Cantilever
Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil
Vol. 4, No. 1, Oktober 2015, Halaman: 7 - 13, ISSN: 1907-4247 (Print), ISSN: 2477-4863 (Online)
Alamat Website: http://cantilever.unsri.ac.id

STUDI PERILAKU BALOK KASTELA BENTANG PENDEK DENGAN VARIASI DIMENSI LUBANG HEKSAGONAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ahmad Muhtarom
Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya
(Jl. Raya Prabumulih KM.32 Inderalaya, Sumatera Selatan)
Email : ahmadmuhtarom2000@yahoo.com

Abstract

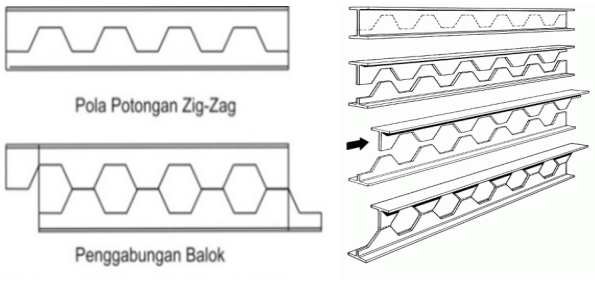
Modification technology of castellated beams of Wide Flange beam (I WF) are now varied, starting from addition high beam variation so that moment of inertia larger than origin beam, until the hole dimension variation for the aesthetic and mechanical-electrical installations. In the castellated beams design should be noted weakening effect shear forces and buckling due to the hole modified. This study was to determine the behavior of castellated beam with hexagonal holes dimensional variations using the finite element method. The method in this research is to create a numerical model of the castellated beam 225x75x7x5 mm span of 1 meter with a hexagonal hole openings using the finite element method are verified first by the results of an experimental model. Geometry, material properties and loading both models are the same. After the numerical model results closer to experimental model results, then made 9 other castellated beam numerical models with variations in the dimensions of the hexagonal holes. The results showed that the higher and the wider hole so the larger tensile stress and compressive stress. Deflection is proportional to tensile stress and compressive stress. The smaller the ratio of the hole and holes number so the smaller the shear stress.

Key Words: *castellated beam, finite element method*

1. PENDAHULUAN

Teknologi konstruksi menggunakan balok kastela saat ini berkembang pesat, kelebihan menggunakan balok kastela dibandingkan balok baja profil I *wide flange* (WF) adalah momen inersia nya menjadi lebih besar dikarenakan penambahan tinggi balok tanpa menambah berat sendiri balok sehingga kekakuan lenturnya menjadi lebih tinggi. Kelebihan kedua adalah sisi estetika dari lubang heksagonal hasil dari modifikasi, selain itu lubang tersebut bisa dimanfaatkan sebagai tempat instalasi mekanikal-elektrikal. Selain memiliki kelebihan balok kastela juga memiliki kelemahan, yaitu terhadap gaya geser dan tekuk akibat lubang hasil modifikasi tersebut.Untuk mereduksi kelemahan tersebut diperlukan batasan-batasan dalam memodifikasi balok kastela terutama perilaku balok kastela akibat variasi dimensi lubang heksagonal hasil modifikasi.

Sistem pembuatan balok kastela adalah pemotongan pada bagian badan balok baja I biasa dengan pola *zigzag*, kemudian kedua potongan tersebut diangkat dan disatukan dengan pengelasan. Modifikasi ini membuat tinggi balok lebih tinggi dari tinggi awal. Sistem pembuatan balok kastela dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Pola potongan dan penggabungan balok kastela (Boyer, 1964)

Dengan adanya bukaan lubang pada badan, perilaku balok kastela akan berbeda dengan balok tanpa adanya bukaan. Kerdal dan Nethercott (1984)

menentukan bahwa terdapat tujuh mode kegagalan dari balok kastela :

1. Formasi dari mekanisme Vierendeel
2. Tekuk Lateral-Torsi dari Web Post
3. Buckling Lateral-Torsi dari keseluruhan bentang
4. Buckling Web Post
5. Buckling pada Lower Tee atau Upper Tee
6. Kegagalan pada sambungan Las
7. Formasi dari mekanisme lentur

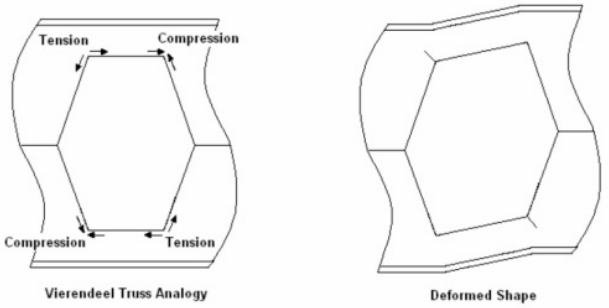
Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana mengetahui perilaku balok kastela bentang 1 meter dengan berbagai variasi dimensi lubang heksagonal yang sesuai standar di pasaran dengan menggunakan metode elemen hingga.

Tujuan penelitian adalah mengetahui perilaku balok kastela dengan berbagai variasi dimensi lubang heksagonal menggunakan metode elemen hingga sehingga bisa didapatkan batasan-batasan dalam merancang balok kastela tersebut ditinjau dari kelemahan dan kelebihan akibat modifikasi balok tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

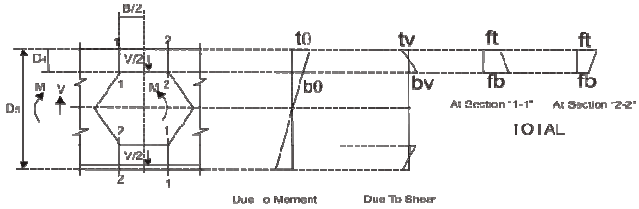
(1) Balok Kastela

Menurut Boyer (1964) bahwa balok kastela berperilaku seperti *Vierendeel Truss,* dimana pada daerah tepi lubang heksagonal tersebut terjadi gaya tarik dan ditepi lain terjadi gaya tekan, sehingga deformasi yang terjadi seperti apa yang terjadi pada *truss*. Analogi *Vierendeel Truss* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 di bawah ini :



Gambar 2. Analogi *Vierendeel Truss* pada balok kastela (Boyer, 1964)

Menurut Boyer (1964) tegangan pada serat longitudinal dipengaruhi oleh momen lentur dan gaya geser balok. Diagram tegangan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini :



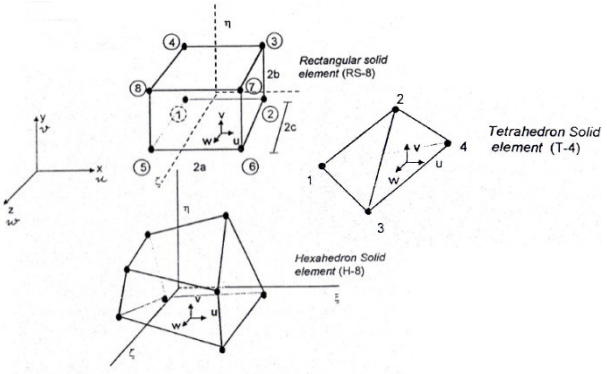
Gambar 3.Tegangan yang terjadi pada daerah lubang balok (Boyer, 1964)

(2) Metode Elemen Hingga

Dalam analisis struktur metode elemen hingga, elemen sangat mempengaruhi perhitungan, dalam penelitian ini balok kastela di idealisasikan sebagai elemen 3 dimensional solid dikarenakan mempunyai sayap yang lebar dan terbuat dari material solid baja.

Menurut Suhendro (2002), jenis elemen pada 3-dimensional solid yang paling banyak digunakan adalah 3 macam yaitu :

a. Element Rectangular Solid (RS-8), bentuk elemen ini adalah sepertti bata (*brick*) yang mempunyai titik nodal minimal 8 buah. Elemen ini digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang beraturan saja karena bentuk nya yang menyerupai kubus.
b. Elemen Hexahedron Solid (H-8), elemen ini adalah pengembangan dari elemen Rectangular Solid (RS-8), mempunyai 6 sisi (*hexahedron side*) tapi bentuknya tidak berbemtuk kubus sempurna. Elemen ini digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang agak beraturan saja.
c. Elemen Tetrahedron Solid (T-4), elemen ini mempunyai 4 sisi (*Tetrahedron side*), elemen ini cocok digunakan untuk menganalisis bentuk struktur yang tidak beraturan. Dalam peneltian ini elemen ini yang dipakai untuk meng idealisasikan struktur balok kastela dengan bukaan atau lubang heksagonal yang bentuknya tidak beraturan. Gambar elemen 3 dimensional solid dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini :



Gambar 4. Elemen 3 dimensional solid (Suhendro, 2002)

3. METODOLOGI

Secara umum metode penelitian ini dibagi tiga tahap, yaitu :

1. Membuat satu model numeris balok kastela dengan bukaan lubang heksagonal menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ANSYS V.10. Hasil analisis model tersebut berupa tegangan-tegangan, defleksi dan beban ultimit yang terlebih dahulu diverifikasi dengan hasil model eksperimen dengan geometri, properties material dan setting pengujian yang sama.
2. Setelah hasil keduanya konvergen kemudian dibuat 9 model numeris lain dengan penampang, bentang, propertis material dan setting pembebanan yang sama menggunakan berbagai variasi dimensi lubang heksagonal sesuai standar dari produsen baja yang ada di pasaran.
3. Menganalisis perilaku hasil pemodelan berupa tegangan tarik maksimum, tegangan tekan maksimum, tegangan geser maksimum dan defleksi maksimum.

(1) Metode Eksperimental

Benda uji

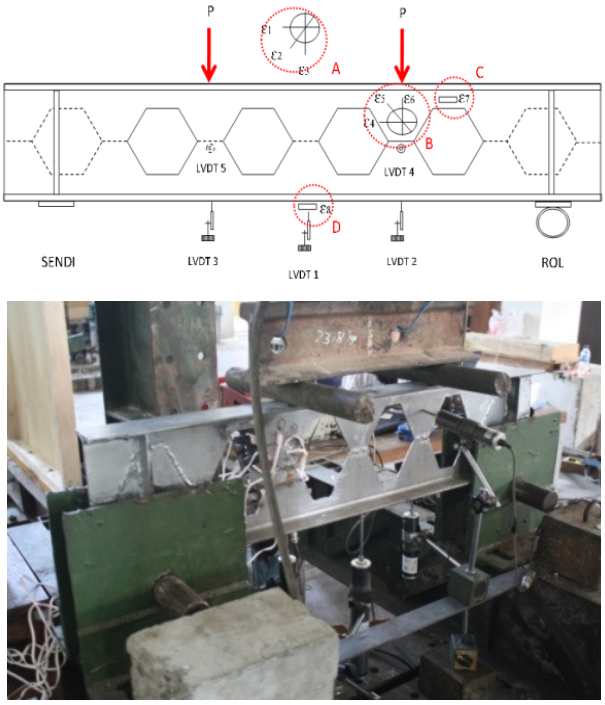
a. Dimensi balok kastela yang digunakan adalah 225x75x7x5 mm dengan dimensi balok sebelum dimodifikasi 150x75x7x5 mm, menggunakan standar dimensi lubang heksagonal produsen baja di Indonesia. Alasan digunakannya dimensi tersebut adalah faktor literatur yang digunakan, persediaan di pasaran dan faktor ekonomis.
b. Bentang balok kastela yang digunakan adalah sekitar 1 meter atau untuk bentang pendek.
c. Perletakan yang digunakan adalah sendi dan rol dan di bagian badan balok yang berada di atas perletakan dipasang pengaku atau *stiffener*.
d. Idealisasi sambungan las *web post* pada pemodelan numeris adalah sempurna sedangkan pada model eksperimen sesuai di lapangan

Alat dan *Setting Up* benda uji eksperimen :

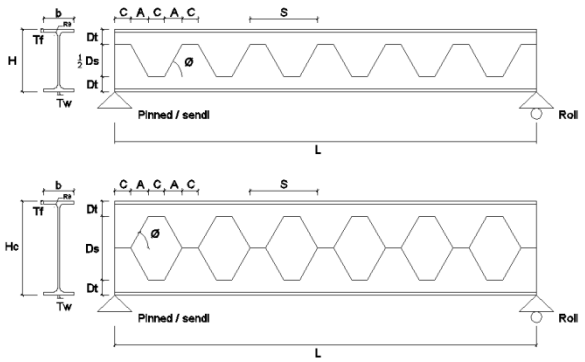
a. Untuk mengetahui regangan dan menghitung tegangan yang terjadi pada balok kastela dipasang Strain Gauges dan Rectangular Rosette pada 4 titik. Titik A pada sayap atas bagian tengah, titik B pada bagian Web Post, titik C pada bagian Upper Tee atau Stem, dan titik D pada sayap bawah bagian tengah.
b. Untuk pembebanan pada balok kastela dipasang 2 titik dengan Hydraulic jack, untuk mengukur beban yang akurat dari Hydraulic jack digunakan Load Cell, dan beban tersebut direkam dan dibaca oleh Data Logger.
c. Untuk mengetahui lendutan yang t terjadi pada balok kastela dipasang LVDT (Linear Variable Differential Transformer) pada 5 titik. Titik 1 dipasang pada sayap bawah bagian tengah, titik 2 dan 3 pada sayap bawah tepat di bawah pembebanan dan titik 4 dan 5 pada Web Post tepat di bawah pembebanan.
d. Pembebanan yang dilakukan pada dua titik dan diletakkan di atas badan balok yang tidak ada lubangnya karena paling efektif (Blodgett, 1982).
e. Bukaan lubang yang berada di dekat perletakan ditutup kembali dengan baja supaya tidak terjadi kegagalan awal pada perletakan.

(2) Metode Numeris

Pemodelan numeris yang dibuat untuk studi parameter dimensi lubang heksagonal dibuat sama dengan benda uji eksperimen yaitu balok baja dengan ukuran 225x75x7x5 mm yang menggunakan standar dimensi lubang produsen baja. Variasi parameter input yang digunakan adalah tinggi lubang (Ds), tinggi stem (Dt), dan lebar lubang (c dan a). Parameter input tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 5. Gambar dan poto Setting pengujian balok kastela eksperimen (Muhtarom, 2012; Pradipta, 2012)



Gambar 6. Parameter variasi dimensi lubang heksagonal

Tabel 1. Parameter variasi dimensi lubang heksagonal

No. Variasi	ds (mm)	dt (mm)	c (mm)	a (mm)	s (mm)	L (mm)
1*	154.00	35.50	38.50	44.66	166.32	1036.42
2	105.00	60.00	26.25	30.45	113.40	1046.85
3	105.00	60.00	31.50	36.75	136.50	987.00
4	105.00	60.00	42.00	42.00	168.00	1050.00
5	150.00	37.50	37.50	43.50	162.00	1009.50
6	150.00	37.50	45.00	52.50	195.00	1020.00
7	150.00	37.50	60.00	60.00	240.00	1020.00
8	195.00	15.00	48.75	56.55	210.60	1101.75
9	195.00	15.00	58.50	68.50	254.00	1074.50
10	195.00	15.00	78.00	78.00	312.00	1014.00

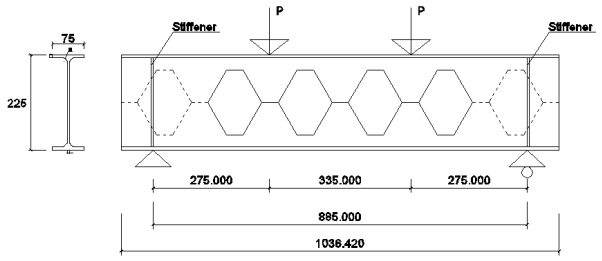
Ket : * untuk verifikasi dengan hasil eksperimen

Perhitungan variasi tinggi lubang :
Syarat : Ds = 0.7 h s/d 1.3 h
h = 150 mm hc = 225 mm dan hc = Ds + 2Dt

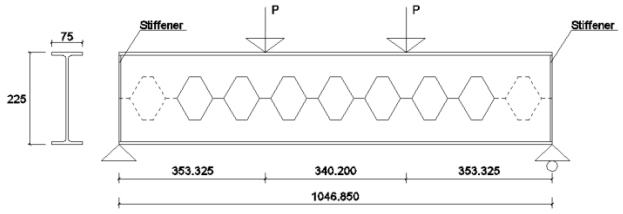
1. Untuk Ds = 0.7 h
   Ds = 0.7 x h = 0.7 x 150 = 105 mm
   Dt = ½ x (hc – Ds) = ½ (225-105) = 60 mm
2. Untuk Ds = 1 h
   Ds = 1 x h = 1 x 150 = 150 mm
   Dt = ½ x (hc – Ds) = ½ (225-150) = 37.5 mm
3. Untuk Ds = 1.3 h
   Ds = 1.3 x h = 1.3 x 150 = 195 mm
   Dt = ½ x (hc – Ds) = ½ (225-195) = 15 mm

Perhitungan variasi lebar lubang :
Syarat : S = 1.08 Ds s/d 1.6 Ds

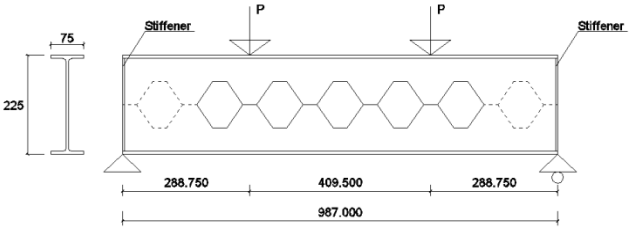
1. Untuk S = 1.08 Ds
   S = 2A + 2C, A = 0.29 Ds, dan C = 0,25 DS
2. Untuk S = 1.3 Ds
   S = 2A + 2C, A = 0.35 Ds, dan C = 0,30 DS
3. Untuk S = 1.6 Ds
   S = 2A + 2C, A = 0.40 Ds, dan C = 0,40 DS



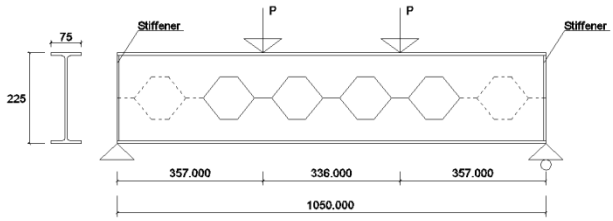
Variasi 1



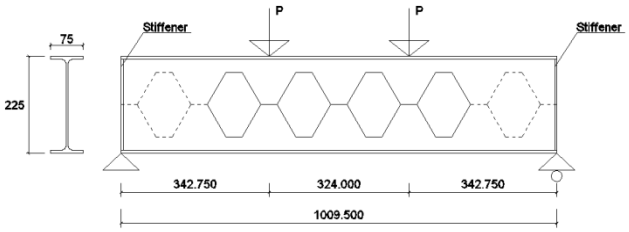
Variasi 2



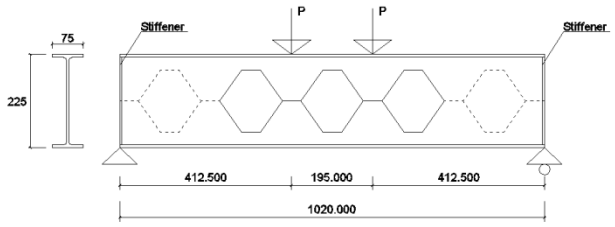
Variasi 3



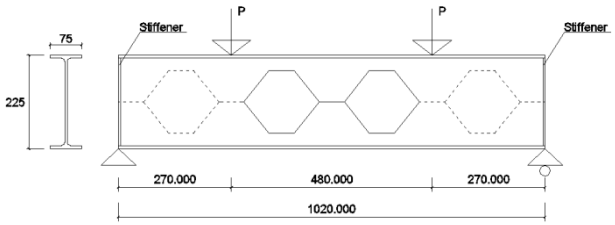
Variasi 4



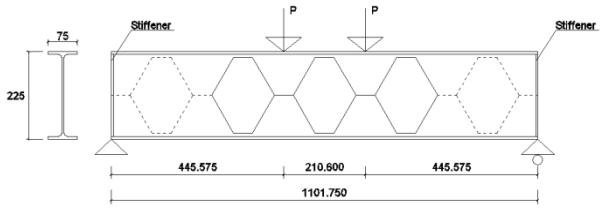
Variasi 5



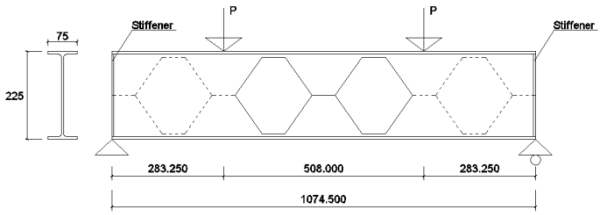
Variasi 6



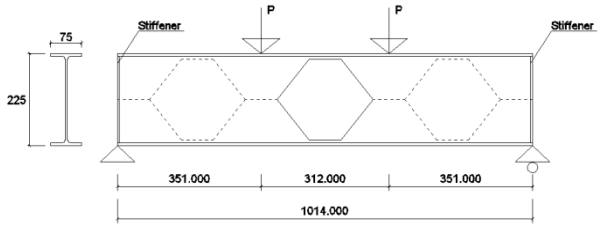
Variasi 7



Variasi 8



Variasi 9



Variasi 10

Gambar 7. Sepuluh variasi dimensi lubang heksagonal model numeris balok kastela

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

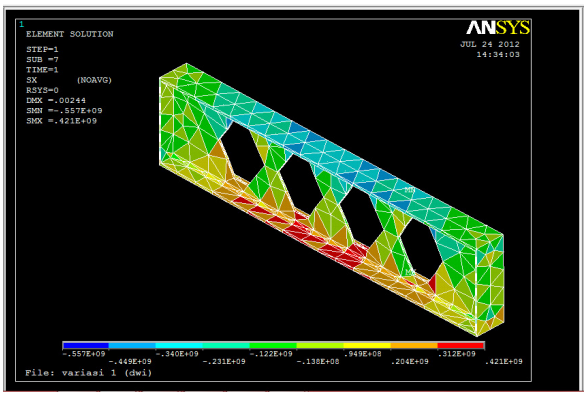
(1) Perbandingan Hasil Satu Model Numerik dengan Hasil Model Eksperimen

Hasil analisis pemodelan numeris menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ANSYS V.10 dan hasil eksperimen balok kastela dengan dimensi 225x75x7x5 mm dan bentang 1 meter dapat dilihat pada Gambar 8, Gambar 9, dan Tabel 2 di bawah ini :

Tabel 2. Perbandingan hasil model eksperimen dengan hasil model numeris

Model	Tegangan max. (MPa)	Defleksi (mm)	Beban Ultimit (kN)
Eksperimen	397.00	1.84	140.50
Numeris	423.00	2.44	145.00
selisih (%)	6.55	32.61	3.20

Gambar 8. Foto hasil pengujian balok kastela (Muhtarom, 2012; Pradipta, 2012)



Gambar 9.Output analisis model numeris balok kastela menggunakan perangkat lunak ANSYS V.10

Pembahasan:

Dari perbandingan hasil model eksperimen dengan model numeris diatas dapat dilihat bahwa beban ultimit yang didapat dari kedua model sudah mendekati yaitu, sebesar 140.5 kN dan 145 kN dengan persentase selisih 3.20%. Begitu juga dengan tegangan maksimum yang didapat yaitu, sebesar 397 MPa dan 423 MPa dengan persentase selisih 6.55%. Sedangkan pada defleksi yang terjadi hasil yang didapatkan agak berbeda yaitu, 1.84 mm pada model eksperimen dan 2.44 mm pada model numeris dengan persentase selisih diatas 10% yaitu 32.61%. Perbedaan tersebut disebabkan oleh terjadinya tekuk pada badan balok terlebih dahulu (*web buckling*) karena perlemahan las yang tidak sempurna pada sambungan *web post* sewaktu modifikasi pembuatan balok kastela di awal. Pada model numeris sambungan *web post* tersebut di idealisasikan sebagai las sempurna sehingga tidak terjadinya *web buckling* terlebih dahulu dan defleksi yang terjadi lebih besar dari model eksperimen.

Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa model numeris yang dibuat sudah mendekati (konvergen) hasil model eksperimen. Dengan demikian model numeris tersebut dapat digunakan

sebagai dasar untuk membuat 9 variasi dimensi lubang heksagonal balok kastela lainnya.

(2) Hasil Model Numeris dengan Variasi Dimensi Lubang Heksagonal

Hasil analisis pemodelan numeris balok kastela dengan variasi dimensi lubang heksagonal menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ANSYS V.10 dapat silihat pada Tabel 3 di bawah ini :

Tabel 3. Rekapitulasi hasil analisis variasi dimensi lubang heksagonal menggunakan metode elemen hingga

Variasi	σ tarik (MPa)	σ tekan (MPa)	σ geser (MPa)	Defleksi (mm)	Rasio Lubang (%)	Jumlah lubang (buah)
1*	381	423	340	2.44	25.89	4
2	478	459	451	3.89	18.86	7
3	379	403	329	2.61	17.21	5
4	478	486	327	3.63	15.92	4
5	524	529	334	3.51	22.82	4
6	577	583	338	4.00	20.39	3
7	356	358	192	2.53	16.73	2
8	704	724	436	5.09	26.50	3
9	446	449	190	2.85	21.85	2
10	567	550	196	3.27	14.22	1

Ket : * untuk verifikasi dengan hasil eksperimen

Pembahasan :

1. Semakin tinggi lubang maka semakin besar tegangan tarik dan tekan yang terjadi. Ini bisa terlihat pada variasi 5,6,8 dan 10.
2. Semakin lebar lubang maka semakin besar tegangan tarik dan tekan yang terjadi. Ini bisa terlihat pada variasi 5,6,8 dan 10.
3. Semakin dekat jarak antar 2 titik pembebanan tehadap tengah bentang maka semakin besar tegangan yang terjadi. Ini bisa terlihat pada variasi 5,6,8, dan 10.
4. Semakin jauh jarak antar 2 titik pembebanan terhadap bentang tengah maka defleksi yang terjadi semakin kecil. Ini bisa terlihat pada variasi 1,3,7 dan 9.
5. Defleksi yang terjadi berbanding lurus dengan nilai tegangan tarik dan tegangan tekan yang terjadi. Ini bisa terlihat pada variasi 2,4,5,6,8 dan 10.
6. Semakin kecil rasio lubang dan semakin sedikit jumlah lubang yang dibuat maka semakin kecil tegangan geser yang terjadi. Ini bisa terlihat pada variasi 7,9 dan 10.

5. KESIMPULAN

(1) Kesimpulan

Bedasarkan hasil dan pembahasan di atas maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Model numerik hasil analisis metode elemen hingga lebih kaku dibandingkan dengan model eksperimen. Hal ini disebabkan pengelasan pada model numeris di idealisasikan lebih sempurna dibandingkan model eksperimen.
2. Bedasarkan studi variasi dimensi lubang heksagonal didapatkan hasil bahwa semakin tinggi lubang dan lebar lubang maka semakin besar tegangan tarik dan tekan yang terjadi dan nilai defleksi yang terjadi berbanding lurus dengan nilai tegangan tarik dan tegangan tekan tersebut.
3. Bedasarkan studi variasi dimensi lubang heksagonal didapatkan hasil bahwa Semakin kecil rasio lubang dan semakin sedikit jumlah lubang yang dibuat maka semakin kecil tegangan geser yang terjadi.

(2) Rekomendasi

Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya adalah kualitas pengelasan dalam modifikasi pembuatan balok kastela untuk model eksperimen harus bermutu baik agar didapatkan hasil verifikasi dengan model numeris menggunakan metode elemen hingga lebih konvergen.

REFERENSI

1) Apriyatno, Henry, 2000, Pengaruh Rasio Tinggi dan Tebal Badan Balok Castella Pada Kapasitas Lentur, *Master Thesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
2) Blodgett. O.W., 1982., *Design of Welded Structures*, The - James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Vol. 14, Cleveland, Ohio.
3) Boyer J.P., 1964, *Castellated Beams-New Developments,* AISC National Engineering Conference, Omaha.
4) Dervinis, B., Kvedaras, A.K., 2008, Investigasi of Rational Depth of Castellated Steel I-Beam*, Journal of Civil Engineering and Management,* vol. 14. No. 3 pp 163-168.
5) Kerdal. D., Nethercott. D.A., 1984, Failure Modes of Castellated Beams, *Journal of Construction Steel Research* 4, pp. 295-315.
6) Moaveni, Saeed., 2003, *Finite Element Analysis : Theory And Application With ANSYS,* Pearson Education Inc., New Jersey.
7) Muhtarom, A., 2012, Optimasi Dimensi Lubang Heksagonal Balok Kastela Bentang Pendek Dengan Metode Artificial Neural Network, *Master Thesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
8) Nakasone, Y., Yoshimoto, S., Stolarski T. A., 2006, *Engineering Analysis With ANSYS Software,* Elsevier Butterworth-Heinemann, Vol. 1, Burlington, UK.
9) Pirmoz, A., Daryan, A.S., 2008, *Nonlinear Behavior of Castellated Beams Subjected to Moment Gradient Loading*, Special Report, Civil Engineering Dept., Toosi University of Technology.

10) Pradipta, D.A., 2012, Perilaku Geser Balok Komposit *Castellated* Bukaan Heksagonal Dengan Selimut Mortar *Master Thesis*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
11) Salmon, C.G., 1996, *Struktur Baja Desain dan Perilaku*, Gramedia, Jakarta.
12) Showkati H., 2008, Lateral-Torsional Bucklingof Castellated Beam, *Iranian Journal of Science & Technology*, vol. 32, No. B2, pp 153-156.
13) Showkati H., Kohnehpooshi O., 2009, Numerical Modeling and Struktur Behavior of Elastic Castellated Section, *European Journals of Scientific Research*, Vol. 31. No. 2, pp. 306-318.
14) Suhendro, Bambang, 2000, *Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya*, UGM, Yogyakarta.
15) Castellated Beam <http://www.macsteel.co.za > (March, 5, 2015).
16) Castellated Shape Honey Comb <http://www.grdsteel.com> (March, 12, 2015).