

RUANG PRESENTASI BALE PASEBAN I

KAMIS, 27 OKTOBER 2022

No	KODE PAPER	JUDUL	AUTHOR	WAKTU			DURASI
-	-	REGISTRASI PRESENTER	-	12:50	-	13:00	00:10
1	ST23	ANALISIS KINERJA HOLLOW CORE SLAB PRECAST DENGAN VARIASI BENTUK LUBANG MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA	Sunarjo Leman	13:00	-	13:15	00:15
2	ST28	MENGENAL METODE-METODE PERHITUNGAN KEKUATAN PENAMPANG ELEMEN STRUKTUR BAJA CANAI DINGIN (COLD-FORMED)	Andy Prabowo	13:15	-	13:30	00:15
3	ST21	ANALISIS KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG DENGAN GFRP U-WRAPPING MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA	Sunarjo Leman	13:30	-	13:45	00:15
4	ST22	Analisis Kinerja Yield-Link Sambungan Baja Terprakualifikasi Simpson Strong-Tie Strong Frame dengan Metode Elemen Hingga	Christopher Kevin Sidharta	13:45	-	14:00	00:15
5	ST20	ANALISIS KERUSAKAN STRUKTUR PELAT ATAP : STUDI KASUS GEDUNG E UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH KALIMANTAN TIMUR	Anang Akbar Arha	14:00	-	14:15	00:15
6	ST26	APLIKASI VEKTOR BEBAN PENENTU LOKASI KERUSAKAN STRUKTUR PADA STRUKTUR PORTAL RANGKA RUANG	Richard Frans	14:15	-	14:30	00:15
7	ST27	Evaluasi Reliabilitas Jembatan Standar Rangka Baja Akibat Beban Lalu Lintas Hasil Pengukuran B-WIM	Widi Nugraha	14:30	-	14:45	00:15
8	ST32	PERILAKU MEKANIK PANEL KOMPOSIT BETON RINGAN (LIGHTWEIGHT CONCRETE) PREFABRIKASI PADA PEMBEBAAN AXIAL	Fatriady MR	14:45	-	15:00	00:15

LETTER OF ACCEPTANCE

Denpasar, 12 Oktober 2022

Kepada Yth. Bapak/Ibu/Sdr/i
Pemakalah KoNTekS ke-16
Di tempat

Dengan hormat,

Bersama surat ini, kami panitia Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS) ke-16 menginformasikan bahwa makalah Bapak/Ibu/Sdr/i dengan :

ID Makalah : -
Pemakalah : Andy Prabowo
Institusi : Universitas Tarumanagara
Judul : MENGENAL METODE-METODE PERHITUNGAN KEKUATAN PENAMPANG ELEMEN STRUKTUR BAJA CANAI DINGIN (COLD-FORMED)

Telah direview dan dinyatakan diterima dengan status **Accepted with Revision** untuk dipresentasikan dalam Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS) ke-16 di Hotel Grand Inna Kuta Bali (Master Rundown terlampir). Dihimbau kepada pemakalah untuk segera mengirimkan revisi paper paling lambat 15 Oktober 2022 untuk memperoleh Nomer ID Makalah.

Informasi Technical Meeting akan disampaikan pada Whatsapp Group Peserta KoNTekS ke-16. Bagi yang belum tergabung, bisa melalui link berikut : <https://bit.ly/PESERTA-KONTEKS16>.

Demikian informasi ini kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terimakasih.

Ketua Panitia KoNTekS ke-16,


KoNTekS16

Dr. Ir. Putu Ika Wahyuni, S.T, M.Si, M.T.,IPM
NIDN : 0809097101

INVITATION LETTER

Denpasar, 12 Oktober 2022

Kepada Yth. Bapak/Ibu/Sdr/i
Andy Prabowo

Di tempat

Dengan hormat,

Bersama surat ini, kami panitia Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTeks) ke-16 mengundang Bapak/Ibu/Sdr/i Andy Prabowo dari Universitas Tarumanagara untuk mempresentasikan makalahnya yang berjudul MENGENAL METODE-METODE PERHITUNGAN KEKUATAN PENAMPANG ELEMEN STRUKTUR BAJA CANAI DINGIN (COLD-FORMED) pada Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTeks) ke-16 yang diselenggarakan pada:

Hari, Tanggal : Kamis - Jumat, 27 Oktober 2022 - 28 Oktober 2022

Waktu : Sesuai Master Rundown (terlampir)

Lokasi : Hotel Grand Inna Kuta, Bali

Informasi Technical Meeting akan disampaikan pada Whatsapp Group Peserta KoNTeks ke-16. Bagi yang belum tergabung, bisa melalui link berikut : <https://bit.ly/PESERTA-KONTEKS16>.

Demikian undangan ini kami sampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terimakasih.

Ketua Panitia KoNTeks ke-16,



Dr. Ir. Putu Ika Wahyuni, S.T, M.Si, M.T.,IPM
NIDN : 0809097101



SURAT TUGAS

NOMOR: 931-D/4571/FT-UNTAR/XI/2022

1.	Jenis penugasan	Urusan Akademik
2.	Pejabat berwenang pemberi tugas	Dekan Fakultas Teknik
3.	Nama yang ditugaskan	Andy Prabowo, S.T., M.T., Ph.D.
4.	Posisi (kapasitas) sebagai	Dosen Tetap
5.	Jabatan Struktural/JJA	AA
6.	Kegiatan yang dihadiri	Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTeks) ke-16 dan Rapat Koordinasi Badan Musyawarah Pendidikan Tinggi Teknik Sipil Seluruh Indonesia (BMPTTSSI)
7.	Institusi Penyelenggara	KoNTeKs 16
8.	Tempat Berangkat & Kegiatan a. Tempat berangkat b. Tempat kegiatan (lokasi tujuan)	-Rumah - Grand Inna Kuta - Bali
9.	a. Tanggal berangkat b. Tanggal kembali bekerja	27 Oktober 2022 (Kamis) 28 Oktober 2022 (Jumat)
10.	Posisi subyek dalam kegiatan	Peserta
11.	Alat transportasi yang digunakan	Pesawat
12.	Pembebanan anggaran	Prodi Sarjana Teknik Sipil
Laporan kegiatan dan keuangan wajib diserahkan paling lambat 1 (satu) minggu setelah kegiatan perjalanan dinas berakhir (Pasal 13 PUT No. 057 tentang Perjalanan Dinas)		

25 Oktober 2022

Dekan



Harto Tanujaya, S.T., M.T., Ph.D.

Tembusan:

1. Kaprodi. Sarjana Teknik Sipil
2. Kepala Bagian Tata Usaha
3. Kasubag. Keuangan/Personalia

Lembaga

- Pembelajaran
- Kemahasiswaan dan Alumni
- Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat
- Penjaminan Mutu dan Sumber Daya
- Sistem Informasi dan Database

Fakultas

- Ekonomi dan Bisnis
- Hukum
- Teknik
- Kedokteran
- Psikologi
- Teknologi Informasi
- Seni Rupa dan Desain
- Ilmu Komunikasi
- Program Pascasarjana



ORGANIZE BY :



SUPPORTED BY :



KoNTeks16

Resilience of Construction Industry In Post - Pandemic Era

SERTIFIKAT PEMAKALAH

Diberikan kepada :

Andy Prabowo

atas partisipasinya pada kegiatan Konferensi Nasional Teknik Sipil ke-16

Dengan Judul Paper

MENGENAL METODE-METODE PERHITUNGAN KEKUATAN PENAMPANG ELEMEN STRUKTUR BAJA CANAI DINGIN (COLD-FORMED)

Bali, 28 Oktober 2022

KoNTeks16
Konferensi Nasional Teknik Sipil Ke - 16

DR. IR. PUTU IKA WAHYUNI, S.T., M.SI., M.T.
KoNTeks 16th Chairman Committee

MENGENAL METODE-METODE PERHITUNGAN KEKUATAN PENAMPANG ELEMEN STRUKTUR BAJA CANAI DINGIN (COLD-FORMED)

Andy Prabowo¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No. 1 Jakarta
e-mail: andy.prabowo@ft.untar.ac.id

ABSTRAK

Dalam menghitung kekuatan elemen penampang kolom dan balok pada struktur baja canai dingin (*cold-formed steel*) dikenal beberapa istilah seperti metode lebar efektif (*effective width method*), metode kekuatan langsung (*direct strength method*), dan yang terbaru yaitu metode kekuatan menerus (*continuous strength method*). Ketiga metode ini memiliki fokus pada desain penampang elemen struktur akibat dikenai aksi tertentu (tekan atau aksial) dengan pendekatan yang berbeda. Metode pertama mengandalkan properti penampang tereduksi untuk menghitung kapasitas yang dimiliki, sedangkan metode kedua dapat lebih mudah diselesaikan menggunakan program bantu untuk menghitung kekuatan elastik tekuk (*elastic buckling analysis*) berbasis *finite strip analysis*, dan metode ketiga memerlukan model konstitutif material yang disederhanakan serta mengoptimalkan kemampuan deformasi dari elemen struktur untuk menghitung kekuatan penampang. Makalah ini bertujuan untuk membahas ketiga metode desain kekuatan elemen pada struktur baja canai dingin dengan tujuan memberikan pemahaman yang tepat agar insinyur struktur dapat melakukan perhitungan kekuatan struktur baja canai dingin dengan akurat dan relatif cepat. Selain itu, makalah ini bertujuan untuk memberi saran dan pendapat yang dapat dipertimbangkan ketika melakukan revisi peraturan baja canai dingin di Indonesia yang saat ini relatif usang dibandingkan dengan peraturan asing sejenis.

Kata kunci: *effective width method* (EWM), *direct strength method* (DSM), *continuous strength method* (CSM)

1. PENDAHULUAN

Elemen struktur baja canai dingin banyak digunakan sebagai komponen struktur ringan pada bangunan struktur baja, seperti pada gording penutup atap metal and balok penumpu dinding metal. Profil yang sering digunakan pada bagian struktur tersebut umumnya berbentuk profil kanal (*channel profile*) atau profil berongga (*hollow profile*). Kedua jenis profil tersebut dapat dibentuk dari lembaran plat baja dalam kondisi suhu ruangan baik dengan cara ditekuk menggunakan mesin penekan (*press-braked method*) atau dengan menggunakan seperangkat mesin penggulung (*rolled forming method*). Karena memiliki metode fabrikasi yang berbeda dengan struktur baja *hot-rolled*, desain elemen struktur baja canai dingin dibedakan dan memiliki peraturan/spesifikasi tersendiri. Saat ini, peraturan yang berlaku di Indonesia untuk menghitung kekuatan elemen struktur baja canai dingin yaitu menggunakan SNI 7971:2013, yang mengadopsi peraturan asing AS/NZS 4600:2005 dan AISI S100-07.

Kedua peraturan asing yang disebutkan digunakan khusus untuk melakukan perhitungan elemen struktur baja canai dingin di Australia (AS/NZS 4600:2005) dan di Amerika Serikat (AISI S100-07). Peraturan AS/NZS 4600 akan selalu diperbaharui mengikuti AISI S100. Saat ini kedua peraturan tersebut sudah tidak berlaku karena telah digantikan dengan edisi yang lebih baru, yaitu AS/NZS 4600:2018 dan AISI S100-2016. Pada kedua peraturan terbaru ini terdapat beberapa pemutakhiran pada metode desain elemen struktur seperti kolom dan balok, seperti telah digunakannya metode desain kekuatan langsung (*direct strength method*) secara resmi, yang selanjutnya dalam tulisan ini akan disebut sebagai metode DSM, seperti juga metode lebar efektif (*effective width method*), disingkat menjadi EWM.

Metode EWM dikembangkan oleh Prof. George Winter pada tahun 1947 melalui penelitiannya di Cornell University. Sejarah perkembangan metode EWM dapat dilihat lebih lanjut pada Yu et al. (2020). Metode DSM, yang telah dikembangkan oleh beberapa ahli semenjak kemunculan resminya di tahun 2004, telah diakomodasi sebagai metode alternatif untuk perhitungan kekuatan penampang pada peraturan AISI (Schafer, 2008). Metode ini relatif lebih sederhana dalam proses perhitungan manual apabila menggunakan program bantu yang berbasis *finite strip analysis* untuk melakukan analisis tekuk elastik (*elastic buckling analysis*). Perkembangan terakhir pada proses perhitungan berbasis metode DSM dapat dilihat pada (Schafer, 2019).

Metode yang lebih baru dari DSM dalam melakukan analisis kekuatan penampang pada struktur baja canai dingin diperkenalkan oleh Prof. Leroy Gardner dari Imperial College London (Gardner, 2008). Awalnya metode CSM ini dipakai untuk memberikan alternatif dalam melakukan analisis penampang kekuatan profil baja nirkarat (*stainless steel*) canai dingin. Metode ini tidak menggunakan klasifikasi penampang yang umum digunakan pada perhitungan elemen baja *hot-rolled* yang dikaitkan dengan perilaku tekuk mana yang menentukan. Metode CSM memiliki 1 kurva dasar yang berasal dari hubungan antara rasio regangan ultimit ($\epsilon_{csm}/\epsilon_y$) dan kelangsingan pelat penyusun profil elemen

struktur (λ_p).

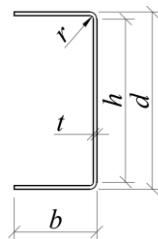
Ketiga metode EWM, DSM, dan CSM telah diadopsi pada draft peraturan baja nirkarat canai dingin (ASCE, 2021). Namun demikian, untuk peraturan baja karbon canai dingin yang terbaru saat ini (AS/NZS 4600:2018 dan AISI S100-2016) hanya mengadopsi dua metode, yaitu EWM dan DSM ditambah dengan metode kekuatan cadangan inelastis (*inelastic reserve strength*) yang tidak dibahas pada makalah ini dikarenakan metode ini hanya dapat dipakai pada penampang stocky yang kekuatannya di atas kekuatan leleh. Pada perkembangan peraturan selanjutnya, tidak menutup kemungkinan apabila metode CSM dapat diakomodir oleh peraturan baja karbon canai dingin. Metode DSM dan CSM membantu insinyur struktur dalam melakukan perhitungan kapasitas penampang baja canai dingin dengan lebih optimal dan relatif lebih cepat dibandingkan dengan metode EWM (Schafer, 2008; Gardner, 2008).

Bagian selanjutnya dari makalah ini menampilkan persamaan-persamaan yang dipakai pada ketiga metode tersebut. Persamaan-persamaan tersebut berlaku untuk penampang kanal dan penampang berongga, baik yang berbentuk persegi (*square hollow section*), persegi panjang (*rectangular hollow section*), dan lingkaran (*circular hollow section*). Penampang I, siku, dan bentuk lainnya tidak menjadi fokus karena relatif jarang dipakai untuk struktur penutup atap dan dinding pada bangunan baja. Selain itu, yang menjadi fokus pada makalah ini yaitu desain penampang terhadap aksi tunggal baik akibat tekan (kolom) maupun lentur (balok) pada sumbu kuat. Desain penampang akibat aksi kombinasi (tekan dan lentur), dapat didekati secara konservatif dengan meminjam persamaan interaksi yang diberikan oleh SNI 7971:2013.

Menurut ketentuan pada pasal E dan F AISI (2016), kekuatan maksimal penampang baik kolom maupun balok tanpa lubang ditentukan berdasarkan nilai terkecil dari kapasitas: (1) kuat leleh dan atau tekuk global (*yielding and global buckling*); (2) kuat tekuk lokal (*local buckling*) berinteraksi dengan kuat leleh dan tekuk global; dan (3) kuat tekuk distorsi (*distortional buckling*). Perbedaan dalam menghitung masing-masing kekuatan batas dari ketiga metode akan diuraikan berikut ini.

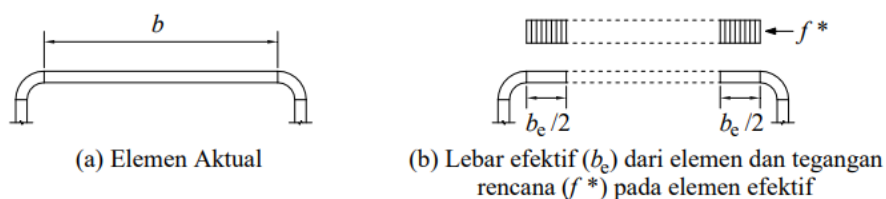
2. METODE EWM

Pada prinsipnya, metode EWM dipakai dengan memanfaatkan kekuatan pasca tekuk pada setiap elemen pelat (Yu et al., 2020) yang membentuk sebuah profil baja canai dingin. Sebagai contoh, profil kanal pada Gambar 1 terdiri dari 2 pelat sayap (*unstiffened element*) dan 1 pelat badan (*stiffened element*). Besar tegangan tekuk yang dialami pelat badan dan sayap bervariasi di sepanjang pelat sehingga terjadi distribusi tegangan tekuk yang tidak merata pada penampang pelat. Akibatnya penampang pelat yang lebih dekat dengan tumpuan akan mengalami tekuk yang lebih besar, sedangkan yang jauh dari tumpuan akan mengalami tegangan yang lebih kecil. Tumpuan ini berada pada daerah pertemuan antara pelat sayap dan badan. Apabila lebar pelat sangat besar seperti pada pelat langsing, maka tegangan di daerah pelat yang relatif jauh dari tumpuan diabaikan sehingga bagian pelat yang mengalami tegangan tekuk yang diabaikan menjadi tidak diperhitungkan untuk kekuatan penampang secara keseluruhan. Dengan demikian, lebar bagian pelat yang diperhitungkan tadi disebut sebagai lebar efektif, b_e (*effective width*).

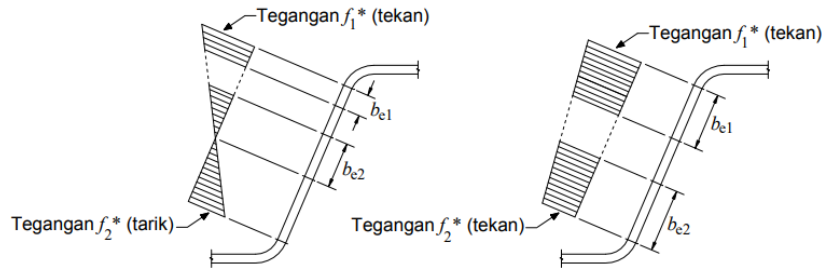


Gambar 1. Penampang profil kanal

Akibat adanya pengurangan lebar ukuran penampang dari b menjadi b_e (seperti terlihat pada Gambar 2) properti penampang perlu dihitung ulang, seperti inersia (I), modulus elastis (S), dan modulus plastis (Z) penampang. Perhitungan ulang ini melibatkan persamaan-persamaan lebar efektif yang diberikan oleh peraturan, seperti yang tertulis pada appendix 1 AISI (2016). Persamaan-persamaan tersebut dikumpulkan pada Tabel 1 untuk menganalisis lebar efektif dari profil kanal dan profil berongga yang mengalami gaya aksial tekan dan momen lentur.



Gambar 2. Ilustrasi lebar efektif (b_e) (diambil dari SNI 7971:2013)



Gambar 3. Elemen badan mengalami tegangan bergradien (SNI 7971:2013)

Berdasarkan perhitungan b_e dari Tabel 1, maka dapat disimpulkan apabila metode EWM sangatlah tepat untuk menghitung kekuatan penampang untuk menghindari tekuk lokal (P_{nl} atau M_{nl}) karena menggunakan nilai tegangan tekuk lokal (F_{cr1}). Besarnya nilai F_{cr1} bergantung pada nilai “k” yang merupakan koefisien pengali tegangan tekuk kritis yang dialami sebuah elemen plat yang berasal dari Timoshenko and Gere (1961). Nilai “k” tersebut tidak memperhitungkan interaksi antar element plat yang menyusun sebuah profil, maka F_{cr1} menjadi sangat konservatif.

Tabel 1. Persamaan-persamaan lebar efektif (b_e)

Elemen penampang	Kolom	Balok
Plat Sayap	$b_e = \rho \cdot b_f$; $b_f = b - r - t$ (1) $\rho = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$ (2) dimana $\lambda = \sqrt{\frac{f}{F_{cr1}}}$; $\lambda \leq 0.673 \rightarrow \rho = 1$ (3) Nilai f berdasarkan hasil iterasi dan untuk iterasi pertama bisa dianggap $f = f_y$. Dan $F_{cr1} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2$; (4) $k = 0.43$ untuk profil kanal, dan $k = 4$ untuk profil berongga.	Perhitungan b_e hanya dilakukan untuk bagian sayap yang mengalami tekan. Untuk bagian sayap yang mengalami tarik maka keseluruhan bagian efektif dalam memikul tarik. Nilai b_e dihitung menggunakan persamaan (1) – (4)
Plat Badan	b_e untuk plat badan sama dengan persamaan b_e untuk plat sayap, kecuali untuk nilai $k = 4$ baik untuk profil kanal maupun profil berongga.	Gambar 3 Kasus 1: f_1^* tekan, f_2^* tarik $\psi = f_2^*/f_1^* $ (5) $k = 4 + 2(1 + \psi)^3 + 2(1 + \psi)$ (6) Untuk $h/b \leq 4$: $b_1 = b_e/(3 + \psi)$; $b_2 = b_e/2$ untuk $\psi > 0.236$ (7) $b_2 = b_e - b_1$ untuk $\psi \leq 0.236$ (8) Untuk $h/b > 4$: $b_1 = b_e/(3 + \psi)$; $b_2 = b_e/(1 + \psi) - b_1$ (9) Gambar 3 Kasus 2: f_1^* & f_2^* tekan $k = 4 + 2(1 - \psi)^3 + 2(1 - \psi)$ (10) $b_1 = b_e/(3 - \psi)$; $b_2 = b_e - b_1$ (11) Catatan: Perlu selalu dikontrol agar $b_1 + b_2 \leq$ lebar bagian badan yang terkena tekan. b_e dihitung dari persamaan (1)-(4) dengan b merupakan tinggi plat badan (d)

Sesuai dengan mekanisme keruntuhan no (2) pada AISI (2016), kuat tekuk lokal dapat terjadi berinteraksi dengan kuat leleh (P_y atau M_y) atau tekuk global (P_{ne} atau M_{ne}). Tekuk lokal murni hanya dapat ditemukan pada kegagalan kolom pendek (*stub column*) dan balok yang mengalami momen lentur dengan penampang simetris (Afshan and Gardner, 2013). Tekuk global seperti tekuk lentur (*flexural buckling*), tekuk torsi (*torsional buckling*), dan tekuk lentur-torsi (*flexural-torsional buckling*) terjadi pada kolom/balok langsung. Kuat penampang akibat tekuk lokal dan tekuk global dihitung menggunakan persamaan-persamaan pada Tabel 2.

Pada struktur baja canai dingin, dikenal istilah tekuk distorsi (*distortional buckling*) yang hanya terjadi pada profil I, Z, C, dan profil lain yang memiliki *edge stiffeners*. Profil seperti ini yang ada di pasaran yaitu profil lipped channel (CNP) yang banyak digunakan untuk struktur gording. Untuk kuat tekuk distorsi, AISI (2016) hanya menyediakan metode DSM untuk menghitung besarnya nilai kekuatan. Desain penampang profil CNP menggunakan metode EWM

menjadi lebih rumit karena perlu memeriksa lebar efektif bagian *lipped*-nya. Pada metode EWM diperlukan iterasi dalam menentukan garis netral elastik pada saat menghitung properti penampang tereduksi (penampang efektif) pada balok. Contoh perhitungan yang melibatkan proses iterasi dapat dilihat pada contoh soal 4.5 pada buku Yu et al. (2020). Untuk perhitungan kolom, perhitungan lebar efektif tidak memerlukan iterasi dikarenakan penampang mengalami tegangan tekan merata akibat gaya aksial. Namun perlu diingat, distribusi tegangan tekan merata ini tidak ekuivalen dengan distribusi tegangan tekuk yang dialami pelat sebagai respon akibat adanya tegangan tekan tersebut.

Tabel 2. Menghitung kuat tekuk lokal berinteraksi dengan kuat leleh dan tekuk global menggunakan metode EWM

Keruntuhan	Kolom	Balok
Tekuk lokal	$P_{nl} = A_e F_n \leq P_{ne}$ (12) dimana: A_{ne} merupakan luas penampang efektif dari reduksi ukuran penampang akibat perhitungan b_e .	$M_{nl} = S_e F_n \leq S_{ef} f_y$ (20) S_e = modulus penampang efektif dihitung dari lokasi garis netral ke serat tekan terluar. S_{ef} = modulus penampang efektif dihitung dari lokasi garis netral ke serat tarik terluar.
Tekuk global	$P_{ne} = A_g F_n$, dimana: (13) Untuk $\lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658 \lambda_c^2) f_y$ (14) Untuk $\lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right) f_y$ (15) dan $\lambda_c = (f_y / F_{cre})^{0.5}$ (16) Nilai F_{cre} ditentukan dari jenis tekuk global yang dialami oleh penampang. Untuk penampang simetris pada dua arah hanya terjadi tekuk lentur, sehingga: $F_{cre} = \pi^2 E / (KL/r)^2$ (17) K adalah faktor panjang efektif. Untuk penampang yang mengalami tekuk torsi atau tekuk lentur torsi: $F_{cre} = \frac{1}{2\beta} \left[(\sigma_{ex} + \sigma_t) - \sqrt{(\sigma_{ex} + \sigma_t)^2 - 4\beta \sigma_{ex} \sigma_t} \right]$ (18) $\sigma_{ex} = \frac{\pi^2 E}{(K_x L_x / r_x)^2}$ (19) σ_t dihitung dari persamaan (28)	$M_{nl} \leq M_{ne}$ serta $M_{ne} \leq M_y$ (21) $M_{ne} = S_f f_y$; (22) S_f = modulus elastis tidak tereduksi dihitung dari garis netral ke serat tekan terluar pada penampang $M_y = S_y f_y$; (23) S_y = modulus elastis tidak tereduksi dihitung dari garis netral pada saat kondisi leleh pertama. Nilai F_n ditentukan dari: $F_{cre} \geq 2.78 f_y \rightarrow F_n = f_y$ (24) $2.78 f_y > F_{cre} > 0.56 f_y \rightarrow$ $F_n = 10 f_y / 9 * (1 - 10 f_y / 36 F_{cre})$ (25) $F_{cre} \leq 0.56 f_y \rightarrow F_n = F_{cre}$ (26) $F_{cre} = \frac{C_b r_o A}{S_f} \left[\sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \right]$ (27) Nilai C_b dihitung seperti pada struktur baja <i>hot-rolled</i> $\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right]$ (28)

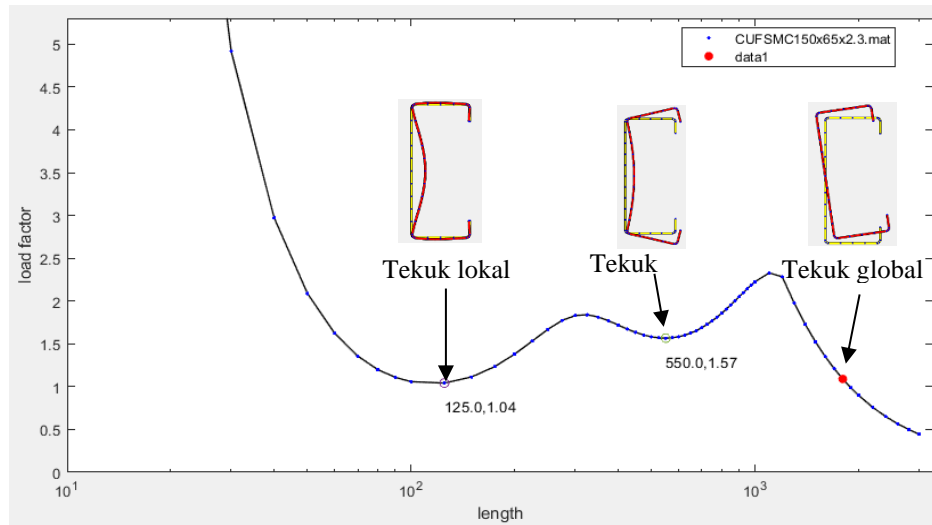
3. METODE DSM

Perhitungan kekuatan penampang menggunakan metode DSM berbasis pada properti penampang utuh sehingga tidak diperlukan perhitungan lebar efektif penampang. Namun demikian, metode ini melibatkan perhitungan kuat tekuk elastis penampang yang dapat diperoleh dari persamaan-persamaan di bagian apendiks 2 pada peraturan AISI (2016). Sebagai alternatif, analisis tekuk elastis dapat dilakukan menggunakan program bantu yang berbasis *finite strip analysis* (FSA) seperti pada program CUFSM (Schafer and Adány, 2006) atau THIN-WALL (Papangelis and Hancock, 1995). Selain itu, bisa juga menggunakan program bantu berbasis metode elemen hingga (*finite element method*/FEM) seperti pada software ABAQUS (2018). Secara umum, penggunaan software berbasis FSA relatif lebih sederhana dari sisi input dan user interface dari pada software berbasis FEM. Perhitungan menggunakan program bantu ini dianggap lebih optimal karena telah melibatkan interaksi antar elemen plat penyusun sebuah profil.

Apabila dibandingkan dengan metode EWM, maka metode DSM relatif lebih sederhana dan lebih cepat dalam melakukan perhitungan. Selain itu, optimasi juga dapat diperoleh karena memperhitungkan interaksi elemen plat pada kekuatan tekuk elastisnya. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa profil-profil yang dipakai harus memenuhi prasyarat seperti yang disebutkan oleh Schafer (2008). Selain itu, perlu dicatat bahwa metode DSM didasarkan oleh persamaan-persamaan empiris yang diperoleh dari data hasil pengujian dan hasil simulasi numerik pada penelitian yang ada. Maka dari itu, peraturan akan selalu mengkalibrasi persamaan-persamaan yang ada apabila di kemudian hari diperoleh data terbaru. Untuk melindungi pengguna, maka diberikan faktor reduksi kekuatan yang dipakai pada metode LRFD untuk menghitung kapasitas ijin tereduksi.

Program CUFSM direkomendasikan oleh AISI (2016) dan software ini dapat diunduh secara gratis. Dengan bantuan program CUFSM maka akan diperoleh *signature curve* yang menunjukkan seluruh kapasitas tekuk elastis dari penampang yang sedang ditinjau. Sebagai contoh, Gambar 4 menampilkan *signature curve* dari profil kanal C150x65x20x2.3 yang terkena beban aksial tekan. Sumbu absis menyatakan panjang bagian batang yang mengalami

tekuk untuk setengah periode panjang gelombang (*buckling half-wavelength*) dan sumbu ordinat menyatakan faktor pengali terhadap kapasitas leleh.



Gambar 4. *Signature curve* profil C150x65x20x2.3

Pada Gambar 4, diketahui apabila kapasitas tekuk lokal elastis (P_{cr1}) sebesar $1.04P_y$, tekuk distorsi elastis (P_{crd}) sebesar $1.57P_y$, dan tekuk global yang merupakan tekuk torsi elastis (P_{cre}) pada panjang bentang 1800 mm sebesar $1.09P_y$. Setelah diperoleh nilai-nilai kuat tekuk elastis dari masing-masing keruntuhan maka dapat dihitung kuat ultimit penampang menggunakan persamaan-persamaan yang akan ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Menghitung kuat tekuk lokal berinteraksi dengan kuat leleh dan tekuk global menggunakan metode DSM

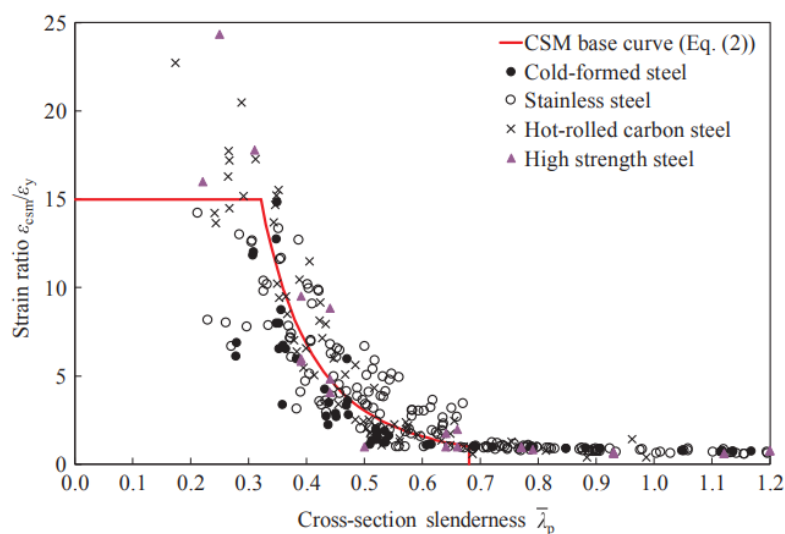
Keruntuhan	Kolom	Balok
Tekuk lokal	Untuk $\lambda_1 \leq 0.776 \rightarrow P_{nl} = P_{ne}$ (29)	Untuk $\lambda_1 \leq 0.776 \rightarrow M_{nl} = M_{ne}$ (35)
	Untuk $\lambda_1 > 0.776 \rightarrow$	Untuk $\lambda_1 > 0.776 \rightarrow$
	$P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne}$ (30)	$M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}$ (36)
	dengan $\lambda_1 = (P_{ne}/P_{cr1})^{0.5}$ (31) Nilai P_{cr1} diperoleh dari <i>signature curve</i>	dengan $\lambda_1 = (M_{ne}/M_{cr1})^{0.5}$ (37) Nilai P_{cr1} diperoleh dari <i>signature curve</i>
Tekuk global	$P_{ne} = A_g F_n$, dimana: (13)	$M_{nl} \leq M_{ne}$ serta $M_{ne} \leq M_y$ (21)
	Untuk $\lambda_c \leq 1.5 \rightarrow F_n = (0.658 \lambda_c^2) f_y$ (14)	$M_{ne} = S_f f_y$; (22) S_f = modulus elastis tidak tereduksi dihitung dari garis netral ke serat tekan terluar pada penampang
	Untuk $\lambda_c > 1.5 \rightarrow F_n = \left(\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right) f_y$ (15)	$M_y = S_{fy} f_y$; (23) S_{fy} = modulus elastis tidak tereduksi dihitung dari garis netral pada saat kondisi leleh pertama.
	dan $\lambda_c = (f_y/F_{cre})^{0.5}$ (16)	Nilai F_n ditentukan dari:
	Nilai F_{cre} dapat ditentukan menggunakan nilai kuat tekuk global pada <i>signature curve</i>	$F_{cre} \geq 2.78 f_y \rightarrow F_n = f_y$ (24)
		$2.78 f_y > F_{cre} > 0.56 f_y \rightarrow$ $F_n = 10 f_y / 9 * (1 - 10 f_y / 36 F_{cre})$ (25)
	$F_{cre} \leq 0.56 f_y \rightarrow F_n = F_{cre}$ (26)	
Tekuk distorsi	Untuk $\lambda_d \leq 0.561 \rightarrow P_{nd} = P_y = A_g f_y$ (32)	Untuk $\lambda_d \leq 0.673 \rightarrow M_{nd} = M_y$ (38)
	Untuk $\lambda_d > 0.561 \rightarrow$	Untuk $\lambda_d > 0.673 \rightarrow$
	$P_{nd} = \left[1 - 0.25 \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{P_{crd}}{P_y} \right)^{0.6} P_y$ (33)	$P_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y$ (39)
	dengan $\lambda_1 = (P_y/P_{crd})^{0.5}$ (34) Nilai P_{crd} diperoleh dari <i>signature curve</i>	dengan $\lambda_1 = (M_y/M_{crd})^{0.5}$ (40) Nilai M_{crd} diperoleh dari <i>signature curve</i>

4. METODE CSM

Metode CSM, awalnya dikembangkan untuk melakukan perhitungan kekuatan kolom pendek dan kekuatan lentur

pada penampang struktur baja nirkarat (Gardner, 2008; Afsan and Gardner, 2013). Metode ini dibuat dengan tujuan untuk mengoptimasi hasil perhitungan kekuatan penampang yang memiliki mekanisme keruntuhan dominan pada perilaku inelastis. Kekuatan penampang pada kondisi inelastis jauh lebih tinggi dibandingkan kekuatan elastis yang dihitung berdasarkan tegangan leleh (f_y), terutama pada struktur baja nirkarat. Hal ini berbeda dengan metode DSM yang membatasi kekuatan maksimal dari penampang tidak boleh melebihi kekuatan elastisnya. Menurut Gardner (2008) dan Afsan and Gardner (2013), hal ini menjadikan desain profil struktur dengan kelangsingan pelat ($\lambda_p \leq 0.68$) menjadi kurang realistis karena kemampuan dalam memikul beban tidak dimobilisasi keseluruhan.

Yun and Gardner (2018) melakukan penelitian lebih lanjut pada metode CSM untuk digunakan pada profil berongga yang terbuat dari baja karbon canai dingin. Penelitian mereka terbatas pada profil-profil yang memiliki nilai $\lambda_p \leq 0.68$. Meskipun demikian, dari penelitian tersebut diperoleh hasil apabila persamaan-persamaan metode CSM yang dipakai pada struktur baja nirkarat (Afsan and Gardner, 2013) dapat dipakai pada struktur baja karbon. Hal ini terlihat dari kurva hubungan antara rasio regangan ($\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$) dengan kelangsingan plat profil (λ_p) pada penelitian Yun and Gardner (2018) yang dapat dilihat pada Gambar 5, yang dikenal sebagai CSM *base curve* (garis berwarna merah). Pada kurva tersebut terlihat apabila garis berwarna merah dapat mewakili hubungan antara $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$ dan λ_p dari data hasil eksperimen struktur baja karbon (*hot-rolled carbon steel*), struktur baja nirkarat (*stainless steel*) dan struktur baja karbon canai dingin.



Gambar 5. CSM *base curve* untuk profil baja carbon canai dingin (Yun and Gardner, 2018)

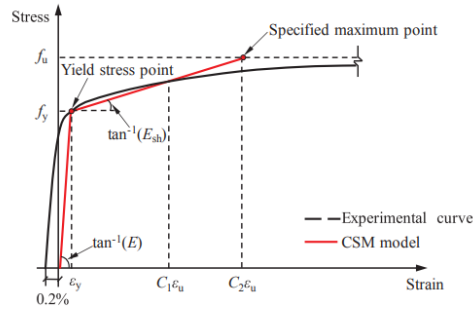
Nilai ε_{csm} pada Gambar 5 diperoleh dari nilai perpendekan maksimal (δ_u) dari struktur kolom pendek dibagi dengan panjang kolom (L) serta dari konversi nilai kurvatur maksimal (κ_u) dari struktur balok lentur yang diperoleh dari hasil eksperimen (Yun and Gardner, 2018). Untuk nilai $\lambda_p \leq 0.68$, nilai ε_{csm} yang diinput ke Gambar 5 hanya mewakili nilai regangan plastis (Afsan and Gardner, 2013). Selanjutnya, nilai ε_{csm} dinormalisasi terhadap nilai ε_y yang diperoleh dari tegangan leleh (f_y) dibagi dengan modulus elastisitas material (E). Persamaan empiris antara $\varepsilon_{csm}/\varepsilon_y$ dengan λ_p dari hasil penelitian Yun and Gardner (2018) serta Zhao and Gardner (2018) dapat dilihat pada persamaan (41)-(43) yang diperoleh secara empiris dari data eksperimen. Hasil penelitian Zhao and Gardner (2018) diikutsertakan karena berfokus pada penampang terbuka dengan $\lambda_p \leq 0.68$ dan $\lambda_p > 0.68$.

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \frac{0.25}{\lambda_p^{3.6}} \text{ tapi } \leq \min(15, 0.4\varepsilon_u/\varepsilon_y) \text{ untuk } \lambda_p \leq 0.68 \quad (41)$$

$$\frac{\varepsilon_{csm}}{\varepsilon_y} = \left(1 - \frac{0.222}{\lambda_p^{1.050}}\right) \frac{1}{\lambda_p^{1.050}} \text{ untuk } \lambda_p > 0.68 \quad (42)$$

$$\lambda_p = (f_y/\sigma_{cr})^{0.5} \quad (43)$$

Nilai σ_{cr} diperoleh dari nilai tegangan elastis tekuk lokal yang dapat diperoleh dari *signature curve*, yang berarti telah memperhitungkan interaksi elemen plat penyusun profil. Selain CSM *base curve*, pada metode CSM diperlukan juga pemodelan konstitutif material untuk menentukan besarnya regangan ultimit material (ε_u) dan *strain hardening* material (E_{sh}). Yun and Gardner (2018) mengusulkan model konstitutif material seperti pada Gambar 6 (garis berwarna merah) yang diperoleh dari pengumpulan hasil uji tarik material baja canai dingin pada penelitian-penelitian sebelumnya. Dari pengumpulan tersebut, Yun and Gardner (2018) mengusulkan persamaan (44) dan (45) yang digunakan untuk menghitung kapasitas penampang.



Gambar 6. Model konstitutif material (Yun and Gardner, 2018)

$$\epsilon_u = 0.6(1 - f_y/f_u) \tag{44}$$

$$E_{sh} = (f_u - f_y)/(0.45\epsilon_u - \epsilon_y) \tag{45}$$

Kapasitas penampang yang dihasilkan dengan menggunakan metode CSM berasal dari mekanisme keruntuhan tekuk lokal yang berinteraksi dengan tekuk global. Kapasitas penampang kolom dihitung menggunakan persamaan (46)-(48), sedangkan untuk kapasitas penampang terkena lentur menggunakan persamaan (49) dan (50). Persamaan-persamaan ini diperoleh dari gabungan hasil penelitian Yun and Gardner (2018) serta Zhao and Gardner (2018). Walaupun hasil penelitian Zhao and Gardner (2018) terbatas untuk baja nirkarat, Gambar 5 menunjukkan adanya kesinambungan tren *CSM base curve* antara baja karbon dan baja nirkarat.

$$P_{csm} = A_g f_{csm} \tag{46}$$

$$f_{csm} = f_y + E_{sh}(\epsilon_{csm} - \epsilon_y) \text{ untuk } \epsilon_{csm} \geq \epsilon_y \tag{47}$$

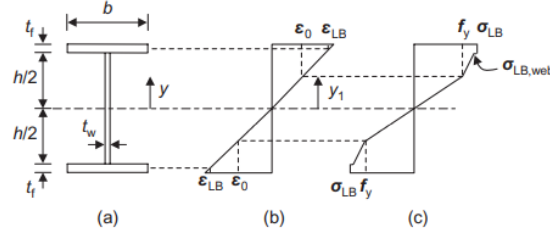
$$f_{csm} = E\epsilon_{csm} \text{ untuk } \epsilon_{csm} < \epsilon_y \tag{48}$$

$$M_{csm} = \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{S}{Z} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{S}{Z} \right) / \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^2 \right] \text{ untuk } \epsilon_{csm} \geq \epsilon_y \tag{49}$$

$$M_{csm} = \epsilon_{csm} \cdot S \cdot f_y / \epsilon_y \text{ untuk } \epsilon_{csm} < \epsilon_y \tag{50}$$

Apabila dilihat dari bentuk persamaan matematikanya, persamaan kapasitas penampang tekan sama dengan persamaan menghitung kekuatan kolom pendek, yaitu berdasarkan hasil perkalian luas penampang (A_g) dikalikan dengan kapasitas tegangan. Untuk metode CSM, nilai kapasitas tegangan berasal dari f_{csm} yang besarnya sudah memperhitungkan *strain hardening* pada material serta kemampuan deformasi ultimit pada struktur. Dari persamaan (47), terlihat apabila nilai tegangan yang dipakai untuk menghitung kapasitas penampang boleh melebihi f_y selama penampang dapat berdeformasi lebih regangan leleh material (ϵ_y).

Kekuatan penampang lentur dihitung menggunakan persamaan (49) yang diperoleh dari analisis penampang seperti Gambar 7. Persamaan (49) merupakan hasil penyederhanaan yang diusulkan oleh Gardner et al. (2011), sedangkan persamaan (50) diambil dari Zhao and Gardner (2018).



Gambar 7. Analisis penampang profil I untuk metode CSM (Gardner, 2008).

5. CONTOH PERHITUNGAN KEKUATAN KOLOM

Pada bagian ini akan diberikan contoh perhitungan kekuatan kolom menggunakan profil kanal seperti Gambar 1 berdasarkan ketiga metode.

Data ukuran profil: $b = 60 \text{ mm}$; $d = 120 \text{ mm}$; $r = 2 \text{ mm}$; $t = 2 \text{ mm}$; $f_y = 240 \text{ MPa}$; $E = 200000 \text{ MPa}$; $A = 236.71 \text{ mm}^2$
 $r_x = 48.5$; $r_y = 19.2 \text{ mm}$; $r_o = 56.8 \text{ mm}$; $x_o = 22.49 \text{ mm}$; $J = 78.9 \text{ mm}^2$; $C_w = 214977116.4 \text{ mm}^4$

➤ **Metode EWM**

1. Memeriksa lebar efektif plat sayap:

$$b_f = 58 \rightarrow b_f/t = 58$$

$F_{cr1} = 22.18$ MPa dari persamaan (4) dengan nilai $k = 0.43 \rightarrow \lambda = 3.4109$ (lihat persamaan (3))

Karena $\lambda > 0.673$, maka nilai ρ dari persamaan (2) = 0.2743 $\rightarrow b_e$ untuk sayap = $0.27 \cdot 58 = 15.9076$ mm

Maka plat sayap **tidak seluruhnya efektif**

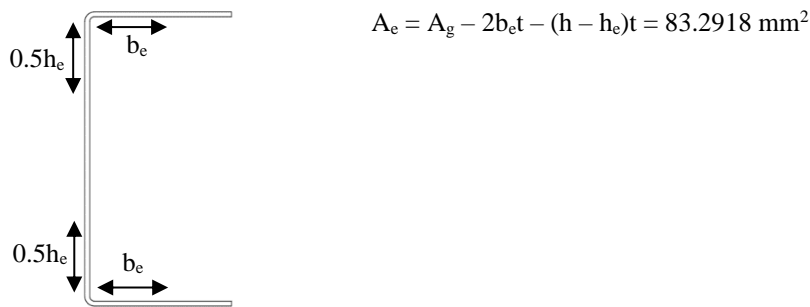
2. Memeriksa lebar efektif plat badan:

$$h = d - 2r - 2t = 116 \rightarrow h/t = 116$$

$F_{cr1} = 51.58$ MPa dari persamaan (4) dengan nilai $k = 4 \rightarrow \lambda = 2.2364$

maka nilai $\rho = 0.403$ dan $h_e = 46.7666$ mm

3. Menghitung properti penampang tereduksi:



4. Menghitung kapasitas penampang ($L = 2000$)

- a. Tekuk global (P_{ne}): $K_x = K_y = K_t = 1$

Tekuk lentur: F_{cre} (persamaan (15)) = 174.64 MPa

Tekuk torsi-lentur: $\sigma_t = \frac{1}{A r_o^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L)^2} \right] = 140.987$ MPa dan $\sigma_{ex} = 1114.357$ MPa

Dengan nilai $\beta = 0.843$, maka $F_{cre} = 137.928$ MPa (Tekuk torsi-lentur menentukan)

$\lambda_c = (258/137.928)^{0.5} = 1.368 \leq 1.5$ (persamaan (14)) $\rightarrow F_n = 117.88$ MPa

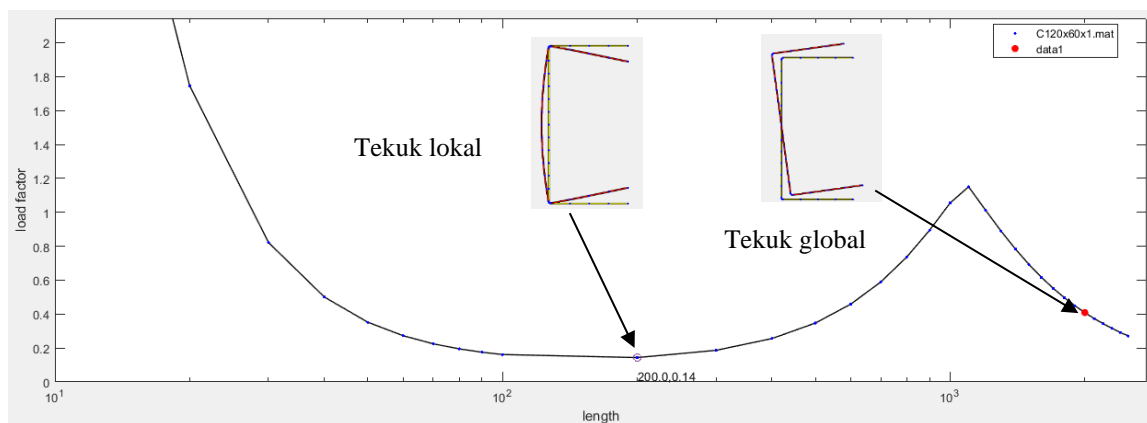
$P_{ne} = A_g F_n = 27.9$ kN

- b. Tekuk lokal berinteraksi dengan tekuk global (P_n)

$P_n = A_e F_n = 83.2918 \cdot 117.88 = 9.82$ kN $< P_{ne}$

Jadi kapasitas penampang = **9.82 kN**

➤ **Metode DSM**



Gambar 8. Signature curve profil kanal C120x60x1

Dari Gambar 8, diperoleh nilai: $P_{cr1} = 0.14P_y$ dan $P_{cre} = 0.41P_y$

1. Kapasitas penampang akibat tekuk global:

$\lambda_c = (P_y/0.41P_y)^{0.5} = 1.562 > 1.5 \rightarrow F_n = 0.359f_y = 93.097$ MPa

$P_{ne} = A_g \cdot F_n = 21.924$ kN

2. Kapasitas penampang akibat tekuk lokal:

$\lambda_1 = (21.924/0.14P_y)^{0.5} = 1.605 > 0.776$

$$P_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{P_{cr1}}{P_{ne}} \right)^{0.4} P_{ne} = 13.54 \text{ kN}$$

➤ **Metode CSM**

$$\lambda_p = (f_y / \sigma_{cr})^{0.5} = (1/0.14)^{0.5} = 2.6726 > 0.68$$

$$\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} = \left(1 - \frac{0.222}{\lambda_p^{1.050}} \right) \frac{1}{\lambda_p^{1.050}} = 0.328 \rightarrow \epsilon_{csm} = 0.328 \epsilon_y$$

$$\text{If } f_u = 620 \text{ MPa} \rightarrow \epsilon_u = 0.35 \text{ and } E_{sh} = 2318.2 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{csm} = E \epsilon_{csm} = 84.624 \text{ N/mm}^2 \rightarrow P_{csm} = 20.03 \text{ kN}$$

Tabel 4. Perbandingan kapasitas penampang

Jenis Tekuk	Metode EWM	Metode DSM	Metode CSM
Tekuk global	27.9 kN	21.9 kN	-
Tekuk lokal+global	9.82 kN	13.5 kN	20.03 kN

Perbandingan hasil perhitungan kapasitas penampang ditampilkan pada Tabel 4. Untuk tekuk global, nilai P_{ne} dari metode EWM lebih besar dari pada metode DSM. Hal ini dikarenakan metode EWM menggunakan persamaan-persamaan teoritis yang relatif lebih akurat dari pada metode pendekatan berdasarkan FSA yang dihasilkan oleh metode DSM. Metode CSM tidak spesifik meninjau perhitungan tekuk global karena metode ini dikembangkan untuk profil-profil *stocky*. Meskipun demikian, besarnya P_{ne} dapat diperoleh menggunakan persamaan analitis seperti pada metode EWM. Untuk kapasitas tekuk lokal berinteraksi dengan tekuk global (P_{nl}), metode CSM menghasilkan nilai yang paling besar dibanding dengan metode lainnya. Hal ini dikarenakan pengaruh implisit *strain hardening* pada nilai ϵ_{csm} yang umumnya diabaikan pada desain kapasitas penampang yang diperoleh berdasarkan pada kondisi leleh pertamanya saja. Metode EWM menghasilkan nilai P_{nl} yang relatif kecil dikarenakan pendekatan yang digunakan pada perhitungan lebar efektif, dimana kuat tekuk lokal elastis pada masing-masing pelat penyusun profil ditinjau secara terpisah. Hal ini berbeda dengan metode DSM yang menggunakan hasil perhitungan analisis tekuk elastis berbasis FSA, dimana interaksi antar elemen plat diperhitungkan. Dengan demikian, hasil perhitungannya lebih realistis dan tidak terlalu konservatif.

6. PENUTUP

Tiga metode perhitungan kapasitas penampang elemen struktur baja canai dingin menggunakan metode lebar efektif (EWM), metode kekuatan langsung (DSM), dan metode kekuatan menerus (CSM) telah dibahas pada makalah ini. Ketiga metode memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Metode EWM hanya membutuhkan persamaan-persamaan analitis untuk memperoleh kekuatan tekuk elastis dan kapasitas penampang. Namun, metode ini memerlukan iterasi perhitungan lebar efektif pada saat menghitung kekuatan penampang akibat lentur. Metode DSM relatif lebih ringkas dari pada metode EWM tetapi persamaan kapasitas penampang yang digunakan berasal dari persamaan-persamaan empiris dari hasil pengujian yang telah dilaporkan. Metode ini menjadi lebih cepat untuk diaplikasikan apabila didukung dengan program bantu yang berbasis *finite strip analysis*. Metode CSM menjadi metode yang paling sederhana untuk diaplikasikan. Namun demikian, metode ini memerlukan pembuktian dan konsensus lebih lanjut dari para ahli karena metode ini membolehkan nilai kapasitas penampang yang melebihi kapasitas lelehnya untuk kasus *non-slender plate element* sebagai penyusun profil baja canai dingin dan mengikutsertakan pengaruh *strain hardening* serta *regangan ultimit* penampang. Secara umum, metode DSM saat ini dianggap menjadi metode yang tepat untuk menggantikan metode EWM apabila melihat perkembangan peraturan baja canai dingin yang terakhir diterbitkan di Amerika. Mudah-mudahan peraturan baja canai dingin di Indonesia ke depan dapat menempatkan metode DSM setara dengan metode EWM. Saat ini metode DSM sudah dikembangkan untuk berbagai perhitungan lain seperti terhadap aksi geser dan tekuk plat (*web crippling*).

DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS. (2018). User's manual and theory manual.: Dassault Systèmes Simulia Corp.
- Afshan, S., and Gardner, L. (2013). "The continuous strength method for structural stainless steel design." *Thin-Walled Structures*, 68, 42-49
- AISI. (2007). *North American Specification for the design of cold-formed steel structural members*. AISI S100-07. Washington D.C., USA: American Iron and Steel Institute.
- AISI. (2016). *North American Specification for the design of cold-formed steel structural members*. AISI S100-

16. Washington D.C., USA: American Iron and Steel Institute.
- AS/NZS. (2005). *Cold-formed steel structure*. AS/NZS 4600:2018. Sydney, Australia: Standards Australia/Standards New Zealand
- AS/NZS. (2018). *Cold-formed steel structure*. AS/NZS 4600:2018. Sydney, Australia: Standards Australia/Standards New Zealand
- ASCE. (2021). *Draft specification for the design of cold-formed stainless steel structural members*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.
- BSN. (2013). *Struktur baja canal dingin*. SNI 7971:2013. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional
- Gardner, L. (2008). "The continuous strength method". *Proceedings of the ICE—Structures and Buildings*, 161(3), 127-133.
- Gardner L, Wang F, Liew A. (2011). "Influence of strain hardening on the behaviour and design of steel structures.". *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11(5), 855–75.
- Papangelis, J.P. and Hancock, G.J. (1995). "Computer analysis of thin-walled structural members.". *Computers & Structures*, 56(1), 157-176.
- Schafer, B.W., and Ádány, S. (2006). "Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods." *Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, FL.
- Schafer, B.W. (2008). "Review: the direct strength method of cold-formed steel member design.". *J. Constr. Steel Res.*, 64(7/8), 766-778.
- Schafer, B.W. (2019). "Review: the direct strength method of cold-formed steel member design.". *Thin-Walled Structures*, 140, 533-541.
- Timoshenko, S. P., and J. M. Gere. (1961). *Theory of Elastic Stability*: McGraw-Hill, New York.
- Yu, W.-W., LaBoube, R. A., & Chen, H. (2020). *Cold-formed steel design*: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, USA.
- Yun, X., and Gardner, L. (2018). "The continuous strength method for the design of cold-formed steel non-slender tubular cross-sections.". *Engineering Structures*, 175, 549-564.
- Zhao, O., and Gardner, L. (2018). "The continuous strength method for the design of mono-symmetric and asymmetric stainless steel cross-sections in bending.". *J. Constr. Steel Res.*, 150, 141-152.