

Studi Eksperimental Batang Tekan Baja Canai Dingin Diperkaku Sebagian

Arif Sandjaya

Jurusan Teknik Sipil Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta, 11440

E-mail: arifs@ft.untar.ac.id

Bambang Suryoatmono

Jurusan Teknik Sipil Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciembuleuit No.94 Bandung, 40141

E-mail: suryoatm@unpar.ac.id

Abstrak

Struktur baja canai dingin saat ini populer digunakan karena ringan, mudah digunakan, dan cepat dalam konstruksi. Kelemahan struktur baja canai dingin adalah tekuk lokal yang disebabkan tipisnya elemen penampang. Hal tersebut menyebabkan kegagalan struktur terjadi sebelum mencapai kapasitas beban tertinggi. Dalam penelitian ini, dua buah profil baja canai dingin yang disusun bersama pada bagian punggung dengan punggung sebagai batang tekan akan ditambahkan pengaku dengan tiga pola penempatan berbeda untuk meningkatkan ketahanan terhadap tekuk lokal. Hasil pengujian menunjukkan ketahanan terhadap tekuk lokal meningkat akibat berkurangnya panjang tekuk kritis sedangkan cara menempatkan pengaku tidak memberikan berpengaruh. Korelasi hasil kekuatan tekan antara perbedaan penempatan pengaku secara eksperimental diverifikasi menggunakan SNI 7971:2013 dan analisis elemen hingga.

Kata-kata Kunci: Struktur baja canai dingin, tekuk lokal, batang tekan tersusun, pengaku.

Abstract

The cold formed steel structure is currently popularly used because it is lightweight, easy to use, and fast in construction. The weakness of cold formed steel structures is the local buckling caused by the thinness of the cross-sectional elements. This causes structural failure occurs before it reaches the highest load capacity. In this study, two cold formed steel profiles arranged together on back to back as compression member will be added stiffeners with three different placement patterns to improve local buckling resistance. The test results showed increased resistance to local buckling due to the reduced length of the critical buckling while the way of placing stiffeners not give effect. The correlation of compressive strengths between experimental confinement placement differences was verified using SNI 7971: 2013 and finite element analysis.

Keywords: Cold-formed steel, local buckling, built-up compression member, stiffeners.

1. Pendahuluan

Baja canai dingin merupakan baja yang dibentuk tanpa peleburan, tetapi dengan penggabungan atau penekanan lembaran baja tipis menjadi penampang yang dibutuhkan. Penelitian terhadap baja canai dingin merupakan suatu tantangan untuk meningkatkan kinerjanya. Hal ini mendorong banyak penelitian yang berhubungan dengan analisis numerik dan eksperimental untuk mengetahui sifat dan metode desain yang aman pada baja canai dingin.

Kelemahan struktur baja canai dingin adalah tekuk lokal yang disebabkan tipisnya elemen penampang. Hal tersebut menyebabkan kegagalan struktur terjadi sebelum mencapai kapasitas beban tertinggi. Untuk mengurangi kemungkinan terjadinya tekuk lokal komponen struktur tekan baja canai dingin, digunakan penampang tersusun. Menurut Mei dkk (2009) penampang tersusun adalah suatu inovasi yang baik karena kemampuan pikul beban meningkat.

Hasil tersebut dipengaruhi oleh celah antara penampang yang disusun, jarak pengaku dan penyambung. Penampang tersusun pada umumnya disambung dengan menggunakan baut sehingga membutuhkan pembuatan lubang. Menurut Baldassino dkk (2005) keberadaan lubang pada dinding badan penampang berpengaruh terhadap pola kegagalan dan dapat mengakibatkan beban menjadi eksentris. Menurut Wang dan Salhab (2009) keberadaan lubang tersebut juga menurunkan kapasitas pikul beban. Berdasarkan SNI 7971:2013 dan AISI 2007, batang tekan baja canai dingin berlaku untuk komponen struktur dimana resultan semua beban yang bekerja padanya berupa beban aksial yang melalui titik berat penampang efektif yang dihitung pada tegangan kritis (f_n). Gaya aksial tekan desain (N^*) harus memenuhi **Persamaan 1** dan **Persamaan 2**.

$$N^* \leq \phi_c N_s \quad (1)$$

$$N^* \leq \phi_c N_c \quad (2)$$

dengan

ϕ_c = faktor reduksi kapasitas untuk komponen struktur dalam tekan (0,85).

N_s = kapasitas penampang nominal dari komponen struktur dalam tekan, $A_{ey} F_y$

A_{ey} = luas efektif saat tegangan leleh.

N_c = kapasitas komponen struktur nominal dari komponen struktur dalam tekan, $A_{en} F_n$

A_{en} = luas efektif saat tegangan kritis.

Luas efektif saat tegangan leleh (A_{ey}) dan saat tegangan kritis (A_{en}), ditentukan sesuai dengan lebar efektif untuk perhitungan kapasitas. Lubang boleh diabaikan jika jumlah panjang lubang sepanjang daerah efektif dibagi dengan panjang efektif tidak melampaui 0,015.

Lebar efektif pengaku (b_e atau d_{se}) diukur dari tepi terkekang dari elemen tekan tanpa pengaku dan pengaku tepi dengan tegangan bergradien (f_1^* dan f_2^*) dihitung berdasarkan penampang bruto seperti yang ditunjukkan **Gambar 1**. Dalam kasus kedua tegangan dalam tekan, maka $f_1^* \geq f_2^*$. Lebar efektif adalah hasil pengalihan lebar rata pengaku tidak termasuk lengkungan (b) dikalikan faktor lebar efektif (ρ) yang dipengaruhi rasio kelangsingan (λ) seperti persamaan dibawah:

$$\rho = \frac{(1 - \frac{0,22}{\lambda})}{\lambda} \leq 1 \quad (3)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{f^*}{f_{cr}}} \quad (4)$$

$$f_{cr} = \frac{k \pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (5)$$

dengan

f^* = tegangan desain pada elemen tekan yang dihitung berdasarkan lebar desain efektif.

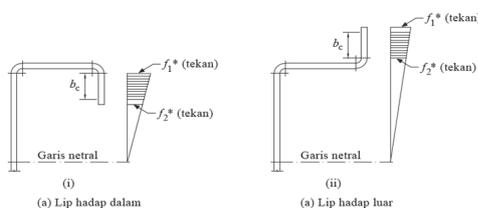
f_{cr} = tegangan tekuk elastis pelat.

k = koefisien tekuk pelat.

E = modulus elastisitas young (200×10^3 MPa).

ν = angka poisson.

t = tebal elemen dengan pengaku yang mengalami tekan merata.



Gambar 1. Elemen tanpa pengaku dengan tegangan bergradien tekan (SNI 7971:2013)

Lebar efektif elemen (b_e) yang mengalami tekan merata dengan pengaku tepi (**Gambar 2**) dipengaruhi faktor kelangsingan (S) harus ditentukan sebagai berikut:

1. Untuk $\frac{b}{t} \leq 0,328 S$

$$b_e = b \quad (6)$$

$$b_1 = b_2 = \frac{b}{2} \quad (7)$$

$$d_s = d_{se} \quad (8)$$

$$A_s = A_{se} \quad (9)$$

2. Untuk $\frac{b}{t} > 0,328 S$

$$b_1 = \frac{b_e}{2} \left(\frac{I_s}{I_a}\right) \quad (10)$$

$$b_2 = b_e - b_1 \quad (11)$$

$$d_s = d_{se} \left(\frac{I_s}{I_a}\right) \quad (12)$$

$$A_s = A_{se} \left(\frac{I_s}{I_a}\right) \quad (13)$$

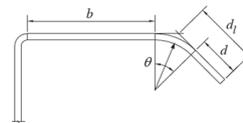
$$I_s = \frac{a^3 \tau \sin^2 \theta}{12} \leq I_a \quad (14)$$

$$I_a = 399 t^4 \left(\frac{b}{tS} - 0,328\right)^3 \leq t^4 (115 \frac{b}{tS} + 5) \quad (15)$$

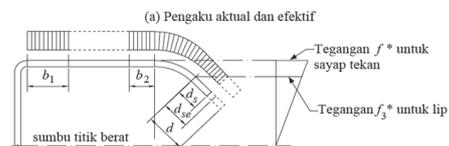
dengan

I_a = momen inersia pengaku cukup, sehingga setiap elemen komponen struktur berperilaku sebagai elemen dengan pengaku.

I_s = momen inersia pengaku utuh terhadap sumbu yang melalui titik berat yang sejajar dengan elemen yang akan diperkaku.



Keterangan
 d_1, d = dimensi pengaku aktual



Keterangan
 d_{se} = lebar efektif dari pengaku dihitung sesuai Pasal 2.3.2.2
 d_s = lebar efektif tereduksi dari pengaku

(b) Elemen efektif dan tegangan pada elemen efektif

Gambar 2. Elemen dengan pengaku tepi lip sederhana (SNI 7971:2013)

Lebar efektif elemen (b_e) dengan pengaku yang mengalami tekan merata dengan pengaku antara majemuk (**Gambar 3**) harus ditentukan sebagai berikut:

$$b_e = \rho \left(\frac{A_g}{t}\right) \quad (16)$$

$$\rho = \frac{(1 - \frac{0,22}{\lambda})}{\lambda} \text{ jika } \lambda > 0,673 \text{ dan } 1 \text{ jika } \lambda \leq 0,673 \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{1,052}{\sqrt{k}} \left(\frac{b_e}{t}\right) \sqrt{\frac{f^*}{E}} \quad (18)$$

$$R = \frac{11-b_o/d_1}{5} \text{ jika } \frac{b_o}{d_1} < 1 \text{ dan } 2 \text{ jika } \frac{b_o}{d_1} \geq 1 \quad (19)$$

$$K_{loc} = 4(n + 1)^2 \quad (20)$$

$$k_d = \frac{(1+\beta^2)^2 + \gamma(1+n)}{\beta^2\{1+\delta(n+1)\}} \quad (21)$$

$$\beta = \{1 + \gamma(n + 1)\}^{0,25} \quad (22)$$

$$\gamma = \frac{10,92 I_{sp}}{b_o t^3} \quad (23)$$

$$\delta = \frac{A_s}{b_o t} \quad (24)$$

dengan

b_o = lebar rata total dari elemen dengan pengaku.

A_g = luas bruto elemen termasuk pengaku.

k = koefisien tekuk pelat harus ditentukan dari yang terkecil antara $R k_d$ dan k_{loc} .

k_d = koefisien tekuk pelat untuk tekuk distorsi.

k_{loc} = koefisien tekuk pelat untuk tekuk subelemen lokal.

d_1 = lebar elemen yang bersebelahan dengan elemen dengan pengaku.

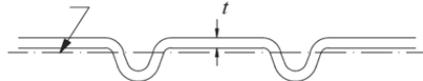
β, δ = koefisien.

γ = faktor kepentingan.

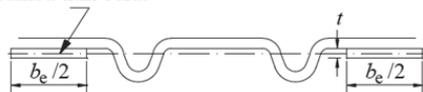
I_{sp} = momen inersia pengaku terhadap garis tengah bagian rata dari elemen.

A_s = luas bruto pengaku.

sumbu titik berat



sumbu titik berat



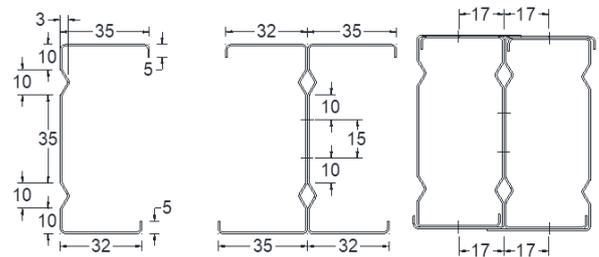
Gambar 3. Lokasi lebar efektif (SNI 7971:2013)

Tetapi peraturan yang ada belum mencakup jika batang tekan memiliki penampang yang tidak seragam sepanjang bentang. Pada studi eksperimental ini diselidiki pengaruh pengaku yang ditambahkan pada batang tekan tersusun dengan menggunakan tiga pola penempatan yang berbeda. Korelasi antara pola penempatan pengaku dipelajari dalam studi eksperimental ini dan diverifikasi dengan analisis elemen hingga menggunakan perangkat lunak Abaqus.

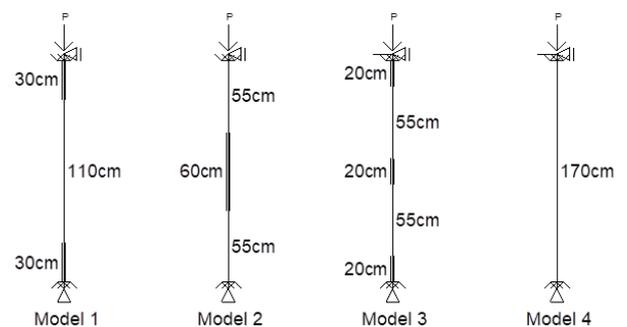
2. Metode Penelitian

Studi eksperimental ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan penempatan pengaku yang ditambahkan pada penampang susun batang tekan terhadap kapasitas pikul batang tekan (P_{cr}).

Profil baja canai dingin yang digunakan sebagai batang tekan adalah kanal 75 mm x 35 mm x 5 mm dengan tebal 0,65 mm yang terbuat dari galvanis 550 (G550). Profil ini mudah diperoleh dari distributor baja, yang umumnya digunakan untuk rangka atap baja ringan di DKI Jakarta. Profil disusun saling berpunggungan sehingga menjadi penampang tersusun (Gambar 4). Sekrup dengan diameter 5 mm pada setiap 2 cm arah memanjang digunakan sebagai penyambung. Panjang setiap benda uji 1,8 m. Ujung batang tekan sisi atas dan bawah diselimuti adukan semen setebal 5 cm yang berfungsi untuk distribusi gaya tekan oleh mesin penguji menjadi terbagi rata. Benda uji ditambahkan pengaku dengan 3 pola berbeda. Model pertama menggunakan pengaku pada kedua tumpuan batang saja. Model ke dua menggunakan pengaku pada bagian tengah batang saja. Model ke tiga menggunakan pengaku pada kedua ujung dan tengah batang. Model ke empat tanpa penambahan pengaku (Gambar 5). Struktur benda uji merupakan struktur batang tekan dengan tumpuan bawah jepit dan atas jepit-rol. Pengaku menggunakan profil yang sama (Gambar 4) dengan total panjang 60 cm. Pengujian model dilakukan di B2TKS BPPT, Serpong. Benda uji dinyatakan gagal jika bacaan beban tekan tidak lagi meningkat tetapi diperpendek benda uji tetap berlanjut.



Gambar 4. Sketsa penampang kanal (kiri), penampang tersusun (tengah), dan penampang berpengaku (kanan)

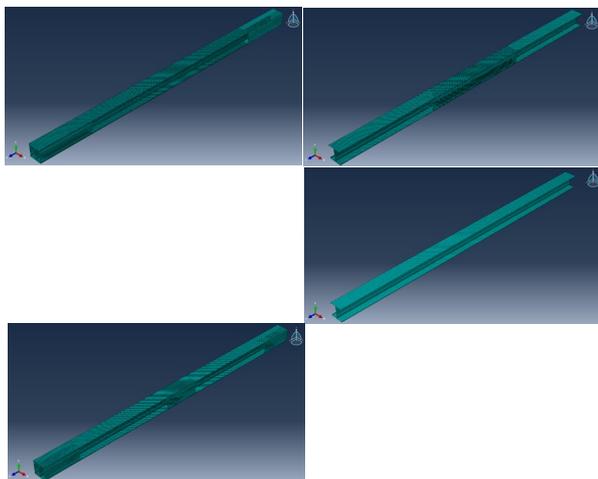


Gambar 5. Sketsa penempatan pengaku struktur benda uji

Perhitungan dilakukan berdasarkan perhitungan SNI 7971:2013. Karena SNI 7971:2013 tidak mencakup penampang non prismatis, maka panjang tanpa pengaku dijadikan panjang efektif (l_e) untuk setiap model.

Analisis elemen hingga dengan menggunakan Abaqus dilakukan untuk mengetahui pengaruh penempatan pengaku terhadap P_{cr} . Analisis elemen hingga menggunakan elemen *shell* dengan bentuk segi empat

dengan 4 nodal sebagai elemen utama yang mampu merepresentasikan perilaku membran dan perilaku lentur. **Gambar 6** menunjukkan jaring elemen model 1, model 2, model 3, dan model 4 yang digunakan dalam analisis. Salah satu ujung dari model dibuat tumpuan jepit, sedangkan ujung lainnya diberi tumpuan jepit-rol (deformasi arah z yang diijinkan) dan beban tekan 1 N. Tegangan leleh diasumsikan 550 MPa. Hasil yang diperoleh juga digunakan untuk mengetahui kapasitas alat tekan yang dibutuhkan untuk uji tekan eksperimental.

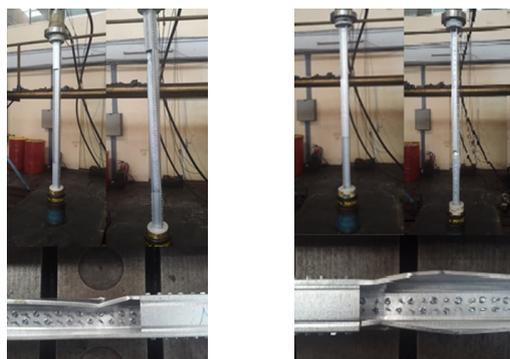


Gambar 6. Jaring elemen hingga model 1 (kiri atas), model 2 (kanan atas), model 3 (kiri bawah), dan model 4 (kanan bawah)

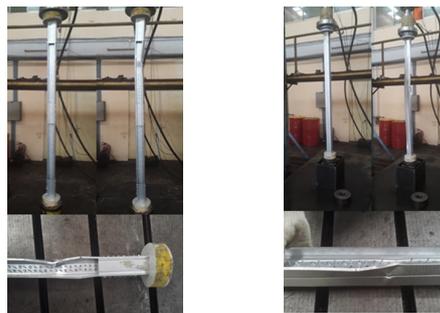
3. Hasil Analisis dan Eksperimental

3.1 Uji eksperimental batang tekan

Kegagalan yang terjadi adalah tekuk lokal pada daerah yang tidak diperkuat pengaku seperti yang ditunjukkan **Gambar 7** untuk model 1 dan model 2 dan **Gambar 8** untuk model ke tiga dan model 4. Tekuk lokal terjadi karena besarnya rasio kelangsingan elemen penampang, sehingga kapasitas batang tekan ditentukan dari tertekuknya elemen (tekuk lokal) terlebih dahulu dan bukan dari tekuk global batang tekan.



Gambar 7. Benda uji model 1 (kiri) dan model 2 (kanan) sebelum ditekan, saat ditekan, dan kegagalan yang terjadi



Gambar 8. Benda uji model 1 (kiri) dan model 2 (kanan) sebelum ditekan, saat ditekan, dan kegagalan yang terjadi

Setiap kegagalan benda uji berpengaku (model 1, model 2, dan model 3) yang terjadi adalah tekuk lokal pada profil tanpa pengaku yang posisinya dekat dengan profil berpengaku. Hal ini disebabkan perubahan tegangan akibat perubahan luas penampang profil. Hasil nilai P_{cr} dari 3 benda uji untuk model pertama hingga ke empat dapat dilihat dalam **Tabel 1** atau **Tabel 2**. Salah satu hasil pada benda uji ke tiga untuk model 2 mengalami penurunan yang disebabkan kegagalan adukan semen mengalami tekuk distorsi.

3.2 SNI 7971:2013

Berdasarkan hasil perhitungan gaya tekan aksial desain diperoleh dari model 1, model 2, model 3, dan model 4 secara berurutan adalah 25,17 kN, 28,80 kN, 28,80 kN, dan 20,74 kN.

3.3 Analisis elemen hingga

Analisis elemen hingga bertujuan mencari nilai faktor P_{cr} perbandingan dari ketiga model yang diuji tekan secara eksperimental. Hasil analisis elemen hingga model 1, model 2, model 3, dan model 4 secara berurutan adalah 42,60 kN, 51,62 kN, 51,50 kN, dan 41,67 kN. Ragam kegagalan yang terjadi adalah tekuk lokal pada daerah yang tidak diperkuat pengaku seperti yang ditunjukkan **Gambar 9** untuk model 1, model 2, model 3, dan model 4.

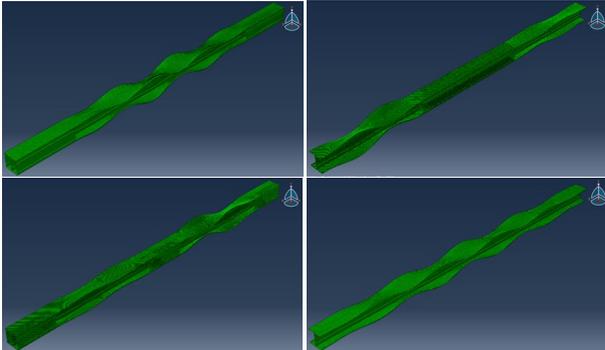
3.4 Perbandingan SNI 7971:2013 dan eksperimental batang tekan

Persentase perbedaan hasil gaya tekan aksial desain SNI 7971:2013 dengan eksperimental ditunjukkan dalam **Tabel 1**. Perbedaan absolut hasil perhitungan gaya tekan aksial desain SNI 7971:2013 dengan hasil eksperimental berkisar antara 7% - 23%. Untuk model 2 dan model 3 menghasilkan perbedaan absolut 7% - 14%, sedangkan model 1 dan model 4 menghasilkan perbedaan absolut 15% - 23%. Perhitungan gaya tekan aksial desain SNI 7971:2013 termasuk konservatif.

3.5 Perbandingan analisis elemen hingga dan eksperimental batang tekan

Persentase perbedaan analisis elemen hingga dengan eksperimental ditunjukkan dalam **Tabel 2**. Perbedaan

hasil analisis elemen hingga dengan hasil eksperimental berkisar antara 30% - 68%. Semua hasil analisis elemen hingga lebih besar dibandingkan hasil eksperimental. Hal ini disebabkan analisis elemen hingga menggunakan asumsi bahwa material bersifat elastis.



Gambar 9. Ragam tekuk hasil analisis elemen hingga model 1 (kiri atas), model 2 (kanan atas), model 3 (kiri bawah), dan model 4 (kanan bawah)

Tabel 1. Persentase Perbedaan SNI 7971:2013 Dengan Eksperimental

	Beban Tekuk Kritis (kN)		Perbedaan (%)
	SNI 7971:2013	Eksperimental	
Model 1	25.17	29.60	14.97
		29.60	14.97
		32.80	23.26
Model 2	28.80	33.60	14.29
		31.20	7.69
		20.80	38.46
Model 3	28.80	32.80	12.20
		31.60	8.86
		31.60	8.86
Model 4	20.74	27.20	23.75
		27.20	23.75
		24.80	16.37

Tabel 2. Persentase Perbedaan Antara Analisis Elemen Hingga Dengan Eksperimental

	Beban Tekuk Kritis (kN)		Perbedaan (%)
	FEA	Eksperimental	
Model 1	42,60	29,60	43,92
		29,60	43,92
		32,80	29,88
Model 2	51,62	33,60	53,63
		31,20	65,45
		20,80	148,17
Model 3	51,50	32,80	57,01
		31,60	62,97
		31,60	62,97
Model 4	41,67	27,20	53,20
		27,20	53,20
		24,80	68,02

4. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

Penggunaan pengaku memberikan penambahan kapasitas tekan batang 16% hingga 23%. Letak pengaku yang paling besar dalam meningkatkan beban adalah yang ditunjukkan dengan model 2 (pengaku panjang di tengah) dan model 3 (pengaku pendek di kedua ujung dan di tengah).

Penambahan kapasitas tekan batang dipengaruhi panjang tekuk kritis yang berkurang akibat penambahan pengaku, sedangkan cara menempatkan pengaku tidak memberikan pengaruh selama panjang tekuk kritis sama. Hal ini didukung oleh hasil eksperimental, perhitungan SNI, dan analisis elemen hingga. Hasil kapasitas tekan tertinggi dan tidak jauh berbeda diperoleh dari model 2 dan model 3 dengan panjang tekuk kritis sebesar 550 mm, kemudian model 1 dengan panjang tekuk kritis 1100 mm, dan yang paling rendah diperoleh dari model 4 dengan panjang tekuk kritis 1700 mm.

Analisis elemen hingga yang digunakan adalah analisis tekuk dengan asumsi material elastis sehingga beban kritis yang diperoleh jauh lebih besar daripada beban gagal yang diperoleh dari studi eksperimental. Sekalipun demikian, hasil elemen hingga menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu letak pengaku pada model 2 dan model 3 adalah yang memberikan kapasitas tekan terbesar.

Hal yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian lebih lanjut adalah perilaku tekan pada penampang tersusun baja canai lain yang diperkaku.

5. Referensi

- American Iron and Steel Institute (2007), *Nort American Specification for Design of Cold-Formed Steel Structure Members*, Mexico.
- Badan Standarisasi Nasional, SNI 7971:2013, *Struktur Baja Canai Dingin*, Indonesia.
- Baldassino, N.; Eccher, G.; dan Zandonini, R., 2005, *Buckling Design Analysis of Thin-walled Compressed Members with or without Perforations*, International Journal of Steel Structures 5: p. 33-42.
- Mei, CC.; Lau, H.H.; dan Toh, S.L., 2009, *Applications of Built-Up Sections in Lightweight Steel Trusses*, Sixth International Conference on Advances in Steel Structures: p. 857-864. Hong Kong, China.
- Wang, Y.C. dan Salhab, B., 2009, *Structural Behaviour and Design of Lightweight Structural Panels Using Perforated Cold-Formed Thin-Walled Section under Compression*, International Journal of Steel Structures 9: p. 57-67.

