

ANALISIS STRUKTUR ATAS PADA JEMBATAN TANJUNG SELAMAT

Baran Manuang Nainggolan¹, Nanda Mukhtazar², Rhini Wulan Dary³

Teknik Perancangan Jalan dan Jembatan^{1,2}, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Medan
Manajemen Rekayasa Konstruksi Gedung³, Teknik Sipil, Politeknik Negeri Medan
barannainggolan@students.polmed.ac.id¹, nandamukhtazar@students.polmed.ac.id²,
rhiniwulandary@polmed.ac.id³

ABSTRAK

Jembatan Tanjung Selamat merupakan jembatan dengan struktur rangka baja yang diresmikan pada Tahun 2009 dengan standar peraturan perencanaan lama. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dengan peraturan terbaru yang ada pada Tahun 2021. Tujuan dari penelitian ini adalah memperoleh besar beban yang terjadi serta profil rangka baja yang digunakan pada struktur atas jembatan. Penelitian dilakukan dengan tahapan melakukan survei perolehan data, penentuan dimensi awal, perhitungan pembebanan, dan kontrol dimensi rangka baja. Hasil yang diperoleh dari penelitian adalah beban mati stringer sebesar 1,858 kN/m, beban mati cross beam sebesar 2,047 kN/m, beban mati perkerasan sebesar 1,65 kN/m, beban terbagi rata sebesar 10,125 kN/m, beban garis terpusat sebesar 49 kN/m, beban truk sebesar 650 kN, beban temperatur sebesar 25°C. Stringer yang digunakan adalah IWF 800.300.22.14, cross beam yang digunakan adalah IWF 800.300.26.14, rangka utama yang digunakan adalah IWF 350.350.19.19.

Kata Kunci : Baja, Beban, Dimensi, Struktur Atas

PENDAHULUAN

Jembatan Tanjung Selamat memiliki bentang 60 meter dan lebar 7 meter. Jembatan ini melayani lalu lintas jalan Kelas II yang menghubungkan Jalan Flamboyan Raya dengan Jalan Besar Tanjung Selamat. Struktur atas Jembatan Tanjung Selamat pada skripsi ini berupa rangka baja tipe *warren truss*. Tipe jembatan *warren truss* memiliki karakteristik bentuk konstruksinya yang berupa segitiga sama sisi.

Jembatan Tanjung Selamat dibangun pada Tahun 2009 dengan menggunakan peraturan lama yakni RSNI-T-03-2005 tentang Perencanaan Struktur Baja Untuk Jembatan. Hal ini yang melatar belakangi penulis melaksanakan penelitian terhadap Jembatan Tanjung Selamat. Penelitian akan dilaksanakan dengan mengacu pada peraturan perencanaan terbaru yakni Panduan Bidang Jalan Dan Jembatan No. 02/M/BM/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan yang dirancang oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh besar beban yang terjadi pada struktur atas Jembatan Tanjung Selamat serta dimensi profil baja yang akan digunakan pada Jembatan Tanjung Selamat menggunakan peraturan yang ditentukan.

TINJAUAN PUSTAKA

Pembebanan Pada Struktur Jembatan Rangka Baja

Pembebanan direncanakan dengan menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI 1725:2016) tentang Pembebanan Untuk Jembatan.

Perencanaan Jembatan

Perencanaan Jembatan Tanjung Selamat mengacu pada Surat Edaran Menteri PUPR No. 06/SE/Db/2021 tentang Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan.

METODE PENELITIAN

Objek Penelitian

Objek yang akan ditinjau pada penelitian adalah rangka baja pada struktur atas Jembatan Tanjung Selamat. Jembatan Tanjung Selamat menghubungkan Jl. Besar Tanjung Selamat dan Jl. Flamboyan Raya, serta berlokasi di Kec. Pancur Batu, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara.

Tahapan Penelitian

Langkah-langkah perancangan terhadap analisis struktur atas Jembatan Tanjung Selamat adalah:

- 1) Pengumpulan Data
- 2) Pemilihan Dimensi Profil Awal (*Pre-Eliminary Design*)
- 3) Perhitungan Beban dan Gaya Dalam
- 4) Cek Kekuatan Dimensi Profil
- 5) Penulisan Kesimpulan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perolehan Data

Data-data yang diperoleh saat survei dan studi terhadap syarat perhitungan adalah:

Bentang jembatan	L	$=$	60	m
Tinggi jembatan	h	$=$	6	m
Bentang stringer	L_b	$=$	5	m
Jarak antar stringer	S_{str}	$=$	1,5	m
Bentang cross beam	L_{cb}	$=$	8	m
Jarak antar cross beam	S_{cb}	$=$	5	m
Tebal pelat lantai	t_s	$=$	0,27	m
Lebar perkerasan	L_a	$=$	6	m
Tebal perkerasan	t_a	$=$	0,05	m
Berat jenis aspal	Y_a	$=$	22	kN/m ³
Lebar trotoar	L_{tr}	$=$	0,5	m
Tebal trotoar	t_{tr}	$=$	0,25	m
Mutu beton perkerasan	f'_c	$=$	30	MPa
Berat jenis beton	Y_c	$=$	24	kN/m ³
Modulus elastisitas beton	E_c	$=$	25.742,96	MPa
Mutu baja	BJ	$=$	37	
Berat jenis baja	Y_s	$=$	78,5	kN/m ³
Tegangan putus minimum	F_u	$=$	370	MPa
Tegangan leleh minimum	F_y	$=$	240	MPa
Modulus elastisitas baja	E_s	$=$	200.000	MPa

Pemilihan Dimensi Awal (*Pre-Eliminary Design*)

Berikut ini adalah data-data profil penampang yang akan direncanakan dalam perancangan Jembatan Tanjung Selamat atau dengan kata lain *pre-eliminary design*. Stringer yang digunakan adalah IWF 800.300.22.14, cross beam yang digunakan adalah IWF 800.300.26.14, rangka utama yang digunakan adalah IWF 350.350.19.19.

Perencanaan Profil Stringer

Perhitungan Beban dan Gaya Dalam

- 1) Akibat Beban Permanen

$$\text{Beban mati komponen stringer } (W_{str}) = A_{gstr} \cdot Y_s = 1,858 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Beban mati komponen pelat } (W_s) = t_s \cdot S_{str} \cdot Y_c = 9,72 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Beban mati perkerasan } (W_a) = S_{str} \cdot t_a \cdot Y_a = 1,65 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Momen akibat berat stringer } (M_{MS_str}) = \frac{1}{8} \cdot W_{str} \cdot L_b^2 = 5,807 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat berat pelat } (M_{MS_s}) = \frac{1}{8} \cdot W_s \cdot L_b^2 = 30,375 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban mati tambahan } (M_{MA}) = \frac{1}{8} \cdot W_a \cdot L_b^2 = 5,156 \text{ kNm}$$

$$\text{Geser akibat berat stringer } (V_{MS_{str}}) = \frac{W_{str} \cdot L_b}{2} = 4,66 \text{ kN}$$

$$\text{Geser akibat berat pelat } (V_{MS_s}) = \frac{W_s \cdot L_b}{2} = 24,3 \text{ kN}$$

$$\text{Geser akibat beban mati tambahan } (V_{MA}) = \frac{W_a \cdot L_b}{2} = 4,125 \text{ kN}$$

2) Akibat Beban Kendaraan Standar

Kendaraan standar yang digunakan berdasarkan SNI Pembebanan Jembatan 1725-2016 Pasal 8.4.1.

Beban kendaraan standar (P) = 500 kN

Momen tidak terfaktor akibat kendaraan standar ($M_{TS_{max}}$) = 312,50 kN.m

Geser tidak terfaktor akibat kendaraan standar ($V_{TS_{max}}$) = 250 kN

a) Faktor Distribusi Beban Hidup Balok Interior

$$\text{Eksentrisitas stringer } (e_g) = \frac{P}{M_{TS_{max}}} = 625 \text{ mm}$$

$$\text{Luas penampang } (A_b) = A_{gstr} = 23672 \text{ mm}^2$$

$$\text{Parameter kekakuan longitudinal } (K_g) = n \cdot I_{str} + A_b \cdot e_g^2 = 2,90^{10}$$

$$\text{Nilai } K_g \text{ harus memenuhi syarat batas } 4 \cdot 10^9 \leq K_g \leq 3 \cdot 10^{12}$$

b) Faktor Distribusi Momen Gelagar Interior

Faktor distribusi momen gelagar interior satu lajur terbebani :

$$g_{mi_1} = 0,06 + \left(\frac{S_{str}}{4300}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{S_{str}}{L_b}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{S_{str}}{L_b t_s^3}\right)^{0,1} = 0,465$$

Faktor distribusi momen gelagar interior dua lajur terbebani :

$$g_{mi_2} = 0,075 + \left(\frac{S_{str}}{2900}\right)^{0,6} \cdot \left(\frac{S_{str}}{L_b}\right)^{0,2} \cdot \left(\frac{S_{str}}{L_b t_s^3}\right)^{0,1} = 0,377$$

Momen tidak terfaktor akibat kendaraan standar

$$M_{TS_{maxs}} = M_{TS_{max}} \cdot \{\max(g_{mi_1}; g_{mi_2})\} = 145,206 \text{ kN.m}$$

c) Faktor Distribusi Geser Gelagar Interior

Faktor distribusi geser gelagar interior satu lajur terbebani :

$$g_{vi_1} = 0,36 + \left(\frac{S_{str}}{7600}\right) = 0,557$$

Faktor distribusi geser gelagar interior dua lajur terbebani :

$$g_{vi_2} = 0,36 + \left(\frac{S_{str}}{3600}\right) - \left(\frac{S_{str}}{10700}\right)^2 = 0,597$$

Geser tidak terfaktor akibat kendaraan standar

$$V_{TS_{maxs}} = V_{TS_{max}} \cdot \{\max(g_{vi_1}; g_{vi_2})\} = 149,254 \text{ kN}$$

Beban BTR dikonversikan menjadi beban merata persatuan panjang.

$$\text{Karena } L_b > 30 \text{ m, maka nilai } q_{BTR} = 9 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) = 6,75 \text{ kPa}$$

$$\text{Beban terbagi rata } (W_{BTR}) = q_{BTR} \cdot S_{str} = 10,125 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Momen maksimum akibat beban terbagi rata } (M_{BTR}) = \frac{1}{8} \cdot W_{BTR} \cdot L_b^2 = 31,641 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser maksimum akibat beban terbagi rata } (V_{BTR}) = \frac{1}{2} \cdot W_{BTR} \cdot L_b = 25,313 \text{ kN}$$

Beban terbesar yang digunakan sebagai momen dan geser maksimum untuk beban lalu lintas, yakni :

$$\text{Momen maksimum lalu lintas } (M_{LL}) = 145,206 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser maksimum lalu lintas } (V_{LL}) = 149,254 \text{ kN}$$

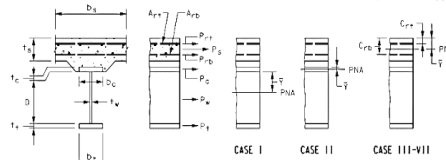
3) Kombinasi Pembebanan

$$\text{Kombinasi momen ultimit } (M_u) = 1,3M_{MS_s} + 1,1M_{MS_{str}} + 2M_{MA} + (1 + \text{FBD}) \cdot 1,8M_{LL} = 395,970 \text{ kNm}$$

Cek Kekuatan Profil (Ultimit)

1) Lentur

a) Penentuan Sumbu Netral Plastis



Gambar 1 Dimensi, Gaya, dan Posisi Gaya Penentuan Besar Momen Plastis

Gaya aksial pada sayap atas (P_c) = 1584 kN

Gaya aksial pada web (P_w) = 2513,28 kN

Gaya aksial pada sayap bawah (P_t) = 1584 kN

Kasus I

$$P_t + P_w = 4097,28 \text{ kN}$$

$$P_c = 1584 \text{ kN}$$

$$P_t + P_w \geq P_c \quad \rightarrow \quad 4097,28 \geq 1584 \dots \text{MPa}$$

Karena kasus I memenuhi persyaratan maka PNA berada pada pelat badan (web), sehingga :

$$Y = 374 \text{ mm}$$

- b) Penentuan Momen Plastis Penampang Nonkomposit

$$d_t = \frac{t_t}{2} + D - Y = 385 \text{ mm}$$

$$d_c = \frac{t_c}{2} + Y = 385 \text{ mm}$$

$$\text{Sehingga momen plastis } (M_p) = \frac{P_w}{2D} \cdot Y^2 + (D-Y)^2 + (P_c \cdot d_c + P_t \cdot d_t) = 1594,548 \text{ kN.m}$$

- c) Penentuan Momen Leleh Penampang Komposit

$$\text{Modulus elastis penampang nonkomposit } (S_{nc}) = \frac{I_{str}}{y_{str}} = 6791443,85 \text{ mm}^3$$

$$M_y = F_y \cdot S_{nc} = 1629,947 \text{ kN.m}$$

- d) Penentuan Nilai Dcp

$$\text{Luas sayap } (A_f) = b_c \cdot t_c = 6600 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas badan } (A_w) = t_w \cdot D = 10472 \text{ mm}^2$$

Karena nilai F_y dan luas dari pelat sayap tarik dan tekan sama, sehingga :

$$Dcp = \frac{D}{2A_w \cdot F_{yw}} (F_{yc} \cdot A_f + F_{yw} \cdot A_w - F_{yt} \cdot A_f) = 374 \text{ mm}$$

- e) Faktor Plastifikasi Pelat Badan

$$\text{Batas rasio kelangsingan pelat badan kompak } (\lambda_{pwDcp}) = \frac{\sqrt{\frac{E_s}{F_y}}}{\left(0,54 \frac{M_p}{R_h M_y} - 0,09\right)^2} = 150,287$$

$$\text{Hitung batas rasio kelangsingan untuk pelat badan nonkompak } (\lambda_{rw}) = 5,7 \sqrt{\frac{E_s}{F_y}} = 164,545$$

Faktor plastifikasi pelat badan harus diambil sebagai berikut :

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_y} = 0,978$$

$$R_{pt} = \frac{M_p}{M_y} = 0,978$$

- f) Hitung Ketahanan Terhadap Tekuk Lokal Pelat Sayap Tekan

Untuk pelat sayap tekan dengan bracing tidak menerus, maka berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal A6.3.2 :

Rasio kelangsingan untuk pelat sayap tekan ;

$$\lambda_f = 6,818$$

$$\lambda_{pf} = 10,97$$

$$\lambda_f \leq \lambda_{pf} \quad \rightarrow \quad 6,818 \leq 10,97 \dots \text{OKE}$$

Maka, penampang dengan pelat sayap kompak.

Sehingga tekuk lokal pelat sayap tekan adalah :

$$M_{nc1} = R_{pc} \cdot M_y = 1594,548 \text{ kN.m}$$

- g) Periksa tekuk torsi lateral pelat sayap tekan

$$\text{Jari-jari girasi efektif } (r_t) = 77,016 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang tanpa bracing } (L_b) = 5000 \text{ mm}$$

Batasan panjang tanpa bracing (L_p) untuk mencapai tahanan lentur nominal :

$$L_p = 2223,259 \text{ mm}$$

Jadi : $L_b \geq L_p$

Hitung tegangan pelat sayap tekan pada saat mencapai leleh nominal penampang (F_{yr}) dengan mengambil nilai minimum dari ketiga persyaratan berikut :

1. $0,7.F_y = 168 \text{ MPa}$
2. $R_h.F_y \cdot \frac{S_{xt}}{S_{xc}} = 240 \text{ MPa}$
3. $F_{yw} = 240 \text{ MPa}$

Sehingga diperoleh nilai $F_{yr} = 168 \text{ MPa}$

Konstanta torsi St. Venant (J_s) = $\frac{D \cdot t_w^3}{3} + \frac{b_c \cdot t_c^3}{3} \cdot (1 - 0,63 \cdot \frac{t_c}{b_c}) + \frac{b_t \cdot t_t^3}{3} \cdot (1 - 0,63 \cdot \frac{t_t}{b_t}) = 2715383,147 \text{ mm}^4$

Hitung ketinggian antara garis pusat pelat sayap (h) = $0,5t_c + D + 0,5t_t = 770 \text{ mm}$

Hitung batas panjang tidak terkekang (L_r) untuk mencapai leleh nominal awal pada kedua pelat sayap :

$$L_r = 1,95 \cdot r_t \cdot \frac{E_s}{F_{yr}} \cdot \sqrt{\frac{J_s}{S_{xc} \cdot h}} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{1 + 6,76 \cdot \left(\frac{F_{yr}}{E_s} \cdot \frac{S_{xc}}{J_s}\right)^2}} = 9399,729 \text{ mm}$$

$L_p < L_b < L_r$

Jika $L_p < L_b < L_r$, maka $C_b = 1$

Tekuk torsi lateral pelat sayap tekan berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal A6.3.3 adalah :

$$M_{nc2} = C_b \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{F_{yr} \cdot S_{xc}}{R_{pc} \cdot M_y} \right) \cdot \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \cdot R_{pc} \cdot M_y = 441,466 \text{ kN.m}$$

Dari kedua nilai M_{nc} tersebut diambil nilai paling minimum untuk dihitung ke dalam persyaratan berikut :

$$M_{u_ultimit} + \frac{f_l}{3} \cdot S_{xc} \leq \phi_f \cdot M_{nc} \quad \rightarrow \quad 395,970 \leq 397,319 \text{OKE}$$

2) Geser

Tahanan geser harus memenuhi persyaratan berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal 6.10.9 :

$$V_u \leq \phi_v \cdot V_n$$

Hitung gaya geser pada saat ultimit (V_u) = $1,1V_{MS_str} + 1,3V_{MS_s} + 2V_{MA} + (1 + FBD) \cdot 1,8V_{LL} = 394,204 \text{ kN}$

Hitung gaya geser plastis (V_p) = $0,58F_y \cdot D \cdot t_w = 1457,702 \text{ kN}$

Hitung nilai geser nominal pada penampang

$$V_n = V_{cr} = C \cdot V_p = 1457,702 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 1457$$

Periksa gaya geser yang terjadi dengan tahanan nominal geser :

$$V_u \leq \phi_v \cdot V_n \quad \rightarrow \quad 394,204 \leq 1457,702 \text{OKE}$$

Perencanaan Profil Cross Beam

Reaksi tumpuan pada stringer

$$\text{Reaksi tumpuan akibat berat stringer } (R_{str}) = \frac{W_{str} \cdot L_b}{2} = 4,646 \text{ kN}$$

$$\text{Reaksi tumpuan akibat berat pelat } (R_s) = \frac{W_s \cdot L_b}{2} = 24,3 \text{ kN}$$

$$\text{Reaksi tumpuan akibat beban mati tambahan } (R_{MA}) = \frac{W_a \cdot L_b}{2} = 4,125 \text{ kN}$$

$$\text{Reaksi tumpuan akibat beban terbagi rata } (R_{BTR}) = \frac{1}{2} \cdot q_{BTR} \cdot L_b = 25,3125 \text{ kN}$$

Perhitungan beban dan gaya dalam pada crossbeam

1) Beban pada cross beam

$$\text{Berat sendiri cross beam } (W_{cbi}) = A_{gcbi} \cdot \gamma_s = 2,047 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Berat mati komponen cross beam } (MS_{cbi}) = W_{cbi} = 2,047 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Karena contoh tinjauan adalah cross beam tengah, yang menjadi beban terpusat adalah sebesar dua kali reaksi tumpuan pada stringer (jarak antara cross beam seragam), karena adanya pengaruh dari stringer kiri dan stringer kanan.

$$\text{Beban mati stringer } (P_{str}) = 2 \cdot R_{str} = 9,291 \text{ kN}$$

$$\text{Beban mati pelat } (P_s) = 2 \cdot R_s = 48,6 \text{ kN}$$

$$\text{Beban mati tambahan } (P_{MA}) = 2 \cdot R_{MA} = 8,25 \text{ kN}$$

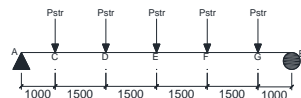
2) Perhitungan gaya dalam pada cross beam

Karena beban berat sendiri adalah beban merata, maka momen maksimum akibat beban cross beam ditentukan dengan persamaan-persamaan berikut :

$$\text{Momen akibat berat cross beam } (M_{MS_cbi}) = \frac{1}{8} MS_{cbi} \cdot L_{cb}^2 = 16,373 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser akibat berat cross beam } (V_{MS_cbi}) = \frac{W_{cb} \cdot L_b}{2} = 8,187 \text{ kN}$$

a) Akibat Stringer



Gambar 2 Posisi Beban Stringer Pada Cross Beam

$$d_1 = 1000 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1500 \text{ mm}$$

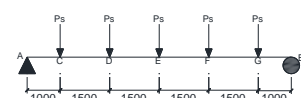
Reaksi tumpuan beban stringer pada cross beam :

$$R_{str} = \frac{P_{str} \cdot (d_2 \cdot 4 + d_1) + P_{str} \cdot (d_2 \cdot 3 + d_1) + P_{str} \cdot (d_2 \cdot 2 + d_1) + P_{str} \cdot (d_2 + d_1) + P_{str} \cdot (d_1)}{L_{cb}} = 23,228 \text{ kN}$$

$$\text{Momen maksimum } (M_{MS_str}) = R_{str} \cdot (d_1 + d_2 \cdot 2) - P_{str} \cdot (d_2 \cdot 2) - P_{str} \cdot (d_2) = 51,102 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser maksimum } (V_{MS_str}) = R_{str} = 23,228 \text{ kN}$$

b) Akibat Beban Pelat



Gambar 3 Posisi Beban Pelat Pada Cross Beam

$$d_1 = 1000 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1500 \text{ mm}$$

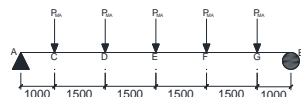
Reaksi tumpuan beban pelat pada cross beam

$$R_s = \frac{P_s \cdot (d_2 \cdot 4 + d_1) + P_s \cdot (d_2 \cdot 3 + d_1) + P_s \cdot (d_2 \cdot 2 + d_1) + P_s \cdot (d_2 + d_1) + P_s \cdot (d_1)}{L_{cb}} = 121,5 \text{ kN}$$

$$\text{Momen maksimum } (M_{MS_s}) = R_s \cdot (d_1 + d_2 \cdot 2) - P_s \cdot (d_2 \cdot 2) - P_s \cdot (d_2) = 267,3 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser maksimum } (V_{MS_s}) = R_s = 121,5 \text{ kN}$$

c) Akibat Beban Mati Tambahan



Gambar 4 Posisi Beban Mati Tambahan Pada Cross Beam

$$d_1 = 1000 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1500 \text{ mm}$$

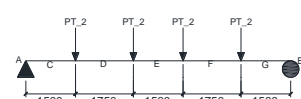
Reaksi tumpuan beban mati tambahan pada cross beam

$$R_{MA} = \frac{P_{MA} \cdot (d_2 \cdot 4 + d_1) + P_{MA} \cdot (d_2 \cdot 3 + d_1) + P_{MA} \cdot (d_2 \cdot 2 + d_1) + P_{MA} \cdot (d_2 + d_1) + P_{MA} \cdot (d_1)}{L_{cb}} = 20,625 \text{ kN}$$

$$\text{Momen maksimum } (M_{MA}) = R_{MA} \cdot (d_1 + d_2 \cdot 2) - P_{MA} \cdot (d_2 \cdot 2) - P_{MA} \cdot (d_2) = 45,375 \text{ kN.m}$$

$$\text{Geser maksimum } (V_{MA}) = R_{MA} = 20,625 \text{ kN}$$

d) Akibat Beban Truk



Gambar 5 Posisi Beban Truk Tambahan Pada Cross Beam

$$d_1 = 1500 \text{ mm}$$

$$d_2 = 1750 \text{ mm}$$

$$d_3 = 1500 \text{ mm}$$

Faktor beban dinamis (FBD) = 0,3

Untuk satu roda tengah atau belakang (P_{T_2}) = 112,5 kN

Reaksi tumpuan akibat beban roda atau belakang

$$R_{A_2} = \frac{P_{T_2} \cdot (d_{2,4} + d_1) + P_{T_2} \cdot (d_{2,3} + d_1) + P_{T_2} \cdot (d_{2,2} + d_1) + P_{T_2} \cdot (d_2 + d_1) + P_{T_2} \cdot (d_1)}{L_{cb}} = 203,906 \text{ kN}$$

Momen maksimum (M_T) = $R_{T_2} \cdot (d_1 + d_{2,2}) - P_{T_2} \cdot (d_{2,2}) - P_{T_2} \cdot (d_2) = 465,820 \text{ kN.m}$

Geser maksimum (V_T) = $R_{A_2} = 203,906 \text{ kN}$

3) Kombinasi pembebanan kendaraan standar

$$M_{u_ultimit} = 1,3M_{MS_s} + 1,1M_{MS_str} + 1,1M_{MS_cbl} + 2M_{MA} + (1+FBD) \cdot 1,8M_{TS} = 1602,482 \text{ kN.m}$$

Cek Kekuatan Profil (Kondisi Ultimit)

1) Lentur

a) Penentuan Sumbu Netral Plastis

Gaya aksial pada sayap atas (P_c) = 1872 kN

Gaya aksial pada web (P_w) = 2513,28 kN

Gaya aksial pada sayap bawah (P_t) = 1872 kN

Kasus I

$$P_t + P_w = 4385,28 \text{ kN}$$

$$P_c = 1872 \text{ kN}$$

$$P_t + P_w \geq P_c$$

Karena kasus I memenuhi persyaratan maka PNA berada pada pelat badan (web), sehingga :

$$Y = \left(\frac{D_i}{2}\right) \cdot \left(\frac{P_t - P_c}{P_w} + 1\right) = 374 \text{ mm}$$

b) Penentuan Momen Plastis Penampang Nonkomposit

$$d_t = \frac{t_{ti}}{2} + D_i - Y = 387 \text{ mm}$$

$$d_c = \frac{t_{ci}}{2} + Y = 387 \text{ mm}$$

Sehingga momen plastis dapat dihitung dengan :

$$M_p = \frac{P_w}{2D_i} \cdot Y^2 + (D_i - Y)^2 + (P_c \cdot d_c + P_t \cdot d_t) = 1823,796 \text{ kN.m}$$

c) Penentuan Momen Leleh Penampang Komposit

$$\text{Modulus elastis penampang nonkomposit } (S_{nc}) = \frac{I_{cbl}}{y_{cbl}} = 7807486,631 \text{ mm}^3$$

$$M_y = F_y \cdot S_{nc} = 1873,797 \text{ kN.m}$$

d) Penentuan Nilai Dcp

$$\text{Luas sayap } (A_f) = b_{ci} \cdot t_{ci} = 7800 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas badan } (A_w) = t_{wi} \cdot D_i = 10472 \text{ mm}^2$$

Nilai F_y dan luas dari pelat sayap tarik dan tekan sama, maka :

$$Dcp = \frac{D}{2A_w \cdot F_{yw}} (F_{yc} \cdot A_f + F_{yw} \cdot A_w - F_{yt} \cdot A_f) = 374 \text{ mm}$$

e) Faktor Plastifikasi Pelat Badan

$$\text{Batas rasio kelangsingan pelat badan kompak } (\lambda_{pwDcp}) = \frac{\sqrt{\frac{E_s}{F_y}}}{\left(0,54 \cdot \frac{M_p}{R_h \cdot M_y} - 0,09\right)^2} = 152,143$$

$$\text{Hitung batas rasio kelangsingan untuk pelat badan nonkompak } (\lambda_{rw}) = 5,7 \sqrt{\frac{E_s}{F_y}} = 164,545$$

Faktor plastifikasi pelat badan harus diambil sebagai berikut :

$$R_{pc} = \frac{M_p}{M_y} = 0,973$$

$$R_{pt} = \frac{M_p}{M_y} = 0,973$$

f) Hitung ketahanan terhadap tekuk lokal pelat sayap tekan

Untuk pelat sayap tekan dengan bracing tidak menerus, maka berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal A6.3.2 :

Rasio kelangsingan untuk pelat sayap tekan ;

$$\lambda_f = 5,769$$

$$\lambda_{pf} = 10,970$$

$$\lambda_f \leq \lambda_{pf}$$

Maka, penampang dengan pelat sayap kompak.

Sehingga tekuk lokal pelat sayap tekan adalah $(M_{nc1}) = R_{pc} \cdot M_y = 1823,796 \text{ kN.m}$

g) Periksa tekuk torsi lateral pelat sayap tekan

Jari-jari girasi efektif (r_t) = 78,286 mm

Panjang tanpa bracing (L_b) = 1500

Batasan panjang tanpa bracing (L_p) untuk mencapai tahanan lentur nominal = 2223,259 mm

$$L_b \leq L_p$$

Sehingga tekuk torsi lateral pelat sayap tekan adalah $(M_{nc2}) = 1823,796 \text{ kN.m}$

Dari kedua nilai M_{nc} tersebut diambil nilai paling minimum untuk dihitung ke dalam persyaratan berikut :

$$M_{u_ultimit} + \frac{f_l}{3} \cdot S_{xc} \leq \phi_f \cdot M_{nc} \quad \rightarrow \quad 1602,482 \leq 1641,416 \text{OKE}$$

h) Periksa tahanan lentur berdasarkan leleh pada pelat sayap tarik

Modulus elastisitas penampang nonkomposit (S_{nt}) = $\frac{I_{cbi}}{y_{cbi}} = 7807486,631 \text{ mm}^3$

$$M_{yt} = F_{yt} \cdot S_{nt} = 1873,797 \text{ kN.m}$$

$$\text{Faktor plastifikasi pelat badan } (R_{pt}) = \frac{M_p}{M_{yt}} = 0,973$$

Modulus elastisitas penampang terhadap sumbu mayor dari penampang ke pelat sayap tarik

$$S_{xt} = \frac{M_{yt}}{F_{yt}} = 7807486,631 \text{ mm}^3$$

Sehingga tahanan lentur terhadap pelat sayap tarik (M_{nt}) = $R_{pt} \cdot M_{yt} = 1823,796 \text{ kN.m}$

$$M_{u_ultimit} + \frac{f_l}{3} \cdot S_{xc} \leq \phi_f \cdot M_{nt} \quad \rightarrow \quad 1602,482 \leq 1641,416$$

2) Geser

Tahanan geser harus memenuhi persyaratan berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal 6.10.9 :

$$V_u \leq \phi_v \cdot V_n$$

$$\text{Gaya geser ultimit } (V_u) = 1,1V_{MS_str} + 1,1V_{MS_cbi} + 1,3V_{MS_s} + 2V_{MA} + (1+FBD) \cdot 1,8V_{TS} = 710,897 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya geser plastis } (V_p) = 0,58F_y \cdot D_i \cdot t_{wi} = 1457,702 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya geser nominal pada penampang } (V_n) = 1457,702 \text{ kN}$$

$$\phi_v \cdot V_n = 1457,702 \text{ kN}$$

Periksa gaya geser yang terjadi dengan tahanan nominal geser :

$$V_u \leq \phi_v \cdot V_n \quad \rightarrow \quad 710,897 \leq 1457,702 \text{OKE}$$

Perencanaan Profil Rangka

Reaksi tumpuan di cross beam

1) Akibat beban mati (M_{Ss} , M_{Ssb})

a) Reaksi tumpuan di cross beam interior

Reaksi tumpuan akibat cross beam interior (R_{cbi}) = 8,187 kN

Reaksi tumpuan akibat beban pelat (R_{si}) = 121,5 kN

Reaksi tumpuan akibat stringer (R_{str_i}) = 23,228 kN

Reaksi tumpuan akibat berat sendiri cross beam interior dan stringer (R_{Msi}) = 31,415 kN

b) Reaksi tumpuan di cross beam eksterior

Reaksi tumpuan akibat cross beam eksterior (R_{cbe}) = 8,187 kN

Reaksi tumpuan akibat beban pelat (R_{se}) = $\frac{R_{si}}{2} = 60,75 \text{ kN}$

Reaksi tumpuan akibat stringer (R_{str_e}) = $\frac{R_{str_i}}{2} = 11,614 \text{ kN}$

Reaksi tumpuan akibat berat sendiri cross beam interior dan stringer (R_{Mse}) = $R_{cbe} + R_{str_e} = 19,801 \text{ kN}$

2) Akibat beban mati tambahan

a) Reaksi tumpuan di cross beam interior

Reaksi tumpuan akibat beban mati tambahan (R_{MA_i}) = 20,625 kN

b) Reaksi tumpuan di cross beam eksterior

Reaksi tumpuan akibat beban mati tambahan (R_{MA_e}) = $\frac{R_{MA_i}}{2} = 10,3125 \text{ kN}$

3) Akibat beban lajur

a) Reaksi tumpuan di cross beam interior

Reaksi tumpuan akibat beban terbagi rata (R_{BTR_i}) = 191,25 kN

Beban garis terpusat (BGT) terletak tepat pada cross beam tengah pada tengah bentang jembatan.

Faktor beban dinamis (FBD) = 0,4

Beban Garis Terpusat (BGT) = $49 \frac{kN}{m}$

$BGT_{used} = (1+FBD).BGT = 68,6 \frac{kN}{m}$

Reaksi tumpuan akibat beban garis terpusat (R_{BGT}) = $\frac{1}{2}.BGT_{used}.L_{cb} = 274,4$ kN

b) Reaksi tumpuan di cross beam eksterior

Reaksi tumpuan akibat beban terbagi rata (R_{BTR_e}) = $\frac{R_{BTR_i}}{2} = 95,625$ kN

4) Akibat Beban Truk

Faktor beban dinamis (FBD_T) = 0,3

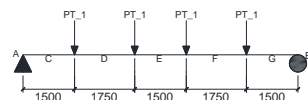
Untuk satu roda depan (P1) = 25 kN

Untuk satu roda tengah dan belakang (P2) = 112,5 kN

Akibat beban truk (roda depan) (P_{T_1}) = $P1.(1+FBD_T) = 32,5$ kN

Akibat beban truk (roda tengah dan belakang dengan beban sama) (P_{T_2}) = $P2.(1+FBD_T) = 146,25$ kN

a) Dua Truk Bergerak



Gambar 6 Posisi Beban Dua Truk Pada Cross Beam

$d_{ac} = 1500$ mm

$d_{cd} = 1750$ mm

$d_{de} = 1500$ mm

Reaksi tumpuan akibat beban roda depan (R_{A_2a}) = $\frac{P_{T_1} \cdot (d_{cd} \cdot 2 + d_{de} + d_{ac}) + P_{T_2} \cdot (d_{de} + d_{cd} + d_{ac})}{L_{cb}} = 65$ kN

Reaksi tumpuan akibat beban roda depan dan belakang

$R_{A_2b} = \frac{P_{T_2} \cdot (d_{cd} \cdot 2 + d_{de} + d_{ac}) + P_{T_1} \cdot (d_{de} + d_{cd} + d_{ac})}{L_{cb}} = 292,5$ kN

5) Beban temperatur seragam

Berdasarkan SNI 1725:2016 tentang pembebanan jembatan untuk temperatur maksimum dan minimum pada jembatan baja dapat diambil dengan nilai sebagai berikut:

$T_{maxdesign} = 40$ °C

$T_{mindesign} = 15$ °C

Koefisien muai panjang baja (α) = $0,000012 \frac{mm}{mm \cdot ^\circ C}$

Panjang jembatan (L_b) = 60.000 mm

Perbedaan suhu (ΔT) = $T_{maxdesign} - T_{mindesign} = 25$ °C

Deformasi struktur (ΔL) = $\alpha \cdot L_b \cdot (T_{maxdesign} - T_{mindesign}) = 18$ mm

Gaya Dalam Pada Rangka Baja

Dalam penelitian ini, rangka baja yang ditinjau yaitu rangka nomor 2 dan 3. Rangka baja nomor 2 terjadi gaya aksial tarik dan rangka baja nomor 3 terjadi gaya aksial tekan.

1) Batang Tarik

a) Gaya dalam pada batang tarik

Gaya aksial tarik pada rangka baja nomor 2 yaitu :

Akibat berat sendiri rangka, cross beam, dan stringer (P_{MS_tarik}) = 206,646 kN

Akibat beban mati pelat lantai (P_{MS_tarik}) = 730,335 kN

Akibat beban hidup (truk) gaya maksimum berdasarkan dua truk yang bergerak pada jembatan

($P_{LL_truk_tarik}$) = 284,155 kN

Akibat beban hidup (lajur) ($P_{LL_lajur_tarik}$) = 1149,601 kN

Kombinasi ultimit dengan beban truk ($P_{u_truk_tarik}$)

$$P_{u_truk_tarik} = 1,3P_{MS_tarik} + 1,1P_{MS_tarik} + 2P_{MA_tarik} + 1,8P_{LL_truk_tarik} = 1936,180 \text{ kN}$$

Kombinasi ultimit dengan beban lajur ($P_{u_lajur_tarik}$)

$$P_{u_lajur_tarik} = 1,3P_{MS_tarik} + 1,1P_{MS_tarik} + 2P_{MA_tarik} + 1,8P_{LL_lajur_tarik} = 3493,981 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil analisis maka gaya aksial ultimit ditentukan oleh beban lajur, sehingga :

$$P_{u_tarik} = P_{u_lajur_tarik} = 3493,981 \text{ kN}$$

b) Analisis kapasitas penampang batang tarik

Panjang tidak terkekang (L_u) = 6557,439 mm

Luas penampang (A_{gp}) = 19.494 mm²

Inersia penampang (I_p) : $I_{xp} = 428.000.000 \text{ mm}^4$

$$I_{yp} = 144.000.000 \text{ mm}^4$$

$$\text{Jari-jari girasi } (r_x) = \sqrt{\frac{I_{xp}}{A_{gp}}} = 148,174 \text{ mm}$$

$$\text{Jari-jari girasi minimum } (r_y) = \sqrt{\frac{I_{yp}}{A_{gp}}} = 85,947 \text{ mm}$$

Modulus geser baja (G_s) = 77.000 MPa

Modulus elastisitas baja (E_s) = 200.000 MPa

Faktor reduksi untuk tarik, kondisi leleh dari luas penampang kotor (ϕ_{tarik_leleh}) = 0,9

Faktor reduksi untuk tarik, kondisi fraktur dari luas penampang bersih ($\phi_{tarik_fraktur}$) = 0,75

c) Tahanan tarik terfaktor

Tahanan tarik terfaktor diambil nilai terkecil diantara 2 persamaan di bawah ini:

1. Tahanan tarik terfaktor kondisi 1 (kondisi leleh dari luas penampang kotor)

$$P_{r1} = \phi_{tarik_leleh} \cdot P_{ny} = \phi_{tarik_leleh} \cdot F_y \cdot A_g$$

$$P_{r2} = \phi_{tarik_fraktur} \cdot P_{nu} = \phi_{tarik_fraktur} \cdot F_u \cdot A_n R_p \cdot U$$

2. Tahanan tarik terfaktor kondisi 2 (kondisi fraktur dari luas penampang bersih)

$$A_{gp} = 19.494 \text{ mm}^2$$

$$P_{ny} = F_y \cdot A_{gp} = 4678,56 \text{ kN}$$

$$P_{r1} = \phi_{tarik_leleh} \cdot P_{ny} = 4210,704 \text{ kN}$$

Tahanan tarik terfaktor kondisi 2 (kondisi fraktur dari luas penampang bersih)

Diameter baut (d_b) = 24 mm

Diameter lubang baut (d_h) = $d_b + 3 \text{ mm} = 27 \text{ mm}$

Jumlah baut berdasarkan pola keruntuhan A-D (n_b) = 4 buah

Luas netto (A_n) = $A_{gp} - n_b \cdot d_h \cdot t_{cp} = 17.442 \text{ mm}^2$

Faktor reduksi shear lag (U):

Jarak dari serat atas ke titik berat profil (X) = 175 mm

Panjang elemen yang terkena baut (l_b) = 580 mm

Tinggi penampang IWF rangka utama (d_p) = 350 mm

$$U_1 = \frac{(b_{cp} - t_{cp}) + (b_{tp} - t_{tp})}{A_{gp}} = 0,696$$

$$U_2 = 1 - \frac{X}{l_b} = 0,698$$

$$U_3 = 0,9 \quad \text{Karena } b_{cp} \geq \frac{2}{3}d_p$$

Ambil nilai maksimum untuk faktor shear lag, sehingga diperoleh: $U = 0,9$

Luas netto efektif (A_e) = $A_n \cdot U = 15697,8 \text{ mm}^2$

Faktor reduksi untuk lubang baut yang dibor (R_p) = 1

Tahanan nominal kondisi fraktur (P_{nu}) = 5808,186 kN

Tahanan tarik terfaktor kondisi fraktur (P_{r2}) = 4356,140 kN

Tahanan tarik terfaktor diambil nilai terkecil diantara dua kondisi, sehingga $P_r = 4210,704 \text{ kN}$

Tahanan tarik nominal dan tarik yang terjadi di batang (P_{u_tarik}) = 3493,981 kN

2) Batang Tekan

a) Gaya dalam pada batang tekan

Gaya aksial tekan pada rangka baja nomor 3 yaitu :

Akibat berat sendiri rangka, cross beam, dan stringer (P_{MS_tekan}) = 169,074 kN

Akibat beban mati pelat lantai (P_{MS_taekan}) = 597,547 kN

Akibat beban hidup (truk) gaya maksimum berdasarkan dua truk yang bergerak pada jembatan ($P_{LL_truk_tekan}$) = 35,519 kN

Akibat beban hidup (lajur) ($P_{LL_lajur_tekan}$) = 940,583 kN

Kombinasi ultimit dengan beban truk ($P_{u_truk_tekan}$)

$$P_{u_truk_tekan} = 1,3P_{MS_taekan} + 1,1P_{MS_taekan} + 2P_{MA_tekan} + 1,8P_{LL_truk_tekan} = 1229,598 \text{ kN}$$

Kombinasi ultimit dengan beban lajur ($P_{u_lajur_tekan}$)

$$P_{u_lajur_tekan} = 1,3P_{MS_tekan} + 1,1P_{MS_tekan} + 2P_{MA_tekan} + 1,8P_{LL_lajur_tekan} = 2858,712 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil analisis maka gaya aksial ultimit ditentukan oleh beban lajur, sehingga :

$$P_{u_tekan} = P_{u_lajur_tekan} = 2858,712 \text{ kN}$$

b) Analisis kapasitas penampang batang tekan

Faktor panjang efektif (K) = 0,75 mm

Panjang tidak terkekang (L_u) = 6557,439 mm

Luas penampang (A_{gp}) = 19.494 mm²

Inersia penampang (I_p) : $I_{xp} = 428.000.000 \text{ mm}^4$

$I_{yp} = 144.000.000 \text{ mm}^4$

Jari-jari girasi (r_x) = $\sqrt{\frac{I_{xp}}{A_{gp}}} = 148,174 \text{ mm}$

Jari-jari girasi minimum (r_y) = $\sqrt{\frac{I_{yp}}{A_{gp}}} = 85,947 \text{ mm}$

Modulus geser baja (G) = 77.000 MPa

Faktor tahanan untuk tekan (ϕ_{tekan}) = 0,9

c) Tahanan kritis tekuk elastik (P_e)

1. Tahanan kritis tekuk elastik berdasarkan tekuk lentur (r_{min} adalah r_y)

$$P_{e1} = \frac{(\pi^2 \cdot E_s)}{\left(\frac{K \cdot L_u}{r_y}\right)^2} \cdot A_{gp} = 11751,715 \text{ kN}$$

2. Komponen simetris ganda (profil I), tahanan kritis tekuk elastik berdasarkan tekuk torsi

Panjang efektif untuk tekuk torsi ($K_z L_z$) = 4918,079 mm

Tebal sayap (t_{cp}) = 19 mm

Jarak antara pusat sayap (h_p) = $d_p - \left(\frac{t_{cp} + t_{tp}}{2}\right) = 331 \text{ mm}$

Konstanta torsi warping (C_w) = $\frac{I_{yp} \cdot h_p^2}{4} = 3.944.196.000.000 \text{ mm}^6$

Konstanta torsi St. Venant (J_s)

$$J_s = \frac{d_p \cdot t_{wp}^3}{3} + \frac{b_{cp} \cdot t_{cp}^3}{3} \cdot (1 - 0,63 \cdot \frac{t_{cp}}{b_{cp}}) + \frac{b_{tp} \cdot t_{tp}^3}{3} \cdot (1 - 0,63 \cdot \frac{t_{tp}}{b_{tp}}) = 2377923,847 \text{ mm}^4$$

$$P_{e2} = \left[\frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot C_w}{(K_z L_z)^2} + G \cdot J_s \right] \cdot \frac{A_{gp}}{I_{xp} + I_{yp}} = 9731,953 \text{ kN}$$

d) Tahanan tekan nominal (P_n)

Sebelum menentukan tahanan tekan nominal, komponen tekan dengan penampang tidak langsing harus di periksa tahanan nominal leleh (P_o) terhadap tahanan kritis tekuk elastik (P_e) dengan persyaratan sebagai berikut:

$$P_o = F_y \cdot A_g = 4678,56 \text{ kN}$$

$$\frac{P_{e1}}{P_o} \geq 0,44 \rightarrow 2,512 \geq 0,44 \text{OKE}$$

$$\frac{P_{e2}}{P_o} \geq 0,44 \rightarrow 2,080 \geq 0,44 \text{OKE}$$

Berdasarkan AASHTO LRFD 2017 Pasal 6.9.4.1.1, jika $\frac{P_e}{P_o} \geq 0,44$ maka tahanan tekan nominal ditentukan dengan persamaan berikut :

$$P_{n1} = \left[0,658 \left(\frac{P_o}{P_{e1}} \right) \right] \cdot P_o = 3960,452 \text{ kN}$$

$$P_{n2} = \left[0,658 \left(\frac{P_o}{P_{e2}} \right) \right] \cdot P_o = 3825,831 \text{ kN}$$

Diambil tahanan tekan nominal (P_n) yang terkecil, sehingga : $P_n = 3825,831 \text{ kN}$

SIMPULAN

Hasil yang diperoleh dari penelitian adalah beban mati stringer sebesar 1,858 kN/m, beban mati cross beam sebesar 2,047 kN/m, beban mati perkerasan sebesar 1,65 kN/m, beban terbagi rata sebesar 10,125 kN/m, beban garis terpusat sebesar 49 kN/m, beban truk sebesar 650 kN, beban temperatur sebesar 25°C. Stringer yang digunakan adalah IWF 800.300.22.14, cross beam yang digunakan adalah IWF 800.300.26.14, rangka utama yang digunakan adalah IWF 350.350.19.19.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan penelitian ini, terkhusus kepada Politeknik Negeri Medan melalui pihak P3M atas bantuan anggaran HAKIM sesuai dengan nomor surat kwitansi 125/KONSEP-IV/HI/2023

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *Penetapan Standar Nasional Indonesia 1729:2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural*. 8, 1–336.
- PUPR, K. (2015). Pedoman Persyaratan Umum Perencanaan Jembatan. *Surat Edaran Menteri PUPR No. 07/SE/M/2015*, 1–28.
- AASHTO. (2007). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications: SI Unit 4th Edition 2007. In *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- PUPR, K. (2021). Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan. *Surat Edaran Menteri PUPR No. 06/SE/Db/2021*, 1–9.