

## Tinjauan Tingkah Laku Lengkokan Anggota Keluli Terbentuk Sejuk Terbina: Tersambung Bersemuka dan Belakang-ke-Belakang

(An Overview of Buckling Behaviour of Cold-Formed Steel Built-Up Members: Connected Face-to-Face and Back-to-Back)

Muhammad Khairuddin Zulkifli<sup>a</sup>, Shahrizan Baharom<sup>a,b\*</sup>, Mohd Reza Azmi<sup>a,b</sup>, Tee Sing Huat<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Jabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, UKM Bangi, Selangor

<sup>b</sup>Pusat Penyelidikan Bandar Pintar dan Lestari (SUTRA), Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600, UKM Bangi, Selangor

<sup>c</sup>Ari Utara Sdn Bhd Lot 28, Taman Perindustrian Bukit Makmur, 08000 Sungai Petani, Kedah

\*Corresponding author: [shahrizan@ukm.edu.my](mailto:shahrizan@ukm.edu.my)

Received 16 June 2024, Received in revised form 13 September 2024  
Accepted 13 October 2024, Available online 30 November 2024

### ABSTRACT

*Cold-formed steel (CFS) is increasingly being used in modern buildings owing to its lightweight, recyclable nature and material usage efficiency aligning with sustainable practices. Built-up CFS sections have garnered significant attention owing to their increasing application in modern construction. These thin-walled CFS sections are prone to low buckling resistance, limiting their application in tall buildings under extreme loading conditions. This paper review comprehensively the buckling behaviour and structural stability of various CFS built-up configurations of face-to-face, back-to-back non-gapped and back-to-back gapped configurations. The findings show that built-up sections enhance structural performance by reducing local, distortional, and global buckling compared with single sections. Fasteners and stiffeners are crucial for improving the performance by optimising the fastener spacing and the inclusion of stiffeners significantly enhances structural stability. These modifications enhance both the structural axial and flexural performances by improving the buckling resistance under extreme loads. Current design standards often inadequately address buckling complexities and necessitate updates to fully leverage CFS's structural potential. The back-to-back gapped configuration stands out for its superior constructibility particularly in truss systems, owing to its ease of assembly, adaptability to buckling challenges and improved lateral stability. Innovative design improvements and updated guidelines are required to enhance CFS applications in sustainable and resilient structural systems. Keywords: Built-up section; back-to-back section; closed section; Cold-formed steel (CFS); open section*

### ABSTRAK

*Keluli terbentuk-sejuk (CFS) semakin digunakan dalam bangunan moden kerana sifatnya yang ringan, boleh dikitar semula dan kecekapan penggunaan bahan selaras dengan amalan mampan. Keratan CFS terbina telah mendapat perhatian yang ketara kerana aplikasinya yang semakin meningkat dalam pembinaan moden. Keratan CFS berdingin-nipis ini terdedah kepada rintangan lengkokan yang rendah yang mengehendkan penggunaannya di bangunan tinggi di bawah keadaan pembebanan yang melampau. Kertas ini meninjau secara komprehensif terhadap tingkah laku lengkokan dan kestabilan struktur pelbagai konfigurasi terbina CFS iaitu konfigurasi bersemuka, belakang-ke-belakang tidak bersela dan belakang-ke-belakang bersela. Penemuan menunjukkan keratan terbina meningkatkan prestasi struktur dengan mengurangkan lengkokan tempatan, herotan dan sejagat berbanding keratan tunggal. Pengikat dan pengukuh adalah penting untuk meningkatkan prestasi dengan melalui mengoptimumkan jarak pengikat dan kemasukan pengukuh dapat meningkatkan kestabilan struktur secara ketara. Pengubahsuaian ini meningkatkan prestasi paksi dan lentur struktur dengan menambah baik rintangan lengkokan di bawah beban yang melampau. Piawai reka bentuk semasa selalunya tidak mencukupi menangani kerumitan lengkokan dan memerlukan kemas kini untuk memanfaatkan*

sepenuhnya potensi struktur CFS. Konfigurasi belakang-ke-belakang bersela menonjol kerana kebolehbinaannya yang unggul terutamanya dalam sistem kekuda kerana pemasangan yang mudah, kebolehsuaian kepada cabaran lengkokan dan kestabilan sisi yang lebih baik. Penambahbaikan reka bentuk yang inovatif dan garis panduan yang dikemas kini diperlukan untuk meningkatkan aplikasi CFS dalam sistem struktur yang mampan dan berdaya tahan.

*Kata kunci:* Keratan terbina; keratan belakang-ke-belakang; Keratan tertutup; Keluli terbentuk-sejuk (CFS); keratan terbuka

## PENGENALAN

Pertumbuhan pesat penduduk global dan tekanan tinggi terhadap sumber asli telah mendorong keperluan untuk sistem struktur yang mampan dan cekap. Struktur keluli terbentuk-sejuk telah muncul sebagai penyelesaian yang menjanjikan untuk pembinaan bangunan moden kerana beratnya yang ringan, kelajuan pembinaan, kebolehkitar semula dan keselamatan. Istilah “keluli terbentuk-sejuk” - *cold-formed steel* (CFS) merujuk kepada keluli yang dihasilkan dengan menggulung atau menekan tolok nipis kepingan keluli kepada hasil produk dan proses itu dikenali sebagai “pembentukan sejuk”. Walau bagaimanapun, rintangan lengkokan yang rendah pada keratan nipis menghasilkan kekuatan dan kemuluran yang agak rendah dan mengehadkan prestasinya di bangunan tinggi dan di bawah peristiwa pembebanan yang melampau (Hancock 2003).

Kemajuan terkini dalam sistem bangunan keluli pra-kejuruteraan menawarkan kelebihan yang ketara terutamanya untuk bangunan perindustrian satu tingkat. Sistem ini menggunakan keluli terbentuk-sejuk sebagai anggota struktur primer atau sekunder, menyediakan alternatif yang praktikal dan cekap kepada kaedah pembinaan konvensional. Penyepaduan keluli terbentuk-sejuk dengan alat reka bentuk termaju dalam kaedah unsur terhingga - *finite element method* (FEM) seperti Staad Pro, ABAQUS dan kejuruteraan perisian lain membolehkan pengoptimuman prestasi struktur dan keberkesanan kos (Rehman & Sakalle 2019; Taufik et al. 2011).

Kesan alam sekitar akibat aktiviti pembinaan telah memacu pembangunan amalan bangunan lestari. Struktur keluli terbentuk-sejuk menyumbang kepada matlamat ini dengan mengurangkan penggunaan bahan dan meningkatkan kecekapan tenaga. Kajian tentang prestasi haba keratan keluli terbentuk-sejuk menunjukkan potensinya dalam membina struktur cekap tenaga yang mematuhi piawaian yang ketat seperti rumah pasif (Johnston et al. 2018; Maxineasa et al. 2020). Keluli terbentuk-sejuk boleh dikitar semula, tahan lama dan boleh disesuaikan menjadikannya pilihan yang baik untuk pembinaan moden. Kualiti ini menyokong prinsip reka bentuk yang mampan dan membantu mengurangkan kesan alam sekitar bangunan (Harini et al. 2020).

Sim et al. (2015) membincangkan penggabungan keluli terbentuk-sejuk ke dalam reka bentuk bangunan dalam kajian di mana industri pembinaan boleh memberi kesan alam sekitar yang lebih rendah melalui pengurangan pelepasan karbon dan kecekapan sumber yang lebih baik. Selain itu, kebolehsuaian dan fleksibiliti struktur keluli terbentuk-sejuk boleh menyokong kaedah pembinaan inovatif yang menyumbang kepada Indeks Bangunan Hijau - *Green Building Index* (GBI) seperti pembinaan pasang siap dan modular. Kaedah ini bukan sahaja mengurangkan masa dan kos pembinaan tetapi juga meminimumkan sisa pembinaan dan penggunaan tenaga sekali gus menyokong faktor dalaman dan luaran yang penting untuk amalan pengurusan hijau yang dikenal pasti dalam kajian, seperti teknologi alam sekitar/hijau dan memberi pendekatan baharu kepada pengurusan.

Salah satu kelebihan utama keluli terbentuk-sejuk ialah nisbah kekuatan-kepada-beratnya yang tinggi menjadikannya pilihan yang ideal untuk aplikasi yang memerlukan bahan yang ringan dan kuat. Pengoptimuman produk keluli terbentuk-sejuk telah menjadi titik fokus dalam penyelidikan terkini yang bertujuan untuk meningkatkan kecekapan dan keselamatan struktur. Kajian oleh Becque (2019) meneroka pelbagai teknik pengoptimuman dan aplikasi praktikalnya, serta menekankan keperluan untuk produk keluli terbentuk-sejuk yang cekap dan berdaya saing yang boleh dihasilkan dengan kos dan penggunaan bahan yang minimum. Dalam sistem kekuda, keluli terbentuk-sejuk berupaya menawarkan prestasi unggul berbanding kekuda keluli tergelek-panas tradisional.

Dar et al. (2020) menjalankan kajian perbandingan antara keluli terbentuk-sejuk dan kekuda keluli tergelek-panas, menunjukkan bahawa kekuda keluli terbentuk-sejuk bukan sahaja mempunyai nisbah kekuatan-ke-berat yang lebih tinggi tetapi juga mempamerkan prestasi keseluruhan yang lebih baik dari segi kos dan kemudahan fabrikasi. Kajian ini menggariskan kepentingan potensi keluli terbentuk-sejuk dalam aplikasi struktur yang mengurangkan berat-diri dan kekuatan yang dipertingkatkan. Pengoptimuman tiang-rasuk menggunakan keluli terbentuk-sejuk juga memberikan peluang penting untuk meningkatkan prestasi struktur.

Penyelidikan oleh pelbagai pengarang telah memberi tumpuan kepada pengoptimuman bentuk keluli terbentuk-sejuk untuk menangani kekangan praktikal dan pembuatan. Matlamatnya adalah untuk membangunkan keratan keluli terbentuk-sejuk yang memaksimumkan rintangan sambil meminimumkan berat dan kerumitan pembuatan. Ini melibatkan penggunaan algoritma pengoptimuman lanjutan, seperti algoritma genetik dan pengoptimuman kawanan zarah untuk meneroka pelbagai kemungkinan reka bentuk (Parastesh et al. 2019, 2021). Walaupun dengan kemajuan ini, cabaran masih kekal dalam penggunaan struktur keluli terbentuk-sejuk yang meluas. Satu isu utama ialah kerentanan anggota keluli terbentuk-sejuk terhadap lengkokan tempatan dan herotan, yang memerlukan reka bentuk yang teliti.

Penyelidikan oleh Dar et al. (2020) menonjolkan kepentingan menangani ketidakstabilan lengkokan ini melalui pendekatan reka bentuk yang inovatif dan pengesahan percubaan yang mantap. Selain itu, keperluan untuk piawaian reka bentuk yang komprehensif yang boleh menampung ciri-ciri unik keluli terbentuk-sejuk adalah kritikal. Garis panduan yang sedia ada, walaupun berguna namun sering gagal menangani kerumitan yang terlibat dalam mereka bentuk keratan keluli terbentuk-sejuk yang dioptimumkan. Kajian telah meminta pembangunan kod reka bentuk yang lebih terperinci dan inklusif yang boleh menyokong jurutera dengan lebih baik dalam memanfaatkan potensi penuh keluli terbentuk-sejuk.

Davies (2000) mengkaji kemajuan terkini dalam struktur keluli terbentuk-sejuk dan memfokuskan bagaimana teknologi baharu telah membawa keratan keluli yang lebih kukuh dan kompleks serta mempertingkatkan kaedah reka bentuk untuk menangani cabaran lengkokan. Penulis menggunakan peralihan daripada model reka bentuk ringkas kepada kaedah analisis “keseluruhan keratan” yang lebih canggih, menekankan keperluan untuk kemajuan dalam model pengiraan dan kod reka bentuk untuk mengikuti perkembangan teknologi dan aplikasi dalam bidang tersebut.

Disebabkan oleh had pembuatan, keratan keluli terbentuk-sejuk biasanya dibentuk menjadi keratan saluran terbuka seperti keratan C, Z dan sesiku. Walau bagaimanapun, disebabkan konfigurasi keratan keluli terbentuk-sejuk yang serba boleh, penyelidik terdahulu telah bereksperimen dengan reka bentuk keratan keluli terbentuk-sejuk yang menghasilkan kepada keratan terbina. Keratan terbina terdiri daripada dua keratan saluran yang sama dan dicantumkan dengan pengikat atau plat tetulang. Keratan tunggal keluli terbentuk-sejuk mempunyai panjang rasuk yang terhad dan tidak mencukupi untuk menahan beban reka bentuk dan industri pembinaan menggunakan keratan terbina hibrid inventif ini. Maka, banyak kajian

telah dijalankan untuk memahami tingkah laku struktur keratan keluli terbentuk-sejuk terbina.

Penyelidikan ini memfokuskan kelakuan lengkokan dan kesan ke atas kestabilan bagi struktur-struktur keluli terbentuk-sejuk terbina untuk keratan tertutup, belakang-ke-belakang tanpa sela dan belakang-ke-belakang bersela. Jenis-jenis konfigurasi untuk setiap keratan turut dikaji untuk memahami keupayaan menggalas beban bagi struktur. Jenis dan jarak di antara pengikat serta pengukuh turut diberi perhatian untuk melihat sama ada pengikat dan pengukuh turut memberi impak terhadap prestasi keratan-keratan tersebut.

## KEUPAYAAN MENANGGUNG BEBAN KELULI TERBENTUK-SEJUK TERBINA.

Satu bidang penyelidikan yang ketara ialah pembangunan dan analisis keratan keluli terbentuk-sejuk terbina yang melibatkan penyambungan pelbagai keratan keluli berdingin-nipis untuk membentuk anggota komposit dengan sifat mekanikal yang lebih baik. Ini kerana keratan saluran terbuka sering mengalami masalah seperti lengkokan tempatan dan herotan yang boleh menjejaskan integriti strukturnya. Untuk menangani cabaran ini, penyelidik telah meneroka penggunaan keratan terbina yang direka bentuk dengan menyambungkan berbilang unsur keluli terbentuk-sejuk untuk meningkatkan kestabilan dan meningkatkan keupayaan menanggung-beban dengan mengurangkan isu seperti lengkokan tempatan, herotan dan kilasan sisi.

Manikandan & Thulasi (2019) menyiasat kelakuan keratan-I terbina saluran bibir keluli terbentuk-sejuk dengan pengukuh bebibir perantaraan dan pinggir di bawah lenturan. Pengubahsuaian reka bentuk yang dicadangkan sejajar dengan Kaedah Kekuatan Terus - *Direct Strength Method* (DSM) untuk prestasi struktur yang lebih baik dan menekankan peranan penting web dan pengukuh tepi dalam mengoptimumkan kekuatan rasuk dan rintangan lengkokan

Li et al. (2021) memberi tumpuan kepada keupayaan menanggung beban tiang keluli berbentuk-sejuk berkekuatan tinggi dengan keratan tertutup terbina. Penyelidikan penulis termasuk ujian kapasiti pembebanan yang komprehensif pada kedua-dua tiang mampat paksi dan kesipian, mendedahkan bahawa keratan tertutup terbina boleh mencapai keupayaan menanggung beban muktamad 10-20% lebih tinggi daripada keratan saluran berbibir individu. Penambahbaikan ini disebabkan oleh peningkatan pengukuh kilasan dan kesan pengurangan pada lengkokan yang disediakan oleh konfigurasi terbina

Begitu juga, ketegaran lenturan anggota binaan keluli terbentuk-sejuk telah diterokai oleh Phan & Rasmussen

(2019), yang menyerlahkan cara pengukuh tepi yang kompleks dan pengukuh berbibir perantara menyumbang kepada keupayaan menanggung-beban yang lebih baik bagi struktur ini. Mekanik anggota keluli terbentuk-sejuk terbina telah dihuraikan lagi oleh Rasmussen et al. (2020), yang meneliti pelbagai tingkah laku struktur di bawah keadaan pembebanan yang berbeza. Kerja mereka menekankan kepentingan pengukuh perantara dalam meningkatkan prestasi struktur dengan mengurangkan lengkukan tempatan dan meningkatkan kestabilan keseluruhan.

Kemajuan dalam kajian keupayaan menanggung beban terbina bagi struktur keluli bentuk-sejuk menggariskan peranan kritikal reka bentuk dan pengoptimuman inovatif dalam meningkatkan prestasi struktur. Dengan menangani cabaran ketidakstabilan lengkukan dan kilasan, kajian-kajian ini membuka jalan untuk aplikasi keluli terbentuk-sejuk yang lebih cekap dan boleh dipercayai dalam pembinaan. Penemuan kolektif daripada penyiasatan ini menyediakan rangka kerja yang teguh untuk penyelidikan dan pembangunan masa hadapan dalam bidang struktur keluli terbentuk-sejuk dalam memastikan amalan pembangunan yang lebih selamat dan tahan lama.

#### KERATAN TERBINA BERSEMUKA DAN TERTUTUP

Konfigurasi keratan bersemuka dan tertutup merentas jurnal mempamerkan beberapa persamaan ketara yang meningkatkan prestasi struktur unsur keluli terbentuk-sejuk. Setiap kajian secara konsisten memfokuskan pada penggunaan keratan terbina yang dibentuk dengan menyambungkan pelbagai profil berbentuk C atau U untuk mencipta konfigurasi tertutup. Pendekatan ini secara sejagat bertujuan untuk meningkatkan keupayaan menanggung beban dan kestabilan di bawah mampatan. Dalam semua kajian, keratan terbina telah dipasang menggunakan pengikat, seperti bolt atau skru penggerudian-sendiri dan diletakkan secara strategik di sepanjang profil bebibir untuk memastikan tindakan komposit. Matlamat utama adalah untuk meningkatkan interaksi antara komponen individu, menghasilkan tingkah laku struktur bersatu yang meningkatkan kekuatan keseluruhan dan rintangan lengkukan keratan dengan ketara. Jadual 1 menunjukkan konfigurasi keratan terbina secara bersemuka oleh setiap pengarang dalam beberapa tahun kebelakangan ini.

Kajian Craveiro et al. (2022) mengkaji tiang terbina tertutup dan mendapati tiang terbina jenis ini mempunyai rintangan lengkukan dan keupayaan beban yang lebih baik berbanding dengan keratan tunggal. Konfigurasi tertutup

berkesan menghalang lengkukan tempatan dan global, dengan itu memberikan cerapan untuk mengoptimumkan reka bentuk untuk prestasi yang lebih baik.

Ma et al. (2023) menguji rasuk dengan pendakap dan tanpa pendakap untuk menilai pengaruh lengkukan kilasan sisi pada kapasiti lenturnya yang terdiri daripada dua atau tiga bahagian C atau sigma yang disusun dalam keratan tertutup. Kajian ini mengkaji kesan nilai kelangsingan keratan rentas yang berbeza, jarak skru dan panjang rasuk ke atas kapasiti lengkukan kilasan sisi. Rasuk pendakap telah diuji untuk mengasingkan kapasiti lenturan dalam satah dan menghapuskan kesan kilasan sisi, manakala ujian tanpa pendakap dibenarkan untuk penilaian kelakuan lengkukan di bawah keadaan panjang rasuk dan jarak skru yang berbeza-beza. Kajian ini mengenal pasti mod kegagalan yang berbeza, termasuk lengkukan tempatan, herotan dan lenturan-kilasan yang berbeza-beza berdasarkan ketebalan dan konfigurasi rasuk. Hasilnya menyerlahkan bahawa lengkukan kilasan sisi memberi kesan ketara kepada kekuatan keseluruhan rasuk tanpa pendakap dengan keratan yang lebih tebal menunjukkan interaksi yang lebih tinggi antara mod lengkukan keratan dan sejagat.

Meza et al. (2020) memfokuskan pada tiang keluli terbentuk-sejuk terbina dengan pelbagai geometri dan konfigurasi pengikat. Penemuan menunjukkan bahawa tiang terbina dengan jarak pengikat optimum menunjukkan keupayaan dan kestabilan beban yang bertambah baik dengan ketara. Tingkah laku lengkukan menunjukkan bahawa jarak pengikat yang sesuai adalah penting untuk mengelakkan lengkukan tempatan dan herotan serta meningkatkan prestasi keseluruhan tiang.

Selvaraj & Madhavan (2019) meneroka gelagat lentur dan kekuatan keluli terbentuk-sejuk terbina bersambung secara bersemuka menggunakan DSM. Keputusan menunjukkan bahawa rasuk bersambung bersemuka mempamerkan keupayaan dan kestabilan menanggung beban yang bertambah baik dengan ketara. Tingkah laku lengkukan diurus dengan lebih baik di mana DSM meramalkan kekuatan dan ragam kegagalan rasuk dengan tepat. Ini menunjukkan kebolehpercayaannya untuk reka bentuk sedemikian.

Selain itu, Li et al. (2021) telah menilai tingkah laku herotan lengkukan tiang keratan tertutup keluli terbentuk-sejuk terbina. Keputusan menunjukkan bahawa menangani lengkukan herotan adalah penting untuk mengoptimumkan prestasi struktur. Reka bentuk keratan tertutup telah meningkatkan dengan ketara rintangan kilasan dan keupayaan menanggung-beban dengan berkesan mengurangkan isu lengkukan herotan.

Roy et al. (2019) pula telah menyiasat kesan jarak penyambung yang berbeza dan konfigurasi geometri pada keupayaan paksi keratan kotak keluli terbentuk-sejuk terbina. Keratan tertutup terbina telah menunjukkan

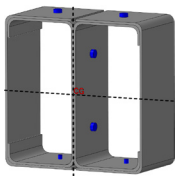
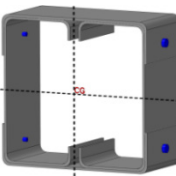
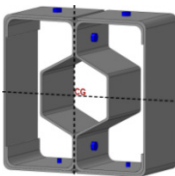
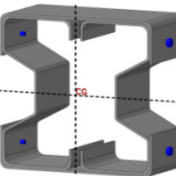
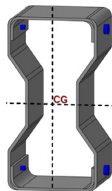
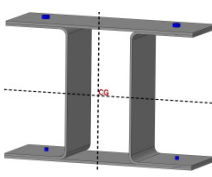
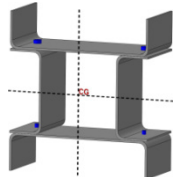
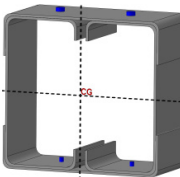
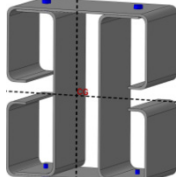
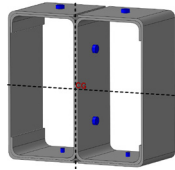
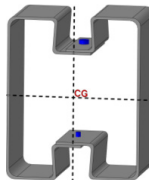
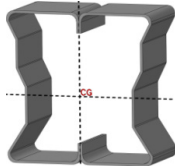
bahawa ia mempunyai keupayaan beban yang jauh lebih tinggi dan rintangan yang lebih baik terhadap lengkukan daripada profil individu. Tingkah laku lengkukan menunjukkan bahawa konfigurasi tertutup berkesan menghalang lengkukan tempatan dan sejagat serta meningkatkan kestabilan struktur keseluruhan.

Vy & Mahendran (2021) dan Dai et al. (2023) menunjukkan keratan tertutup mempunyai keupayaan beban dan kestabilan yang sangat baik. Tingkah laku lengkukan dikawal dengan baik, dengan konfigurasi tertutup menghalang lengkukan tempatan dan meningkatkan

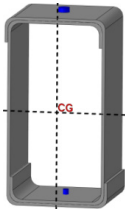
kestabilan keseluruhan struktur menjadikan keratan ini teguh di bawah mampatan.

Nie et al. (2020) mengkaji kelakuan mampatan tiang dua tertutup terbina yang diperbuat daripada empat saluran keluli terbentuk-sejuk dan mendapati bahawa tiang tertutup terbina dua kali mempunyai keupayaan menanggung-beban yang tinggi dan rintangan lengkukan yang lebih baik. Tingkah laku lengkukan menunjukkan bahawa konfigurasi dua tertutup terbina dengan berkesan meningkatkan kestabilan serta tiang menunjukkan rintangan kepada kedua-dua ragam lengkukan tempatan dan sejagat di bawah mampatan.

JADUAL 1. Konfigurasi keratan bersempena dan tertutup

Penyelidik	Tahun	Konfigurasi keratan
Craveiro et al.	2022	
		
		
		
Ma et al.	2023	
Meza et al.	2020	
		
		
		
Nie et al.	2020	
Roy et al.	2019	
Selvaraj & Madhavan	2019	

bersambung ...

Dai et al.	2023	
Li et al.	2021	
Vy & Mahendran	2021	

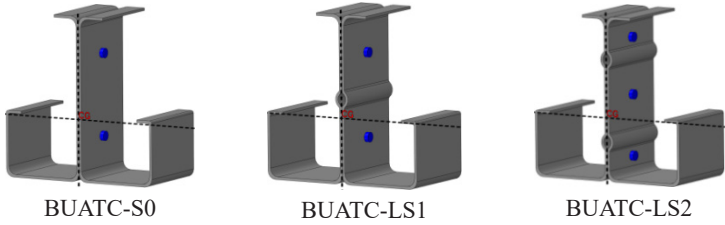
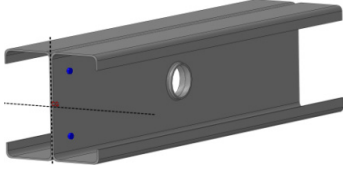
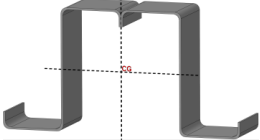
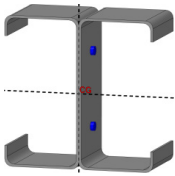
### KERATAN TERBINA BELAKANG-KE-BELAKANG TIDAK BERSELA

Konfigurasi terbina belakang-ke-belakang tidak bersela melibatkan penyambungan anggota keluli terbentuk-sejuk dalam susunan belakang-ke-belakang untuk meningkatkan prestasi strukturnya. Konfigurasi ini biasanya melibatkan penggunaan skru atau pengikat bolt pada selang tersendiri sepanjang anggota untuk memastikan tindakan komposit dan untuk mengelakkan lengkukan bebas bagi keratan individu. Kajian eksperimen telah menunjukkan bahawa konfigurasi sedemikian boleh meningkatkan keupayaan menanggung-beban dan kestabilan anggota keluli terbentuk-sejuk dengan ketara. Jarak sambungan adalah faktor kritikal, dengan jarak yang lebih dekat secara amnya memberikan kapasiti lenturan dan paksi yang lebih tinggi

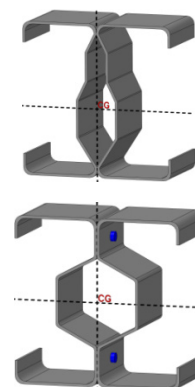
dengan mengurangkan kemungkinan lengkukan setempat dan herotan.

Model berangka dan analisis unsur terhingga telah digunakan secara meluas untuk mengesahkan penemuan eksperimen dan penyelidikan-penyelidik (Ananthi et al. 2021; Chen et al. 2021; Roy et al. 2021) mencadangkan supaya reka bentuk keratan terbina ini harus mempertimbangkan kesan kelenturan sambungan, ketidaksempurnaan geometri awal dan interaksi antara ragam lengkukan tempatan dan sejagat. Penyelidikan menunjukkan bahawa piawaian reka bentuk semasa mungkin konservatif dan kajian lanjut diperlukan untuk memperhalusi persamaan reka bentuk untuk meramalkan prestasi anggota keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang tidak bersela. Jadual 2 menunjukkan konfigurasi keratan belakang-ke-belakang tidak bersela daripada beberapa penyelidik dalam beberapa tahun kebelakangan ini.

JADUAL 2. Konfigurasi keratan belakang-ke-belakang tidak bersela

Penyelidik	Tahun	Konfigurasi keratan
Ananthi et al.	2021	
Chen et al.	2021	
Georgieva et al.	2012	
Phan & Rasmussen	2019	
Roy et al.	2021	
Vy et al.	2020:2021	

Selvaraj & Madhavan	2021
Elnagar et al.	2023
Zhang & Young	2012



Georgieva et al. (2012) menilai keupayaan mampatan tiang yang terdiri daripada keratan-Z. Penemuan eksperimen menunjukkan persetujuan yang baik dengan ramalan berasaskan kod, mengesahkan bahawa piawaian reka bentuk semasa boleh dipercayai untuk jenis tiang ini. Penulis lebih lanjut mengkaji kelakuan anggota dua-Z terbina di bawah beban lentur dan mampatan. Eksperimen mendedahkan bahawa anggota ini mempunyai peningkatan keupayaan yang ketara disebabkan oleh konfigurasi terbina yang berkesan mengurangkan isu lengkokan tempatan.

Konfigurasi biasa keratan-I terbina dikaji oleh semua pengarang ini dan penemuan untuk keratan tersebut diterangkan. Phan & Rasmussen (2019) menyimpulkan bahawa ketegaran lenturan meningkat dengan bilangan dan kekakuan sambungan, menonjolkan kepentingan perincian sambungan dalam reka bentuk anggota terbina. Vy et al. (2020) menunjukkan bahawa lengkokan tempatan dan herotan adalah ragam kegagalan yang utama dan mencadangkan pengubahsuaian dalam reka bentuk untuk mengambil kira fenomena lengkokan ini. Roy et al. (2021) mengesahkan melalui kaedah unsur terhingga bahawa pengaruh kritikal terhadap prestasi lenturan adalah jarak sambungan. Satu lagi kajian oleh Vy et al. (2022) menyerlahkan bahawa DSM menyediakan ramalan yang boleh dipercayai untuk keupayaan mampatan, terutamanya apabila mempertimbangkan interaksi lengkokan tempatan-sejagat. Penambahan pengukuh ke dalam keluli terbentuk-sejuk keratan-I terbina dapat meningkatkan ketara keupayaan mampatan keratan tersebut dengan melalui peningkatan rintangan lengkokan dan kestabilan keseluruhan (Ananthi et al. 2021; Zhang & Young 2012).

Selain itu, Chen et al. (2021) pula membandingkan keupayaan momen untuk konfigurasi lubang yang berbeza dalam saluran belakang-ke-belakang. Keputusan menunjukkan bahawa lubang yang dikakukan tepi keratan

memberikan keupayaan momen tertinggi disebabkan oleh rintangan lengkokan specimen tersebut yang lebih baik dan diikuti oleh lubang yang tidak dikakukan serta keratan berbibir biasa,

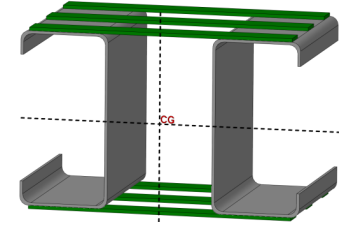
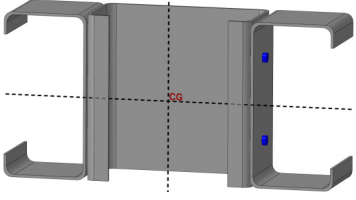
Selvaraj & Madhavan (2021) membangunkan garis panduan reka bentuk untuk rasuk keluli terbentuk-sejuk belakang-ke-belakang bersambung untuk keratan sigma. Penemuan ini menekankan keperluan untuk model ramalan yang tepat untuk pengukuhan dan kekuatan lenturan serta mencadangkan persamaan reka bentuk baharu untuk meningkatkan ketepatan piawaian sedia ada.

Secara keseluruhannya, penyelidikan ini secara kolektif menekankan keperluan untuk perincian sambungan yang tepat dan potensi untuk peraturan reka bentuk yang dioptimumkan untuk memanfaatkan sepenuhnya kelebihan struktur konfigurasi keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang tidak bersela.

## KERATAN TERBINA BELAKANG-KE-BELAKANG BERSELA

Konfigurasi keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang bersela yang disambungkan dengan saluran C atau plat tetulang telah dikaji secara meluas untuk memahami kelakuannya di bawah pelbagai keadaan pembebanan. Keratan ini lazimnya melibatkan dua saluran berbibir yang sama diletakkan secara berhadapan dengan sela di antaranya. Sambungan antara saluran ini dicapai menggunakan saluran pautan perantaraan, plat tetulang atau jahitan yang diskrukan atau diselak melalui web saluran belakang-ke-belakang seperti ditunjukkan dalam Jadual 3.

JADUAL 3. Konfigurasi keratan belakang-ke-belakang bersela

Penyelidik	Tahun	Jenis peruang	Konfigurasi keratan
Dabaon et al	2015	Plat tetulang	
Mohan et al.	2022		
Rondal & Niazi	1990		
Sangeetha et al.	2022		
Anbarasu & Dar.	2020	C-jahitan/ web	
Crisan et al.	2014		
Roy et al.	2018, 2019, 2020		

Penggunaan plat tetulang menyambungkan dua saluran keluli berbentuk sejuk yang diletakkan di belakang, memberikan kestabilan terhadap lengkokan dan mengekalkan integriti keratan terbina di bawah beban paksi. Kehadiran plat tetulang membantu mengagihkan beban yang dikenakan secara sama rata antara komponen, menghalang ubah bentuk kilasan sisi dan meningkatkan kapasiti galas beban keseluruhan tiang. Kajian mendapati bahawa konfigurasi, jarak dan kedudukan plat ini mempengaruhi mod kegagalan dengan ketara dengan lengkokan tempatan sering berlaku di antara plat tetulang, menunjukkan kesannya terhadap kestabilan dan kekuatan tiang. Hasilnya menggariskan keperluan untuk pertimbangan reka bentuk yang teliti bagi plat tetulang dalam tiang terbina untuk memastikan pemindahan beban yang berkesan dan prestasi struktur yang optimum (Dabaon et al. 2015; Mohan et al. 2022; Sangeetha et al. 2022).

Anbarasu & Dar (2020) mendapati bahawa menambah peruang melintang meningkatkan kestabilan dan kekuatan tiang keluli terbentuk-sejuk dengan ketara serta menyerlahkan keperluan untuk kemas kini reka bentuk. Roy et al. (2019; 2020) selanjutnya menunjukkan bahawa sela dalam keratan keluli terbentuk-sejuk terbina meningkatkan prestasi lenturan mereka. Mereka mengesyorkan perubahan reka bentuk untuk meramal dengan tepat kekuatan lenturan keratan ini. Kajian-kajian ini mencadangkan bahawa keratan keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang bersela berprestasi lebih baik daripada piawai semasa, terutamanya dari segi kekuatan paksi dan lenturan. Piawai reka bentuk diperlukan dengan kemas kini untuk mencerminkan penambahbaikan ini

Dalam kajian yang membandingkan keratan keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang bersela dengan kaedah dan konfigurasi sambungan yang berlainan,

impak terhadap tingkah laku anggota berbeza dengan ketara merentas penyelidikan. Rondal & Niazi (1990) menjalankan penyelidikan eksperimen ke atas tiang dengan plat tetulang dan jahitan-C. Mereka mendapati bahawa plat tetulang menyediakan sambungan yang lebih tegar, menghasilkan kestabilan yang lebih baik dan keupayaan beban yang lebih tinggi daripada jahitan-C. Crisan et al. (2014) mengkaji penentuan formula reka bentuk untuk anggota keluli terbentuk-sejuk belakang-ke-belakang bersela yang disambungkan dengan bolt dan jahitan. Penemuan mereka menunjukkan bahawa walaupun jahitan-C menyediakan sambungan yang lebih fleksibel, keupayaan beban muktamad adalah lebih rendah daripada konfigurasi menggunakan plat tetulang atau guset. Simulasi berangka kajian tersebut dalam persetujuan yang baik dengan keputusan eksperimen, mengukuhkan prestasi yang lebih tinggi bagi konfigurasi plat tetulang dari segi keupayaan beban dan rintangan lengkokan. Vijayanand & Anbarasu (2017) mengesahkan bahawa plat tetulang meningkatkan integriti struktur di bawah pemampatan paksi lebih baik daripada jahitan-C yang menawarkan kemudahan pemasangan tetapi kapasiti beban yang lebih rendah.

Secara keseluruhan merentasi kajian ini, plat tetulang secara konsisten menunjukkan prestasi unggul dari segi keupayaan beban dan kestabilan. Walau bagaimanapun, jahitan-C menawarkan faedah praktikal dari segi kemudahan pemasangan dan fleksibiliti semasa pembinaan. Mereka mengagihkan beban dengan lebih sekata tetapi mempunyai keupayaan beban muktamad yang lebih rendah bergantung pada bilangan jahitan. Peruang dengan jahitan-C sesuai sebagai keratan belakang-ke-belakang bersela terbina untuk sistem kekuda kerana jahitan-C berguna untuk faedah pemasangan praktikalnya.



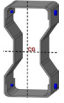



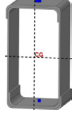
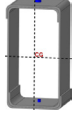

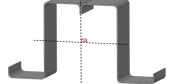
## RAGAM LENGKOKAN

Tingkah laku lengkokan bagi keratan terbina secara bersemuka (tertutup), belakang ke belakang tidak bersela dan belakang-ke-belakang bersela berkongsi beberapa persamaan terutamanya dari segi ragam lengkokan tempatan, herotan dan sejagat.

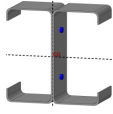
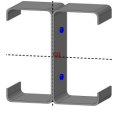
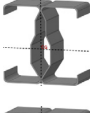
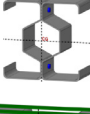
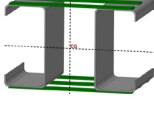
Untuk keratan bersemuka, lengkokan tempatan sering berlaku disebabkan kekangan geometri keratan tertutup. Lengkokan herotan menjadi ketara apabila jarak skru yang

besar menjejaskan tindakan komposit dan mengurangkan keupayaan menanggung-beban. Apabila jarak antara pengikat lebih kecil daripada separuh panjang gelombang lengkokan tempatan dapat menghasilkan tindakan komposit lebih tinggi dan memaksimumkan keupayaan menanggung-beban anggota terbina. Interaksi ragam lengkokan tempatan dan herotan adalah penting untuk menentukan kestabilan keseluruhan keratan tertutup (Vy et al. 2021).

JADUAL 4. Ragam lengkokan semua konfigurasi keluli terbentuk-sejuk terbina

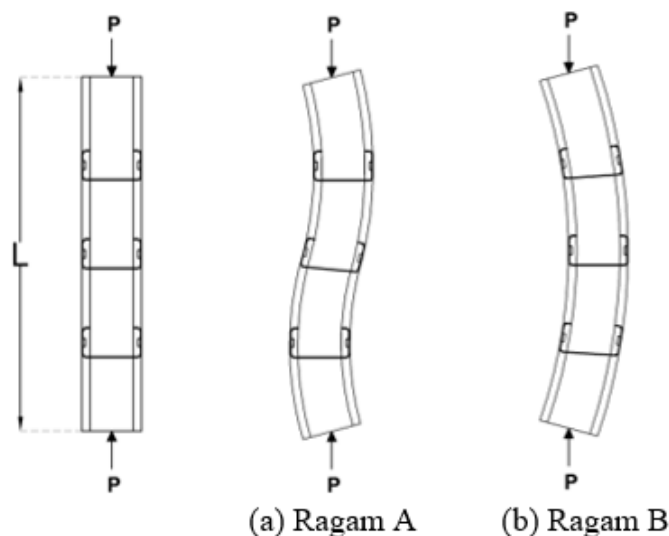
Jenis konfigurasi	Penyelidik	Tahun	Jenis keratan	Jenis beban	Ragam lengkokan
Keratan bersemuka dan tertutup	Craveiro et al.	2022	R-2C+2U S-2C+2U R-2Σ+2U S-2Σ+2U (Rujuk JADUAL 1)	Mampatan	Tempatan, sejagat, herotan
	Ma et al.	2023		Lenturan	Tempatan, herotan, lenturan-kilasan
	Meza et al.	2020	SC1 SC2 SC3 SC4 (Rujuk JADUAL 1)	Mampatan	Tempatan, herotan
	Nie et al.	2020		Mampatan	Tempatan, sejagat
	Selvaraj & Madhavan	2019		Lenturan	Tempatan, sejagat
	Roy et al.	2019		Mampatan	Tempatan, herotan, kilasan
	Li et al.	2021		Mampatan	Tempatan, sejagat
Keratan belakang-ke-belakang tidak bersela	Vy & Mahendran	2021		Mampatan	Tempatan, sejagat
	Ananthi et al.	2021	BUATC-S0 BUATC-LS1 BUATC-LS2 (Rujuk Jadual 2)	Mampatan	Tempatan, lentur
	Chen et al.	2021		Lenturan	Tempatan, herotan, lentur
	Georgieva et al.	2012		Mampatan	Tempatan, herotan, kilasan-lentur

bersambung ...

	Phan & Rasmussen	2019		Lenturan	Tempatan, lentur
	Roy et al.	2021		Lenturan	Tempatan, herotan, lentur
		2021		Mampatan	Tempatan, herotan
	Vy et al.	2022		Lenturan	Lentur, lentur tempatan, lentur-herotan tempatan.
	Selvaraj & Madhavan	2021		Lenturan	Herotan
	Zhang & Young	2012		Lenturan	Tempatan, herotan, lentur
Keratan belakang-ke-belakang bersela	Dabaon et al.	2015		Mampatan	Tempatan, herotan
	Mohan et al.	2022		Mampatan	Tempatan, herotan
	Rondal & Niazi	1990		Mampatan	Tempatan, sejagat, herotan
	Anbarasu & Dar	2020		Mampatan	Tempatan, lentur
	Roy et al.	2018 2020		Mampatan Lenturan	Ragam A dan B (Rujuk RAJAH 1) Setempat, herotan,

Keratan belakang-ke-belakang tidak bersela seperti keratan keluli C atau Z terbentuk-sejuk, mempamerkan tingkah laku lengkokan yang serupa. Lengkokan tempatan dipengaruhi oleh sifat keratan berdingin-nipis, manakala lengkokan herotan dipengaruhi oleh kehadiran dan reka bentuk pengukuh. Interaksi antara ragam lengkokan adalah rumit dan selalunya mengakibatkan gabungan ragam kegagalan. Pengukuh tepi dan web dalam keratan terbuka membantu dalam meningkatkan kestabilan dan keupayaan beban, serta menangani kelemahan kepada lengkokan tempatan dan herotan (Selvaraj & Madhavan 2019).

Keratan belakang-ke-belakang bersela terdiri daripada dua anggota keluli terbentuk-sejuk yang disambungkan pada selang jarak, mempamerkan kedua-dua ragam lengkokan tempatan dan sejagat. Lengkokan kilasan-lentur amat ketara dalam keratan ini dan dipengaruhi dengan ketara oleh ketidaksempurnaan awal sejagat dan jarak antara sambungan. Lengkokan herotan kekal sebagai faktor kritikal dan mengurangkan jarak antara sambungan tidak semestinya meningkatkan rintangan anggota disebabkan kesan herotan yang berterusan. Tingkah laku keratan ini dicirikan oleh interaksi kompleks ragam kilasan, lentur dan herotan (Li et al. 2020).



RAJAH 1. Ragam lengkokan keseluruhan keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang bersela

Rajah 1 menunjukkan ragam lengkukan anggota keluli terbentuk-sejuk. Dalam tiang terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang bersela, lengkukan Ragam A biasanya berlaku dalam tiang yang lebih pendek dan pertengahan, dicirikan oleh ubah bentuk sudut seperti engsel yang berbeza kira-kira satu pertiga keratan atas tiang. Ubah bentuk ini menunjukkan lenturan dan putaran setempat, di mana keratan atas tiang mengalami ubah bentuk plastik yang ketara. Sebaliknya, lengkukan Ragam B diperhatikan dalam tiang yang lebih langsing dan melibatkan corak lengkukan seragam dengan ubah bentuk utama berlaku berhampiran ketinggian pertengahan tiang. Ragam ini mencadangkan gelagat lengkukan lentur sejagat di mana keseluruhan panjang tiang

Kajian berbeza pada keratan-Z belakang-ke-belakang menyerlahkan perbezaan dalam ragam lengkukan berbanding dengan kajian lain. Dalam penyiasatan ini, lengkukan kilasan-lentur adalah ragam kegagalan utama dan dipengaruhi dengan ketara oleh pergerakan sisi di keratan atas dan jarak antara sambungan. Ubah bentuk kilasan ini lebih ketara berbanding keratan lain, di mana lengkukan tempatan biasanya dominan. Kajian ini menekankan kesan unik ubah bentuk kilasan dalam konfigurasi belakang-ke-belakang menunjukkan bahawa tingkah laku lengkukan tidak begitu lazim dalam keratan tertutup atau terbuka disambungkan tanpa lengkukan setempat atau herotan yang ketara (Fratamico et al. 2018)

Kajian tentang ragam lengkukan bagi keratan bersemuka (tertutup), belakang-ke-belakang tidak bersela dan belakang-ke-belakang bersela bagi tiang keluli terbentuk-sejuk telah menunjukkan bahawa keratan bersemuka lebih kuat terhadap lengkukan, dengan garis panduan reka bentuk sedia ada yang selalunya konservatif. Saluran belakang-ke-belakang tidak bersela terutamanya saluran biasa, lazimnya gagal disebabkan oleh lengkukan tempatan. Bagaimanapun penambahan pengukuh boleh meningkatkan kekuatannya tetapi juga berisiko gagal dalam lengkukan herotan. keratan belakang-ke-belakang bersela terutamanya yang mempunyai jarak, lebih terdedah kepada lengkukan kilasan sisi dan kekuatannya banyak dipengaruhi oleh jarak pengikat.

Jadual 4 membentangkan ringkasan ragam lengkukan untuk semua jenis keratan. Secara keseluruhan, walaupun piawaian reka bentuk semasa cenderung konservatif, garis panduan yang lebih khusus diperlukan untuk mengambil kira tingkah laku yang berbeza bagi setiap jenis keratan.

## NISBAH KELANGSINGAN

Dalam kajian tingkah laku lengkukan pelbagai tiang keluli terbentuk-sejuk, nisbah kelangsingan adalah parameter kritikal yang mempengaruhi ragam lengkukan dan

keupayaan menanggung-beban. Nisbah kelangsingan ( $\lambda$ ) biasanya ditakrifkan oleh formula (1) dengan  $L$  ialah panjang berkesan tiang dan  $r$  ialah jejari kilasan.

$$\lambda = \frac{L}{r} \quad (1)$$

Craviero et al. (2022) memerhatikan bahawa apabila nisbah kelangsingan spesimen meningkat, kekuatan maksimum di bawah mampatan paksi sepusat berkurangan dengan ketara dan spesimen cenderung untuk mempamerkan peralihan dalam ragam lengkukan daripada lengkukan tempatan kepada lengkukan lentur sejagat. Sementara itu, ragam perantaraan termasuk herotan lengkukan menjadi lebih menonjol. Khususnya, nisbah kelangsingan yang lebih rendah selalunya menghasilkan lengkukan tempatan, manakala nisbah kelangsingan yang lebih tinggi menghasilkan ragam lengkukan gabungan yang mungkin termasuk lengkukan tempatan, herotan dan lentur. Selain itu, penulis mencadangkan nisbah kelangsingan yang diubah suai mengambil kira interaksi antara komponen keratan, selalunya dinyatakan sebagai (2) di mana  $N_{cr}$  ialah beban genting,  $A$  ialah luas keratan rentas dan  $f_y$  ialah kekuatan alah.

$$\lambda_{tertutup} = \sqrt{\frac{N_{cr}}{Af_y}} \quad (2)$$

Dalam kes keratan belakang-ke-belakang tidak bersela, nisbah kelangsingan dilaraskan untuk mengambil kira kesan gabungan komponen yang disambungkan, biasanya diubah suai sebagai (3) di mana  $r_1$  dan  $r_2$  ialah jejari kilasan komponen individu.

$$\lambda_{belakang-ke-belakang} = \sqrt{\frac{L^2}{r_1^2 + r_2^2}} \quad (3)$$

Tingkah laku lengkukan keratan ini banyak dipengaruhi oleh interaksi antara anggota badan yang bersambung. Pada nisbah kelangsingan yang lebih rendah, lengkukan tempatan adalah berleluasa disebabkan oleh kecenderungan anggota individu terhadap lengkukan. Walau bagaimanapun, apabila nisbah kelangsingan meningkat, kelakuan lengkukan keseluruhan dikawal oleh gabungan pengukuh dan kelangsingan berkesan bagi keseluruhan keratan. Ini mengakibatkan peralihan ke arah ragam lengkukan lentur dan herotan. Jejari kilasan berkesan dalam keratan ini

memainkan peranan penting dalam menentukan beban lengkohan kritikal, yang dipengaruhi oleh interaksi dan pengagihan beban antara komponen yang disambungkan (Vy & Mahendran 2021).

Untuk keratan belakang-ke-belakang bersela, ragam lengkohan yang diperhatikan berbeza dengan panjang tiang. Puntung dan tiang pendek biasanya mempamerkan lengkohan tempatan, manakala tiang perantaraan mempamerkan bentuk lengkohan sudut. tiang langsing didominasi oleh lengkohan keseluruhan dengan ubah bentuk setempat yang ketara berhampiran ketinggian pertengahan tiang (Anbarasu & Dar 2020). Nisbah kelangsingan yang diubah suai untuk keratan ini diberikan oleh (4), di mana  $r_{eff}$  ialah jejari kilasan berkesan yang menyumbang kepada sela.

$$\lambda_{terjarak} = \sqrt{\frac{L^2}{r_{eff}^2}} \quad (4)$$

Bagi anggota tetulang, kajian eksperimen dan analisis oleh Vijayanand & Anbarasu (2022) menunjukkan bahawa ragam lengkohan berkembang dengan nisbah kelangsingan yang semakin meningkat. Pada mulanya, lengkohan tempatan diperhatikan namun apabila nisbah kelangsingan meningkat, gabungan ragam lengkohan tempatan, herotan

dan lentur diperhatikan. Gabungan ini menjadi lebih ketara pada nisbah kelangsingan yang lebih tinggi. Nisbah kelangsingan yang diubah suai untuk anggota tetulang diwakili oleh (5), di mana  $r_x$  dan  $r_y$  ialah jejari kilasan dalam paksi utama.

$$\lambda_{beroti} = \sqrt{\frac{L^2}{(r_x^2 + r_y^2)/2}} \quad (5)$$

Secara keseluruhannya, kajian parametrik pada pelbagai keratan terbina menggariskan kepentingan nisbah kelangsingan dalam menentukan ragam kegagalan. Peralihan daripada ragam tempatan kepada herotan dan akhirnya kepada ragam lengkohan sejagat dipengaruhi oleh kedua-dua nisbah kelangsingan dan geometri keratan rentas spesifik spesimen. Nisbah kelangsingan ialah faktor penting dalam menentukan kelakuan lengkohan dan keupayaan menanggung-beban tiang keluli terbentuk-sejuk dan nisbah kelangsingan yang lebih tinggi biasanya membawa kepada kekuatan dan peralihan yang lebih rendah daripada ragam lengkohan tempatan kepada sejagat. Ini menekankan keperluan untuk pertimbangan yang teliti tentang kelangsingan dalam reka bentuk dan analisis struktur keluli berbentuk-sejuk. Jadual 5 menyenaraikan ragam lengkohan bagi panjang tiang yang berbeza berkenaan dengan nisbah kelangsingannya.

JADUAL 5. Ragam lengkohan disebabkan nisbah kelangsingan

Jenis konfigurasi	Penyelidik	Tahun	Nilai nisbah kelangsingan	Ragam melengkakan
Keratan bersejaga dan tertutup	Roy et al.	2019	Puntung: 10.9 - 17.7 Pendek: 49.7 - 62.8 Pertengahan: 106.8 - 130.5 Langsing: 165.5 - 187.5	Tempatan Tempatan Tempatan + sejagat Sejagat
	Selvaraj & Madhavan	2019	$\lambda_c < 0.3$ : $\lambda_c > 0.4$ $0.3 \leq \lambda_c \leq 0.4$	Tempatan Sejagat Tempatan + sejagat
Keratan belakang-ke-belakang tidak bersela	Ananthi et al.	2021	$\lambda < 70$ $70 \leq \lambda \leq 120$ $\lambda > 70$	Tempatan + herotan + lentur Herotan + lentur Herotan + lentur
Keratan belakang-ke-belakang bersela	Anbarasu & Dar	2020	Pendek: $\lambda < 75$ Pertengahan: $75 \leq \lambda \leq 125$ Langsing: $\lambda > 125$	Tempatan Tempatan + sejagat sejagat + lentur
	Roy et al.	2019	$\lambda < 0.5$ $1.0 \leq \lambda \leq 0.5$ $\lambda > 1.0$	Tempatan Tempatan + herotan Sejagat
	Mohan et al.	2022	$\lambda < 30$ $\lambda > 30$	Tempatan + lentur Tempatan + herotan + Lentur
	Rondal & Niazi	1990	$\lambda=54.3$ $\lambda=78.6$ $\lambda=102.9$	Tempatan Tempatan + herotan Sejagat + lentur + kilasan-lentur

## PENGIKAT

Dalam keratan keluli terbentuk-sejuk terbina, pelbagai pengikat memainkan peranan penting dalam menyambungkan keratan individu dan mempengaruhi tingkah laku struktur keseluruhan dan kecekapan konfigurasi tersebut.

Untuk keratan bersemuka atau tertutup, skru kebanyakannya digunakan untuk menyambungkan saluran berbibir dan tidak berbibir. Skru ini diletakkan secara strategik di sepanjang anggota memastikan sambungan ketat yang meningkatkan tindakan komposit dan mengurangkan kesan lengkokan tempatan. Penggunaan skru dengan cara ini memastikan saluran bertindak bersama-sama sebagai satu unit, dengan itu meningkatkan keupayaan menanggung-beban dan kestabilan keratan (Craveiro et al. 2022).

Bolt, skru dan kadangkala kimpalan digunakan di keratan belakang-ke-belakang tidak bersela untuk menyambungkan kedua-dua saluran melalui webnya. Fratamico et al. (2018) menyatakan bahawa kaedah penyambungan jenis ini membentuk pemasangan yang teguh yang menentang lengkokan bebas anggota individu. Pengikat diposisikan supaya ia memastikan kedua-dua saluran bertindak serentak, dengan itu memberikan peningkatan kekuatan dan kekakuan pada keratan terbina. Konfigurasi ini amat berkesan dalam aplikasi di mana beban mampatan tinggi dijangkakan. Untuk keratan belakang-ke-belakang bersela, pengikat seperti skru atau bolt digunakan untuk menyambungkan bibir saluran. Di samping itu, elemen penyambung web tambahan sering digunakan untuk mengekalkan jarak antara saluran dan meningkatkan kestabilan keseluruhan keratan. Peletakan tepat pengikat ini adalah penting untuk memastikan saluran kekal sejajar dan jarak yang betul untuk mengekalkan integriti struktur dan prestasi keratan terbina di bawah beban.

Zaharia & Dubina (2006) menyiasat kelakuan sambungan bolt dalam kekuda keluli berbentuk-sejuk, memfokuskan pada kekukuhan sambungan dan kesannya terhadap reka bentuk kekuda. Eksperimen pada sambungan pusingan tunggal dan subhimpunan kekuda digunakan untuk membangunkan dan mengesahkan model teori untuk kekukuhan sambungan. Kajian ini menggariskan kepentingan menggabungkan kekukuhan sambungan dalam reka bentuk kekuda kerana pengaruhnya pada panjang lengkokan anggota web dan prestasi struktur keseluruhan. Formula yang dicadangkan untuk mengira kekukuhan putaran sambungan menunjukkan persetujuan yang baik dengan data eksperimen, menekankan kepentingan kedua-dua kekukuhan putaran dan paksi dalam kestabilan dan ketegaran kekuda.

Bohara et al. (2024) menyiasat prestasi sambungan rasuk-ke-rasuk keluli terbentuk-sejuk antara pembawa lantai dan gelegar lantai dengan menggunakan sudut klip diskru di bawah beban tegangan dan ricih. Melalui eksperimen berskala penuh, mod kegagalan, tingkah laku anjakan beban dan kekuatan muktamad sambungan ini telah dicirikan. Hasilnya dibandingkan dengan ramalan daripada persamaan reka bentuk piawai. Eksperimen mendedahkan bahawa di bawah beban tegangan, mod kegagalan utama ialah penarikan skru pada kaki penambat sudut klip, dicirikan oleh keretakan ulir dalaman. Untuk beban ricih, dua mod kegagalan yang berbeza telah diperhatikan iaitu patah skru dan lengkokan ricih kaki julur pada sudut klip. Kajian itu juga menyatakan bahawa kapasiti beban meningkat dengan bilangan skru yang lebih tinggi pada bahagian pembawa lantai statik. Perbandingan dengan ramalan reka bentuk piawai menunjukkan percanggahan, kerana persamaan meramalkan mod kegagalan tegangan dengan betul, tetapi gagal untuk mengambil kira lengkokan ricih yang diperhatikan. Penemuan ini menyerlahkan keperluan untuk penyelidikan lanjut untuk meningkatkan piawaian reka bentuk semasa, terutamanya untuk menangani lengkokan ricih dalam sambungan sudut klip diskru, dengan itu memberikan pandangan penting untuk menambah baik amalan reka bentuk CFS.

Anggota tetulang menggunakan plat tetulang yang disambungkan dengan bolt atau skru pada selang jarak yang tetap sepanjang panjang anggota. Plat tetulang ini memberikan sokongan sisi kepada anggota utama dan mengurangkan nisbah kelangsingan berkesan tiang terbina, dengan itu meningkatkan rintangan lengkokannya (Phan & Rasmussen 2019). Jarak dan kekukuhan pengikat dalam anggota tetulang direka bentuk dengan teliti untuk memastikan komponen individu berfungsi bersama dengan berkesan untuk menahan beban yang dikenakan. Konfigurasi ini biasanya digunakan dalam aplikasi di mana tiang langsing yang panjang tertakluk kepada daya mampatan yang ketara.

Secara keseluruhannya, pilihan dan susunan pengikat dalam konfigurasi ini adalah penting untuk menentukan keupayaan menanggung beban, kestabilan dan rintangan kepada lengkokan keratan keluli terbentuk-sejuk terbina. Penggunaan skru, bolt dan kimpalan yang berkesan memastikan keratan individu bertindak sebagai unit padu, dengan itu meningkatkan prestasi dan keselamatan sistem struktur.

## KESAN JARAK PENGIKAT

Kesan jarak pengikat pada prestasi anggota keluli terbentuk-sejuk terbina yang berbeza termasuk keratan

tertutup, keratan belakang-ke-belakang tidak bersela, keratan belakang-ke-belakang bersela dan anggota tetulang telah dikaji secara meluas dalam beberapa tahun kebelakangan ini.

Untuk keratan tertutup, Li et al. (2020) menunjukkan bahawa peningkatan jarak pengikat menghasilkan pengurangan ketara dalam kekuatan paksi dengan pengurangan sehingga 19.42% bergantung pada panjang tiang dan konfigurasi. Kesimpulan ini diperolehi daripada kedua-dua model FEM dan ujian eksperimen yang menunjukkan bahawa jarak yang lebih luas mengurangkan keberkesanan perkongsian beban antara komponen, dengan itu menjejaskan integriti struktur keseluruhan.

Kajian Roy et al. (2021) mengenai keratan belakang-ke-belakang tidak bersela mendedahkan bahawa meningkatkan jarak pengikat mengurangkan tindakan komposit dan meningkatkan kemungkinan lengkukan tempatan, merendahkan ketegaran lentur dan keupayaan paksi dengan ketara. Keratan ini telah diuji di bawah pelbagai jarak pengikat dan diperhatikan bahawa jarak yang lebih luas membawa kepada lengkukan bebas bagi saluran individu mengurangkan kestabilan keseluruhan keratan terbina. Sementara itu, untuk belakang-ke-belakang bersela, analisis eksperimen dan FEM menunjukkan bahawa mengurangkan jarak pengikat meningkatkan kekuatan lentur dan kestabilan keseluruhan tiang. Kajian khusus telah menyerlahkan kepentingan meminimumkan jarak untuk mengelakkan lekuk bebas saluran. Kehadiran sela antara saluran memerlukan jarak pengikat yang lebih rapat untuk mengekalkan prestasi struktur dan mengelakkan lengkukan pramatang.

Penyelidikan Dabaon et al. (2015) ke atas anggota tetulang menunjukkan bahawa jarak pengikat tetulang adalah kritikal dalam mengawal tingkah laku lengkukan dan meningkatkan prestasi struktur. Jarak tetulang yang rapat memastikan pengagihan beban yang lebih baik dan peningkatan kekuatan paksi. Kajian mengenai tiang bertetulang dengan jarak pengikat yang berbeza mendedahkan bahawa pengikat jarak rapat membantu mengekalkan integriti tiang di bawah beban paksi dengan menyediakan kekangan yang lebih baik terhadap lengkukan. Prestasi yang lebih baik ini disebabkan oleh peningkatan kekukuhan dan pengurangan panjang berkesan antara pengikat.

Kajian ini secara kolektif menekankan peranan penting jarak pengikat dalam reka bentuk dan prestasi pelbagai anggota keluli terbentuk-sejuk terbina di bawah keadaan pembebanan yang berbeza. Jarak pengikat yang dioptimumkan dengan betul bukan sahaja meningkatkan keupayaan menganggu beban tetapi juga memastikan kestabilan dan daya tahan terhadap lengkukan, dengan itu memanjangkan hayat perkhidmatan dan keselamatan struktur.

## PENGUKUH

Penambahan pengukuh kepada struktur keluli terbentuk-sejuk telah menjadi subjek penyelidikan yang meluas, menonjolkan peranan kritikal mereka dalam meningkatkan prestasi struktur bahan yang ringan dan menjimatkan. Keluli berbentuk-sejuk yang terkenal dengan nisbah kekuatan-ke-berat yang unggul, kemudahan pembinaan dan serba boleh semakin digunakan dalam pelbagai aplikasi struktur daripada bangunan kediaman kepada rangka kerja industri berskala besar.

Di sebalik kelebihan ini, anggota keluli berbentuk-sejuk terdedah kepada pelbagai bentuk lengkukan termasuk lengkukan tempatan, herotan dan sejagat disebabkan sifat berdinging-nipis. Penggabungan pengukuh telah muncul sebagai strategi yang berkesan untuk mengurangkan isu lengkukan dan meningkatkan dengan ketara keupayaan menanggung-beban dan kestabilan keseluruhan struktur keluli berbentuk-sejuk. Kajian terbaru telah menunjukkan bahawa kemasukan pelbagai jenis pengukuh seperti web, pinggir dan pengukuh perantaraan boleh membawa kepada peningkatan yang ketara dalam prestasi paksi dan lenturan. Qadir et al. (2020) dan Elnagar et al. (2023) meneroka peningkatan prestasi struktur dalam keratan saluran keluli terbentuk-sejuk dengan mengoptimalkan geometri dan pengaruh kesan kerja sejuk. Penyelidikan mendapati bahawa penempatan strategik dan reka bentuk pengukuh meningkatkan rintangan lengkukan dan kekuatan muktamad keratan keluli dengan ketara. Pengenaln pengukuh lebih dekat dengan persimpangan bebibir-web dan konfigurasi geometri yang optimum menghasilkan rintangan yang dipertingkatkan terhadap herotan lengkukan. Selain itu, kajian menunjukkan bahawa kesan kerja sejuk yang meningkatkan kekuatan bahan ketika lenturan disebabkan proses pembentukan mampu meningkatkan lagi prestasi keratan terutamanya apabila pengukuh diletakkan dengan bersesuaian. DSM digunakan untuk membandingkan keputusan, menonjolkan bahagian yang dioptimumkan menawar peningkatan kekuatan yang ketara berbanding reka bentuk konvensional. Ia menekankan kepentingan geometri dan kerja sejuk dalam meningkatkan prestasi keluli struktur. Pendekatan komprehensif ini menunjukkan kepentingan untuk mempertimbangkan geometri struktur dan kesan pembuatan dalam reka bentuk optimum keratan saluran keluli terbentuk-sejuk, memastikan kekuatan maksimum sambil mengekalkan ciri ringan. Penemuan ini adalah penting untuk memajukan penggunaan keluli terbentuk-sejuk dalam pembinaan bangunan, terutamanya dalam aplikasi yang memerlukan kecekapan struktur yang tinggi dan kestabilan di bawah beban lenturan.

Zhang & Young (2012) menjalankan ujian mampatan pada tiang keratan tertutup terbina dengan pengukuh web

menunjukkan bahawa pengukuh ini meningkatkan ketara kupayaan paksi tiang dengan menyediakan sokongan sisi tambahan dan mengurangkan kelangsingan web, yang seterusnya mengurangkan keupayaan lengkokan tempatan dan herotan. Phan & Rasmussen (2019) meneroka ketegaran lenturan anggota keluli terbentuk-sejuk terbina menunjukkan bahawa pengukuh perantaraan dengan ketara meningkatkan ketegaran lentur dan keupayaan lenturan anggota, sekali gus meningkatkan struktur keseluruhannya. Begitu juga, Roy et al. (2019) menyiasat keupayaan paksi keratan tertutup terbina dan membuat kesimpulan bahawa pengukuh membawa kepada peningkatan ketara dalam keupayaan menampung-beban dan prestasi yang dipertingkatkan di bawah pemampatan paksi.

Selvaraj S. & Madhavan M. (2018, 2019) menjalankan satu siri kajian tentang kelakuan rasuk keluli terbentuk-sejuk terbina dan panel stad dengan pengukuh. Keputusan eksperimen mereka menunjukkan bahawa pengukuh secara berkesan melambatkan permulaan lengkokan tempatan dan meningkatkan pengagihan beban merentas keratan, membawa kepada kekuatan muktamad yang lebih tinggi dan prestasi yang lebih baik di bawah lenturan. Fratamico et al. (2018) mengkaji lengkokan sejagat dan gelagat runtuh tiang keluli terbentuk-sejuk terbina dengan pelbagai susunan pengukuh. Penyelidikan mereka menunjukkan bahawa pengukuh memainkan peranan penting dalam meningkatkan rintangan lengkokan sejagat dan kestabilan keseluruhan terutamanya dalam senario nisbah kelangsingan yang tinggi.

Selain itu, Wang & Young (2018) menyiasat kelakuan keratan terbina dengan pengukuh perantaraan di bawah lenturan, mendedahkan bahawa pengukuh berkesan meningkatkan ketegaran dan rintangan keratan terhadap ubah bentuk lentur dan lengkokan tempatan. Penemuan ini disokong oleh kedua-dua ujian eksperimen dan analisis unsur terhingga, mengesahkan kebolehppercayaan pengukuh dalam meningkatkan prestasi struktur. Ananthi et al. (2021) membentangkan keputusan baharu yang terdiri daripada ujian mampatan paksi dan analisis unsur terhingga kupayaan paksi tiang keratan sudut berbentuk-T keluli terbentuk-sejuk terbina belakang-ke-belakang dengan dan tanpa pengaku perantaraan. Kajian mereka mendapati bahawa keupayaan paksi untuk tiang dengan dua pengukuh di kaki yang lebih panjang dan satu pengukuh di kaki yang lebih pendek meningkat sebanyak purata 20% berbanding dengan tiang tanpa pengukuh perantaraan. Kajian itu mengesahkan prestasi DSM untuk konfigurasi sedemikian menunjukkan bahawa DSM boleh dipercayai dan konservatif sebanyak 14% secara purata.

Kajian-kajian ini secara kolektif menggariskan kepentingan menggabungkan pengukuh dalam struktur keluli terbentuk-sejuk untuk meningkatkan keupayaan paksi dan lenturnya, mengurangkan lengkokan setempat

dan herotan, dan memberikan kestabilan tambahan terhadap pelbagai ragam kegagalan menjadikan pengukuh sebagai pertimbangan penting dalam reka bentuk dan pengoptimuman struktur keluli terbentuk-sejuk.

## JURANG PENYELIDIKAN SEMASA DAN CADANGAN HALA TUJU MASA DEPAN

Walaupun terbukti bahawa banyak penyelidikan mengenai tingkah laku lengkokan terhadap struktur CFS terbina, namun terdapat jurang penyelidikan yang perlu ditangani berdasarkan kajian literasi dan dicadangkan sebagai kerja masa depan.

1. Keratan tertutup menawarkan kilasan yang lebih tinggi tetapi lebih terdedah kepada lengkokan tempatan. Sementara itu, walaupun keratan belakang-ke-belakang tidak bersela mempunyai kapasiti ricih yang sedikit lebih baik, struktur masih mempunyai rintangan lengkokan yang rendah disebabkan sentuhan bibir-ke-bibir. Keratan tertutup dan belakang-ke-belakang tidak bersela mempunyai had seperti pengurangan fleksibiliti dalam pelarasan reka bentuk, kesukaran dalam fabrikasi dan pemasangan. Had ini menjadikan keratan tersebut kurang sesuai dengan perubahan beban. Keratan ini juga mempunyai rintangan kilasan yang lebih rendah dan lebih mencabar untuk diselenggara dan diperiksa kerana sifatnya yang tertutup yang boleh memerangkap kelembapan dan menghasilkan kakisan.
2. Konfigurasi keratan belakang-ke-belakang bersela mengurangkan risiko lengkokan tempatan, membantu mengagihkan tegasan dengan lebih sekata dan meningkatkan kestabilan keseluruhan. Pemisahan ini meningkatkan rintangan kilasan dan kekuatan lenturan, membolehkan setiap keratan menahan lengkokan dengan lebih berkesan di bawah beban mampatan dan lenturan. Prestasi lenturan boleh dipertingkatkan dengan jenis dan jarak pengikat yang sesuai. Keratan ini mengoptimumkan penggunaan bahan dengan memberikan nisbah kekuatan-kepada-berat yang lebih tinggi daripada keratan tertutup atau tidak bersela. Reka bentuk ini amat berfaedah dalam keadaan pembebanan yang kompleks kerana ia membenarkan keratan bertindak balas secara bebas kepada komponen tegasan yang berbeza dan meningkatkan prestasi dalam beban paksi, lenturan dan ricih.
3. Cadangan kerja masa depan ialah menjalankan kajian dengan mengaplikasi keratan terbina belakang-ke-belakang bersela ke dalam struktur kekuda. Ini adalah disebabkan fleksibiliti sambungan anggota keratan

tersebut dan kebolehan rintangan sisi yang tinggi yang sesuai dalam struktur kekuda. Selain itu, disyorkan menggunakan sambungan bolt panjang daripada skru penggerudian-sendiri untuk memudahkan pemasangan dan dipisahkan selari dengan amalan mampan. Eksperimen ujian tolak-keluar turut dicadangkan untuk kajian sambungan bolt bagi konfigurasi keratan belakang-ke-belakang bersela

## KESIMPULAN

Penerokaan dan analisis keratan keluli terbentuk-sejuk terbina termasuk konfigurasi bersemuka, belakang-ke-belakang tidak bersela dan belakang-ke-belakang bersela telah mendedahkan kemajuan yang ketara dalam prestasi struktur dan kestabilan. Penyepaduan pelbagai unsur keluli terbentuk-sejuk untuk membentuk keratan terbina telah terbukti dapat mengurangkan isu seperti lengkukan tempatan, herotan dan sejagat yang wujud dalam anggota keluli terbentuk-sejuk berdingin nipis.

Keratan terbina belakang-ke-belakang bersela menawarkan beberapa kelebihan berbanding keratan tertutup dan belakang-ke-belakang tanpa sela, terutamanya disebabkan oleh prestasi struktur yang dipertingkatkan dengan meningkatkan rintangan lengkukan, kapasiti galas beban dan rintangan sisi untuk struktur yang lebih panjang.

## PENGHARGAAN

Penyelidikan ini menerima sokongan kewangan daripada geran universiti penyelidikan GUP-2022-029 yang ditajakan oleh Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Pengajian Tinggi (KPT) Malaysia.

## PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

## RUJUKAN

- Ananthi, G.B.G., Deepak, M.S., Roy, K. & Lim, J.B.P. 2021. Influence of intermediate stiffeners on the axial capacity of cold-formed steel back-to-back built-up unequal angle sections. *Structures* 32: 827–848.
- Anbarasu, M. & Adil Dar, M. 2020. Axial capacity of CFS built-up columns comprising of lipped channels with spacers: Nonlinear response and design. *Engineering Structures* 213.
- Anbarasu, M. & Venkatesan, M. 2019a. Behaviour of cold-formed steel built-up I-section columns composed of four U-profiles. *Advances in Structural Engineering* 22(3): 613–625.
- Anbarasu, M. & Venkatesan, M. 2019b. Behaviour of cold-formed steel built-up I-section columns composed of four U-profiles. *Advances in Structural Engineering* 22(3): 613–625.
- Bohara, R.P., Le, T., Thai, H.T. & Ngo, T. 2024. August. An experimental study of cold-formed steel connections with screwed clip angle under tension and shear loads. *In Structures* 66: 106908.
- Becque, J. 2019. Optimization of cold-formed steel products: achievements, challenges and opportunities *Ce/Papers* 3(3–4): 211–218.
- Chen, B., Roy, K., Fang, Z., Uzzaman, A., Raftery, G. & Lim, J.B.P. 2021. Moment capacity of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes, and plain webs. *Engineering Structures* 235.
- Craveiro, H.D., Rahnavard, R., Laím, L., Simões, R.A. & Santiago, A. 2022. Buckling behavior of closed built-up cold-formed steel columns under compression. *Thin-Walled Structures* 179.
- Crisan, A., Ungureanu, V. & Dubina, D. 2014. Calibration of design formula for buckling strength of built-up back-to-back cold-formed steel members in compression. *Proc., ICTWS*
- Dabaon, M., Ellobody, E. & Ramzy, K. 2015. Experimental investigation of built-up cold-formed steel section battened columns. *Thin-Walled Structures* 92: 137–145.
- Dai, Y., Roy, K., Fang, Z., Raftery, G.M. & Lim, J.B. 2023. Structural performance of cold-formed steel face-to-face built-up channel sections under axial compression at high temperatures through finite element modelling. *Buildings*, 13(2): 305.
- Dar, M.A., Subramanian, N., Baniya, M.G., Anbarasu, M., Carvalho, H. & Dar, A.R. 2021. Development of an efficient steel truss system using CFS sections: a comparative study with a hot-rolled steel truss. *International Journal of Structural Integrity* 12(6): 894–903.
- Davies, J.M. 2000. Recent research advances in cold-formed steel structures. *Journal of constructional steel research* 55(1-3): 267–288.
- Elnagar, M., El-Taly, B.A., Elmenshawy, D.N. & Hekal, G.M. 2023. Study the Structural Behavior of Back-to-Back Cold-Formed Steel Columns with Different Types of Web Stiffeners. *Mansoura Engineering Journal* 48(6): 22–26.
- Fratamico, D.C., Torabian, S., Zhao, X., Rasmussen, K.J.R. & Schafer, B.W. 2018. Experiments on the global buckling and collapse of built-up cold-formed steel columns. *Journal of Constructional Steel Research* 144: 65–80.



- Georgieva, I., Schueremans, L. & Pyl, L. 2012. Composed columns from cold-formed steel Z-profiles: Experiments and code-based predictions of the overall compression capacity. *Engineering Structures* 37: 125–134.
- Georgieva, I., Schueremans, L., Pyl, L. & Vandewalle, L. 2012. Experimental investigation of built-up double-Z members in bending and compression. *Thin-Walled Structures* 53: 48–57.
- Hancock, G.J. 2003. Cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research* 59(4): 473–487.
- Harini, B., Lingeswaran, N., Perumal, K. & Aravinthan, K. 2020. Sustainable design of cold formed steel. In *Materials Today: Proceedings* 33: 881–885
- Johnston, R.P.D., McGrath, T., Nanukuttan, S., Lim, J.B.P., Soutsos, M., Chiang, M.C., Masood, R. & Rahman, M.A. 2018. 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.
- Li, Y., Zhou, T., Zhang, L., Ding, J. & Zhang, X. 2021. Distortional buckling behavior of cold-formed steel built-up closed section columns. *Thin-Walled Structures* 166: 108069.
- Ma, D., Rasmussen, K. & Zhang, H. 2023. Lateral-torsional buckling experiments of built-up section CFS beams. *ce/papers* 6(3-4): 1947-1952.
- Manikandan, P. & Thulasi, M. 2019. Investigation on cold-formed steel lipped channel built-up I beam with intermediate web stiffener. *International Journal of Advanced Structural Engineering* 11(1): 97–107.
- Maxineasa, S.G., Isopescu, D.N., Baciuc, I.R., Lupu, M.L. & Dragan, T.C. 2020. Thermal analysis of a structure made by using cold formed steel sections. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 789(1): 012039
- Meza, F.J., Becque, J. & Hajirasouliha, I. 2020. Experimental study of the cross-sectional capacity of cold-formed steel built-up columns. *Thin-Walled Structures* 155: 106958
- Mohan, M., Ramachandran, A., Amran, M. & Borovkov, A. 2022. Determination of Buckling Behavior of Web-Stiffened Cold-Formed Steel Built-Up Column under Axial Compression. *Materials* 15(9): 2968
- Nie, S., Zhou, T., Eatherton, M.R., Li, J. & Zhang, Y. 2020. Compressive behavior of built-up double-box columns consisting of four cold-formed steel channels. *Engineering Structures* 222: 111133
- Parastesh, H., Hajirasouliha, I., Taji, H. & Bagheri Sabbagh, A. 2019. Shape optimization of cold-formed steel beam-columns with practical and manufacturing constraints. *Journal of Constructional Steel Research* 155: 249–259.
- Parastesh, H., Mohammad Mojtabaei, S., Taji, H., Hajirasouliha, I. & Bagheri Sabbagh, A. 2021. Constrained optimization of anti-symmetric cold-formed steel beam-column sections. *Engineering Structures* 228: 111452
- Phan, D.K. & Rasmussen, K.J.R. 2019a. Flexural rigidity of cold-formed steel built-up members. *Thin-Walled Structures* 140: 438–449.
- Phan, D.K. & Rasmussen, K.J.R. 2019b. Flexural rigidity of cold-formed steel built-up members. *Thin-Walled Structures* 140: 438–449.
- Qadir, S.J., Nguyen, V.B., Hajirasouliha, I., Cartwright, B. & English, M.A. 2020. Optimal design of cold roll formed steel channel sections under bending considering both geometry and cold work effects. *Thin-Walled Structures* 157: 107020
- Rasmussen, K.J.R., Khezri, M., Schafer, B.W. & Zhang, H. 2020. The mechanics of built-up cold-formed steel members. *Thin-Walled Structures* 154: 106756
- Rehman, M. & Sakalle, R. 2019. Finite elemental analysis of industrial structure using cold formed steel. In *AIP Conference Proceedings* 2158(1)
- Rondal, J. & Niazi, M. 1990. Stability of built-up beams and columns with thin-walled members. *Journal of Constructional Steel Research* 16(4): 329-335.
- Roy, K., Lau, H.H., Ting, T.C.H., Chen, B. & Lim, J.B.P. 2021. Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: Experiments and finite element modelling. *Structures* 29: 235–253.
- Roy, K., Lau, H.H. & Lim, J.B.P. 2019. Numerical investigations on the axial capacity of back-to-back gapped built-up cold-formed stainless steel channels. *Advances in Structural Engineering* 22(10): 2289–2310.
- Roy, K., Lau, H.H., Ting, T.C.H., Chen, B. & Lim, J.B.P. 2020. Flexural capacity of gapped built-up cold-formed steel channel sections including web stiffeners. *Journal of Constructional Steel Research* 172: 106154
- Roy, K., Mohammadjani, C. & Lim, J.B.P. 2019. Experimental and numerical investigation into the behaviour of face-to-face built-up cold-formed steel channel sections under compression. *Thin-Walled Structures* 134: 291–309.
- Roy, K., Ting, T.C.H., Lau, H.H. & Lim, J.B.P. 2018. Nonlinear behaviour of back-to-back gapped built-up cold-formed steel channel sections under compression. *Journal of Constructional Steel Research* 147: 257–276.
- Roy, K., Ting, T.C.H., Lau, H.H. & Lim, J.B.P. 2019. Experimental and numerical investigations on the axial capacity of cold-formed steel built-up box sections. *Journal of Constructional Steel Research* 160: 411–427.

- Sangeetha, P., Vaishnavi, M., Modhagapriyan, A. & Rajarajan, T. 2022. Effect of batten plates on the unlipped channel CFS built-up column under axial compression. *Materials Today: Proceedings* 66: 1796-1804.
- 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.
- Selvaraj, S. & Madhavan, M. 2021. Design of Cold-Formed Steel Back-To-Back Connected Built-up Beams. *Journal of Constructional Steel Research* 181: 106623
- Sim, Y.L., Putuhena, F., Ling, L.P. & Baharun, A. 2015. Assessing the Contribution Factors for the Enhancement of Green Building Index (GBI) in the Malaysian Construction Industry. *Jurnal Kejuruteraan* 27: 49-56.
- Taufik, S., Baharom, S. & Xiao, R.Y. 2011. Predicted behaviour of partially restrained connection with cold formed high strength steel by 3D finite element modelling. *In Advanced Materials Research*. 250: 1734–1743.
- Vijayanand, S. & Anbarasu, M. 2017. Effect of Spacers on Ultimate Strength and Behavior of Cold-Formed Steel Built-up Columns. In *Procedia Engineering*. 173: 1423–1430.
- Vy, S.T. & Mahendran, M. 2021. Behaviour and design of slender built-up nested cold-formed steel compression members. *Engineering Structures* 241: 112446
- Vy, S.T. & Mahendran, M. 2022. DSM design of fixed-ended slender built-up back-to-back cold-formed steel compression members. *Journal of Constructional Steel Research*. 189: 107053
- Vy, S.T., Mahendran, M. & Sivaprakasam, T. 2021. Built-up back-to-back cold-formed steel compression members failing by local and distortional buckling. *Thin-Walled Structures* 159: 107224
- 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.
- Zaharia, R. & Dubina, D. 2006. Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses. *Journal of Constructional Steel Research* 62(3): 240–249.
- Zhang, J.H. & Young, B. 2012. Compression tests of cold-formed steel I-shaped open sections with edge and web stiffeners. *Thin-Walled Structures* 52: 1–11.