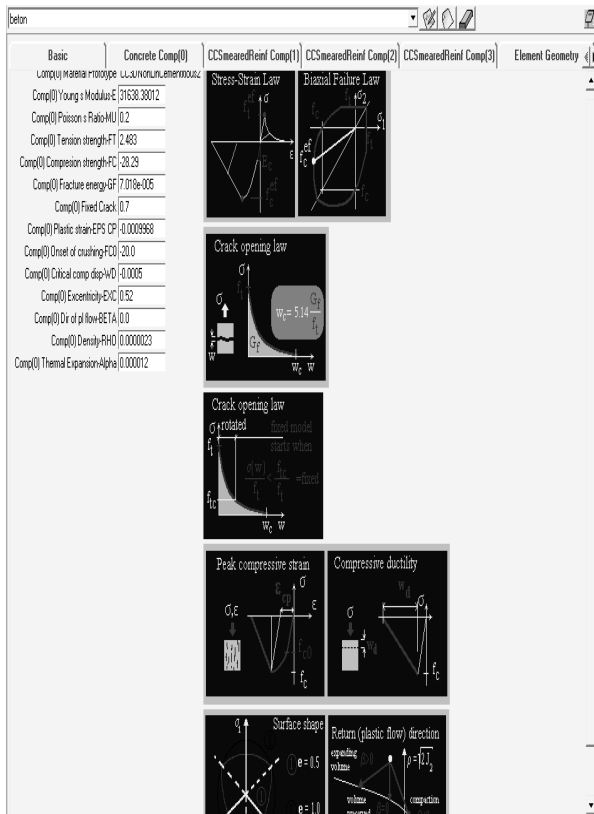


Gambar 9. Pemodelan Berat Sendiri pada Balok

Material yang digunakan dalam analisis GID-ATENA untuk memodelkan material baja dapat dilihat pada Gambar 10 dan untuk memodelkan material beton dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Sifat material baja yang dipakai dalam analisis ATENA



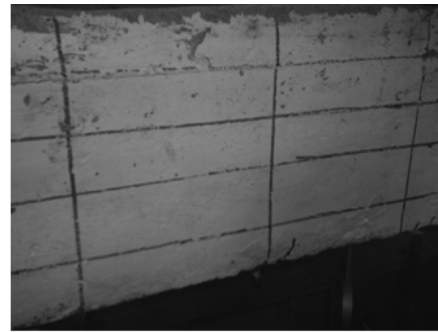
Gambar 11. Sifat material beton yang dipakai dalam analisis ATENA

HASIL PENELITIAN

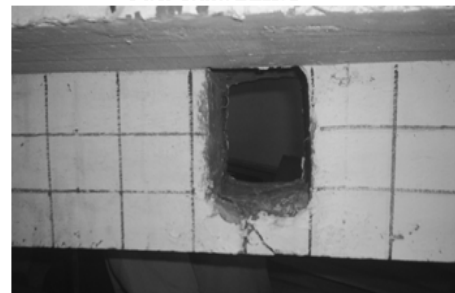
Perilaku Benda Uji Eksperimen

Pengujian di laboratorium dilakukan tes pertama kali adalah balok BLK01. Setelah itu balok BLKLB01 kemudian balok BLKLB02. Berdasarkan hasil eksperimen di lab. Bahan & Struktur UNNES, maka didapatkan data beban dan lendutan. Gambar pola retak pertama balok terlihat pada Gambar 12.

Berdasarkan pengujian di laboratorium terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang (BLK01) terjadi di tengah bentang. Sedangkan untuk balok dengan lubang (BLKLB01 dan BLKLB02) retak, retak pertama terjadi di bawah lubang. Dari pola retak pertama yang terjadi dapat disimpulkan bahwa retak pertama balok terjadi karena lentur disebabkan oleh pola retak yang tegak lurus batang.



First Crack BLK01

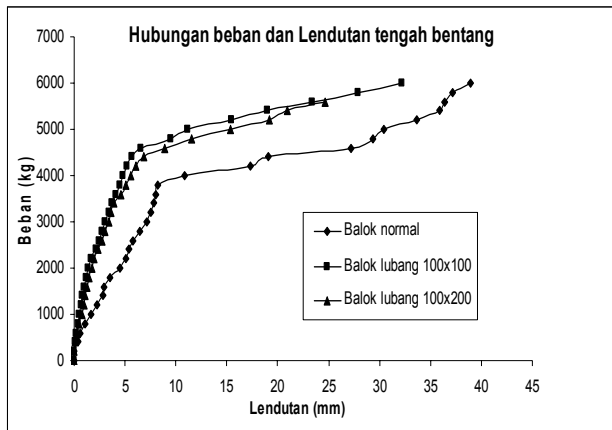


First Crack BLKLB01



First Crack BLKLB02

Gambar 12. Pola First Crack Balok (Eksperimen)



Gambar 13. Diagram Hubungan Beban-Lendutan pada Tengah Bentang Balok (Eksperimen)

Tabel 2. Beban dan Lendutan Balok (Eksperimen)

Benda Uji	Retak pertama		Ultimit	
	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)
BLK01	1600	2.95	6000	38.93
BLKLB01	1800	1.22	6000	32.2
BLKLB02	1200	1	5600	24.7

Berdasarkan Gambar.13 dan Tabel. 2 terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 1600 kg dan lendutan yang terjadi 2.95 mm. Untuk balok BLKLB01 terjadi kenaikan beban retak pertama menjadi 1800 kg, tetapi terjadi penurunan lendutan yang terjadi. Untuk balok BLKLB02 terjadi penurunan beban retak pertama menjadi 1200 kg dan lendutan menjadi 1 mm. Untuk beban ultimit balok BLK01 terjadi pada beban 6000 kg dan lendutan yang terjadi 38.93 mm. Untuk balok BLKLB01 beban ultimit yang terjadi sama dengan balok BLK01 yaitu 600 kg sedangkan lendutan yang terjadi menurun menjadi 32.2 mm. Untuk balok BLKLB02 beban ultimit menurun menjadi 5600 kg sedangkan lendutan yang terjadi juga menurun menjadi 24.7 mm. Untuk beban ultimit ini pengamatan visual menjadi faktor yang menentukan untuk menentukan nilai beban ultimit, karena beban ultimit saat eksperimen didapat pada saat benda uji sudah mulai retak merata ke seluruh permukaan balok tanpa balok patah.

Perilaku Benda Uji hasil Analisis ATENA

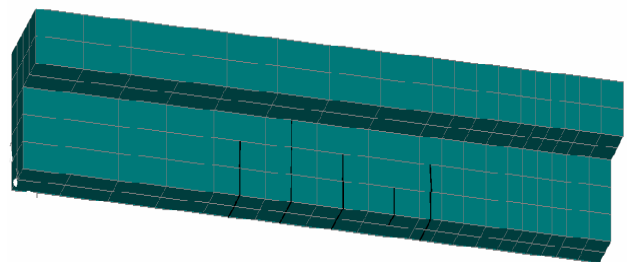
Tabel 3. Beban dan Lendutan Balok (ATENA)

Benda Uji	Retak pertama		Ultimit	
	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)
BLK01	700	0.4243	3200	12.859
BLKLB01	700	0.426	3700	11.94
BLKLB02	700	0.4488	3700	13.562

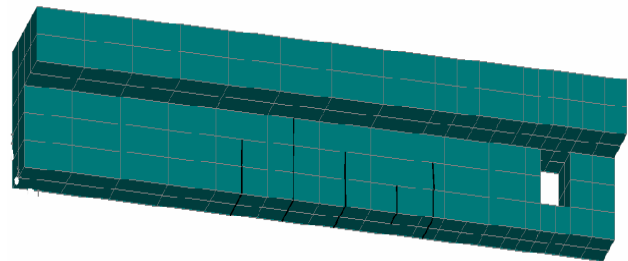
Pada analisis numerik memakai software GID-ATENA ini kenaikan beban yang bekerja pada balok adalah 100 kg setiap iterasi. Berdasarkan analisis numerik memakai GID-ATENA terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang (BLK01) terjadi di tengah bentang. Untuk balok BLKLB01 retak pertama yang terjadi hampir sama dengan balok BLK01 yaitu terjadi di tengah

bentang. Sedangkan untuk balok dengan lubang BLKLB02 retak, retak pertama terjadi di bawah lubang dan di tengah bentang. Dari pola retak pertama yang terjadi dapat disimpulkan bahwa retak pertama balok terjadi karena lentur disebabkan oleh pola retak yang tegak lurus batang.

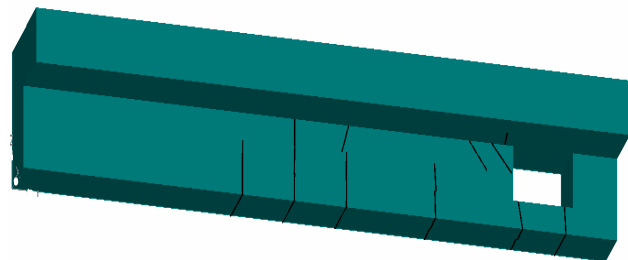
Berdasarkan Gambar. 15 dan Tabel. 3 terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 700 kg dan lendutan yang terjadi 0.424 mm. Untuk balok BLKLB01, beban retak tetap menjadi 700 kg, tetapi terjadi kenaikan lendutan yang terjadi menjadi 0.426 mm. Untuk balok BLKLB02 beban retak tetap menjadi 700 kg, tetapi terjadi kenaikan lendutan yang terjadi. Untuk beban ultimit balok BLK01 terjadi pada beban 3200 kg dan lendutan yang terjadi 12.859 mm. Untuk balok BLKLB01 beban ultimit yang terjadi yaitu 3700 kg sedangkan lendutan yang terjadi menurun menjadi 11.94 mm. Untuk balok BLKLB02 beban ultimit sama dengan balok BLKLB02 yaitu 3700 kg sedangkan lendutan yang terjadi juga naik menjadi 13.562 mm. Untuk beban ultimit ini diperoleh dari analisis GID-ATENA dimana iterasi Ghaus-Jordan adalah sama dengan nol.



First Crack BLK01

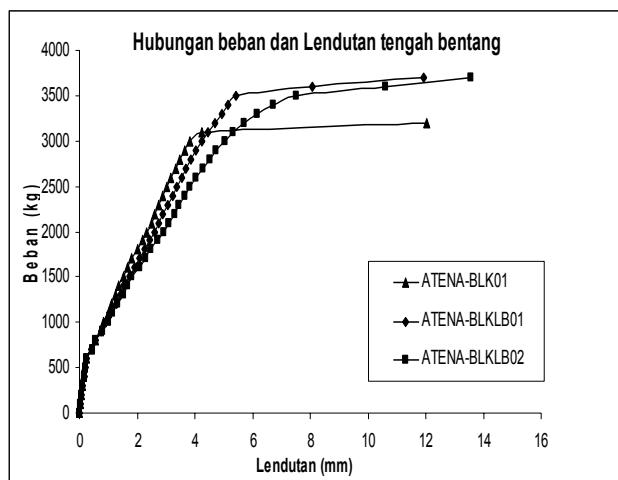


First Crack BLKLB01



First Crack BLKLB02

Gambar 14. Pola First Crack Balok (ATENA)



Gambar 15. Diagram Hubungan Beban-Lentutan pada Tengah Bentang Balok (ATENA)

Perbandingan Hasil Eksperimen dengan Numerik hasil Analisis ATENA

Secara keseluruhan hasil eksperimen yang didapat terdapat perbedaan nilai dengan hasil analisis tampang. Besarnya perbedaan nilai tersebut secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan Gambar. 16 terlihat bahwa hasil analisis ATENA mendapatkan hasil lentutan pada beban retak pertama dan ultimit terlalu kecil dibandingkan eksperimen. Dari Tabel. 5 terlihat bahwa perbedaan pada saat beban retak pertama yaitu sebesar 85.6 % untuk balok BLK01, 65.08 % balok BLKLB01, dan 55.12% balok BLKLB02. Untuk lentutan saat beban ultimit terjadi perbedaan 66.96 % untuk balok BLK01, 62.91% untuk balok BLKLB01, dan 45.09% untuk balok BLKLB02. Dari data ini apabila kita memakai variabel lentutan untuk mendesain balok dengan lubang maka akan sangat perlu diperhatikan bahwa lentutan dari analisis GID-ATENA tersebut harus dikalikan kurang lebih antara 2-3 kali lentutan hasil analisis GID-ATENA.

Berdasarkan Gambar. 16 terlihat bahwa hasil analisis ATENA mendapatkan hasil beban retak pertama dan ultimit terlalu kecil dibandingkan eksperimen. Dari Tabel. 5 terlihat bahwa perbedaan pada beban retak pertama yaitu sebesar 56.25 % untuk balok BLK01, 61.11 % balok BLKLB01, dan 41.67% balok BLKLB02. Untuk beban ultimit terjadi perbedaan 46.67 % untuk balok BLK01, 38.33% untuk balok BLKLB01, dan 33.92% untuk balok BLKLB02. Dari data ini apabila kita memakai variabel beban untuk mendesain balok dengan lubang maka akan sangat perlu diperhatikan bahwa beban dari analisis GID-ATENA tersebut adalah masih dalam batas aman dari keruntuhan.

KESIMPULAN dan SARAN

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari hasil pengujian dan pembahasan adalah sebagai berikut:

1. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 1600 kg dan lentutan yang terjadi 2.95 mm. Untuk balok BLKLB01 terjadi kenaikan beban retak pertama menjadi 1800 kg, tetapi terjadi penurunan lentutan menjadi 1.22 mm. Untuk balok

BLKLB02 terjadi penurunan beban retak pertama menjadi 1200 kg dan lentutan menjadi 1 mm.

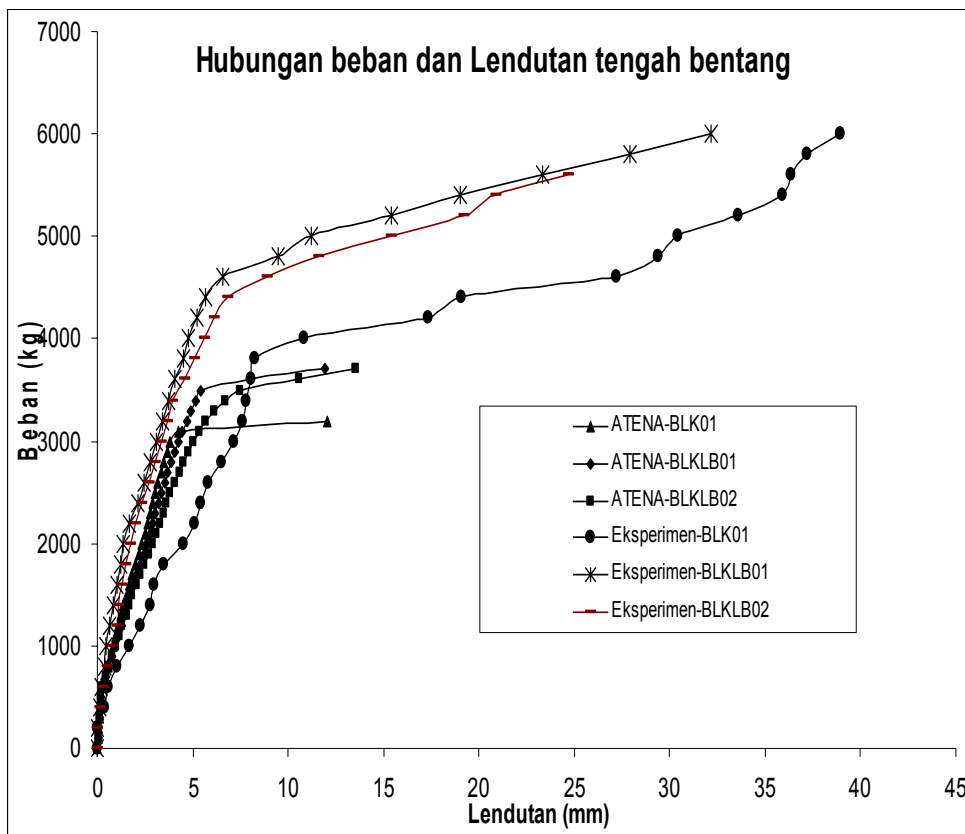
2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa beban ultimit balok BLK01 terjadi pada beban 6000 kg dan lentutan yang terjadi 38.93 mm. Untuk balok BLKLB01 beban ultimit yang terjadi sama dengan balok BLK01 yaitu 600 kg sedangkan lentutan yang terjadi menurun menjadi 32.2 mm. Untuk balok BLKLB02 beban ultimit menurun menjadi 5600 kg sedangkan lentutan yang terjadi juga menurun menjadi 24.7 mm.
3. Berdasarkan pengujian di laboratorium terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang (BLK01) terjadi di tengah bentang. Sedangkan untuk balok dengan lubang (BLKLB01 dan BLKLB02) retak, retak pertama terjadi di bawah lubang.
4. Pola retak pertama yang terjadi adalah karena lentur disebabkan oleh pola retak yang tegak lurus batang.
5. Berdasarkan analisis numerik memakai GID-ATENA terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang (BLK01) terjadi di tengah bentang. Untuk balok BLKLB01 retak pertama yang terjadi hampir sama dengan balok BLK01 yaitu terjadi di tengah bentang. Sedangkan untuk balok dengan lubang BLKLB02 retak, retak pertama terjadi di bawah lubang dan di tengah bentang. Hasil analisis GID-ATENA mendapatkan hasil yang berbeda pola retak pertamanya.
6. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan bahwa beban retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 700 kg dan lentutan yang terjadi 0.424 mm. Untuk balok BLKLB01, beban retak tetap menjadi 700 kg, tetapi terjadi kenaikan lentutan yang terjadi menjadi 0.426 mm. Untuk balok BLKLB02 beban retak tetap menjadi 700 kg, tetapi terjadi kenaikan lentutan yang terjadi.
7. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan bahwa beban ultimit balok BLK01 terjadi pada beban 3200 kg dan lentutan yang terjadi 12.859 mm. Untuk balok BLKLB01 beban ultimit yang terjadi yaitu 3700 kg sedangkan lentutan yang terjadi menurun menjadi 11.94 mm. Untuk balok BLKLB02 beban ultimit sama dengan balok BLKLB02 yaitu 3700 kg sedangkan lentutan yang terjadi juga naik menjadi 13.562 mm.
8. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan perbedaan pada beban retak pertama yaitu lebih kecil sebesar 56.25 % untuk balok BLK01, 61.11 % balok BLKLB01, dan 41.67% balok BLKLB02 terhadap hasil eksperimen.
9. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan perbedaan pada lentutan tengah bentang pada beban retak pertama yaitu lebih kecil sebesar 85.62 % untuk balok BLK01, 65.08 % balok BLKLB01, dan 55.12 % balok BLKLB02 terhadap hasil eksperimen.
10. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan perbedaan beban ultimit terjadi perbedaan lebih kecil sebesar 46.67 % untuk balok BLK01, 38.33% untuk balok BLKLB01, dan 33.92% untuk balok BLKLB02 terhadap hasil eksperimen.
11. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan perbedaan lentutan tengah bentang pada beban ultimit terjadi perbedaan lebih kecil sebesar 66.97 % untuk balok BLK01, 66.92% untuk balok BLKLB01, dan 45.09% untuk balok BLKLB02 terhadap hasil eksperimen.

Tabel 4. Perbandingan Beban dan Lendutan Balok antara Ekspeimen dengan ATENA

Benda Uji	Eksperimen				Benda Uji	ATENA			
	Retak pertama		Ultimit			Retak pertama		Ultimit	
	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)		P (kg)	Lendutan Tengah (mm)	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)
BLK01	1600	2.95	6000	38.93	BLK01	700	0.4243	3200	12.859
BLKLB01	1800	1.22	6000	32.2	BLKLB01	700	0.426	3700	11.94
BLKLB02	1200	1	5600	24.7	BLKLB02	700	0.4488	3700	13.562

Tabel 5. Persentase Perbedaan Analisis GID-ATENA terhadap Eksperimen

Benda Uji	Retak pertama		Ultimit	
	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)	P (kg)	Lendutan Tengah (mm)
BLK01	56.25	85.62	46.67	66.97
BLKLB01	61.11	65.08	38.33	62.92
BLKLB02	41.67	55.12	33.93	45.09



Gambar 16. Perbandingan Beban dan Lendutan Tengah Bentang Balok antara Ekspeimen dengan ATENA

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan disarankan bahwa:

1. Perlu diadakannya penelitian lebih lanjut variasi lubang di badan balok dengan beban baik statik maupun dinamik.
2. Diperbanyak jumlah benda ujinya untuk mendapatkan hasil yang valid.
3. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Struktur yang mempunyai peralatan yang lengkap dan modern untuk mendapatkan perilaku balok yang lengkap.
4. Analisis numerik dilakukan dengan software yang berlisensi untuk mendapatkan meshing benda uji yang lengkap dan detail.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Departemen Pendidikan Nasional Republik Indonesia melalui dana penelitian dosen muda DP2M $\Upsilon \cdot \cdot \wedge$ Diknas.

NOTASI

a = tinggi distribusi tegangan persegi ($= \beta \cdot c$)
 b_w = lebar balok badan
 b_E = lebar balok efektif sayap
 c = jarak garis netral dari serat tekan terluar
 d = tinggi bersih balok (jarak serat tekan terluar terhadap tulangan tarik)
 β = faktor koreksi
 C_c = gaya tekan dalam beton
 f_c = kuat tekan beton
 f_y = kuat leleh baja
 T_s = gaya dalam akibat tulangan tarik
 A_s = tulangan tarik balok
 ρ = rasio tulangan baja tarik
 ρ_b = rasio tulangan balance baja

DAFTAR PUSTAKA

- Abdalla, Hany, Kennedy, John B. (1985). "Dynamics Analysis of Prestressed Concrete Beams with Openings." *Journal of Structural Engineering*, V. 121, No. 7, July 1985, pp. 1058-1068.
- Anonim. (1981). Annual Book of ASTM Standard part 14: *Concrete and Mineral Aggregates (including Manual of Aggregate and Concrete Testing)* Philadelphia.
- Darsono, Udin. (2007). *Tinjauan Degradasi Daktilitas dan Kekakuan Balok Beton Bertulang Akibat Pembuatan Lubang pada Badan Balok*, Skripsi, UMS
- Mansur, M.A., Tan, K. H., and Lee, S. L. (1985). "Design Method for Reinforced Concrete Beam with Large Web Openings." *ACI Structural Journal*, V. 82, No.4, July-August 1985, pp. 517-524.
- Mansur, M.A., Huang, L. M., Tan, K. H., and Lee, S. L. (1992). "Deflection of Reinforced Concrete Beam with Web Openings." *ACI Structural Journal*, V. 89, No.4, July-August 1992, pp. 391-397.
- MacGregor, J.G. (1997). *Reinforced Concrete Mechanics and Design (3rd ed.)*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Pool, Richard B., Lopez, Rogerio. (1986). "Cyclically Loaded Concrete Beams with Openings." *ACI Journal*, V. 83, September – October 1986, pp. 757-763.
- Suhendro, B. (2000). *Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental*. Penerbit Beta Offset, Yogyakarta.
- Silalahi, Mangatar. (2008). "Analisa Dan Kajian Experimental Balok Beton Berlubang." Tesis, USU.
- Tan, K. H. and Mansur, M.A. (1986). "Design Procedure for Reinforced Concrete Beam with Large Web Openings." *ACI Structural Journal*, V. 93, No.4, July-August 1996, pp. 404-411.
- Ujianto, M. (2004). "Perilaku Balok Beton Bertulang Berlubang dengan Lubang Segi Empat akibat Pembebanan Siklik." Tesis, Universitas Gadjah Mada.
- Yayasan LPMB. (1991). *Standar SK SNI T-15-1991-03 : Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Bandung: LPMB Dep. Pekerjaan Umum RI.