

Modifikasi Perencanaan Struktur Jembatan Putat Lor Menggunakan Struktur Busur Rangka Dengan Analisa Waktu & Biaya

Planning Modification Of Putat Lor Bridge Using Steel Truss Arch Bridge With Time & Cost Analysis

Cahyo Umar Wibisono¹, Naufal Ramadhani Kuncoro², Rahmat Dwi Sutrisno³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Gresik, Gresik – Indonesia
*Email: ¹cahyoumarwibisono@gmail.com, ²naufalrk333@gmail.com, ³rahmatdwisutrisno@umg.ac.id

Artikel histori:

Submitted 22 April 2025
Revised 30 Mei 2025
Accepted 15 Juni 2025

ABSTRAK: Jembatan Putat Lor yang terletak di Kali Lamong, Desa Putat Lor, Kecamatan Menganti, Kabupaten Gresik memiliki panjang 120 m dan lebar 6,5 m dengan struktur beton bertulang. Kondisi eksisting menunjukkan keterbatasan kapasitas, sehingga diperlukan alternatif desain yang lebih efisien. Penelitian ini bertujuan merencanakan ulang struktur jembatan dengan sistem busur rangka baja agar lebih optimal secara teknis maupun biaya. Analisis struktur dan pembebanan dilakukan dengan SAP2000 dan SPColumn berdasarkan standar RSNI/SNI (RSNI T-12-2004, RSNI T-03-2005, SNI 1725:2016, SNI 1729:2020, dan lainnya), sedangkan biaya dan penjadwalan dihitung menggunakan Microsoft Project mengacu pada HSPK Bina Marga Kabupaten Gresik tahun 2023. Hasil perencanaan menunjukkan bahwa desain jembatan busur rangka baja memerlukan biaya Rp33.548.000.000 dengan durasi 1.125 hari. Desain ini memenuhi kriteria kelayakan teknis, efisiensi konstruksi, dan memberikan kontribusi sebagai alternatif jembatan yang aman, ekonomis, serta sesuai standar nasional.

Kata kunci: Jembatan Busur Rangka Baja; Putat Lor; Perencanaan; Manajemen Konstruksi

ABSTRACT: The Putat Lor Bridge located on the Lamong River, Putat Lor Village, Menganti District, Gresik Regency has a length of 120 m and a width of 6.5 m with a reinforced concrete structure. The existing condition shows limited capacity, so a more efficient design alternative is needed. This study aims to redesign the bridge structure with a steel truss arch system to be more optimal technically and cost-wise. Structural and loading analysis was carried out using SAP2000 and SPColumn based on RSNI/SNI standards (RSNI T-12-2004, RSNI T-03-2005, SNI 1725:2016, SNI 1729:2020, and others), while costs and scheduling were calculated using Microsoft Project referring to the HSPK Bina Marga of Gresik Regency in 2023. The planning results show that the design of the steel truss arch bridge requires a cost of Rp33,548,000,000 with a duration of 1,125 days. This design meets the criteria of technical feasibility, construction efficiency, and contributes as a safe, economical, and national standard-compliant bridge alternative.

Keywords: Steel Truss Bow Bridge; Putat Lor; Planning; Construction Management

1. PENDAHULUAN

Dalam era Revolusi Industri 4.0, perkembangan ilmu rekayasa teknik sipil semakin pesat untuk menunjang kebutuhan transportasi masyarakat. Transportasi, menurut Peraturan Presiden Republik

Indonesia Nomor 102 Tahun 2022 Pasal 1 Ayat 2, merupakan mata rantai distribusi barang dan mobilitas penumpang yang berperan penting dalam berbagai aspek kehidupan. Sejalan dengan itu, (Steenbrink, 1974) mendefinisikan transportasi

sebagai perpindahan orang atau barang menggunakan alat atau kendaraan dari satu lokasi ke lokasi lain yang terpisah secara geografis. Untuk menunjang kelancaran transportasi, diperlukan infrastruktur memadai seperti jalan, terminal, bandara, dan jembatan. Infrastruktur ini perlu terus diperbarui agar keselamatan, keamanan, dan kenyamanan pengguna transportasi dapat terjamin.

Jembatan memiliki fungsi vital sebagai penghubung wilayah sekaligus simbol kemajuan infrastruktur (Kerzner, 2019). Menurut (Stephenson & Faace, 1996), manajemen proyek berperan penting dalam mengatur sumber daya, termasuk tenaga kerja, material, dan peralatan, agar pembangunan infrastruktur dapat terlaksana secara efisien. Analisis waktu dan biaya adalah dua komponen penting dalam manajemen proyek jembatan. Selanjutnya, (Al Nasser et al., 2016) menegaskan bahwa analisis waktu dan biaya merupakan faktor krusial dalam keberhasilan proyek karena dapat mengurangi risiko keterlambatan maupun pembengkakan anggaran. Lebih lanjut, (Kerzner, 2019.) menekankan bahwa estimasi biaya dan penjadwalan waktu dapat sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, perubahan desain, fluktuasi harga material, dan ketidakpastian kondisi lapangan.

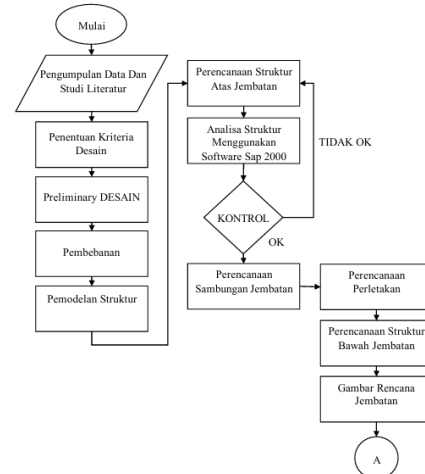
Jembatan Putat Lor terletak di atas Kali Lamong, sungai besar yang bermuara di perbatasan Kota Surabaya dan Kabupaten Gresik yang memiliki fluktuasi debit cukup ekstrem sehingga dibuatkan desain jembatan yang kuat, tahan terhadap beban dinamis, dan memiliki umur layanan panjang.

Desain eksisting Jembatan Putat Lor menggunakan struktur beton dengan bentang total 120 m dan lebar 4,5 m. Meskipun konstruksi beton mampu menahan beban, pada bentang panjang diperlukan beberapa pilar penyangga yang berpotensi mengganggu aliran sungai serta meningkatkan biaya perawatan. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan modifikasi desain menggunakan sistem busur rangka baja (*steel truss arch bridge*), yang menurut (Margianto, 2020) serta (Setiawan & Masagala, 2021) lebih efisien untuk bentang 60–600 m karena mampu mengurangi momen lentur dan jumlah pilar. Menurut (Victor, 1980), bentuk busur memiliki efisiensi struktural tinggi karena gaya yang bekerja disalurkan secara merata sepanjang elemen, sehingga momen lentur berkurang signifikan. Sementara itu, (Septiarsilia et al., 2020) menegaskan bahwa desain busur memungkinkan penggunaan material lebih hemat dibandingkan gelagar paralel tanpa mengurangi kekuatan struktural, sekaligus memberikan nilai estetika tinggi. Namun, penelitian sebelumnya masih terbatas pada aspek struktural, sementara analisis biaya dan waktu konstruksi jarang dibahas secara komprehensif pada konteks lokal. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merencanakan ulang Jembatan Putat Lor dengan sistem busur rangka baja sesuai standar SNI dan

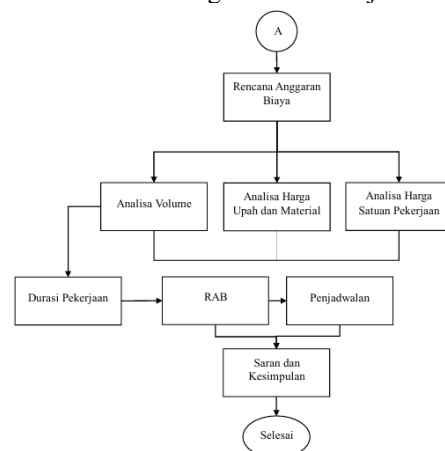
RSNI terbaru, menghitung biaya serta waktu konstruksi berdasarkan HSPK 2023, dan menganalisis kontribusinya terhadap kekuatan, efisiensi material, serta aspek estetika.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan perencanaan teknik dengan mengacu pada standar nasional Indonesia (SNI/RSNI) terbaru terkait perencanaan dan pembebanan jembatan, struktur baja, beton, serta gempa. Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Bagan Alur Pekerjaan



Gambar 2. Lanjutan Bagan Alur Pekerjaan

Perencanaan jembatan dilakukan melalui tahapan yang sistematis, meliputi:

1. Studi Literatur – Teori standar dan penelitian terdahulu terkait perencanaan jembatan.
2. Pengumpulan Data – Kondisi eksisting Jembatan, data teknis, dan HSPK.
3. Analisis Perencanaan – Analisis pembebanan dan pemodelan struktur.
4. Analisis Biaya dan Waktu – RAB dan jadwal proyek dengan acuan HSPK 2023 dan Microsoft Project.
5. Evaluasi Hasil – membandingkan hasil desain dengan standar dan penelitian terdahulu.

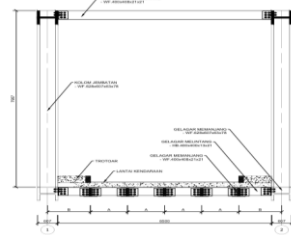
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Preliminary Design

Perencanaan awal Jembatan Putat Lor Menganti dirancang sebagai jembatan rangka busur tipe K-Truss dengan spesifikasi sebagai berikut.

A. Data Jembatan

Lokasi	: Gresik
Jenis Jembatan	: Jembatan Rangka Busur
Tipe Jembatan	: K-Truss steel truss arch
Panjang Jembatan	: 120 m
Lebar Total	: 6,5 (2 x 3,25 m)
Zona Gempa	: Gresik Menganti
Trotoar	: 1 m (kanan & kiri)
Tebal Plat Lantai	: 0,25 m
Tinggi Busur	: 20 m
Tinggi tanpa busur	: 4 m
Panjang panel	: 7,5 m (tiap panel)
Bangunan Bawah	: 2 Abutment
Beton plat lantai	: $F'_c = 35 \text{ MPa}$
Baja Plat lantai	: 370 MPa
Baja rangka BJ-41	: $F_y = 2.500 \text{ kg/cm}^2$ (245 MPa), $f_u = 4.100 \text{ kg/cm}^2$ (402 MPa)



Gambar 3. Layout dan Potongan Melintang Jembatan

3.2. Analisis Pembebanan

Pembebanan mengacu pada SNI 1725:2016, meliputi beban mati, beban hidup, dan gempa.

1. Beban Mati

- Pelat Beton : 5,85 ton/m
- Aspal : 1,07 ton/m
- Pelat Trotoar : 7,02 ton/m
- Bondex : 0,083 ton/m

2. Beban Hidup

- Beban Lajur "D"
Beban Terbagi Rata (BTR) : 4,218 ton/m
Beban Garis Terpusat (BGT) : 28,665 Ton
- Beban Truk "T" : 238,61 Ton
- Beban Pejalan Kaki "P" : 3,823 ton/m
- Beban Rem "B" : 0,21 ton/m

3. Beban Gempa

- $S_s = 0,676 \text{ g}$, $S_1 = 0,296 \text{ g}$, $PGA = 0,312 \text{ g}$
- Jenis Tanah : Tanah SD

Hasil ini menunjukkan bahwa pembebanan jembatan telah mempertimbangkan kondisi lokal (zona gempa Gresik–Menganti), sehingga analisis lebih realistis terhadap kondisi lapangan.

3.3. Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban dihitung sesuai dengan SNI 1725:2016, baik kondisi ultimit maupun daya layan.

- Kombinasi Kuat

1. Kuat 1 : 1,1 MS + 2 MA + 1,8 LL
2. Kuat 2 : 1,1 MS + 2 MA + 1,4 LL
3. Kuat 3 : 1,1 MS + 2 MA + 1,4 Ew
4. Kuat 4 : 1,1 MS + 2 MA
5. Kuat 5 : 1,1 MS + 2 MA + 0,4 Ew

- Kombinasi Ekstrem

1. Ekstrem 1 : 1,1 MS + 2 MA + 0,5 LL + 0,3EqX + 1EqY
2. Ekstrem 2 : 1,1 MS + 2 MA + 0,5 LL + 1EqX + 0,3EqY

- Kombinasi Daya Layan

1. Daya Layan 1 : 1 MS + 1 MA + 1 LL + 1 Ew
2. Daya Layan 2 : 1 MS + 1 MA + 1,3 LL
3. Daya Layan 3 : 1 MS + 1 MA + 0,8 LL
4. Daya Layan 4 : 1 MS + 1 MA + 0,7 Ew

Penggunaan kombinasi beban ini memastikan bahwa desain memperhitungkan kondisi beban paling kritis sesuai standar, baik akibat beban lalu lintas maupun gempa.

3.4. Perencanaan Struktur Atas

3.4.1. Perencanaan Pelat Lantai

A. Perencanaan Pelat Lantai

Tebal pelat lantai dihitung sesuai RSNI T-12-2004 Pasal 5.5.2 dengan jarak antar balok 1,125 m, diperoleh tebal minimum 145 mm. Untuk keamanan dan durabilitas dipilih tebal 250 mm.

$$\text{Rasio bentang pelat dihitung : } \frac{L_y}{L_x} = \frac{6500}{7500} = 0,867$$

Dengan nilai < 1 , pelat bekerja sebagai pelat dua arah.

B. Pembebanan Pelat Lantai

Pembebanan pelat lantai mengacu pada SNI 1725:2016, terdiri dari:

- Beban mati (Pasal 7.2): pelat beton (0,78 ton/m), aspal (0,143 ton/m), kerb (0,936 ton/m), dan bondek (0,11 ton/m). Total 1,969 ton/m.
- Beban hidup (Pasal 8.1): beban lajur "D" (Pasal 8.3.1 $\rightarrow$ BTR = 8,437 ton/m; BGT = 12,986 ton/m) dan beban truk "T" (Pasal 8.4.1 $\rightarrow$ beban roda maksimum 29,82 ton).

Nilai pembebanan ini digunakan dalam analisis struktur untuk memastikan pelat lantai memenuhi ketentuan kekuatan dan keamanan sesuai ketentuan standar.

C. Perhitungan Momen Pelat Lantai

Hasil analisis SAP2000 menunjukkan momen maksimum tumpuan -11,029 ton·m dan momen lapangan +12,154 ton·m. Berdasarkan nilai tersebut, direncanakan penulangan sebagaimana Tabel 1.

D. Perencanaan Penulangan Pelat Lantai

Penulangan pelat lantai ditentukan berdasarkan momen tumpuan (negatif), momen lapangan (positif), serta tulangan susut dan suhu sesuai SNI 2847:2019. Rekapitulasi hasil perencanaan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Penulangan Pelat Lantai				
Area Tulangan	Tebal Pelat (cm)	Cover (mm)	Diameter dan Spasi	Jumlah Tulangan
Tumpuan (-)	25	30	D13 – 80 mm	12 batang
Lapangan (+)	25	30	D13 – 70 mm	13 batang
Susut dan Suhu	25	30	D10 – 190 mm	-

Penulangan yang direncanakan telah memenuhi syarat kekuatan serta ketahanan retak sesuai standar.

E. Kontrol Kekuatan Geser Pons

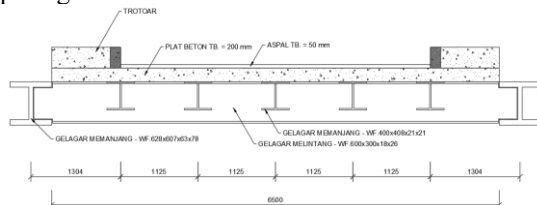
Perhitungan kapasitas geser pons mengacu pada RSNI T-12-2004 Pasal 5.6.1–5.6.2 dengan beban roda belakang truk sesuai SNI 1725:2016 Pasal 8.4.1 (luasan 250×750 mm, beban 112,5 kN).

- Tebal Efektif (D_3) = 250 mm
- $B_0 = b + \left(2 \times \left(\frac{\text{Tebal Plat}}{2}\right)\right) = 1000 \text{ mm}$
- $D_0 = d + \left(2 \times \left(\frac{\text{Tebal Plat}}{2}\right)\right) = 500 \text{ mm}$
- Gaya Geser :
 $V_u = 112,5 \text{ kN} \times (1 + \text{FBD}) \times \gamma_{TT}^U$
 $V_u = 112,5 \text{ kN} \times (1 + 30\%) \times 2 = 292,5 \text{ kN}$
- Luas Kritis (A_k) = $2 \times (b_0 + d_0) \times d_3$
 $A_k = 2 \times (1000 + 500) \times 250 = 750.000 \text{ mm}^2$
- Tegangan Geser Beton :
 $V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} \times A_k = 739,5 \text{ kN}$
- Kapasitas Ijin :
 $\phi V_c = 0,75 \times 739,5 \text{ kN}$
 $= 554,6 \text{ kN} > V_u = 292,5 \text{ kN} \text{ (OK)}$

Pelat aman terhadap geser pons.

3.4.2. Perencanaan Gelagar Memanjang

Pada jembatan ini terdapat dua jenis profil untuk gelagar memanjang ujung dan Tengah seperti pada gambar berikut.



Gambar 4. Tampak Potongan Melintang Gelagar Memanjang

A. Perencanaan Gelagar Memanjang Ujung

Profil yang digunakan adalah WF built-up 628×607×63×78 dengan luas penampang 1.244 cm², $f_y = 2.500 \text{ kg/cm}^2$, dan $E = 2.000.000 \text{ kg/cm}^2$.

Analisis pembebanan dilakukan sesuai SNI 1725:2016, mencakup beban mati, beban lajur “D”, dan beban truk “T”. Rekapitulasi hasil pembebanan beserta momen dan gaya geser ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi Beban Gelagar Memanjang

Jenis Beban	q (ton/m)	Momen (ton.m)	Geser (ton)
Beban Mati	3,178	22,35	11,90
Beban Lajur “D”	1,29 + 12,79	33,05	11,23
Beban Truk “T”	14,63	27,42	7,31
Total Kombinasi	-	55,39	23,15

Sehingga diperoleh momen total kombinasi sebesar 55,39 ton·m dan gaya geser total sebesar 23,15 ton.

1. Kontrol Kekuatan Profil terhadap momen, geser dan lendutan (RSNI T-03-2005)

- Kontrol Tekuk Lokal

Kontrol Pelat Sayap ($\gamma < \gamma_p$)

$$\gamma = \frac{bf}{2 \times tf} = 0,39 < \gamma_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 3,40 \text{ (Kompak)}$$

Kontrol Pelat Badan ($\gamma < \gamma_p$)

$$\gamma = \frac{h}{tw} = 0,68 < \gamma_p = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = 33,60 \text{ (Kompak)}$$

Penampang dinyatakan kompak dan momen nominal:

$$M_n = Z_x \times f_y \leq 1,5 \times S_x \times f_y$$

$$= 73.872.870 \leq 92.688.894 \text{ (OK)}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times M_n = 664,85 \text{ Ton.m}$$

$$\phi M_n = 665,85 \text{ Ton.m} > M_u \text{ (OK)}$$

- Kontrol Tekuk Lateral

Untuk profil WF 628×607×63×78 :

$$L_b = 750 \text{ cm}$$

$$L_p = 1,76 \times r_y \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1882,195 \text{ cm}$$

$$L_r = 1.456.497,432 \text{ cm}$$

Karena $L_b < L_p$ (bentang pendek)

Perhitungan momen nominal :

$$M_a = M_c = 84,43 \text{ Ton.m}$$

$$M_b = 55,39 \times 100000 = 5.539.461,34 \text{ kg.cm}$$

$$M_{\max} = 5.539.461,34 \text{ kg.cm}$$

$$M_p = M_n = Z_x \times f_y = 73.872.870 \text{ Kg.cm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times 73.872.870 < M_u$$

$$= 66.485.583 \text{ Kg.cm} < 5.539.461,34 \text{ Kg.cm (OK)}$$

$$\text{Cek kontrol, } \frac{M_u}{\phi M_n} = 0,0833 < 1,0 \text{ (OK)}$$

- Kontrol Gaya Geser

Mengacu RSNI T-03-2005 Pasal 7.8.2 :

$$\frac{h}{tw} < 1,1 \times \sqrt{\frac{K_n \times E}{f_y}}$$

$$\frac{428}{63} < 1,1 \times \sqrt{\frac{5 \times 2.000.000}{2500}} = 6,79 < 69,57 \text{ (Plastis)}$$

Dengan $C_v = 1$, kuat geser nominal:

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w \times C_v$$

$$= 0,6 \times 2500 \times (d \times Tw) \times 1 = 593.460 \text{ kg}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 593.460 = 534.114 \text{ Kg} > V_u \text{ (OK)}$$

• Kontrol Lendutan

Mengacu RSNI T-03-2005 Pasal 4.7.2, lendutan izin adalah:

$$\Delta_{ijin} = \frac{L}{800} = \frac{750}{800} = 0,9375 \text{ cm}$$

Lendutan akibat beban lajur "D"

$$\Delta_D = \frac{1}{48} \times \frac{P_{LBGT} \times L^3}{EI} + \frac{5}{384} \times \frac{q_{LBTR} \times L^4}{EI} = 0,06 \text{ cm} < 0,9375 \text{ cm (OK)}$$

Lendutan akibat beban truk "T"

$$\Delta_T = \frac{1}{48} \times \frac{P_{T \times L^3}}{EI} = 0,084 \text{ cm} < 0,9375 \text{ cm (OK)}$$

Gelagar memanjang dengan profil WF 628×607×63×78 memenuhi syarat momen, geser, tekuk lateral, dan lendutan sesuai RSNI T-03-2005.

B. Perencanaan Gelagar Memanjang Tengah

Gelagar memanjang tengah berfungsi sebagai elemen utama penyalur beban dari lantai kendaraan ke struktur bawah. Perhitungan pembebanan dan kontrol dilakukan dengan persamaan yang sama seperti gelagar memanjang ujung, mengacu pada SNI 1725:2016 dan RSNI T-03-2005. Berdasarkan data penampang profil yang digunakan adalah WF built-up 400×408×21×21 ($A = 250,7 \text{ cm}^2$, $I_x = 70.900 \text{ cm}^4$, $I_y = 23.800 \text{ cm}^4$, $S_x = 3.540 \text{ cm}^3$, $Z_x = 3.920 \text{ cm}^3$), diperoleh:

- Beban mati total = 2,32 ton/m → MUD = 16,32 ton·m; VUD = 8,7 ton.
- Beban hidup (Lajur D dan Truk T) → MUL = 33,05 ton·m; VUL = 11,23 ton.
- Kombinasi total → Mu = 49,36 ton·m; Vu = 19,93 ton.

• Kontrol Kekuatan Profil :

a. Kontrol Tekuk Lokal ($\gamma < \gamma_p$)

Kontrol Sayap : $\gamma = 0,97 < \gamma_p = 3,40$ (Kompak)

Kontrol Badan : $\gamma = 1,5 < \gamma_p = 33,60$ (Kompak)

Momen Nominal :

$$M_n = 9.800.000 \text{ kg.cm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times M_n$$

$$= 8.820.000 \text{ Kg.cm} = 88,2 \text{ Ton.m}$$

$$\phi M_n = 88,2 \text{ Ton.m} > M_u = 49,36 \text{ Ton.m (ok)}$$

b. Kontrol Tekuk Lateral

$$L_b = 750 \text{ cm}, L_p = 1.198 \text{ cm}, L_r = 927.439,024 \text{ cm}$$

Karena $L_b < L_p$ (bentang pendek)

Momen Nominal :

$$M_p = M_n = 9.800.000 \text{ kg.cm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times 9.800.000 < M_u$$

$$= 8.820.000 \text{ Kg.cm} < 4.936.365,87 \text{ Kg.cm (OK)}$$

$$\text{Cek kontrol, } \frac{M_u}{\phi M_n} = 0,559 < 1,0 \text{ (OK)}$$

c. Kontrol Geser

$$\frac{h}{t_w} < 1,1 \times \sqrt{\frac{K_n \times E}{f_y}} = 14,95 < 69,57 \text{ (Plastis)}$$

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w \times C_v$$

$$= 0,6 \times 2500 \times (d \times T_w) \times 1 = 126.000 \text{ kg}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 126.000$$

$$= 113.400 \text{ Kg} > V_u = 19.934 \text{ Kg (OK)}$$

d. Kontrol Lendutan

$$\Delta_{ijin} = \frac{L}{800} = \frac{750}{800} = 0,9375 \text{ cm}$$

Hasil Perhitungan :

$$\Delta_D = 0,67 \text{ dan } \Delta_T = 0,924 \text{ cm} < \Delta_{ijin} \text{ (Aman)}$$

Gelagar memanjang tengah dengan profil WF 400×408×21×21 memenuhi persyaratan kekuatan momen, geser, tekuk lokal, tekuk lateral, dan lendutan sesuai RSNI T-03-2005.

3.4.3. Perencanaan Gelagar Melintang

Data Perencanaan :

- Tebal aspal = 5 cm, Tebal pelat beton = 25 cm
- Panjang Gelagar = 6,5 m
- Jarak Gelagar Melintang = 7,5 m
- Jarak Gelagar Memanjang = 1,125 m
- Mutu baja = BJ-41 ($F_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$, $F_u = 4100 \text{ kg/cm}^2$, $E = 2.000.000 \text{ kg/cm}^2$)

A. Perencanaan Gelagar Melintang Ujung

Profil gelagar melintang ujung menggunakan WF 400×400×13×21 (BJ-41) dengan $A = 218,7 \text{ cm}^2$, $I_x = 66.600 \text{ cm}^4$, $S_x = 3.330 \text{ cm}^3$, dan $Z_x = 3.600 \text{ cm}^3$.

1) Analisis Pembebanan berdasarkan SNI 1725:2016, diperoleh:

- Beban mati (qD): total 7,77 ton/m → MUD1 = 41,02 ton·m; VUD1 = 25,2 ton. Setelah komposit, tambahan aspal 1,07 ton/m dan kerb 7,02 ton/m → MUD2 = 60,02 ton·m; VUD2 = 9,43 ton.
- Beban Hidup
 - Lajur D → qL = 21,34 ton/m → MUL1 = 102,05 ton·m; VUL1 = 48,02 ton.
 - Truk T → M = 140,77 ton·m; V = 58,5 ton.
- Total Geser: VU = 93,18 ton

2) Kontrol Kekuatan Penampang

- Kontrol Geser (SNI 1729:2020 Bab G2)

$$\lambda = \frac{h}{t_w} < \lambda_p = \frac{1100}{\sqrt{F_y}}$$

$$\frac{346}{13} < \frac{1100}{\sqrt{2500}} = 26,61 < 70 \text{ (Kompak)}$$

Kapasitas Geser Nominal :

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w = 0,6 \times f_y \times (D \times T_w)$$

$$V_n = 7.800.000 \text{ Kg} = 7.800 \text{ Ton}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 7.800$$

$$= 7.020 \text{ Ton} > V_u = 93,176 \text{ Ton (OK)}$$

- Kontrol Momen

a. Sebelum Komposit

Kontrol Pelat Sayap

$$\gamma = \frac{b_f}{2 \times t_f} = 9,52 < \gamma_p = \frac{170}{\sqrt{f_y}} = 10,75 \text{ (Kompak)}$$

Kontrol Pelat Badan

$$\gamma = \frac{h}{t_w} = 26,61 < \gamma = \frac{1680}{\sqrt{f_y}} = 106,25 \text{ (Kompak)}$$

Dikarenakan penampang kompak, maka momen nominal :

$$M_n = M_p \leq 1,5 \times M_y$$

$$M_n = Z_x \times f_y \leq 1,5 \times S_x \times f_y$$

$$= 9.000.000 \leq 12.487.500 \text{ (ok)}$$

$\phi M_n = 0,9 \times M_n$
 $= 8.100.000 \text{ Kg. cm} = 81,0 \text{ Ton. m}$
 $\phi M_n = 81,0 \text{ Ton. m} > M_u = 41,02 \text{ Ton. m}$ (ok)
 Kontrol terhadap Tekuk Lateral
 $L_b = 112,5 \text{ cm}$, $L_p = 502.781 \text{ cm}$
 $L_r = 1.808,654 \text{ cm}$, $L_p > L_b$ (Bentang Pendek)
 $\rightarrow$ momen nominal tetap $M_n = M_p$ (sama seperti hasil kontrol penampang). Sehingga :
 $\phi M_n = 81,0 \text{ Ton. m} > M_u = 41,02 \text{ Ton. m}$ (ok)
 Cek Kontrol = $\frac{Mud1}{\phi M_n} = \frac{4.102.048}{8.100.000} = 0,506$ (OK)
 b. Sesudah Komposit
 Lebar Efektif Pelat :
 $\frac{1}{8} \times \text{Bentang} = \frac{1}{8} \times 6500 = 812,5 \text{ mm}$
 $\frac{1}{2} \times \text{Jarak antar gelagar} = \frac{1}{2} \times 7500 = 3750 \text{ mm}$
 Jarak tepi pelat = 7500 mm
 Maka digunakan, $B_e = 812,5 \text{ mm}$
 $A_c = B_e \times T_b = 812,5 \times 25.000 = 203.125 \text{ mm}^2$
 Gaya Tekan Beton :
 C merupakan nilai terkecil dari:
 $C1 = A_g \times f_y = 218,7 \times 2500 = 546.750 \text{ Kg}$
 $C2 = 0,85 \times f_c \times A = 604.297 \text{ Kg}$
 Maka, Nilai C yang digunakan yaitu 546.750 Kg
 Jarak Centroid Gaya – Gaya yang Bekerja :
 $a = \frac{C}{0,85 \times f_c \times B_e} = 22,6 \text{ cm}$
 $h_r = 53 \text{ mm}$ (brosur bondex)
 $D1 = h_r + t_b - \frac{a}{2} = 189,9 \text{ mm}$, $D2 = 0 \text{ mm}$,
 $D3 = \frac{D}{2} = 300 \text{ mm}$
 $M_n = C \times (D1 + D2) + A_s \times f_y \times (D3 + D2)$
 $= 267.854.839,53 \text{ Kg. mm}$
 $\phi M_n = 0,9 \times 267.854.839,53 \text{ Kg. cm}$
 $= 24.106.935,56 \text{ Kg. cm}$
 $\phi M_n > M_u = \phi M_n > Mud1 + Mud2 + Mulmax$
 $24.106.935,56 \text{ Kg. cm} > 20.309.213,95 \text{ Kg. cm}$ (OK)
 Cek Kontrol = $\frac{M_u}{\phi M_n} = \frac{20.309.213,95}{24.106.935,56} = 0,842$

- Kontrol Lendutan
 Batas izin : $\Delta_{ljin} = \frac{L}{800} = \frac{6500}{800} = 8,125 \text{ mm}$
 Hasil perhitungan :
 Lajur D $\Delta_{Total} = 0,901 \text{ mm} < \Delta_{ljin} = 8,125 \text{ mm}$ (OK)
 Lajur T $\Delta_{Total} = 6,31 \text{ mm} < \Delta_{ljin} = 8,125 \text{ mm}$ (OK)
- Perhitungan Shear Connector
 Shear connector direncanakan menggunakan diameter 29 mm dengan mutu baja BJ-37. Perhitungan kapasitas mengacu pada SNI 1729:2020 Bab I8.
 $A_{sc} = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times 29^2 = 660,519 \text{ mm}^2$
 $F_u = 410 \text{ MPa}$
 $Q_n = 0,5 \times A_{sc} \times \sqrt{F_c \times A_{sc}} \leq A_{sc} \times f_u$
 $Q_n = 325.803,573 \geq 270.813,140$ (pakai terkecil)
 $h_r = 53 \text{ mm}$ (brosur bondex), $h_s = h_r + 40 = 93 \text{ mm}$
 $N_r = 1$ (Dipasang 1 Stud pada setiap gelombang)
 $V_n = C = 546.750 \text{ Kg} = 5.361.785 \text{ N}$

Jumlah Stud $N = \frac{V_n}{Q_n} = 19,79 \sim 20$ Buah

$N_{total} = 2 \times N = 2 \times 20 = 40$ buah

Gelagar melintang ujung aman terhadap momen, geser, tekuk lateral, lendutan, serta kebutuhan shear connector sesuai SNI 1725:2016 dan SNI 1729:2020.

B. Perencanaan Gelagar Melintang Tengah

Perhitungan gelagar melintang tengah dilakukan dengan tahapan yang sama seperti gelagar melintang ujung, meliputi analisis pembebanan, kontrol kekuatan profil (momen, geser, tekuk lokal, tekuk lateral), kontrol lendutan, serta perhitungan kebutuhan shear connector. Perbedaan hanya terletak pada dimensi profil dan hasil perhitungannya. Profil yang digunakan adalah WF 600×300×18×26 dengan data penampang: $A = 254,64 \text{ cm}^2$, $I_x = 153.269 \text{ cm}^4$, $S_x = 5.109 \text{ cm}^3$, $Z_x = 5.829 \text{ cm}^3$.

A. Analisis Pembebanan (SNI 1725:2016)

- Beban Mati (q_D) : 7,80 ton/m $\rightarrow MUD1 = 41,18 \text{ ton. m}$; $VUD1 = 25,3 \text{ ton.}$
- Sesudah komposit : $MUD2 = 60,34 \text{ ton. m}$; $VUD2 = 9,43 \text{ ton.}$
- Beban Lajur “D” : $q_L = 21,34 \text{ ton/m} \rightarrow MUL1 = 102,05 \text{ ton. m}$; $VUL1 = 48,02 \text{ ton.}$
- Beban Truk “T” : $MUL2 = 140,77 \text{ ton. m}$; $VUL2 = 58,5 \text{ ton.}$
- Geser Total Kombinasi : $VU = 93,28 \text{ ton.}$

B. Kontrol Kekuatan Penampang

- Kontrol Geser

$$\lambda = \frac{h}{t_w} < \lambda_p = \frac{1100}{\sqrt{F_y}} = 27,33 < 70 \text{ (Kompak)}$$

Kapasitas Geser Nominal :

$$V_n = 0,6 \times f_y \times A_w = 0,6 \times f_y \times (D \times T_w)$$

$$V_n = 16.200.000 \text{ Kg} = 16.200 \text{ Ton}$$

$$\phi V_n = 0,9 \times 16.200$$

$$= 14.580 \text{ Ton} > V_u = 93,276 \text{ Ton (OK)}$$

- Momen Sebelum Komposit ($\gamma < \gamma_p$)

Kontrol Sayap : $\gamma = 5,76 < \gamma_p = 10,75$ (Kompak)

Kontrol Badan : $\gamma = 27,73 < \gamma_p = 106,25$ (Kompak)

Momen Nominal :

$$M_n = 14.571.420 \text{ kg.cm}$$

$$\phi M_n = 0,9 \times M_n$$

$$= 13.114.278 \text{ Kg. cm} = 131,14 \text{ Ton. m}$$

$$\phi M_n = 131,14 \text{ Ton. m} > M_u = 49,36 \text{ Ton. m}$$
 (ok)

Kontrol Tekuk Lateral

$$L_b = 112,5 \text{ cm}$$
, $L_p = 834,17 \text{ cm}$, $L_r = 645,512 \text{ cm}$

$$L_p > L_b$$
 (Bentang Pendek)

Momen nominal tetap $M_n = M_p$ (sama seperti hasil kontrol penampang). Sehingga :

$$\phi M_n = 131,14 \text{ Ton. m} > M_u = 41,18 \text{ Ton. m}$$
 (ok)

$$\text{Cek Kontrol} = \frac{Mud1}{\phi M_n} = \frac{4.118.252}{13.114.278} = 0,314 \text{ (OK)}$$

- Momen Setelah Komposit

Berdasarkan SNI 1729:2020, lebar efektif pelat diambil dari nilai terkecil, yaitu $b_{eff} = 812,5 \text{ mm}$ dengan luas efektif $A_c = 2.031 \text{ cm}^2$. Nilai ini sama

dengan gelagar melintang ujung tidak ada perbedaan pada tahap ini.

Gaya Tekan Beton :

C merupakan nilai terkecil dari C1 dan C2

$$C1 = Ag \times fy = 254 \times 2500 = 636.600 \text{ Kg}$$

$$C2 = 0,85 \times fc \times Ac = 604.297 \text{ Kg}$$

Maka, Nilai C yang digunakan yaitu 604.297 Kg

Jarak Centroid Gaya – Gaya yang Bekerja :

$$a = \frac{C}{0,85 \times fc \times Be} = 25 \text{ cm, hr} = 53 \text{ mm (brosur bondex)}$$

$$D1 = hr + tb - \frac{a}{2} = 178 \text{ mm, D2} = 0 \text{ mm,}$$

$$D3 = \frac{D}{2} = 300 \text{ mm}$$

$$Mn = C \times (D1 + D2) + As \times fy \times (D3 + D2) = 298.544.844 \text{ Kg. mm}$$

$$\phi Mn = 0,9 \times 298.544.844 \text{ Kg. mm} = 26.869.035,94 \text{ Kg. cm}$$

$$\phi Mn > Mu = \phi Mn > Mud1 + Mud2 + Mulmax \\ 26.869.035,94 \text{ Kg. cm} > 20.309.213,95 \text{ Kg. cm (OK)}$$

$$\text{Cek Kontrol} = \frac{Mu}{\phi Mn} = \frac{20.309.213,95}{26.869.035,94} = 0,757$$

C. Kontrol Lendutan

$$\text{Batas izin : } \Delta_{ijin} = \frac{L}{800} = \frac{6500}{800} = 8,125 \text{ mm}$$

Hasil Perhitungan :

$$\Delta_D = 0,774 \text{ dan } \Delta_T = 5,42 \text{ cm} < \Delta_{ijin} \text{ (Aman)}$$

D. Perhitungan Shear Connector

Shear connector menggunakan stud Ø29, mutu baja BJ-37, Perhitungan kapasitas mengacu pada SNI 1729:2020 Bab I8.

Hasil perhitungan didapatkan kebutuhan stud :

$$\text{Dengan } C = 604.297 \text{ Kg} = 5.926.128 \text{ N}$$

$$N = \frac{V_n}{Q_n} = 21,88 \sim 22 \text{ Buah (per sisi)}$$

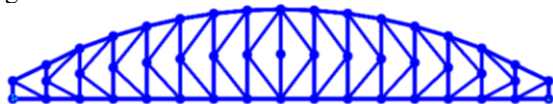
$$N \text{ total} = 2 \times 22 = 44 \text{ Buah stud}$$

Dengan metode yang sama seperti gelagar melintang ujung, gelagar melintang tengah juga terbukti aman terhadap momen, geser, tekuk, lendutan, serta memenuhi kebutuhan shear connector sesuai SNI 1725:2016 dan SNI 1729:2020.

3.5. Permodelan Struktur Jembatan

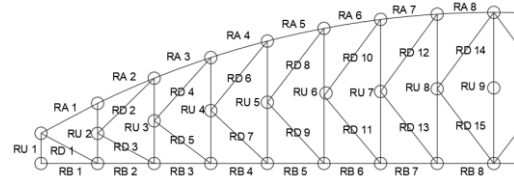
A. Permodelan Jembatan dan Hasil Analisis Struktur

Pemodelan jembatan ini dilakukan dengan SAP2000. Permodelan jembatan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. Pemodelan Jembatan

Hasil analisis SAP 2000 gaya aksial pada batang rangka menunjukkan gaya tekan maksimum 1.815 ton (RA 8) dan gaya tarik maksimum 305 ton (RU 3). Profil yang digunakan mampu menahan beban tersebut → seluruh batang rangka utama aman.



Gambar 6. Batang Rangka Jembatan

B. Perencanaan Rangka Utama

1) Batang Tekan (RA 8)

Profil *built up* yang digunakan WF 615x605x62x77 dengan panjang batang $L = 750,418$ cm. dan gaya tekan terfaktor $PU = 1.815,2$ Ton = 17.801 Kn.

a. Kontrol Kekuatan Penampang

$$\lambda_e = 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{fy}} = 4,71 \times \sqrt{\frac{2.000.000}{2500}} = 133,219$$

Diasumsikan rangka menggunakan perletakan sendi-send, sehingga nilai $KC = 1$

$$\lambda_x = \frac{L \times Kc}{ix} = 30,659, \lambda_y = \frac{L \times Kc}{iy} = 49,039$$

$$\lambda_{max} = 49,039 < \lambda_e = 133,219 \text{ (Inelastis), maka}$$

$$Fe = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda_{max}^2} = 8.208 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Dikarenakan rangka batang termasuk inelastis maka:

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{Fy}{Fe}\right) \times Fy = 2.200,78 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

$$P_n = Ag \times F_{cr} = 2.679.494 \text{ Kg} = 26.276,86 \text{ Kn}$$

$$\phi P_n = 0,9 \times P_n = 23.469 \text{ Kn}$$

$$\phi P_n > PU = 23.469 \text{ Kn} > 17.801 \text{ Kn (OK)}$$

b. Kontrol Penampang

• Kontrol Plat Badan

$$\frac{h}{Tw} < 1,49 \times \sqrt{\frac{E}{fy}} = 6,73 < 42,144 \text{ (OK)}$$

• Kontrol Plat Sayap

$$\frac{bf}{2 \times tf} < 0,56 \times \sqrt{\frac{E}{fy}} = 3,928 < 15,839 \text{ (OK)}$$

c. Kontrol Kuat Tarik Leleh

$$\phi P_n = 0,9 \times Ag \times Fy = 26.864,53 \text{ Kn}$$

d. Kontrol Kuat Tarik Putus

$$A_n = 0,75 \times Ag = 913,14 \text{ cm}^2, \mu = 0,9$$

$$A_e = \mu \times A_n = 821,83 \text{ cm}^2$$

$$\phi P_n = 0,75 \times A_e \times fu = 24.782 > Pu \text{ (OK)}$$

Batang RA8 aman terhadap tekan, tarik, dan stabilitas penampang.

2) Batang Tarik (RU 3)

Profil yang digunakan adalah built up WF 600x600x60x75 dengan panjang batang $L = 1.127,39$ cm, dengan gaya tarik terfaktor $PU = 305.353$ ton = 2.994,5 kN. Material BJ-41, $fy = 2500$ kg/cm², $E = 2000000$ kg/cm². Perhitungan dilakukan dengan metode yang sama seperti rangka batang tekan RA 8, mengacu pada RSNI T-03-2005.

a. Kontrol Kekuatan Penampang

$$\lambda_e = 4,71 \times \sqrt{\frac{E}{fy}} = 133,219$$

si perletakan sendi-sendi $\Rightarrow K_c = 1$.

$$\lambda_x = \frac{L \times K_c}{i_x} = 47,114, \quad \lambda_y = \frac{L \times K_c}{i_y} = 74,103$$

$$\lambda_{\max} = 74,103 < \lambda_e = 133,219 \text{ (Inelastis)}, \text{ maka}$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \times E}{\lambda_{\max}^2} = 3.594,67 \text{ kg/cm}^2$$

Dikarenakan rangka batang termasuk inelastis maka:

$$F_{cr} = \left(0,658 \frac{F_y}{F_e}\right) \times F_y = 1.868,62 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_n = A_g \times F_{cr} = 2.186.286 = 1.868,62 \text{ Kn}$$

$$\phi P_n = 0,9 \times P_n = 19.296,13 \text{ Kn}$$

$$\phi P_n > P_u = 19.296,13 > 2.994,5 \text{ Kn (OK)}$$

b. Kontrol Penampang

- Kontrol Plat Badan

$$\frac{h}{t_w} < 1,49 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 6,77 < 42,144 \text{ (OK)}$$

- Kontrol Plat Sayap

$$\frac{b_f}{2 \times t_f} < 0,56 \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4 < 15,839 \text{ (OK)}$$

a. Kontrol Kuat Tarik Leleh

$$\phi P_n = 0,9 \times A_g \times F_y = 25.816 \text{ Kn}$$

b. Kontrol Kuat Tarik Putus

$$A_n = 0,75 \times A_g = 877,5 \text{ cm}^2, \mu = 0,9$$

$$A_e = \mu \times A_n = 789,75 \text{ cm}^2$$

$$\phi P_n = 0,75 \times A_e \times f_u = 23.815 > P_u \text{ (OK)}$$

Batang tarik RU 3 aman terhadap tarik, stabilitas, dan penampang. Perhitungan ini menggunakan prosedur yang sama dengan batang tekan RA 8, sehingga hanya hasil akhirnya yang ditampilkan.

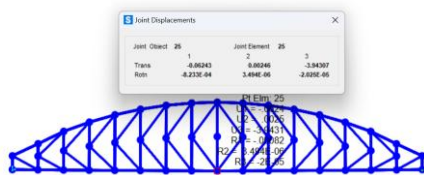
C. Kontrol Lendutan

Dalam perencanaan jembatan, lendutan yang terjadi tidak boleh melebihi lendutan ijin. Batas lendutan diatur menurut RSNi T-03-2005, yaitu:

$$\Delta_{\text{ijin}} = \frac{L}{1000} = \frac{120}{1000} = 0,12 \text{ m} = 120 \text{ mm}$$

a. Lendutan Akibat Beban Hidup Lajur "D" dan "T"

Analisis lendutan menggunakan SAP2000 ditunjukkan pada Gambar 7 (akibat BGT) dan Gambar 8 (akibat BTR).



Gambar 7. Lendutan Akibat BGT



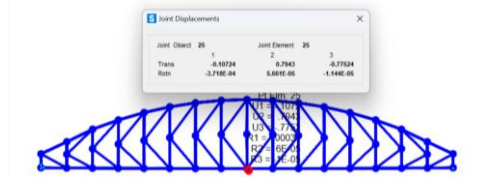
Gambar 8. Lendutan Akibat Lajur D

Dari hasil analisis diperoleh lendutan maksimum sebesar:

$$\Delta_{\text{Lajur D}} = \text{BGT} + \text{BTR} = 3,94 \text{ mm} + 11,54 \text{ mm} = 15,48 \text{ mm}$$

$$15,48 < \Delta_{\text{ijin}} = 120 \text{ mm (OK)}$$

Analisis SAP2000 untuk beban hidup truk "T" ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Lendutan Akibat Beban Truk
Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh nilai lendutan sebagai berikut:

$$\Delta_{\text{Truk "T"}} = 0,775 < \Delta_{\text{ijin}} = 120 \text{ mm (OK)}$$

Hasil lendutan akibat beban hidup (lajur "D" dan truk "T") masih jauh di bawah batas ijin (120 mm), sehingga syarat lendutan terpenuhi.

D. Perilaku Aerodinamis

Pada jembatan bentang panjang, pengaruh angin menjadi faktor penting yang dapat menyebabkan kegagalan struktur. Oleh karena itu, perlu dilakukan kontrol stabilitas aerodinamis, khususnya terhadap fenomena vortex-shedding (tumpahan pusaran angin). Analisis dengan SAP2000 menunjukkan :

$$f_B = 1,141 \text{ Hz}, \quad f_T = 2,756 \text{ Hz}$$

Sehingga rasio frekuensi :

$$\frac{f_T}{f_B} = \frac{2,756}{1,141} = 2,415 \approx 2,5 \text{ (Mathivat)}$$

a. Efek Pusaran Angin (Vortex-Shedding)

Kecepatan angin dihitung menggunakan angka Strouhal ($s = 0,2$) dengan tinggi lantai kendaraan $h = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$. Didapatkan kecepatan angin sebagai berikut :

$$V = \frac{f_B \times h}{s} = \frac{1,141 \times 0,3}{0,2} = 1,71 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dengan kecepatan tersebut, bilangan Reynold :

$$Re = \frac{V \times B}{\bar{\nu}} = \frac{1,71 \times 6,5}{0,15 \times 10^{-4}} = 7,4 \times 10^5 \text{ (OK)}$$

Nilai Re berada dalam rentang stabil ($10^5 - 10^7$).

Kecepatan angin tersebut akan menghasilkan gaya angkat (uplift) pada jembatan, yang besarnya dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$F_o = \rho \frac{V^2}{2} C \times h = 1,3 \times 10 \times \frac{1,71^2}{2} \times 0,4 \times 0,3 = 22,39 \text{ N}$$

Osilasi akibat gaya ini menghasilkan amplitude :

$$\hat{v} = \frac{\pi}{\delta} \times \frac{F_o}{m} \times v_{\max} = 0.14263 \text{ mm}$$

Dengan percepatan getar :

$$\ddot{v} = 4\pi^2 \times f_{B^2} \times \hat{v} = 0,733 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Hasil analisis menunjukkan amplitudo berada pada zona A dan percepatan pada zona B menurut kriteria Walther (1999), sehingga struktur jembatan aman terhadap efek aerodinamis.

3.6. Perencanaan Sambungan

Spesifikasi material sambungan adalah baja Bj 41 dengan $F_y = 2500 \text{ kg/cm}^2$, $F_u = 4100 \text{ kg/cm}^2$,

menggunakan baut A325 tipe ulir dalam bidang geser (SNI 1729:2020 Pasal J3.2) dengan kapasitas geser $F_{nv} = 372 \text{ MPa} \approx 3794 \text{ kg/cm}^2$.

Sambungan jembatan direncanakan menggunakan baut A325. Analisis pembebanan dengan SAP2000 menunjukkan gaya terbesar pada titik buhul, sehingga jumlah baut ditentukan berdasarkan gaya tersebut dan dibuat sama pada setiap buhul. Dengan demikian, sambungan dinyatakan aman. Persyaratan kekuatan sambungan mengikuti $R_u \leq \phi R_n$. Jenis sambungan yang direncanakan meliputi:

- Tipe 1 : Rangka Utama Ujung – Gelagar Melintang Bawah
- Tipe 2 : Gelagar Memanjang Atas Ujung – Rangka Utama Ujung
- Tipe 3 : Gelagar Memanjang Atas Ujung – Gelagar Memanjang Atas
- Tipe 4 : Rangka Utama Tengah – Gelagar Memanjang Bawah
- Tipe 5 : Rangka Utama Ujung – Gelagar Memanjang Atas
- Tipe 6 : Cremona – Rangka Utama
- Tipe 7 : Antara Rangka Utama
- Tipe 8 : Gelagar Melintang Bawah Tengah – Gelagar Memanjang Bawah Ujung

Tabel 3. Rekapitulasi Sambungan Baut

Sambu ngan	R_u (kg)	Dia. Baut (mm)	R_n 1 baut (kg)	Jumlah Baut (Bh)
Tipe 1	1.111.576	36	28.958	24
Tipe 2	1.090.069	36	28.958	22
Tipe 3	1.205.056	36	28.958	24
Tipe 4	341.162	36	28.958	7
Tipe 5	1.815.208	36	28.958	36
Tipe 6	141.655	36	28.958	3
Tipe 7	158.274	36	28.958	4
Tipe 8	341.162	36	28.958	9

Dari hasil rekapitulasi, seluruh sambungan memenuhi syarat kekuatan karena nilai $R_u \leq \phi R_n \times n$, sehingga sambungan baut dinyatakan aman.

3.7. Perencanaan Perletakan Lantai Kendaraan

1) Perencanaan Sendi Lantai Kendaraan

Didapatkan dari SAP2000 untuk perletakan sendi kode 1, 2, dan 3, direncanakan menggunakan beban sebagai berikut:

$$P_u = 1.160 \text{ ton}, H_x = 1.665 \text{ ton}, H_y = 131 \text{ ton}$$

Tebal Bantalan (S1) :

Direncanakan : $L = 100 \text{ cm}$, $b = 100 \text{ cm}$, $\phi = 0,9$, dan $P = 1.160,71 \text{ ton} = 1.160,715 \text{ kg}$

Digunakan dua titik tumpu, sehingga :

$$P = \frac{P}{2} = \frac{1.160.715}{2} = 580.357 \text{ kg}$$

$$S_1 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3 \times P \times L}{\phi \times F_y \times B}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3 \times 580.357 \times 100}{0,9 \times 2500 \times 100}} = 13,9 \approx 60 \text{ cm}$$

Tebal Bantalan (S2 dan S3) :

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{1}{8} \times P \times L = \frac{1}{8} \times 580,357 \times 100 \\ &= 14.508,931 \text{ kg.cm} \end{aligned}$$

$$W = \frac{M}{\phi \times F_y} = \frac{14.508,931}{0,9 \times F_y} = 6,448 \text{ cm}^3$$

Dengan persamaan **Muller Breslaw**.

$$\bullet \frac{h}{S_2} = 4, \quad \frac{b}{a \times S_3} = 4,2$$

$$\bullet W = 0,2251 \times a \times h^2 \times S_3$$

Dipakai jumlah rusuk (a) = 4, maka

$$S_3 = \frac{b}{a \times S_3} = \frac{100}{4 \times 4,2} = 5,95 \approx 6 \text{ cm}$$

$$h = \sqrt{\frac{W}{0,2251 \times a \times S_3}} = \sqrt{\frac{6,448}{0,2251 \times 4 \times 6}} = 34,5 \approx 70 \text{ cm}$$

$$S_2 = \frac{h}{4} = 17,5 \approx 33 \text{ cm}, S_4 = \frac{h}{6} = 12 \text{ cm}, S_5 = \frac{h}{9} = 8 \text{ cm}$$

Dengan demikian diperoleh $S_2 = 33 \text{ cm}$ dan $S_3 = 6 \text{ cm}$.

Diameter Tengah Sumbu Sendi :

$$d_1 = \frac{2 \times 0,8 \times P}{\phi \times F_y \times L} = \frac{2 \times 0,8 \times 580.357}{0,9 \times 2500 \times 100} = 4,126 = 20 \text{ cm}$$

$$d_3 = \frac{1}{4} d_1 = \frac{20}{4} = 5 \text{ cm}$$

$$d_2 = d_1 + (2 \times d_3) = 20 + (2 \times 5) = 30 \text{ cm}$$

Kekuatan Geser Perletakan :

$$H_x = 1.665,75 \text{ ton}, H_y = 131,3 \text{ ton}, d_1 = 20 \text{ cm}$$

$$A_s = \frac{\pi}{4} \times d_1^2 = \frac{\pi}{4} \times 20^2 = 314,159 \text{ cm}^2$$

Kekuatan Geser Nominal Baut = 3.793 kg/cm²

Bidang Geser (m) = 4

$$\begin{aligned} V_n &= 0,6 \times \text{Kuat Geser} \times A_s \times m \\ &= 2.860.124,85 \text{ kg} = 2.860 \text{ Ton} \end{aligned}$$

Kebutuhan Angkur :

$$H_x = 1.665,75 \text{ ton}, H_y = 131,3 \text{ ton}$$

Jumlah Perletakan (n) = 2, D Angkur = 6 cm

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{\pi}{4} \times D_{\text{Angkur}}^2 = \frac{\pi}{4} \times 6^2 \\ &= 28,27 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{Beban tiap perletakan} = \frac{H_x}{n} = \frac{1.665,75}{2} = 832,88 \text{ T}$$

Kekuatan Geser Nominal Baut = 3.793 kg/cm²

Bidang Geser (m) = 1

$$\begin{aligned} V_n &= 0,6 \times \text{Kuat Geser} \times A_s \times m \\ &= 54.352 \text{ Kg} = 64,35 \text{ Ton} \end{aligned}$$

$$\phi V_n = 0,75 \times 64,35 = 48,26 \text{ Ton}$$

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Angkur} &= \frac{\text{Beban Tiap Perletakan}}{\phi V_n} = \frac{832,88}{48,26} \\ &= 17,256 \approx 20 \text{ Buah} \end{aligned}$$

Panjang Angkur :

$$F_y = 2500 \text{ kg/cm}^2 = 25 \text{ kg/mm}^2$$

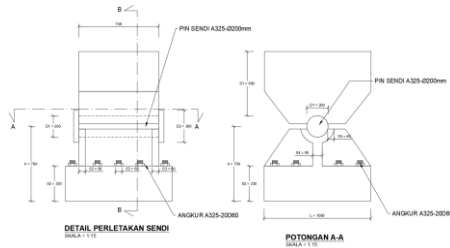
$$D_{\text{Angkur}} = 60 \text{ mm}, A_s = 28,27 \text{ cm}^2$$

$$L_{db} = 0,06 \times D_{\text{Angkur}} \times F_y$$

$$= 0,06 \times 60 \times 25 = 90 \text{ mm} \approx 100 \text{ mm}$$

Didapatkan perletakan sendi untuk lantai kendaraan.

Berikut gambar untuk perletakan sendi :



Gambar 10. Perletakan Sendi Jembatan

2) Perencanaan Rol Lantai Kendaraan

Dari SAP2000 diperoleh: $P_u = 1.153,25$ ton. $F_y = 2500$ kg/cm², $L = 200$ cm, $b = 200$ cm, $p = 1.153.250$ kg, $\phi = 0,9$.

1. Tebal bantalan (S1) dihitung dengan rumus :

$$S1 = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{3 \times p \times L}{\phi \times F_y \times B}} = 19,61 \text{ cm} \approx 25 \text{ cm}$$

2. Diameter Rol (D4) direncanakan sebagai :

$$F_u \text{ Roll} = 8500 \text{ kg/cm}^2$$

$$D4 = 0,75 \times 10^6 \times \left(\frac{P}{L \times \phi \times F_u^2 \text{ Roll}} \right) = 73,9 \approx 100 \text{ cm}$$

$$D6 = 2,5 \text{ cm}$$

$$D5 = D4 + 2 \times D6 = 100 + (2 \times 2,5) = 105 \text{ cm.}$$

3. Kebutuhan Angkur

Digunakan 16 buah angkur ($\phi = 10$ cm)

Panjang Angkur (Ldb) dihitung :

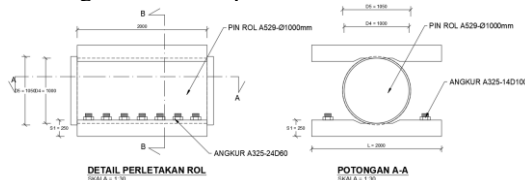
$$D_{\text{Angkur}} = 60 \text{ mm, } A_s = 28,27 \text{ cm}^2$$

$$L_{db} = 0,06 \times D_{\text{Angkur}} \times F_y = 90 \text{ mm}$$

$$L_{db} \text{ Pakai} = 100 \text{ mm} \approx 10 \text{ cm.}$$

Dengan spesifikasi tersebut, desain perletakan rol memenuhi syarat kekuatan dan kestabilan struktur.

Berikut gambar untuk perletakan Roll :



Gambar 11. Perletakan Roll Jembatan

3.8. Analisis Daya Dukung Tanah

Analisis daya dukung tanah dilakukan berdasarkan data bore log/N-SPT pada Lokasi dengan koreksi muka air tanah menurut Terzaghi. Kedalaman tiang pancang Adalah 14 m dengan jenis tanah lempung kelanauan dan nilai $N = 15$.

- Koreksi N-SPT terhadap tegangan overburden menurut Terzaghi :

$$N1 = 15, \gamma_{\text{Sat}} = 1,9 \text{ ton/m}^3$$

$$\gamma' = 1,9 - 1 = 0,9 \text{ ton/m}^3$$

$$Po_{14} = Po_{13} + (\gamma' \times \gamma_{\text{Sat}}) = 11,85 + (0,9 \times 1,9) = 12,3 \text{ ton/m}^3$$

Karena $Po_{14} > 7,5$ maka :

$$N2 = \frac{4 \times N1}{3,25 + 0,1 \times Po_{14}} = \frac{4 \times 15}{3,25 + 0,1 \times 12,3} = 13,39$$

$N2$ Pakai = 13,39 (dipakai terkecil dari $2 \times N1$ atau $N2$)

$$N \text{ rata-rata} = N_{211} - N_{215} = 23,8$$

- Perhitungan Daya Dukung Tanah

Diameter bored pile : 120 cm.

$$SF = 2, A_p = \frac{\pi}{4} \times 120^2 = 1,131 \text{ m}^2$$

$$\text{Keliling} = \pi \times D = 3,77 \text{ m}$$

$$C_n \text{ Ujung} = 40 \times N \text{ rata-rata} = 952 \text{ ton/m}^2$$

$$Q_p = C_n \text{ ujung} \times A_p = 952 \times 1,131 = 1.076,77 \text{ ton}$$

Untuk tanah lempung kelanauan :

$$F_{si} = \frac{N \text{ rata-rata}}{2} = 11,9 \text{ ton/m}^2$$

$$F_{si} \times A_{si} = F_{si} \times (\text{keliling} \times \text{selisih kedalaman}) = 11,9 \times (3,77 \times 0,5) = 22,43 \text{ ton}$$

$$Q_{s14} = Q_{s13} + (F_{si} \times A_{si}) = 227,97 \text{ ton}$$

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s = 1.076,77 + 227,97 = 1.304,74 \text{ ton}$$

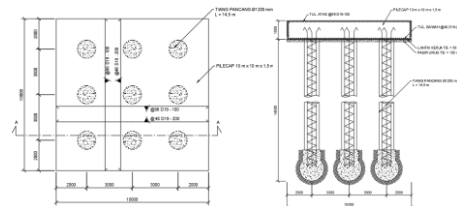
$$Q_{ijin} = \frac{Q_{ult}}{SF} = \frac{1.304,74}{2} = 652,37 \text{ ton}$$

Dengan kedalaman tiang pancang 14 m pada tanah lempung kelanauan ($N=15$), kapasitas ijin pondasi bored pile diameter 120 cm adalah 652,37 ton, sehingga daya dukung tanah dinyatakan memadai untuk menahan beban struktur jembatan.

3.9. Perencanaan Struktur Bawah

1) Data Pilecap

Pilecap menerima beban dari struktur jembatan busur rangka bentang 120 m dengan dimensi abutment $10 \times 10 \times 1,5$ m. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 12. Dimensi Pilecap Jembatan

2) Perencanaan Tiang Pancang

Berikut adalah hasil kombinasi beban dari SAP2000 yang akan digunakan untuk perencanaan tiang pancang

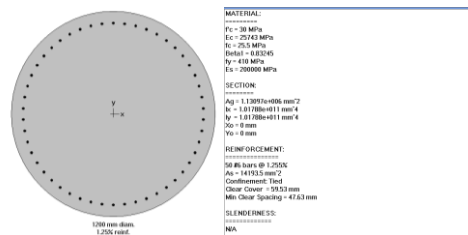
- $P = 1.160,71$ Ton
- $H_x = 1.665,75$ Ton
- $H_y = 131,3$ Ton
- $M_x = 94,64$ Ton. m = 842 Kn. m
- $M_y = 139,23$ Ton. m = 1238 Kn. m

Tiang pancang menggunakan bored pile diameter 1.200 mm (120 cm), dengan:

$$\text{Luas Penampang} = 1.130.973 \text{ mm}^2$$

$$\text{Inersia Tiang} = \frac{1}{64} \times \pi \times D^4 = \frac{1}{64} \times \pi \times 120^4 = 10.178.760 \text{ cm}^4$$

Menentukan M_n Nominal tiang pancang digunakan program bantu SpColumn sehingga direncanakan :



Gambar 13. Dimensi dan Material Tiang Pancang SpColumn

Konfigurasi tiang pancang (SNI 8460:2017 pasal 9.7.1.2) dimana untuk jarak antar tiang pancang:

$$\text{Jarak Antar Tiang} = 2,5D < S < 3D \\ = 300 \text{ cm} < S < 360 \text{ cm}$$

$$\text{Jarak ke Tepi} = D < S < 2D \\ = 120 \text{ cm} < S < 240 \text{ cm}$$

Jumlah Tiang arah Y, m dan X, n = 3 Buah

Jumlah tiang N = m × n = 3 × 3 = 9 Buah

Beban tiap tiang: $Q_{\text{Perlu}} = \frac{R}{E_f} = \frac{132,32}{0,894} = 148 \text{ Ton}$

Beban tiap tiang dihitung sebesar $Q_{\text{Perlu}} = 148 \text{ ton}$. Untuk menahannya digunakan pondasi bored pile berdiameter 120 cm dengan kedalaman 14 m. Berdasarkan metode Meyerhof, daya dukung izin satu tiang adalah $Q_{\text{ijin}} = 652,37 \text{ ton}$, sehingga memenuhi syarat karena $Q_{\text{ijin}} > Q_{\text{perlu}}$ ($652,37 \text{ Ton} > 148 \text{ Ton} \rightarrow \text{OK}$). Dengan demikian, digunakan 9 bored pile berdiameter 120 cm dan kedalaman 14 m untuk mendukung pilecap pada abutment.

3) Penulangan Pilecap

Pilecap yang digunakan memiliki dimensi 10 m × 10 m × 1,5 m dan didukung oleh 9 tiang pancang. $P_u = Q_u \text{ Tiang Pancang} = 148 \text{ Ton} = 1.451,38 \text{ Kn}$. Kekuatan beton yang digunakan adalah $f_c = 30 \text{ MPa}$ dan kekuatan leleh baja tulangan $f_y = 410 \text{ MPa}$, cover = 50 mm, dengan ϕ tulangan D-19 (Utama) dan D-13 (Geser).

- Tinggi efektif d

$$D_y = 1500 - 50 - 19 - \frac{19}{2} = 1.436,5 \text{ mm}$$

$$D_x = 1500 - 50 - \frac{19}{2} = 1.445,5 \text{ mm}$$

- Kontrol Geser Ponds Akibat Tiang Pancang Untuk pilecap non prategang V_c diambil nilai terkecil dari persamaan berikut :

$$b_o = 0,25 \times \pi \times (1200 + 1.436,5) = 2.070 \text{ mm}$$

B = perbandingan Panjang & lebar pilecap

$$\frac{10}{10} = 1$$

$\alpha = 40$, Kolom Dalam

= 30, Kolom Tepi

= 20, Kolom Dalam

Dipakai Nilai α sebesar 40 karena posisi kolom dalam

$$V_{c1} = 0,17 \times \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_o \times d \\ = 8.309 \text{ Kn}$$

$$V_{c2} = 0,083 \times \left(\frac{\alpha \times d}{b_o} + 2\right) \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_o \times d \\ = 40.228 \text{ Kn}$$

$$V_{c3} = 0,33 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \times b_o \times d = 5.376 \text{ Kn}$$

V_c Pakai = Nilai V_c Terkecil = 5.376 Kn

$$\phi V_c = 0,9 \times 5.376 = 4.838 \text{ Kn} > P_u = 4.280 \text{ Kn (OK)}$$

- Penulangan Lentur Pilecap

Rasio tulangan (ρ) ditentukan dari:

$$\rho = \frac{1}{m} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times R_n}{f_y}}\right)$$

Tabel 4. Rekapitulasi Penulangan Lentur

Arah	Tulang an Atas	Tulanga n Bawah	Jumlah As (mm ²)	Spasi (mm)
X	96D19	48D19	27.000/ 13.500	100 / 200
Y	96D19	48D19	27.000/ 13.500	100 / 200

Dengan 9 bored pile Ø120 cm kedalaman 14 m dan pilecap 10 × 10 × 1,5 m, desain struktur bawah memenuhi syarat daya dukung, geser pons, dan lentur.

3.10. Rencana Anggaran Biaya

Perhitungan biaya merupakan suatu perkiraan biaya - biaya dari sumber daya yang diperlukan dalam menyelesaikan setiap aktivitas pekerjaan. Biaya dihitung berdasarkan volume tiap pekerjaan serta nilai AHSP yang telah ditetapkan oleh pemerintah atau hasil survei lapangan. Total Biaya yang diperlukan untuk modifikasi Jembatan Putat Lor ini adalah Rp. 33.547.000.000. Dengan total durasi pekerjaan selama 1125 hari.

3.11. Hasil dan Pembahasan

Hasil perencanaan menunjukkan bahwa desain busur rangka baja untuk Jembatan Putat Lor membutuhkan biaya Rp. 33.547.000.000 dengan durasi 1.125 hari. Nilai lendutan maksimum sebesar 14 mm berada di bawah batas izin 1/800 L sesuai SNI 1725:2016, sehingga struktur aman terhadap deformasi. Kontribusi utama desain busur rangka adalah mengurangi kebutuhan pilar tengah, meningkatkan kapasitas bentang panjang, serta mempercepat durasi konstruksi dibandingkan desain beton eksisting. Temuan ini sejalan dengan penelitian Setiawan & Masagala (2021) yang melaporkan bahwa sistem busur baja mampu menurunkan lendutan hingga 20% pada bentang panjang, serta didukung oleh literatur lain yang menekankan efisiensi struktur lengkung dibanding gelagar konvensional. Dengan demikian, desain busur rangka baja tidak hanya memenuhi kriteria teknis, tetapi juga memberikan nilai tambah dari sisi efisiensi biaya-waktu dan estetika, sekaligus menjadi solusi atas keterbatasan kapasitas jembatan eksisting.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perencanaan ulang Jembatan Putat Lor dengan sistem busur rangka baja, diperoleh bahwa struktur dengan panjang bentang 120 m dan lebar 6,5 m memenuhi persyaratan kekuatan terhadap momen, geser, tekuk, serta lendutan sesuai ketentuan SNI 1725:2016. Pelat lantai direncanakan menggunakan beton $f'c$ 35 MPa dengan tebal 0,25 m, sedangkan elemen utama jembatan menggunakan profil baja WF sesuai kapasitas rencana. Sambungan direncanakan dengan baut M36 dan dinyatakan memenuhi syarat kekuatan. Struktur bawah jembatan terdiri dari pilecap berukuran $10 \times 10 \times 1,5$ m dengan bored pile berdiameter 1,2 m sedalam 14 m sebanyak 18 tiang. Estimasi biaya konstruksi sebesar Rp33,55 miliar dengan durasi pelaksanaan 1.125 hari. Dengan demikian, desain busur rangka baja ini dinyatakan layak secara teknis, ekonomis, serta dapat dijadikan alternatif pengembangan jembatan nasional yang lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Al Nasser, H. A., Widen, K., & Aulin, R. (2016). A taxonomy of planning and scheduling methods to support their more efficient use in construction project management. In *Journal of Engineering, Design and Technology* (Vol. 14, Issue 3, pp. 580–601). Emerald Group Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1108/JEDT-11-2013-0078>
- Alghiffary, R. (2021). *PERANCANGAN JEMBATAN SEMUJUR DENGAN JEMBATAN BUSUR BOX BAJA DIAGONAL SEBAGAI ICON KOTA PANGKAL PINANG*.
- Chen, W.-F., & Duan, L. (2014). *Bridge engineering handbook: construction and maintenance*. CRC press.
- Darmawan, D., Tinambunan, A. P., Hidayat, A. C., Sriharyati, S., Hamid, H., Estiana, R., Sono, M. G., Ramli, A., Sondeng, S., & Mareta, S. (2023). *Manajemen Sumber Daya Manusia Era Digital*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Fazis, M., & Tugiah, T. (2022). Perencanaan Proyek dan Penjadwalan Proyek. *Jurnal Sosial Teknologi*, 2(12), 1365–1377.
- Graciella, N., Arsjad, T. T., & Tjakra, J. (2024). Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) Pekerjaan Arsitektur Pada Proyek Konstruksi Ruko Puri Kelapa Gading Minahasa Utara. *TEKNO*, 22(87), 643–651.
- Kadim, A. (2017). *Penerapan Manajemen Produksi & Operasi di Industri Manufaktur*. <http://www.mitrawacanamedia.com>.
- Kerzner, H. (n.d.). *Project management: case studies*.
- Kurniawan, N. (2007). Analisis Kelayakan usaha pengolahan sampah Kota menjadi produk yang berguna Di tpa bantargebang. *Skripsi Program Studi Teknik Industri*.
- Luther, J., & Fitriani, A. S. (2023). Penerapan Sistem Informasi Manajemen Kepegawaian terhadap Pengembangan Karir di Satuan Polisi Pamong Praja. *Jurnal Mirai Management*, 8(3).
- Margianto, I. (2020). *MODIFIKASI DAN ANALISIS STAGING JEMBATAN CINCIN LAMA WIDANG MENGGUNAKAN STRUKTUR BUSUR RANGKA*.
- Mulyadi, W. W. (2020). Pengantar manajemen. *Banyumas: Pena Persada*.
- Project Management Institute. (2021). *The Standard for Project Management PMBOK® Guide- Seventh Edition AND The Standard for Project Management PMI Seventh Edition*. <https://lccn.loc.gov/2021011107>
- Rawis, T. D., Tjakra, J., & Arsjad, T. T. (2016). Perencanaan biaya Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) pada proyek konstruksi bangunan (studi kasus: sekolah st. ursula kotamobagu). *Jurnal Sipil Statik*, 4(4).
- Roring, H. S. D., Sompie, B. F., & Mandagi, R. J. M. (2014). Model estimasi biaya tahap konseptual konstruksi bangunan gedung dengan metode parametrik (Studi kasus pada bangunan gedung publik di wilayah Kota Manado dan kabupaten/kota sekitarnya). *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(2).
- Septiarsilia, Y., Fitriyah, D. K., & Propika, J. (2020). Perencanaan Struktur Jembatan Sumber Sari, Kutai Barat, Kalimantan Timur dengan Sistem Busur Baja. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(1), 79–87.
- Setiawan, B., & Masagala, A. A. (2021). Perancangan Struktur Atas Jembatan Busur Baja Tipe Tied Arch Bridge Bentang 60 M (Studi Kasus: Jembatan Kali Putih, Magelang). *RENOVASI: Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, 6(1), 34–46.
- Stephenson, H. L., & Faace, C. (1996). *Total Cost Management Framework, 2nd Edition, Total Cost Management Framework An Integrated Approach to Portfolio, Program, and Project Management Second Edition Total Cost Management Framework Second Edition*.
- Tama, A. K., Anggraini, L., & Tutuko, B. (2020). Analisis Kinerja Manajemen Konstruksi Pada Proyek Gedung Digitasi Universitas Negeri Semarang. *Jurnal Teknik Sipil*, 3.
- Widjajanto, T., Perdana, S., & Rahman, A. (2020). PELATIHAN MANAJEMEN PROYEK DENGAN METODE CPM (Critical Path Method) DI PT. NIROMUKTI AIRTECH INDONESIA. *Lakar: Jurnal Arsitektur*, 2(2)