

Pengaruh Jarak Sekrup terhadap Kapasitas dan Perilaku Penampang Tersusun Boks (*Closed Section*) Baja Canai Dingin

Maria Yasinta Menge Making, *Ali Awaludin, Bambang Supriyadi

Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
*)ali.awaludin@ugm.ac.id

Received: 9 Juli 2020 Revised: 28 September 2020 Accepted: 5 Oktober 2020

Abstract

The capacity and behaviour of cold-formed steel built-up sections are affected by the arrangement of the connections. This study aims to determine the effect of the screw spacing to the bending capacity and behaviour of the cold-formed steel built-up box section which made from lipped-channel (1.0 mm thick, 81 mm web height, 8.5 mm lip height, upper and lower wing width 38 mm and 40 mm). A total of 19 beams with a length of 1200 mm each are subjected to pure bending moments by applying two point loads spaced 600 mm in the midspan. The screw spacing variations in the moment span are 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 328 mm, and 350 mm. The test results show the average of bending capacity of the beam test is increasing with the reduction in screw spacing while the screw configuration also affects the beam capacity. Analysis of the bending capacity using the effective width method and the direct strength method based on AISI S100-16 gives very conservative results. The failure mode of the built-up box sections were observed in the form of local buckling, distortion, and lateral-torsional buckling.

Keywords: Cold-formed steel, built-up box, bending capacity

Abstrak

Kapasitas serta perilaku penampang tersusun baja canai dingin dipengaruhi oleh susunan alat sambung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak sambungan sekrup terhadap kapasitas lentur serta perilaku penampang tersusun boks yang dibentuk dari penampang kanal-lip (tebal 1,0 mm, tinggi web 81 mm, tinggi lip 8,5 mm, lebar sayap atas dan bawah 38 mm dan 40 mm). Total 19 balok dengan panjang masing-masing 1200 mm dikenakan momen lentur murni melalui dua beban titik berjarak 600 mm yang diaplikasikan di tengah bentang. Variasi jarak sekrup pada bentang momen yaitu 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 328 mm, dan 350 mm. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata kapasitas lentur uji balok bertambah ketika jarak sekrup berkurang. Adapun, konfigurasi sekrup juga turut mempengaruhi kapasitas balok tersusun. Analisis kapasitas lentur menggunakan metode lebar efektif dan metode kekuatan langsung berdasarkan AISI S100-16 memberikan hasil yang sangat konservatif. Mode kegagalan penampang tersusun yang teramati berupa tekuk lokal, distorsi dan torsi-lateral.

Kata kunci: Baja canai dingin, penampang tersusun boks, kapasitas lentur

Pendahuluan

Perkembangan dunia konstruksi saat ini semakin didominasi oleh penggunaan material yang kuat serta ringan akibat persediaan sumber daya alam yang terus berkurang. Salah satu contoh material ringan yang banyak digunakan yaitu material baja. Baja diklasifikasikan menjadi baja canai panas (*hot-rolled*) dan baja canai dingin (*cold-formed*) berdasarkan cara pembuatannya. Aplikasi baja canai dingin (CFS) di Indonesia biasanya banyak

dijumpai pada struktur rangka atap, akan tetapi, saat ini baja canai dingin semakin banyak digunakan pada komponen struktur balok maupun kolom bangunan. Tipe penampang baja canai dingin yang paling banyak digunakan adalah penampang kanal dengan atau tanpa *lip* dikarenakan tipe penampang ini lebih mudah dan cepat diproduksi. Penampang kanal merupakan tipe penampang terbuka dengan kekakuan torsi yang relatif kecil sehingga lemah terhadap puntir dibandingkan dengan penampang tertutup. Aplikasi penampang jenis ini biasanya

hanya dibatasi pada komponen struktur dengan jarak bentang kecil serta memikul beban yang lebih ringan. Kapasitas penampang tunggal baja canai dingin dapat ditingkatkan antara lain dengan menggabungkan penampang tunggal dengan kayu laminasi untuk mengurangi tekuk serta menambah kekuatan dan kekakuan (Awaludin *et al.*, 2016). Metode lainnya yaitu menggunakan penampang tersusun yang dibentuk dengan menghubungkan dua penampang kanal tunggal menggunakan alat sambung seperti sekrup (Wang & Young, 2018).

Kerapatan serta kekuatan penampang tersusun baja canai dingin turut dipengaruhi oleh alat sambung. Jenis sambungan yang dapat digunakan selain sekrup yaitu sambungan las. Li *et al.* (2014), serta Whittle & Ramseyer (2009) dalam penelitiannya, menyelidiki konfigurasi sambungan penampang tersusun kanal terhadap kapasitas tekuk beban aksial. Li *et al.* (2014) menyatakan lokasi sambungan dapat mempengaruhi lokasi kegagalan dan kekuatan ultimit penampang tersusun. Hasil penelitian Whittle & Ramseyer (2009) memperlihatkan penampang dengan sambungan dua sisi memberikan stabilitas yang lebih baik pada lokasi sambungan dan menyebabkan tahanan torsi elemen tunggal menjadi sangat tinggi.

Penelitian penampang tersusun baja canai dingin telah banyak dilakukan, namun, dibandingkan dengan struktur kolom, penelitian terkait balok penampang tersusun dapat dikatakan terbatas. Penelitian Li *et al.* (2016) terkait penampang tersusun boks dari dua penampang kanal-*lip* dan kanal biasa menunjukkan adanya efek dari interaksi antar penampang tunggal terhadap perilaku struktur balok (khususnya kapasitas momen). Menurut Li *et al.* (2016), perbedaan geometri penampang tunggal menyebabkan kapasitas momen balok tersusun boks menjadi lebih kecil dari kapasitas total penampang tunggal. Hal ini dikarenakan masing-masing penampang tidak dapat mencapai beban maksimum secara bersamaan.

Pengujian Chea (2017) menunjukkan adanya pengaruh dimensi penampang dan jarak sekrup terhadap kapasitas balok tersusun boks CFS yang dikenakan beban konsentris. Semakin besar rasio tinggi *web*-tebal penampang (h/t) dan rasio lebar sayap-tebal (w/t), kapasitas balok tersusun boks akan semakin berkurang, sedangkan jarak sambungan yang semakin rapat berdampak pada peningkatan kapasitas penampang tersusun. Selvaraj & Madhavan (2019) juga menyimpulkan bahwa jarak sambungan longitudinal yang lebih kecil pada balok yang disusun dari penampang sigma dapat meningkatkan kekompakan penampang tersusun boks.

Xu *et al.* (2009) melakukan studi parametrik pada balok tersusun boks yang dibebani secara konsentris maupun eksentris. Hasil studi menunjukkan bahwa lokasi pembebanan turut serta mempengaruhi kapasitas lentur balok. Balok yang dibebani secara konsentris memiliki kapasitas yang sesuai dan dapat dianggap sama dengan kapasitas total masing-masing penampang tunggal (sesuai asumsi AISI), sedangkan kapasitas balok yang dibebani secara eksentris menunjukkan hasil yang tidak konservatif.

Studi parametrik juga dilakukan oleh Wang & Young (2018) untuk meneliti balok penampang tersusun boks (*closed section*) dan I (*open section*), serta menggunakan model *finite element* (FE) untuk mengetahui pengaruh susunan sekrup terhadap kekuatan dan perilaku struktural balok. Hasil studi Wang & Young (2018) memperlihatkan pengaruh jarak sekrup terhadap momen, pada penampang tersusun dengan kelangsingan tekuk lokal yang lebih kecil memiliki efek yang lebih signifikan, serta menyarankan jarak sekrup maksimum kurang dari empat kali tinggi total *web* balok tersusun ($4h_w$) untuk mencegah terjadinya kegagalan torsi-lateral atau pemisahan komponen penampang tersusun.

Metode desain komponen struktur baja canai dingin yang tercantum dalam *North American Specification for the design of cold-formed steel Structural Members*, AISI S100-16 terdiri dari dua metode yaitu metode lebar efektif (EWM) dan metode kekuatan langsung (DSM). Metode EWM merupakan metode yang mempertimbangkan tekuk lokal komponen baja canai dingin dengan mereduksi penampang utuh yang mengalami distribusi tegangan nonlinier menjadi penampang efektif yang mengalami distribusi tegangan linier yang disederhanakan. Metode DSM merupakan metode desain yang memberikan prediksi kekuatan komponen tanpa menggunakan lebar efektif. Penggunaan metode EWM biasanya hanya terbatas pada jenis penampang yang tidak begitu kompleks seperti penampang kanal dengan dan atau tanpa *lip*, sedangkan metode DSM dapat mengakomodasi bentuk penampang yang tidak biasa (Young & Chen, 2008) dan dapat digunakan untuk menganalisis penampang dengan bentuk yang lebih kompleks seperti penampang Z dan sigma, serta kanal dengan variasi *lip* dan pengaku.

Pedoman analisis kapasitas lentur komponen struktur baja canai dingin berdasarkan metode EWM dan metode DSM saat ini tidak menyediakan syarat desain untuk jenis penampang tersusun. AISI 2002 merekomendasikan kekuatan lentur dan momen inersia penampang tersusun dapat diambil sebagai jumlah dua komponen berdasarkan kompatibilitas lendutan (Xu *et al.*, 2009).

Studi literatur terkait balok penampang tersusun boks menunjukkan bahwa metode “*sum up*” (asumsi AISI) merupakan metode yang umumnya dipakai untuk memperkirakan kekuatan lentur balok penampang tersusun boks. Anbarasu (2019), Selvaraj & Madhavan (2019), Abbasi *et al.* (2018), Zhang & Young (2018), Haris *et al.* (2018), Li *et al.* (2016), serta Wang & Young (2016) menggunakan asumsi ketebalan ganda pada elemen penampang yang disambung (*overlapping*) atau komposit penuh dengan mengabaikan jarak sambungan. Hasil dari penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa kekuatan lentur penampang tersusun dengan asumsi komposit penuh memiliki nilai yang tidak konservatif.

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jarak alat sambung sekrup terhadap kapasitas lentur serta perilaku penampang tersusun boks baja canai dingin yang dibentuk dari dua penampang kanal-*lip* sederhana. Hasil pengujian kekuatan lentur balok selanjutnya akan dibandingkan dengan hasil analisis kapasitas lentur nominal berdasarkan metode EWM dan DSM yang tercantum dalam spesifikasi desain komponen struktur baja canai dingin AISI S100-16.

Metode

Penampang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan penampang kanal-*lip* sederhana dengan tinggi *web* penampang (h), lebar sayap atas (w_{fa}) dan lebar sayap bawah (w_{fb}), berturut-turut adalah 81 mm, 38 mm dan 40 mm. Tinggi *lip* (h_{lip}) 8,5 mm dan tebal penampang (t) 1,0 mm. Alat sambung berupa *self-drilling screw* #12 dengan diameter 5,49 mm. Sketsa kanal-*lip* dan potongan penampang tersusun boks ditunjukkan dalam Gambar 1. Adapun, sifat mekanik material berupa rasio Poisson (ν), modulus elastisitas (E), serta tegangan leleh (f_y) material penampang kanal-*lip* disajikan dalam Tabel 1. Data tersebut merupakan hasil pengujian kuat tarik baja ringan Cahaya Fortuna Steel Yogyakarta oleh Laboratorium Bahan Bangunan, Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan, Universitas Gadjah Mada.

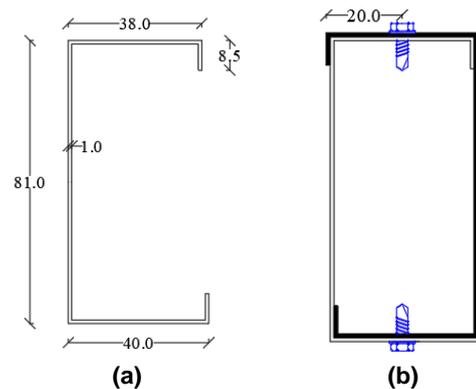
Tabel 1. Properti material penampang kanal-*lip*

Material	ν	E (MPa)	f_y (MPa)
CFS	0,3	2×10^5	619,54

Spesimen balok memiliki panjang (L) 1.200 mm dengan panjang bentang momen 600 mm dan bentang geser 300 mm. Variasi jarak sekrup pada bentang momen (s) yaitu 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 328 mm dan 350 mm,

sedangkan jarak sekrup pada bentang geser (s_s) sebesar 65 mm. Variasi jarak sekrup 328 mm diambil sesuai dengan jarak sekrup maksimum yang disarankan oleh Wang & Young (2018) yaitu empat kali tinggi total penampang tersusun boks ($h_w = 82$ mm). Tabel 2 memperlihatkan kombinasi jarak sekrup pada bentang momen spesimen balok tersusun. Penamaan benda uji seperti B81-1,0- s 350 memiliki arti yaitu, B sebagai boks, 81 tinggi penampang kanal-*lip*, 1,0 merupakan dimensi tebal penampang dan s 350 sebagai jarak sekrup pada bentang momen ($s = 350$ mm).

Gambar 2 merupakan skema aplikasi beban pada balok dilakukan dengan mendistribusikan beban terpusat melalui balok transfer sehingga benda uji akan dibebani pada dua titik pembebanan berjarak 600 mm. Alat uji lentur/*flexural frame* yang digunakan memiliki kapasitas beban maksimum 10 ton beserta *speed control* untuk mengatur kecepatan pembebanan. Pengukuran defleksi vertikal balok dilakukan dengan menggunakan *Linear Variabel Displacement Transducer* (LVDT) kapasitas 50 mm dan ditempatkan di lokasi pembebanan serta tengah bentang. Penampang U yang terbuat dari pelat baja konvensional setebal 5 mm ditempatkan pada titik pembebanan sebagai dukungan serta pengaku untuk mencegah terjadinya kegagalan di titik tersebut.

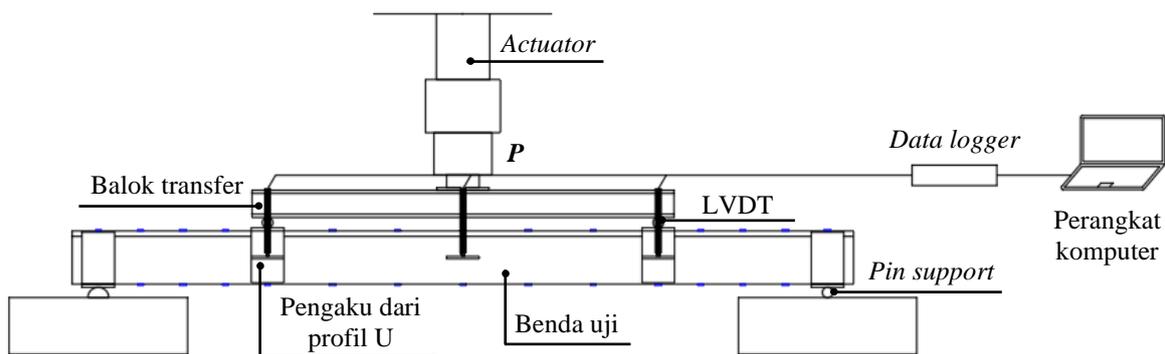


Gambar 1. (a) Sketsa dimensi penampang kanal-*lip*, (b) potongan balok tersusun boks

Kapasitas uji balok penampang tersusun boks baja canai dingin diambil sebagai nilai beban maksimum yang terekam selama pengujian, sedangkan nilai lendutan diambil dari hasil pengukuran LVDT di tengah bentang. Beban (P) yang akan digunakan dalam menghitung kapasitas lentur uji merupakan beban maksimum ditambah dengan berat balok transfer beserta dudukannya untuk memperoleh kapasitas total balok. Analisis kapasitas lentur penampang dengan EWM dan DSM dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan spesifikasi desain AISI S100-16. Penelitian ini menggunakan aplikasi cUFMS berbasis *finite strip method* untuk menganalisis tekuk elastis penampang.

Tabel 2. Kombinasi jarak sekrup (s) pada bentang momen spesimen balok

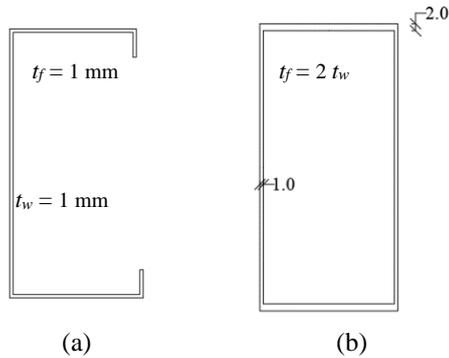
Kombi-nasi	Benda uji	Total sampel	Konfigurasi sekrup pada bentang momen 600 mm (Gambar 2)
1	B81-1,0-s350	2	
2	B81-1,0-s328	3	
3	B81-1,0-s300	3	
4	B81-1,0-s250	3	
5	B81-1,0-s200	2	
6	B81-1,0-s150	3	
7	B81-1,0-s100	3	



Gambar 2. Skema *setting-up* pengujian kapasitas lentur penampang tersusun boks

Panduan desain struktur lentur metode DSM yang tercantum dalam AISI S100-16 memerlukan momen tekuk elastis berupa tekuk lokal, distorsi dan torsi-lateral (M_{crL} , M_{crd} , dan M_{cre}). Ketiga nilai momen tersebut dihitung menggunakan metode *finite strip* dalam aplikasi cUFSM. Analisis tekuk elastis metode *finite strip* tidak dapat secara langsung digunakan untuk menghitung penampang tersusun yang disambung dengan sekrup (Lu *et al.*,

2017), karenanya dalam penelitian ini model penampang tersusun diasumsikan sebagai penampang kanal-*lip* biasa dan penampang komposit penuh. Sketsa penampang ditampilkan dalam Gambar 3. Penampang komposit penuh diasumsikan memiliki tebal sayap (t_f) dua kali tebal *web* (t_w). Asumsi model penampang dilakukan untuk membandingkan kapasitas uji dan kapasitas desain.



Gambar 3. Model penampang dalam analisis yaitu (a) kanal-lip, dan (b) komposit penuh

Metode EWM dan DSM dalam spesifikasi desain AISI S100-16 menyarankan kapasitas lentur nominal balok (M_n) harus diambil sebagai nilai minimum dari kapasitas lentur penampang yang dihitung berdasarkan kelelahan (M_y), tekuk torsi-lateral (M_{ne}), tekuk lokal (M_{nl}) dan tekuk distorsi (M_{nd}). Berdasarkan kelelahan dan tekuk torsi lateral:

$$M_y = S_f F_y \quad (1)$$

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad (2)$$

Untuk $F_{cre} \geq 2,78 F_y$

$$F_n = F_y \quad (3)$$

Untuk $2,78 F_y > F_{cre} > 0,56 F_y$

$$F_n = \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}} \right) \quad (4)$$

Untuk $F_{cre} \leq 0,56 F_y$

$$F_n = F_{cre} \quad (5)$$

F_y merupakan tegangan leleh, S_f merupakan modulus penampang utuh tanpa reduksi. F_n merupakan tegangan lentur nominal pada tekuk global (torsi-lateral). Nilai F_{cre} merupakan tegangan tekuk torsi-lateral elastis yang ditentukan sesuai tipe penampang (section F2 AISI S100-16). Metode EWM dan DSM untuk penentuan kapasitas lentur berdasarkan kelelahan awal dan tekuk torsi-lateral pada dasarnya adalah sama. Metode EWM dalam bentuk F_n sedangkan dalam metode DSM, F_n dikonversi menjadi momen melalui perkalian F_n dengan S_f .

Kapasitas lentur berdasarkan interaksi tekuk lokal dengan kelelahan dan tekuk global adalah sebagai berikut:

Metode EWM

$$M_{nl} = S_e F_n \leq S_{et} F_y \quad (6)$$

Metode DSM

Untuk $\lambda_l \leq 0,776$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (7)$$

Untuk $\lambda_l > 0,776$

$$M_{nl} = \left[1 - 0,15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad (8)$$

$$M_{crl} = S_f F_{crl} \quad (9)$$

S_e dan S_{et} = modulus penampang efektif yang dihitung pada tegangan serat tekan dan tarik terluar = F_n .

Kapasitas lentur berdasarkan tekuk distorsi ditentukan sesuai Section F4 AISI S100-16 sebagai berikut:

Untuk $\lambda_d \leq 0,673$

$$M_{nd} = M_y \quad (10)$$

Metode DSM

Untuk $\lambda_d > 0,673$

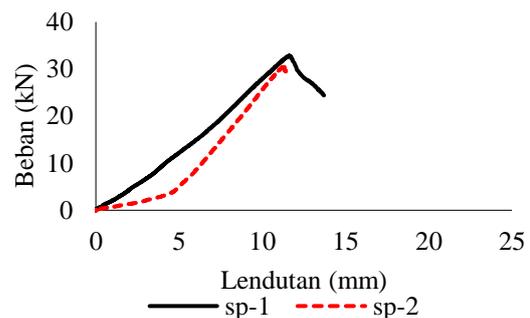
$$M_{nd} = \left[1 - 0,22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0,5} M_y \quad (11)$$

M_{cre} , M_{crl} , dan M_{crd} merupakan momen tekuk kritis berdasarkan tekuk global, lokal dan distorsi yang dapat ditentukan secara analitis (Appendix 2 AISI S100-16) atau numerik menggunakan cUFISM.

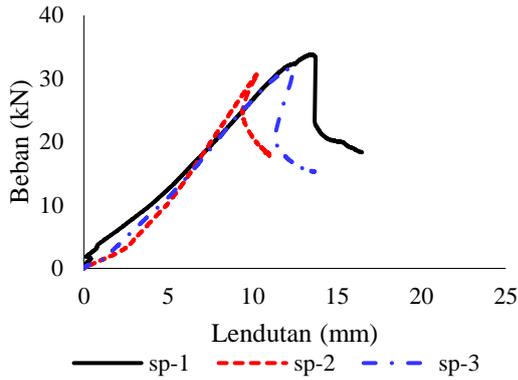
Kapasitas momen nominal penampang tersusun boks baja canai dingin berdasarkan asumsi penampang tunggal (kanal-lip) diambil sama dengan jumlah kapasitas momen nominal dua penampang sesuai dengan rekomendasi kuat lentur penampang tersusun oleh AISI. Adapun, kapasitas lentur uji (M_{uji}) dihitung sebagai gaya geser ($0,5P$) dikalikan dengan panjang bentang geser (300 mm).

Hasil dan Pembahasan

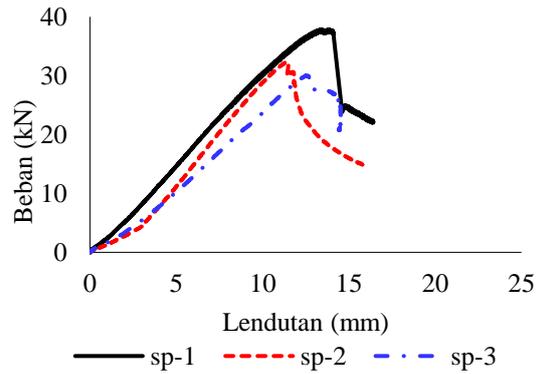
Gambar 4 sampai dengan 10 menampilkan hasil pengujian berupa grafik beban-lendutan masing-masing sampel (sp) benda uji sedangkan, beban total (P_{uji}), defleksi vertikal, serta kapasitas lentur uji (M_{uji}) balok tersusun boks disajikan dalam Tabel 3.



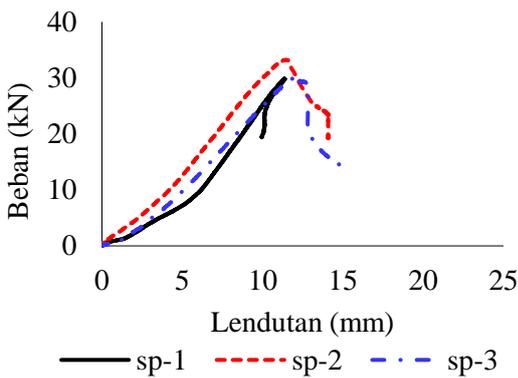
Gambar 4. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s350



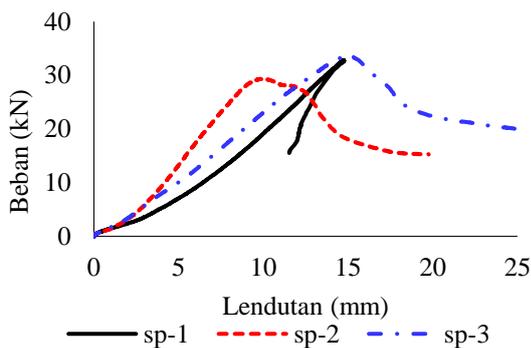
Gambar 5. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s328



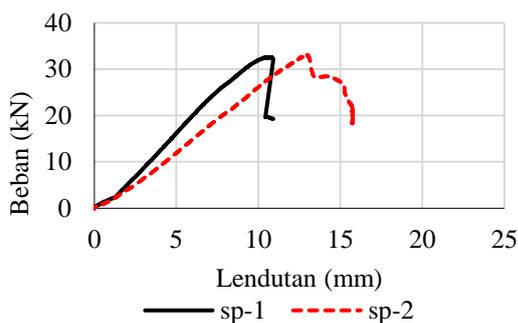
Gambar 9. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s150



Gambar 6. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s300

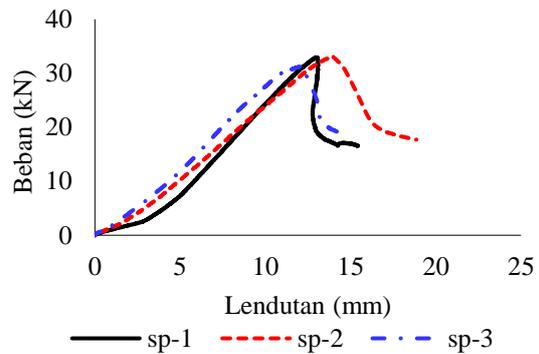


Gambar 7. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s250



Gambar 8. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s200

Grafik beban-lendutan spesimen sp-2 B81-1,0-s350 (Gambar 4), sp-2 B81-1,0-s328 (Gambar 5), sp-1 B81-1,0-s300 (Gambar 6), serta sp-1 B81-1,0-s250 (Gambar 7), memperlihatkan bentuk grafik yang berbeda dibandingkan dengan grafik spesimen lain serta benda uji B81-1,00-s200 (Gambar 8), B81-1,00-s150 (Gambar 9), B81-1,00-s100 (Gambar 10). Hal disebabkan oleh kondisi balok transfer yang mengalami deformasi setelah benda uji mencapai beban maksimum, akan tetapi, deformasi tersebut tidaklah bersifat permanen. Balok transfer kembali ke posisi awal setelah beban dihentikan.



Gambar 10. Grafik beban-lendutan sampel balok B81-1,00-s100

Tabel 3 menunjukkan adanya peningkatan kapasitas spesimen ketika jarak sambungan sekrup semakin kecil. Rata-rata kapasitas lentur maksimum ditunjukkan oleh benda uji B81-1,0-s150 sebesar 5,049 kNm, sedangkan kapasitas rata-rata minimum ditunjukkan oleh benda uji B81-1,0-s300. Rendahnya nilai kapasitas tersebut kemungkinan disebabkan oleh susunan sekrup pada bentang momen spesimen B81-1,00-s300 yang lebih sedikit dibandingkan dengan spesimen lainnya (Tabel 2).

Penelitian Whittle & Ramseyer (2009), serta Li *et al.* (2014) menunjukkan bahwa susunan sambungan pada penampang tersusun dapat mempengaruhi kapasitas komponen. Mode kegagalan spesimen balok yang diamati setelah

pengujian disajikan dalam Tabel 4. Benda uji B81-1,0-s300 memiliki mode kegagalan berupa kombinasi antara tekuk lokal (LB)-distorsi (D) dan tekuk lokal (LB)-torsi-lateral (LT). Mode tekuk merupakan faktor kunci yang mempengaruhi kuat lentur spesimen. Kombinasi antara tekuk lokal dan distorsi dapat berdampak pada reduksi kekuatan lentur (Wang & Zhang, 2009).

Tabel 3. Kapasitas hasil uji dan lendutan spesimen balok tersusun boks

Benda uji	P_{uji} (kN)	Defleksi (mm)	M_{uji}	
			M_{uji} (kNm)	M_{uji} rata-rata
B81-1,0-s350	33,06	11,58	4,96	4,81
	31,05	11,33	4,66	
B81-1,0-s328	34,04	13,55	5,11	4,85
	30,98	10,28	4,65	
	32,02	12,33	4,80	
B81-1,0-s300	30,07	11,38	4,51	4,71
	33,46	11,58	5,02	
	30,70	12,26	4,60	
B81-1,0-s250	33,05	14,75	4,96	4,83
	29,66	10,06	4,45	
	33,86	15,14	5,08	
B81-1,0-s200	32,82	10,83	4,92	4,96
	33,34	12,99	5,00	
B81-1,0-s150	38,11	13,40	5,72	5,05
	32,59	11,46	4,89	
	30,29	12,64	4,54	
B81-1,0-s100	33,23	12,99	4,98	4,91
	33,34	13,99	5,00	
	31,672	12,213	4,75	

Kapasitas lentur benda uji dengan jarak sekrup terkecil (B81-1,0-s100) memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan benda uji B81-1,0-s150. Hal ini mengindikasikan bahwa meski dengan jarak sekrup yang semakin rapat, kapasitas penampang tersusun tidak selalu bertambah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa batas kapasitas teratas dicapai oleh benda uji B81-1,0-s150. Penelitian Li *et al.* (2014) serta Whittle & Ramseyer (2009), juga menunjukkan bahwa batas kapasitas teratas tidak selalu dicapai oleh penampang dengan jarak sambungan yang paling kecil.

Hasil analisis kapasitas lentur nominal (M_n) penampang tersusun berdasarkan metode lebar efektif (EWM) dan metode kekuatan langsung (DSM) menurut AISI S100-16 disajikan dalam Tabel 5. *Signature curve* beserta mode tekuk penampang hasil analisis cFUSM yang ditampilkan dalam Gambar 11 memperlihatkan momen tekuk elastis berdasarkan asumsi penampang komposit penuh lebih besar dari penampang kanal-lip. Nilai

momen tekuk elastis berpengaruh terhadap kapasitas lentur penampang. Kapasitas nominal dalam Tabel 5, M_n , kanal-lip (kl) sebesar 1,43 kNm (EWM) dan 1,60 kNm (DSM), sedangkan untuk asumsi AISI, total kapasitas dua kanal-lip (2kl) sebesar 2,85 kNm (EWM) dan 3,19 kNm (DSM). Asumsi penampang tersusun boks sebagai penampang komposit penuh (kp) memiliki nilai kapasitas yang lebih besar yaitu 4,97 kNm (EWM) dan 4,96 kNm (DSM).

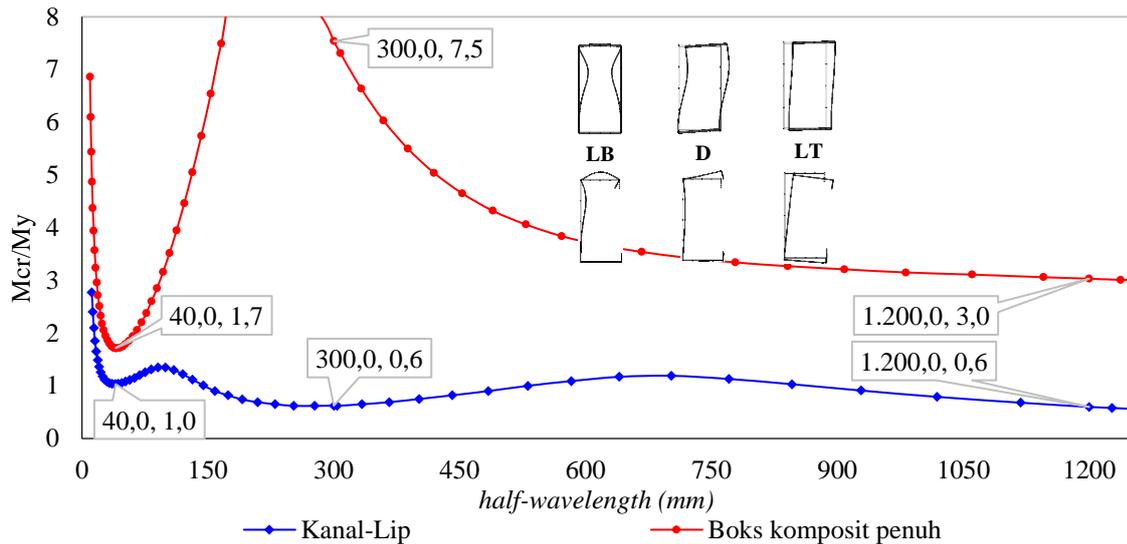
Tabel 4. Mode kegagalan balok tersusun boks

Benda Uji		Mode Kegagalan	
		Mode	Lokasi
B81-1,00-s350	1	LB	¼ L
	2	LB + D	¼ L
B81-1,00-s328	1	LB	¾ L
	2	LB + D	¾ L
	3	LB + LT	¼ L
B81-1,00-s300	1	LB + D	¾ L
	2	LB + LT	¾ L
	3	LB + LT	¾ L
B81-1,00-s250	1	LB + LT	¾ L
	2	LB + LT	¼ L
	3	LB + D	¼ L
B81-1,00-s200	1	LB	¾ L
	2	LB	¾ L
B81-1,00-s150	1	LB	¾ L
	2	LB	¾ L
	3	LB	¾ L
B81-1,00-s100	1	LB	¾ L
	2	LB	¼ L
	3	LB	¾ L

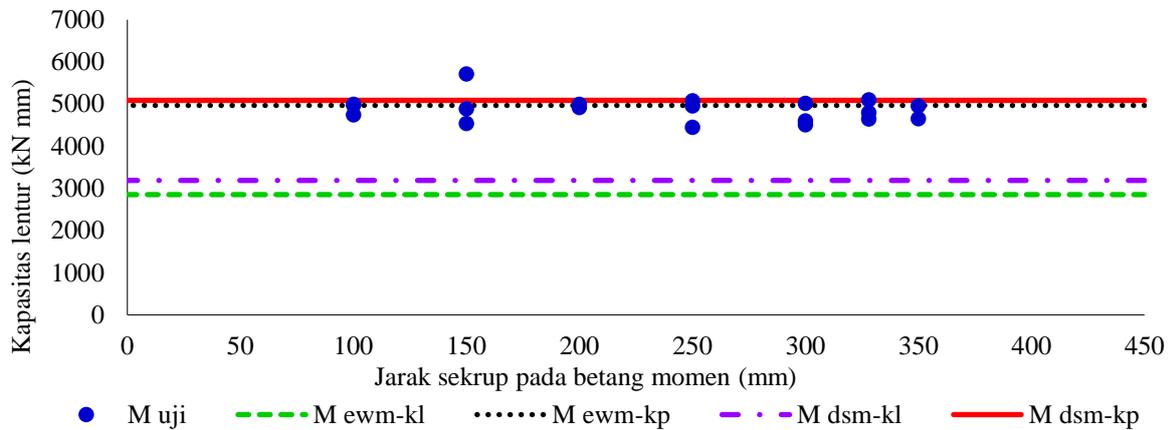
Perbandingan kapasitas lentur uji spesimen dan kapasitas desain dari penampang tersusun boks dengan asumsi kanal-lip dan komposit penuh disajikan dalam Gambar 12. Asumsi desain kapasitas lentur penampang tersusun boks berdasarkan AISI (2kl), kapasitas momen sama dengan kapasitas total penampang tunggal, menunjukkan hasil yang sangat konservatif baik pada metode EWM maupun DSM, sedangkan untuk asumsi penampang komposit penuh kedua metode memperlihatkan hasil yang tidak konservatif sama seperti pada penelitian Anbarasu (2019), Selvaraj & Madhavan (2019), Zhang & Young (2018), Haris *et al.* (2018), Li *et al.* (2016), serta Wang & Young (2016).

Tabel 5. Hasil analisis kapasitas lentur penampang tersusun boks

Metode	Kanal-lip (kl)	M_n (kNm)	
		AISI (2kl)	Komposit penuh (kp)
EWM	1,43	2,85	4,97
DSM	1,60	3,19	4,96



Gambar 11. Signature curve dan mode tekuk hasil analisis cUFSM



Gambar 12. Grafik hubungan jarak sekrup dengan kapasitas lentur balok

Mode kegagalan sampel balok diamati ketika spesimen balok mencapai beban maksimum (Tabel 4). Dokumentasi hasil penelitian disajikan dalam Gambar 13 sampai dengan Gambar 19. Kegagalan sampel didominasi oleh tekuk lokal (LB) yang terjadi di sayap atas dan *web* penampang mengingat bahwa jarak sekrup yang digunakan pada sayap lebih besar dari *half-wavelength* tekuk lokal kanal-*lip*, serta letak sambungan yang tidak dapat mencegah terjadinya tekuk pada *web* penampang. Kombinasi antara tekuk lokal dan distorsi (LB + D) teramati pada sampel B81-1,0-s350 (Gambar 13).

Kombinasi tekuk lokal dan tekuk torsi lateral (LB + LT) teramati pada sampel B81-1,0-s328, B81-1,0-s300 dan B81-1,0-s250 (Gambar 14, 15 dan 16). Benda uji dengan kombinasi jarak sekrup yang lebih kecil dari 200 mm, hanya menunjukkan mode kegagalan berupa tekuk lokal (Tabel 4 dan Gambar 17, 18, 19). Lokasi kegagalan tekuk lokal yang teramati tidak terjadi pada lokasi yang diharapkan

yaitu tengah bentang balok, melainkan pada titik pembebanan sejak titik tersebut tidak sepenuhnya diperkuat (Li *et al.*, 2016).

Wang & Young (2018) menyarankan jarak sekrup maksimum sebesar $4h_w$ untuk menghindari terjadinya tekuk torsi-lateral atau pemisahan komponen, namun, dalam penelitian ini ditemukan bahwa benda uji dengan jarak yang lebih kecil dari $4h_w$ (300 mm dan 250 mm) tetap mengalami kegagalan torsi-lateral meski tidak mengalami pemisahan antar komponen penyusun tunggal. Hal ini mengindikasikan bahwa jarak sekrup $\leq 4h_w$ kemungkinan tidak berlaku pada penampang yang digunakan dalam penelitian ini serta mengalami mode kegagalan berupa kombinasi di antara ketiga mode tekuk. Hasil penelitian Selvaraj dan Madhavan (2019) juga menunjukkan bahwa batasan jarak sekrup $< 4h_w$ mungkin hanya berlaku untuk komponen struktur yang mengalami kegagalan berupa tekuk lokal seperti dalam penelitian Wang & Young (2018).

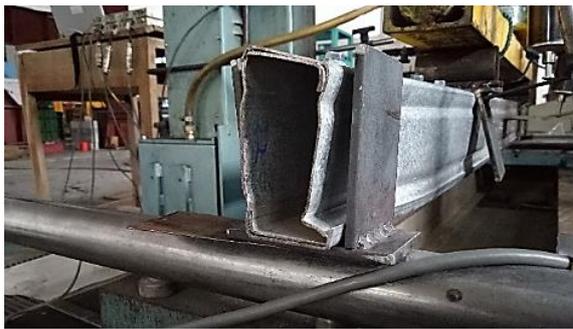


(a) LB pada sayap dan badan sp-1



(b) Distorsi pada tumpuan balok sp-2

Gambar 13. Mode kegagalan B81-1,0-s350



(a) LB + D balok sp-2



(b) LB + LT balok sp-3

Gambar 14. Mode kegagalan B81-1,0-s328



(a) LB + D balok sp-1



(b) LB + LT balok sp-2

Gambar 15. Mode kegagalan B81-1,0-s300



(a) LB + LT balok sp-1



(b) LB + D balok sp-2

Gambar 16. Mode kegagalan B81-1,0-s250



(a) LB pada sayap dan badan balok sp-1



(b) LB balok sp-2

Gambar 17. Mode kegagalan B81-1,0-s200



(a) LB balok sp-2



(b) LB balok sp-3

Gambar 18. Mode kegagalan B81-1,0-s150



(a) LB balok sp-1



(b) LB balok sp-2

Gambar 19. Mode kegagalan B81-1,0-s100

Kesimpulan

Total 19 balok dengan panjang masing-masing 1200 mm telah diuji dan dianalisis sesuai dengan spesifikasi desain struktur baja canai dingin AISI S100-16. Kesimpulan yang dapat ditarik yaitu, adanya pengaruh jarak terhadap kapasitas lentur penampang tersusun boks baja canai dingin. Jarak sekrup yang semakin rapat terbukti meningkatkan kapasitas balok. Namun, untuk penampang yang digunakan dalam penelitian ini ditemukan bahwa batas kapasitas teratas tidak dicapai pada balok dengan jarak sekrup minimum ($s = 100$ mm) melainkan pada balok dengan jarak sekrup 150 mm. Konfigurasi atau susunan sekrup pada bentang

momen juga ikut mempengaruhi kapasitas balok. Kapasitas uji B81-1,0-s300 dengan konfigurasi sambungan sekrup yang lebih sedikit pada bentang momen memiliki nilai rata-rata kapasitas lentur yang paling kecil (Tabel 2 dan 3).

Analisis kapasitas lentur berdasarkan metode lebar efektif (EWM) dan metode kekuatan langsung (DSM) pada penampang kanal-*lip* tunggal menunjukkan hasil yang sangat konservatif. Hal ini sekaligus mengindikasikan bahwa rekomendasi yang diberikan oleh AISI berdampak pada hasil desain kapasitas yang sangat konservatif. Asumsi penampang komposit penuh, dimana tebal elemen yang disambung sama dengan tebal ganda

menunjukkan hasil kapasitas lentur (berdasarkan EWM dan DSM) yang tidak konservatif dan tidak aman dibandingkan dengan kapasitas hasil uji, untuk kasus balok tersusun boks yang dikenakan beban konsentris dan geometri penampang yang digunakan dalam penelitian ini.

Mode kegagalan penampang dengan jarak sekrup yang lebih kecil dari 200 mm berupa tekuk lokal, sedangkan jarak sekrup yang lebih besar dari 200 mm mengalami kegagalan berupa tekuk lokal, kombinasi antara tekuk lokal dan distorsi serta kombinasi antara tekuk lokal dan global (torsional).

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada PT. Cahaya Fortuna Steel, Yogyakarta yang telah membantu dan menyumbangkan material untuk digunakan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

Abbasi, M., Khezri, M., Rasmussen, K. J. R., & Schafer, B. W. (2018). Elastic buckling analysis of cold-formed steel built-up sections with discrete fasteners using the compound strip method. *Thin-Walled Structures*, 124, 58–71.

AISI S100-16. (2016). *North American specification for the design of cold-formed steel structural members*. American: American Iron and Steel Institute.

Anbarasu, M. (2019). Simulation of flexural behaviour and design of cold-formed steel closed built-up beams composed of two sigma sections for local buckling. *Engineering Structures*, 191, 549–562.

Awaludin, A., Danastri, A. D., & Supriyadi, B. (2016). Development of cold formed steel-timber composites for roof structures: Connection systems. *International Journal of Technology*, 7(6), 1117–1127.

Chea, B. (2017). Experimental and numerical study on cold-formed steel built-up box beams with different sections, *Master of science Thesis*, Thailand: Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University.

Haris, S., Prasetio, A., Thamrin, R., & Herman, H. (2018). An experimental study of bending behaviour of double channel and hollow sections of light gauge steel. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(3), 882–888.

Li, Y., Li, Y., Wang, S., & Shen, Z. (2014). Ultimate load-carrying capacity of cold-formed thin-walled columns with built-up box and I section under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 79, 202–217.

Li, Y. L., Li, Y. Q., & Shen, Z. Y. (2016). Investigation on flexural strength of cold-formed thin-walled steel beams with built-up box section. *Thin-Walled Structures*, 107, 66–79.

Lu, Y., Zhou, T., Li, W., & Wu, H. (2017). Experimental investigation and a novel direct strength method for cold-formed built-up I-section columns. *Thin-Walled Structures*, 112, 125–139.

Selvaraj, S., & Madhavan, M. (2019). Structural design of cold-formed steel face-to-face connected built-up beams using direct strength method. *Journal of Constructional Steel Research*, 160, 613–628.

Wang, L. & Young, B. (2016). Behavior of cold-formed steel built-up sections with intermediate stiffeners under bending. II: parametric study and design. *Journal of Structural Engineering*, 142(3), 1–11.

Wang, L., & Young, B. (2018). Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements. *Thin-Walled Structures*, 131, 16–32.

Wang, H., & Zhang, Y. (2009). Experimental and numerical investigation on cold-formed steel C-section flexural members. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(5), 1225–1235.

Whittle, J., & Ramseyer, C. (2009). Buckling capacities of axially loaded, cold-formed, built-up C-channels. *Thin-Walled Structures*, 47(2), 190–201.

Xu, L., Sultana, P., & Zhou, X. (2009). Flexural strength of cold-formed steel built-up box sections. *Thin-Walled Structures*, 47(6–7), 807–815.

Young, B., & Chen, J. (2008). Design of cold-formed steel built-up closed sections with intermediate stiffeners. *Journal of Structural Engineering*, 134(5), 727–737.

Zhang, J. H., & Young, B. (2018). Finite element analysis and design of cold-formed steel built-up closed section columns with web stiffeners. *Thin-Walled Structures*, 131, 223–237.