

## PERILAKU BALOK KASTELA BENTANG PENDEK DENGAN VARIASI BUKAAN CIRCULAR, DIAMOND DAN HEXAGONAL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ahmad Muhtarom<sup>1,\*</sup>, Yakni Idris<sup>2</sup> dan Welly<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya  
(Jl. Raya Prabumulih - Km 32 Indralaya, Ogan Ilir, Sumatera Selatan)

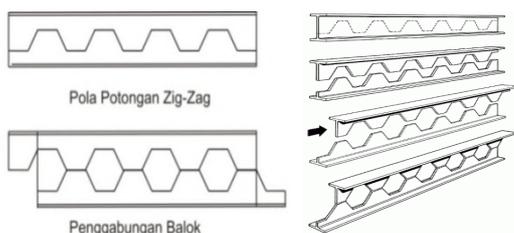
### Abstract

Opening modification of castellated beam now has varied including circular, diamond and hexagonal, in the selection of openings required data behavior as the basis of planning according to the desired conditions. The purpose of this study is to know the behavior of short-span castellated beam with variations of circular, diamond and hexagonal openings using finite element method. The geometry of the 1 meter span castellated beam used 225x75x7x5 mm. The method used to create a numerical model castellated beam with circular openings that are analyzed using finite element method then verified with experimental model results with geometry, material and loading the same. After the numerical model result closer to the experimental model, then created 5 variations of the geometry of numerical model openings for each variations. The results showed that the variation in the height and width of the same openings in the three types of openings obtained for the circular opening beams have greater deflection than the others because of the larger holes ratio. For diamond opening beams, the ultimate load is greater than the other because the ratio of the smaller holes ratio and for the hexagonal opening beams has the smallest deflection and stress than the others.

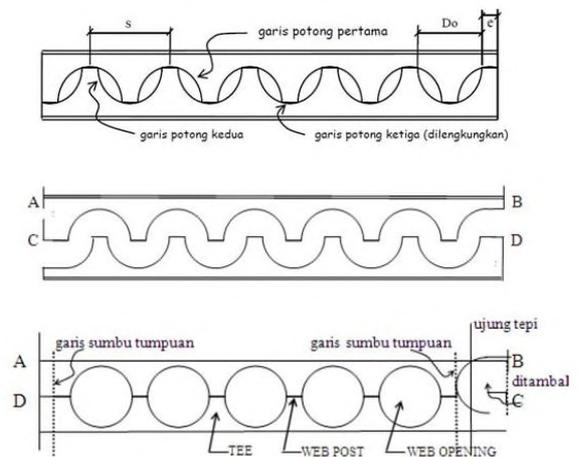
**Key Words:** *castellated beam, deflection, stress, ultimate load*

### 1. PENDAHULUAN

Teknik modifikasi awal balok kastela adalah memotong badan balok baja I WF menggunakan pola zigzag, lalu salah satu potongan tersebut diangkat dan disatukan kembali dengan potongan yang satunya dengan cara pengelasan. Hasil modifikasi menjadikan tinggi balok lebih tinggi dari balok awal. Tujuan modifikasi ini adalah meningkatkan nilai lentur aksial, momen inersia, dan modulus penampang (knowles, 1991). Metode modifikasi balok kastela dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Seiring waktu bentuk bukaan balok kastela kian bervariasi, tidak hanya dimanfaatkan sebagai instalasi mekanikal-elektrikal tapi juga dijadikan sebagai nilai estetika balok.



Gambar 1. Metode modifikasi balok kastela paling awal (Boyer, 1964)



Gambar 2. Pola potongan dan penggabungan balok kastela bukaan circular (Suharjanto, 2011)

Variasi bukaan tersebut diantaranya bentuk *circular* (lingkaran) dan *diamond* (wajik). Estetika bukaan balok kastela terlihat pada balok yang terekspose terbuka, sehingga variasi bukaan menjadi daya tarik tersendiri suatu bangunan.

Menurut Katili (2008) metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik yang bisa digunakan untuk menyelesaikan mekanika struktur. Metode ini adalah membagi struktur menjadi elemen

yang lebih kecil-kecil untuk mendapatkan pendekatan tegangan dan perpindahan suatu struktur. Persamaan umum metode elemen hingga (Suhendro, 2000):

$$[K] \{U\} = \{F\} \quad (1)$$

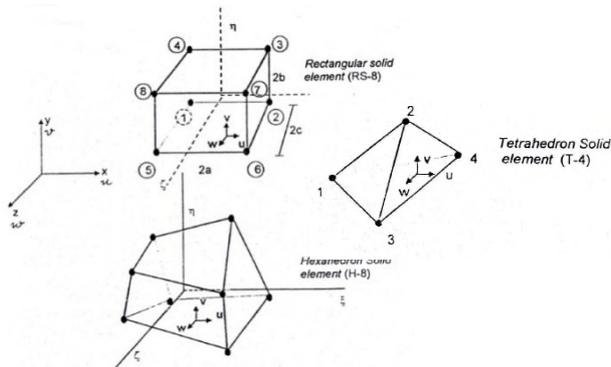
dimana :

[K] : Matriks kekakuan elemen

{U} : Matriks perpindahan elemen

{F} : Matriks gaya yang bekerja pada elemen

Pemilihan elemen yang sesuai adalah syarat penting dalam perhitungan metode elemen hingga, idealisasi elemen yang digunakan untuk balok kastela adalah elemen 3 dimensional solid karena materialnya solid dari baja dan bersayap lebar.



Gambar 3. Elemen 3 dimensional solid (Suhendro, 2000)

Dari uraian latar belakang di atas perlu dilakukan penelitian mengenai perilaku balok kastela dengan variasi bukaan *circular*, *diamond* dan *hexagonal* menggunakan metode elemen hingga dengan tujuan untuk mengetahui perilaku balok kastela dengan 3 jenis variasi bukaan tersebut untuk mendapatkan data perilaku sebagai dasar pemilihan dan perencanaan balok kastela sesuai kondisi yang diinginkan.

Jamadar dan Kumbhar (2015) melakukan studi parameter terhadap balok kastela dengan bukaan *circular* dan bukaan *diamond* hasil modifikasi dari I WF 100x60x5x5 mm dengan bentang 900 mm dan pembebanan 2 titik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada bukaan *circular* beban maksimum terjadi 32.5 kN pada bukaan 0.73 kali dari tinggi badan balok dengan rasio  $s/d_o=1.4$  dan rasio  $d/d_o=1.41$ . Pada bukaan *diamond* beban maksimum yang terjadi 34 kN pada bukaan 0.67 kali dari tinggi badan balok dengan rasio  $s/d_o=1.4$  dan rasio  $d/d_o=1.5$ .

Wakchaure et al. (2012) melakukan penelitian balok kastela dengan variasi ketinggian bukaan *hexagonal* dengan pembebanan 2 titik. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa beban maksimum terjadi pada bukaan 0.6 kali dari tinggi web balok dan dengan peningkatan ketinggian bukaan maka kegagalan *Vierendeel* menjadi dominan.

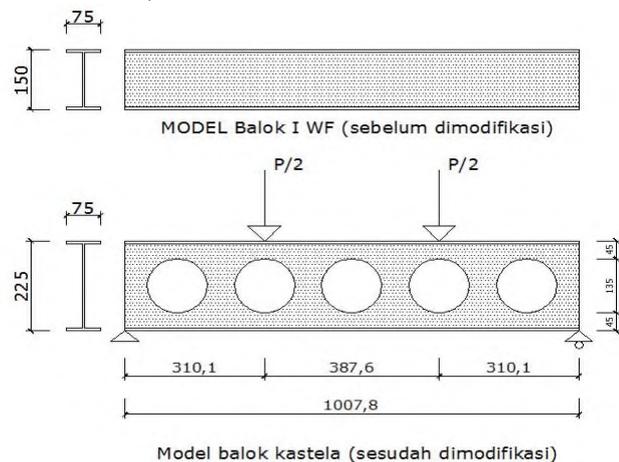
Erdal dan saka (2013) melakukan penelitian beban ultimit balok kastela dengan bukaan *circular* untuk mendapatkan kapasitas yang optimal

menggunakan metode elemen hingga. hasil penelitian menyatakan bahwa terjadi mekanisme *Vierendeel* jika beban dipasang diatas bukaan dan terjadi *web post buckling* jika beban dipasang diantara 2 bukaan lubang.

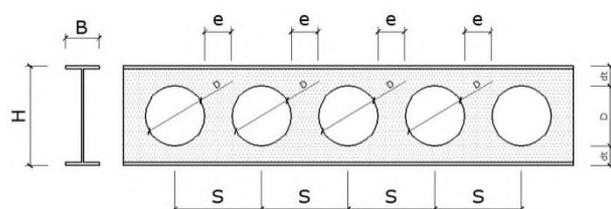
## 2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dilakukan dua tahapan sebagai berikut :

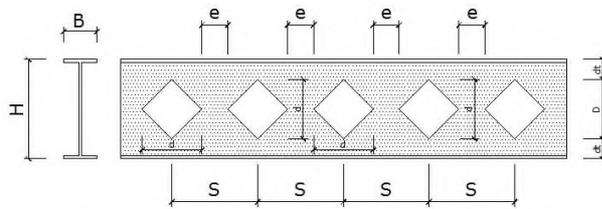
1. Membuat satu model numerik balok kastela untuk verifikasi dengan model eksperimen. Data geometri, properti material dan pembebanan kedua model disamakan. Model eksperimen yang dijadikan untuk verifikasi adalah model balok kastela bukaan *circular* Suharjanto (2011). Geometri balok adalah 225x75x7x5 mm hasil modifikasi balok I WF 150x75x7x5 mm dengan bentang 1007.8 mm. properti material adalah mengacu standar JIS G 3101 SS400 (sesuai standar baja yang dijual di pasaran). Untuk pembebanan adalah beban 2 titik (lentur murni) dan sistem struktur adalah balok sederhana (*simple beam*). Parameter verifikasi yang digunakan adalah beban ultimit dan tegangan geser maksimum yang terjadi. Model numeris yang dibuat dalam tahapan ini dapat dilihat pada Gambar 4.
2. Membuat variasi model numeris balok kastela sebanyak 5 buah untuk bukaan *circular*, *diamond* dan *hexagonal* dengan batasan yang disyaratkan produsen baja. Variasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7 serta Tabel 1 .



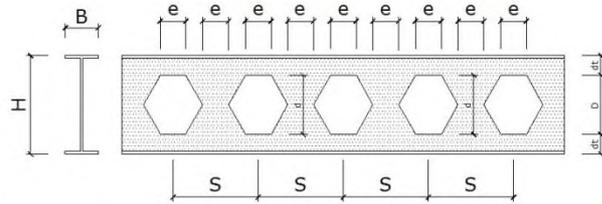
Gambar 4. Model numeris yang dibuat untuk verifikasi dengan model eksperimen.



Gambar 5. Geometri model numeris bukaan *circular*



Gambar 6. Geometri model numeris bukaan *diamond*



Gambar 7. Geometri model numeris bukaan *hexagonal*

Tabel 1. Geometri model numeris bukaan *circular*, *diamond* dan *hexagonal*

Model	H (mm)	D (mm)	S (mm)	e (mm)	dt (mm)
Mod 1	225.00	135.00	193.80	58.80	45.00
Mod 2	225.00	155.00	186.00	31.00	35.00
Mod 3	225.00	127.50	191.25	63.75	48.75
Mod 4	225.00	162.00	196.00	34.00	31.50
Mod 5	225.00	180.00	225.00	45.00	22.50

3. Analisis hasil respon struktur untuk masing-masing variasi bukaan dengan parameter berupa: beban ultimit, defleksi dan tegangan maksimum yang terjadi. Dari hasil analisis tersebut kemudian disimpulkan perilaku dari masing-masing bukaan sebagai dasar pemilihan dan perencanaan balok kastela sesuai kondisi yang diinginkan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1) Hasil verifikasi hasil respon struktur model numeris dengan model eksperimen. Hasil verifikasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 2. Hasil verifikasi respon struktur model numeris dengan model eksperimen.

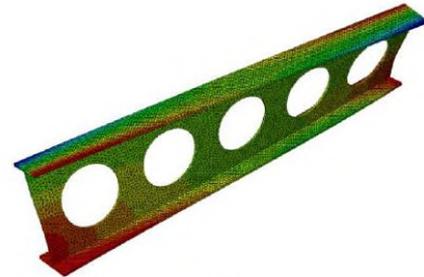
Model	Beban Ultimit (kN)	Tegangan Geser (MPa)
Eksperimen	79	340
Numeris	92.52	320.13
Selisih (%)	14.61	5.84

Dari respon struktur kedua model didapatkan hasil yang mendekati, yaitu selisih 14,61% untuk beban ultimit dan 5,84% untuk tegangan geser. Idealisasi pengelasan yang sempurna di model numeris dibandingkan model eksperimen menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi perilaku respon struktur.

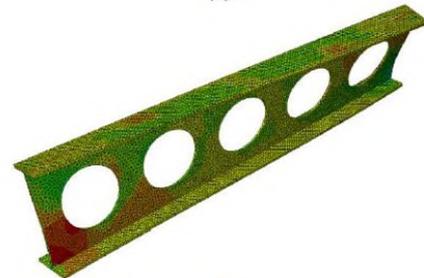
2) Hasil respon struktur variasi bukaan model numeris untuk *circular*, *diamond* dan *hexagonal*. Hasil respon struktur variasi bukaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 3. Hasil respon struktur untuk 5 model variasi bukaan *circular*

Model	Beban per titik (kN)	Defleksi (mm)	Tegangan (MPa)	Rasio lubang (%)
Mod 1	44.33	2.43	306.34	31.58
Mod 2	45.84	12.77	312.57	41.62
Mod 3	48.39	3.33	326.25	28.16
Mod 4	47.48	18.38	313.55	45.47
Mod 5	47.89	2.22	346.64	39.51
Rerata	46.79	7.83	321.07	37.27



(a)



(b)

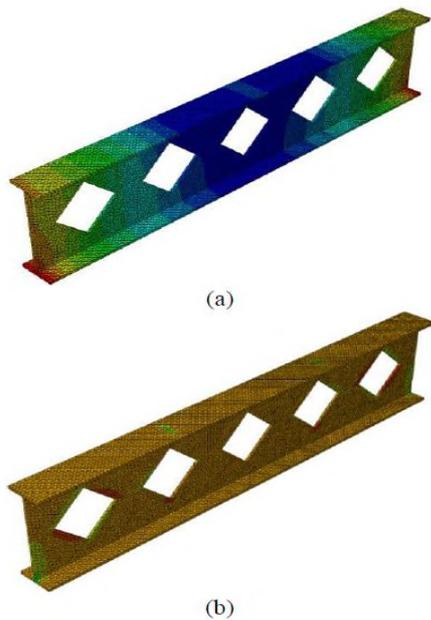
Gambar 8. Perilaku respon struktur balok kastela bukaan *circular* model 1 dengan metode elemen hingga. (a) defleksi (b) tegangan

Tabel 4. Hasil respon struktur untuk 5 model variasi bukaan *diamond*

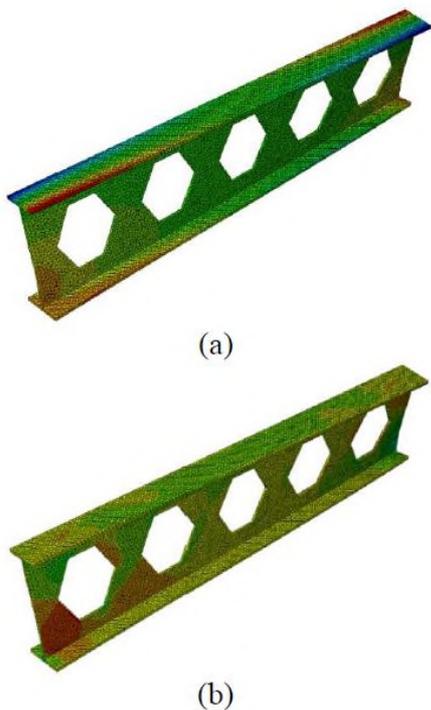
Model	Beban per Titik (kN)	Defleksi (mm)	Tegangan (MPa)	Rasio Lubang (%)
Mod 1	48.72	1.28	333.31	20.09
Mod 2	43.99	1.37	302.35	26.49
Mod 3	48.49	1.25	328.47	17.92
Mod 4	47.74	4.75	315.50	28.93
Mod 5	49.63	1.14	333.34	21.43
Rerata	47.71	1.96	322.59	22.97

Tabel 5. Hasil respon struktur untuk 5 model variasi bukaan *hexagonal*

Model	Beban per Titik (kN)	Defleksi (mm)	Tegangan (MPa)	Rasio Lubang (%)
Mod 1	46.26	2.95	253.38	28.85
Mod 2	47.45	1.88	327.51	34.43
Mod 3	42.74	1.34	290.28	26.88
Mod 4	47.52	1.88	318.39	35.01
Mod 5	48.27	1.30	328.60	26.79
Rerata	46.45	1.87	303.63	30.39

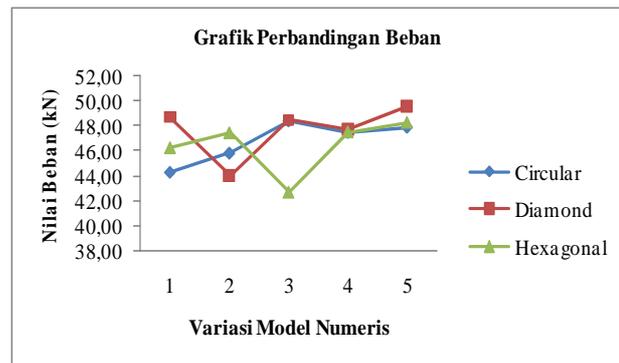


Gambar 9. Perilaku respon struktur balok kastela bukaan *diamond* model 1 dengan metode elemen hingga. (a) defleksi (b) tegangan

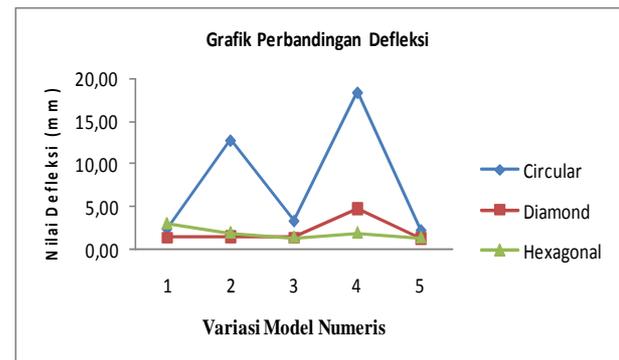


Gambar 10. Perilaku respon struktur balok kastela bukaan *hexagonal* model 1 dengan metode elemen hingga. (a) defleksi (b) tegangan

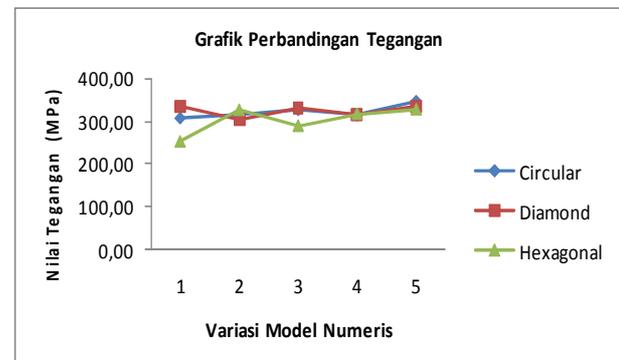
3) Analisis hasil dan pembahasan respon struktur untuk masing-masing variasi bukaan dengan parameter berupa: beban ultimit, defleksi dan tegangan maksimum yang terjadi. Grafik perbandingan untuk masing-masing respon struktur dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 11. Grafik perbandingan beban ultimit untuk variasi *circular*, *diamond* dan *hexagonal*.



Gambar 12. Grafik perbandingan defleksi untuk variasi *circular*, *diamond* dan *hexagonal*.



Gambar 13. Grafik perbandingan tegangan untuk variasi *circular*, *diamond* dan *hexagonal*.

#### Pembahasan:

- Pada bukaan *circular* terjadi perilaku defleksi yang cukup besar pada model 2 yaitu 12.77 mm dan pada model 4 yaitu 18.38 mm. Kondisi ini disebabkan oleh besarnya rasio lubang yaitu 41.62% (model 2) dan 45.47% (model 4).
- Pada bukaan *circular* model 3 memberikan perilaku beban ultimit yang paling maksimum yaitu 48.39 KN pertitik. Kondisi ini dipengaruhi jarak antar lubang (e) yang lebih lebar dari model lainnya yaitu 63.75 mm dan rasio lubang yang paling kecil yaitu sebesar 28.16%.
- Pada bukaan *diamond* perilaku beban ultimit minimum terjadi pada model 2 yaitu 43.99 kN.

Kondisi ini dipengaruhi dipengaruhi jarak antar lubang ( $e$ ) yang lebih pendek dari model lainnya yaitu 31 mm dan rasio lubang yang besar yaitu sebesar 26.49%.

- d. Pada bukaan *diamond* rasio lubang secara rata-rata lebih kecil yaitu 22.97% dibandingkan bukaan *circular* (37.27%) dan bukaan *hexagonal* (30.39%)
- e. Pada bukaan *hexagonal* perilaku defleksi secara rata-rata lebih kecil yaitu 1.84 mm dibandingkan bukaan *circular* (7.83%) dan bukaan *diamond* (1.96%).
- f. Model 5 pada ketiga jenis bukaan memberikan perilaku beban ultimit dan tegangan geser yang maksimum serta perilaku defleksi yang paling minimum. Kondisi ini dipengaruhi jumlah lubang yang lebih sedikit dan rasio lubang yang minimum yaitu, 21.43%.
- g. Secara keseluruhan rata-rata tegangan geser yang terjadi pada ketiga variasi bukaan tidak berbeda jauh yaitu *circular*: 321.07 MPa, *diamond*: 322.59 MPa dan *hexagonal* : 303.63 MPa.
- h. Secara keseluruhan rata-rata beban ultimit yang terjadi pada ketiga variasi bukaan tidak berbeda jauh yaitu *circular*: 46.79 kN, *diamond*: 47.71 kN dan *hexagonal*: 46.45 kN.
- i. Untuk pabrikan balok kastela, bukaan *hexagonal* adalah yang paling ekonomis karena bahan yang terbuang sangat minim.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil uraian pembahasan di atas dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Model 5 balok kastela bukaan *diamond* memberikan perilaku beban ultimit paling maksimum 49.63 kN per titik dan perilaku defleksi paling minimum 1.14 kN. Kondisi ini dipengaruhi jumlah lubang yang paling sedikit dan rasio lubang yang minimum yaitu 21.43%.
2. Perilaku defleksi yang terjadi paling besar terjadi pada balok kastela bukaan *circular*. Perilaku defleksi ini dipengaruhi oleh rasio lubang yang besar pada balok kastela.
3. Perilaku beban ultimit pada bukaan *circular*, *diamond* dan *hexagonal* memberikan besaran yang tidak berbeda jauh yaitu 46.79 kN, 47.71 kN dan 46.45 kN
4. Perilaku tegangan geser pada bukaan *circular*, *diamond* dan *hexagonal* memberikan besaran yang tidak berbeda jauh yaitu 321.07 MPa, 322.59 MPa dan 303.63 MPa.
5. Untuk pabrikan balok kastela, bukaan *hexagonal* adalah yang paling ekonomis karena bahan yang terbuang sangat minim.

#### DAFTAR PUSTAKA

- 1) Boyer, J.P. (1964). Castellated Beams-New Developments. AISC National Engineering Conference. Omaha.
- 2) Erdal F. and Saka M. P. (2013). Ultimate load carrying capacity of optimally designed steel circular beams. Journal of Constructional Steel Research. Vol. 80. pp. 355-368.
- 3) Jamadar, M. R. and Kumbhar P. D. (2015). Parametric Study of Castellated Beam with Circular and Diamond Shaped Opening. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.2. Issue 2.
- 4) Katili, I. (2008). Metode Elemen Hingga Untuk Skeletal. Raja Grafindo Persada. Jakarta
- 5) Khennane A. (2013). Introduction to finite element analysis using MATLAB and Abaqus. 1st Edition, CRC Press. New York.
- 6) Knowles, P.R. (1991). Castellated Beams. Proceeding of the Institution of Civil Engineers. Part 1. No. 90. pp 521-536.
- 7) Suharjanto. (2011). Kajian Kuat Geser Horizontal Circular Castellated Beam With and Without Adding Plates. Jurnal Teknik. vol. 1 No.2.
- 8) Suhendro, B. (2000). Metode Elemen Hingga dan Aplikasinya. Beta Offset. Yogyakarta.
- 9) Wakchaure, M.R. and Sagade, A.V. (2012). Finite element analysis of castellated steel beam. International Journal of Engineering and Innovative Technology. Vol.2. No.1. pp. 3744-3755.
- 10) Wakchaure, M.R., Sagade, A.V. and Auti, V.A. (2012). Parametric study of castellated beam with varying depth of web opening. International Journal of Scientific and Research Publication. Vol.2. No.8. pp. 2153-2160.

