

Optimasi Distribusi Lubang Pada Balok Baja Kastela

Windu Partono*, Sukamta, Siti Hardiyati, Listiyono Budi

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Abstrak

Balok baja kastela adalah profil baja yang dikembangkan dari profil I yang dipotong bagian badan dan disambung lagi sedemikian rupa sehingga membentuk lubang pada bagian badan. Bentuk lubang profil balok baja kastela pada umumnya adalah persegi enam (heksagonal). Pembuatan balok baja kastela perlu memperhatikan jarak antar lubang agar balok mempunyai kemampuan menahan beban tertinggi. Tulisan ini menyajikan hasil penelitian untuk menentukan jarak antar lubang yang optimum pada balok baja kastela dengan mempertimbangkan distribusi tegangan, deformasi, dan kelelahan pada balok tersebut. Penelitian diawali dengan perhitungan menggunakan metode Elemen Elemen Hingga (Finite Element Method /FEM) kemudian dilanjutkan dengan pengujian di laboratorium. FEM dilakukan untuk menentukan ukuran dan jarak antar lubang optimum pada balok kastela. Variasi sudut bukaan lubang dilakukan antara 45° sampai 70° . Hasil analisa FEM kemudian diujikan di laboratorium dengan ukuran dan jarak antar lubang optimum untuk mengevaluasi perbedaan hasilnya. Hasil penelitian menunjukkan lubang profil dengan kemiringan antara 45° sampai 70° sebaiknya dibuat dengan jarak antar lubang antara 0.1 sampai 0.25 dari tinggi profil balok kastela dengan distribusi lubang terbaik adalah antara 5 sampai 7 lubang per meter.

Kata kunci: baja kastela; FEM; jarak lubang; ukuran lubang

Abstract

[Optimum Hole Distributions of Castellated Steel Beams] A castellated steel beam is a beam profile, customized from I-beam which subjected to a longitudinal cut along its web following a specific pattern and reassembled. The most common form of castellated steel beam hole is hexagonal. To maximize the strength, one must determine optimum hole size and distance between holes. This paper presents the result of research to determine optimum distance between holes by considering stress distribution, deformation, and yield stress. The research was begun by using Finite Element Method (FEM) then tested in laboratory. FEM was taken to determine the optimum distance between holes. The analysis was done by conducting 45° to 70° opening slope holes. FEM analysis results were then evaluated by performing laboratory test using the optimum distance between holes. The results showed that the castellated steel beams with 45° to 70° opening slope holes should be made with an approximate distance between holes is 0.1 to 0.25 of the castella profile height and the best hole distribution is 5 to 7 holes for each meter.

Keywords: castellated steel beam; FEM; hole distance; hole size

1. Pendahuluan

Balok baja kastela adalah profil baja yang dikembangkan dari profil I yang dipotong pada bagian badan dan disambung lagi sedemikian rupa sehingga membentuk lubang di bagian badan. Bentuk lubang profil

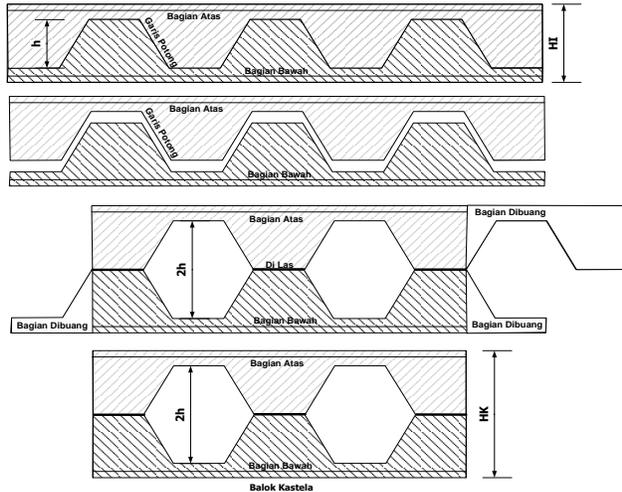
balok baja kastela pada umumnya adalah persegi enam (heksagonal). Bentuk lubang lain yang juga sering digunakan adalah bentuk lubang lingkaran, walaupun bentuk ini jarang digunakan karena proses pembuatan yang lebih rumit dibandingkan bentuk heksagonal. Secara umum proses pembuatan lubang heksagonal pada balok kastela dilakukan dengan urutan sebagaimana terlihat pada Gambar 1. Pada Gambar 1 terlihat ketinggian balok

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: windu_bapake_dila@yahoo.com

kastela “HK” lebih besar dibandingkan ketinggian balok asli “HI”.

Hasil modifikasi balok asli menjadi balok kastela menghasilkan pembesaran luas penampang dan momen inersia tetapi memperkecil kekakuan dari penampang. Pembesaran penampang dan momen inersia akan meningkatkan kemampuan balok dalam menahan beban



Gambar 1. Proses Pembuatan Balok Baja Kastela

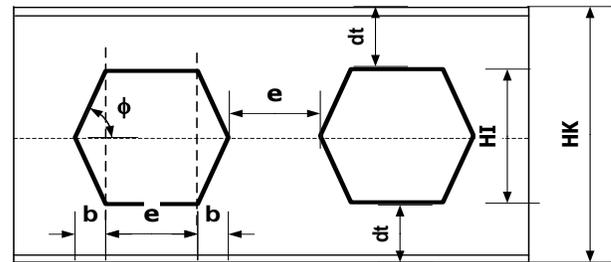
yang bekerja padanya. Kekakuan penampang yang makin mengecil menyebabkan balok kastela rawan terhadap peristiwa *buckling* (Ellobody, 2011; Ellobody, 2012; Jichkar dkk., 2014, Zirakian & Showkati, 2006). Potensi kegagalan yang sering terjadi pada balok kastela adalah pada bagian lubang atas (*web* atas), bawah (*web* bawah) dan pada bagian sambungan antara bagian atas dan bawah (Bedi & Pachpor, 2011; Redwood & Dermidjian 1998; Zaarour & Redwood, 1996). Kekuatan las yang lebih tinggi dibandingkan kekuatan bagian badan pada umumnya akan mengurangi potensi kegagalan pada bagian sambungan las (Altfillisch dkk, 1957; Toprac & Cooke, 1959).

Penentuan ukuran lubang, jarak antar lubang dan posisi lubang terhadap kedua sisi *flange* atas maupun bawah akan berpengaruh terhadap potensi timbulnya kerusakan lubang bagian atas dan bawah (Priyambodo dkk., 2014; Wakchaure dkk., 2012). Persoalan yang sering dijumpai pada pengembangan profil balok kastela adalah penentuan ukuran lubang dan jarak antar lubang yang paling baik dalam mereduksi potensi kegagalan balok kastela (Apriyatno, 2000; Priyambodo dkk., 2014; Wakchaure dkk., 2012). Banyak ahli konstruksi yang kurang memahami cara penentuan ukuran lubang dan jarak antar lubang optimum yang dapat diterapkan dalam mengembangkan profil balok kastela. Tulisan ini menyajikan hasil penelitian yang dilakukan untuk menentukan ukuran lubang dan jarak antar lubang optimum yang dapat dikembangkan pada balok baja

kastela. Penelitian dilakukan melalui dua tahap yaitu analisa model dengan bantuan komputer dengan menggunakan FEM untuk mendapatkan ukuran lubang dan jarak antar lubang optimum pada balok kastela (Jamadar & Kumbhar, 2014; Khennane, 2013; Srimani & Das, 1978; Suharjanto, 2004; Wakchaure & Sagade, 2012). Data ukuran lubang maupun jarak lubang optimum yang diperoleh dari hasil analisa komputer kemudian diverifikasi dengan melakukan pengujian laboratorium untuk menguji seberapa besar perbedaan hasil analisa komputer dan hasil pengujian laboratorium (Darwin, 2003; Hosain & Speirs, 1973)

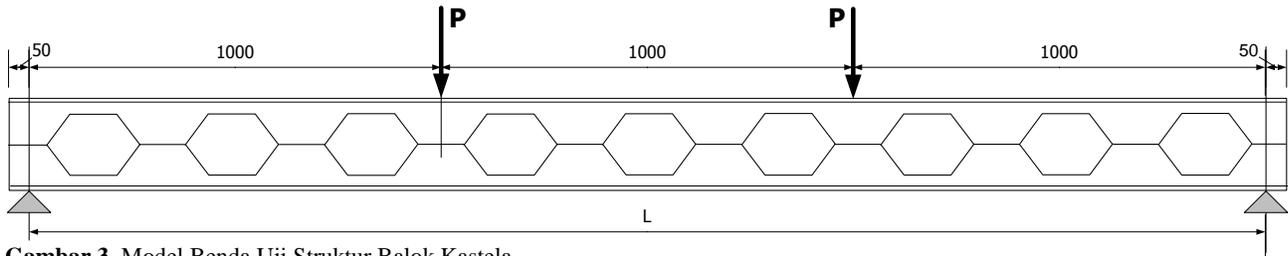
2. Bahan dan Metode

Model yang digunakan pada penelitian ini adalah model lubang heksagonal. Model balok kastela dikembangkan dari model asli profil baja IWF 150.75.5.7. dengan tinggi profil 150 mm, lebar *flange* 75 mm. Hasil pengembangan profil asli menjadi profil kastela menghasilkan ukuran profil 225.75.5.7. Tinggi profil balok kastela adalah 225 mm. Analisa model balok kastela untuk menentukan ukuran lubang dan jarak antar lubang dengan bantuan komputer dilakukan dengan menggunakan metode FEM. Ukuran lubang dan jarak antar lubang ditentukan dengan mengambil dua parameter “e” dan “φ” yang mencerminkan jarak antar lubang dan sudut kemiringan lubang (sudut bukaan lubang). Gambar 2 menunjukkan bentuk balok kastela dan ukuran lubang yang digunakan pada analisa dengan FEM. Tinggi lubang “HI” pada penelitian ini diambil sama dengan tinggi profil asli yaitu 150 mm. Tinggi profil balok kastela “HK” adalah 225 mm. Jarak pinggir lubang ke tepi profil “dt” adalah 37.5 mm.



Gambar 2. Model Lubang Balok Kastela

Model struktur yang digunakan pada penelitian ini adalah model balok di atas dua tumpuan dengan dua beban terpusat (Wang, Ma & Wang, 2014). Panjang balok ditentukan sebesar 3100 mm dengan jarak tepi balok ke sumbu tumpuan adalah 50 mm sehingga panjang bersih balok (jarak antara kedua tumpuan) pada model adalah 3000 mm. Gambar 3 menunjukkan bentuk model balok yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3. Model Benda Uji Struktur Balok Kastela

Pada Gambar 3 terlihat posisi setiap beban diambil sejarak 1000 mm terhadap posisi tumpuan. Optimasi bentuk lubang ditentukan dengan mengembangkan 6 model sudut kemiringan lubang “ ϕ ” masing-masing sebesar 45°, 50°, 55°, 60°, 65° dan 70°. Variasi ukuran e untuk setiap nilai ϕ ditentukan berdasarkan panjang balok kastela “L”, jumlah lubang per meter panjang benda uji “nl” dan sudut kemiringan ϕ . Untuk menentukan jarak e dan jumlah lubang ditentukan dengan rumus pendekatan sebagaimana terlihat pada Persamaan 1. Jarak e ditentukan sedemikian rupa agar posisi beban P terletak pada bagian badan (*web*) dan tidak pada bagian lubang. Jumlah lubang untuk setiap meter panjang untuk setiap variasi sudut ϕ dapat dilihat pada Tabel 1. Jumlah lubang per meter panjang “nl” pada setiap sampel balok sebagaimana terlihat pada tabel tersebut ditentukan dengan beda 3. Sebagai contoh untuk model dengan sudut $\phi=45^\circ$ maka jumlah lubang per meter yang dipilih ada 6 masing-masing dengan jumlah lubang 3, 6, 9, 12, 15 dan 18.

$$e = \left[\frac{L - \left(nl * 2 * \frac{HI}{2} \text{tg}\phi \right)}{2 * nl} \right] \quad (1)$$

Tabel 1. Nilai sudut ϕ , jumlah sampel dan jumlah lubang nl yang dipilih pada analisa dengan FEM

$\phi(^{\circ})$	Jumlah Sampel	nl
45	6	3 - 18
50	7	3 - 21
55	8	3 - 24
60	10	3 - 30
65	12	3 - 36
70	15	3 - 45

Analisa dengan FEM bertujuan untuk mendapatkan distribusi tegangan, nilai beban maksimum dan nilai defleksi maksimum sampai terjadinya leleh pertama. Analisa model komputer dilakukan dengan bantuan *Software Abaqus ver 6.10* yang dikembangkan oleh *Dassault System Simulia Corp.* pada tahun 2010

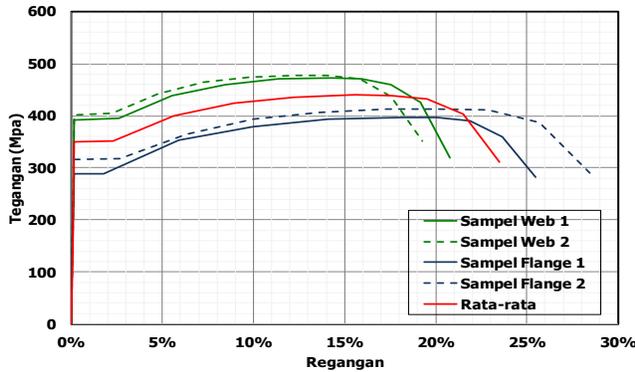
(Khennane, 2013). Analisa FEM pada model balok Kastela dilakukan dengan pendekatan jumlah nodal 40000 dan ukuran mesh 5 mm. Penentuan ukuran mesh pada analisa FEM dilakukan dengan metode konvergensi mesh dengan cara merubah ukuran mesh dari ukuran besar 25 mm sampai ukuran terkecil 4 mm sehingga diperoleh nilai defleksi dan tegangan Von Mises mencapai konvergen. Model optimum yang diperoleh dengan FEM kemudian dilanjutkan dengan membuat model benda uji di laboratorium. Pengujian laboratorium bertujuan untuk memverifikasi model analisa yang dikembangkan dengan bantuan komputer. Jumlah benda uji yang dibuat di laboratorium sebanyak 3 buah masing-masing dengan panjang balok 3100 mm dengan jarak antar tumpuan 3000 mm. Benda uji dibebani sampai terjadi kelelahan pertama. Sebelum dilakukan pengujian laboratorium maka dilakukan pengujian sampel baja yang diambil dari bagian *flange* dan *web* (Beer dkk., 2012; Craig, 2011; Gere & Goodno, 2009; Pytel & Kuisalaas, 2012;). Sampel material baja ditest dengan pengujian tarik untuk mendapatkan nilai σ_{yield} , $\sigma_{ultimate}$, $\sigma_{rupture}$, modulus elastisitas (E), regangan material baja (ϵ). Prosedur pengujian tarik baja sesuai dengan standar ASTM E 8M-04 *Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials*.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian material baja yang diambil pada bagian *flange* dan *web* dalam bentuk diagram tegangan-regangan dapat dilihat pada Gambar 4. Pada gambar terlihat nilai tegangan leleh dan tegangan putus pada bagian *flange* lebih besar dibandingkan dengan bagian *web*. Regangan yang diperoleh dari pengujian bagian *flange* lebih kecil dibandingkan dengan hasil pengujian pada bagian *web*. Dari hasil pengujian dan perhitungan rata-rata menunjukkan nilai σ_{yield} adalah 349.34 MPa, $\sigma_{ultimate}$ adalah 440.121 MPa dan Modulus Elastisitas (E) adalah 211629.3656 MPa.

Data material hasil uji tarik sampel baja kemudian digunakan sebagai input untuk analisa komputer dengan menggunakan *software Abaqus*. Hasil analisa yang diperoleh dari program *Abaqus* meliputi data distribusi

tegangan, nilai beban maksimum dan nilai defleksi maksimum.



Gambar 4. Diagram Tegangan Regangan Material Baja

Proses analisa untuk masing-masing model balok baja kastela lubang heksagonal dilakukan sebanyak dua kali, yaitu analisa plastis hingga model mencapai leleh pertama dan analisa elastis dengan nilai beban maksimum 10 KN. Kedua proses analisa tersebut akan menghasilkan dua data yang berbeda, yaitu data distribusi tegangan, nilai beban maksimum dan nilai defleksi maksimum pada kondisi leleh pertama serta pada kondisi pembebanan mencapai 10 KN. Tabel 2 menunjukkan hasil analisa dengan menggunakan komputer dengan pendekatan elastis. Pada tabel tersebut terlihat hubungan antara sudut kemiringan ϕ dan jumlah lubang n_l terhadap nilai P dan δ (deformasi vertikal) pada kondisi elastis. Nilai e dan n_l diambil berdasarkan nilai P/δ tertinggi untuk setiap nilai ϕ . Cara yang sama juga dilakukan pada kondisi leleh sebagaimana terlihat pada Tabel 3.

Jarak e pada Tabel 2 dan Tabel 3 merupakan jarak e yang diambil pada kondisi nilai P/δ optimum. Nilai P/δ optimum diperoleh dengan menggambarkan hubungan antara nilai e/HI dan P/δ . Ukuran HI yang merupakan ukuran tinggi lubang diambil sebesar 150 mm. Gambar 5 menunjukkan grafik hubungan antara e/HI dan P/δ untuk semua sampel dengan sudut bukaan ϕ antara 45° sampai 70° . Nilai P/δ sebagaimana terlihat pada Gambar 5 diperoleh dari hasil analisa semua sampel dalam kondisi elastis. Cara yang sama juga dilakukan pada kondisi leleh. Gambar 6 menunjukkan hubungan antara nilai e/HI dan P/δ untuk semua sampel dengan sudut bukaan ϕ antara 45° sampai 70° .

Dari semua grafik yang terlihat pada Gambar 5 maupun Gambar 6 terlihat sudut bukaan terbaik berkisar antara 45° sampai 50° . Dari kedua gambar tersebut juga terlihat nilai e/HI terbaik berkisar antara 0.1 sampai 0.3. Pada kondisi leleh sebagaimana terlihat pada Gambar 6 besar sudut bukaan ϕ terbaik berkisar antara 45° sampai

50° . Nilai e/HI pada kondisi leleh tersebut berkisar antara 0.1 sampai 0.3.

Pada Gambar 5 dan Gambar 6 terlihat nilai P/δ pada kondisi optimum untuk kondisi elastis maupun leleh untuk semua nilai ϕ berkisar antara 6000 sampai 6500.

Tabel 2. Hasil Perhitungan P dan δ untuk Berbagai Variasi Sudut ϕ dan Jumlah Lubang n_l pada Kondisi Elastis dengan Beban Maksimum 10 kN

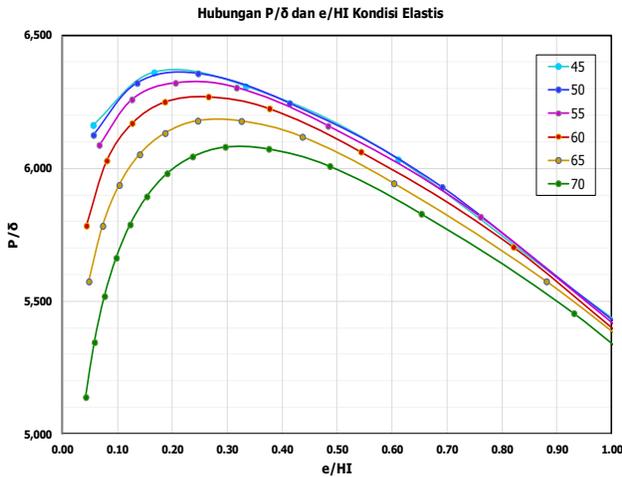
ϕ ($^\circ$)	e (mm)	n_l	Elastis	
			P (kN)	δ (mm)
45	50,0000	4	9,997	1,585
	25,0000	5		1,572
50	37,0000	5		1,573
	20,3333	6		1,582
55	47,5000	5		1,586
	30,8333	6		1,581
60	39,8333	6		1,594
	27,9286	7	1,599	
65	48,8333	6	1,618	
	36,9286	7	1,618	
70	56,3333	6	1,646	
	44,4286	7	1,644	

Tabel 3. Hasil Perhitungan P dan δ untuk Berbagai Variasi Sudut ϕ dan Jumlah Lubang n_l pada Kondisi Leleh

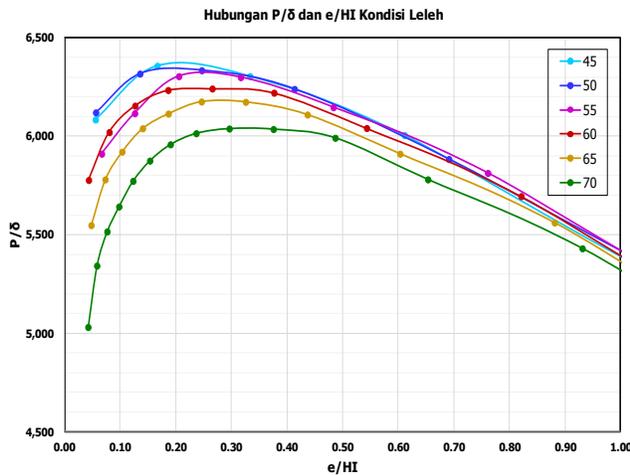
ϕ ($^\circ$)	e (mm)	n_l	Leleh	
			P (kN)	δ (mm)
45	50,0000	4	44,829	7,111
	25,0000	5	44,829	7,052
50	37,0000	5	67,168	10,604
	20,3333	6	50,432	7,983
55	47,5000	5	44,829	7,117
	30,8333	6	67,165	10,654
60	39,8333	6	67,163	10,761
	27,9286	7	67,162	10,774
65	48,8333	6	44,828	7,261
	36,9286	7	44,828	7,259
70	56,3333	6	44,828	7,427
	44,4286	7	67,156	11,121

Nilai P/δ pada kedua kondisi tersebut hampir sama. Untuk menentukan nilai sudut bukaan ϕ dan jarak e optimum juga dilakukan dengan melihat peningkatan tegangan atau perbedaan antara tegangan leleh antara profil balok kastela dan balok asli (IWF 150.75.5.7). Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara peningkatan tegangan dengan nilai e/HI pada kondisi leleh. Dari grafik sebagaimana terlihat pada tersebut nilai e/HI optimum terjadi pada saat peningkatan tegangan leleh antara profil balok kastela dan profil asli berkisar antara 1.98 sampai 2.034 atau terjadi peningkatan tegangan rata-rata sebesar 200%. Kondisi ini terjadi pada semua sudut bukaan ϕ . Nilai λ pada Gambar 7 merupakan hasil perbandingan nilai P/δ yang dihitung pada balok kastela dengan nilai

P/δ yang diperoleh pada balok asli. Pada Gambar 5 sampai Gambar 7 terlihat profil dengan sudut bukaan $\phi = 45^\circ$ merupakan profil dengan kemampuan menahan beban terbesar. Sedangkan profil dengan sudut bukaan $\phi = 70^\circ$ merupakan profil dengan kemampuan menahan beban terkecil. Profil dengan sudut bukaan yang makin membesar mengalami perlemahan yang lebih besar dibandingkan profil dengan sudut bukaan yang lebih kecil.



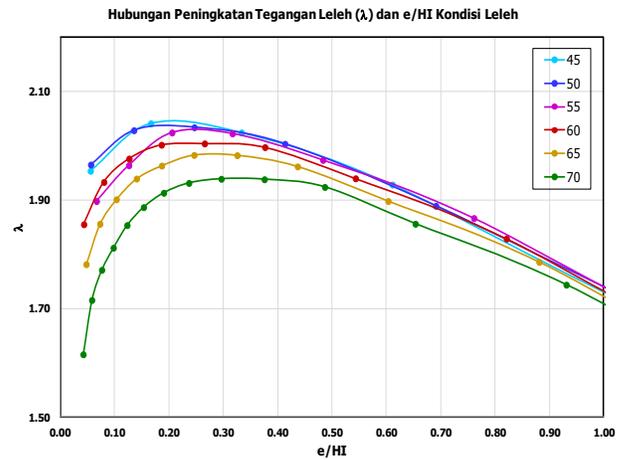
Gambar 5. Grafik Hubungan P/δ dan e/HI untuk semua sudut bukaan ϕ pada kondisi elastis



Gambar 6. Grafik Hubungan P/δ dan e/HI untuk semua sudut bukaan ϕ pada kondisi leleh

Hasil analisa untuk menentukan jarak antar lubang dan bentuk ukuran lubang optimum menunjukkan setiap nilai ϕ menghasilkan satu jarak e optimum. Setiap sudut bukaan ϕ menghasilkan satu nilai optimum e/HI . Nilai e/HI optimum diperoleh pada kisaran angka 0.1 sampai 0.4. Jika menggunakan ukuran tinggi profil balok kastela HK, maka nilai e/HK optimum diperoleh diantara nilai

0.1 sampai 0.25. Dengan menggunakan ukuran sampel balok sepanjang 3000 mm maka nilai e/HI dapat diperoleh dengan mengambil jumlah lubang antara 5 sampai 7 buah. Tabel 4 menunjukkan hubungan antara sudut bukaan ϕ , jarak antara lubang e dan jumlah lubang nl yang diperoleh untuk sampel balok dengan panjang 3000 mm. Jumlah lubang bukaan pada tabel tersebut diperoleh dari hasil perhitungan nilai P/δ tertinggi.



Gambar 7. Grafik Hubungan e/HI dan λ untuk semua sudut bukaan ϕ

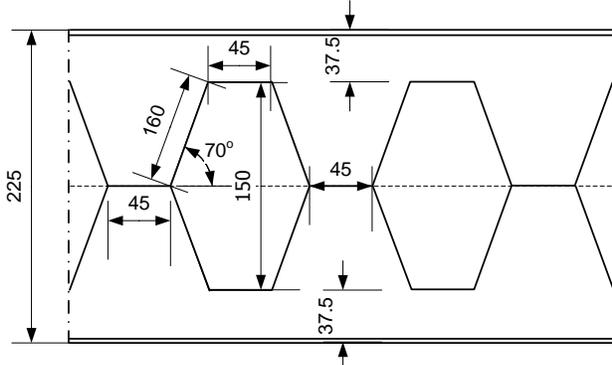
Tabel 4. Hubungan Antara Jarak Lubang (e), Jumlah Lubang Setiap Meter dan Ukuran Lubang untuk Semua Nilai ϕ

ϕ ($^\circ$)	e (mm)	nl	e/HI	e/HK
45	25,0000	5	0,167	0,111
50	37,0000	5	0,180	0,164
55	30,8333	6	0,226	0,137
60	39,8333	6	0,266	0,177
65	48,8333	6	0,326	0,217
70	56,3333	7	0,376	0,250

Hasil analisa dengan bantuan program *Abaqus* untuk selanjutnya diverifikasi dengan melakukan pengujian laboratorium untuk memastikan apakah model analisa dengan FEM sesuai dengan hasil pengujian laboratorium. Verifikasi yang dilakukan meliputi verifikasi defleksi dan beban maksimum pada saat leleh pertama. Berdasarkan hasil analisa sebagaimana terlihat pada Tabel 4 kemudian dipilih satu ukuran bukaan lubang ϕ untuk mendapatkan jarak antar lubang terbaik yang dapat digunakan sebagai sampel uji di laboratorium. Pada penelitian ini sampel ukuran bukaan yang dipilih adalah dengan sudut $\phi = 70^\circ$ dengan jumlah lubang setiap meter panjang balok $nl = 7$. Gambar 8 menunjukkan detail ukuran lubang sampel balok kastela yang diuji di laboratorium (satuan ukuran dalam mm) dan Gambar 9

menunjukkan penyiapan pengujian balok kastela di laboratorium.

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium yang dilakukan pada tiga sampel diperoleh grafik hubungan P dan defleksi vertikal (δ) sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Beban maksimum pada ketiga sampel tersebut pada kondisi leleh pertama masing-masing adalah 75.021 kN, 69.419 kN dan 67.456 kN dengan nilai δ masing-masing adalah 13.790 mm, 12.549 mm dan 12.629 mm. Rata-rata P leleh dari ketiga sampel tersebut adalah 70.632kN dengan δ rata-rata 12.989 mm.



Gambar 8. Model Lubang untuk Sampel Uji



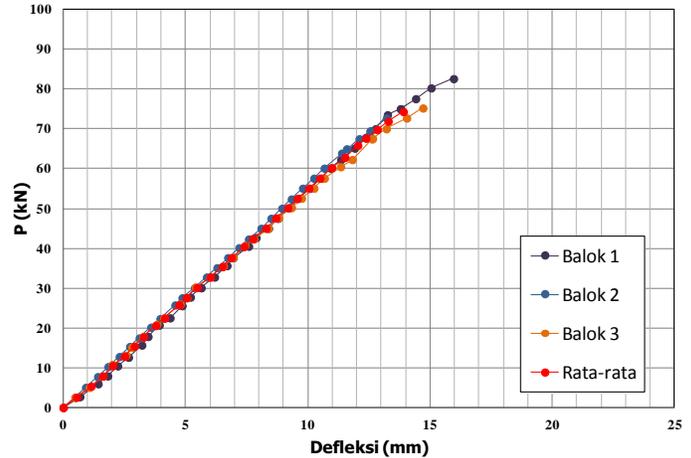
Gambar 9. Setting Pengujian Sampel Balok Kastela di Laboratorium

Analisa komputer untuk model benda uji laboratorium juga dilakukan untuk memverifikasi hasil pengujian laboratorium. Pada Gambar 11 juga ditampilkan hasil analisa untuk model yang sama dengan menggunakan komputer. Analisa dengan komputer tetap dilakukan karena adanya kemungkinan terjadinya perubahan dari ukuran lubang dan posisi lubang akibat kurang sempurnanya proses pembuatan benda uji laboratorium. Pembuatan model komputer juga dilakukan untuk tiga model. Pembuatan model komputer terhadap ketiga benda uji disebabkan kemungkinan adanya

perbedaan ukuran balok baja kastela pada ketiga sampel balok di laboratorium. Hasil pengujian dengan menggunakan komputer menghasilkan nilai P rata-rata pada saat leleh pertama sebesar 69.182 kN dengan defleksi vertikal rata-rata sebesar 12.373 mm.

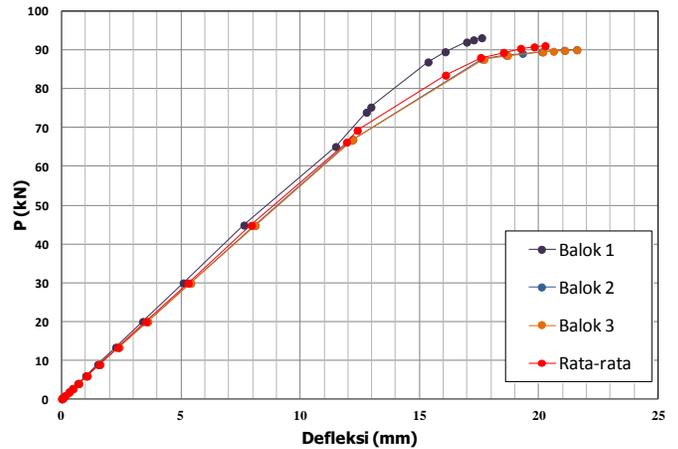
Hasil pengujian laboratorium kemudian dibandingkan dengan hasil analisa dengan komputer dan menghasilkan grafik hubungan P dan defleksi vertikal (δ) sebagaimana terlihat pada Gambar 12.

Grafik hubungan beban (P) dan defleksi vertikal (δ) hasil pengujian laboratorium



Gambar 10. Grafik Hubungan P dan Defleksi Vertikal Hasil Pengujian Laboratorium

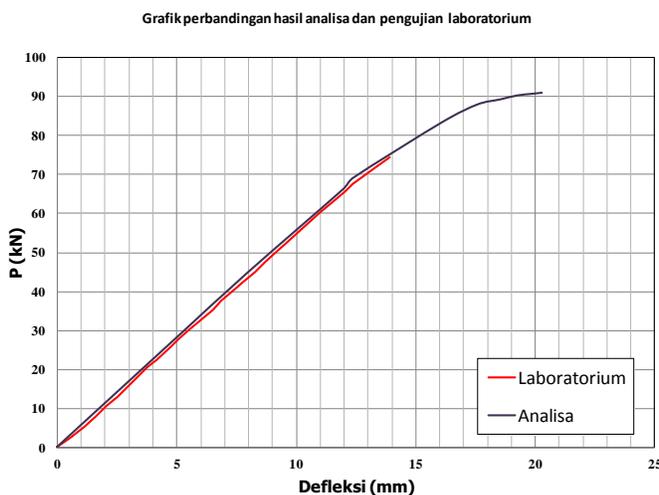
Grafik hubungan beban (P) dan defleksi vertikal (δ) hasil analisa komputer



Gambar 11. Hasil Analisa Komputer

Pada gambar tersebut terlihat grafik hubungan antara P dan defleksi vertikal yang diperoleh dari pengujian laboratorium dan analisa komputer hampir sama atau hampir berimpit untuk nilai P kurang dari 68 kN. Dari kedua grafik tersebut juga terlihat leleh pertama terjadi pada nilai P antara 68 sampai 70 kN. Grafik hubungan antara P dan defleksi vertikal hasil pengujian

laboratorium maupun hasil analisa komputer sebagaimana terlihat pada gambar tersebut diambil dari nilai rata-rata hasil pengujian dari tiga sampel balok uji. Hasil pengujian laboratorium dan analisa komputer menunjukkan perbedaan nilai P maksimum hal ini disebabkan adanya ketidak sempurnaan pekerjaan pengelasan atau pembuatan profil balok uji. Meskipun demikian nilai P maksimum yang mencapai 70 kN dari benda uji laboratorium menunjukkan kondisi leleh pertama yang hampir sama dengan hasil analisa model dengan komputer. Hal ini juga memberi gambaran bahwa pekerjaan pembuatan balok uji sudah sangat baik karena dapat menghasilkan P leleh yang hampir sama dengan hasil analisa komputer.



Gambar 12 Komparasi Hasil Pengujian Laboratorium dan Analisis Komputer untuk Model Balok Kastela dengan Sudut Bukaannya 70° dan Jarak Antar Lubang 45mm

4. Kesimpulan

Hasil penelitian untuk menentukan jarak lubang optimum pada profil balok baja kastela menunjukkan bahwa untuk model balok kastela dengan sudut bukaan antara 45° sampai 70° maka jarak lubang optimum adalah antara 0.1 sampai 0.4 dari tinggi profil asli atau antara 0.1 sampai 0.25 dari tinggi profil balok kastela, profil dengan sudut bukaan makin kecil menghasilkan kemampuan menahan beban lebih besar, dan pola distribusi lubang terbaik adalah antara 5 sampai 7 lubang setiap meter.

Daftar Pustaka

Altfillisch, M. D., Cooke, B. R., & Toprac, A. A. (1957). An Investigation of Welded Open Web Expanded Beams, *AWS Journal*.

Apriyatno, H. (2000). Pengaruh Rasio Tinggi dan Tebal Badan Balok Castella pada Kapasitas Lentur. *Tesis*. Yogyakarta: Magister Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada.

Bedi, M. K. S., & Pachpor P. D. (2011). Moment and Shear Analysis of Beam with Different Web Openings. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 1(4), 1917-1921.

Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2012). *Mechanics of Materials*. Sixth Edition. New York: McGraw-Hill Companies.

Craig, R. R. (2011). *Mechanics of Materials*. Third Edition. New York: John Wiley and Sons.

Darwin, D. (2003). *Design of Steel and Composite Beams with Web Openings*. American Institute of Steel Construction (AISC)

Dassault Systems Simulia Corp (2010). *Abaqus/CAE 6.10 User's Manuals*. Dassault Systems Simulia Corporation.

Ellobody, E. (2011). Interaction of Buckling Modes in Castellated Steel Beams. *Journal Construction Steel Research*, 67, 814-825.

Ellobody, E. (2012). Nonlinear Analysis of Cellular Steel Beams under Combined Buckling Modes. *Thin-Walled Structures*, 52, 66-79.

Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2009). *Mechanics of Material*. Seventh Edition, Toronto : Cengage Learning.

Hosain, M. U., & Speirs, W. G. (1973). Experiments on Castellated Beams. *Journal of the American Welding Society, Welding Res. Supp.*, 52(8), 329-342.

Jamadar, A. M., & Kumbhar, P. D. (2014). Finite Element Analysis of Castellated Beam: A Review. *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)*, 1(9), 125-129.

Jichkar, R. R., Arukia, N. S., & Pachpor, P. D. (2014). Analysis of Steel Veam with Web Openings Subjected to Buckling Load. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 4 (5), 185-188.

Khennane, A. (2013). *Introduction to Finite Element Analysis Using Matlab and Abaqus, in Thin and Thick Plates*. Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group.

Priyambodo, B., Suswanto, B., & Kristijanto, H. (2014). Analisa Model Keruntuhan Variasi Bukaannya Badan pada Profil Heksagonal Castellated Beam dengan Program FEA. *Jurnal Teknik POMITS*, 1(2), 1-6.

Pytel, A., & Kuisalaas, J. (2012). *Mechanics of Material*, Second Edition. Stamford : Cengage Learning.

Redwood, R., & Dermidjian, S., (1998). Castellated Beams Web Buckling in Shear. *Journal of Stuctural Engineering*, 124(10), 1202-1207.

Srimani, S. S. L., & Das, P. K. (1978). Finite Element Analysis Castellated Beams. *Computer and Structures*, 9, 169-174.

- Suharjanto. (2004). Kajian Banding Secara Numerik Kapasitas dan Perilaku Balok Baja Kastela Menggunakan Program SAP 2000. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 13(2), 114-121.
- Toprac, A. A., & Cooke, B. R. (1959). An Experimental Investigation of Open-Web Beams. *Welding Research Council Bulletin Series*, 47.
- Wakchaure, M. R., & Sagade, A. V. (2012). Finite Element Analysis of Castellated Steel Beam. *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2(1), 356-370.
- Wakchaure M. R., Sagade A. V., & Auti V. A. (2012). Parametric Study of Castellated Beam with Varying Depth of Web Opening. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2(8), 1-6.
- Wang, P., Ma, N., & Wang, X. (2014). Numerical Studies on Large Deflection Behaviors of Restrained Castellated Steel Beams in Fire. *Journal Construction Steel Research*, 100, 136-145.
- Zaarour, W., & Redwood, R. (1996). Web Buckling in Thin Webbed Castellated Beams. *Journal of Stuctural Engineering*, 122(8), 860-866.
- Zirakian, T., & Showkati, H., (2006). Distortional Buckling of Castellated Beams. *Journal Construction Steel Research*, 62, 863-871.