

ANALISIS PERBANDINGAN STRUKTUR KOMPOSIT PELAT BETON BALOK BAJA SEBELUM DAN SESUDAH KASTELELA

Theresia Lu Theopuspitarsari^{1*} dan Yoyong Afriadi¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari No.44, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

*theresia.theopuspitarsari@uajy.ac.id

Masuk: 21-10-2025, revisi: 16-01-2026, diterima untuk diterbitkan: 26-01-2026

ABSTRACT

The classic problem raised in this paper is the limited capability of the original IWF steel beam concrete slab composite structure compared to the castellated IWF steel beam assembled from the original profile. The self-weight of the castellated IWF steel beam is relatively the same. The purpose of this paper is to evaluate the effect of the castellated IWF steel beam concrete slab composite structure with the original. The benefit of this paper is as information on the advantages of the castellated IWF steel beam composite structure. The structural material specifications are: the original IWF steel beam $400 \times 200 \times 7 \times 11$ and the castellated IWF $600 \times 199 \times 7 \times 11$ with openings in the hexagonal shape with the allowable base strength $f_s, ijin = 160$ MPa, a light steel deck with ribs 7.5 cm high, a concrete slab thickness of 14 cm, and a concrete compressive strength $f'c = 25$ MPa. The composite beam is a simple beam with a span of 7 m. The useful width distance between the beams is 3.0 m. The composite beam elements are evaluated with Nominal Strength (ASD and Moment Strength) AISC 360-22. The study findings of the castellated IWF steel beam stress are smaller than the required allowable value, the structure is safe, the original IWF composite cross section is unsafe. The addition of moment strength is 132.41%. The short-term deflection of the original IWF composite steel beam does not meet the requirements, the long-term deflection of the castellated IWF composite steel beam is smaller than the original cross section deflection. The short-term and long-term deflection of the castellated IWF composite steel beam meets the requirements.

Keywords: composite; castellated; nominal strength; deflection

ABSTRAK

Permasalahan klasik yang diangkat paper ini adalah keterbatasan kemampuan struktur komposit pelat beton balok baja profil IWF asli dibandingkan balok baja IWF kastela yang dirakit dari profil aslinya. Berat sendiri balok baja IWF kastela relatif sama. Tujuan paper ini untuk mengevaluasi efek struktur komposit pelat beton balok baja IWF kastela dengan aslinya. Manfaat paper ini sebagai informasi keunggulan struktur tampang komposit balok baja IWF kastela. Spesifikasi material struktur berupa: balok baja IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dan IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ dengan bukaan pada bentuk hexagonal dengan kuat dasar ijin $f_s, ijin = 160$ MPa, dek baja ringan dengan rusuk tingginya 7,5 cm, tebal pelat beton 14 cm, kuat desak beton $f'c = 25$ MPa. Balok komposit berupa simple beam bentang 7 m. Jarak lebar manfaat antara balok 3,0 m. Elemen balok komposit dievaluasi dengan Nominal Strength (ASD dan Moment Strength) AISC 360-22. Temuan studi tegangan balok baja IWF kastela lebih kecil dari nilai izin yang disyaratkan, struktur aman, tampang komposit IWF asli tidak aman. Penambahan kekuatan momen (moment strength) sebesar 132,41%. Defleksi jangka pendek balok baja komposit IWF asli tidak memenuhi persyaratan, defleksi jangka panjang balok baja komposit IWF kastela lebih kecil daripada defleksi tampang aslinya. Defleksi jangka pendek dan jangka panjang pada balok baja komposit IWF kastela memenuhi persyaratan.

Kata kunci: komposit; kastela; nominal strength; defleksi

1. PENDAHULUAN

Tujuan dari *paper* ini adalah untuk mengevaluasi efek dari struktur komposit pelat beton balok baja profil IWF kastela dengan profil aslinya. Evaluasi mencakup parameter-parameter yaitu tegangan-tegangan, kekuatan momen, defleksi, dan *intermediate stiffness* yang terjadi pada struktur komposit. Hasil dari nilai besar parameter-parameter yang dievaluasi harus memenuhi persyaratan standar peraturan yang diizinkan. Untuk menentukan tujuan spesifik yang terukur seperti durabilitas, keberlanjutan, ketahanan terhadap gempa, pelaksanaan konstruksi cepat, dan struktur hibrida (*hybrid building*) dengan material gabungan. Struktur komposit dibuat dari gabungan dua atau lebih elemen-elemen struktur yang menjadi satu elemen struktur tunggal, setiap komponen beraksi secara efisien (Feyissa & Kenea,

2022). Struktur komposit memberikan suatu tampilan konsisten dan pilihan terbaik karena struktur komposit mudah untuk dikerjakan, serta terjangkau (Ibrahim et al., 2022).

Balok baja kastela banyak digunakan secara luas karena performa dalam kemampuan layan penggunaan secara struktural berdaya guna, karena sifat-sifat yang baik secara signifikan, seperti ringan, fasilitas dalam konstruksi, kuat dan material yang ekonomis. Balok baja kastela difabrikasi dari balok utuh yang aslinya adalah balok I dengan memotong *web* (badan) dalam bentuk *zigzag* lalu disambung kembali dengan dilas sehingga tinggi balok baja kastela bertambah sekitar 50% (Hadeed & Alshimmen, 2019; Islam et al., 2022; Aljboury & Al Shareef, 2025). Bukaan pada badan bermacam-macam bentuk seperti lingkaran, elips dan hexagonal, pola bukaan bertujuan meningkatkan luas permukaan dan mengurangi berat sendiri dari balok tanpa mengorbankan kemampuan struktur (Muthukkumaren et al., 2023). Balok kastela telah menggantikan secara efektif peran balok rakitan (*built-up girders*) dalam konstruksi skala ringan sampai sedang untuk bentang medium dan panjang (Jacob et al., 2024).

Struktur balok kastela dibandingkan dengan balok baja asli yang utuh, hasilnya nilai kapasitas dukungan beban dari masing-masing balok baja kastela meningkat dibandingkan balok baja asli dikarenakan meningkatnya kekakuan (*stiffnees*) balok baja setelah kastela. Juga, nilai defleksi bentang tengah pada beban layan berkurang pada masing-masing benda uji dibandingkan dengan balok baja utuh yang asli karena meningkatnya dimensi penampang dan kekakuan setelah proses kastela (Hadeed & Alshimmen 2019). Geometri yang unik, termasuk lubang-lubang (bukaan) pada badan (*web*), membuat estimasi kapasitas beban geser berbeda dari balok-balok tradisional dengan badan yang *solid*. *Transverse Weld Hexagonal Catellated (TWHC)* dapat menghemat material lebih dengan suatu peningkatan 13% dibandingkan terhadap balok I asli (Arifa & Priyanka, 2024).

Secara efektif balok baja I kastela meningkatkan kekuatan tanpa meningkatkan berat balok. Untuk peningkatan, direkomendasi untuk memperkuat kekakuan sekitar bukaan. Tipe dari kerusakan terjadi pada badan kastela termasuk pecah pada sambungan bagian badan, tekuk torsi-lateral (*lateral-torsional buckling*) pada bagian badan (Aljboury & Al Shareef, 2025). Model kegagalan yang spesifik sangat dominan akan merusak performanya secara serius, seperti tekuk badan pada bukaan, dan tekuk torsi lateral karena kondisi pembebanan yang berbeda (Rabi et al., 2024; Hosseinpou et al., 2020). Seluruh mekanisme kegagalan dipengaruhi oleh parameter-parameter rasio tinggi terhadap tebal, jarak bukaan dan kelangsingan total dari balok kastela (Aswad et al., 2025; Au et al., 2024).

Tipe umum dari penampang konstruksi komposit terdiri balok baja, dek baja ringan, dan pelat beton. Kekuatan tekuk mengikuti persyaratan berikut: ketinggian rusuk nominal tidak lebih 75 mm, lebar rata-rata rusuk beton w_r tidak kurang dari 50 mm, tetapi tidak diikuti dalam hitungan, seperti tidak lebih dari lebar bersih minimum dekat bagian atas dari dek baja. Pelat beton akan dihubungkan ke balok baja dengan angkur *stud* berkepala yang dilas, ada yang tembus dek atau langsung ke permukaan sayap baja. Setelah *stud* dipasang, panjangnya tidak kurang dari 38 mm di atas puncak dari dek baja dan setidaknya 13 mm dari selimut beton. Ketebalan pelat beton di atas dek baja ringan tidak kurang dari 50 mm. Dek baja ringan diangkur ke seluruh balok pendukung pada jarak tidak lebih 460 mm. (AISC, 2016).

Dalam menentukan tampang dari struktur komposit menggunakan konsep lebar efektif untuk pelat beton. Untuk bangunan gedung nilai maksimum lebar efektif b_E dizinkan adalah nilai hitungan terkecil (Salmon et al., 2009). Untuk balok interior dengan pelat terbentang pada dua sisi dari balok mengikuti persamaan 1a-1c.

$$b_E \leq L/4 \quad (1a)$$

$$b_E \leq b_o \quad (1b)$$

$$b_E \leq b_f + 16 t_s \quad (1c)$$

dengan b_E = lebar efektif pelat beton, b_o = jarak antara balok, b_f = lebar *flange* profil baja, t_s = tebal *slab* beton.

Balok komposit terdiri dari balok baja, yang sebaiknya berbentuk I yang dihubungkan dengan pelat beton dengan sambungan geser. Tampang komposit dihitung dengan metode luasan yang ditransformasi. Luas pelat beton ditransfer ke luas ekuivalen baja. Penggunaan lebar pelat sama dengan b_E/n . (Salmon, et.al., 2009). Umumnya modulus elastis baja sebesar $2,1 \times 10^5$ MPa, sedangkan modulus elastis beton, E_c dalam unit MPa, dihitung dengan Persamaan 2.

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} \quad (2)$$

Beberapa faktor untuk menentukan defleksi balok komposit, yakni: metode konstruksi, pemisahan dari momen beban mati dan beban hidup. Metode konstruksi menentukan cara di mana penampang melintang komposit memikul tegangan-tegangan beban mati. Jika balok baja ditumpu perancah dari bawah selama pengerasan pelat beton, tampang komposit akan diasumsikan menahan tegangan-tegangan beban mati dan beban hidup. Tetapi, jika balok baja tidak ditumpu perancah, balok baja akan diasumsikan tegangan-tegangan beban mati dan tampang komposit hanya akan menahan tegangan-tegangan beban hidup. Jika kontruksi tanpa perancah, defleksi total merupakan penjumlahan dari defleksi beban mati balok baja dan defleksi beban hidup dari tampang komposit. Untuk defleksi jangka pendek digunakan nilai rasio modular $n = E_s/E_c$, defleksi jangka panjang nilai rasio modular $2n$. (Salmon et al., 2009).

Defleksi di tengah beban, akibat beban mati tersebar merata, untuk struktur balok sederhana dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$\Delta_{DL} = (5W_{DL}L^4) / (384E_sI_s) \quad (3)$$

Defleksi di tengah beban, akibat beban hidup tersebar merata, untuk struktur balok sederhana dapat dihitung dengan Persamaan 4.

$$\Delta_{LL} = (5W_{LL}L^4) / (384E_sI_c) \quad (4)$$

Defleksi total dihitung dengan Persamaan 5.

$$\Delta_T = \Delta_{DL} + \Delta_{LL} \quad (5)$$

dengan E_c = modulus elastis beton, f'_c = kuat desak beton (MPa), E_s modulus elastis baja, E_c modulus elastis beton, Δ_{DL} = defleksi di tengah beban, akibat beban mati tersebar merata, L = panjang bentang balok komposit untuk struktur *simple beam* (m), W_{DL} = berat beban mati merata (kN/m), Δ_{LL} = defleksi di tengah beban, akibat beban hidup tersebar merata, W_{LL} = berat beban hidup merata (kN/m), I_s = momen inersia baja, I_c = momen inersia tampang struktur komposit, Δ_T = defleksi total, Δ_{DL} = defleksi akibat beban mati tersebar merata, Δ_{LL} = defleksi akibat beban hidup tersebar merata.

Menurut AISC 360-22, *intermediate stiffness* tidak diperlukan bila kedua syarat berikut terpenuhi. Kedua syarat tersebut mengikuti Persamaan 6 dan 7.

$$\frac{h}{t_w} \leq 260 \quad (6)$$

$$f_v \leq \frac{F_y \times C_v}{2,89} \leq 0,40 F_y \quad (7)$$

dimana $f_v = \frac{v}{A_w}$

Nilai C_v untuk *inelastic buckling* mengikuti Persamaan 8.

$$C_v = \frac{190}{h/t} \times \sqrt{\frac{k}{F_y}} \quad (8)$$

dengan h = tinggi badan profil baja (tidak termasuk tinggi sayap), t_w = tebal badan profil baja, C_v = koefisien tekuk geser, v = gaya geser kritis di tumpuan, A_w = luasan badan profil baja.

Nilai maksimum $\frac{h}{t}$ disajikan dalam balok roll tanpa *intermediate stiffness* akan didesain menggunakan $f_v = 0,40 F_y$, dimana tidak ada kekakuan (*stiffness*) yang digunakan, nilai $\frac{a}{h}$ yang besar maka menggunakan nilai k mendekati 5,34.

2. METODE PENELITIAN

Untuk mendukung kelancaran dan keberhasilan studi ini, perlu adanya pedoman kerja yang jelas terukur berupa langkah-langkah rencana terstruktur. Dalam studi ini ada enam tahap langkah pedoman kerja.

1. Menentukan struktur komposit yang terdiri dari pelat beton, dek baja ringan bondek, dan balok profil baja. Dengan data elemen bahan: pelat beton dengan mutu kuat desak beton umur 28 hari $f'_c = 25$ MPa, tebal total pelat beton 14 cm; dek baja ringan bondek dengan ketebalan pelat 0,75 mm, berat dek baja ringan per unit luas 10,1 kg/cm², dengan tinggi rusuk dek baja ringan bondek 7,5 cm; balok profil baja IWF asli 400×200×7×11 (mm); setelah balok baja IWF asli dibentuk balok baja IWF kastela ukuran menjadi 600×199×7×11, mutu profil baja $F_y = 240$ MPa.
2. Data *layout* denah disajikan pada Gambar 2, balok sederhana (*simple beam*) jalur 2 dengan bentang 7,5 m. Jarak antar balok $b_o = 3,0$ m.
3. Pembebanan mencakup beban mati, beban hidup. Berat beban mati tersebar merata sebesar 14,01 kN/m; berat beban hidup tersebar merata sebesar 18,00 kN/m. Kemudian dapat dihitung momen mati, momen hidup, dan momen total.
4. Dari momen total dicari penampang modulus perlu terhadap sumbu x ($Z_{x,perlu}$). Selanjutnya nilai tampang modulus tabel $Z_{x,tabel}$ untuk balok profil baja IWF asli 400×200×7×11 lebih kecil dari $Z_{x,perlu}$. Sedangkan, nilai tampang modulus tabel $Z_{x,tabel}$ untuk balok profil baja IWF kastela 600×199×7×11 lebih besar dari $Z_{x,perlu}$. Tinjauan struktur komposit balok profil baja IWF asli 400×200×7×11. Langkah analisis mencakup: lebar efektif pelat beton; rasio modulus baja dan modulus beton; garis netral struktur komposit; momen inersia struktur komposit; modulus tampang di serat atas pelat beton, diserat sayap (*flange*) bawah dan di serat sayap atas balok baja. Periksa tegangan-tegangan dan defleksi yang terjadi dari struktur komposit. Periksa kekuatan momen (*moment strength*)

dan defleksi. Untuk defleksi diperiksa defleksi jangka pendek dengan rasio modular n dan defleksi jangka panjang dengan rasio modular $2n$.

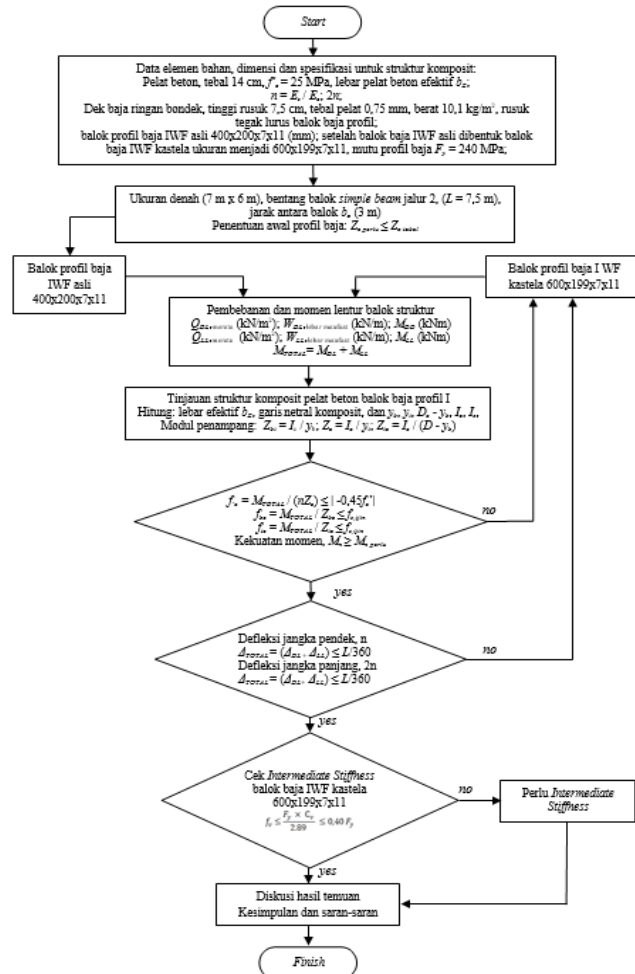
- langkah yang sama pada tahap butir keempat, dengan menggunakan balok profil baja IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ yang dirakit dari balok profil baja IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$. Periksa *intermediate stiffness* pada tumpuan yang mengalami geser maksimum.
- Melakukan diskusi dari temuan-temuan pada analisis hasil pada butir keempat dan kelima di atas. Selanjutnya hasil diskusi disampaikan dalam bentuk kesimpulan dan saran-saran.

Agar *paper* dapat terfokus dengan baik ada lima batasan masalah, yaitu:

- Bagian stuktur yang ditinjau adalah balok komposit bangunan gedung, dengan elemen utama adalah: pelat beton, dek baja ringan dari bondek dan balok baja profil IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dan balok baja profil IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ yang berasal dari balok baja profil IWF $400 \times 200 \times 7 \times 11$.
- Struktur balok yang akan ditinjau adalah balok interior, dan merupakan balok sederhana (*simple beam*) yang ditumpu balok induk. Dek baja ringan bondek dipasang dengan arah rusuk (*rib*) tegak lurus terhadap balok baja profil IWF. Analisis hitungan pada momen positif di tengah bentang balok struktur.
- Dalam desain struktur balok Elemen balok komposit dievaluasi dengan *Nominal Strength* (ASD dan *Moment Strength*) AISC 360-22.
- Desain struktur balok tidak memperhitungkan aksi Vierendeel. Dalam perhitungan defleksi jangka panjang tidak menyertakan efek susut dan rangkak.
- Paper* ini tidak menyertakan tinjauan *shear connector*.

Bagan Alir Penelitian

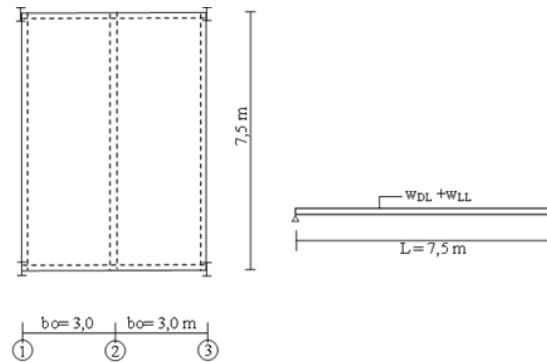
Bagan alir penelitian tampak pada Gambar 1. Bagan tersebut merupakan rangkaian analisis untuk mendapatkan hasil dari keseluruhan kegiatan analisis yang akan dilakukan.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Data Analisis



Gambar 2. Balok jalur 2 yang ditinjau

Kekuatan desak beton $f'_c = 25$ MPa, berat sendiri beton $\gamma_c = 24$ kN/m³, tegangan luluh baja $F_y = 240$ MPa, tegangan dasar izin $f_s = 2/3 \times F_y = 160$ MPa; berdasarkan SNI 1729:2020 (Spesifikasi untuk Bangunan Gedung Baja Struktural), modulus elastis baja $E_s = 2,1 \cdot 10^5$, modulus elastis beton $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 23500$ MPa, rasio modular antara baja dan beton $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,1 \times 10^5}{23500} = 8,94 \approx 9$, dan bentang balok $L = 7,5$ m. Denah dan balok jalur 2 yang ditinjau dapat dilihat pada Gambar 2.

Analisis perhitungan pembebanan pelat lantai dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Pembebanan pelat lantai

Bagian	Q (Beban)
Plat lantai (14 cm)	$0,14 \times 24 = 3,36$
Bondek ($t_b = 7,5$ cm)	$= 0,101$
Plafon dan rangka (18 cm)	$= 0,18$
Finishing	$0,035 \times 24 = 0,84$ +
Q _{DL} (kN/m ²)	$= 4,481$
Q _{LL} (kN/m ²)	$= 6,000$

dengan Q_{DL} = pembebanan akibat beban mati (*dead load*), Q_{LL} = pembebanan akibat beban hidup (*live load*).

Pembebanan Balok Jalur 2 untuk balok baja profil IWF asli dan balok baja profil kastela IWF adalah sama, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Pembebanan balok jalur 2

Bagian	W
W _{baja}	$= 0,566$
W _{pelat}	$3 \times 4,481 = 13,443$ +
W _{DL} (kN/m)	$= 14,009$
W _{LL} (kN/m)	$3 \times 6,000 = 18,000$ +
W _{Total} (kN/m)	$= 32,009$

$$M_{DL} = 14,009 \times 7,5^2/8 = 98,501 \text{ kN.m}$$

$$M_{LL} = 18,000 \times 7,5^2/8 = 126,562 \text{ kN.m}$$

$$M_{total} = 32,009 \times 7,5^2/8 = 225,063 \text{ kN.m}$$

dengan W_{baja} = berat sendiri balok baja profil I, W_{pelat} = berat sendiri pelat, W_{DL} = berat akibat beban mati (*dead load*), W_{LL} = berat akibat beban hidup (*live load*), W_{Total} = berat gabungan berat akibat beban mati (*dead load*) dan berat akibat beban hidup (*live load*), M_{DL} = momen akibat beban mati (*dead load*), M_{LL} = momen akibat beban hidup (*live load*), M_{total} = momen gabungan akibat beban mati (*dead load*) dan momen akibat beban hidup (*live load*).

Penentuan Awal Profil Baja

Untuk penentuan awal profil baja diawali dengan asumsi bahwa hanya profil baja yang bekerja untuk menahan berat struktur.

tegangan luluh baja $F_y = 240$ MPa

tegangan dasar izin $f_s = 2/3 \times F_y = 160$ MPa; berdasarkan SNI 1729:2020.

$$\text{modulus penampang } Z_x \text{ perlu} = \frac{M_{Total}}{f_s} = \frac{225,063 \cdot 10^6}{160} = 1406643,75 \text{ mm}^3 \\ = 1406,644 \text{ cm}^3$$

Berdasarkan data dari katalog tabel profil baja Gunung Garuda (1986) dipilih profil I asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dengan $Z_x = 1010 \text{ cm}^3 < Z_{x \text{ perlu}} = 1406,644 \text{ cm}^3$. Kemudian, berdasarkan tabel profil baja Gunung Garuda (1986) dipilih profil I kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ (dibentuk dari profil I asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$) dengan $Z_x = 1591,4 \text{ cm}^3 > Z_{x \text{ perlu}} = 1406,644 \text{ cm}^3$.

Selanjutnya profil IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dan profil IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$, ditinjau sebagai struktur balok baja komposit dengan menganalisis: cek tegangan, kekuatan momen (*moment strength*), kontrol defleksi jangka pendek dan jangka panjang, dan kebutuhan pengekang lateral terhadap tekuk (*buckling*).

Peninjauan Struktur Balok Baja Komposit IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$

Balok baja komposit IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$, dan dek baja ringan tegak lurus profil balok IWF. Tentukan lebar efektif pelat beton (b_E). Pilih yang terpendek dari tiga alternatif di bawah ini:

$$b_E = \frac{1}{4} \times (\text{panjang bentang}) = \frac{1}{4} \times (700) = 175 \text{ cm (ok)}$$

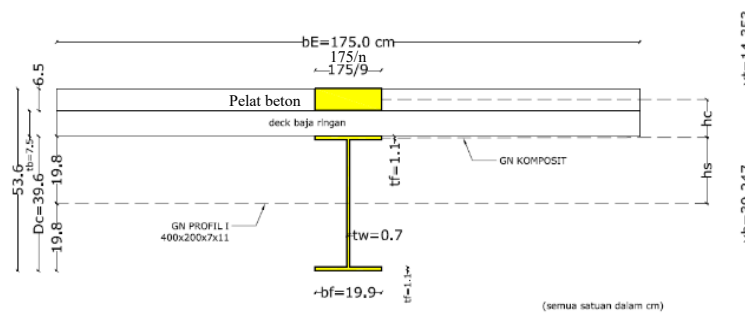
$$b_E = b_o = 300 \text{ cm}$$

$$b_E = b_f + 16 \cdot t_s = 119,9 + (16 \times 14) = 243,9 \text{ cm}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,1 \times 10^5}{23500} = 8,94 \approx 9$$

dengan b_E = lebar efektif pelat beton, b_o = jarak antara balok, b_f = lebar sayap profil baja, t_s = tebal slab beton, n = rasio modular.

Struktur balok baja komposit IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$, dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampang komposit dengan nilai n balok profil baja IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$

Periksa Gambar 3.

$$A_p = \frac{175}{9} \times 6,5 = 126,389 \text{ cm}^2$$

$$I_p = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{\left(\frac{175}{9}\right) \times (6,5)^3}{12} = 444,994 \text{ cm}^4$$

Pemeriksaan tampang komposit dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Pemeriksaan tampang komposit balok profil baja IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dengan nilai n

Bagian	A (cm ²)	Y (cm)	A×Y (cm ³)	h (cm)	A×h ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
Pelat Beton	126,389	50,35	6363,686	11,103	15580,807	444,994
IWF $400 \times 200 \times 7 \times 11$	72,160	19,80	1428,768	19,447	2728,888	20000
Total	198,549		7792,454		18309,695	20444,994

$$y_b =$$

$$\frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{7792,454}{198,549} = 39,247 \text{ cm}$$

$$y_t = 53,6 - 39,247 = 14,353 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned}
 h_c &= y_t - \frac{6,5}{2} = 14,353 - \frac{6,5}{2} = 11,103 \text{ cm} \\
 h_s &= y_b - \frac{D_c}{2} = 39,247 - 19,8 = 19,447 \text{ cm} \\
 I_c &= \sum A \times h^2 + \sum I_o = 18309,695 + 20444,994 = 383754,689 \text{ cm}^4 \\
 Z_{bc} &= \frac{I_c}{Y_b} = \frac{38754,689}{39,247} = 987,456 \text{ cm}^3 \\
 Z_c &= \frac{I_c}{Y_t} = \frac{38754,689}{14,353} = 2700,111 \text{ cm}^3 \\
 Z_{te} &= \frac{I_c}{(39,6-39,247)} = \frac{38754,689}{0,353} = 38754,338 \text{ cm}^3 \\
 &= 1818 \text{ cm}^3 > Z_{bc} = 987,456 \text{ cm}^3 \quad (G)
 \end{aligned}$$

dengan A_p = luasan pelat beton, I_p = Inersia pelat beton, A = luasan bagianampang, Y = jarak lengan penampang ke bagian sayap bawah profil baja I, I_c = Inersia tampang komposit, Z_{bc} = tampang modulus baja di serat sayap bawah, Z_c = tampang modulus beton di permukaan pelat beton, Z_{te} = tampang modulus baja di permukaan sayap atas baja.

Cek Tegangan Struktur Balok Baja Komposit

Tegangan beton:

$$\begin{aligned}
 f_c &= -\frac{M_{Total}}{n \times Z_c} = -\frac{196,055}{9 \times (2700,111 \cdot 10^{-3})} = | -9,261 | \text{ MPa} \leq | -0,45 \cdot f'_c | \quad (f'_c = 0,45 \cdot f'_c, \text{ berdasarkan AISC 2016}) \\
 &= | -9,261 | \text{ MPa} < | -11,25 | \text{ MPa} \quad (G)
 \end{aligned}$$

Modulus penampang, berdasarkan AISC 2016:

$$\begin{aligned}
 Z_{tr,max} &= (1,35 + 0,35 \times \frac{M_{LL}}{M_{DL}}) \times Z_x \\
 &= (1,35 + 0,35 \times \frac{126,562}{98,501}) \times 1010 \\
 &= 1818 \text{ cm}^3 > Z_{bc} = 987,456 \text{ cm}^3 \quad (G)
 \end{aligned}$$

kesimpulan: jika tampang modulus baja di serat sayap bawah $Z_{bc} = 987,456 \text{ cm}^3$ tidak mencapai batas limit $Z_{tr,max} = 1818 \text{ cm}^3$, maka tidak diperlukan perancah/scaffolding.

Tegangan baja di serat flange bawah:

$$\begin{aligned}
 f_{bc} &= \frac{M_{Total}}{Z_{bc}} = \frac{225,063}{(987,456 \cdot 10^{-3})} \\
 &= 227,922 \text{ MPa} > f_s = 160 \text{ MPa} \quad (N.G)
 \end{aligned}$$

Tegangan baja di serat flange atas:

$$\begin{aligned}
 f_{tc} &= \frac{M_{Total}}{Z_{te}} = \frac{225,063}{(38754,336 \cdot 10^{-3})} \\
 &= 5,807 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa} \quad (G)
 \end{aligned}$$

Cek Kekuatan Momen (Moment Strength) Tampang Komposit

$$M_u = 1,2M_{DL} + 1,6M_{LL}$$

$$= 1,2 \times 98,501 + 1,6 \times 126,662 = 320,700 \text{ kN.m}$$

$$M_{n,perlu} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{320,700}{0,9} = 356,333 \text{ kN.m}$$

Periksa Gambar 4.

$$\begin{aligned}
 C &= 0,85 \times f'_c \times b_E \times a \\
 &= 0,85 \times 25 \times 1750 \times a = 37187,5 a \text{ N}
 \end{aligned}$$

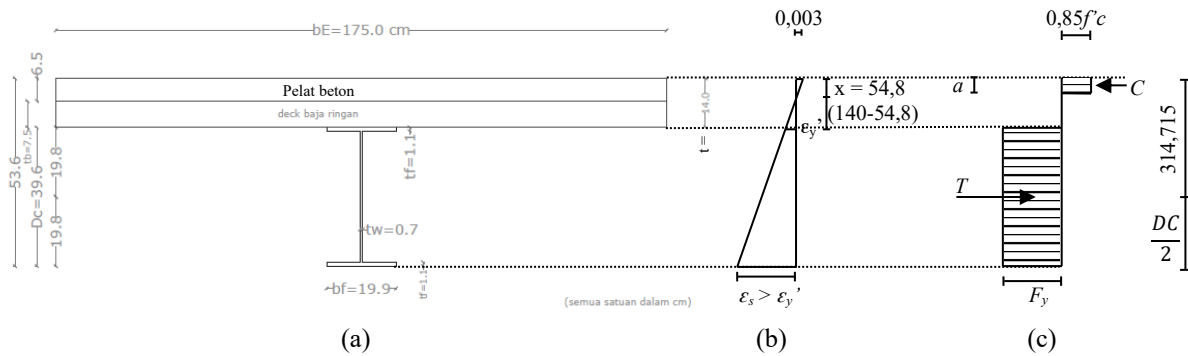
$$\begin{aligned}
 T &= A_s \times F_y \\
 &= 7216 \times 240 = 1731840 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$C = T$$

$$37187,5 a = 1731840$$

$$a = 46,57 \text{ mm} < 140 \text{ mm} \rightarrow x = \frac{46,57}{0,85} = 54,8 \text{ mm}$$

Sumbu netral terletak pada pelat beton, untuk kasus ini, regangan (*strain*) pada puncak penampang baja seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Tampang komposit dengan balok profil baja IWF asli 400×200×7×11, (b) Regangan (*strain*), dan (c) Tegangan yang terjadi diperkirakan pada kekuatan M_n , untuk $x < t$

$$\varepsilon'_y = \frac{0,003}{54,8} \times (140 - 54,8) = 0,0047 > \varepsilon_y = \frac{F_y}{E_s} = \frac{240}{2.10^5} = 0,0012$$

Menunjukkan keseluruhanampangbajasurehasudah luluh.

$$\text{Lengan} = \frac{DC}{2} + t - \frac{a}{20} = 198 + 140 - \frac{46,57}{2} = 314,715 \text{ mm}$$

$$M_n = T \times \text{lengan} = 1731840 \times 314,715 = 545036025,6 \text{ N.mm} \\ = 545,036 \text{ kN.m} > M_{n\text{perlu}} = 356,333 \text{ kN.m}$$

dengan M_u = momen ultimit, $M_n\text{perlu}$ = momen nominal yang diperlukan, M_u = momen ultimit, ϕ = faktor reduksi kekuatan (*strength reduction factor*), C = gaya desak pada pelat beton, x = jarak dari permukaan pelat beton ke garis netral, a = x dikali 0,85, T = gaya tarik yang terjadi di tulangan baja, A_s = luasan profil baja, F_y = mutu profil baja, ε'_y = regangan baja di permukaan sayap atas, ε_y = regangan leleh (*yield strain*), E_s = modulus elastis baja, DC = tinggi profil baja, t = tinggi pelat beton, M_n = momen nominal.

Kontrol Defleksi di Tengah Bentang Jangka Pendek Untuk Nilai Rasio Modular $n = 9$ Tampang Komposit

Defleksi akibat Beban mati:

$$\Delta_{DL} = \frac{5 \times W_{DL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_s} \\ = \frac{5 \times 14,009.10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1 \times 10^6 \times 20000} = 1,374 \text{ cm}$$

Defleksi akibat Beban hidup:

$$\Delta_{LL} = \frac{5 \times W_{LL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} \\ = \frac{5 \times 18,000.10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1.10^6 \times 38754,689} = 0,911 \text{ cm}$$

Defleksi total = $\Delta_{DL} + \Delta_{LL}$

$$\Delta_T = 1,374 + 0,911 = 2,285 \text{ cm} \leq \frac{L}{360} \\ > 2,083 \text{ cm (N.G)}$$

dengan Δ_{DL} = defleksi di tengah beban, akibat beban mati tersebar merata, L = panjang bentang balok komposit untuk struktur *simple beam* (m), W_{DL} = berat beban mati merata (kN/m), Δ_{LL} = defleksi di tengah beban, akibat beban hidup tersebar merata, W_{LL} = berat beban hidup merata (kN/m), E_s = modulus elastis baja, E_c = modulus elastis beton, I_s = momen inersia baja, I_c = momen inersia tampang struktur komposit, Δ_T = defleksi total, Δ_{DL} = defleksi akibat beban mati tersebar merata, Δ_{LL} = defleksi akibat beban hidup tersebar merata.

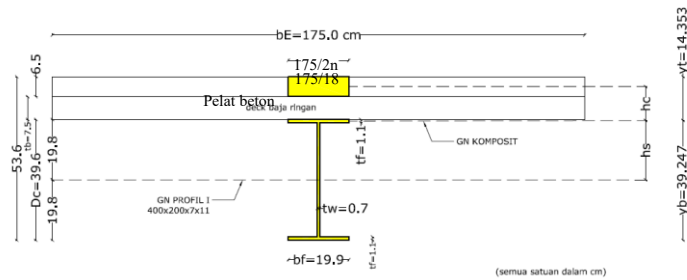
Kontrol Defleksi di Tengah Bentang Jangka Panjang Untuk Rasio Modular $2n = 2 \times 9 = 18$ Tampang Komposit

Nilai rasio modular untuk $2n$ diperoleh berdasarkan:

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,1 \times 10^5}{23500} = 8,94 \approx 9, \quad 2n = 2 \times 9 = 18$$

dengan n = rasio modular, E_c = modulus elastis beton, E_s = modulus elastis baja.

Struktur balok baja komposit IWF asli 400×200×7×11, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Tampang komposit dengan rasio modular 2n balok profil baja IWF asli 400×200×7×11

Periksa Gambar 5.

Dek baja ringan dengan *rib* tegak lurus profil balok baja IWF asli 400×200×7×11

$$A_p = \frac{175}{18} \times 6,5 = 63,194 \text{ cm}^2$$

$$I_p = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{\left(\frac{175}{8}\right) \times (6,5)^3}{12} = 222,497 \text{ cm}^4$$

Jarak y terhadap permukaan sayap (*flange*) bagian bawah

Pemeriksaan tampang komposit dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pemeriksaan tampang komposit balok profil baja IWF asli 400×200×7×11 dengan rasio modular 2n

Bagian	A (cm ²)	Y (cm)	A×Y (cm ³)	h (cm)	A×h ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
Pelat Beton	63,194	50,35	3181,818	16,037	16252,372	222,497
IWF 400×200×7×11	72,160	19,80	1428,768	14,263	14679,737	20000
Total	135,354		4610,586		30932,309	20222,497

$$y_b = \frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{4610,586}{135,354} = 34,063 \text{ cm}$$

$$y_t = 53,6 - 34,063 = 19,537 \text{ cm}$$

$$h_c = 19,537 - \frac{6,5}{2} = 16,037 \text{ cm}$$

$$h_s = 34,063 - 19,8 = 14,263 \text{ cm}$$

$$I_c = \sum A \cdot h^2 + \sum I_o = 30932,309 + 20222,497 = 51154,806 \text{ cm}^4$$

Untuk perhitungan defleksi jangka panjang, defleksi akibat beban mati menggunakan Inersia komposit $I_c = 51154,806 \text{ cm}^4$, dan untuk defleksi akibat beban hidup menggunakan Inersia komposit $I_c = 38754,689 \text{ cm}^4$ (rasio modular n).

Defleksi akibat beban mati:

$$\begin{aligned} \Delta_{DL} &= \frac{5 \times w_{DL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} \\ &= \frac{5 \times 14,009 \cdot 10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 51154,806} = 0,537 \text{ cm} \end{aligned}$$

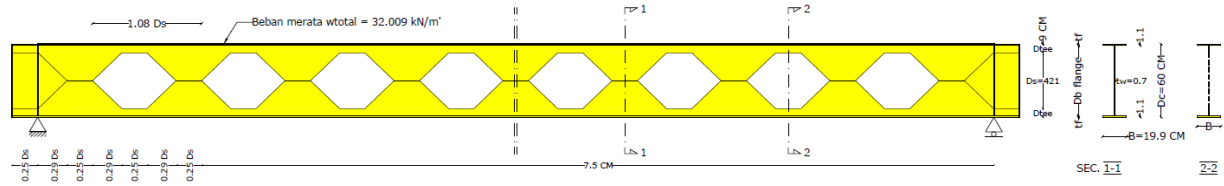
Defleksi akibat beban hidup:

$$\begin{aligned} \Delta_{LL} &= \frac{5 \times w_{LL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} \\ &= \frac{5 \times 18,000 \cdot 10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 38754,689} = 0,911 \text{ cm} \end{aligned}$$

Defleksi total = $\Delta_{DL} + \Delta_{LL}$

$$\begin{aligned} \Delta_T &= 0,537 + 0,911 = 1,448 \text{ cm} \leq \frac{L}{360} \\ &< 2,083 \text{ cm} \quad (G) \end{aligned}$$

Dikarenakan tegangan baja diserat sayap (*flange*) bawah lebih besar dari tegangan izin, dan defleksi total lebih besar dari defleksi izin menyebabkan struktur komposit balok profil baja IWF asli 400×200×7×11 tidak aman. Selanjutnya akan ditinjau struktur komposit balok profil baja IWF kastela 600×199×7×11 seperti pada Gambar 6, yang berasal dari balok baja profil IWF asli 400×200×7×11.

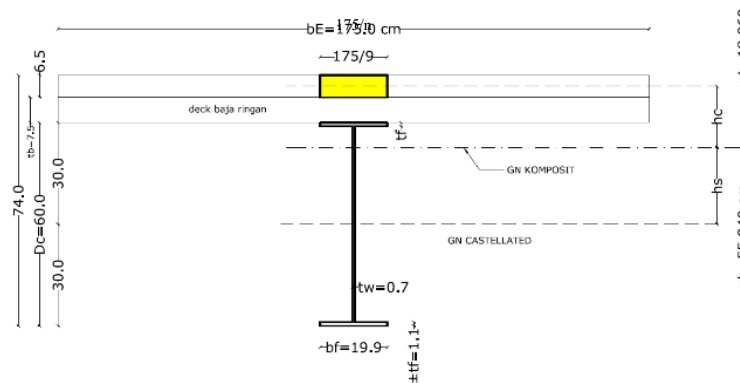


0,25 Ds = 105,25 mm ; 0,29 Ds = 122,09 mm ; Ds = 421 mm

Gambar 6. Balok profil baja IWF kastela 600×199×7×11

A. Peninjauan Struktur Komposit Balok Baja Profil I Kastela 600×199×7×11

Struktur komposit balok baja IWF kastela 600×199×7×11, berasal dari balok baja profil IWF asli 400×200×7×11. Periksa Gambar 7.



Gambar 7. Tampang komposit dengan rasio modular n balok profil baja IWF kastela 600×199×7×11

$$A_p = \frac{175}{9} \times 6,5 = 126,389 \text{ cm}^2$$

$$I_p = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{\left(\frac{175}{9}\right) \times (6,5)^3}{12} = 444,994 \text{ cm}^4$$

Pemeriksaan tampang komposit balok IWF kastela dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pemeriksaan tampang komposit balok profil baja IWF kastela 600×199×7×11 dengan rasio modular n

Bagian	A (cm ²)	Y (cm)	A×Y (cm ³)	h (cm)	A×h ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
Pelat Beton	126,389	70,75	8942,022	14,810	27721,670	444,994
Profil IWF Kastela 600×199×7×11	72,160	30	2164,800	25,940	48555,281	47743
Total	198,549		11106,822		76276,951	48187,994

Pemeriksaan tampang komposit balok IWF kastela dapat dilihat pada Tabel 5.

$$y_b = \frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{11106,822}{198,549} = 55,940 \text{ cm}$$

$$y_t = 74 - 55,940 = 18,060 \text{ cm}$$

$$h_c = 18,060 - \frac{6,5}{2} = 14,810 \text{ cm}$$

$$h_s = 55,940 - 30 = 25,940 \text{ cm}$$

$$I_c = \sum A \times h^2 + \sum I_o = 76276,951 + 48187,994 = 124464,945 \text{ cm}^4$$

$$Z_{bc} = \frac{I_c}{Y_b} = \frac{124464,945}{55,940} = 2224,972 \text{ cm}^3$$

$$Z_c = \frac{I_c}{Y_t} = \frac{124464,945}{18,060} = 6891,747 \text{ cm}^3$$

$$Z_{te} = \frac{I_c}{(60-55,940)} = \frac{124464,945}{(60-55,940)} = 30656,390 \text{ cm}^3$$

Cek Tegangan Struktur Komposit

Tegangan beton:

$$f_c = -\frac{M_{Total}}{n \times Z_c} = -\frac{225,063}{9 \times (6891,747 \cdot 10^{-3})}$$

$$= | -3,629 | \text{ MPa} \leq | -0,45 \cdot f'_c | \quad (f_c = 0,45 f'_c, \text{ berdasarkan AISC 2016})$$

$$= | -3,629 | \text{ MPa} < | -11,25 | \text{ MPa} \quad (G)$$

Modulus penampang, berdasarkan AISC 2016:

$$Z_{tr,mak} = (1,35 + 0,35 \times \frac{M_{LL}}{M_{DL}}) \times Z_x$$

$$= (1,35 + 0,35 \times \frac{126,562}{98,501}) \times 1591,4$$

$$= 2864,52 \text{ cm}^3 > Z_{bc} = 2224,972 \text{ cm}^3 \quad (G)$$

kesimpulan: jika tampang modulus baja di serat sayap bawah $Z_{bc} = 2224,972 \text{ cm}^3$ tidak mencapai batas limit $Z_{tr,mak} = 2864,52 \text{ cm}^3$, maka tidak diperlukan perancah/scaffolding.

Tegangan baja di serat flange bawah:

$$f_{bc} = \frac{M_{Total}}{Z_{bc}} = \frac{225,063}{(2224,972 \cdot 10^{-3})} = 110,153 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa} \quad (G)$$

Tegangan baja di serat flange atas:

$$f_{tc} = \frac{M_{Total}}{Z_{te}} = \frac{225,063}{(30656,390 \cdot 10^{-3})} = 7,341 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa} \quad (G)$$

Cek Kekuatan Momen (*Moment Strength*) Tampang Komposit $M_u = 1,2M_{DL} + 1,6M_{LL}$

$$= 1,2 \times 98,501 + 1,6 \times 126,662 = 320,700 \text{ kN.m}$$

$$M_{n,perlu} = \frac{M_u}{\phi} = \frac{320,700}{0,9} = 356,333 \text{ kN.m}$$

Periksa Gambar 4.

$$C = 0,85 \times f'_c \times b_E \times a$$

$$= 0,85 \times 25 \times 1750 \times a = 37187,5 a \text{ N}$$

$$T = A_s \times f_y$$

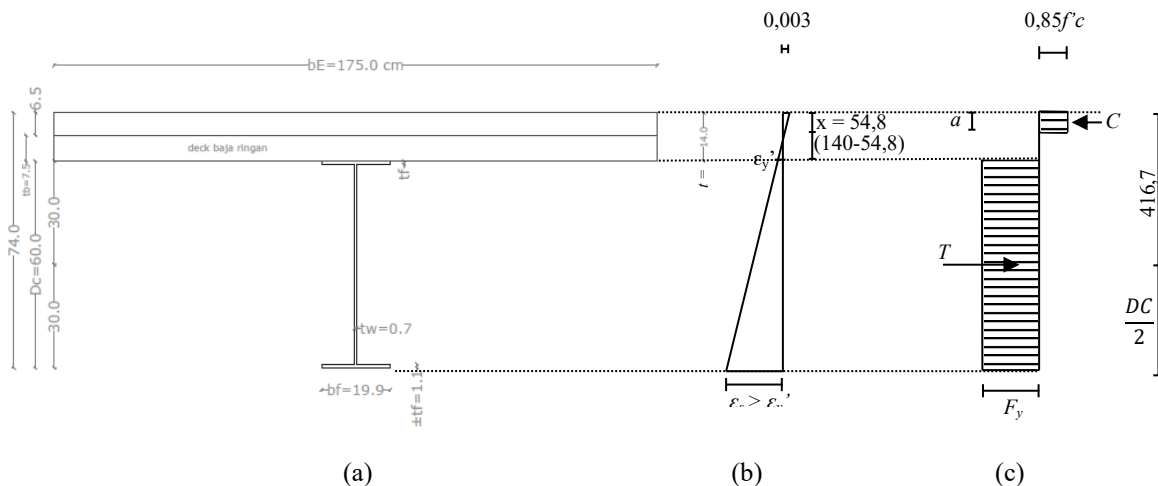
$$= 7216 \cdot 240 = 1731840 \text{ N}$$

$$C = T$$

$$37187,5 a = 1731840$$

$$a = 46,57 \text{ mm} < 140 \text{ mm} \rightarrow x = \frac{46,57}{0,85} = 54,8 \text{ mm}$$

Sumbu netral terletak pada pelat beton, untuk kasus ini, regangan (*strain*) pada puncak penampang baja seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. (a) Tampang komposit dengan balok profil baja IWF kastela 600x199x7x11
(b) Regangan (*strain*), dan (c) Tegangan yang terjadi diperkirakan pada kekuatan M_n , untuk $x < t$

$$\epsilon_y' = \frac{0,003}{54,8} \times (140 - 54,8) = 0,0047 > \epsilon_y = \frac{F_y}{E_s} = \frac{240}{2 \times 10^5} = 0,0012$$

Menunjukkan keseluruhan penampang baja sudah luluh.

$$\text{Lengan} = \frac{DC}{2} + t - \frac{a}{20} = 300 + 140 - \frac{46,57}{2} = 416,715 \text{ mm}$$

$$M_n = T \times \text{lengan} = 1731840 \times 416,715 = 721683705,6 \text{ N.mm}$$

$$= 721,684 \text{ kN.m} > M_{n \text{ perlu}} = 356,333 \text{ kN.m}$$

Kontrol Defleksi di Tengah Bentang Jangka Pendek Untuk Rasio Modular $n = 9$ Struktur Komposit

Defleksi akibat Beban Mati:

$$\Delta_{DL} = \frac{5 \times w_{DL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_s} = \frac{5 \times 14,009.10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1.10^6 \times 47743} = 0,576 \text{ cm}$$

Defleksi akibat Beban Hidup:

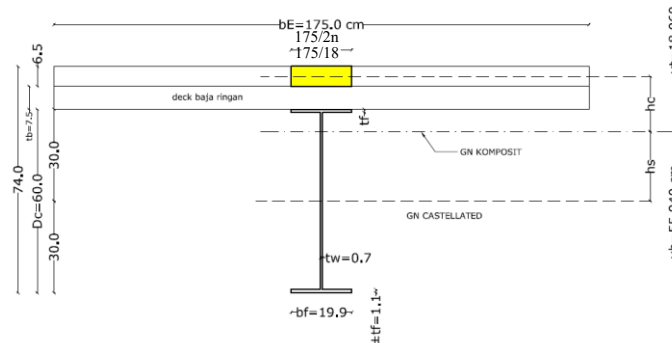
$$\Delta_{LL} = \frac{5 \times w_{LL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} = \frac{5 \times 18,000.10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1.10^6 \times 124464,945} = 0,284 \text{ cm}$$

Defleksi total = $\Delta_{DL} + \Delta_{LL}$

$$\Delta_T = 0,576 + 0,284 = 0,860 \text{ cm} \leq \frac{L}{360} < 2,083 \text{ cm} \quad (G)$$

Tegangan yang terjadi dan defleksi dengan nilai rasio n masih di bawah tegangan ijin dan defleksi ijin. Kesimpulan struktur komposit dengan balok baja profil IWF kastela $600 \times 200 \times 7 \times 11$ dalam kondisi aman.

Kontrol Defleksi di Tengah Bentang Panjang Untuk nilai $2n = 2 \times 9 = 18$ Struktur Komposit



Gambar 9. Tampang komposit dengan nilai $2n$ balok profil baja IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$

Periksa Gambar 9.

Dek baja ringan dengan rib tegak lurus profil balok IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$

$$A_p = \frac{175}{18} \times 6,5 = 63,194 \text{ cm}^2$$

$$I_p = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{\left(\frac{175}{18}\right) \times (6,5)^3}{12} = 222,497 \text{ cm}^4$$

Jarak y terhadap permukaan sayap (*flange*) bagian bawah

Pemeriksaan tampang komposit dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Pemeriksaan tampang komposit balok profil baja IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ dengan nilai $2n$

Bagian	A (cm ²)	Y (cm)	A×Y (cm ³)	h (cm)	A×h ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
Pelat Beton	63,194	70,75	4470,976	21,725	29825,028	222,497
Profil IWF Kastela 600×199×7×11	72,160	30	2164,800	19,025	26118,357	47743
Total	135,354		6635,776		55944,385	47965,497

$$\frac{\sum Ay}{\sum A} = \frac{4610,586}{135,354} = 49,025 \text{ cm}$$

$$y_t = 74 - 49,025 = 24,975 \text{ cm}$$

$$h_c = 24,975 - \frac{6,5}{2} = 21,725 \text{ cm}$$

$$h_s = 49,025 - 30 = 19,025 \text{ cm}$$

$$I_c = \sum A \cdot h^2 + \sum I_o = 55944,385 + 47965,497 = 103909,882 \text{ cm}^4$$

Defleksi akibat beban mati:

$$\begin{aligned}\Delta_{DL} &= \frac{5 \times w_{DL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} \\ &= \frac{5 \times 14,009 \cdot 10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 103909,882} = 0,264 \text{ cm}\end{aligned}$$

Defleksi akibat beban hidup:

$$\begin{aligned}\Delta_{LL} &= \frac{5 \times w_{LL} \times L^4}{384 \times E_s \times I_c} \\ &= \frac{5 \times 18,000 \cdot 10^{-4} \times 7500^4}{384 \times 2,1 \cdot 10^6 \times 124464,945} = 0,254 \text{ cm}\end{aligned}$$

Defleksi total = $\Delta_{DL} + \Delta_{LL}$

$$\Delta_T = 0,264 + 0,254 = 0,518 \text{ cm} \leq \frac{L}{360} < 2,083 \text{ cm} \quad (G)$$

Tegangan yang terjadi dan defleksi dengan nilai rasio modular 2n masih di bawah tegangan izin dan defleksi izin. Kesimpulan struktur komposit dengan balok baja profil IWF kastela 600×200×7×11 dalam kondisi aman.

Cek *Intermediate Stiffness*

Intermediate stiffness berfungsi untuk stabilitas profil IWF kastela. Perlu diperiksa gaya geser penyebab tekuk. Lokasi yang ditinjau adalah di tumpuan di daerah bukaan kastela. Gaya geser di tumpuan merupakan nilai maksimum. Untuk profil IWF kastela ini, bagian lubang ditutup dengan pelat baja dengan ukuran yang sama dengan sambungan las. Menurut persamaan (6), (7), dan (8) perhitungan *intermediate stiffness* adalah sebagai berikut:

$$\frac{h}{t_w} = \frac{57,8}{0,7} = 82,57 < 260 \quad (\text{ok})$$

$$f_v \leq \frac{F_y \times C_v}{2,89} \leq 0,40 F_y$$

Gaya geser kritis di tumpuan:

$$\begin{aligned}V_{tumpuan} &= \frac{1}{2} \times W_{Total} \times L \\ &= \frac{1}{2} \times 32,009 \times 7,5 = 120,034 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$f_v = \frac{V}{A_w} = \frac{120,034 \times 10^3}{7 \times 578} = 29,77 \text{ MPa} = 0,145 \times 29,77 = 4,31 \text{ ksi}$$

$$C_v = \frac{190}{h/t} \times \sqrt{\frac{k}{F_y}} = \frac{190}{82,57} \times \sqrt{\frac{5,34}{240 \times 0,145 \text{ (ksi)}}} = 0,901$$

$$\frac{F_y \times C_v}{2,89} = \frac{(240 \times 0,145) \times 0,901}{2,89} = 10,849 \text{ ksi}$$

$$0,40 F_y = 0,40 \times (240 \times 0,145) = 13,92 \text{ ksi}$$

$$4,31 \text{ ksi} < 10,849 \text{ ksi} < 13,92 \text{ ksi} \quad (\text{ok})$$

Berdasarkan analisis di atas, struktur profil IWF kastela tanpa menggunakan *intermediate stiffness*.

Tegangan geser yang terjadi di tumpuan, dengan bukaan kastela ditutup:

$$\begin{aligned}f_v &= \frac{V_{tumpuan}}{Dc \times t_w} \\ &= \frac{120,034 \cdot 10^3}{600 \times 7} = 28,580 \text{ MPa}\end{aligned}$$

dengan Dc = total tinggi badan profil baja

Tegangan geser yang diizinkan di tumpuan (untuk ASD, berdasarkan AISC 360-22):

$$\begin{aligned}F_v &= 0,4 \times F_y \\ &= 0,4 \times 240 = 96 \text{ MPa} > f_v = 28,580 \text{ MPa} \quad (G)\end{aligned}$$

Profil IWF kastela 600×199×7×11 aman terhadap tekuk lateral yang disebabkan oleh gaya geser yang terjadi di tumpuan.

Untuk pertimbangan keamanan, dari tumpuan ke tengah bentang dengan jarak setiap 1 m dipasang pelat pengaku tegak dengan estimasi $2 \times (578 \times 95 \times 7)$ mm, dengan ukuran las penuh $a = 6$ mm.

Pembahasan

Dalam desain awal profil baja, modulus penampang, $Z_{x\text{ perlu}} = 1406,644 \text{ cm}^3$. Bila digunakan balok baja IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$, dengan $Z_x = 1010 \text{ cm}^3$, tidak memenuhi desain kriteria modulus penampang. Kemudian dipilih balok baja profil IWF kastela $600 \times 200 \times 7 \times 11$ (dibentuk dari profil IWF asli $400 \times 200 \times 7 \times 11$), dengan $Z_x = 1591,4 \text{ cm}^3$. Modulus penampang balok baja profil IWF kastela ini lebih kecil dari modulus penampang, $Z_{x\text{ perlu}}$, sehingga memenuhi desain kriteria modulus penampang. Modulus penampang baja arah x pada balok baja profil IWF kastela dibandingkan baja IWF asli ada penambahan sebesar 61,1%. Balok baja profil IWF dibandingkan baja IWF asli ada penambahan ketinggian sebesar 50%.

Momen inersia arah x baja profil IWF kastela, $I_c = 124464,945 \text{ cm}^4$ dan momen inersia arah x baja profil IWF asli, $I_c = 38754,689 \text{ cm}^4$, ada penambahan momen inersia sebesar 221,16%. Tegangan-tegangan yang terjadi pada balok baja komposit IWF asli: tegangan di permukaan pelat beton, $f_c = -9,261 \text{ MPa}$ (tegangan desak), tegangan baja di serat *flange* bawah, $f_{bc} = 227,922 \text{ MPa} > f_s = 160 \text{ MPa}$ (tidak aman), tegangan baja di serat *flange* atas, $f_{tc} = 5,807 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa}$ (aman). Tegangan-tegangan yang terjadi pada balok baja komposit IWF kastela: tegangan di permukaan pelat beton, $f_c = -3,629 \text{ MPa}$ (tegangan desak), tegangan baja di serat *flange* bawah, $f_{bc} = 110,153 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa}$ (aman), tegangan baja di serat *flange* atas, $f_{tc} = 7,341 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa}$ (aman). Struktur balok baja komposit IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$ dalam kondisi aman.

Berdasarkan analisis kekuatan momen (*moment strength*) pada balok baja komposit IWF kastela, $M_n = 721,684 \text{ kN.m} > M_{n\text{ perlu}} = 356,333 \text{ kN.m}$, dan balok baja komposit IWF asli, $M_n = 545,036 \text{ kN.m} > M_{n\text{ perlu}} = 356,333 \text{ kN.m}$, ada penambahan kekuatan momen (*moment strength*) sebesar 132,41%.

Hasil analisis defleksi jangka pendek dengan nilai rasio modular n, dengan $n = 9$ pada balok baja komposit IWF asli: defleksi beban mati, $\Delta_{DL} = 1,374 \text{ cm}$, defleksi beban hidup, $\Delta_{DL} = 0,911 \text{ cm}$ dan defleksi total, $\Delta_{total} = 2,285 \text{ cm} > \Delta_{ijin} = 2,083 \text{ cm}$ (*N.G*, tidak aman) berarti struktur tidak aman. Sedangkan analisis defleksi jangka panjang dengan nilai rasio modular $2n$, dengan $2 \times 9 = 18$ pada balok baja komposit IWF asli: defleksi beban mati, $\Delta_{DL} = 0,537 \text{ cm}$, defleksi beban hidup, $\Delta_{DL} = 0,911 \text{ cm}$ dan defleksi total, $\Delta_{total} = 1,448 \text{ cm} < \Delta_{ijin} = 2,083 \text{ cm}$ (*G*, aman) berarti struktur aman. Analisis defleksi jangka pendek pada balok baja komposit IWF kastela $600 \times 199 \times 7 \times 11$: defleksi beban mati, $\Delta_{DL} = 0,576 \text{ cm}$, defleksi beban hidup, $\Delta_{DL} = 0,284 \text{ cm}$ dan defleksi total, $\Delta_{total} = 0,86 \text{ cm} < \Delta_{ijin} = 2,083 \text{ cm}$, berarti struktur komposit profil IWF kastela dalam kondisi aman. Sedangkan analisis defleksi jangka panjang pada balok baja komposit IWF kastela: defleksi beban mati, $\Delta_{DL} = 0,264 \text{ cm}$, defleksi beban hidup, $\Delta_{DL} = 0,254 \text{ cm}$ dan defleksi total, $\Delta_{total} = 0,518 \text{ cm} < \Delta_{ijin} = 2,083 \text{ cm}$ (*G*, aman), berarti struktur komposit profil IWF kastela dalam kondisi aman.

Temuan dari diskusi di atas ternyata tampang struktur balok baja komposit IWF kastela lebih andal dari profil aslinya. Berat yang relatif sama antara balok baja komposit IWF kastela profil aslinya. Tegangan-tegangan yang terjadi pada balok baja komposit IWF asli tidak aman, sedangkan struktur balok baja komposit IWF kastela dalam kondisi aman. Defleksi jangka pendek balok baja komposit IWF asli tidak memenuhi persyaratan, defleksi jangka panjang memenuhi persyaratan. Defleksi jangka pendek dan jangka panjang pada balok baja komposit IWF kastela memenuhi persyaratan. Sehingga kekuatan struktur balok baja komposit IWF kastela memiliki keunggulan dibandingkan dengan balok baja komposit IWF asli, hal ini sudah sesuai (*in line*) dengan studi Jacob et al (2024) bahwa rasio kekuatan balok kastela yang meningkat menawarkan keunggulan yang signifikan dalam pengurangan berat, sementara kapasitas struktur membaik atau dipertahankan.

Berdasarkan analisis kekuatan momen (*moment strength*) ada penambahan kekuatan momen (*moment strength*) sebesar 132,41%, sudah sesuai dengan studi Hadeed (2019) bahwa nilai kapasitas dukungan beban dari masing-masing balok baja komposit IWF kastela meningkat dibandingkan dengan balok baja komposit IWF asli karena ada peningkatan kekakuan (*stiffness*) pada balok baja setelah kastela, dan nilai defleksi bentang tengah pada beban layan turun pada masing-masing benda uji dibandingkan dengan balok baja utuh yang asli karena meningkatnya dimensi penampang dan kekakuan setelah proses kastela.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari temuan di bagian diskusi *paper* ini, ada empat kesimpulan yang penting dalam studi ini.

1. Modulus tampang baja, modulus tampang komposit dan momen inersia tampang komposit balok baja profil IWF kastela lebih besar dari baja profil aslinya.
2. Dari nilai tegangan-tegangan yang terjadi tampang komposit balok baja profil IWF kastela lebih kecil dari nilai izin yang disyaratkan dan berarti struktur dalam kondisi aman. Sedangkan dengan parameter yang sama tampang komposit profil IWF asli menunjukkan kondisi tidak aman. Ada keunggulan dari kekuatan tampang komposit balok baja profil IWF kastela dibandingkan baja profil aslinya.
3. Kekuatan momen (*moment strength*) ada penambahan kekuatan momen (*moment strength*) sebesar 132,41%.

4. Defleksi jangka pendek balok baja komposit IWF asli tidak memenuhi persyaratan, defleksi jangka panjang pada balok baja komposit IWF kastela lebih kecil daripada defleksi baja profil aslinya. Defleksi jangka pendek dan jangka panjang pada balok baja komposit IWF kastela memenuhi persyaratan.

Untuk mengembangkan *paper* ini ada empat usulan saran, yakni:

1. Perlu adanya studi lanjut untuk mencari beban hidup maksimum yang terjadi dari tampang komposit baja profil IWF kastela. Dengan kekuatan tarik dasar profil baja yang diijinkan dan modulus tampang komposit kastela akan diperoleh nilai momen total. Momen beban hidup akan diperoleh dari momen total dikurangi momen mati, karena konstruksi balok sederhana (*simple beam*), beban hidup merata dapat dihitung. Dengan cara ini akan diperoleh beban merata maksimum yang dapat didukung oleh tampang komposit balok baja profil IWF kastela.
2. Perlu adanya studi pembandingan antara pendekatan evaluasi analisis dengan uji tes laboratorium terkait nilai defleksi yang terjadi pada struktur komposit balok baja profil IWF kastela.
3. Perlu adanya studi balok kastela menerus dengan kombinasi beban merata dan beban terpusat.
4. Untuk defleksi jangka panjang perlu ditinjau pengaruh susut dan rangkai.

DAFTAR PUSTAKA

- Aljboury, K.H.S., & Al Shareef, N.H. (2025). The flexural behavior composite hybrid castellated I-beam. *Kufa Journal of Engineering*, 16(2), 135-149. <https://doi.org/10.25130/tjes.31.2.4>
- American Institute of Steel Constuction (AISC) (2016). ANSI/AISC 360-16. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, Inc.
- American Institute of Steel Constuction (AISC) (2022). ANSI/AISC 360-22. *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, Inc.
- Arifa, V., & Priyanka, D.P. (2024). Numerical analysis of corrugated castellated beam with and without openings. *Journal Civil and Construction Engineering*, 10(2), 15-24.
- Aswad, N. H., Pongsimpin, D., Asikin, T., Rachman, R. M., Tachrir., & Tumpu, M. (2025). Analysis of the effect of high opening variation on the performance of castellated beams using the reduced beam section method. *Journal Engineering, Technology Applied Science Research*, 15(2), 22059-22064. <https://doi.org/10.48084/etasr.10260>
- Au, S., Yu, Y., Luo, W., Shen, W., & Wu, Y. (2024). Evaluation of ultimate bearing capacity of large-scale section: experimental verification and numerical simulation. *Journal Construction Steel Research*, 212, 108220. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.108220>
- Badan Standardisasi Nasional (2020). Spesifikasi Untuk Bangunan Gedung Baja Struktural (SNI 1729:2020). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>
- Feyissa, A., & Kenea, G. (2022). Performance of shear connector in composite slab and steel beam with reentrant and open trough profiled steel sheeting. *Advance in Civil Engineering*, 2022(3), 1-14. <https://doi.org/10.1155/2022/5010501>
- Hadeed, S. M., & Alshimmeri, A.J.H. (2019). Comparative study structural behaviour for rolled and castellated steel beams with different strengthening techniques. *Civil Engineering Journal*, 5(6), 1384-1394. <https://doi.org/10.1155/2022/5010501>
- Hosseinpour M. Y., & Sharifi, H.S. (2020), Neural network application for distortional buckling capacity assessment of castellated steel beams. *Journal Structures*, 27, 1174-1183. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.027>
- Ibrahim, T.H., Allawi, A.A, & El-Zohairy, A. (2022). impact behavior of composite reinforced concrete beam with pultruded I-GFRF beam. *Materials*, 15(2), 441. <https://doi.org/10.3390/ma15020441>
- Islam, M.A., & Islam, M.S. (2023). Numerical analysis of castellated beam with various web openings for marine structures. *Proceeding of the 13th International Conference on Marine Technology (MARTEC 2022)*, 69, 1-6. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4445386>
- Jacob, P. A., Aiswaya, S., Johny, B., Joy, B., & Thomas, T. C. (2024). Finite element analysis of castellated beams with different web openings. *Applied Mechanics and Materials*, 920, 77-84. <https://doi.org/10.4028/p-FeuCb8>
- Muthukkumaren, C., Karthikeyan, S., & Satheesh K.K.R.P. (2023). Structural behaviour of castellated beam: A review. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT) 2023*, 3(1), 83-95. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-9011>
- PT. Gunung Garuda. (1986). *Product Catalogue Steel is Our Business*. Karawang: PT. Gunung Garuda. www.gictsteel.com.
- Rabi, M., Jweihan, Y.S., Abarkan, I., Ferreira, F. P. V., Shamass, R., Limbachiya, V., Tsavdaridis, K. D., & Santos, L. F. (2024). Machine learning-driven web post buckling resistance prediction for high-strength steel beams with elliptically-based web openings. *Results in Engineering*, 24, 101749. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101749>
- Salmon, C.G., Johnson, E.J., & Malhas, F.A. (2009). *Steel Structures Design and Behavior* (5th ed.). Harper & Row.

