

ANALISIS GESER BALOK-T BETON BERTULANG BERLUBANG MEMANJANG DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA NONLINIER

Kasmat Saleh Nur

Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Negeri Gorontalo

ABSTRACT

The presence of flanges on the reinforced concrete T-beam increases the shear capacity, but if the beam-T is made in hollow elongated affect shear capacity. This research conducted to find numerical modelling of nonlinear finite element for hollow reinforced concrete. using the program ATENA V.2.1.10 which were then verified with numerical experiment model. The results showed that the hole in hollow reinforced concrete is not enough affect the shear capacity but may reduce the ductility, in which the ductility decreases as the ratio of the hole increases.

Keywords : Reinforcement concrete, Hollow core beam, Shear, Ductility, Crack pattern.

PENDAHULUAN

Material beton merupakan bahan struktur yang paling berat dari suatu bangunan. Oleh karenanya dalam perkembangan diupayakan suatu cara untuk mengurangi berat tersebut, salah satunya adalah membuat penampang berlubang dengan mempertahankan dimensi sesungguhnya. Pengurangan luas penampang tersebut apakah akan berpengaruh terhadap kapa-sitas geser struktur tersebut, yang sekarang ini perencanaannya masih bersifat empiris. Akan tetapi permasalahan tersebut dapat didekati lewat pemecahan numerik dan eksperimen. Pemecahan lewat ekspe-rimen membutuhkan biaya dan waktu yang tidak sedikit, sedangkan pemecahan numerik malah sebaliknya.

Dengan adanya program ATENA memungkinkan struktur dimodelkan menyerupai / mirip dengan struktur sesung-guhnya. Oleh karenanya penelitian ini bertu-juan : 1) untuk mendapatkan model elemen hingga nonlinier balok beton bertulang berlubang dengan menggunakan program ATENA V.2.1.10; 2) untuk mengetahui distribusi tegangan geser balok beton bertulang berlubang; 3) mem-peroleh bentuk pola perkembangan retak yang terjadi; 4) mengetahui perilaku balok bila dilakukan variasi rasio lubang.

Menurut Pansuk (2007) keberadaan flens balok-T yang menggunakan tulangan geser memiliki pengaruh yang signifikan pada kapasitas geser, sedangkan untuk yang tidak menggunakan tulangan geser, flens tidak berpengaruh signifikan terhadap kapa-sitas geser. Dalam penelitian lain dikatakan bahwa lubang memanjang pada balok beton bertulang dapat mengurangi kuat geser nominal beton hingga 32%, sehingga me-nuntut tulangan yang lebih banyak agar mampu menahan gaya geser yang terjadi (Sapramedi, 2005). Krasna (2010) dalam penelitiannya untuk balok-T berlubang me-manjang, menyimpulkan bahwa kapasitas geser hasil eksperimen lebih besar 37,61% dari hasil teoritis berdasarkan SNI-03-2847-2002.

Model idealisasi elemen beton yang sering dilakukan dalam penelitian adalah *orthotropic models*, *nonlinear elasticity models*, dan *plastic model*. Untuk elemen beton ATENA mengasumsikan sebelum retak beton bersifat sebagai material isotropik yang kemudian setelah retak diasumsikan sebagai material ortotropik.

Model konstitutif *fracture-plastic* merupakan kombinasi dari perilaku *tensile (fracturing)* dan *compressive (plastic)*. Model ini didasarkan pada ortotropik dengan formulasi *smearred crack* dan model *crack band*. Dalam penerapannya menggunakan *Rankine failure criterion*, *exponential softening*, dan dapat juga menggunakan *rotated* atau *fixed crack model*.

Untuk retak pada beton menggunakan *Rankine criterion* yakni,

$$F_i^f = \sigma_{ii}^{\prime t} - f_{ti} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana $\sigma_{ii}^{\prime t}$ adalah *trial stress*, f_{ti} adalah kuat tarik material dalam arah *i*. Untuk *plastic model* perhitungan menggunakan persamaan *predictor-corrector*.

$$\sigma_{ij}^n = \sigma_{ij}^{n-1} + E_{ijkl}(\Delta \varepsilon_{kl} - \Delta \varepsilon_{kl}^p) = \sigma_{ij}^t - E_{ijkl} \Delta \varepsilon_{kl}^p = \sigma_{ij}^t - \sigma_{ij}^p \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana, σ_{ij}^p adalah hasil hitungan langsung dari *yield function* dengan *return mapping algorithm*.

$$F^p(\sigma_{ij}^t - \sigma_{ij}^p) = F^p(\sigma_{ij}^t - \Delta \lambda l_{ij}) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

dimana, l_{ij} didefinisikan sebagai,

$$l_{ij} = E_{ijkl} \frac{\partial G^p(\sigma_{kl}^t)}{\partial \sigma_{kl}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

dan,

$$\Delta \varepsilon_{ij}^p = \Delta \lambda \frac{\partial G^p(\sigma_{ij}^t)}{\partial \sigma_{ij}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

dimana, $G^p(\sigma_{kl}^t)$ adalah fungsi *plastic potential*, yang dihitung menggunakan persamaan berikut,

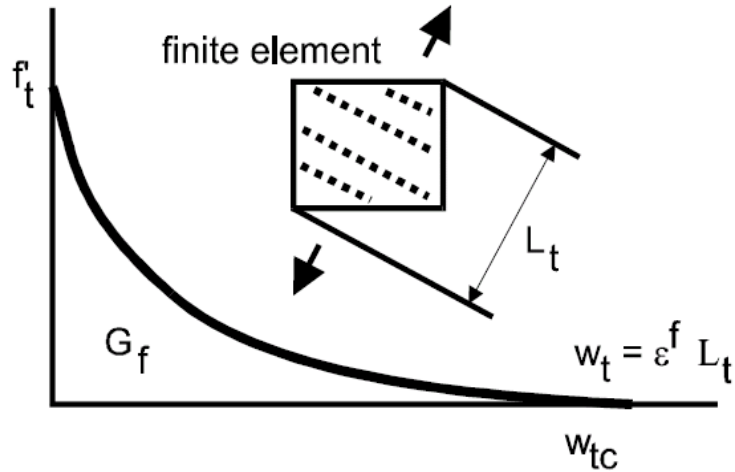
$$G^p(\sigma_{ij}) = \beta \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 + \sqrt{2J_2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\beta < 0$ bila volume dari material mengecil, $\beta = 0$ bila volume tetap (tidak berubah) dan $\beta > 0$ bila volume dari meterial membesar.

Kombinasi *plasticity* dan *fracture model* secara umum merupakan solusi simultan dari persamaan berikut.

$$F^p \left(\sigma_{ij}^{n-1} + E_{ijkl} (\Delta \varepsilon_{kl} - \Delta \varepsilon_{kl}^f - \Delta \varepsilon_{kl}^p) \right) \leq 0 \dots\dots\dots(7)$$

$$F^f \left(\sigma_{ij}^{n-1} + E_{ijkl} (\Delta \varepsilon_{kl} - \Delta \varepsilon_{kl}^p - \Delta \varepsilon_{kl}^f) \right) \leq 0 \quad (8)$$



Gambar 1. Tensil softening dan panjang karakteristik

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian dilakukan pemodelan balok-T berlubang memanjang dengan menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) dengan bantuan program *GID 7.4.4b*, yang dapat berinteraksi dengan program *ATENA*. Hasil pemodelan tersebut diverifikasi dengan model eksperimen Krasna (2010) setelah itu dilakukan studi parameter untuk mengetahui pengaruh perubahan rasio lubang 5%, 7.5% dan 10% (lihat Gambar 2).

Material yang perlu dimodelkan dalam penelitian adalah beton, baja tulangan, plat baja dan baja silinder. Beton dimodelkan sebagai elemen solid 3D (*hexahedral 8 nodal*) dan menggunakan model material *CC3DNonLinCementitious2* (lihat Tabel 1 dan Gambar 3). Baja tulangan dimodelkan sebagai *discrete model* dan *perfect bonded* dengan menggunakan material *CCReinforcement* (lihat Gambar 4). Plat baja dan silinder baja dimodelkan menggunakan material *CC3DElastIsotropic*. Khusus untuk silinder baja geometriaknya diidealisasi menjadi balok persegi (lihat Gambar 3), ini dikarenakan keterbatasan jumlah elemen *ATENA V.2.1.10* yang dipakai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Model numerik dan eksperimen

Berdasarkan hasil analisis program *ATENA* (Gambar 6), nampak terlihat perbedaan kekakuan, permasalahan ini dapat disebabkan oleh : 1) hubungan lekatan tulangan dengan beton model numerik dianggap *perfect bonded*; 2) letak beban dekat perletakan yang menyebabkan gaya geser menjadi dominan; 3) model konstitutif yang tersedia hanyalah *CC3DnonLinCementitious2*, dan 4) dapat juga disebabkan tidak padatnya (keropos) model eksperimen. Bila dilihat dari beban ultimit model numerik lebih kecil 11,36 % dari model eksperimen, sedangkan lendutan ultimit model numerik adalah lebih besar 22,46 % dari model eksperimen.

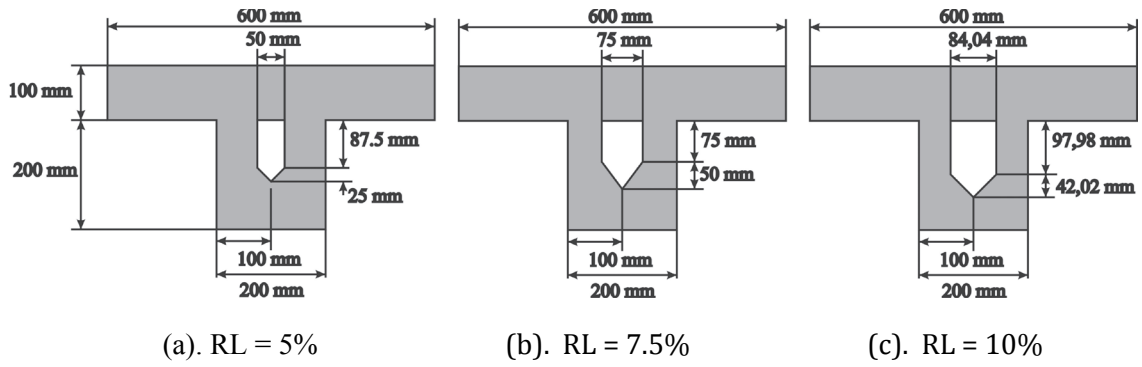
Menurut SNI 03-2847-2002 besarnya gaya geser dalam perencanaan dapat diambil pada jarak $1d$ dari perletakan/tumpuan dan berdasarkan teori balok homogen bahwa tegangan geser maksimum terjadi pada titik berat penampang. Oleh karenanya dalam eksperimen dipasang *strain gauge* beton pada arah vertikal dan horisontal. Pada pemodelan numerik *strain gauge* beton diganti dengan *monitor for point*.

Hasil analisis menunjukkan hubungan beban-regangan (lihat Gambar 7) model numerik dan model eksperimen (BB1) cukup berdekatan. Akan tetapi terlihat perbedaan yang signifikan dengan BB2. Perbedaan tersebut dikarenakan ketidak sempurnaan model eksperimen, yakni salah satunya adalah laju pembebanan yang tidak terkontrol.

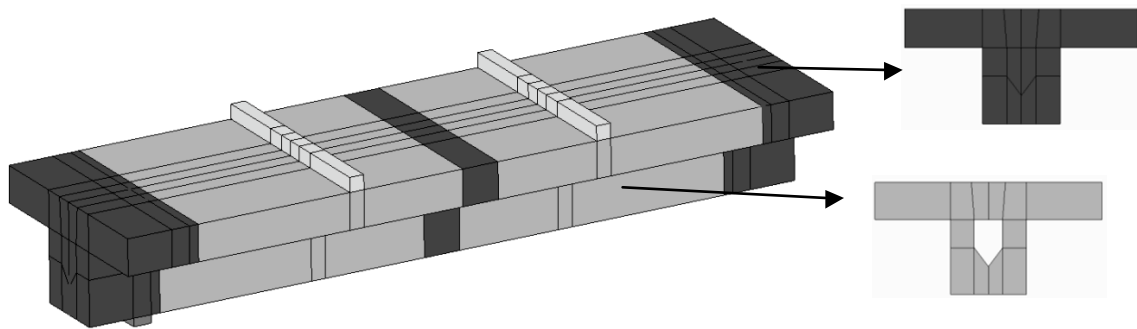
Verifikasi lain yang dilakukan adalah pola retak. Pola retak model numerik memiliki kesamaan dengan model eksperimen, akan tetapi nampak pada model numerik terlihat retak horisontal dan retak yang bersilangan (lihat Gambar 8 dan 9). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan ATENA V.2.1.10 yang dipakai hanya menggunakan *smeared model* dengan satu model konstitutif, yakni *CC3DnonLin-Cementitious2*

Tabel 5.1. Parameter material beton (model numerik)

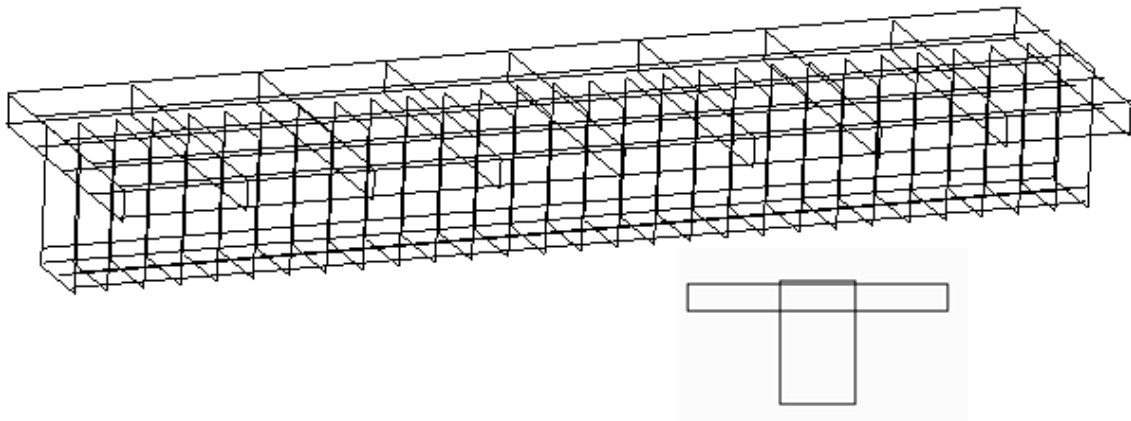
Parameter	Persamaan	Besaran	Satuan	Sumber
Kuat tekan	f'_c	-33,87	MPa	Krasna (2010)
Ukuran agregat maksimum	d_a	20,00	mm	Krasna (2010)
Modulus elastisitas	$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$	27318,98	MPa	SNI 03-2847-2002
Poisson Ratio	ν	0,20		Default ATENA
Kuat tarik	$f_t = 0,24f'_{cu} \left(\frac{d_a}{20}\right), \quad f'_{cu} = \frac{f'_c}{0,85}$	2,795	MPa	Cervenka
Fracture Energy	$G_f = (2,73 + 3,10f'_c)f'_c \frac{d_a}{E_c}$	$6,5126 \times 10^{-5}$	MN/m	Bazant
Plastic strain	$\epsilon_{cp} = 2 \frac{f_t}{E_c}$	-0,002473		Cervenka
Onset of Crushing	$f_c^0 = \frac{2}{3}f'_c$	-22,52		Cervenka
Critical Compression Displacement	w_{ca}	-0,0005	m	Default ATENA
Dir of flow	β	0		Default ATENA
Density	ρ	0,023	MN/m ³	Default ATENA
Thermal Expansion	α	0,000012		Default ATENA



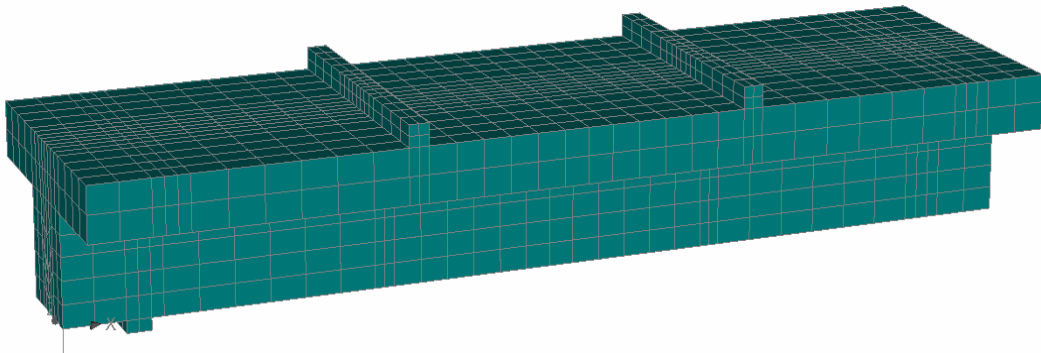
Gambar 2. Penampang melintang variasi rasio lubang



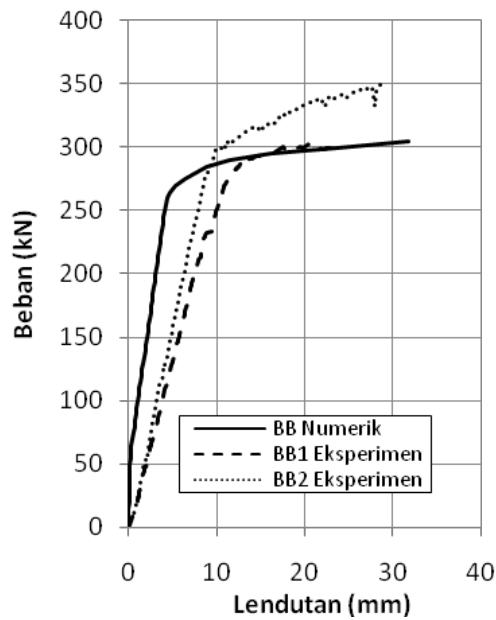
Gambar 3. Model numerik elemen beton



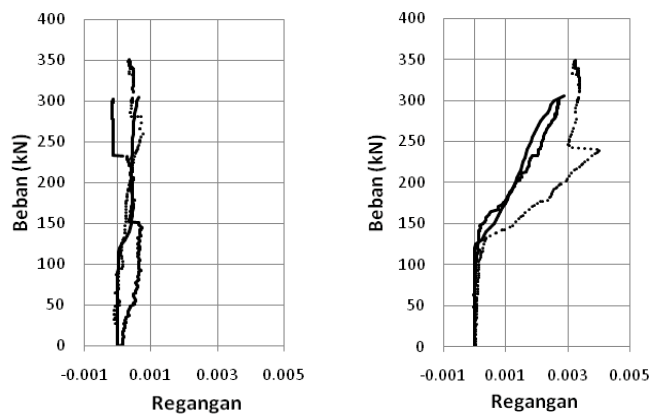
Gambar 4. Model numerik elemen tulangan (*diskrit*)



Gambar 5. Pembagian elemen solid (beton, baja)



Gambar 6. Hubungan beban – displacement



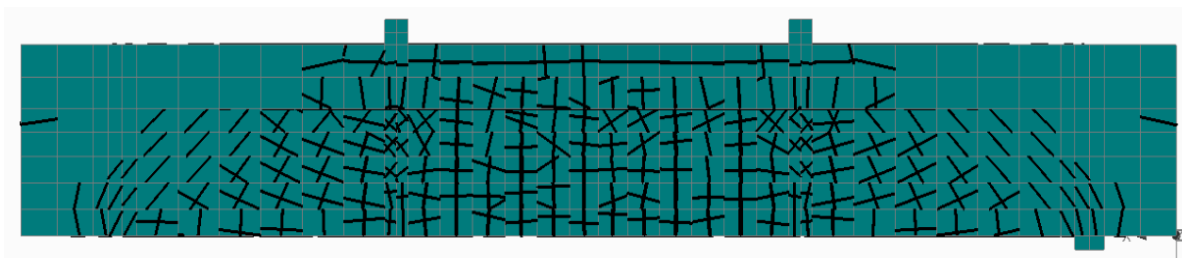
(a) Horizontal

(b) Vertikal

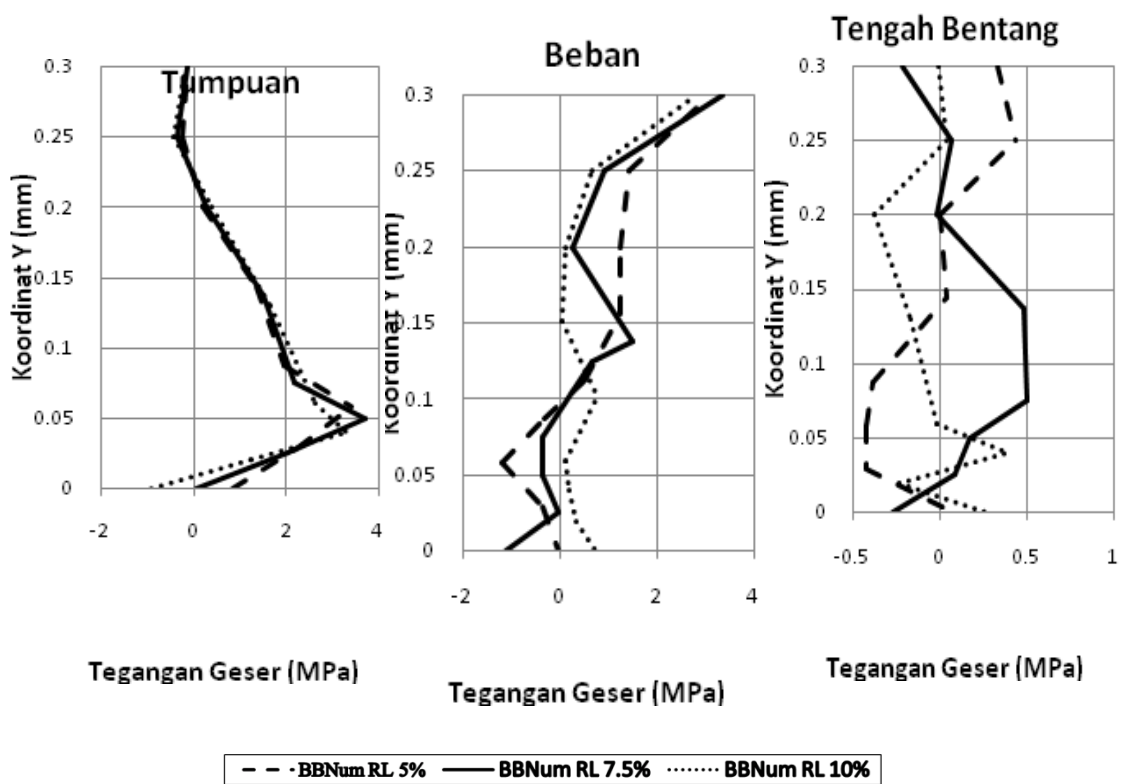
Gambar 7. Hubungan beban – lendutan BB Numerik dan BK Numerik



Gambar 8. Pola retak balok berlubang BB2 (Krasna, 2010)



Gambar 9. Pola retak BB Numerik

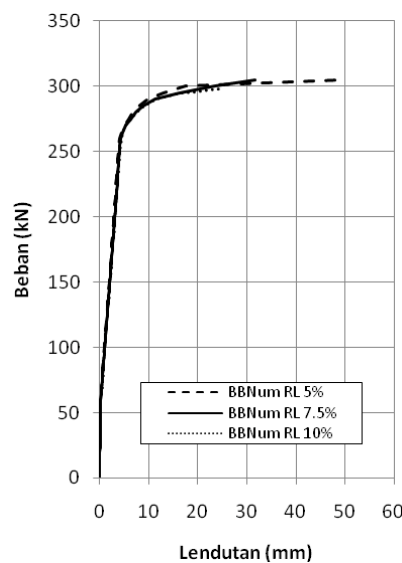


Gambar 10. Distribusi tegangan geser pada level beban ultimit

MODEL NUMERIK STUDI PARAMETER

Setelah model numerik dianggap telah sesuai dengan model eksperimen, dilakukan studi parameter untuk mengetahui perilaku dari setiap variasi rasio lubang yang dilakukan. Hasil analisis nampak terlihat perubahan rasio lubang tidak signifikan akan tetapi sangat berpengaruh pada daktilitas, dimana makin besar rasio lubang, daktilitas makin kecil (lihat Gambar 11).

Untuk distribusi tegangan geser pada keadaan beban ultimit di daerah tepi baik tepi atas ataupun bawah (lihat Gambar 10) sesungguhnya terjadi tegangan geser, τ_{xy} (tegangan geser tidak nol), sedangkan pada daerah perletakan sendi tegangan geser maksimum terjadi pada koordinat $\pm 0,05$ m (tidak pada titik berat penampang) dan pada daerah beban terjadi pada tepi atas. Pada daerah tengah bentang tegangan geser maksimum juga tidak terjadi pada titik berat penampang.



Gambar 11. Hubungan beban – lendutan

KESIMPULAN

1. Model numerik hasil analisis program ATENA lebih kaku dari model eksperimen Krasna.
2. Berdasarkan hubungan beban – lendutan, beban ultimit model numerik lebih kecil 11,36% dari model eksperimen sedangkan lendutan lebih besar 22,48%.
3. Tegangan geser terjadi pada semua titik dari balok beton berlubang (tegangan geser pada tepi atas, tepi bawah dan di tengah bentang adalah tidak nol) dan tegangan geser maksimum pada daerah perletakan sendi terjadi pada ± 5 cm dari tepi bawah, pada daerah beban terjadi pada tepi atas sedangkan pada tengah bentang berbeda-beda pada setiap perubahan parameter.
4. Bentuk pola retak model numerik hasil analisis menyerupai pola retak model eksperimen balok Krasna (2010).
5. Lubang memanjang pada balok-T tidak cukup berpengaruh pada kapasitas geser.
6. Daktilitas menurun bila rasio lubang meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim. 2007. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002) dilengkapi dengan penjelasan (S-2002), ITSpress, Surabaya.
- [2] Bathe, K. J., 1996. Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey.
- [3] Cervenka, V., Jendele, L., Cervenka J. 2009. Atena Program Documentation Part 1 (Theory), Cervenka Consulting, Praha, Republik Ceko.
- [4] Chen, W. & Saleeb, A. F. 1982. Constitutive Equations for Engineering Materials (volume 1), John Wiley, inc.
- [5] Cung & Ahmad. 1994. Model for Shear Critical High Strength Concrete Beam, ACI Struktural Journal., Vol.91, No.1, Jan-Feb 1994.
- [6] Bentz, E. C., Vecchio, F. J, and Collins, M. P., 2006, Simplified Modified Compression Field Theory for Calculating Shear Strength of Reinforced Concrete Elements, Jurnal ACI, Vol 103-S65 hal 614-624.
- [7] Gilang, 2009, Perilaku Geser dan Lentur Pada Balok Beton Bertulang Berlubang Lingkaran, Tugas Akhir, UGM, Yogyakarta.
- [8] Krasna, 2010, Perilaku Geser Pada Keadaan Layan dan Ultimit Balok Beton Bertulang Berlubang Memanjang (Hollow Core RC Beam), Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [9] Kwak, H. G. Dan Filippou, F. C., 1990, Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures Under Monotonic Loads, Departemen of Civil Engineering University of California, California.
- [10] MacGregor, J. G., 1992. Reinforced Concrete Mechanics & Design (second edition), Prentice Hall, New Jersey
- [11] Nilson, A. H, dkk. 2004. Design of Concrete Structures (thirteenth edition), McGraw Hill, California.
- [12] Pansuk, P., & Sato, Y. 2007. Shear Mechanism of Reinforced Concrete T-Beams with Stirrup, Jurnal Advanced Concrete Technology, Vol 5, hal 395-408, Japan Concrete Institute.
- [13] Park, R dan T. Pauley. 1975. Reinforced Concrete Structures, Canada, John Wiley & Sons, inc.
- [14] Priyosulistyo, H. 2009. Struktur Beton Lanjut, Materi kuliah, UGM, Yogyakarta.
- [15] Sapramedi, W.N., 2005. Analisis Perilaku Geser dan Lentur Pada Balok Beton Bertulang Berlubang Lingkaran (Hollow Core RC Beam), Tugas Akhir, UGM, Yogyakarta.
- [16] Suhendro, N. 1990. Analisis Buckling Pada Struktur Dengan Finite Element Method, Media Teknik, Edisi No 1, hal 46-51, UGM, Yogyakarta.
- [17] Suhendro, B. 2000. Kekanika Kontinum, Beta Offset, Yogyakarta.

- [18] Suhendro, B. 2000. Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya, Jurusan Teknik Sipil UGM, Yogyakarta.
- [19] Vecchio, F. J dan Collins, M. P., 1988, Predicting the Response of Reinforced Concrete Beam Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory, Jurnal ACI, Vol 85-S27, hal 258-268.
- [20] Wang, C. K & Salmon, C. G. 1985 Desain Beton Bertulang, Erlangga, Jakarta.
- [21] Weaver Jr, William & Johnston, P.,. 1993. Elemen Hingga untuk Analisis Struktur, Eresco, Bandung.
- [22] Winter, G. & Nilson, A, H. 1993. Perencanaan Struktur Beton Bertulang, Pradnya Paramita, Jakarta.