

ANALISIS PERBANDINGAN STRUKTUR KOMPOSIT BALOK BAJA BETON TANPA DAN DENGAN PRATEGANG

Theresia Lu Theopuspitasari^{a*} dan Yoyong Afriadi^b

^a*Program Studi Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

^b Program Studi Teknik Sipil Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta, Indonesia

ABSTRAK

Permasalahan yang diangkat pada *paper* ini adalah perubahan beban hidup pada bagian struktur gedung sistem komposit balok baja, *deck* baja ringan dan pelat beton. Beban hidup struktur *existing* awalnya $4,0 \text{ kN/m}^2$. Saat *finishing* beban hidup menjadi $6,0 \text{ kN/m}^2$, mengakibatkan tegangan tarik baja serat bawah melebihi tegangan ijin baja. Tujuan studi ini untuk mengevaluasi dan mendesain kembali bagian struktur sehingga dapat melayani perubahan beban hidup yang diperlukan. Usulan solusi untuk mengatasi permasalahan dengan penambahan dua eksternal *strand tendon* dengan konfigurasi lurus di bagian bawah baja profil *existing*. Spesifikasi material Struktur *existing* berupa: baja Profil I $400 \times 200 \times 7 \times 11$ dengan tegang ijin $f_{s,ijin} = 160 \text{ MPa}$, *deck* baja ringan *rib* tinggi $7,5 \text{ cm}$. Ketebalan pelat beton 14 cm , kuat desak beton $f'_c = 25 \text{ MPa}$. Balok komposit berupa *simple beam* dengan bentang $7,0 \text{ m}$. Lebar manfaat antar balok $3,0 \text{ m}$. Elemen balok komposit didesain dengan metode *Allowable Stress Design (ASD)*. Evaluasi struktur *existing* mencakup: berat beban mati sesuai lebar manfaat $W_{DL}=14,009 \text{ kN/m}$, berat beban hidup merata $Q_{LL} = 4,0 \text{ kN/m}^2$ berubah menjadi $Q_{LL} = 6,0 \text{ kN/m}^2$ dan berat beban sesuai lebar manfaat $W_{DL} = 18,0 \text{ kN/m}$; analisis hitungan diperoleh tegangan desak di serat atap beton yakni $f_c = 8,068 \text{ MPa} < f_{c,ijin} = 11,25 \text{ MPa}$. Struktur komposit *existing* tidak aman dengan tegangan tarik diserat baja profil bagian bawah $f_{s,b} = 198,545 \text{ MPa} > f_{s,ijin} = 160 \text{ MPa}$. Untuk mengatasi struktur komposit yang tidak aman dengan menambah dua eksternal *strand tendon grade 250* di bagian bawah profil. Tegangan desak terjadi di serat atap beton $f_c = 2,918 \text{ MPa} < f_{c,ijin} = 11,25 \text{ MPa}$. Tegangan tarik diserat baja profil bagian bawah $f_{s,b} = 64,495 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa}$, struktur komposit dengan tendon aman. Defleksi total yang terjadi $\Delta_{LL,\text{tanpa tendon}} = 0,691 \text{ cm} > \Delta_{LL,\text{dengan tendon}} = 0,526 \text{ cm}$. Kesimpulan penting berdasarkan tinjauan dari momen inersia diperoleh ratio perbandingan nilai $I_{c,\text{dengan tendon}}$ dengan $I_{c,\text{tanpa tendon}}$ sebesar $1,314$. Besaran defleksi total dengan tendon lebih kecil dibandingkan dengan defleksi total tanpa tendon dalam melayani beban layan (*service load*).

Keywords: komposit, *strand*, *deck*

1. PENDAHULUAN

Seorang konstruktur bangunan gedung sering dihadapi dengan hal-hal tidak terduga, baik pada tahap desain maupun tahap konstruksi. Yang hendak diangkat pada *paper* ini adalah di saat suatu proyek sudah masuk ketahap *finishing* ada permintaan mengevaluasi serta usulan solusi dari bagian tertentu bangunan, karena mengalami perubahan spesifikasi peralatan yang akan dilayani. Perubahan berupa bertambahnya beban hidup rencana awal.

Struktur *existing* yang akan dievaluasi berupa suatu balok komposit, balok sederhana (*simple beam*) interior yang ditumpuh oleh balok induk. Elemen-elemen balok komposit *existing* terdiri dari balok profil I, *deck* baja ringan. Pelat beton beserta penghubung geser (*shear connector*). Dari hasil evaluasi struktur balok komposit *existing* ternyata tidak aman. Selanjutnya usulan solusi agar struktur aman dengan menambah dua *strand tendon* prategang yang posisinya di bawah sayap bawah balok profil I.

Untuk mendapat tujuan spesifik terukur seperti durabilitas, keberlanjutan, tahan gempa, pelaksanaan konstruksi cepat, bangunan hibrida (*hybrid building*) dengan material gabungan diperlukan. Komposit memberi suatu tampilan konsisten dan pilihan terbesar karena komposit mudah untuk dikerjakan, terjangkau dan dapat dibangun, (Ibrahim, Allawi, Zohairy, 2022).

Struktur komposit akan digunakan dan menjadi ideal pada industri konstruksi. Komposit struktur dibuat dari gabungan dua atau lebih elemen-elemen struktur menjadi satu elemen struktur tunggal dengan setiap komponen beraksi secara efisien. Cara penggabungan struktur komposit mempertimbangkan prinsip ekonomi sebagai suatu pertimbangan utama selain itu keselamatan. Sebagai suatu hasil, suatu analisis menyeluruh diperlukan untuk meniptakan suatu keselamatan, biaya yang efektif dan desain struktur komposit yang tahan lama, (Feyissa, Kenea, 2022).

Kekurangan utama dari beton terletak kekuatan tarik rendah, petunjuk meningkatnya dari macam-macam solusi untuk meningkatkan aspek ini. Pendekatan yang perlu dicatat adalah penggunaan dari beton bertulang prategang

(*Prestressed Reinforced Concrete/PRC*) dengan tendon. Tujuannya adalah memperkuat kekuatan tarik, seperti penggunaan dari tipe-tipe tendon yang beragam dari *PRC* lanjutan. Suatu *review* menjadi penting diselidiki pada perkembangan, terkait studi untuk menggali tentang karakteristik, tampilan dan perkembangan macam-macam tendon yang berbeda terkait baja dan komposit, (Rafieizonoo, Jang, et.al., 2024; Wu, Sun, et.al., 2021).

Struktur komposit telah mengambil peran sangat penting dalam bidang teknik sipil. Struktur komposit ini telah digunakan dari skala kecil sampai besar di bangunan gedung dan jembatan. Perinsip dasar struktur komposit adalah material-material spesifik yang akan digunakan lebih efisien pada jenis kondisi tegangan. Jadi, kombinasi dari suatu kekuatan material dalam desak bersamaan dengan kekuatan dalam tarik membuat sangat ekonomis untuk digunakan dalam struktur. Dengan material-material dasar seperti beton, baja dan bermacam-macam kombinasi material lainnya yang mungkin dapat digunakan. Sampai sekarang informasi tentang itu belum tersedia untuk insiyur praktisi atau perencana, (Sabnis, 1979).

Keuntungan utama dari komponen baja prategang yaitu: untuk memperbesar batas sifat-sifat elastis, meningkat kapasitas, mengurangi berat baja struktur dan memperbaiki kelelahan (*fatigue*) dan kekuatan fraktur (*fracture strength*). Hasil yang menguntungkan dari aksi kopel momen internal pada arah berlawanan yang ditimbulkan oleh beban yang bekerja secara ekternal. Hasil yang menguntungkan dari tendon mempunyai baja tegangan tinggi dibandingkan dengan baja biasa dengan kekuatan lebih rendah. Tambahan tendon pada balok komposit lebih disukai dari pada pelat penutup yang dilas (*welding cover plate*) pada sayap balok karena tendon mempunyai kekuatan lebih tinggi dari pada ujung-ujung *cover plate*, (Saadatmanesh, et.al., 1989).

Permasalahan yang diangkat pada *paper* ini adalah perubahan beban hidup dari bagian struktur gedung dengan sistem komposit balok baja, *deck* baja ringan dan pelat beton. Pada awalnya struktur *existing* didesain dengan beban hidup seberat 4,0 kN/m². Selanjutnya, dalam tahap *finishing* ada perubahan beban hidup menjadi 6,0 kN/m². Akibatnya dari perubahan beban hidup tersebut mengakibat tegangan tarik baja serat bawah melebihi tegangan ijin baja.

Tujuan dari studi ini untuk mengevaluasi dan mendisain kembali agak bagian struktur dapat melayani perubahan beban hidup yang diperlukan. Usulan untuk mengatasi permasalahan yang ada dengan penambahan dua ekternal *strand tendon* di bagian bawah baja profil *existing*. Evaluasi mencakup parameter-parameter yaitu tegangan-teangan dan defleksi pada struktur komposit existing sebelum dan sesudah perubahan beban hidup. Hasil dari nilai besar parameter-parameter yang dievaluasi harus memenuhi persyaratan standar peraturan yang diijin, sehingga struktur balok tersebut benar-benar aman.

Manfaat dari *paper* ini sebagai alternatif solusi bila terjadi permasalahan di atas. Diharapkan bagi pihak para akademis, konsultan dan praktisi, informasi dari hasil *paper* ini dapat bermanfaat sebagai referensi tambahan.

Agar *paper* ini dapat fokus, ada 6 batasan masalah:

- a. Struktur *eksisting* yang ditinjau adalah balok komposit gedung, elemen utamanya adalah: pelat beton, *metal decking sheet* dari bondek dan baja profil.
- b. Struktur balok yang akan ditinjau adalah balok interior, dan merupakan balok sederhana (*simple beam*) yang ditumpuh balok induk. *deck* baja ringan dipasang dengan arah rib tegak lurus terhadap balok baja profil I. Analisis hitungan pada momen positif di tengah bentang balok struktur.
- c. Dalam tahap *finishing* ada perubahan manfaat fungsi bangunan pada beban hidup, awalnya $Q_{LL} = 4,0 \text{ kN/m}^2$ menjadi $6,0 \text{ kN/m}^2$.
- d. Akibat dari tambahan beban hidup, tegangan dibagian bawah baja balok komposit struktur *eksisting* tidak aman. Selanjutnya alternatif solusi dengan menambah dua *strand tendon* dengan konfigurasi tendon lurus, berjarak jarak 4 cm dari serat bawah balok baja. *Strand grade* tendon 250 dengan diameter nominal satu *strand tendon* 1,27 cm.
- e. Dalam desain struktur balok menggunakan metode didesain tegangan ijin (*allowable stress design*).

2. METODE PENELITIAN

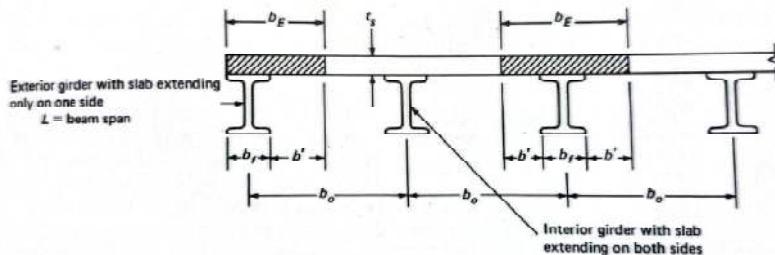
Tujuan istilah konstruksi balok baja komposit berlaku untuk suatu sistem terdiri dari balok baja dan bekerja sama dengan komponen pelat beton pada sayap atas (Hogen, 1976; Salmon, et.al., 1979, 2009). Dengan menyatunya balok baja dengan pelat beton membentuk suatu unit utuh. Keunggulan komparatif dari tipe konstruksi komposit terletak pada fakta bahwa pelat tidak hanya mendistribusi beban ke balok utama, tetapi juga membentuk bagian dari balok itu sendiri.

Suatu tipe yang sangat lajim dari penampang konstruksi komposit terdiri balok baja, *deck* baja ringan, dan pelat beton. *Deck* baja ringan dipasang posisi *rib* paralel atau tegak lurus terhadap balok baja. *Deck* baja ringan juga akan beraksi secara komposit atau nonkomposit dengan pelat beton. Awalnya lembar *deck* baja ringan bahannya merupakan elemen penahan beban pelat beton. Jadi *deck* baja ringan hanya berfungsi untuk mendukung berat beton pelat yang masih

basah. Bila pelat beton sudah mengeras aksi antara plat beton dan *deck* baja ringan dapat menahan beban gabungan. Dengan kemajuan sekarang ada *deck* baja ringan merupakan pelat yang memberi aksi komposit dengan balok baja. Dengan cara mudah menggunakan *stud shear connector* yang dipasang dengan las di atas sayap (*beam flange*) profil balok baja, (Hogen, 1976).

Metode untuk pencapaian aksi balok komposit yang diinginkan di atas, mencakup ketentuan dari bentuk koneksi mekanika antara balok dan pelat pada bidang antar muka. Distribusi geser horizontal antara pelat dan balok sehingga kejadian slip dapat berkurang. Elemen koneksi mekanika ini disebut sambungan geser (*shear connector*), (Hogen, 1976).

Untuk menentuan tampang dari struktur komposit ada cara praktis, yaitu menggunakan konsep lebar efektif untuk pelat beton. Tinjauan pada penampang komposit yang mengalami tegangan, di mana lebar pelat beton tidak terbatas. Intensitas tegangan desak pada serat ekstrem maksimum di atas balok baja, turun secara nonlinear dengan jarak menjauhi balok. Sebagai penyederhanaan untuk tujuan disain untuk bangunan gedung nilai maksimum lebar efektif b_E diijinkan adalah nilai hitungan terkecil, (Salmon, et.al 2009).



Gambar 1. Dimensi yang Mengatur Lebar Efektif, b_E , pada Balok Baja-Beton Komposit

a. Untuk balok interior dengan pelat terbentang pada dua sisi dari balok:

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

$$(ii) \quad b_E \leq b_o \text{ (untuk jarak antara balok sama)} \quad (1b)$$

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

b. Untuk balok ekterior dengan pelat terbentang pada satu sisi:

$$(i) \quad b_E \leq L/12 + b_f \quad (2a)$$

$$(ii) \quad b_E \leq \frac{1}{2}(b_o + b_f) \quad (2b)$$

$$(iii) \quad b_E \leq b_f + 6 t_s \quad (2c)$$

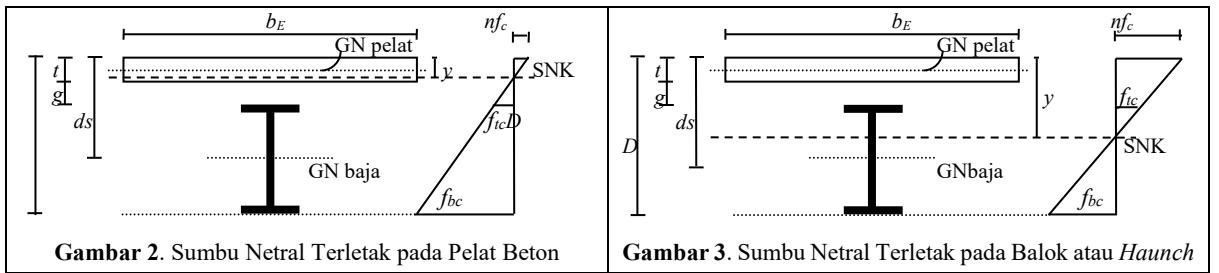
Balok komposit mencakup balok baja sebaiknya bentuk I yang dikoneksi dengan pelat beton dengan sambung geser. Dalam desain direkomendasikan dasar acuan suatu penampang seragam. Karakter suatu tampang komposit dihitung dengan metode luas yang ditransformasi. Di mana luas beton pelat ditransfer ke luas ekivalen baja. Penggunaan lebar pelat sama dengan b_E/n . Di mana n adalah ratio dari modulus elastis baja E_s terhadap modulus elastis beton E_c , (Salmon, et.al, 1971, 2009). Umumnya modulus elastis baja sebesar $2,1 \times 10^5$ MPa, sedangkan modulus elastis beton dalam unit MPa, umumnya sebagai berikut:

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

dengan f'_c = kuat desak beton (MPa).

Distribusi tegangan elastis pada penampang melintang balok komposit yang berhubungan dengan *slip* antara baja struktur dan elemen beton. Sebelum *slip*, regangan keduanya terjadi pada baja dan beton merupakan proporsi terhadap jarak dari sumbu netral untuk penampang transformasi elastis. Setelah *slip*, distribusi regangan tidak menerus dengan suatu lompatan pada bagian atas dari baja. Regangan pada baja merupakan proportional terhadap jarak sumbu netral terpisah, yaitu untuk baja dan yang lain untuk beton, (AISC, 1986).

Menurut Hogen (1976), karakter penampang ditinjau dalam dua tipe penampang untuk kondisi umum dari suatu balok komposit dengan komponen sambungan (*haunch*). Persamaan digunakan untuk balok profil baja I dan gap (g) antara permukaan dari balok baja dan bagian bawah dari pelat. Jika g ditetapkan sama dengan nol. Untuk suatu balok komposit tanpa *haunch*.



a. Sumbu netral elastis terletak pada pelat beton

Berdasarkan pada Gambar 1, di mana sumbu netral terletak pada pelat beton. Momen area ditinjau dari permukaan pelat beton. Lokasi sumbu netral diperoleh dari:

$$y = \sum(Ay) / \sum(A)$$

$$y(A_s + b_E(y)) = A_s d_s + (b_E y / n)(y/2)$$

$$y^2 + (2nA_s/b_E)y - 2nA_s d_s / b_E = 0$$

$$\text{bila, } r = 2A_s / (b_E d_s)$$

$$y = (d_s/2) (\sqrt{nr(4+nr)} - nr)$$

$$\text{dan, } t/2 < y < t$$

Momen inersia dari tampang komposit yaitu:

$$I_c = (b_E/y^3)/(3n) + I_s + A_s(d_s - y)^2 \quad (5)$$

dan modulus tampang dan tegangan-tegangan yang terjadi adalah:

$$Z_{bc} = I_c/(D - y); \quad f_{bc} = M / Z_{bc} \quad (6.a)$$

$$Z_{tc} = I_c/(g + t - y); \quad f_{tc} = M / Z_{tc} \quad (6.b)$$

$$Z_c = I_c/(y); \quad f_c = M / (nZ_c) \quad (6.c)$$

b. Sumbu netral elastis terletak pada balok baja atau *haunch*

Berdasarkan pada Gambar 2, di mana sumbu netral terletak pada balok baja atau *haunch*. Momen area ditinjau dari permukaan pelat beton. Lokasi sumbu netral diperoleh dari:

$$y = \sum(Ay) / \sum(A)$$

$$y = ((b_E t / n)(t/2) + A_s d_s) / ((b_E t / n) + A_s) = ((b_E t^2 / 2n) + A_s d_s) / ((b_E t / n) + A_s) \quad (7)$$

dan, $t < y < (g + t)$ untuk sumbu netral terletak *haunch* atau $(g + t) < y < d_s$ untuk sumbu netral pada balok baja.

Momen inersia dari tampang komposit yaitu:

$$I_c = (b_E/n)t^3/12 + (b_E/n)t(y - t/2)^2 + I_s + A_s(d_s - y)^2 \quad (8)$$

dan modulus tampang dan tegangan-tegangan yang terjadi adalah:

$$Z_{bc} = I_c/(D - y); \quad f_{bc} = M / Z_{bc} \quad (9.a)$$

$$Z_{tc} = I_c/(g + t - y); \quad f_{tc} = M / Z_{tc} \quad (9.b)$$

$$Z_c = I_c/(y); \quad f_c = M / (nZ_{bc}) \quad (9.c)$$

dengan A_s = luas balok baja, b_E = lebar efek pelat beton, D = ketinggian total tampang komposit, d_s = jarak pusat balok baja ke permukaan atas beton, f_{bc} = tegangan lentur pada balok baja serat bawah, f_{tc} = tegangan lentur pada balok baja serat atas, f_c = tegangan lentur pada pelat serat beton serat atas, g = jarak antara bagian atas balok baja dan bagian bawah plat beton, I_c = momen inersia dari tampang komposit, I_s = momen inersia dari balok baja, n = ratio modulus, t = tebal pelat, Z_{bc} = modulus tampang komposit balok baja sayap bawah, Z_{bs} = modulus tampang balok baja sayap bawah, Z_{bc} = modulus tampang komposit pada bagian atas pelat beton, Z_{tc} = modulus tampang komposit pada bagian atas sayap bawah, Z_{ts} = modulus tampang pada bagian atas tampang bawah.

Akibat momen inersia yang besar dari penampang transformasi *defleksi* pada balok komposit lebih kecil dari pada balok bukan komposit. Momen inersia yang lebih besar ada hanya setelah pelat beton telah mengeras. Defleksi disebabkan oleh berlakunya beban-beban sebelum beton mengeras harus dihitung dengan momen inersia dari profil balok baja. Permasalahan tambahan muncul jika balok mengalami beban hidup layan total, seperti berat partisi, setelah beton mengeras. Pada daerah momen positif, beton akan dalam desak dan mengalami rangka (*creep*). Rangka merupakan suatu deformasi terjadi pada beban desak layan total. Setelah deformasi awal, deformasi tambahan akan terjadi pada suatu tingkat sangat lambat melampaui periode waktu yang lama. Efek pada balok komposit adalah meningkatnya lengkung balok berupa defleksi vertikal, (Segui, 2003).

Defleksi beban mati dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta_{DL} = (5W_{DL}L^2) / (384E_s I_s) \quad (10.a)$$

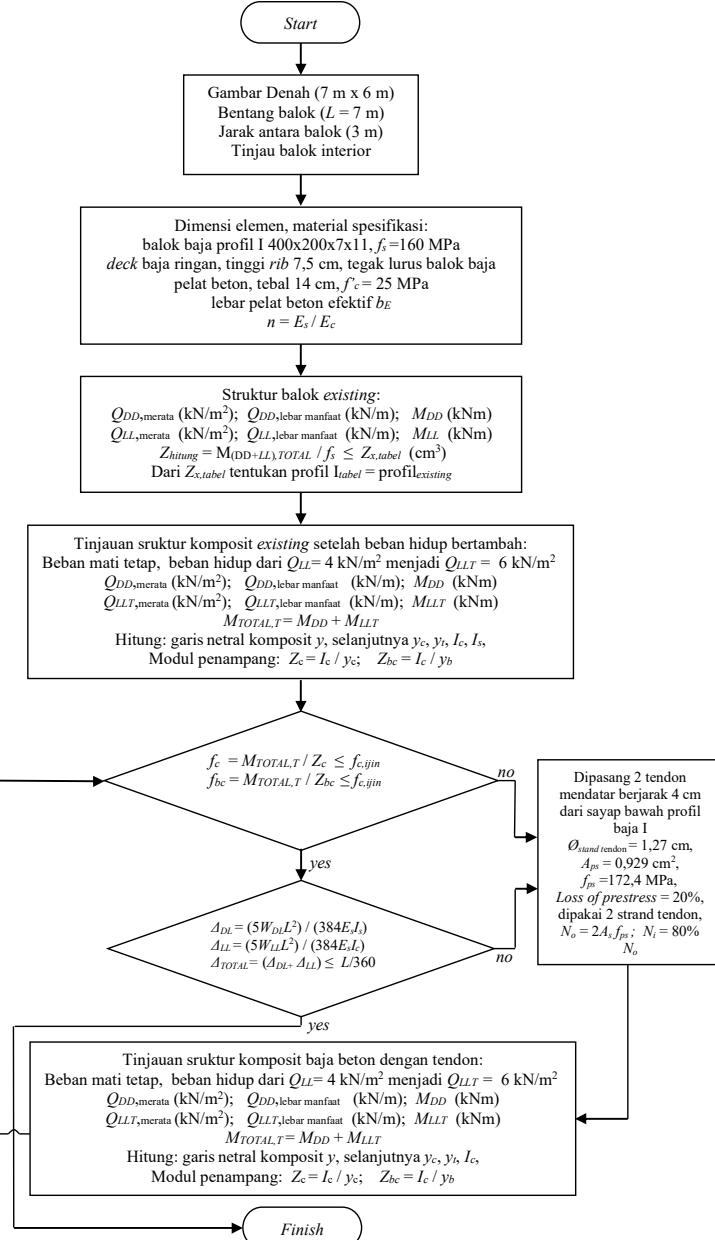
dan untuk defleksi beban hidup dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$\Delta_{LL} = (5W_{LL}L^2) / (384E_c I_c) \quad (10.b)$$

dengan L = panjang bentang balok komposit untuk struktur *simple beam*, m , W_{DL} = berat beban mati merata, kN/m, W_{LL} = berat beban hidup merata, kN/m, E_s = modulus elastis baja, E_c = modulus elastis tumpang.

Penggunaan tendon prategang eksternal pada balok komposit beton baja akan memperbaiki tampil balok oleh perkuatan struktur, meningkatkan momen ultimit, dan mengurangi defleksi. Penyelidikan tentang sifat-sifat dari prategang, balok komposit beton baja dengan dukungan sederhana dengan tendon eksternal dan pada momen lentur positif. Teknik prategang dapat digunakan untuk memperbaiki bangunan baru atau dalam *retrofilling*. Pada balok *simple beam* tendon akan dirangkai dalam suatu profil konfigurasi lurus, trapesium dan parabolik (Rocha, Sauza, 2021).

Agar tercapai tujuan studi, perlu ada pedoman kerja yang jelas berupa langkah-langkah rencana terstruktur. Berikut tahapan langkah yang diperlukan dalam studi ini:

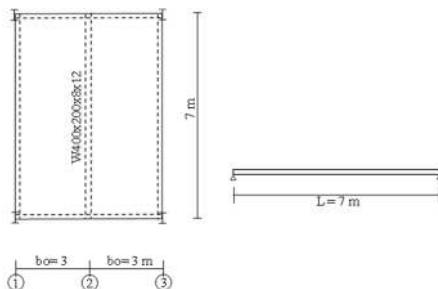


Gambar 4. Diagram Alir Studi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Hitung

Data yang digunakan dalam analisis ini yakni balok jalur 2 seperti di Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Balok Jalur 2 yang Ditinjau

Dalam analisis ini digunakan data yakni kuat tekan beton (f'_c) = 25 MPa, kuat tekan beton pada saat transfer gaya prategangan (f'_{ci}) = 0,75, $f_c = 18,75$ MPa, Modulus elastisitas beton $E_c = 4700\sqrt{f'c} = 23500$ MPa, $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,1 \times 10^5}{2350} = 8,49 \approx 9$, berat sendiri beton bertulang 24 kN/m³, dengan bentang balok L = 7,0 m.

a. Pembebanan Lantai

Data pembebanan lantai dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Pembebanan Lantai

Bagian	Q
Plat lantai (14 cm)	0,14 x 24 =
Bondek ($t_b = 7,5$ cm)	0,101 =
Plafon dan rangka	0,18 =
<i>Finishing</i>	0,035 x 24 =
Q_{DL} (kN/m ²)	= 4,481
Q_{LL} (kN/m ²)	= 4,000

b. Analisis Struktur Komposit Existing

Data pembebanan struktur *existing* bedasarkan data dari katalog tabel profil baja Gunung Garuda 1986 yang dapat dilihat pada Tabel 2:

Tabel 2. Pembebanan Pada Balok Jalur 2 *Eksisting*

Bagian	I
W_{baja} (I400x200x7x11)	0,566 =
W_{plat}	3 x 4,481 =
W_{DL} (kN/m')	= 14,009
W_{LL} (kN/m')	3 x 4,000 = 12,000
$W_{Total,1}$ (kN/m')	= 26,000

Spesifikasi profil I 400x200x7x11, berat (W) = 56,6 kg/m, tinggi (d) = 396 mm, $b_f = 199$ mm, $t_w = 11$ mm, luas tampang A = 72,16 mm², $Z_x = 1010$ cm³, $I_s = 20.000$ cm⁴.

$$M_{T1} = \frac{W_T \times L^2}{8} = \frac{26 \times 7^2}{8} = 159,25 \text{ kN.m}$$

$$Z_1 = \frac{M_{T1}}{F_s} = \frac{159,25}{(160 \times 10^{-3})} = 995,313 \text{ cm}^3 < Z_x = 1010 \text{ cm}^3, (G)$$

Profil I400x200x7x11, (G)

Analisis Hitungan Komposit Tanpa Tendon

a. Pembebanan Balok Jalur 2 dengan $Q_{LL,2} = 6,000$ kN/m²

$$W_{DL,2} = 14,009 \text{ kN/m}$$

$$W_{LL,2} = 3 \times 6,000 = 18,00 \text{ kN/m}$$

$$M_{DL,2} = \frac{14,009 \times 7^2}{8} = 85,75 \text{ kN.m}$$

$$M_{LL,2} = \frac{18,000 \times 7^2}{8} = 110,25 \text{ kN.m}$$

$$W_{Total,2} = 14,009 + 18,000 = 32,009 \text{ kN/m}$$

$$M_{Total,2} = \frac{32,009 \times 7^2}{8} = 196,055 \text{ kN.m}$$

$$Z_2 = \frac{196,055}{(160 \times 10^{-3})} = 1225,344 \text{ cm}^3 > Z_x = 1010 \text{ cm}^3 \text{ (N.G)}$$

b. Cek Struktur Komposit

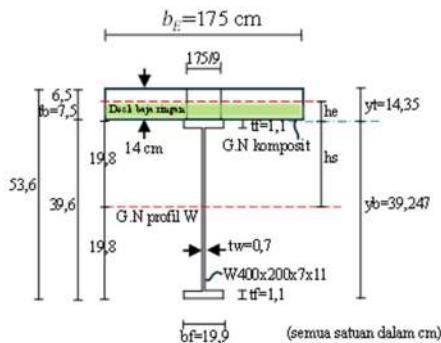
Modulus penampang efektif dan *ratio modulus* penampang (n), penentuan lebar efektif (b_E), serta pilihlah yang terpendek dari tiga alternatif di bawah ini:

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

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

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

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{2,1 \times 10^5}{2350} = 8,49 \approx 9$$



Gambar 6. Tampang Komposit

Periksa Gambar 6, *deck* baja ringan dengan *rib* tegak lurus profil I

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

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

Tabel 3. Pemeriksaan Tampang Komposit

Bagian	A (cm ²)	Y (cm)	A.Y (cm ³)	h (cm)	A.h ² (cm ⁴)	I _o (cm ⁴)
Beton	126,389	50,35	6363,686	11,103	15580,807	444,994
I400x200x7x11	72,160	19,80	1428,768	19,447	2728,888	20000
Total	198,549		7792,454		18309,695	20444,994

$$y_b = \frac{\sum A_y}{\sum A} = \frac{7792,454}{198,549} = 39,247 \text{ cm} ; \quad y_t = 53,6 - 39,247 = 14,353 \text{ cm}$$

$$h_c = 14,353 - \frac{6,5}{2} = 11,103 \text{ cm}$$

$$h_s = 39,247 - 19,8 = 19,447 \text{ cm}$$

$$I_c = \sum A \cdot h^2 + \sum I_o = 18309,695 + 20444,994 = 383754,689 \text{ cm}^4$$

$$Z_{be} = \frac{I_c}{Y_b} = \frac{383754,689}{39,247} = 987,456 \text{ cm}^3$$

$$Z_c = \frac{I_c}{Y_t} = \frac{383754,689}{14,353} = 2700,111 \text{ cm}^3$$

$$Z_{te} = \frac{I_c}{(39,6-39,247)} = \frac{38754,689}{0,353} = 38754,338 \text{ cm}^3$$

c. Cek Tegangan

$$\text{Tegangan beton } f_c = -\frac{M_{T,2}}{n \cdot Z_c} = \frac{196,055}{9x(2700,111 \cdot 10^{-3})} = \begin{cases} -8,068 \text{ MPa} \\ \leq -0,45f'c \\ < -11,25 \text{ MPa} \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Maksimum } Z_{\text{irmak}} &= (1,35 + 0,35 \cdot \frac{M_{L2}}{M_{D2}}) \cdot Z_x \\
 &= (1,35 + 0,35 \cdot \frac{110,25}{85,75}) \cdot 1010 \\
 &= 1818 \text{ cm} > Z_{bc} = 987,456 \text{ cm}^3 \text{ (G)} \rightarrow \text{Tidak diperlukan peranca}
 \end{aligned}$$

Tegangan baja di serat *flange* bawah:

$$f_{bc} = \frac{M_{T,2}}{Z_{bc}} = \frac{196,055}{(987,456 \cdot 10^{-3})} = 198,545 \text{ MPa} > f_s = 160 \text{ MPa}, \quad (\text{NG})$$

Tegangan baja di serat *flange* atas:

$$f_{tc} = \frac{M_{T,2}}{Z_{tc}} = \frac{196,055}{(38754,336 \cdot 10^{-3})} = 5,059 \text{ MPa} < f_s = 160 \text{ MPa}, \quad (\text{G})$$

d. Kontrol Defleksi

- Beban Mati:

$$\Delta_{DL2} = \frac{5 \cdot w_{DL2} \cdot L^4}{384 \cdot E_s \cdot I_s} = \frac{5 \times 14,009 \cdot 10^{-4} \times 7000^4}{384 \times 2,1 \times 10^6 \times 20000} = 1,043 \text{ cm}$$

- #### - Beban Hidup:

$$\Delta_{LL2} = \frac{5 \cdot w_{LL2} \cdot L^4}{384 \cdot E_s \cdot I_c} = \frac{5 \cdot 18,000 \cdot 10^{-4} \cdot 7000^4}{384 \cdot 2,1 \cdot x 10^6 \cdot 38754,689} = 0,691 \text{ cm}$$

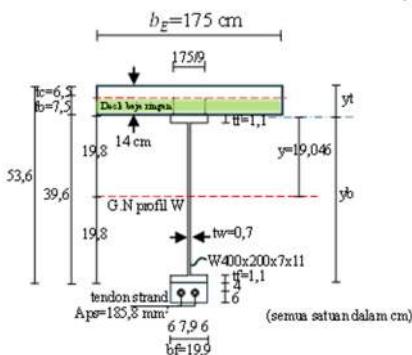
Defleksi total = $A_D + A_L$

$$\Delta_T = 1,043 + 0,691 = 1,734 \text{ cm} \leq \frac{L}{\frac{360}{360}} < 1,94 \text{ cm}$$

Dikarenakan tegangan baja bagian bawah lebih besar dari tegangan ijin, selanjutnya perlu ditambah dua *strand* tendon dengan masing-masing diameter nominal *strand* 0.5 in.

Analisis Tampang Komposit Dengan Tendon

Periksa Gambar 7. Digunakan *strand tendon*, *grade 250*, $f_{ps} = 250 \text{ ksi} = 1724 \text{ MPa}$, $E_{ps} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$. Diameter nominal *strand tendon* = 0,5 in = 1,27 cm. Luas baja nominal satu *strand tendon* = 0,144 in² = 92,9 mm² = 0,929 cm². $A_{ps} = 2 \times 0,929 = 1,858 \text{ cm}^2 = 185,8 \text{ mm}^2$. *Loss of prestress* = 20%.



Gambar 7. Tampang Komposit dengan Tendon *Strand*

Hasil analisis pemeriksaan tampang komposit dengan strand tendon, dapat dilihat pada tabel 4 berikut:

Tabel 4. Pemeriksaan Tampang Komposit dengan Tendon *Strand*

Bagian	A _i (cm ²)	Y _i (Jarak lengan terhadap profil W) (cm)	A _i Y _i (cm ³)
Beton	126,389	30,55	3861,1840
W400x200x7x11	72,160	0	0

Tendon Strand	1,858	-23,8	-44,2204
Total	A _s = 200,407		3816,9636

$$Y = \frac{\sum A_i \cdot Y_i}{\sum A_i} = \frac{3816,9636}{200,407} = 19,046 \text{ cm}$$

$$Y_b = 19,8 + 19,046 = 38,846 \text{ cm}$$

$$Y_t = 19,8 + 14 - 19,046 = 14,754 \text{ cm}$$

$$Y_p = 14,754 - \frac{6,5}{2} = 11,504 \text{ cm}$$

$$e_I = 4 + 19,8 + 19,046 = 42,846 \text{ cm}$$

$$M_{DL,2} = 85,75 \cdot 10^6 \text{ N.mm}$$

$$M_{LL,2} = 110,25 \cdot 10^6 \text{ N.mm}$$

$$N_o = A_{ps} \times f_{ps} = 185,8 \times 1724 = 320319,2 \text{ N}$$

$$N_i = 80\% \times N_o = 256255,36 \text{ N}$$

Tabel 5. Momen Inersia Penampang Komposit

Bagian	I (cm ⁴)
Beton	1/12 x 175/9 x 6,5 ³ = 444,994
	175/9 x 6,5 x 11,504 ² = 879,668
I400x200x7x11	I _s = 20000,000
	72,160 x 19,046 ² = 26176,048
Strand tendon	2 x 1/64 x π x (1,27) ⁴ = 0,255
	1,858 x 42,846 ² = 3410,879
	= 50911,844

Analisis tegangan yang bentang penampang pada Tabel 6 sebagai

terjadi di tengah komposit dapat dilihat berikut:

Akhir di Tegah

Tabel 6. Tegangan Bentang

Tegangan Akhir	Tepi Atas Pelat Beton (MPa)	Tepi Bawah Baja I (MPa)
$\frac{N_i}{A_s}$	-0,142	-1,279
$\frac{N_i \cdot e_i \cdot y_1}{I_c}$	+3,535	-83,774
$\frac{M_{DL} \cdot y_1}{I_c}$	-2,761	+65,427
$\frac{M_{LL} \cdot y_1}{I_c}$	-3,550	+84,121
	-2,918	+64,495
	$ -2,918 \leq -0,45, f'c = -11,25 \text{ (G)}$	< 160 MPa (G)

Kontrol defleksi terhadap beban mati dan beban hidup:

- Beban mati :

$$\Delta_D = \frac{5 \cdot w_{DL2} \cdot L^4}{384 \cdot E_s \cdot I_s} = \frac{5 \cdot 14,009 \cdot 10^{-4} \cdot 7000^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 20000} = 1,043 \text{ cm}$$

- Beban hidup :

$$\Delta_L = \frac{5 \cdot w_{LL2} \cdot L^4}{384 \cdot E_s \cdot I_c} = \frac{5 \cdot 18,000 \cdot 10^{-4} \cdot 7000^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^6 \cdot 50911,844} = 0,525 \text{ cm}$$

$$\text{Defleksi total} = \Delta_D + \Delta_L = 1,569 \text{ cm} \leq \frac{L}{360} \\ < \frac{700}{360} = 1,94 \text{ cm}$$

Jika diamati besaran nilai momen inersia pada penampang komposit tanpa dan dengan tendon, yaitu: $I_{c,tanpa\ tendon} = 38754,689 \text{ cm}^4$ dan $I_{c,dengan\ tendon} = 50911,844 \text{ cm}^4$. Diperoleh ratio nilai perbanding $I_{c,dengan\ tendon}$ dengan $I_{c,tanpa\ tendon}$ sebesar 1.314.

Untuk tegangan-tegangan yang terjadi pada penampang komposit tanpa tendon yaitu: tegangan desak di serat atas

pelat beton sebesar $f_c = 8,068$ MPa lebih kecil dari tegangan desak ijin beton $f'_c = 11,25$ MPa; tegangan tarik di serat bawah dari sayap bawah propil baja I sebesar $f_{bc} = 198,545$ MPa, di mana lebih besar dari tegangan profil baja yang diijinkan $f_s = 160$ MPa, struktur komposit tanpa tendon tidak aman. Untuk tegangan-tegangan yang terjadi pada penampang komposit dengan tendon yaitu: tegangan desak di serat atas pelat beton sebesar $f_c = 2,918$ MPa, lebih kecil dari tegangan desak ijin beton $f'_c = 11,25$ MPa; tegangan tarik di serat bawah dari sayap bawah propil baja I sebesar $f_{bc} = 64,495$ MPa, di mana lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_s = 160$ MPa, struktur komposit dengan tendon aman.

Selanjutnya, untuk defleksi struktur komposit tanpa tendon yaitu: defleksi beban mati $\Delta_{DL} = 1,043$ cm; defleksi beban hidup $\Delta_{LL} = 0,691$ cm; dan defleksi beban total $\Delta_T = 1,724$ cm. Sedangkan, untuk defleksi struktur komposit dengan tendon yaitu: untuk defleksi beban mati $\Delta_{DL} = 1,043$ cm; defleksi beban hidup $\Delta_{LL} = 0,526$ cm; dan defleksi beban total $\Delta_T = 1,569$ cm. Jadi, $\Delta_{DL,\text{tanpa tendon}} = \Delta_{DL,\text{dengan tendon}} = 1,043$ cm; $\Delta_{LL,\text{tanpa tendon}} = 0,691$ cm > $\Delta_{LL,\text{dengan tendon}} = 0,526$ cm, dan $\Delta_{T,\text{tanpa tendon}} = 1,724$ cm > $\Delta_{T,\text{dengan tendon}} = 1,569$ cm. Dari besaran defleksi total dengan tendon lebih kecil dibandingkan dengan defleksi total tanpa tendon, sesuai yang dinyatakan Nie, 2009 dan Rocha, et.al., 2021.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari uraian di bagian diskusi *paper* ini, ada tiga kesimpulan yang penting dalam studi ini:

1. Tinjauan dari momen inersi diperoleh ratio nilai perbanding $I_{c,\text{dengan tendon}} / I_{c,\text{tanpa tendon}}$ sebesar 1.314.
2. Dengan adanya perubahan beban hidup dari 4,0 kN/m² menjadi 6,0 kN/m², struktur komposit dengan tendon mampu menahan perubahan beban tersebut. Dari analisis tegangan-tegangan yang terjadi pada struktur komposit dengan tendon aman.
3. Dari besaran defleksi total dengan tendon lebih kecil dibandingkan dengan defleksi total tanpa tendon dalam melayani beban layan (*servis load*).

Saran

Ada dua saran untuk tindak lanjutan untuk pengembangan *paper* ini:

1. Perlu adanya studi pembanding antara struktur komposit baja-beton prategang dengan komposit baja-beton *cover plate* pada tengah bentang balok sederhana (*simple beam*). Terkait mana yang lebih ekonomis sebagai pemilihan keputusan struktur terpakai.
2. Perlu adanya studi pembanding antara struktur komposit baja-beton prategang dengan bentuk *lay out* konfigurasi yang berbeda yaitu: bentuk lurus, segi tiga, trapesium dan parabolik. Konfigurasi mana yang akan lebih andal dan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- American Institute of Steel Construction (AISC), 1986, *Manual of Steel Construction Load, and Resistance Factor Design*, First Edition, AISC, Inc.
- 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*, Vol. 2022, Article ID 5010501, 14 pages.
- Hogen, T.J., 1971, *Composite Construction Design Guide, Composite Steel Beams in Building*, Australian Institute of Steel Construction LTD.
- Ibrahim, T.H., Allawi, A.A., El-Zohairy, A., 2022, Impact behavior of composite Reinforced Concrete beam with Pultruded I-GFRF Beam, *Material*, Vol. 15, no.2, Article ID 441.
- Nie, J., Tao, M., Cai, C.S., Li, S. 2009, Deformation Analysis of Prestressed Countinuous Steel-C oncrete Composite, *ASCE Journal Structural Engineering*, Vol.135 No.11; 1377, 1389.
- Rafieizonooz, M., Jang, H.K., et.al., 2024. Performances and Propertis of Steel and Composite Prestressed Tendons – A Review, *Heliyon*, Vol.10, Issue, June 15, 2024, Article e.31720.
- Rocha, A.M.M., Sauza, A.S.C. at.al., 2021, Parametric Analysis of Steel-Concrete of Steel-Concrete Composite Prestressed with External Tendons, *Journal of Constructional Steel Research*, December 2021, <http://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.107087>.
- Saadatmanesh, H., Albrecht, P., Ayyub, B.M., 1989, Analytical Study of Prestressed Composite Beams, *ASCE Journal Structural Engineering*, Vol. 115 No. 9 Sep.
- Salmon, C.G; Fisher, J.M., 1979, *Composite Steel-Concrete Construction, Handbook of Composite Construction Engineering*, ed. by Sabnis, G., Chap. 2, Van Nostrand Neinholt Ltd.

- Salmon, C.G., Johnson, E.J., Malhas, F.A., 2009, *Steel Structures Design and Behavior*, Fifth edition, Harper & Row.
- Segui, W.T., 2003, *LRFD Steel Design*, Third edition, THOMSON /Cole.
- Wu,Y., Sun, Y., et. al., 2021, Comparative Study of the Flexural of Steel Fiber Reinforced Light Weight Aggregate Concrete Beams Reinforced and prestress with CFRP Tendons, *Engineering Structures*, Vol. 233, 15 April (2021) <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111901>.