

# PERILAKU LENTUR BALOK-L BETON BERTULANG BERLUBANG DITINJAU SECARA EKSPERIMEN DAN ANALISIS NUMERIK MEMAKAI SOFTWARE GID-ATENA

Endah Kanti Pangestuti, Mahmud Kori Effendi

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

---

**Abstract:** 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 CC1DELASTLSOTROPIC 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:** Pengamatan perilaku balok beton bertulang berlubang di badan dengan variasi bentuk persegi panjang dilakukan secara eksperimen. Benda uji yang digunakan adalah balok L beton bertulang yang dirancang dengan beban 2600 N dan menghasilkan tulangan tunggal 2D13 dengan tumpuan sendi dan rol. Balok mempunyai bentang 2 m, lebar web 150 mm, tinggi 250 mm, tebal slab 100 mm, lebar efektif 317 mm. Untuk mengetahui perilaku lubang di badan maka dibuat benda uji balok tanpa lubang (BLK01), balok dengan lubang 100 mm x 100 mm (BLKLB01), balok dengan lubang 200 mm x 100 mm (BLKLB02). Jarak lubang 150 mm dari tumpuan kanan. Masing2 benda uji 1 buah. Untuk mengetahui kapasitas beban maksimum yang ditahan balok, balok dites lentur murni dengan jarak beban titik 650 mm dari tumpuan. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan bahwa beban retak balok pertama lebih kecil 42-62 %, beban ultimit balok lebih kecil 33-47%, lendutan tengah bentang pada beban retak pertama lebih kecil 55-86%, dan lendutan tengah bentang pada beban ultimit lebih kecil 45-70% terhadap hasil eksperimen. Pola retak pertama balok BLK01 terjadi di tengah bentang sedangkan BLKLB01 dan BLKLB02 terjadi di bawah lubang. Hasil analisis GID-ATENA mendapatkan hasil yang berbeda pola retak pertamanya.

**Kata Kunci:** Balok lubang, Balok L, GID-ATENA

## 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

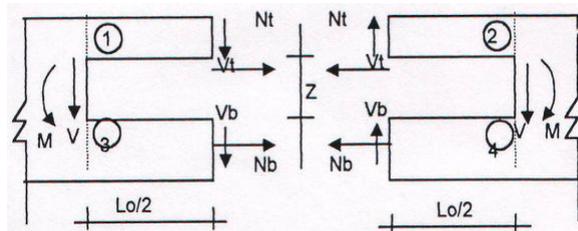
(openings) terhadap kuat ultimit dan perilaku beban layan balok harus dipertimbangkan dengan baik dalam perancangan.

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). Ujianto, M (2004) melakukan penelitian mengenai balok T beton bertulang dengan lubang segi empat akibat beban siklik.

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.

### Analisa Penampang Balok T dengan Lubang

Analisa penampang balok T dengan lubang menurut usulan Kiang-Hwee dan Mohammad A. Mansur perhitungannya didasarkan pada perilaku vierendel dari bagian balok di atas dan di bawah lubang (*chord member*). Titik balik diasumsikan berada di tengah bentang dari chord member, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Gaya aksial diperoleh dari pembagian momen pada chord member dan jarak titik pusat antara batang chord atas dan bawah.



Gambar 2. Free Body Chord Member

Menghitung gaya-gaya dalam *chord member* :

$$N_t = \frac{M_m}{z} \quad (1)$$

$$N_b = -N_t \quad (2)$$

Menghitung gaya geser pada chord member

$$V_t = V_m \left( \frac{I_{gt}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (3)$$

$$V_b = V_m \left( \frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \right) \quad (4)$$

Menghitung momen pada chord member

$$M_1 = -\frac{V_t l_o}{2} \quad (5)$$

$$M_2 = \frac{V_t l_o}{2} \quad (6)$$

$$M_3 = -\frac{V_b l_o}{2} \quad (7)$$

$$M_4 = \frac{V_b l_o}{2} \quad (8)$$

Menghitung kelangsingan

$$\frac{KL_u}{r} < 34 - 12 \frac{M_{1b}}{M_{2b}} \quad (9)$$

$$r = 0,3d_o \quad (10)$$

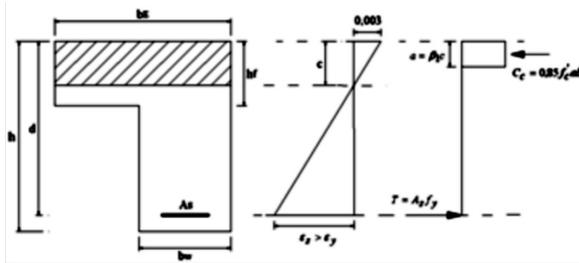
Menghitung Tulangan Senggang

$$A_v = \frac{0,25(\eta V)}{\Phi f_{yv}} \quad (11)$$

$$A_d = \frac{0,75(\eta V)}{\Phi f_{yd} \sin \varphi} \quad (12)$$

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 2.



**Gambar. 2** Distribusi Tegangan Persegi Penampang Balok

Berdasarkan gambar diatas, maka dengan mengasumsi besar nilai  $a=h_f$ , dapat dihitung keseimbangan gaya-gaya dalam

$$C_c + C_s = T_s \quad (13)$$

$$C_c = 0,85 f'_c .a .b \quad (14)$$

$$T_s = A_s . f_y \quad (15)$$

$$M_n = C_c ( d - a/2 ) \quad (16)$$

karena  $M < M_u$ , maka

$$k_{perlu} = \frac{M_u}{\phi b d^2} \quad (17)$$

$$k = f'_c \omega (1 - 0.59 \omega) \quad (18)$$

$$\omega = \frac{\rho f_y}{f'_c} \quad (19)$$

$$\rho = \frac{\omega f'_c}{f_y} \quad (20)$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (21)$$

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

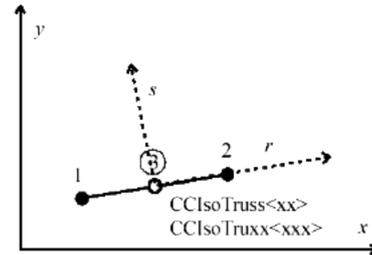
tarik

$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \frac{600}{600 + f_y} \quad (22)$$

$$\rho_{maks} = 0.75 \rho_b < \rho \quad (23)$$

Pada Gambar. 3, 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.



**Gambar 3.** Elemen Geometri CCIsoTruss<xx\_x>

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.

## 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-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.

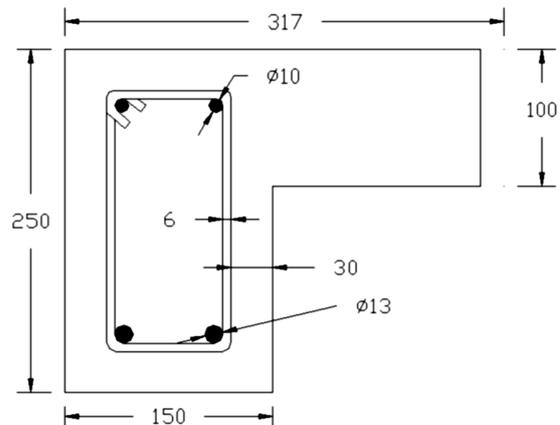
c. *Dial gauge*, untuk untuk mengukur lendutan yang terjadi pada model balok beton bertulang selama pembebanan berlangsung.

### 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.

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. 4 dan Tabel. 1.



Gambar 4. Dimensi dan penulangan benda uji

Tabel 1. Spesifikasi benda uji

Kode	Panjang (mm)	Lebar badan (mm)	Tinggi (mm)	Lebar flange (mm)	Tulangan Pokok Atas	Tulangan Bawah	Tulangan Sengkang
BLK 01	2000	150	250	317	2D13	2D10	Ø6
BLKLB01	2000	150	250	317	2D13	2D10	Ø6
BLKLB02	2000	150	250	317	2D13	2D10	Ø6

### Pelaksanaan Penelitian

#### 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.

#### 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*, dilakukan secara bertahap dengan interval kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan akan dihentikan jika balok sudah runtuh. *Setting* alat dan pembebanan dari model balok beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 5. Penempatan tumpuan sendi dan rol pada pengujian eksperimen dapat dilihat pada Gambar 6.



**Gambar 5.** Setting up pengujian



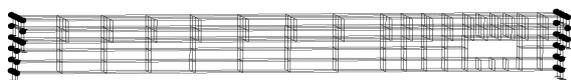
**Gambar 6.** Tumpuan balok pada pengujian

Pada analisis numerik ini maka balok dibagi menjadi elemen kecil-kecil. Software GID-ATENA yang dipakai dalam analisis adalah demo version, jadi hanya dibatasi 300 elemen. Pembagian elemen dapat dilihat pada Gambar 7



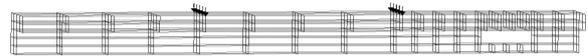
**Gambar 7.** Meshing balok

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 8).



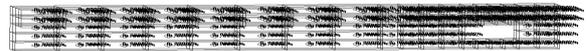
**Gambar 8.** Pemodelan Tumpuan pada Balok

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 9).



**Gambar 9** Pemodelan Beban Titik pada Balok

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

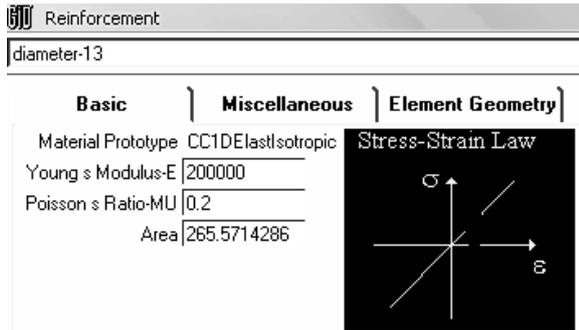


**Gambar 10.** Pemodelan Berat Sendiri pada Balok

Material yang digunakan dalam analisis GID-ATENA untuk memodelkan material beton dapat dilihat pada Gambar 11 dan untuk memodelkan material baja dapat dilihat pada Gambar 12

beton	
Basic	Concrete Comp(0)
Comp(0) Material Prototype	LC30/NonLinLementu
Comp(0) Young's Modulus-E	31638.38012
Comp(0) Poisson's Ratio-MU	0.2
Comp(0) Tension strength-FT	2.483
Comp(0) Compression strength-FC	-28.29
Comp(0) Fracture energy-GF	7.018e-005
Comp(0) Fixed Crack	0.7
Comp(0) Plastic strain-EPS CP	-0.0009968
Comp(0) Onset of crushing-FC0	-20.0
Comp(0) Critical comp disp-WD	-0.0005
Comp(0) Excentricity-EXC	0.52
Comp(0) Dir of pl flow-BETA	0.0
Comp(0) Density-RHO	0.0000023
Comp(0) Thermal Expansion-Alpha	0.000012

**Gambar 11.** Sifat material beton yang dipakai dalam analisis ATENA

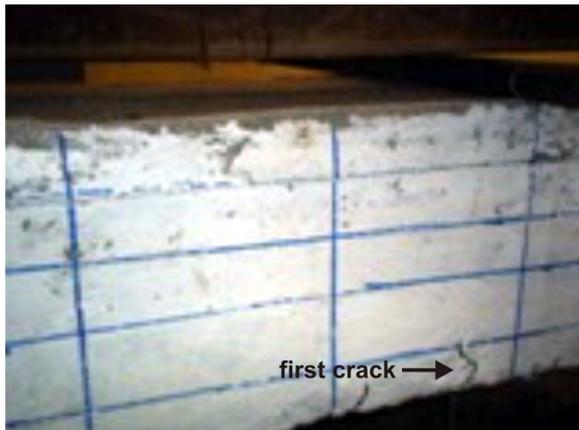


Gambar 12. Sifat material baja yang dipakai dalam analisis ATENA

## HASIL PENELITIAN

### Perilaku Benda Uji Eksperimen

Berdasarkan hasil eksperimen di lab. Bahan & Struktur UNNES, maka didapatkan data beban dan lendutan. Gambar pola retak pertama balok terlihat pada Gambar 13, 14, dan 15.



Gambar 13. Pola *first crack* BLK01

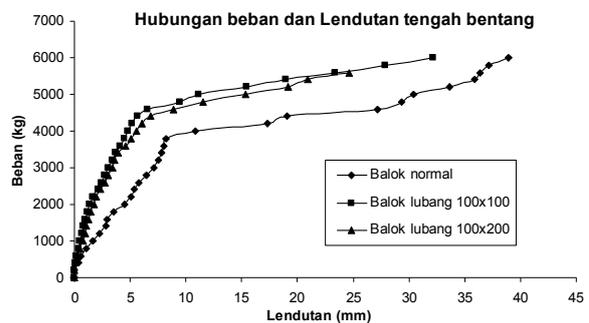


Gambar 14. Pola *first crack* BLKLB01



Gambar 15. Pola *first crack* BLKLB02

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.

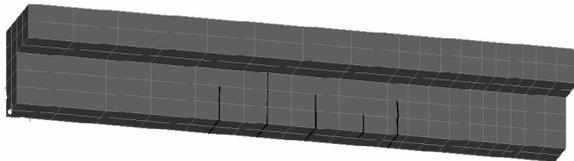


Gambar 16. Diagram Hubungan Beban-Lendutan pada Tengah Bentang Balok (Eksperimen)

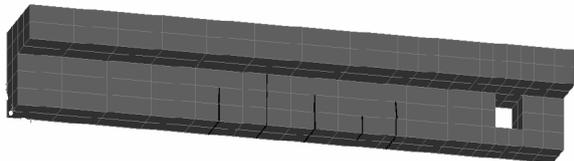
Berdasarkan Gambar.16 dan Tabel. 2 terlihat bahwa retak pertama balok tanpa lubang terjadi pada beban 1600 kg dan lendutan yang terjadi 2.95 mm. Untuk balok BLKLB01 terjadi kenaikan beban retak pertama menjadi 1800 kg. Untuk balok BLKLB02 terjadi penurunan beban retak pertama menjadi 1200 kg dan lendutan 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 6000 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.

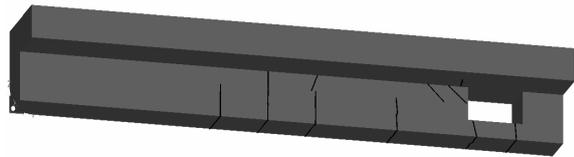
### Perilaku Benda Uji hasil Analisis ATENA



Gambar 17. First Crack BLK01 (Atena)



Gambar 18. First Crack BLKLB01 (Atena)

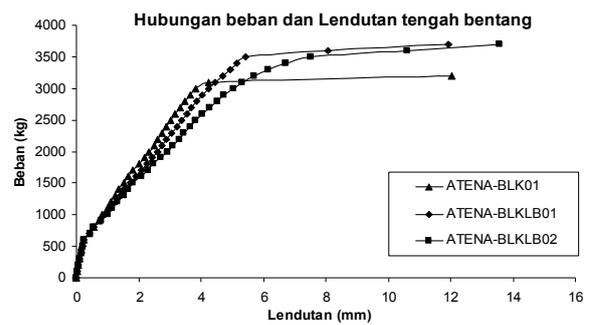


Gambar 19. First Crack BLKLB02 (Atena)

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.

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



Gambar 20. Diagram Hubungan Beban-Lendutan pada Tengah Bentang Balok (ATENA)

Berdasarkan Gambar. 20 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 Gauss-Jordan adalah sama dengan nol.

### 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 di bawah ini

**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	13.5622

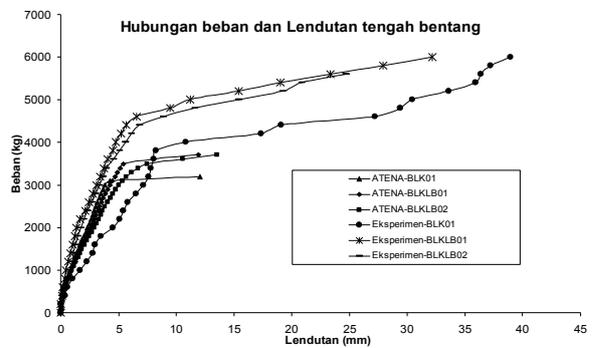
**Tabel 5.** Persentase Perbedaan Analisis GID-ATENA terhadap Eksperimen

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

Berdasarkan Gambar. 21 terlihat bahwa hasil analisis ATENA mendapatkan hasil lendutan pada beban retak pertama dan ulitmit 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 lendutan saat beban ulitmit 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 lendutan untuk mendesain balok dengan lubang maka akan sangat perlu diperhatikan bahwa lendutan dari analisis GID-ATENA tersebut harus dikalikan kurang lebih antara 2-3 kali lendutan hasil analisis GID-ATENA.

Berdasarkan Gambar. 21 terlihat bahwa hasil analisis ATENA mendapatkan hasil beban retak pertama dan ulitmit 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 ulitmit 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.



**Gambar 21.** Perbandingan Beban dan Lendutan Tengah Bentang Balok antara Ekspeimen dengan ATENA

## 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 lendutan yang terjadi 2.95 mm. Untuk balok BLKLB01 terjadi kenaikan beban retak pertama menjadi 1800 kg, tetapi terjadi penurunan lendutan menjadi 1.22 mm. Untuk balok BLKLB02 terjadi penurunan beban retak

- pertama menjadi 1200 kg dan lendutan menjadi 1 mm.
2. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa 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.
  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 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.
  7. Hasil analisis GID-ATENA menunjukkan bahwa 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.
  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 lendutan 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 lendutan 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.

## 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 2008 Diknas.

## NOTASI

- a = tinggi distribusi tegangan persegi ( $\beta.c$ )  
 $b_w$  = 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 )  
 $\beta$  = 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  
 $\rho$  = rasio tulangan baja tarik  
 $\rho_b$  = 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., Lee, S. L., 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., Lee, S. L., 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, 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., Mansur, M.A, Design Procedure for Reinforced Concrete Beam with Large Web Openings, ACI Structural Journal, V. 93, No.4, July-August 1996, pp. 404-411.

Ujiyanto, M 2004, Perilaku Balok Beton Bertulang Berlubang dengan Lubang Segi Empat akibat Pembebanan Siklik, Tesis, UGM

Yayasan LPMB, 1991, "Standar SK SNI T-15-1991-03 : Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", Bandung: LPMB Dep. Pekerjaan Umum RI

Daftar Referensi Internet [www.cervenka.cz](http://www.cervenka.cz)