

## Analisis Profil *Hollow Steel Plate Girder* (HFSPG) Sebagai Alternatif Profil Baja Canai Dingin

Muhammad Syamsu Bachri<sup>1,\*</sup>, Budi Suswanto<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [arisyamsu@gmail.com](mailto:arisyamsu@gmail.com)

Info Artikel		Abstract
Diajukan	23 November 2022	<i>Hollow Flange Steel Plate Girder (HFSPG) is I-profile steel in the form of a square with holes on the wings and plates on the body. The process of forming this profile requires a cold-formed process. The connection between the body and the flange uses a welded joint which serves to reduce the occurrence of joint failure between the body and the flange. Perforated flange steel profiles are expected to be better values in rigidity and strength than cold-formed steel, due to the geographical locations of Indonesia which are prone to natural disasters, so the profile is not prone to local buckling. As a result, variations in the thickness of the perforated flange steel profile will be carried out in this research. In this research, a numerical study (finite element method) will be carried out on the profile of Hollow Steel Plate Girder. Based on numerical studies, the moment capacity of the profile, hysteretic curve, ductility, profile failure patterns, and connections between perforated flange steel profiles will be reviewed. Parameter of testing using results from previous research will be developed according to the required modeling.</i>
Diperbaiki	04 Februari 2023	
Disetujui	18 Februari 2023	

*Keywords: hollow steel plate girder, four point bending, numerical analysis, ABAQUS*

**Abstrak**  
*Hollow Flange Steel Plate Girder (HFSPG) merupakan profil-I baja yang berbentuk persegi berlubang pada bagian sayap dan pelat pada bagian badan. Proses pembentukan profil ini memerlukan proses cold-formed. Sambungan antara bagian badan dengan sayap menggunakan sambungan las yang berfungsi mengurangi terjadinya kegagalan sambungan antara bagian badan dengan sayap. Profil baja sayap berlubang diharapkan memiliki nilai kekakuan dan kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan baja canai dingin, karena letak geografis Negara Indonesia yang rawan bencana alam, sehingga profil tersebut tidak mudah mengalami local buckling. Dalam penelitian ini, akan dilakukan studi numerik (finite element method) mengenai profil Hollow Steel Plate Girder. Berdasarkan studi numerik akan ditinjau mengenai kapasitas momen profil, kurva histeresis, daktilitas, pola kegagalan profil, dan sambungan antar profil baja sayap berlubang. Parameter pengujian menggunakan hasil penelitian sebelumnya yang akan dikembangkan sesuai dengan pemodelan yang dibutuhkan.*

*Kata kunci: hollow steel plate girder, four point bending, analisis numerik, ABAQUS*

### 1. Pendahuluan

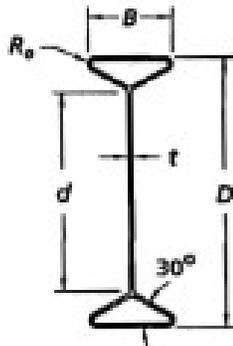
Indonesia merupakan negara rawan bencana alam seperti gempa bumi, angin puting beliung, tanah longsor, karena terletak pada area *Ring of Fire* atau cincin api. Dengan kondisi tersebut, perencanaan suatu struktur konstruksi bangunan perlu diperhatikan terutama pada penggunaan material yang akan digunakan. Pemilihan penggunaan material bangunan berdasarkan kekuatan material, fungsi bangunan, ketersediaan dana *owner*, dan durasi pelaksanaan.

Seiringnya berjalannya waktu material baja mengalami perkembangan. Pada tahun 1939, Prof. George Winter yang berasal dari Universitas Cornell melakukan penelitian material baja yang dibentuk dengan menggunakan proses pendinginan sebuah pelat baja dan dapat disebut sebagai baja ringan (*Cold Form Steel*). Material ini memiliki ketebalan berkisar 0,4 – 1 mm sehingga dikategorikan sebagai material tipis (*thin walled*) dan memiliki tegangan leleh yang sangat tinggi mencapai 550 MPa[1].

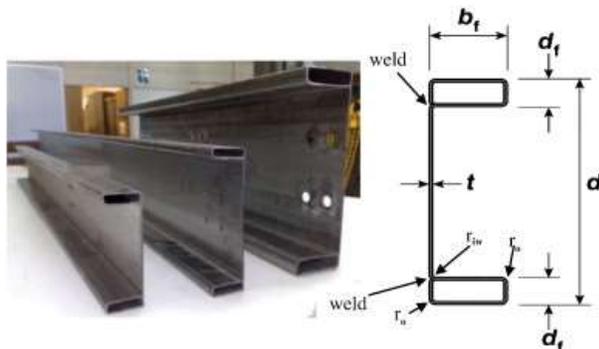
Baja ringan sangat digemari oleh masyarakat karena harganya lebih terjangkau daripada material baja. Selain biaya, baja ringan juga memiliki berat struktur yang lebih ringan, tahan terhadap karat dan keropos, serta memiliki kuat tarik yang mumpuni. Baja ringan memiliki durasi pelaksanaan pemasangan yang lebih cepat daripada baja konvensional, karena penyambungan antara material baja sangat mudah dan baja ringan mudah untuk dibentuk. Namun baja ringan memiliki kelemahan pada ketebalan profil yang tergolong tipis sehingga bersifat tidak kaku sehingga mengakibatkan mudah mengalami tekuk atau *buckling* [2]. Selain itu material baja ringan kanal bersifat monosimetris yang berarti material ini memiliki 1 bidang simetris, sehingga material ini lebih cocok digunakan untuk konstruksi bentang pendek [3]. Berdasarkan permasalahan di atas, diperlukan suatu alternatif material baja yang memiliki variasi dimensi, kekuatan tekuk, dan kekakuan yang lebih baik daripada material baja ringan kanal. Alternatif ini merupakan baja

yang memiliki lubang atau *hollow* pada bagian sayap (*flange*).

Material baja sayap berlubang mengalami perkembangan sejak tahun 1993, dilakukan oleh Perusahaan Palmer Tube Mills [3]. Material yang pertama kali digunakan oleh perusahaan ini berupa “*dog bone*” (**Gambar 1**) yang disebut *Hollow Flange Beam* (HFB) [4]. Material ini memiliki kelemahan yaitu penyambungan pada bagian sayap dengan bagian badan, karena bagian sayap yang berbentuk segitiga sehingga mengalami kesulitan ketika menyambung dengan bagian badan [3]. Sebagai akibatnya, dikembangkan material *Lite Steel Beam* (LSB). Material LSB memiliki bentuk seperti baja ringan dan bersifat monosimetris namun pada bagian sayap terdapat lubang persegi yang terdapat pada **Gambar 2**. LSB lebih cocok digunakan pada bangunan yang memiliki bentang pendek karena sifatnya yang monosimetris. Avery et. al. [5], Anapayan et. al. [6], dan Mahendran [7] melakukan pengamatan terhadap kapasitas lentur dari HFB dan LSB dengan metode eksperimen dan numerik. Namun dalam proses produksi, material LSB tergolong tidak ekonomis, sehingga produksi material ini dihentikan [3].



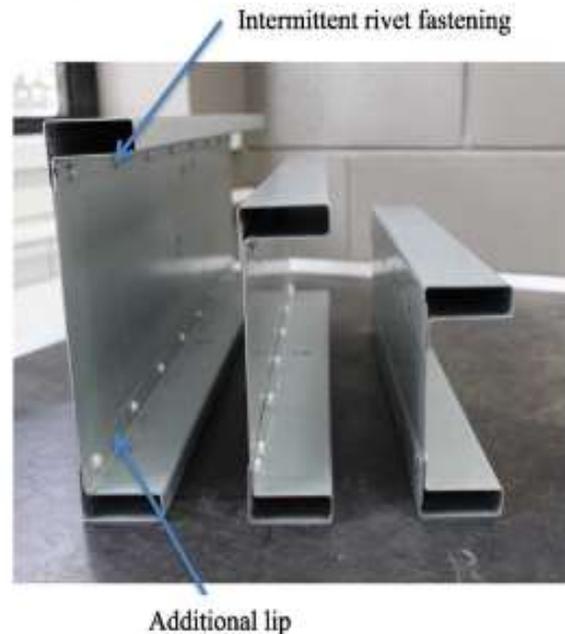
**Gambar 1.** Material baja *Hollow Flange Beam* (HFB) [4]



**Gambar 2.** Material baja *Lite Steel Beam* (LSB) [5]

Pada tahun 2016, Siahaan et. al. telah melakukan penelitian mengenai baja sayap berlubang menggunakan sambungan sekrup, baut, dan paku keling yang menghubungkan sayap dengan bagian badan (**Gambar 3**) [8].

Terdapat kekurangan dalam percobaan ini yang terletak pada saat proses penyambungan karena adanya rongga antara pelat penyambung dengan konektor yang mengakibatkan adanya sambungan yang terputus [3]. Material ini tidak dapat diaplikasikan pada bentang diatas 15 meter.



**Gambar 3.** Material baja sayap berlubang dengan sambungan paku keling [9]

Pada umumnya, material yang digunakan untuk bentang panjang berjenis *hot – rolled* dengan profil I dan memiliki bentang 9 – 30 meter. Dong & Sause [9], Wimer [10], Kim [11], dan Hassanain & Silvestre [12] dalam Perera & Mahendran [3], melakukan penelitian pada material *Concrete Filled Tubular Flange Girder* (CTFG) dan *Hollow Tubular Flange Plate Girder* (HTFPG) untuk jembatan. Akan tetapi pemodelan numerik kedua material yang sangat kompleks, sehingga dibutuhkan suatu penelitian terhadap material baja sayap berlubang yang dapat dimodelkan secara numerik.

Pada tahun 2018, Perera & Mahendran melakukan penelitian numerikal material baja sayap berlubang atau *Hollow Steel Plate Girder* (HFSPG) [3]. Terdapat perbedaan material pada penelitian yang dilakukan oleh Siahaan et. al. yaitu pada sambungan antara sayap dengan badan [8]. Perera & Mahendran menggunakan sambungan las pada material ini (**Gambar 4**) [3]. Hal ini bertujuan untuk meminimalisir terjadinya kegagalan pada sambungan yang mengakibatkan kekuatan baja sayap berlubang berkurang. Terdapat 12 model HFSPG dengan dimensi dan spesifikasi material yang ditentukan oleh Perera & Mahendran [3], seperti pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Dimensi dan Spesifikasi Material HFSPG [3]

No.	Dimensi Spesimen	$b_{fo}$ (mm)	$d_f$ (mm)	$d_w$ (mm)	$d$ (mm)	$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	Mutu Baja (MPa)	
								$W$	$F$
1	HFSPG-75 x 25 x 2.5-100 x 3	75	24.5	101	150	2.97	2.47	238.5	451
2	HFSPG-75 x 25 x 1.6-100 x 3	75	23.5	101	148	2.97	1.57	238.5	449
3	HFSPG-75 x 25 x 1.6-150 x 1.6	75	24.25	151	199.5	1.58	1.57	284.5	449
4	HFSPG-75 x 25 x 1.6-200 x 1.6	75	23.75	200.5	248	1.58	1.57	284.5	449



**Gambar 4.** Material baja sayap berlubang (HFSPG) [3]

Material HFSPG diuji dengan metode *four-point bending test* dengan ketentuan yang tercantum pada **Gambar 5**. Perletakan yang digunakan pada pemodelan ini menggunakan perletakan sendi dan rol. Terdapat 2 titik beban yang dimodelkan pada benda uji dengan nilai sebesar 500 kN [3].

**Tabel 2.** Kapasitas Momen *Ultimate* Material HFSPG [3]

No.	Dimensi Spesimen	<i>Ultimate Moment</i> (kNm)
1	HFSPG-75 x 25 x 2.5-100 x 3	26,24
2	HFSPG-75 x 25 x 1.6-100 x 3	15,80
3	HFSPG-75 x 25 x 1.6-150 x 1.6	22,16
4	HFSPG-75 x 25 x 1.6-200 x 1.6	28,29

Proses pemodelan material HFSPG menghasilkan kapasitas momen *ultimate* dan jenis *buckling* yang terjadi pada benda pemodelan[3]. Kapasitas momen *ultimate* material HFSPG dapat disajikan dalam **Tabel 2**. HFSPG-12 merupakan material yang memiliki nilai kapasitas momen *ultimate* tertinggi dikarenakan dimensi dan mutu material yang besar. Terdapat 2 jenis *buckling* yang terjadi pada hasil pemodelan yaitu *Flange Local Buckling* (FLB) dan *Web Local Buckling* (WLB) seperti pada **Tabel 3**. Sebagian besar material HFSPG mengalami FLB dikarenakan bagian sayap yang berlubang sehingga pada saat pembebanan, bagian akan mengalami tekuk terlebih dahulu. Akan tetapi terdapat beberapa pemodelan yang mengalami tekuk dengan jenis WLB. Hal tersebut dikarenakan dimensi pada bagian badan yang terlalu tinggi.

**2. Metode**

Pemodelan ini bertujuan untuk mengevaluasi pemodelan numerik HFSPG-1, HFSPG-5, HFSPG-7, dan HFSPG-8 yang telah dilakukan oleh [3] dengan dilakukan pendekatan analisis numerik menggunakan program bantu ABAQUS. Dalam pengujian secara numerik ini digunakan beberapa *properties material* yang sesuai dengan pengujian [3], dimana digunakan mutu baja dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada **Tabel 1**. Mutu baja pada bagian sayap profil memiliki nilai lebih besar jika dibandingkan dengan mutu badan, hal tersebut diakibatkan oleh lubang yang terdapat pada bagian sayap dan diharapkan dapat meningkatkan kapasitas momen profil meskipun bagian sayap terdapat lubang. Apabila terdapat perbedaan mutu pada bagian sayap dengan badan, maka sambungan antara kedua bagian tersebut menggunakan sambungan las, hal ini dapat menyebabkan kurang efisien dan menimbulkan kesulitan pada proses penyambungan dengan las. Apabila mutu sayap dengan mutu badan bernilai sama, hal ini dapat menaikkan nilai kapasitas momen profil tanpa memerlukan sambungan las, karena konsep dari *cold form* menggunakan lembaran baja. Jika mutu dan tebal bagian sayap dengan badan sama, hal tersebut menyebabkan bagian sayap lebih kuat dibandingkan dengan bagian badan material. Sebagai akibatnya, akan terjadi *buckling* pada bagian badan maka kapasitas momen nominal profil akan turun secara drastis.

Perhitungan kurva hubungan tegangan-regangan HFSPG sebagai *input* pada program bantu ABAQUS dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan *Ramberg-Osgood* yang disajikan dalam Persamaan 1 hingga Persamaan 3.

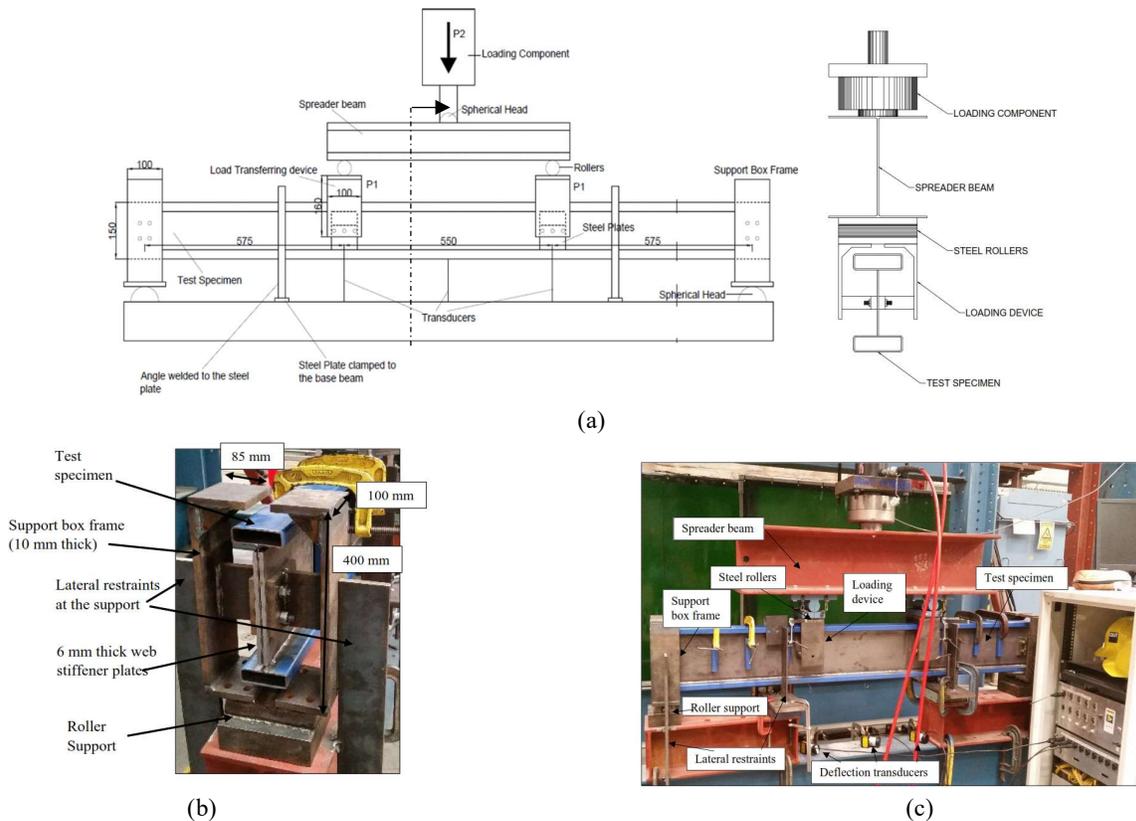
$$\epsilon_{us} = 100 \cdot \left( \epsilon_r - \frac{F_{tu}}{E} \right) \tag{1}$$

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\epsilon_{us}}{0.2}\right)}{\ln\left(\frac{F_{tu}}{F_{ty}}\right)} \tag{2}$$

$$\epsilon_e = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \cdot \left( \frac{\sigma}{F_{ty}} \right)^n \tag{3}$$

Dimana:

- $\epsilon_{us}$  = uniform strain
- $\epsilon_r$  = elongation (%)
- $E$  = modulus elastisitas (MPa)
- $F_{tu}$  = tegangan *ultimate* (MPa)



Gambar 5. Skema pembebanan *four-point bending test* HFSPG [3]

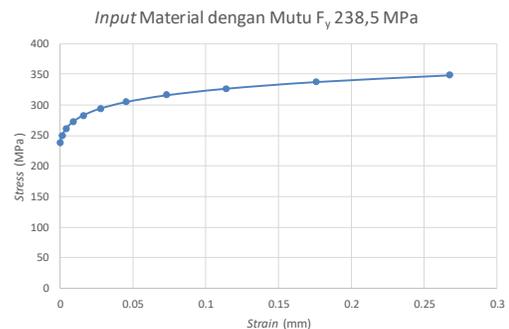
- $F_{ly}$  = tegangan leleh (MPa)
- $\sigma_e$  = *engineering stress* (MPa)
- $\epsilon_e$  = *engineering strain* (mm)

Berdasarkan hasil Persamaan 3 dihasilkan kurva hubungan tegangan dan regangan bagian *flange* dan *web* HFSPG yang dapat disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Langkah selanjutnya adalah memodelkan pembebanan *four-point bending* sesuai dengan Gambar 5. Pemodelan HFSPG *flange* dan *web* mengacu pada Tabel 1.

Proses awal pemodelan benda uji baja sayap berlubang pada program bantu ABAQUS diawali dengan *input* data material yang diperlukan seperti *part*, *property*, *assembly*, *step*, *interaction*, *load*, dan *mesh*. Benda uji pada menu *part* menggunakan model 3D *deformable*. *Base feature* yang digunakan adalah *shell* dengan tipe *extrusion*. Penggunaan model tersebut berdasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh [3]. Hasil dari kurva Ramberg-Osgood dan data material yang terdapat pada Gambar 6 dan Gambar 7 dimasukkan pada program bantu ABAQUS pada menu *property material*.

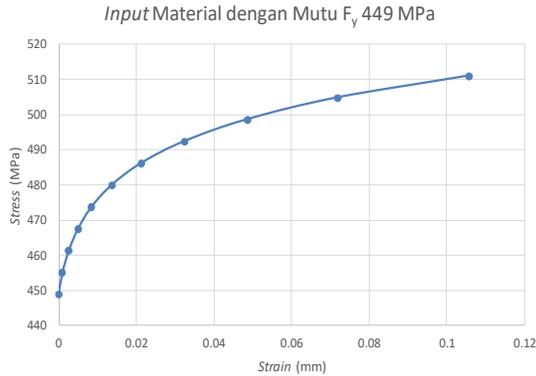
Tabel 3. Jenis *Buckling* pada HFSPG [3]

No.	Dimensi Spesimen	<i>Buckling Mode</i>
1	HFSPG-75 x 25 x 2.5-100 x 3	FLB
2	HFSPG-75 x 25 x 1.6-100 x 3	FLB
3	HFSPG-75 x 25 x 1.6-150 x 1.6	FLB
4	HFSPG-75 x 25 x 1.6-200 x 1.6	FLB/WLB



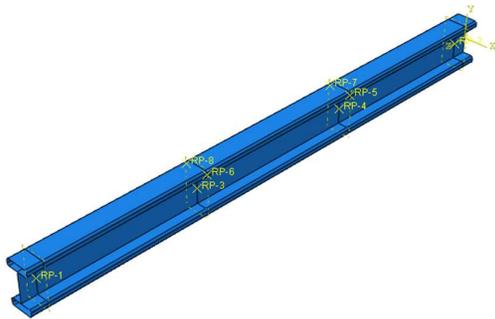
Gambar 6. Kurva *stress-strain* pada bagian sayap HFSPG

Selanjutnya setelah material didefinisikan, dilakukan *assembly* dari pemodelan tersebut, dimana *assembly* disesuaikan mengikuti dengan spesimen yang digunakan untuk tahap analisis. Hasil akhir dari *assembly* dapat dilihat pada **Gambar 8**. Tahapan berikut menentukan *input* tipe pembebanan pada menu *step*.



**Gambar 7.** Kurva stress-strain pada bagian badan HFSPG

Tipe pembebanan menggunakan *static-general*. Nilai *Time period* sebesar 1 detik dengan menggunakan *nlgeom*. *Increment size* digunakan *initial* (0,1 detik), minimum (1E-016), dan *maximum* (0,1). Berdasarkan parameter yang ditinjau untuk proses verifikasi benda uji, pada menu *field output* dilakukan pemilihan parameter yang terdiri dari *stresses*, *strains*, *displacement/velocity/acceleration*, *forces/reactions*, dan *contact*.

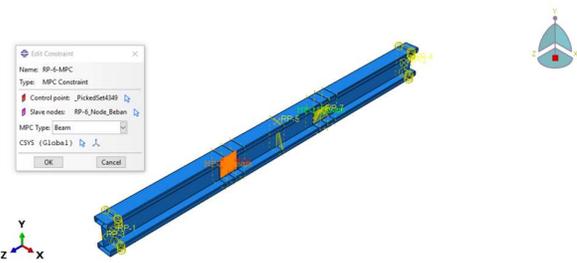


**Gambar 8.** Tahap *assembly* pada program bantu ABAQUS

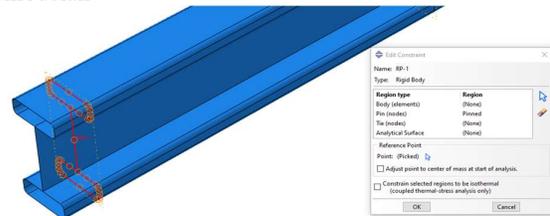
Setelah menentukan *step* yang akan digunakan, maka langkah selanjutnya yaitu menentukan *interaction* yang meliputi jenis tumpuan, titik beban, serta interaksi yang terjadi antara titik beban maupun perletakan dengan benda uji. Interaksi yang digunakan pada titik beban menggunakan interaksi tipe *Multi Point Constraint* (MPC) seperti pada **Gambar 9**. *Control points* yang dimasukkan pada program menggunakan *reference point* yang telah ditentukan letaknya sesuai dengan **Gambar 5** dan *input surface* menggunakan

bagian badan dari profil benda uji yang telah di-meshing. Pada interaksi tumpuan menggunakan tipe *rigid body* dengan tipe *pin (nodes)*. Jenis tumpuan yang digunakan terdapat 3 jenis yaitu tumpuan jepit, rol, dan penahan lateral. *Point* yang digunakan merupakan *reference point* dari titik perletakan, sedangkan untuk *pin (nodes)* menggunakan garis tepi yang telah dipartisi pada tahap sebelumnya (**Gambar 10**).

Pada menu *load* berfungsi untuk menentukan *boundary condition* serta nilai beban yang akan digunakan untuk proses *running* pada program bantu. *Boundary condition* untuk titik perletakan menggunakan *displacement/rotation* dengan tipe *step* yaitu *initial*. Titik pembebanan menggunakan *boundary condition* dengan tipe yang sama pada titik perletakan, namun tipe *step* yang digunakan merupakan *Loading Step*.



**Gambar 9.** Interaksi MPC yang digunakan dalam pemodelan



**Gambar 10.** Titik perletakan dengan tipe *rigid body*

Tahapan sebelum melakukan *running* pemodelan benda uji adalah tahap *meshing*. *Meshing* yang digunakan bertipe *quadratic* dengan *family* yaitu *shell*. Penggunaan *reduced integration* berfungsi untuk meminimalisir terjadinya kegagalan atau *error* pada saat proses *running*. Ukuran *meshing* yang digunakan pada benda uji sebesar 5 × 5 mm. Apabila semua tahapan telah dilakukan maka proses pemodelan dilanjutkan dengan *running* pemodelan benda uji.

Perhitungan secara analitis juga dilakukan dengan menggunakan acuan peraturan SNI 1729:2020[13]. Perhitungan analitis dilakukan dengan tujuan sebagai *cross check* antara hasil kapasitas momen pada pemodelan dengan perhitungan analitis. Langkah pertama dalam menghitung kapasitas momen adalah menghitung nilai momen inersia, modulus elastis, dan modulus plastis yang disajikan dalam Persamaan 4 hingga Persamaan 8

$$I_x = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-2t_f)(h_f-2t_f)^3}{6} - \frac{(\frac{b-t_w}{2})(h-2h_f)^3}{6} \quad (4)$$

$$I_y = \frac{hb^3}{12} - \frac{(h_f - 2t_f)(b - 2t_f)^3}{6} - \frac{(h - 2h_f)\left(\frac{b - t_w}{2}\right)^3}{6} \quad (5)$$

$$S_x = \frac{2 \times I_x}{h} \quad (6)$$

$$S_y = \frac{2 \times I_y}{b} \quad (7)$$

$$Z_x = \frac{bh^2}{4} - \frac{(b - t_w)(h - 2h_f)^2}{4} - (h_f - 2t_f)(b - 2t_f) \cdot (h - h_f) \quad (8)$$

Dimana:

$I_x$  = momen inersia profil pada sumbu x (mm<sup>4</sup>)

$I_y$  = momen inersia profil pada sumbu y (mm<sup>4</sup>)

$S_x$  = modulus elastis profil pada sumbu x (mm<sup>3</sup>)

$S_y$  = modulus elastis profil pada sumbu y (mm<sup>3</sup>)

$Z_x$  = modulus plastis profil pada sumbu x (mm<sup>3</sup>)

$h$  = tinggi profil (mm)

$b$  = lebar profil (mm)

$h_f$  = tinggi flange profil (mm)

$t_w$  = tebal web profil (mm)

$t_f$  = tebal flange profil (mm)

Kapasitas momen profil menggunakan nilai terendah yang dihasilkan oleh kondisi pada batas tekuk lokal sayap dan tekuk torsi lateral [13]. Tekuk lokal sayap tekan terbagi menjadi 3 kondisi meliputi penampang kompak, tidak kompak, dan langsing. Tekuk torsi lateral terbagi menjadi 3 kondisi yaitu bentang pendek, bentang menengah, dan bentang panjang.

#### A. Tekuk Lokal Sayap Penampang

Jenis tekuk lokal sayap penampang menentukan nilai dari kapasitas momen profil. Berikut perumusan untuk menentukan jenis tekuk lokal sayap.

- Penampang Sayap

$$\lambda = \frac{b}{t_f} \quad (9)$$

$$\lambda_p = 1,12 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (10)$$

$$\lambda_r = 1,40 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (11)$$

Dimana:

$E$  = modulus elastisitas (N/mm<sup>2</sup>)

$f_y$  = mutu baja bagian sayap (N/mm<sup>2</sup>)

$\lambda_p, \lambda_r$  = harga batas [13]

- Penampang Badan

$$\lambda = \frac{h}{t_w} \quad (12)$$

$$\lambda_p = 3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (13)$$

$$\lambda_r = 5,70 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (14)$$

Dimana:

$E$  = modulus elastisitas (N/mm<sup>2</sup>)

$f_y$  = mutu baja bagian badan (N/mm<sup>2</sup>)

$\lambda_p, \lambda_r$  = harga batas [13]

Apabila syarat dari penampang kompak terpenuhi pada seluruh bagian profil ( $\lambda < \lambda_p$ ), maka profil tersebut berjenis kompak. Namun, apabila syarat tersebut tidak dipenuhi pada salah satu bagian profil, maka profil tersebut tergolong tidak kompak atau langsing ( $\lambda > \lambda_p$ ). Proses selanjutnya adalah menghitung kapasitas momen berdasarkan jenis penampang. Berikut perumusan kapasitas momen berdasarkan jenis penampang.

- Penampang Kompak

$$M_n = M_p = Z_x \times f_y \quad (15)$$

- Penampang Sayap Tidak Kompak

$$M_n = M_p - (M_p - 0,7f_y S_x) \left( \frac{\lambda - \lambda_{pf}}{\lambda_{rf} - \lambda_{pf}} \right) \quad (16)$$

- Penampang Sayap Langsing (*Slender*)

$$M_n = \frac{0,9Ek_c S_x}{\lambda^2} \quad (17)$$

Dimana:

$$k_c = \frac{4}{\sqrt{d/t_w}} \quad (18)$$

$d$  = tinggi bagian badan (mm)

#### B. Tekuk Torsi Lateral Penampang

Jenis tekuk torsi lateral penampang juga berpengaruh terhadap nilai kapasitas momen. Berikut perumusan untuk menentukan jenis tekuk torsi lateral.

- Bentang Pendek ( $L_b < L_p$ )

$$L_p = 1,76r_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (19)$$

$$M_n = M_p = Z_x \times f_y \quad (20)$$

Dimana:

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} \quad (21)$$

$r_y$  = radius girasi terhadap sumbu y (mm)

$A$  = luas profil (mm<sup>2</sup>)

- Bentang Menengah ( $L_p \leq L_b \leq L_r$ )

$$L_r = 1,95r_{ts} \frac{E}{0,7f_y} \sqrt{\frac{J_c}{S_x h_o} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{S_x h_o}\right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7f_y}{E}\right)^2}} \quad (22)$$

$$M_n = C_b \left[ M_p - (M_p - 0,7f_y S_x) \left( \frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \quad (23)$$

Dimana:

$$r_{ts}^2 = \frac{I_y h_o}{2S_x} \quad (24)$$

$C_b$  = koefisien momen lentur

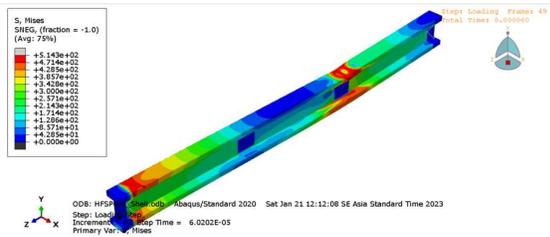
$j$  = konstanta torsi ( $\text{mm}^4$ )  
 $h_o$  = jarak antara titik berat sayap (mm)

- Bentang Panjang ( $L_b > L_r$ )

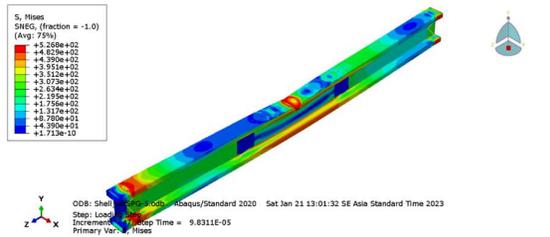
$$M_n = F_{cr} S_x \leq M_p \tag{25}$$

Dimana:

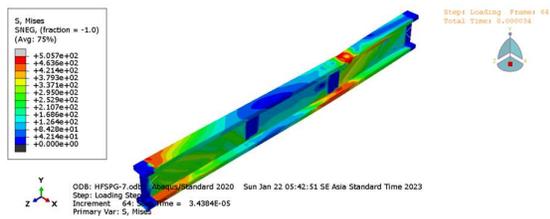
$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0,078 \frac{j_c}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \tag{26}$$



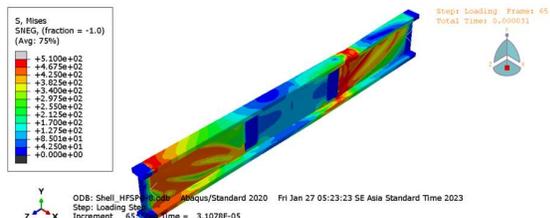
(a) Buckling pada bagian sayap HFSPG-1



(b) Buckling pada bagian sayap HFSPG-5



(c) Buckling pada bagian sayap HFSPG-7



(d) Buckling pada bagian sayap dan badan HFSPG-8

**Gambar 11.** Buckling yang terjadi pada model validasi

### 3. Hasil dan Pembahasan

Dari pemodelan ABAQUS, didapatkan hasil berupa model *buckling* yang dialami oleh model validasi dan hubungan antara kapasitas momen dengan *displacement*.

#### a. Model *buckling* model validasi

Pada penelitian yang dilakukan oleh Perera & Mahendran [3], menunjukkan terdapat 2 jenis *buckling* yang dialami oleh pemodelan yang disajikan pada **Gambar 11** dan **Tabel 4**. *Buckling* yang terjadi yaitu *flange local buckling* (FLB) dan *web local buckling*. Pada pemodelan validasi HFSPG-1, HFSPG-5, dan HFSPG-7, *buckling* yang terjadi berjenis *flange local buckling*. Namun pada pemodelan validasi HFSPG-8, *buckling* yang terjadi pada bagian *flange* dan *web* dari pemodelan validasi. *Buckling* yang terjadi pada bagian *web* HFSPG-8 diakibatkan karena dimensi tinggi *web* yang lebih besar dibandingkan dengan dimensi tinggi *web* HFSPG-1, HFSPG-5, dan HFSPG-7. *Buckling* yang terjadi pada pemodelan validasi sesuai dengan *buckling* yang terjadi pada pemodelan penelitian Perera & Mahendran [3].

#### b. Kurva hubungan antara kapasitas momen dengan *displacement*

Terdapat perbedaan nilai kapasitas momen dan nilai *displacement* pada saat kapasitas momen maksimum pemodelan validasi dengan pemodelan penelitian. Pemodelan validasi HFSPG-1 mencapai nilai kapasitas momen maksimum pada nilai 27,34 kNm dengan *displacement* 24,35 mm, sedangkan pemodelan eksperimental HFSPG-1 memiliki nilai kapasitas momen sebesar 27,23 kNm dengan *displacement* sebesar 29,29 mm. Pemodelan validasi HFSPG-5 mencapai nilai kapasitas momen maksimum dengan nilai 16,26 kNm dengan *displacement* 12,95 mm, sedangkan pada penelitian mencapai kapasitas momen maksimum 16,28 kNm dengan *displacement* sebesar 20,49 mm. Pemodelan validasi HFSPG-7 memiliki nilai kapasitas momen maksimum sebesar 22,21 kNm dengan *displacement* sebesar 15,96 mm, sedangkan pada pengujian eksperimental nilai kapasitas momen maksimum mencapai 22,08 kNm dengan *displacement* sebesar 15,59 mm. Pada HFSPG-8 validasi, kapasitas momen maksimum berada di angka 28,15 kNm dengan nilai *displacement* sebesar 11,25 mm, sedangkan pada pemodelan eksperimental nilai kapasitas momen maksimum mencapai 27,69 kNm dengan nilai *displacement* 10,35 mm.

Selisih nilai kapasitas momen maksimum pemodelan validasi dengan pemodelan penelitian berada di bawah nilai 5% (**Tabel 5**), sehingga parameter yang digunakan pada

model validasi sudah mendekati dengan parameter yang digunakan pada penelitian Perera & Mahendran [3]. Untuk memudahkan dalam melakukan perbandingan grafik hasil dari pemodelan validasi dengan penelitian, maka grafik dari kedua hasil tersebut digabungkan menjadi satu pada **Gambar 12**.

**Tabel 4.** Rekapitulasi jenis *buckling* pada model validasi

Benda Uji	<i>Buckling Mode</i>
HFSPG-1	FLB
HFSPG-5	FLB
HFSPG-7	FLB
HFSPG-8	WLB & FLB

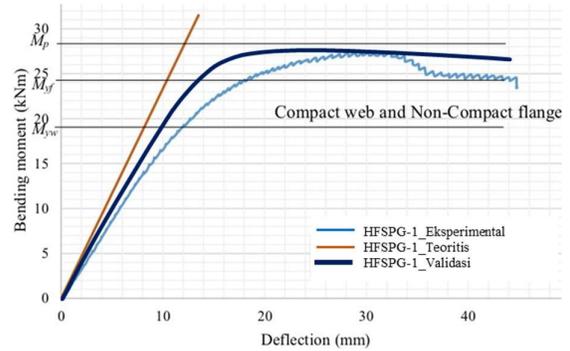
**Tabel 5.** Kapasitas Momen *Ultimate* Model Validasi dengan Penelitian Perera & Mahendran[3]

Benda Uji	Kapasitas Momen <i>Ultimate</i> Model Validasi (kNm)	Kapasitas Momen <i>Ultimate</i> Penelitian [3] (kNm)	Persentase Selisih Model Validasi dengan Eksperimental
HFSPG-1	27,34	27,23	0,43%
HFSPG-5	16,26	16,28	0,12%
HFSPG-7	22,21	22,08	0,56%
HFSPG-8	28,17	27,69	1,72%

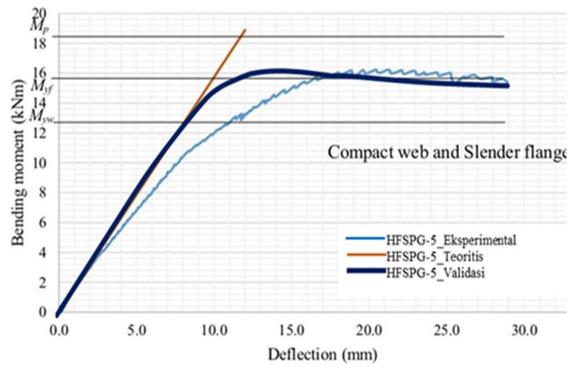
c. Perhitungan analitis kapasitas momen HFSPG

Hasil perhitungan analitis dengan mengacu pada peraturan SNI 1729:2020 [13], menghasilkan nilai yang mendekati dengan hasil pemodelan dengan program bantu. Berdasarkan **Tabel 6**, nilai perhitungan analitis HFSPG-8 lebih besar jika dibandingkan dengan hasil pemodelan. Hal tersebut diakibatkan oleh dimensi tinggi profil HFSPG-8 terlalu tinggi sehingga tergolong langsing (*slender*), namun profil tersebut tergolong bentang pendek. Sebagai akibatnya nilai kapasitas momen perhitungan analitis profil HFSPG-8 lebih besar dibandingkan dengan pemodelan.

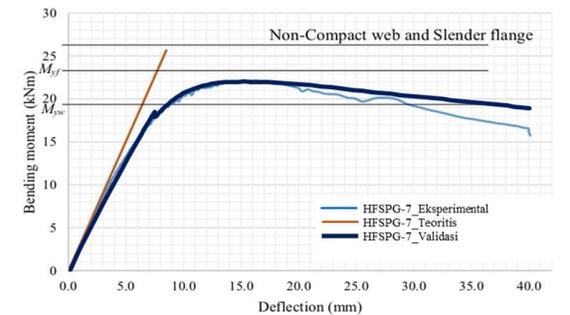
Selain memperhitungkan nilai kapasitas momen setiap profil, perhitungan analitis juga bertujuan untuk menentukan jenis penampang profil. Berdasarkan hasil perhitungan dengan Persamaan 4 hingga Persamaan 26, dihasilkan jenis penampang profil yang tertulis pada **Tabel 7**. Hasil perhitungan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [3].



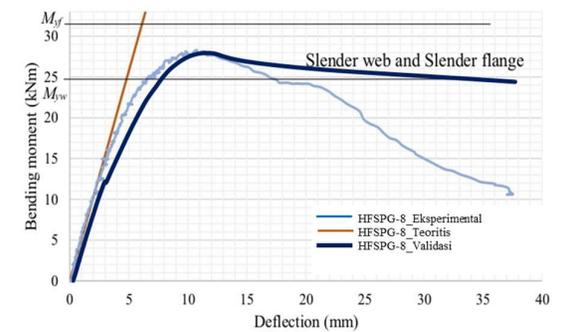
(a) Kurva kapasitas momen HFSGP-1



(b) Kurva kapasitas momen HFSGP-5



(c) Kurva kapasitas momen HFSGP-7



(d) Kurva kapasitas momen HFSGP-8

**Tabel 6** Perbandingan Kapasitas Momen Validasi dengan Perhitungan Analitis

Benda Uji	Kapasitas Momen		$\phi M_n/M$
	<i>Ultimate Model</i>	$\phi M_n$ (Perhitungan Analitis)	
	Validasi ( <i>M</i> )		
	kNm	kNm	
HFSPG-1	27,34	26,87	0,983
HFSPG-5	16,26	16,28	1,001
HFSPG-7	22,21	22,02	0,992
HFSPG-8	28,17	27,67	0,982

**Tabel 7.** Jenis Penampang Profil Berdasarkan Perhitungan Analitis

Profil	Jenis Penampang Profil		<i>Overall</i>
	Bagian Badan	Bagian Sayap	
HFSPG-1	Kompak	Non-kompak	Non-kompak
HFSPG-5	Kompak	Langsing	Langsing
HFSPG-7	Non-Kompak	Langsing	Langsing
HFSPG-8	Langsing	Langsing	Langsing

#### 4. Simpulan

Pemodelan analisis menggunakan *finite element method* atau numerik dilakukan untuk memvalidasi hasil eksperimen berupa jenis *buckling*, kapasitas momen profil, dan jenis penampang. Berdasarkan hasil verifikasi, pemodelan numerikal sudah mendekati dengan model eksperimen dari hasil *buckling*, kurva kapasitas momen dengan *displacement*, dan jenis penampang. Namun terdapat perbedaan pada kemiringan kurva. Hasil kurva pemodelan validasi lebih tegak dan lurus dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hal tersebut diakibatkan adanya perbedaan pada tipe MPC dan *hardening* yang digunakan pada saat pemodelan dengan program bantu. Perbandingan juga dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan analitis. Berdasarkan hasil perhitungan analitis, hasil kapasitas momen dari pemodelan validasi juga mendekati dengan perhitungan analitis. Selain itu, jenis penampang yang dihasilkan dari perhitungan analitis sama dengan hasil eksperimen.

#### Daftar Pustaka

[1] H. Husnah, N. E. Darfia, and F. Hidayat, "Analisis Struktur Rangka Baja Ringan Dan Baja Berat (Wf)

Dengan Metode Bricscad Dan Metode Elemen Hingga," *Siklus J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 2, pp. 87–96, 2019, doi: 10.31849/siklus.v5i2.3232.

- [2] I. N. Dubina, "Managing creativity: theoretical approaches to employees' creativity development and regulation," *Int. J. Manag. Concepts Philos.*, vol. 1, no. 4, p. 334, 2005, doi: 10.1504/ijmcp.2005.008532.
- [3] N. Perera and M. Mahendran, "Section moment capacity tests of hollow flange steel plate girders," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 148, pp. 97–111, 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.04.034.
- [4] P. Avery and M. Mahendran, "Finite element analysis of hollow flange beams with web stiffeners," *Int. Spec. Conf. Cold-Formed Steel Struct. Recent Res. Dev. Cold-Formed Steel Des. Constr.*, pp. 227–242, 1996, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1997)123:9(1123).
- [5] P. Avery, M. Mahendran, and A. Nasir, "Flexural capacity of hollow flange beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 53, no. 2, pp. 201–223, 2000, doi: 10.1016/S0143-974X(99)00067-X.
- [6] T. Anapayan, M. Mahendran, and D. Mahaarachchi, "Section moment capacity tests of LiteSteel beams," *Thin-Walled Struct.*, vol. 49, no. 4, pp. 502–512, 2011, doi: 10.1016/j.tws.2010.12.004.
- [7] T. Anapayan and M. Mahendran, "Improved design rules for hollow flange sections subject to lateral distortional buckling," *Thin-Walled Struct.*, vol. 50, no. 1, pp. 128–140, 2012, doi: 10.1016/j.tws.2011.09.004.
- [8] R. Siahaan, M. Mahendran, and P. Keerthan, "Section moment capacity tests of rivet fastened rectangular hollow flange channel beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 125, pp. 252–262, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2016.06.021.
- [9] J. Dong and R. Sause, "Flexural strength of tubular flange girders," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 3, pp. 622–630, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.02.019.
- [10] M. R. Wimer, "Concrete filled rectangular tubular flange girders with corrugated and flat webs," *Theses Diss.*, no. 04, 2004, [Online]. Available: <http://preserve.lehigh.edu/etd/862>
- [11] B.-G. Kim and R. Sause, "Lateral Torsional Buckling Strength of Tubular Flange Girders," *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 6, pp. 902–910, 2008, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2008)134:6(902).
- [12] M. F. Hassanein and N. Silvestre, "Lateral-distortional buckling of hollow tubular flange plate girders with slender unstiffened webs," *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 572–584, 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.05.028.

- [13] BSN, “SNI 1729:2020 - Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural,” *Badan Stand. Nas.*, no. 8, pp. 9–16, 2020.