

OPTIMASI RASIO JARAK, TINGGI, DAN SUDUT BUKAAN PADA BALOK BAJA HONEYCOMB DENGAN MENGGUNAKAN FAST MULTI SWARM OPTIMIZATION

Richard Frans¹, Herman Parung², Achmad Bakri Muhiddin² dan Rita Irmawaty²

¹Mahasiswa Program Doktor, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Makassar
Email: richardfrans.rf@gmail.com

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Hasanuddin, Jl. Poros Malino, Makassar

ABSTRAK

Balok baja *honey comb* atau yang dikenal dengan balok baja kastella adalah balok baja yang memiliki lubang atau bukaan pada bagian pelat badan (*web*). Keuntungan balok baja *honey comb* jika dibandingkan dengan balok baja biasa (*parent beam*) adalah penambahan tinggi efektif pada balok baja *honey comb*, akan tetapi perlu adanya pertimbangan dalam mendesain balok baja *honey comb*, setidaknya ada tiga variabel yang perlu dipertimbangkan untuk mendapatkan balok baja *honey comb* yang optimal dan memenuhi kriteria perencanaan, yaitu sudut bukaan (sudut pemotongan), jarak bukaan, dan tinggi bukaan. Oleh karena itu, teknik *fast multi swarm optimization* digunakan sebagai “alat” untuk mengoptimasi balok baja *honey comb* dengan fungsi sasaran untuk meminimumkan biaya yang dikeluarkan untuk menghasilkan balok baja *honey comb*. Fungsi penalti digunakan pada penelitian ini, sehingga secara otomatis desain balok baja *honey comb* yang tidak memenuhi kriteria perencanaan akan dihilangkan dari kandidat variabel optimum. Hasil optimasi yang didapatkan cukup memuaskan, hal ini dikarenakan nilai rasio jarak bukaan, serta tinggi bukaan hampir sama dengan desain balok baja *honey comb* berdasarkan usulan BS 5950-1:2000. Dalam penelitian ini juga, dikembangkan suatu model regresi sederhana yang menghubungkan antara rasio tinggi bukaan terhadap tinggi balok baja IWF semula (*parent beam*) yang optimal, dari hasil yang didapatkan dari kurva regresi, nilai koefisien determinasi (R^2) yang didapatkan adalah 0,9962.

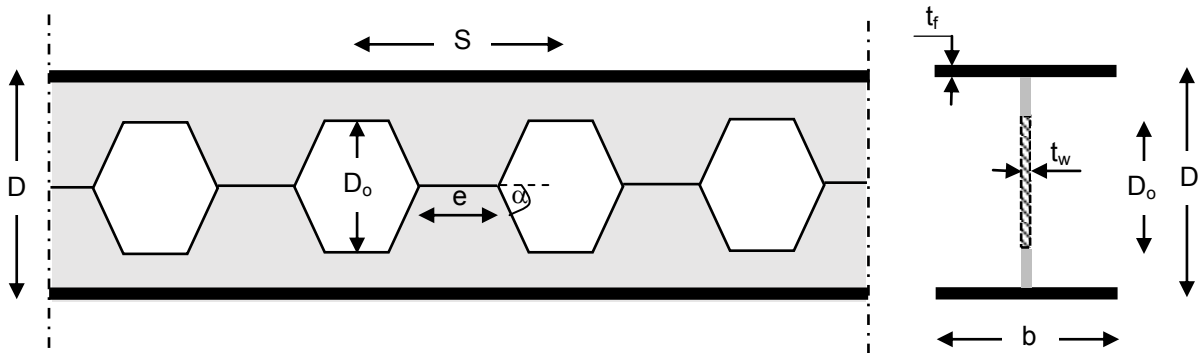
Kata kunci: balok baja *honey comb*, *fast multi swarm optimization*.

1. PENDAHULUAN

Penelitian tentang balok baja *honey comb* sudah mulai berkembang sejak era 60-an, salah satu keuntungan yang didapatkan dengan menggunakan balok baja *honey comb* adalah penambahan tinggi efektif dari profil balok baja tersebut. Peningkatan tinggi efektif ini akan seiring dengan peningkatan kapasitas lentur dari balok baja, sehingga penentuan geometri dari balok baja *honey comb* ini menjadi sangat penting untuk diperhatikan. Hal ini dikarenakan, ada tiga variabel penting yang perlu dipertimbangkan dalam mendesain suatu balok baja *honey comb*, antara lain: sudut pemotongan, jarak antara bukaan, dan tinggi bukaan dari balok baja *honey comb* karena akan berpengaruh pada biaya yang dikeluarkan pada saat balok baja *honey comb* diproduksi (Frans *et al*, 2016). Hal inilah yang kemudian menjadi alasan mengapa balok baja *honey comb* ini tidak terlalu berkembang di Amerika (Dewobroto, 2016) walaupun sebenarnya makalah ilmiah yang menjadi rujukan berawal dari sana (Boyer, 1964 dan Blodget, 1976). Oleh karena itu, perlu adanya suatu pengoptimasian dalam memproduksi balok baja *honey comb* yang *low cost* tetapi tetap memenuhi kriteria perencanaan. Salah satu teknik optimasi yang mempunyai hasil yang cukup baik dalam mendapatkan variabel yang optimum adalah *fast multi-swarm optimization*. Teknik optimasi ini merupakan pengembangan dari teknik optimasi yang dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart (1995) yaitu *particle swarm optimization*.

2. BALOK BAJA HONEY COMB

Balok baja *honey comb* atau yang biasanya dikenal dengan nama balok baja kastella dengan lubang segienam (*hexagonal castellated beam*) adalah balok baja yang berasal dari profil IWF (*hot rolled*) yang dipotong secara zig-zag, kemudian salah satu bagian diangkat dan digabungkan kembali dengan bagian lainnya dengan menggunakan las (Jamadar dan Kumbhar, 2015). Gambar 1 menunjukkan potongan profil balok baja *honey comb*.



Gambar 1. Geometri balok baja *honey comb*

dimana, S adalah jarak antara bukaan (as ke as), D_o adalah tinggi bukaan, D adalah tinggi total balok baja *honey comb*, e adalah jarak bersih antar bukaan, b adalah lebar pelat sayap, t_w adalah tebal pelat badan, t_f adalah tebal pelat sayap, α adalah sudut bukaan.

Kelebihan balok baja *honey comb* adalah penambahan momen inersia pada penampang yang diakibatkan oleh penambahan tinggi dari profil balok baja tersebut, dengan adanya penambahan tinggi dari profil, efektif akan meningkatkan modulus elastisitas dan modulus plastis dari geometri penampang. Keuntungan lainnya, lubang atau bukaan pada bagian badan dari profil dapat dilalui oleh instalasi untuk keperluan *plumbing*.

3. DESAIN BALOK BAJA HONEY COMB

Kombinasi gaya geser dan momen lentur pada bagian bukaan

Penelitian ini mengadopsi desain balok *honey comb* dari peraturan eropa yaitu ENV 1993-1-1 *annex N* dan disatukan dengan penelitian empiris yang diusulkan oleh Chung (2003), yaitu beberapa variabel empiris tak berdimensi hasil interaksi antara rasio momen lentur dan rasio gaya geser pada bagian tengah bukaan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\text{Untuk } \bar{v} < \frac{2}{3}, \quad \left(\frac{\bar{v}}{\bar{v}} \right)^2 + \bar{m}^2 = 1 \quad (1)$$

$$\bar{v} \geq \frac{2}{3}, \quad \left(\frac{v - (\bar{v} - \frac{2}{3})}{2/3} \right)^2 + \bar{m}^2 = 1 \quad (2)$$

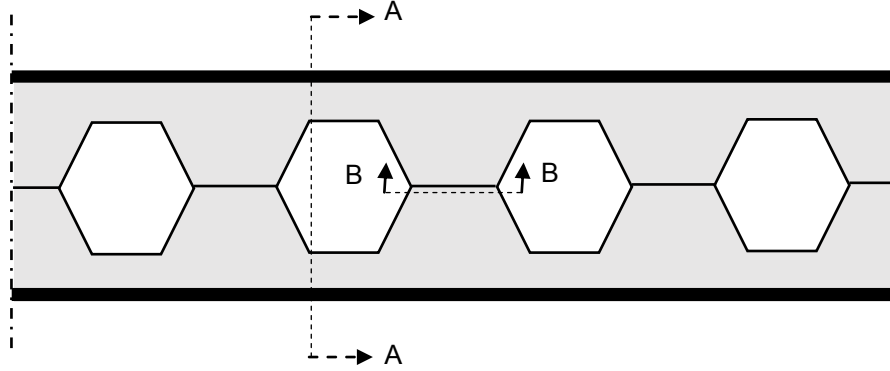
$$\bar{v} = \frac{V_{o,Rd,Vi}}{V_{o,Rd}} \quad (3)$$

$$\bar{m} = \frac{M_{o,Rd,Vi}}{M_{o,Rd}} \quad (4)$$

dimana, \bar{v} adalah ratio kapasitas geser kopel (Tabel 1), \bar{m} adalah rasio kapasitas momen kopel, $V_{o,Rd,Vi}$ adalah gaya geser global pada bukaan yang dikontrol (misalnya potongan A-A pada gambar 2), $V_{o,Rd}$ adalah tahanan gaya geser pada bagian bukaan, $M_{o,Rd,Vi}$ adalah momen lentur global pada bukaan yang dikontrol, $M_{o,Rd}$ adalah tahanan kekuatan lentur pada bagian bukaan. Untuk semua kasus, nilai v tidak boleh melampaui dari nilai kapasitas gaya geser kopel, \bar{v} (Chung,2003).

Tabel 1. Rasio kapasitas geser kopel (Chung, 2003)

D_o/D	0.5	0.67	0.75
\bar{v}	1	0.96	0.91



Gambar 2. Penampang melintang balok baja *honey comb*

Tekuk pada bagian *web-post*

Tekuk pada bagian *web-post* adalah salah satu mekanisme keruntuhan dari balok baja *honey comb*. Mekanisme ini muncul ketika terjadi interaksi yang besar antara gaya geser horizontal dan momen lentur pada bagian tengah dari tinggi balok (potongan B-B). Untuk menghindari mekanisme kegagalan ini, Annex N mengusulkan beberapa persamaan untuk mengecek kekuatan tahanan tekuk pada bagian *web-post* sebagai berikut:

$$\frac{M_{sd}}{M_{el,Rd}} < \min \left[\left\{ C_1 \left(\frac{S}{D_o} \right) - C_2 \left(\frac{S}{D_o} \right)^2 - C_3 \right\}, 0.6 \right] \quad (5)$$

$$M_{sd} = V_{hi} \frac{D_o}{2} \quad (6)$$

$$M_{el,Rd} = \frac{t_w f_{yw} (S - 2b)^2}{6} \quad (7)$$

$$C_1 = 5.097 + 0.1464 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0.00174 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (8)$$

$$C_2 = 1.441 + 0.0625 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0.000683 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (9)$$

$$C_3 = 3.645 + 0.0853 \left(\frac{D_o}{t_w} \right) - 0.00108 \left(\frac{D_o}{t_w} \right)^2 \quad (10)$$

dimana, M_{sd} adalah momen elastik lentur actual pada bagian *web-post*, $M_{el,Rd}$ adalah tahanan momen elastik lentur pada bagian *web-post*, f_{yw} adalah tegangan luluh pada bagian pelat badan, V_{hi} adalah gaya geser horisontal pada bagian *web post*.

Retak pada Sambungan Las antar Bukaam

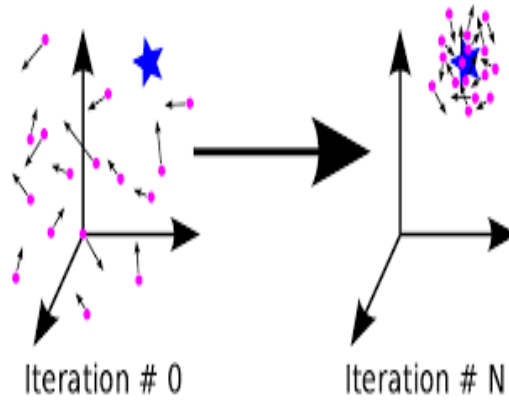
Untuk mencegah kegagalan prematur akibat gaya geser horisontal yang besar pada bagian *web-post* yang mempunyai jarak antar bukaam yang tidak terlalu panjang, perlu adanya pengecekan gaya geser horisontal pada bagian tersebut agar tidak melampaui batas dari tegangan luluh yang diisyaratkan sebagai berikut:

$$V_{hi} \leq \frac{\phi_v e t_w \cdot f_{yw} C_v}{\sqrt{3}} \quad (11)$$

dimana, V_{hi} adalah gaya geser horisontal, e adalah panjang bersih antar bukaam, t_w adalah tebal pelat badan, f_{yw} adalah tegangan luluh pada bagian badan, C_v adalah rasio kritis antara tegangan pelat badan terhadap tegangan luluh geser.

4. FAST MULTI-SWARM OPTIMIZATION

Teknik optimasi *fast multi-swarm optimization* dikembangkan oleh Zhang, 2007 yang merupakan turunan dari *particle swarm optimization* (Kennedy dan Eberhart, 1995). *Particle swarm optimization* ini berdasarkan pada perilaku dari kawanan burung atau serangga. Perilaku sosial dari masing-masing individu bergantung pada tiap-tiap kawanan serta pengaruh dari kawanan lainnya. Oleh karena itu, jika salah satu partikel atau kawanan burung mendapatkan jalan tercepat untuk sampai ke sumber makanan, maka sisa dari kawanan lainnya dapat langsung segera mengikuti jalan tersebut meskipun jauh dari kawanan tersebut. Gambar 3 menunjukkan cara kerja dari *particle swarm optimization*. Pada iterasi ke-0, partikel akan disebar secara acak, dan pada saat iterasi berakhir (iterasi ke-n), semua partikel akan berkumpul pada suatu titik.



Gambar 3. Ilustrasi *particle swarm optimization*

Persamaan dasar yang digunakan untuk memperbarui posisi dari partikel adalah:

$$v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1 R_1 (p_{best,i,j} - x_{i,j}(t)) + c_2 R_2 (g_{best,i,j} - x_{i,j}(t)) \quad (12)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1) \quad (13)$$

$$\omega_{(t)} = \rho_{max} - ((\rho_{max} - \rho_{min}) \cdot t / \max t) \quad (14)$$

dimana, $v_{i,j}(t+1)$ adalah kecepatan partikel pada iterasi $t+1$, $x_{i,j}(t+1)$ adalah posisi partikel pada iterasi $t+1$, $p_{best,i,j}$ adalah posisi lokal terbaik pada iterasi- t , $g_{best,i,j}$ adalah posisi global terbaik pada iterasi ke- t . R_1 dan R_2 angka acak yang mempunyai interval 0-1, c_1 dan c_2 adalah konstanta percepatan, dimana diambil nilainya adalah 2, dan w adalah koefisien *positive inertia weight* yang merupakan fungsi dari ρ_{min} , ρ_{max} , jumlah iterasi, dan nilai dari tiap iterasi, dimana nilai ρ_{min} dan ρ_{max} berturut-turut adalah 0,4 dan 0,9.

Persamaan di atas dapat digunakan dengan baik untuk permasalahan-permasalahan yang tidak terlalu kompleks. Akan tetapi untuk permasalahan yang lebih kompleks, seperti misalnya pengoptimalan multi variabel, persamaan di atas akan menemui kendala yang biasanya disebut sebagai *local optima*. *Local optima* adalah kondisi dimana partikel tersebut akan terjebak dalam kondisi optimum lokal sehingga variabel tersebut seolah-olah telah mencapai

nilai optimum. Sekali terjebak dalam kondisi ini, partikel akan susah untuk menemukan jalan lainnya. Oleh karena itu, Zhang, 2007 mengusulkan beberapa persamaan tambahan untuk mengatasi kondisi *local optima*. Sehingga posisi partikel bukan hanya berdasarkan pada persamaan (12) tetapi juga mengikuti persamaan (15).

$$x_{i,j(t+1)} = x_{i,j(t)} + (v_{i,j(t)} \exp(\delta))\delta_i \quad (15)$$

dimana, δ dan δ_i adalah angka acak Cauchy. Ide ini muncul pada saat dikarenakan pada nilai varians dari distribusi Cauchy tidak berhingga, sehingga memungkinkan partikel untuk keluar dari kondisi *local optima* sangat besar (Zhang, 2007).

5. VARIABEL DESAIN, FUNGSI SASARAN, DAN FUNGSI PENALTI

Ada 3 variabel yang akan dioptimasi pada penelitian ini yaitu sudut bukaan, jarak antar bukaan serta tinggi bukaan, akan tetapi untuk mendapatkan nilai variabel umum. Variabel jarak antar bukaan serta tinggi bukaan akan dijadikan variabel tanpa satuan atau rasio dari tinggi profil IWF semula (S/D_0 dan D/D_0). Untuk fungsi sasaran, penelitian ini mengikuti fungsi sasaran yang diusulkan oleh Sorkhabi *et al*, 2014 dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Total Cost} = (C_1L_1 + C_2L_2 + C_3\rho AL) / W \quad (16)$$

dimana, *Total Cost* adalah biaya yang dikeluarkan untuk memproduksi balok baja *honey comb* (fungsi *fitness*), C_1 , C_2 , dan C_3 adalah koefisien dari masing-masing biaya yang dikeluarkan untuk pemotongan, pengelasan, serta biaya profil IWF semula per satuan panjang, yang pada penelitian ini adalah 0,3, 1, dan 0.8. L_1 , L_2 , dan L masing-masing panjang pemotongan, panjang pengelasan, serta panjang total dari balok baja *honey comb*, dan W adalah faktor skala.

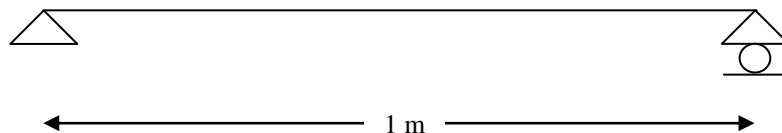
Fungsi penalti digunakan untuk membatasi nilai dari variabel yang tidak memenuhi kriteria perencanaan. Ketika salah satu variabel tidak memenuhi kriteria perencanaan, maka secara otomatis nilai dari *total cost* akan langsung digantikan menjadi nilai yang paling maksimum yang dapat terbaca oleh program.

6. APLIKASI DAN PEMBAHASAN

Ditinjau suatu struktur balok di atas tumpuan sederhana dengan panjang bentang adalah 1 meter seperti yang terlihat pada Gambar 4. Pengambilan nilai panjang bentang ini dimaksudkan untuk menghindari kegagalan tekuk torsi lateral pada balok baja tersebut, sehingga asumsi bahwa momen plastis dapat tercapai pada penampang dapat digunakan. Dua kondisi pembebanan diaplikasikan pada balok tersebut. Kondisi pembebanan yang pertama adalah beban titik tepat ditengah bentang balok, sedangkan kondisi pembebanan kedua adalah beban terdistribusi merata. Properti material dan penampang balok baja dapat dilihat pada Tabel 2.

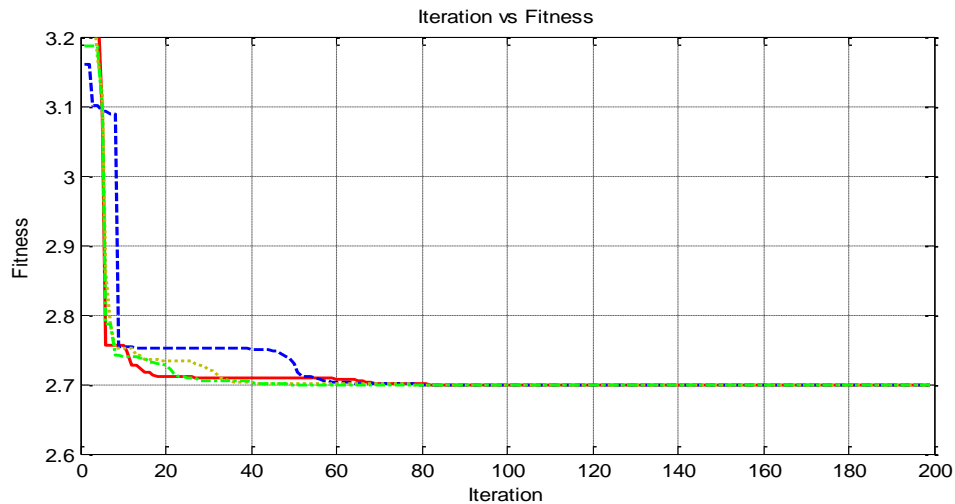
Tabel 2. Properti material dan penampang dari balok baja IWF

Tinggi balok(H)	200 mm
Lebar sayap (b)	100 mm
Tebal pelat badan (t_w)	5.5 mm
Tebal pelat sayap (t_f)	8 mm
Tegangan luluh (F_y)	240 MPa
Modulus elastisitas material (E)	200000 MPa

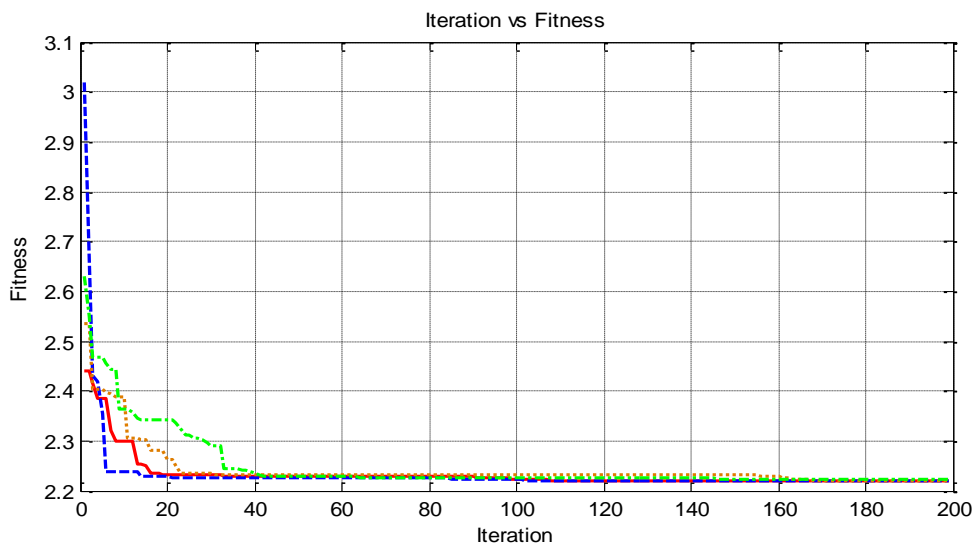


Gambar 4. Balok di atas tumpuan sederhana

Algoritma *fast multi-swarm optimization* dibuat dengan menggunakan bantuan *software* MATLAB. Untuk memastikan hasil yang didapatkan, program dijalankan sebanyak empat kali dengan nilai batas bawah dan batas atas yang berbeda-beda. Parameter yang digunakan adalah: jumlah partikel = 20, maksimum iterasi = 200, kecepatan maksimum = 50, ρ_{\min} dan ρ_{\max} diambil masing-masing 0,4 dan 0,9.



Gambar 5. Penurunan nilai *fitness* untuk tiap iterasi pada balok dengan beban titik di tengah bentang dengan momen maksimum 17,5 kN-m



Gambar 6. Penurunan nilai *fitness* untuk tiap iterasi pada balok dengan beban terdistribusi merata dengan momen maksimum 7,5 kN-m

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan penurunan nilai *fitness* masing-masing untuk beban titik di tengah bentang dengan momen maksimum 17,5 kN-m dan beban terdistribusi merata dengan momen maksimum 7,5 kN-m. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat hasil optimasi yang didapatkan adalah konvergen yaitu tidak terdapat perbedaan hasil untuk nilai batas bawah dan batas atas yang berbeda. Tabel 3 dan tabel 4 menunjukkan hasil optimasi balok baja *honey comb* masing-masing dengan beban di tengah bentang dan beban terdistribusi merata. Dari hasil yang didapatkan bahwa jika terdapat peningkatan momen maksimum (M_{\max}) maka terjadi pula penambahan nilai rasio S/D_o sampai nilai rasio mencapai 1,5027 untuk kasus pertama (beban terpusat di tengah bentang) sedangkan untuk kasus kedua (beban terdistribusi merata) nilai rasio S/D_o maksimum adalah 1,266. Untuk rasio D/D_o berbanding terbalik dengan peningkatan nilai momen maksimum (terjadi penurunan rasio yang sama untuk kedua kasus pembebanan). Untuk sudut bukaan (α), hasil yang didapat menarik, yaitu pada balok dengan beban terdistribusi merata, nilai sudut bukaan untuk semua nilai momen maksimum adalah sama yaitu $63,43495^\circ$, sedangkan untuk balok dengan beban titik di tengah bentang, nilai sudut bukaan mempunyai nilai rerata $54,71239^\circ$.

Tabel 3. Nilai rasio hasil optimasi untuk beban di tengah bentang

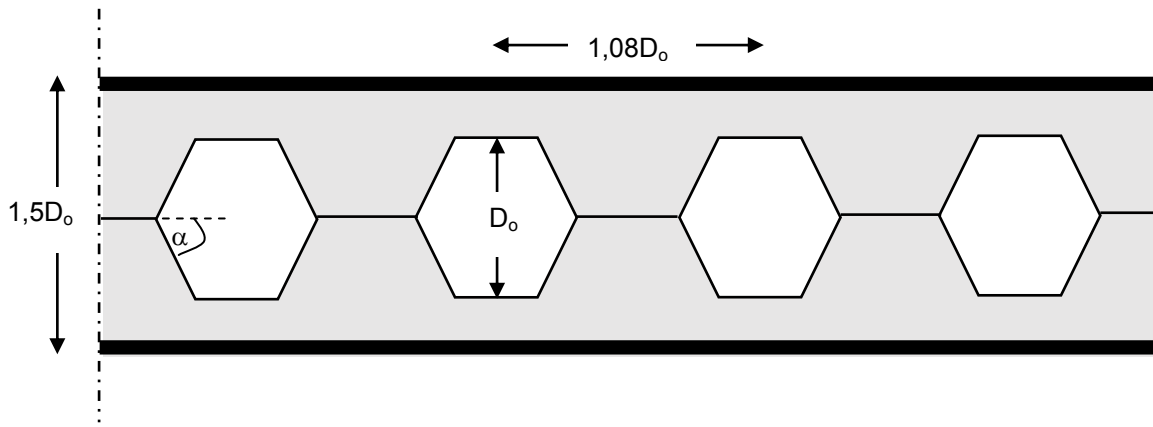
M_{maks}	Beban titik di tengah bentang		
	S/D _o	Sudut Bukaannya (α)	H/D _o
7,5	1,2020	57,5498	1,7586
10	1,2856	56,1477	1,5900
12,5	1,5027	52,3844	1,4749
15	1,3757	53,6046	1,3893
17,5	1,2813	53,8754	1,3239

Tabel 4. Nilai rasio hasil optimasi untuk beban distribusi merata

M_{maks}	Beban terdistribusi merata		
	S/D _o	Sudut Bukaannya (α)	H/D _o
7,5	1,0066	63,4349	1,7586
10	1,2666	63,4349	1,5900
12,5	1,1388	63,4349	1,4749
15	1,0443	63,4349	1,3899
17,5	1,2485	63,4349	1,3239

Hasil ini sejalan dengan yang disarankan oleh BS 5950-1:2000 tentang pola pemotongan standar yaitu 60°. Akan tetapi, nilai S/D_o dan rasio H/D_o (H adalah tinggi profil IWF semula) yang disarankan sedikit berbeda, dari hasil yang didapatkan nilai rasio H/D_o yang optimum akan bergantung dengan nilai momen maksimum yang terjadi pada balok tersebut dan terjadi penurunan nilai H/D_o untuk setiap peningkatan nilai momen maksimum.

Gambar 8 menunjukkan hubungan antara rasio D_o/H terhadap momen maksimum. Nilai rasio D_o/H untuk kedua

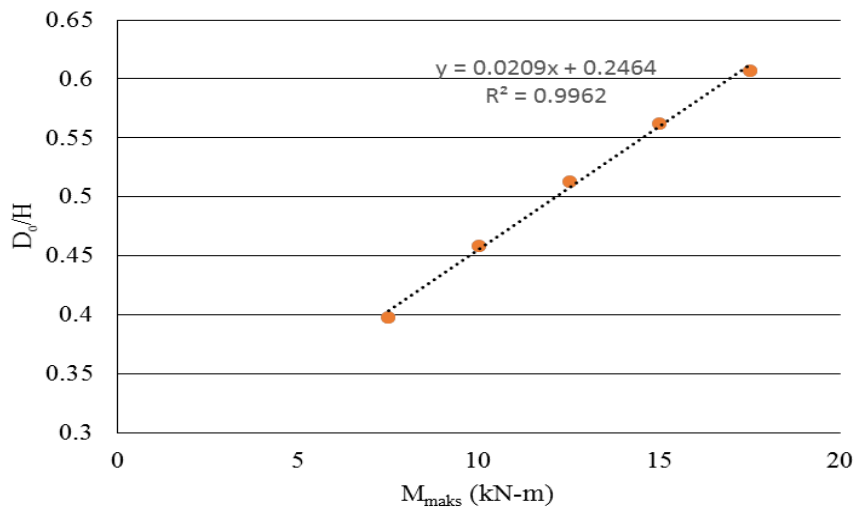


Gambar 7. Standar pemotongan balok baja *honey comb* menurut BS 5950-1:2000

kasus hampir sama dengan nilai momen maksimum yang sama. Berdasarkan hasil yang didapatkan, jika dibuat hubungan antara variabel rasio momen maksimum terhadap rasio H/D_o, dapat dikembangkan suatu persamaan empiris sederhana yang dapat digunakan untuk memperkirakan rasio H/D_o yang optimum dengan nilai momen maksimum tertentu sebagai berikut:

$$\frac{D_o}{H} = 0,2464 + 0,0209M_{maks} \quad (17)$$

dimana, D_o adalah setengah tinggi bukaan, H adalah tinggi profil IWF semula, M_{maks} adalah momen maksimum yang terjadi (aktual) dengan interval momen maksimum 7,5 – 17,5 kN-m.



Gambar 8. Hubungan antara rasio D_o/H terhadap M_{maks}

7. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa nilai rasio D/D_o berdasarkan rujukan BS 5950-1:2000 dapat dijadikan acuan untuk mendesain geometri dari balok baja *honey comb*, hal ini dikarenakan hasil yang didapatkan hampir mirip dengan geometri setelah optimasi dimana nilai D/D_o berkisar antara 1,32 – 1,76. Untuk sudut bukaan yang optimum juga menunjukkan adanya kesamaan antara rujukan dengan hasil optimasi yang berkisar 60° . Untuk jarak bukaan optimum juga mempunyai nilai rasio yang hampir mirip dengan nilai rujukan. Oleh karena itu, standar pemotongan yang diusulkan oleh BS 5950-1:2000 dapat dijadikan desain praktis untuk memproduksi balok baja *honey comb*. Selain itu, persamaan sederhana diusulkan untuk memudahkan dalam menentukan nilai rasio optimum dari balok baja *honey comb*, yaitu $\frac{D_o}{H} = 0,2464 + 0,0209M_{maks}$ dengan interval momen maksimum antara 7,5 – 17,5 kN-m.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings (AISC 360-10)*. Chicago.
- Blodgett, O.W. (1976). *Design of Welded Structures*. The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, Cleveland Ohio.
- Boyer, J. P. (1964). "Castellated beams – developments". AISC Engineering Journal, July.
- BC1. (2012). *Design Guide on Use of Alternative Structural Steel to BS 5950 and Eurocode 3*. The Building and Construction Authority of Singapore (BCA).
- Chung, K.F, Liu, C.H, and Ko, ACH. (2003). "Steel beams with large web openings of various shapes and sizes: an empirical design method using a generalised moment–shear interaction curve". *Journal of Construction Steel Research*, 59, 1177–1200.
- Dewobroto, W. (2016). *Struktur baja: Perilaku, analisis & Desain – AISC 2010*. Jurusan Teknik Sipil UPH, Tangerang.
- EN 1993-1-1. *Eurocode 3: design of steel structures — part 1.1: general rules and rules for buildings*.
- Frans, R., Parung, H., Muhiddin, A.B., dan Irmawaty, R. (2016). "Optimization of short-span hexagonal castellated beam using fast multi swarm optimization". *Proceedings of International Seminar on Infrastructure Development*, Makassar, 22 September 2016, 391-398
- Jamadar, A.M. and Kumbhar, P.D. (2015). "Parametric study of castellated beam with circular and diamond shaped openings". *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2, 715-722.
- Kennedy, J and Eberhart. R.C. (1995). "Particle swarm optimization". *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE Service Center, Piscataway, 1942-1948.
- MathWorks. (2015). *MATLAB:Primer*, Version 8.6. The Mathworks, Inc
- MathWorks. (2015). *MATLAB:Programming Fundamental*, Version 8.6. The Mathworks, Inc

- Soltani, M.R., Bouchair, A. and Mimoune, M. (2012). "Nonlinear FE analysis of the ultimate behavior of steel castellated beams". *Journal of Construction Steel Research*, 70, 101-114.
- Sorkhabi, R.V, Naseri, A. and Naseri, M. (2014). "Optimization of the castellated beams by particle swarm algorithms method". *International Conference on Civil Engineering. APCBEE Procedia*, 9, 381-387.
- Zhang, Q., Li, C., Liu, Y., and Kang, L. (2007). "Fast multi-swarm optimization with cauchy mutation and crossover operation". *Proceedings of Advances in Computation and Intelligence*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 344-352.