

KAPASITAS RANGKA ATAP BAJA CANAI DINGIN DENGAN BERBAGAI MODEL GEOMETRIS DALAM MEMIKUL BEBAN STATIS

Experimental Study into The Capacity of Cold-Formed Roof Trusses with Various Geometric Model Under Static Loads

Wahyu Wuryanti

Pusat Litbang Perumahan dan permukiman, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jl. Panyawungan Ciluenyi Wetan, Kabupaten Bandung

Surel: wuryantiwahyu@gmail.com

Diterima: 25 April 2018

Disetujui: 27 Oktober 2018

Abstrak

Tulisan ini menyampaikan kajian eksperimen mengenai perilaku rangka batang baja canai dingin untuk konstruksi rangka atap (kuda-kuda). Tujuan penelitian untuk menentukan kapasitas beban vertikal maksimum dan model kegagalan rangka atap. Sebanyak enam rangka atap skala penuh telah diuji. Seluruh rangka atap direncanakan dan dibuat oleh penyedia jasa yang berbeda. Maksudnya adalah untuk memberi gambaran faktual perbedaan kinerja rangka atap meski didesain untuk tujuan sama. Rangka atap didesain sebagai atap pelana dengan bentang, sudut kemiringan dan beban penutup atap yang sama. Hasil pengujian menunjukkan 50% properti material mempunyai kekuatan tarik sebagai baja G550. Meski demikian sesuai ketentuan SNI 7971:2013, nilai kekuatan tarik yang digunakan dalam perencanaan sebesar 495 MPa. Sementara lainnya mempunyai kekuatan tarik 452 MPa sampai 485 MPa. Sebanyak 4 rangka atap tidak memenuhi persyaratan kapasitas dalam menerima beban rencana. Performa kegagalan terjadi karena tekuk lokal dan web crippling pada batang kord atas terutama pada bagian yang berdekatan dengan tumpuan (heel joint). Kinerja komponen baja canai dingin dengan profil topi (hat) mempunyai keandalan lebih baik daripada profil C.

Kata Kunci: Baja canai dingin, rangka batang, atap, beban statis, skala penuh

Abstract

This paper present an experimental study on the behavior of cold formed steel trusses for roof construction. The aims of the study was to determine the maximum vertical load capacity and the failure mode of roof trusses. Six full scale cold formed steel roof trusses were tested. The research was conducted to illustrate the differences factual in the roof truss performance although those designed for the same proposed. All of roof trusses were designed and manufactured by different providers. Roof truss was designed as a gable roof with a same span, slope and roof tile load. Test results show that 50% of the material properties have tensile strength as a G550 steel. However according to the provisions of SNI 7971: 2013, the tensile strength used in design is only 495 MPa. While others have a tensile strength of 452 MPa to 485 MPa. A total of 4 roof trusses do not meet the capacity requirements in accepting the design load. Performance failure occurs because of local buckling and web crippling on the top chord bars adjacent to the heel joint. The performance of cold formed steel components which has a hat profile has better reliability than a profile C.

Keywords: Cold formed steel, trusses, roof, static load, full scale

PENDAHULUAN

Saat ini produk baja canai dingin (*cold formed steel*), selanjutnya disingkat BCD, sudah banyak digunakan dan menjadi pilihan utama dalam mendesain rangka batang untuk konstruksi atap pada rumah dan bangunan gedung lainnya. Di pasaran, produk BCD lebih dikenal sebagai baja ringan karena beratnya yang lebih ringan dibandingkan dengan baja *hot-*

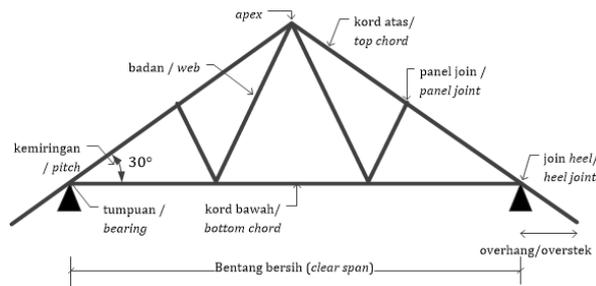
rolled. Pun bila dibandingkan dengan komponen kayu lebih ringan 35–50 % (Prasetyo 2014).

Lebih kurang ada sepuluh kelebihan produk BCD dibandingkan dengan material lain, yaitu bobotnya ringan, rasio kekuatan terhadap berat tinggi, dapat dipabrikasi di bengkel, komponen tidak memuai atau menyusut, mengeliminasi penggunaan perancah,

tahan rayap dan tidak membusuk, mudah pengangkutan dan instalasi, tidak mudah terbakar, dapat didaur-ulang, dan efisiensi energi (Prasetyo 2014). Meski demikian masih diperlukan banyak penelitian berkaitan dengan produk BCD baik pada perilaku komponennya, sambungannya, maupun pada penggunaannya (Schafer et al. 2006; Schafer and Camotim 2013).

Tujuan penelitian ini adalah melakukan kajian eksperimental skala penuh rangka atap untuk mengetahui kapasitas maksimum dalam memikul beban statis vertikal. Sebanyak enam rangka atap telah dibuat penyedia jasa berbeda sebagai perwakilan keberagaman desain faktual di lapangan.

Rangka atap didefinisikan sebagai struktur terdiri dari batang-batang yang dirangkai satu sama lainnya membentuk kerangka dalam satu bidang. Model geometri umumnya satu segitiga atau kombinasi segitiga seri. Untuk menyeragamkan nama batang dan sambungan pada rangka batang digunakan ketentuan pada Gambar 1.



Gambar 1 Penamaan Batang Pada Rangka Atap

Penelitian Terdahulu Dan Tantangannya

Maraknya penggunaan produk BCD telah meningkatkan kebutuhan dan pelaku konstruksi (produsen maupun aplikator) di masyarakat. Sebanyak lebih dari 150 produsen telah muncul di lingkungan industri konstruksi di Indonesia (Renansiva 2014) diikuti dengan munculnya beberapa merk dagang BCD. Pada awalnya untuk melayani permintaan konsumen terutama untuk konstruksi atap, produsen menyediakan jasa perencanaan struktur sekaligus pemasangannya. Semakin lama untuk menekan biaya, di kalangan aplikator yang telah terbiasa dan pengalaman berani menawarkan keterampilan pemasangan rangka atap tanpa dasar analisis rekayasa. Nilai positifnya membuat harga menjadi kompetitif, di sisi lain membuat konsumen bingung menentukan pilihannya dan menghadapi risiko kegagalan struktur. Promosi berlebihan tanpa dukungan data riset, jelas akan merugikan masyarakat (Wuryanti dan Saputra 2015).

Bentuk profil penampang BCD dapat dibuat beragam yang dikelompokkan menjadi profil penampang terbuka, tertutup dan *built-up*. Sementara itu dalam SNI 8399:2017 hanya mencantumkan 4 bentuk, profil C (dengan/tanpa lipatan), profil U, profil Z dan profil topi (*hat*) (Badan Standarisasi Nasional 2017) dengan ketebalan nominal logam dasar berkisar 0,4 mm sampai 1,10 mm. Sebagai struktur rangka atap bentuk profil yang banyak digunakan adalah profil C dan profil topi (*hat*). Profil U biasanya dipakai untuk gording atau reng. Meski belum populer di Indonesia, profil O juga telah digunakan untuk rangka atap struktur bangunan gedung tinggi dan mempunyai kinerja lebih baik daripada profil lainnya dan dapat didesain sampai tebal 8 mm (Hassanein, Elchalakani, dan Elkawas 2017).

Produk BCD tidak hanya dapat digunakan untuk rangka atap, juga untuk rangka struktur lainnya atau dikombinasikan dengan material lainnya (Prasetyo 2014). Seperti untuk desain struktur panel, rangka BCD dikombinasikan dengan material papan gypsum atau papan serat telah terbukti mampu memikul beban lateral (Leng et al. 2017; Karabulut dan Soyoz 2017). Struktur lainnya dengan membuat material komposit BCD dengan kayu laminasi untuk struktur atap bentang panjang dan hasilnya menunjukkan komponen komposit tersebut mampu menahan kegagalan tekuk lokal pada profil C (Irawati, Awaludin, dan Sebastian 2017).

Beberapa penelitian terdahulu telah mempelajari kelebihan-kelebihan BCD dibandingkan dengan material lainnya. Seperti penelitian yang menggunakan komponen BCD sebagai rangka utama rumah biayanya lebih efektif dibandingkan menggunakan kayu (Hassanein, Elchalakani, dan Elkawas 2017). Penelitian Oktarina dan Dermawan (2015) membandingkan rangka atap BCD dengan rangka atap kayu, menunjukkan rangka batang BCD lebih ringan 78% dan harga lebih murah 9 – 27%. Kajian terhadap rangka portal bentang panjang 18 m dan 30 m memperlihatkan hasil bahwa portal BCD biayanya lebih murah 33% dan 15% dibandingkan dengan rangka baja *hot-rolled* (Johnston et al. 2017). Penelitian terhadap aspek *life cycle assessment* antara produk BCD dan baja *hot-rolled* pada desain rangka struktur bentang panjang menghasilkan 30% kandungan karbon (*carbon embodies*) lebih rendah pada produk BCD (Johnston et al. 2017).

Namun demikian sebagaimana material lainnya, produk BCD juga mempunyai kelemahan-kelemahan, yaitu mudah terjadi tekuk lokal (*local-buckling*), memuntir, *web crippling*, dan harus diproteksi dengan lapisan tahan karat. Banyak penelitian terus dikembangkan untuk mengurangi kegagalan tekuk dan menambah kekakuan, antara lain dengan

perkuatan pada pelat profil bagian badan (*web*) dengan dobel pelat atau menambah lekukan pelatnya (Huang et al. 2017).

Satu hal yang kurang diperhatikan masyarakat adalah pentingnya lapisan tahan karat dalam memilih produk BCD. Bahkan jenis dan tebal material tahan karat menjadi faktor pengaruh terhadap harga produk BCD. Secara visual sulit mengetahui ketebalan dan jenis material tahan karat yang digunakan. Pencantuman spesifikasi pada batangan produk BCD hanya menuliskan ketebalan nominal logam dasar induk (*base metal thickness*) tidak ada keterangan soal lapisan tahan karat.

Faktual di lapangan, masih banyak kegagalan konstruksi rangka atap yang disebabkan baik karena masalah teknis akibat perencanaan yang kurang tepat atau pada pelaksanaan di lapangan. Kegagalan teknis dapat terjadi pada bagian sambungan atau pada komponen batang BCD sendiri (Dawe, Liu, dan Li 2010; Yaojie, Kun, dan Xinxi 2002). Contoh kegagalan juga terjadi pada bagian sambungan akibat jumlah sekrup yang dipasang kurang (Apriani, Lubis, dan Anggraini 2017; Haris dan Herman 2015).

Sebagai rangka batang bagian paling kritis adalah bagian sambungan (Pedreschi dan Sinha 2008). Penggunaan alat penyambung dalam SNI 7971:2017 memperbolehkan menggunakan las, baut sekrup, paku keling, *clinches*, paku dan lem (Badan Standardisasi Nasional 2017), tetapi di lapangan yang banyak digunakan adalah sekrup jenis *self-drilling screws* (Wuryanti dan Saputra 2015). Karena pengaruh ketidakpastian perilaku sambungan dalam mendesain seringkali sambungan dibuat overdesain (Bondok dan Salim 2017). Dalam analisis struktur rangka atap, sambungan diasumsikan sebagai sambungan fleksibel, kenyataannya perilakunya sebagai sambungan kaku (*rigid*) yang menerima tidak hanya gaya aksial tetapi juga gaya lentur dan geser (Latumeten et al. 2015).

Beberapa penelitian juga telah mempelajari perilaku sambungan baik pada komponen yang disambung maupun pada alat penyambung. Penelitian menggunakan alat penyambung jenis rivet telah dipelajari dan hasilnya menunjukkan pola kerusakan terjadi lebih disebabkan pada properti dan dimensi komponen BCD daripada alat penyambungannya (Zeynalian, Shelley, dan Ronagh 2016).

Sebagai upaya untuk menjamin keamanan dan keselamatan konsumen dalam menggunakan produk BCD telah diterbitkan SNI. Untuk mengatur persyaratan minimum dalam mendesain komponen struktur digunakan SNI 7971:2013, dan untuk mengatur persyaratan material BCD diterbitkan SNI

8399:2017. Namun kehadiran dua standar tersebut masih belum cukup. Perlu disusun panduan praktis untuk konstruksi sederhana, seperti rangka atap atau kuda-kuda. Salah satu upaya yang telah dilakukan adalah dengan aplikasi menggunakan *spreadsheet* untuk menghitung kapasitas profil BCD (Setiawan et al. 2015; Ariyavinanta et al. 2015). Para produsen BCD yang memberikan pelayanan pemasangan konstruksi atap juga telah membuat panduan perencanaan dan pelaksanaan untuk kalangan internal perusahaan.

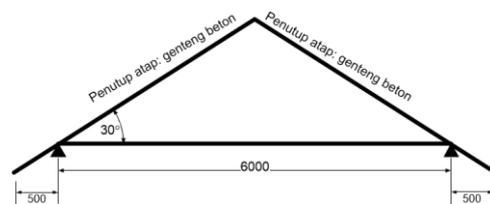
METODE

Ada dua jenis kajian eksperimental yang dilakukan yaitu (1) pengujian kekuatan tarik untuk mengetahui properti mekanis material, dan (2) pengujian beban statik struktur skala penuh rangka atap.

Pembuatan benda uji mulai dari penyediaan material sampai model geometris rangka atap disiapkan dan didesain oleh penyedia jasa yang berbeda. Ada pembatasan rencana desain yang harus dipenuhi dalam analisis perencanaan yaitu jarak bentang, ketinggian atap dan berat penutup atap. Ketentuan teknis yang harus dipenuhi ditampilkan pada Gambar 2 dengan parameter desain sebagai berikut:

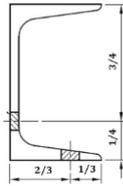
- Panjang bentang 6 m
- Panjang bagian *overhang/overstek* 0,5 m
- Sudut kemiringan rangka atap 30°
- Jarak antar rangka atap 1,2 m
- Penutup atap menggunakan genteng beton.

Setiap penyedia jasa mempunyai kebebasan dalam menentukan model geometris rangka atap, dimensi dan jenis profil BCD, jenis alat penyambung, detail sambungan dan perkuatan lainnya yang dianggap perlu.



Gambar 2 Tipikal Rencana Desain Rangka Atap

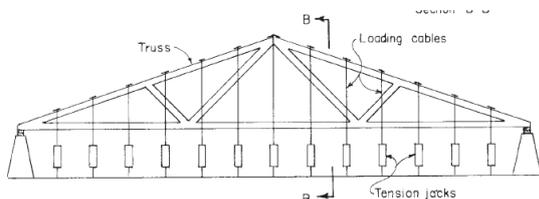
Pengujian batang tarik menggunakan acuan AS 1391-2007 untuk kriteria benda uji produk lembaran, setrip dan pelat tipis dengan ketebalan antara 0,1 mm dan 3 mm (Australian Standard 1391: 2007). Material batang BCD untuk uji tarik diambil dari benda uji yang digunakan sebagai batang-batang penyusun rangka atap. Setiap batang yang akan diuji diambil 3 buah benda uji, 2 sampel bagian sayap (*flange*) dan 1 sampel bagian badan (*web*), ketentuan ini ditampilkan pada Gambar 3.



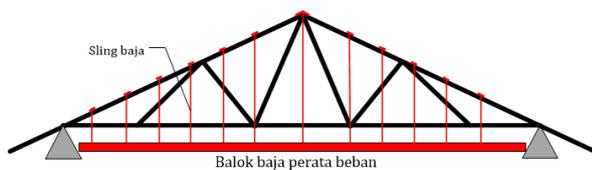
Gambar 3 Lokasi Pengambilan Sampel Uji Tarik

Sumber: AS 1391:2007

Pengujian pembebanan statis skala penuh pada rangka atap menggunakan acuan ASTM E73-13 yang bertujuan untuk melakukan pengujian sampai mencapai kondisi gagal. Penempatan rangka batang diposisikan normal vertikal (American National Standard 2013) sebagai struktur planar. Beban pengujian merupakan beban vertikal diaplikasikan secara hidrolis dengan bantuan balok perata beban menggunakan tali sling baja yang saling berhubungan satu sama lainnya sehingga beban terdistribusi merata dan dapat dikendalikan menggunakan *hydraulic jack* dan *load cell*. Titik pembebanan disesuaikan dengan titik-titik lokasi batang gording. Kondisi ini digambarkan pada Gambar 4. Untuk mengukur lendutan digunakan beberapa transduser yang ditempatkan pada tengah bentang batang kord bawah (*bottom chord*), setiap titik join pada batang kord bawah, join pada *apex* dan perletakan tumpuan.



(a) Pembebanan sesuai ASTM E73-13



(b) Pembebanan di laboratorium

Gambar 4 Aplikasi Posisi Pembebanan

Untuk mencegah tekuk lateral (*lateral buckling*) arah tidak sebidang (*out of plane*) rangka atap dipasang batang penahan lateral di kiri-kanan rangka batang dengan jarak sempit tetapi tidak mengganggu rangka atap untuk berdeformasi. Pembebanan dilakukan secara perlahan-lahan meningkat ($\pm 2\%$ dari beban rencana) dan akan dihentikan seketika bilamana terjadi kegagalan sebelum terjadi keruntuhan total (American National Standard 2013). Gambar 5 menampilkan *setting* rangka atap saat pengujian di laboratorium.



Gambar 5 Pengujian skala penuh rangka atap

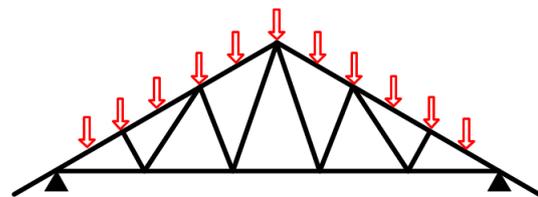
Sumber: Penulis.

Rangka atap direncanakan mampu memikul beban total 2000 N/m^2 dengan rincian,

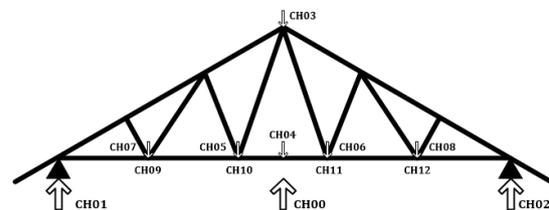
- Beban penutup atap (genteng) = 500 N/m^2
- Beban plafon = 140 N/m^2
- Beban hidup merata = 960 N/m^2
- Beban angin = 400 N/m^2

Beban yang harus diterima bila dihitung tanpa beban angin adalah sebesar 1600 N/m^2 . Menurut Prasetyo (Prasetyo 2014) akibat pembebanan angin, semua kombinasi pembebanan dapat direduksi sebesar 25% atau beban rencana 1500 N/m^2 .

Jumlah titik pembebanan diatur merata pada lokasi batang kord atas dengan jumlah titik lokasi mengikuti Gambar 6 dan lokasi alat ukur transduser ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 6 Aplikasi Posisi Pembebanan



Gambar 7 Lokasi Transduser

Analisis data keluaran hasil pengujian kekuatan tarik batang BCD adalah nilai rata-rata dari setiap batang profil BCD dibandingkan dengan ketentuan SNI 8399:2017. Kriteria penerimaan properti mekanis baja canai dingin G550 adalah mempunyai kuat leleh dan kuat tarik minimum 550 N/mm^2 .

Penentuan nilai kekuatan tarik material berdasarkan AS 1391 maupun ASTM A370 dihitung dengan rumusan sama yaitu pembagian gaya maksimum kecuali terjadi gaya leleh tinggi (*upper yield force*) selama pengujian tarik dengan luas penampang awal benda uji.

Untuk menentukan nilai kekuatan leleh, menurut ketentuan ASTM A370:12 dapat diturunkan dari analisis dengan metode *offset* atau perpanjangan saat dibebani (*extension under load*) (American National Standard 2012). Dalam ketentuan AS 1391 nilai kekuatan leleh berdasarkan nilai persen perpanjangan yang terjadi atau analisis grafis kurva gaya tarik terhadap perpanjangan (*extension*) dan kekuatan leleh yang dibedakan berdasarkan kekuatan leleh tinggi (*upper yield strength*) atau kekuatan leleh rendah (*lower yield strength*).

Seperti disampaikan dalam ASTM E73-13, interpretasi hasil pengujian bila hanya menggunakan satu benda uji tidak dapat dilakukan kesimpulan berbasis statistika. Hasil uji ini hanya untuk pembuktian atau untuk mengamati perilaku umum yang terjadi. Penentuan beban maksimum diperoleh dari hasil beban total maksimum seketika ketika terjadi awal kegagalan.

Data keluaran hasil pengujian beban statis pada rangka atap dianalisis untuk mengetahui beban total maksimum. Kemampuan memikul beban maksimum ini kemudian akan dibandingkan dengan kebutuhan beban rencana. Pengamatan tidak hanya dilakukan pada kekuatan rangka atap tetapi juga pada kekakuan atau fleksibilitas rangka atap dengan pengamatan secara visual performa kegagalan komponen.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebanyak 6 buah rangka atap dilakukan pengujian beban statis. Seluruh rangka atap direncanakan dan dibuat oleh penyedia jasa yang berbeda. Dengan demikian dihasilkan rangka atap dengan bentuk profil penampang dan model geometris berbeda. Sementara detail-detail pada bagian sambungan juga beragam. Kesamaan terjadi pada jenis alat penyambung yaitu menggunakan sekrup tipe *self drilling*. Hal ini menggambarkan kondisi faktual di lapangan, bagaimana bervariasinya suatu desain rangka atap BCD meski untuk menjawab kebutuhan desain yang sama.

Rangka Batang Konstruksi Atap

Dari 6 buah rangka atap, sebanyak 4 buah rangka atap menggunakan batang profil C yaitu rangka S₂, S₄, S₅, dan S₆, sementara dua lainnya menggunakan profil topi (*hat*) yaitu rangka S₁ dan S₃. Tabel 1

menampilkan ragam model geometris rangka atap yang digunakan.

Tabel 1 Model Geometri Rangka Atap

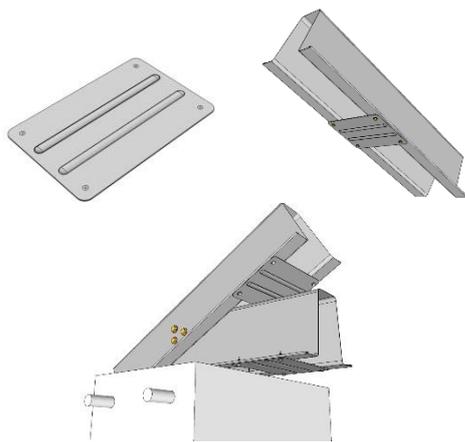
No. BU	Model geometri rangka atap
S ₁	
S ₂	
S ₃	
S ₄	
S ₅	
S ₆	

Batang kord atas (*top chord*) dan kord bawah (*bottom chord*) merupakan batang menerus sedangkan batang-batang bagian *web* tersusun beberapa batang bervariasi membentuk model geometris berbeda. Pada rangka S₁ dan S₃ model geometris tersusun oleh 8 buah batang *web*, rangka S₂ menggunakan batang *web* sebanyak 9 batang, rangka S₄ dan S₅ bagian *web* tersusun 14 batang dan dipasang rapat di bagian ujung dekat tumpuan. Pada rangka S₆ hanya menggunakan 5 batang *web*.

Jumlah batang dan berat profil yang digunakan setiap rangka tentu saja akan mempengaruhi bobot utuh rangka atap dan harga setiap rangkanya.

Untuk memperkuat rangka atap dalam memikul beban, setiap penyedia jasa menyiasati dengan cara berbeda. Pada rangka S₂ batang kord atas bagian ujungnya dan dua lokasi pada batang kord bawah diperkuat dengan merangkap batang profil yang sama. Berbeda halnya dengan rangka S₄ dan S₅ menggunakan perkuatan pada bagian tumpuan dengan menambah batang *web* terutama di bagian ujung dekat dengan tumpuan. Metode ini dilakukan juga pada rangka S₂. Model geometris yang paling sederhana digunakan pada rangka S₆ dengan menggunakan batang *web* 5 batang dan panjang web 1,827 m antar join pada batang kord atas. Hal ini mungkin menjadi bagian paling lemah bila diberi beban terpusat pada tengah bentang.

Selain dengan teknik *overlap* batang profil, teknik perkuatan dilakukan dengan pelat diafragma yang diproduksi sendiri. Hal ini dilakukan pada rangka S₁ dan S₃ dengan menggunakan perkuatan dengan pelat diafragma seperti ditampilkan pada Gambar 8. Hal ini biasanya dilakukan oleh perusahaan yang berperan sebagai produsen, aplikator dan juga perencana untuk mengembangkan kekhasan produknya. Hal ini dilakukan untuk menjamin komitmennya terhadap kualitas produknya, yang di dalam setiap pelayanan dilakukan oleh aplikator internal perusahaan termasuk penggunaan kelengkapan aksesoris struktur. Tipe perusahaan seperti ini biasanya tidak menjual produk BCD secara batangan.



Gambar 8 Pelat Diafragma dan Pemasangannya

Sumber: Prasetyo 2014

Sebagai alat penyambung, seluruh rangka menggunakan jenis dan tipe sama yaitu sekrup tipe *self drilling* nomor 6 dan nomor 8 berdiameter nominal sekrup 3,5 mm – 4,2 mm, biasanya

mempunyai panjang alur (termasuk kepala baut) 16 mm. Jumlah sekrup setiap titik minimum 3 buah.

Gambar 9 menampilkan detail sambungan bagian *apex* yang dilakukan pada rangka S₂, dengan menambah batang *web* arah horizontal. Sementara pada Gambar 10 menampilkan detail sambungan pada tumpuan dengan memasang batang *web* tegak.



Gambar 9 Detail Sambungan Rangka S₂



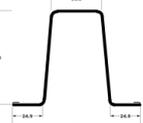
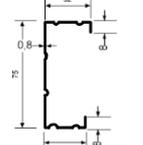
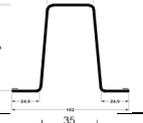
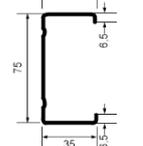
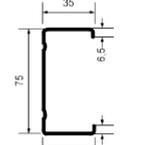
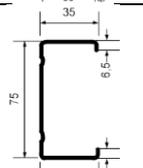
Gambar 10 Detail Sambungan Rangka S₄ dan S₅

Durabilitas material juga ditentukan dari jenis material lapisan tahan karat. Dari ke-6 rangka atap ada 3 jenis material yang digunakan yaitu, galvanis berbahan baku *Zinc (Z)*, zinalum berbahan baku *aluminium-zinc alloy (AZ)* yang di pasaran dikenal juga sebagai galvalum untuk produk Bluescope, dan material ZAM (*Zinc-Aluminium-magnesium*). Penggunaan ketiga material lapisan tahan karat tersebut tidak mempengaruhi kapasitas rangka atap, tetapi akan mempengaruhi harga per batang produk BCD (Wuryanti dan Saputra 2015).

Spesifikasi material dan bentuk profil penampang yang digunakan setiap rangka ditampilkan pada Tabel 2. Kode yang tertera di dalam kurung menjelaskan detail dimensi profil, misalnya kode C 75.35-0,75 artinya profil penampang mempunyai tinggi 75 mm, lebar 35 mm dan tebal 0,75 mm. Pada kode profil penampang di pasaran meski menggunakan kode sama misalnya C75 tetapi detail profil penampang dapat berbeda. Hal ini terlihat pada model tekukan atau lipatan di bagian pelat sayap (*flange*) dan badan (*web*), tujuannya adalah untuk

menambah kaku pelat. Seperti yang ditunjukkan hasil penelitian Huang et al. (Huang et al. 2017) yang menyebutkan dengan penggunaan lipatan atau perkuatan pada pelat badan (*web*) akan menambah kekakuan dibandingkan dengan tanpa pengaku. Namun demikian pengaruh penggunaan tekukan bagian profil terhadap kapasitas sulit diketahui dari hasil pengujian beban.

Tabel 2 Spesifikasi Material

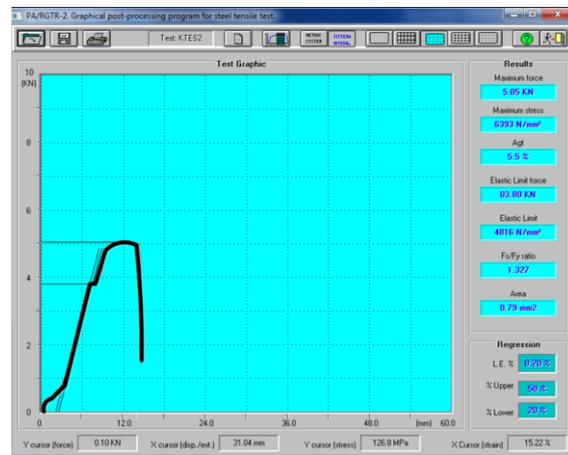
No mor	Bentuk Profil	Kode penampang	Material tahan karat
S ₁		UK-75 (HS 75x39.3x 24.9x0.83)	ZAM
S ₂		C 75 (CNP 75.32- 0.80)	zincalum
S ₃		UK-75 (HS 75x39.3x 24.9x0.85)	gavalum
S ₄		C 75 (C 75.35-0.75)	zincalum
S ₅		C 75 (C 75.35-0.75)	galvanis
S ₆		C 75 (C 75.35-0.75)	zincalum

Properti Material Benda Uji

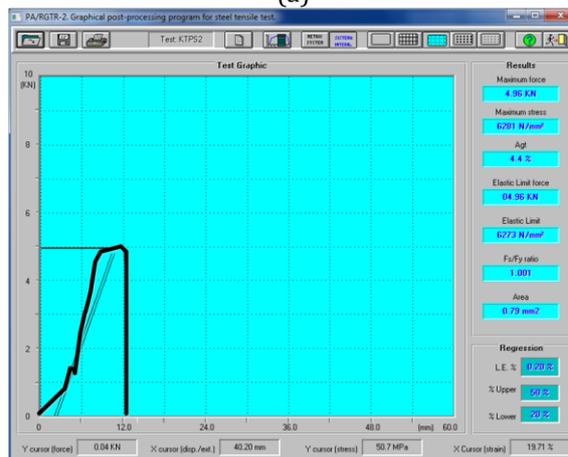
Dalam ketentuan SNI 1727:2013 pasal 1.3.1.3.2 bahwa evaluasi hasil pengujian harus dibuat berdasarkan nilai-nilai yang diperoleh tidak kurang dari 3 pengujian, asalkan deviasi dari nilai rata-rata untuk semua pengujian tidak lebih dari 15%. Jika standar deviasi melebihi 15% harus dilakukan pengujian tambahan (Badan Standardisasi Nasional 2013). Oleh sebab itu setiap rangka diambil benda uji 3 buah untuk menguji properti kekuatan tariknya.

Gambar 11 menampilkan contoh kurva hubungan antara gaya tarik terhadap deformasi. Seluruh

pengujian tarik baja memperlihatkan pola serupa dengan Gambar 11, yang mana pola deformasi elastis dan plastis tetap terjadi, namun tahap deformasi *strain hardening* tidak terlihat dengan jelas. Setelah mencapai gaya tarik maksimum, perpanjangan (*extension*) nilainya tidak besar sebelum mencapai kondisi putus. Gambar 11a dan 11b memperlihatkan perbedaan perpanjangan *plateu*, meski tidak terlalu mudah diamati seketika saat dilakukan pengujian. Pada Gambar 11a perpanjangan *plateu* lebih panjang daripada kondisi pada Gambar 11b. BCD pada Gambar 11b terlihat jelas properti material mempunyai performa getas. Hal ini terjadi karena penggunaan tebal material yang terlalu tipis, kurang dari 1 mm sehingga rasio tegangan tarik terhadap tegangan leleh sama dengan 1,0 (Prasetyo 2014).



(a)



(b)

Gambar 11 Hasil Uji Tarik Baja Canai Dingin

Dengan menggunakan prosedur dan ukuran benda uji sesuai AS 1391:2007, hasil pengujian kekuatan tarik ditampilkan pada Tabel 3. Beban tarik rata-rata diperoleh berdasarkan ketiga benda uji dan nilai tegangan tarik yang terjadi (f_u). Menurut ketentuan SNI 7971:2013 pasal 1.5.1.4. untuk baja G550 dengan

tebal lebih kecil 0,9 mm yang akan digunakan sebagai komponen struktural harus memenuhi 3 kriteria:

1. Rasio kekuatan tarik (f_u) terhadap kekuatan leleh (f_y) harus lebih dari 1,08.
2. Total perpanjangan tidak boleh kurang 10% untuk panjang *gauge* 50 mm
3. Total perpanjangan tidak boleh kurang 7% untuk panjang *gauge* 200 mm.

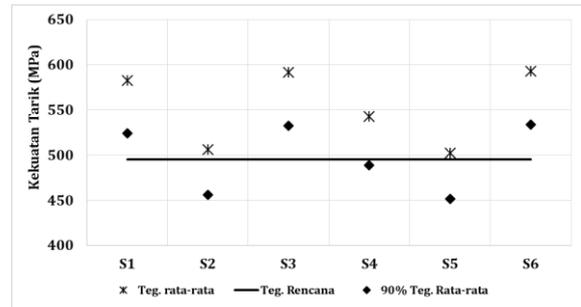
Tabel 3 Properti Kekuatan Tarik Material

No. BU	Tegangan tarik maks. MPa	Std. Dev	Tegangan tarik rata-rata, f_u MPa
S _{1.1}	522,49	53,825	582,34
S _{1.2}	620,66		
S _{1.3}	603,88		
S _{2.1}	516,54	8,178	506,24
S _{2.2}	505,64		
S _{2.3}	496,54		
S _{3.1}	588,69	16,662	592,23
S _{3.2}	613,49		
S _{3.3}	572,79		
S _{4.1}	538,27	11,825	542,96
S _{4.2}	559,20		
S _{4.3}	531,40		
S _{5.1}	494,57	5,400	501,90
S _{5.2}	507,41		
S _{5.3}	503,73		
S _{6.1}	597,30	6,575	593,56
S _{6.2}	584,31		
S _{6.3}	597,36		

Jika ketiga persyaratan tidak dipenuhi untuk tebal kurang dari 0,9 mm dan tebal lebih dari 0,6 mm maka kekuatan leleh (f_y) dan kekuatan tarik (f_u) harus diambil 90% dari nilai-nilai yang tertera atau 495 MPa, diambil yang terkecil.

Kriteria penerimaan dalam SNI 8399:2017 menyebutkan material G-550 dapat digunakan apabila mempunyai kuat leleh dan kuat tarik minimum 550 MPa. Berdasarkan data keluaran dalam Tabel 3 yang memenuhi kriteria penerimaan material BCD hanya ada 3 benda uji yaitu rangka S₁, S₃ dan S₆. Tetapi karena seluruh benda uji mempunyai tebal lebih kecil dari 0,9 mm, maka di dalam perencanaan harus menggunakan nilai 90% dari nilai tertera atau 495 MPa, mana yang terkecil. Untuk mudahnya dapat diamati pada Gambar 12.

Disimpulkan kekuatan tarik izin untuk rangka S₁, S₃, dan S₆ sebesar 495 MPa. Sedangkan untuk rangka lainnya harus menggunakan nilai 90% dari nilai yang tertera, sehingga rangka S₂ menggunakan kekuatan tarik 456 MPa, S₄ menggunakan 489 MPa, dan S₅ menggunakan 452 MPa.



Gambar 12 Kekuatan Tarik Dalam Rencana

Jika melihat pada dokumen perencanaan struktur rangka S₁ dan S₃ yang disediakan oleh penyedia jasa, nilai kekuatan tarik lebih besar dari nilai hasil pengujian. Seluruh perencanaan menggunakan nilai-nilai yang ditampilkan pada Tabel 4. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi properti material yang digunakan dalam analisis perencanaan masih terlalu optimis dibandingkan nilai kekuatan izin sesuai persyaratan dalam SNI 7971.

Tabel 4 Asumsi Properti Material

Properti	Nilai
Modulus elastisitas	203400 MPa
Kekuatan leleh, f_y	500 MPa
Kekuatan tarik, f_u	550 MPa

Kapasitas Beban Rangka Atap

Faktual di lapangan kapasitas rangka atap dalam memikul beban diperoleh dari sistem rangka yang bekerja secara 3 dimensi. Kekakuan konstruksi atap diperkuat dengan gording atau reng yang saling mengikat antarrangka atap. Perilaku ini sulit diprediksi di dalam pengujian di laboratorium. Meski di dalam pengujian dilakukan secara planar, telah dilakukan upaya untuk menyimulasi pembebanan mendekati kondisi di lapangan dengan cara mengeliminasi kegagalan arah tidak sebidang rangka atap.

Kapasitas beban hasil uji

Intepretasi hasil pengujian sesuai ketentuan ASTM E73-13 bila hanya digunakan satu pengujian maka hanya dapat digunakan sebagai hasil pengamatan perilaku umum untuk menentukan kapasitas keamanan dalam memikul beban desain tertentu. Batas maksimum beban yang dapat dipikul oleh rangka batang dihasilkan dari gaya maksimum dibagi dengan faktor keamanan.

Gaya maksimum yang dapat dipikul dan lendutan pada tengah bentang batang kord bawah ditampilkan pada Tabel 5. Nilai tertinggi gaya yang bekerja terjadi pada rangka S₁ dan terkecil pada rangka S₆. Nilai lendutan terbesar terjadi pada rangka S₁, sedangkan yang terkecil pada rangka S₅.

Berdasarkan hasil pengujian ini, pada kondisi lendutan yang terjadi, rangka atap dengan batang BCD profil topi (*hat*) mampu memikul lendutan lebih besar dibandingkan pada rangka dengan profil C. Hal ini menunjukkan penggunaan material yang tipis dengan rasio tinggi terhadap tebal besar mudah terjadi tekuk lokal bagian web (*web crippling*) sehingga bentuk profil penampang menghasilkan moda kegagalan dan deformasi berbeda.

Tabel 5 Kapasitas Rangka Atap

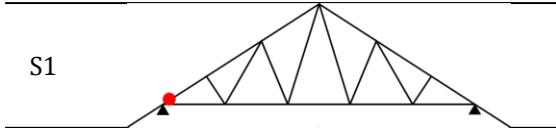
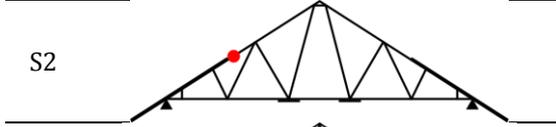
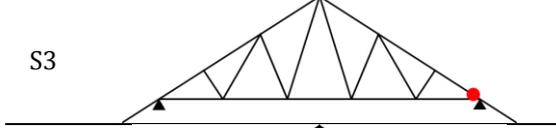
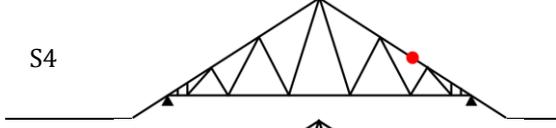
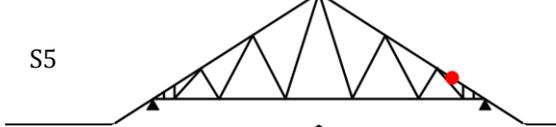
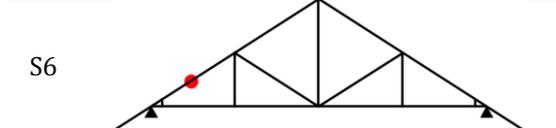
No. BU	Gaya maks. (N)	Lendutan tengah bentang (mm)
S1	31654	17,66
S2	12779	16,55
S3	22978	23,68
S4	14083	16,66
S5	10525	12,72
S6	9065	17,52

Titik awal kegagalan pada setiap rangka atap mempunyai lokasi yang berbeda. Lokasi awal kegagalan ditampilkan pada Tabel 6. Titik kegagalan terjadi pada bagian komponen dekat dengan tumpuan (*heel joint*) dialami pada rangka S₁ dan S₃. Berbeda dengan rangka S₂, kegagalan terjadi pada bagian batang kord atas berdekatan dengan batang yang diperkuat menggunakan batang ganda. Kegagalan pada rangka S₄ dan S₅ hampir sama yaitu pada batang kord atas yang juga berdekatan dengan bagian tumpuan. Berbeda dengan rangka lainnya, awal kegagalan pada rangka S₆ terjadi di bagian tengah bentang batang kord atas karena jarak join batang *web* memang lebih panjang dibandingkan pada rangka lainnya.

Tipe kegagalan pada komponen dekat dengan *heel joint* sejalan dengan hasil penelitian Dawe et al. (Dawe, Liu, dan Li 2010) yang menyebutkan kegagalan tekuk lokal pada pelat profil bagian batang kord bawah terjadi karena tidak memiliki kemampuan cukup untuk menahan beban sehingga terjadi torsi dan *crippling*.

Tipe kegagalan seperti ini terlihat pada Gambar 13. Pada Gambar 13a kegagalan terjadi pada batang kord atas berdekatan dengan *hell joint* dan Gambar 113b pada batang berdekatan dengan batang yang diperkuat. Pola kegagalan menunjukkan perilaku sama yaitu terjadi tekuk lokal dan *web crippling*. Pola kegagalan lain terjadi seperti ditampilkan pada Gambar 14, yaitu ujung batang kord atas mengalami puntir akibat terjadi tekuk lokal seperti yang terjadi pada rangka S₅.

Tabel 6 Kapasitas Rangka Atap

No. BU	Lokasi titik awal kegagalan
S1	
S2	
S3	
S4	
S5	
S6	

Catatan: ● titik awal kegagalan



(a) Kegagalan pada bagian dekat tumpuan



(b) Kegagalan pada tengah bentang *web joint*

Gambar 13 Pola Kegagalan Pada Rangka



Gambar 14 Tekuk Lokal dan Torsi

Kapasitas beban analisis numerik

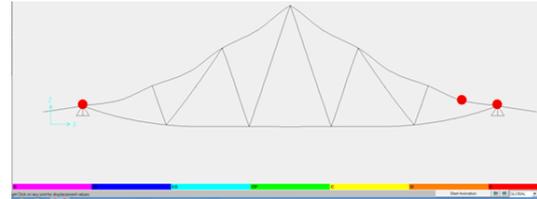
Sebelum dilakukan pengujian dilakukan juga prediksi kapasitas rangka menggunakan analisis numerik dengan data properti bahan sesuai dengan hasil uji kuat tarik aktual. Analisis *pushover* dilakukan untuk mendapatkan lokasi sendi plastis. Nilai beban yang terjadi ketika sendi plastis terbentuk pertama kali itulah yang menjadi nilai kapasitas beban prediksi. Hasil analisis ditampilkan pada Tabel 6 dan lokasi sendi plastis ditampilkan pada Gambar 15.

Tabel 6 Kapasitas Beban Analisis Numerik

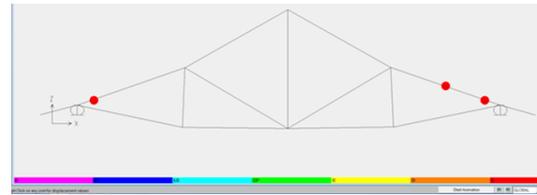
Nomor Rangka atap	Kapasitas ultimit (N)
S ₁	30030
S ₂	12437
S ₃	30030
S ₄	15604
S ₅	15604
S ₆	11241

Pada Gambar 15 diperlihatkan ada 3 lokasi sendi plastis. Titik lokasi pertama dan kedua terjadi pada titik dekat tumpuan dan lokasi ketiga pada batang kord atas berdekatan dengan titik tumpuan. Titik lokasi ini tipikal terjadi pada semua rangka atap.

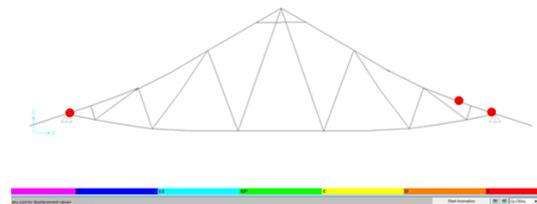
Gambar 15a untuk kondisi rangka S₁, S₂ dan S₃. Gambar 15b untuk kondisi rangka S₆, dan Gambar 15c untuk rangka S₄ dan S₅. Bila dibandingkan kapasitas aktual hasil uji dan nilai prediksi hasil analisis numerik, lihat Tabel 7, menunjukkan hanya Rangka nomor S₁ dan S₂ saja yang mempunyai nilai kapasitas hasil uji lebih besar dari hasil analisis numerik atau nilai rasio lebih besar 1,0. Rangka lainnya mempunyai kapasitas aktual di bawah dari nilai kapasitas prediksi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 15 Lokasi Sendi Plastis Pertama

Tabel 7 Perbandingan Kapasitas

Nomor Rangka	Analisis Numerik (N)	Hasil Uji (N)	Rasio
S ₁	30030	31654	1,05
S ₂	12437	12779	1,03
S ₃	30030	22978	0,77
S ₄	15604	14083	0,90
S ₅	15604	10532	0,67
S ₆	11241	9065	0,81

Nilai-nilai rasio pada Tabel 7 meski dapat digunakan sebagai gambaran awal untuk prediksi perilaku rangka atap, tetapi tidak dapat digunakan sebagai dasar penerimaan kapasitas rangka atap. Hal ini didasarkan pada pertimbangan kemungkinan perbedaan asumsi rencana yang digunakan oleh penulis dengan asumsi oleh penyedia jasa dalam mendesain rangka atapnya.

Demikian pula dengan titik lokasi terjadinya sendi plastis pertama dibandingkan dengan lokasi awal kegagalan. Titik kegagalan di dekat tumpuan sesuai juga dengan hasil uji pada rangka S₁, S₃ dan S₅. Sementara rangka S₆ antara hasil uji dan prediksi diperoleh simpulan yang sama.

Kemampulayaan rangka atap

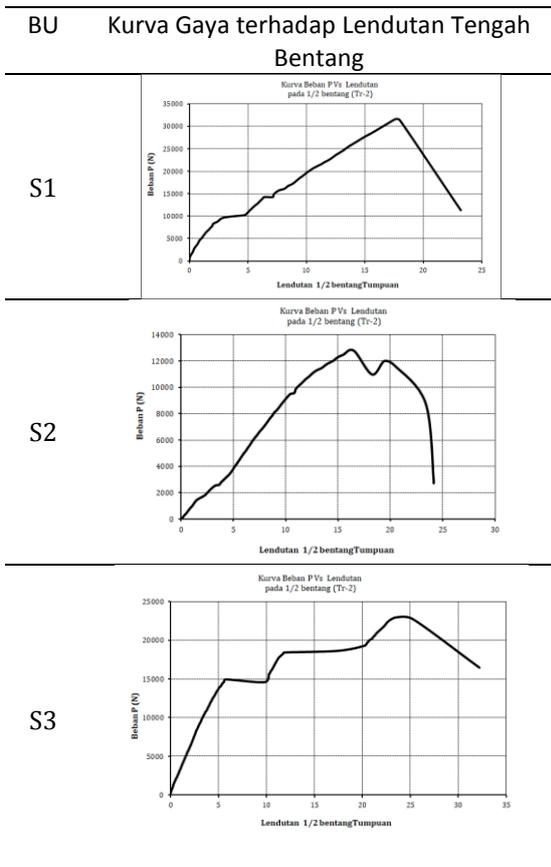
Ada 2 kriteria penerimaan kemampulayaan rangka atap yaitu kriteria kekuatan dan kekakuan. Kriteria kekuatan dihitung dari gaya yang bekerja terhadap beban rencana nilainya harus lebih kecil dari 1,0. Sementara kriteria kekakuan ditinjau dari nilai lendutan akibat beban rencana harus lebih kecil daripada lendutan izin.

Nilai lendutan izin ditentukan sebagai berikut (PT. Jaindo Metal Industries 2014);

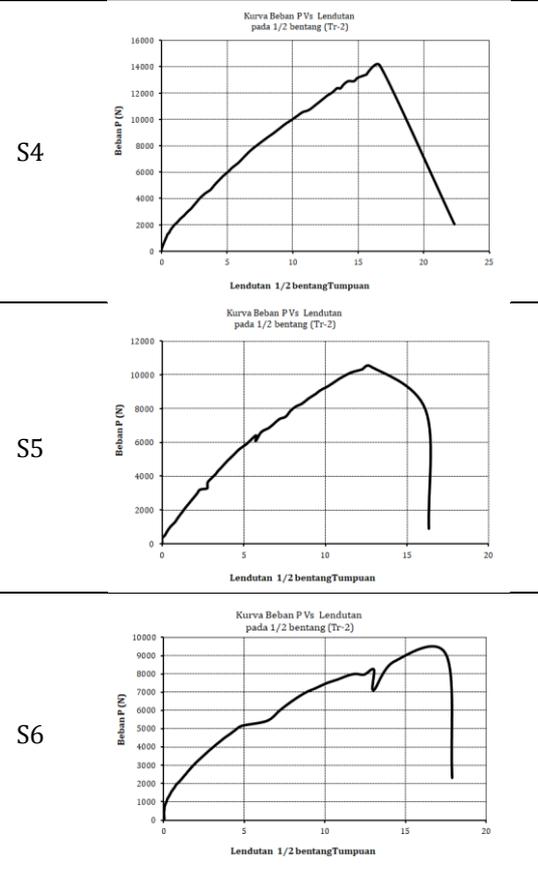
- 1) Lendutan akibat beban total:
 $\delta = L/240$ atau 25 mm.
- 2) Lendutan akibat beban mati dan hidup:
 $\delta = L/360$ atau 17 mm.

Telah disampaikan sebelumnya dalam Tabel 5 nilai lendutan yang terjadi pada saat beban maksimum. Lendutan ini dicatat dari nilai tranduser yang dipasang di tengah bentang pada batang kord bawah (*bottom cord*). Lengkapnya kurva hubungan gaya (beban) dengan lendutan yang terjadi ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Kapasitas Lendutan Rangka Atap



BU Kurva Gaya terhadap Lendutan Tengah Bentang



Pola yang terjadi pada seluruh rangka hampir sama. Penambahan beban akan menyebabkan lendutan juga meningkat. Pada kurva rangka S₃ terjadi perpanjangan lendutan meski tidak ada penambahan beban tertentu. Hal ini mungkin karena terjadi kondisi slip. Meski demikian kondisi tersebut dapat terkoreksi pada penambahan beban berikutnya. Dalam pengujian rangka, pembebanan seketika dihentikan bila telah terjadi kegagalan pada rangka batang. Titik awal kegagalan telah disampaikan sebelumnya di Tabel 6.

Untuk memilih dasar kriteria penerimaan apakah berdasarkan nilai gaya maksimum atau batasan lendutan izin dilihat berdasarkan kurva-kurva beban dengan lendutan tersebut. Bila kriteria persyaratan lendutan izin sebesar 17 mm yang digunakan sebagai dasar penerimaan, ada 3 rangka yang nilai lendutannya lebih besar dari persyaratan lendutan izin, yaitu rangka S₁, S₃ dan S₆. Sementara rangka lainnya sebelum mencapai batas lendutan izin kondisi gaya maksimum sudah tercapai. Dengan demikian batas kapasitas kekuatan atau kapasitas beban untuk rangka atap S₁, S₃ dan S₆ mengacu pada nilai kapasitas beban saat mencapai lendutan izin, 17 mm dan rangka lainnya menggunakan kapasitas maksimum aktual hasil uji.

Sebaliknya bila sebagai kriteria penerimaan menggunakan lendutan izin sebesar 25 mm, maka seluruh rangka menggunakan nilai kapasitas maksimum hasil uji sebagai batas kapasitas ultimit. Tabel 9 menampilkan batas kapasitas ultimit berdasarkan perbedaan kriteria persyaratan lendutan izin.

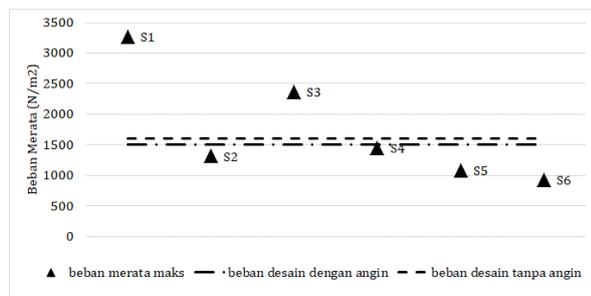
Tabel 9 Kapasitas Berdasarkan Lendutan Izin

Nomor rangka	Kapasitas ultimit (17 mm) (N)	Kapasitas ultimit (25 mm) (N)
S ₁	30684	31654
S ₂	12779	12779
S ₃	18614	22978
S ₄	14083	14083
S ₅	10532	10532
S ₆	9004	9065

Perhitungan kapasitas beban merata yang dapat dipikul oleh tiap rangka atap ditampilkan dalam Tabel 10 berdasarkan persyaratan lendutan izin akibat beban total, 25 mm. Dengan jarak antarrangka 1,2 m dan panjang batang kord atas 8,082 m maka diperoleh kapasitas beban merata setiap rangka. Jika kapasitas beban merata dalam Tabel 10 dibandingkan dengan beban merata rencana, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 16. Beban rencana dengan beban angin tereduksi sebesar 1500 N/m² dan beban rencana total tanpa beban angin sebesar 1600 N/m².

Tabel 10 Kapasitas Rangka Sesuai Hasil Uji

Nomor rangka	Kapasitas beban ultimit (N)	Kapasitas beban merata (N/m ²)
S ₁	31654	3264
S ₂	12779	1318
S ₃	22978	2369
S ₄	14083	1452
S ₅	10532	1086
S ₆	9065	935



Gambar 16 Beban Rencana dan Maksimum

Persyaratan penerimaan rangka atap adalah apabila rangka atap mampu memikul beban rencana. Dalam Gambar 13 terlihat bahwa rangka S₂, S₄, S₅ dan S₆ mempunyai kapasitas lebih kecil dari beban rencana. Sementara rangka S₁ dan S₃ mempunyai kapasitas lebih besar dari beban rencana.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa model geometris dan bentuk profil penampang mempengaruhi kapasitas rangka atap. Nilai kapasitas beban maksimum yang dipikul sebagian besar lebih rendah dari beban rencana dan mempunyai faktor keamanan kurang dari 1,0.

KESIMPULAN

Sebanyak 6 buah rangka atap dilakukan pengujian pembebanan skala penuh. Pengujian dilakukan untuk mengetahui properti material baja canai dingin dan kapasitas rangka atap. Setiap rangka atap baik analisis perhitungan struktur maupun pemasangannya dilakukan oleh penyedia jasa berbeda.

Hasil pengujian menunjukkan hanya 50% material yang mempunyai kekuatan tarik sebagai baja G550 atau lebih besar dari 550 MPa. Meski demikian karena tebal profil penampang kurang dari 0,9 mm, nilai kekuatan tarik menurut ketentuan SNI 7971:2013, nilai $f_u = 550$ MPa tidak dapat digunakan sebagai dasar perencanaan kekuatan tarik. Nilai kekuatan tarik harus diambil nilai terkecil antara 90% dari 550 MPa atau 495 MPa atau sesuai hasil uji. Sebanyak 2 rangka dari 6 rangka yang diuji dapat menggunakan kekuatan tarik sebesar 495 MPa, sementara rangka lainnya menggunakan kekuatan tarik antara 452 MPa sampai 485 MPa. Faktual praktik lapangan dalam proses perencanaannya seluruh rangka atap menggunakan nilai $f_u = 550$ MPa sebagai asumsi kekuatan tarik. Nilai ini tidak memenuhi ketentuan SNI 7971:2013.

Berdasarkan hasil pengujian pembebanan statis sebanyak 4 rangka atap tidak memenuhi persyaratan kapasitas dalam menerima beban rencana. Performa kegagalan terjadi karena tekuk lokal dan *web crippling* pada batang kord atas terutama pada bagian yang berdekatan dengan tumpuan (*heel joint*). Berdasarkan kekuatan pikul dan kekakuan yang terjadi menunjukkan kinerja baja canai dingin dengan profil topi (*hat*) mempunyai keandalan lebih baik daripada profil C.

Mencermati hasil penelitian ini disarankan dalam setiap perencanaan rangka atap perlu memperhatikan batasan kekuatan tarik baja canai dingin terhadap profil penampang yang digunakan. Dalam analisis perhitungan struktur, nilai faktor

keamanan perlu dinaikan untuk mengantisipasi keberagaman kualitas baja canai dingin di pasaran yang kapasitasnya cenderung di bawah spesifikasi yang disyaratkan. Sementara itu pada tahap pelaksanaan konstruksi perlu diperhatikan detail pekerjaan bagian sambungan.

Untuk mengantisipasi kegagalan dalam praktik di lapangan, perlu segera disusun pedoman dan panduan praktis perencanaan dan pelaksanaan rangka atap baja canai dingin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sepenuhnya didanai oleh Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. Penulis ucapkan terima kasih kepada Christanto Yudha Saputra, S.T., M.Eng. sebagai koordinator kegiatan dan para teknisi di Balai Bahan dan Struktur Bangunan yang telah membantu selama pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- American National Standard. 2012. *ASTM A370:12a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products 1*. USA. <https://doi.org/10.1520/A0370-12a.2>.
- . 2013. *ASTM, E 73-13 Standard Practice for Static Load Testing of Truss Assemblies*. USA.
- Apriani, Widya, Fadrizal Lubis, dan Muthia Anggraini. 2017. "Analisis Sambungan Sekrup pada Konstruksi Rangka Atap baja Ringan Menurut SNI 7971:2013." *Jurnal Teknik Sipil Siklus* Vol. 3 (No. 2 Oktober): 49–57.
- Ariyavinanta, Ervan, Allexander Louis, Hasan Santoso, dan Ima Muljati. 2015. "Pengembangan Spreadsheet untuk Perhitungan Kapasitas Baja Canai Dingin Dengan Pengaku Berdasarkan SNI 7971 : 2013." *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil* 4 (2): 1–8.
- Australian Standard. 2007. *AS 1391:2007 Metallic Materials - Tensile Testing at Ambient Temperature*. Vol. 2007. Australia.
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *SNI 1727:2013 Beban Minimum Untuk Perancangan Bangunan Gedung Dan Struktur Lain*. Badan Standardisasi Indonesia. Indonesia.
- Badan Standardisasi Nasional. 2017. *SNI 8399:2017 Profil Rangka Baja Ringan*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- Bondok, D. H., dan H. A. Salim. 2017. "Failure Capacities of Cold-formed Steel Roof Trusses End-connections." *Thin-Walled Structures* 121 (May): 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.026>.

- Dawe, J. L., Yi Liu, dan J. Y. Li. 2010. "Strength and Behaviour of Cold-formed Steel Offset Trusses." *Journal of Constructional Steel Research* 66 (4): 556–65. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.10.015>.
- Haris, Sabril, dan Hazmal Herman. 2015. "Studi Eksperimental Perilaku Sambungan Dengan Alat Sambung Sekrup Pada Elemen Struktur Baja Ringan." In *Annual Civil Engineering Seminar 2015, Pekanbaru*, 978–79.
- Hassanein, M. F., Mohamed Elchalakani, dan A. A. Elkawas. 2017. "Design of Cold-formed CHS Braces for Steel Roof Structures." *Thin-Walled Structures* 120 (June): 249–59. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.09.002>.
- Huang, Xu hao, Jian Yang, Qing feng Liu, Jue Zhu, Li Bai, Fei liang Wang, dan Jian hua Wang. 2017. "A Simplified Flange-lip Model for Distortional Buckling of Cold-formed Steel Channel-sections with Stiffened Web." *International Journal of Mechanical Sciences* 136: 451–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.034>.
- Irawati, Inggar Septhia, Ali Awaludin, dan Nicholas Padua Sebastian. 2017. "The Performance of Cold-formed Steel Long-span Roof Structure Combined with Laminated Timber: Cold-formed Steel - Laminated Timber Composite." In *Procedia Engineering*, 171:1242–49. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.41>.
- Johnston, R.P.D., T. McGrath, S. Nanukuttan, J.B.P. Lim, M. Soutsos, M.C. Chiang, R. Masood, dan M.A. Rahman. 2017. "Sustainability of Cold-formed Steel Portal Frames in Developing Countries in the Context of Life Cycle Assessment and Life Cycle Costs." *Structures* 13: 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.11.003>.
- Karabulut, B., dan S. Soyoz. 2017. "Experimental and Analytical Studies on Different Configurations of Cold-Formed Steel Structures." *Journal of Constructional Steel Research* 133: 535–46. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.027>.
- Latumeten, Regyna A. D., Averina Aprilia, Hasan Santoso, dan Ima Muljati. 2015. "Perencanaan Struktur Rangka Atap Baja Canai Dingin." *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil* Vol. 4 No.: 1–8.
- Leng, Jiazhen, Kara D. Peterman, Guanbo Bian, Stephen G. Buonopane, dan Benjamin W. Schafer. 2017. "Modeling Seismic Response of a Full-Scale Cold-Formed Steel-Framed Building." *Engineering Structures* 153: 146–65. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.08>.

- Oktarina, Devi, dan Agus Darmawan. 2015. "Analisa Perbandingan Rangka Atap Baja Ringan dan Rangka Atap Kayu dari Segi Analisis Struktur dan Anggaran Biaya." *Jurnal Konstruksia* 7 (Nomor 1 Desember): 27–36. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/konstruksi/article/view/647>.
- Pedreschi, R. F., dan B. P. Sinha. 2008. "An Experimental Study of Cold Formed Steel Trusses using Mechanical Clinching." *Construction and Building Materials* 22 (5): 921–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.014>.
- Prasetyo, Ben. 2014. "Penggunaan Cold-Formed Steel Dalam Konstruksi Bangunan." *Diskusi teknis Litbang Baja Ringan Puslitbang Permukiman, 11 Des 2014*.
- PT. Jaindo Metal Industries. 2014. *Standar Perencanaan kuda-kuda*. Bandung.
- Renansiva, Revi. 2014. "Metode Desain dan Pengawasan Pekerjaan Baja Canai Dingin." *Diskusi teknis Litbang Baja Ringan Puslitbang Permukiman, 11 Des 2014*. Bandung.
- Schafer, Benjamin W., dan Dinar Camotim. 2013. "Special Issue on Cold-Formed Steel Structures." *Journal of Structural Engineering* 139 (5): 637–39. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000820](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000820).
- Schafer, Benjamin W, R Laboube, J Fisher, W Kile, J Larson, G Polard, T Sputo, et al. 2006. "Cold-Formed Steel Structures : Special Issue." *Journal of Structural Engineering* 132 (April): 495–96.
- Setiawan, Elvira, Yui Nishimura, Hasan Santoso, dan Ima Muljati. 2015. "Penggunaan Spreasheet Dalam menentukan Kapasitas Profil Baja Canai Dingin Berdasarkan SNI 7971:2013." *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil* Vol 4. No.: 1–8.
- Wuryanti, W., dan C.Y. Saputra. 2015. "Kajian Kinerja Rangka Atap Baja Canai Dingin." In *Koferensi Nasional Teknik Sipil 9 (KoNTekS 9)*, 855–63. Makasar.
- Yaojie, Guo, Li Kun, dan Du Xinxi. 2002. "Destructive Mechanism of Large Span Cold-Formed Section Roof Truss." *Advance in Steel Structures* Vol. I: 453–59.
- Zeynalian, Mehran, Adele Shelley, dan H. R. Ronagh. 2016. "An experimental Study into the Capacity of Cold-formed Steel Truss Connections." *Journal of Constructional Steel Research* 127: 176–86. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.08.001>.