

ANALISIS DAN DESAIN JEMBATAN CANGKANG LENGKUNG DENGAN BENTANG TOTAL 100 METER

Chandrayudha Hardar¹, Agus Sugiarto²

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang²

Email: chandrayudha.hardar@gmail.com¹, agus.sugiarto@polinema.ac.id²

ABSTRAK

Jembatan Kali Lekso, yang terletak di Jalan Raya Jatitengah, Kec. Selopuro, Kab. Blitar, menghubungkan Desa Mronjo dan Jatitengah yang dipisahkan oleh sungai. Struktur jembatan eksisting merupakan jembatan baja tipe Warren truss peninggalan belanda dengan panjang 100 meter dan lebar jalur lalu lintas hanya 4,5 meter, sehingga kendaraan roda empat atau lebih harus melintasi secara bergantian. Mengingat keterbatasan lebar dan usia jembatan yang sudah tua, diperlukan redesain untuk meningkatkan fungsi dan kapasitas daya dukung. Studi ini mengusulkan desain alternatif berupa struktur pelengkung cangkang beton bertulang. Desain mengacu pada Pedoman Perancangan Jembatan Pelengkung 2018 [1], SNI 1725:2016 [2] untuk standar pembebanan, serta SNI 2847:2019 [3] dan RSNI T-12-2004 [4] untuk struktur beton. Analisis struktur dilakukan menggunakan perangkat lunak STAADPro Connect Edition, dan perhitungan struktur menggunakan metode Equivalent Stress Block Whitney. Desain yang diusulkan menunjukkan bahwa jembatan direncanakan mampu menahan beban permanen, beban sementara, dan kombinasi beban. Komponen struktur meliputi: struktur cangkang lengkung tebal 0,3 m dengan tulangan D19-100 arah memanjang dan D16-200 arah melintang; dinding tepi tebal 0,3 m dengan tulangan D16-200 arah memanjang dan D16-200 arah melintang; pelat lantai kendaraan tebal 0,25 m arah memanjang menggunakan tulangan pokok D16-100 dan tulangan bagi D16-200, pada arah melintang menggunakan tulangan pokok D13-100 dan tulangan bagi D13-200. Pada struktur cangkang terjadi lendutan sebesar 36,807 mm akibat kombinasi LAYAN 4, dan pada pelat lantai kendaraan terjadi lendutan sebesar 25,975 mm akibat kombinasi LAYAN 2. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur cangkang mampu menahan gaya-gaya dalam akibat beban kerja. Kebutuhan volume beton pada desain jembatan ini adalah 904,51 m³.

Kata kunci : cangkang lengkung, beton bertulang, STAADPro, jembatan.

ABSTRACT

The Kali Lekso Bridge, located on Jatitengah Highway in Selopuro District, Blitar Regency, connects the villages of Mronjo and Jatitengah, which are separated by a river. The existing bridge is a 100-meter-long steel Warren truss structure built during the Dutch colonial era, with a narrow traffic lane of only 4.5 meters. This limited width requires alternating traffic for four-wheeled vehicles, and the aging structure further reduces its functionality and capacity. This study proposes a redesign using a reinforced concrete arch shell structure. The design refers to the Bridge Arch Design Guidelines (2018), SNI 1725:2016 for loading standards, and SNI 2847:2019 and RSNI T-12-2004 for concrete structure provisions. Structural analysis was performed using STAADPro Connect Edition, and structural calculations utilized the Whitney Equivalent Stress Block method. The proposed design is capable of withstanding permanent loads, transient loads, and load combinations. Structural components include: a 0.3 m thick concrete arch shell with longitudinal D19-100 and transverse D16-200 reinforcements; 0.3 m thick side walls reinforced with D16-200 in both directions; and a 0.25 m thick vehicle deck slab with longitudinal D16-100 and D16-200 reinforcements, and transverse D13-100 and D13-200 reinforcements. The shell structure exhibits a deflection of 36.807 mm under service load combination 4, while the deck slab deflects by 25.975 mm under combination 2. Analysis results indicate that the shell structure effectively resists internal forces due to applied loads. The total required concrete volume for the redesigned bridge is 904.51 m³.

Keywords : Arch-shell, reinforced concrete, STAADPro, bridge

1. PENDAHULUAN

Jembatan berperan menghubungkan ruas jalan yang terputus oleh rintangan alami maupun buatan, seperti sungai, jurang, saluran irigasi, atau persimpangan jalan (Batubara & Simatupang 2018) [5]. Salah satu tipe jembatan yang memiliki keunggulan dari segi kekuatan dan efisiensi adalah jembatan pelengkung.

Jembatan pelengkung dirancang dengan menggunakan elemen lengkung sebagai komponen tekan utama, yang efektif dalam menyalurkan beban dan mengurangi momen lentur, sehingga menghasilkan struktur yang stabil dan efisien dalam penggunaan bahan. (Tristanto & Redrik 2020) [6] menyebutkan bahwa tipe pelengkung mampu menghemat hingga 15% volume beton dibandingkan dengan jembatan gelagar prategang pada bentang optimal sekitar 40 meter. (Zienkiewicz, Taylor & Fox 2019) [7] dalam bukunya menjelaskan struktur cangkang adalah struktur melengkung dengan satu arah atau lebih dan mempunyai ketebalan yang kecil. Meskipun tipis dan ringan, memiliki kemampuan untuk menjangkau area yang luas dan menahan beban dengan sangat efektif (Chapelle & Bathe 2016) [8]. Bila dikombinasikan dengan konsep struktur cangkang maka efisiensi dan kekuatan jembatan dapat ditingkatkan secara signifikan. Namun, jenis struktur ini memerlukan analisis dan desain yang lebih kompleks dibandingkan tipe konvensional.

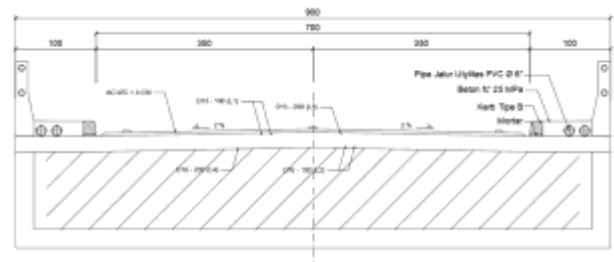
Studi sebelumnya oleh Christin et al. (2022) [9] menunjukkan efisiensi tertinggi terdapat pada tipe deck arch. Selain itu, penelitian Zizi et al. (2022) [10] dan Oliveira et al. (2020) [11] menganalisis pengaruh karakteristik geometri dan tanah terhadap respons jembatan, termasuk dalam kondisi seismik.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis struktur jembatan cangkang lengkung dengan bentang total 100 meter sebagai pengembangan alternatif desain jembatan pelengkung di Indonesia. Studi kasus difokuskan pada Jembatan Kali Lekso yang terletak di Jalan Raya Jatitengah, Kecamatan Selopuro, Kabupaten Blitar. Jembatan eksisting merupakan jembatan baja tipe *Warren truss* peninggalan era kolonial Belanda

Perencanaan jembatan pelengkung ini mengacu pada Pedoman Perancangan Jembatan Pelengkung 2018 [1] dan SNI 1725:2016 [2] sebagai dasar pembebanan. Analisis struktural dilakukan menggunakan perangkat lunak STAADPro Connect Edition untuk mendapatkan respons momen dan deformasi, sementara proses pemodelan geometri dan gambar desain dikerjakan menggunakan AutoCAD.

2. METODE

Jembatan Cangkang Lengkung Kali Lekso terletak di Jalan Raya Jatitengah, Kec. Selopuro, Kab. Blitar menghubungkan jalan yang terbagi oleh sungai. Jembatan ini berada pada jalur alternatif dari Bitar ke Malang. Jembatan ini merupakan jembatan beton bertulang yang memiliki panjang total 100 meter dengan lebar 9 meter.



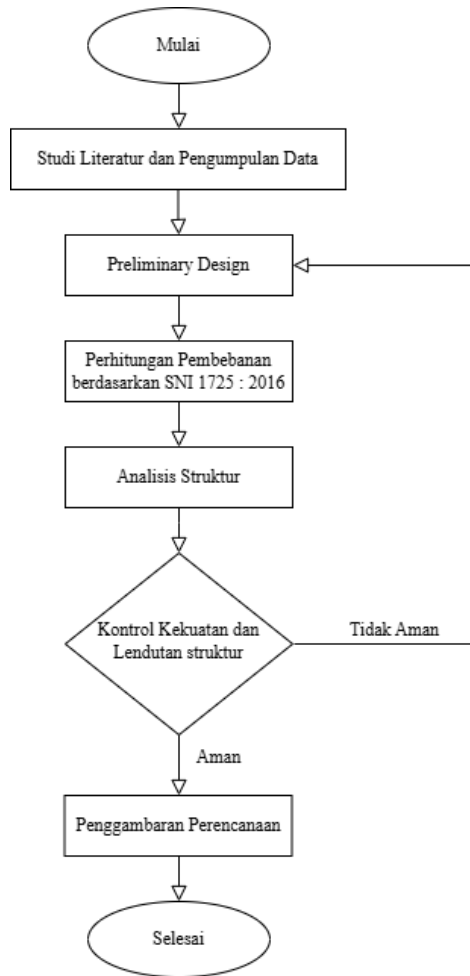
Gambar 1. Potongan Melintang Jembatan

Data Perencanaan Jembatan

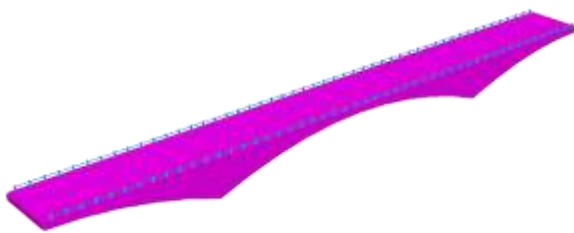
Nama Jembatan	=	Jembatan Kalilekso
Lokasi	=	Jalan Raya Jatitengah, Kec Selopuro, Blitar
Jenis	=	Jembatan Pelengkung
Panjang jembatan	=	100 meter
Lebar jembatan	=	9 meter
Lebar Lajur	=	3,5 meter x 2 lajur
Lebar Trotoar	=	1 meter (kanan dan kiri)
Tebal Pelat lantai	=	0,25 meter
Tinggi struktur	=	7,25 meter
Tebal aspal	=	0,05 meter
Tebal overlay	=	0,05 meter

Spesifikasi Bahan

Mutu beton (f_c')	=	30 MPa (Untuk struktur utama jembatan) 25 MPa (struktur lain)
Mutu baja (f_y)	=	400 MPa
Modulus elastisitas baja (E_s)	=	200000 MPa
Berat jenis beton	=	24 kN/m ³
Berat jenis aspal	=	22 kN/m ³
Berat jenis air	=	9,8 kN/m ³
Berat jenis baja	=	78,5 kN/m ³

Diagram Alir**Gambar 2.** Diagram Alir**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Perencanaan Struktur Atas Jembatan

**Gambar 3.** Permodelan menggunakan STAADPro

Jenis jembatan	: Jembatan Cangkang Lengkung Beton Bertulang
Panjang jembatan	: 100 meter
Lebar jembatan	: 9 meter
Lebar lajur	: 3,5 meter x 2 lajur
Lebar trotoar	: 1 meter

Tebal Pelat lantai kendaraan	: 0,25 meter
Tinggi struktur	: 7,25 meter

Pembebanan Jembatan

Tabel 1. Pembebanan Jembatan dari STAADPro

Beban mati (MS)	= 1.907.599,4 Kg.
Beban mati tambahan (MA)	= 5.649,23 Kg/m
Beban Lajur D (TD)	= 205,8 kN dan 9 kN/m ²
Beban T (TT)	= 650 kN
Beban rem (TB)	= 56,25 kN
Beban angin struktur (EWs)	= 5,39 kN/m
Beban angin kendaraan (EWL)	= 1,502 kN/m

Sumber: Hasil perhitungan

Kombinasi Pembebanan

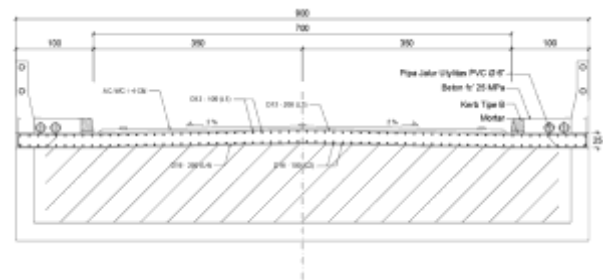
Tabel 2. Kombinasi Pembebanan

Kuat I	: 1,3MS + 2MA + 1,8TT + 1,8TD + 1,8TB + 1,8TP
Kuat II	: 1,3MS + 2MA + 1,4TT + 1,4TD + 1,4TB + 1,4TP
Kuat III	: 1,3MS + 2MA + 1,4EWs
Kuat IV	: 1,3MS + 2MA
Kuat V	: 1,3MS + 2MA + 0,4EWs + 1EWL
Ekstrem I	: 1,3MS + 2MA + TT + TD + TB + TP
Ekstrem II	: 1,3MS + 2MA + 0,5TT + 0,5TD + 0,5TB + 0,5TP
Layan I	: 1MS + 1MA + 1TT + 1TD + 1TB + 1TP + 0,3EWs + 1EWL
Layan II	: 1MS + 1MA + 1,3TT + 1,3TD + 1,3TB + 1,3TP
Layan III	: 1MS + 1MA + 0,8TT + 0,8TD + 0,8TB + 0,8TP
Layan IV	: 1MS + 1MA + 0,7EWs
Fatik	: 0,75TD

Sumber: SNI 1725 : 2016

Perhitungan Struktur Atas Jembatan

a. Pelat lantai kendaraan

**Gambar 4** Detail Pelat Lantai

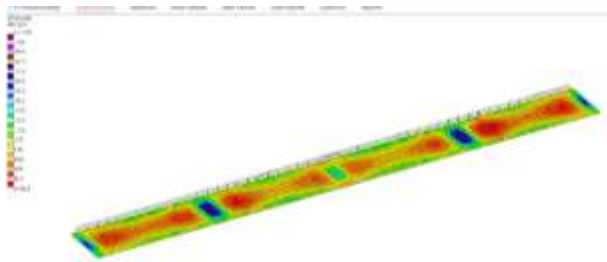
Data perencanaan pelat lantai:

Lebar lantai kendaraan = 9 meter

Mutu beton (f_c')	=	30 MPa
Mutu baja (f_y)	=	400 MPa
Tebal pelat	=	250 mm
Tebal selimut	=	30 mm
Tebal efektif slab beton	=	220 mm
Tipe pelat	=	1 arah

Hasil analisis pada software STAADPro menunjukkan bahwa terjadi momen arah x sebesar 119,837 kNm/m dan momen arah y sebesar 65,362 kNm/m.

Tinjauan penulangan elemen arah x



Gambar 5 Tegangan akibat Mx pada pelat lantai

$$\begin{aligned}
 M_u &= 119,837 \text{ kNm/m} \\
 &119.837.000 \text{ Nmm} \\
 F_y &= 400 \text{ MPa} \\
 R_n &= \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} \\
 &= \frac{119.837.000}{0,8 \cdot 1000 \cdot 220^2} \\
 &= 3,095
 \end{aligned}$$

Menghitung momen nominal

$$\begin{aligned}
 \Phi M_n &= 0,8 \cdot A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 0,8 \cdot 1320 \cdot 400 \left(220 - \frac{31,373}{2} \right) \\
 &= 130.760.784 > M_u = 119.837.000 \rightarrow OK
 \end{aligned}$$

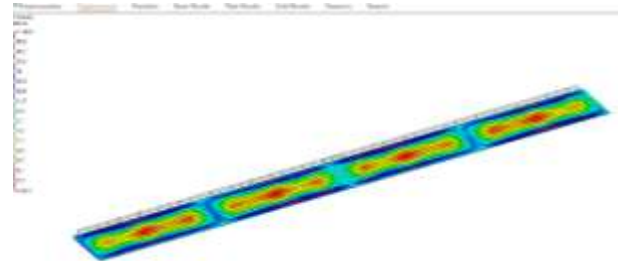
Menghitung tahanan momen

$$\begin{aligned}
 R_{maks} &= 0,75 \cdot \rho b \cdot f_y \cdot \left[1 - 0,5 \cdot 0,75 \cdot \rho b \cdot \frac{f_y}{(0,85 \cdot f_c')} \right] \\
 &= 0,75 \cdot 0,0325 \cdot 400 \cdot \left[1 - 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,0325 \cdot \frac{400}{(0,85 \cdot 30)} \right] \\
 &= 7,89 > R_n = 3,095 \rightarrow OK
 \end{aligned}$$

Penulangan pokok yang digunakan yaitu tulangan BjTS D16 – 100

Penulangan bagi yang digunakan yaitu tulangan BjTS D16 – 200

Tinjauan penulangan arah y



Gambar 6 Tegangan akibat My pada pelat lantai

$$\begin{aligned}
 M_u &= 65,362 \text{ kNm/m} \\
 &65.362.000 \text{ Nmm} \\
 F_y &= 400 \text{ MPa} \\
 R_n &= \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} \\
 &= \frac{65.362.000}{0,8 \cdot 1000 \cdot 220^2} \\
 &= 1,688
 \end{aligned}$$

Menghitung momen nominal

$$\begin{aligned}
 \Phi M_n &= 0,8 \cdot A_s \cdot f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 0,8 \cdot 1320 \cdot 400 \left(220 - \frac{20,706}{2} \right) \\
 &= 88.554.917 > M_u = 65.362.000 \rightarrow OK
 \end{aligned}$$

Menghitung tahanan momen

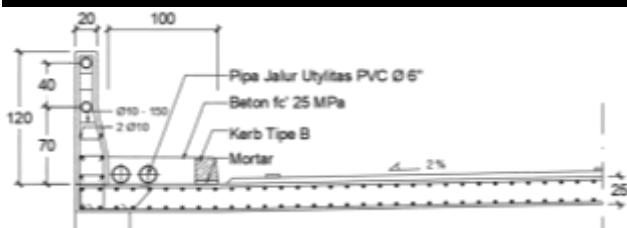
$$\begin{aligned}
 R_{maks} &= 0,75 \cdot \rho b \cdot f_y \cdot \left[1 - 0,5 \cdot 0,75 \cdot \rho b \cdot \frac{f_y}{(0,85 \cdot f_c')} \right] \\
 &= 0,75 \cdot 0,0325 \cdot 400 \cdot \left[1 - 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,0325 \cdot \frac{400}{(0,85 \cdot 30)} \right] \\
 &= 7,89 > R_n = 1,688 \rightarrow OK
 \end{aligned}$$

Penulangan pokok yang digunakan yaitu tulangan BjTS D13 – 100

Penulangan bagi yang digunakan yaitu tulangan BjTS D13 – 200

b.

c. Tiang sandaran dan trotoar



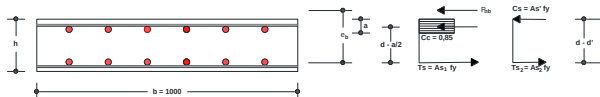
Gambar 7 Detail trotoar

Pembebanan pejalan kaki direncanakan arah horisontal dan vertikal secara bersamaan pada masing masing sandaran dengan $W = 0,75 \text{ kN/m}$ (RSNI T-02-2005). Tiang sandaran direncanakan menggunakan pipa sandaran 3" dengan panjang 2 meter dan tebal beton railing 20 cm. Trotoar dengan ketebalan 25 cm dan lebar 1 meter.

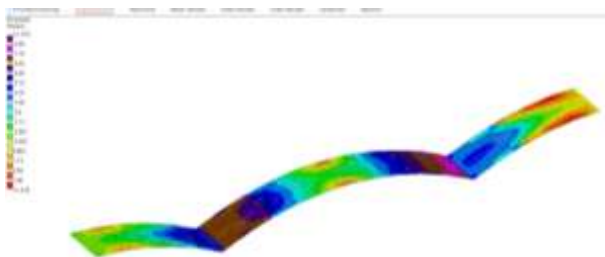
d. Struktur cangkang lengkung

Struktur cangkang menggunakan cangkang tebal Reissner-Mindlin dengan mempertimpangkan deformasi geser dan momen [12]. Perhitungan kekuatan tekan dan tarik didasarkan pada analogi kolom dengan distribusi tegangan ekuivalen [13].

Keruntuhan ditentukan oleh eksentrisitas $e = M_u/P_u > e_b$ atau nilai $P_n = P_u/\phi < P_{nb}$, terjadi keruntuhan hancur tarik. Sebaliknya jika $e = M_u/P_u < e_b$ atau nilai $P_n \text{ perlu} = P_u/\phi > P_{nb}$, terjadi keruntuhan tekan.



Gambar 8 Tegangan dan Gaya dalam pada struktur cangkang



Gambar 9 Output Sx struktur cangkang pelengkung

Hasil geser Sx terbesar adalah 9,513 Mpa dikalikan luasan pelat sehingga didapat nilai Pu sebagai berikut:

$$P_u = S_x \times b \times h$$

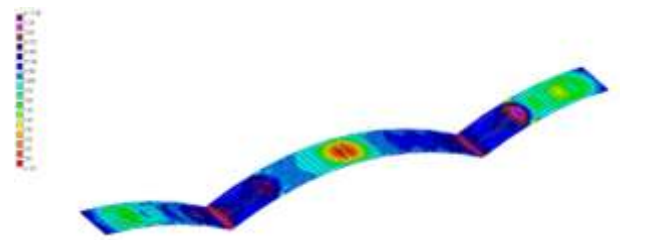
$$P_u = 9,513 \times 1000 \times 300$$

$$P_u = 2.855.900 \text{ N}$$



Gambar 10 Output Mx struktur cangkang pelengkung

Momen arah x didapatkan melalui STAADPro sebesar 329,942 kNm/m atau 329.942.000 Nmm pada elemen no. 696 dengan beban kombinasi KUAT 3



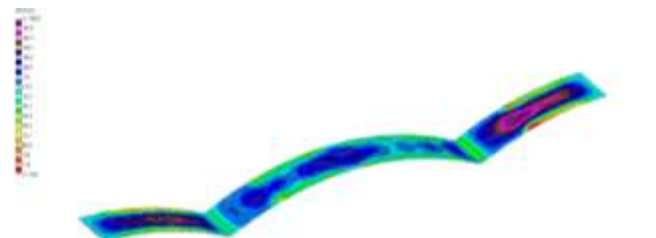
Gambar 11 Output Sy struktur cangkang pelengkung

Hasil geser Sy terbesar adalah 3,103 Mpa dikalikan luasan pelat sehingga didapat nilai Pu sebagai berikut:

$$P_u = S_y \times b \times h$$

$$P_u = 3,103 \times 1000 \times 300$$

$$P_u = 930.900,00 \text{ N}$$



Gambar 12 Output My struktur cangkang pelengkung

Momen arah y didapatkan melalui STAADPro sebesar 129,078 kNm/m atau 129.078.000 Nmm pada elemen no. 806 dengan beban kombinasi KUAT 1.

Tinjauan penulangan elemen arah x

$M_x = 329.942.000 \text{ Nmm}$, $P_u = 2.853.900 \text{ N}$, $\beta_1 = 0,85$, $\rho_b = 0,0325$

$$A_{s_{\max}} = 0,75 \cdot \rho_b \cdot b \cdot d$$

$$= 6340 \text{ mm}^2$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d$$

$$= 910 \text{ mm}^2$$

Maka dicoba luas tulangan $As_1 = 2810 \text{ mm}^2$ dan coba As' dengan persamaan $As' = As_2 = 2810 \text{ mm}^2$, sehingga diketahui $A_{stotal} = 5620 \text{ mm}^2$

Menghitung eksentrisitas

$$\begin{aligned} e &= \frac{Mu}{Pu} \\ &= \frac{329.942.000 \text{ Nmm}}{2.853.900 \text{ N}} \\ &= 115,611 \end{aligned}$$

Letak garis netral dalam keadaan seimbang

$$\begin{aligned} C_b &= \frac{600 \cdot d}{(600 + f_y)} \\ &= \frac{600 \cdot 260}{600 + 400} \\ &= 156 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tinggi blok tekan dalam keadaan seimbang

$$\begin{aligned} ab &= \beta_1 \cdot C_b \\ &= 0,85 \cdot 156 \\ &= 132,60 \text{ mm} \\ \epsilon_s' &= \frac{cb - d'}{cb} \\ &= \frac{156 - 40}{156} \\ &= 0,00223 \\ F_s' &= \epsilon_s' \cdot E \\ &= 0,00223 \cdot 200000 \\ &= 446 \end{aligned}$$

Jika $F_s' \geq F_y$, maka $F_s' = F_y$!

$$\begin{aligned} a &= \frac{As \cdot f_y}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \\ &= \frac{5620 \cdot 400}{0,85 \cdot 30 \cdot 1000} \\ &= 88,16 \\ C_c &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot ab \\ &= 0,85 \cdot 30 \cdot 1000 \cdot 132,60 \\ &= 3.381.300 \\ C_s &= As' \cdot F_s' \\ &= 2810 \cdot 400 \\ &= 1.124.000 \\ T_s &= As \cdot f_y \\ &= 5620 \cdot 400 \\ &= 2.248.000 \end{aligned}$$

Kontrol momen

$$\phi M_{nb} = 0,8 \cdot [C_c \cdot (h/2 - a/2) + C_s \cdot (h/2 - d') + T_s \cdot (h/2 - d')]]$$

$$\begin{aligned} &= 0,8 \cdot [3.381.300 \cdot (300/2 - 88,16/2) + \\ &\quad 1.124.000 \cdot (300/2 - 40) + \\ &\quad 2.248.000 \cdot (300/2 - 40)] \\ &= 583.258.080 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

$$\phi M_{nb} = 583.258.080 > M_u = 329.942.000 \rightarrow \text{OK}$$

Kontrol P_{nb}

$$\begin{aligned} \phi P_{nb} &= 0,65 \cdot (0,85 f_c' ab \cdot b + As' \cdot f_s' - As \cdot f_y) \\ &= 0,65 \cdot (0,85 \cdot 30 \cdot 132,60 \cdot 1000 + 2810 \cdot 400 \\ &\quad - 5620 \cdot 400) \\ &= 1.467.245 \text{ N} \leq P_u = 2.853.900 \text{ N} \end{aligned}$$

Dikarenakan $\phi P_{nb} \leq P_u$, maka terjadi hancur di daerah tekan. Persamaan P_n untuk kasus hancur baja di daerah tekan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \phi P_n &= 0,65 \cdot \left(\left(\frac{As' \cdot f_y}{\frac{e}{d-d'} + 0,5} \right) + \left(\frac{b \cdot h \cdot f_c'}{\frac{3 \cdot h \cdot e}{d^2} + 1,18} \right) \right) \\ \phi P_n &= 0,65 \cdot \left(\left(\frac{2810 \cdot 400}{\frac{115,611}{260-40} + 0,5} \right) + \left(\frac{1000 \cdot 300 \cdot 30}{\frac{3 \cdot 1000 \cdot 115,611}{260^2} + 1,18} \right) \right) \\ \phi P_n &= 1.467.245 \text{ N} > P_u = 2.853.900 \text{ N} \rightarrow \text{OK} \end{aligned}$$

Penulangan daerah tarik yang digunakan yaitu tulangan BjTS D19 – 100

Penulangan daerah tekan yang digunakan yaitu tulangan BjTS D19 – 100

Tinjauan penulangan elemen arah y

$M_y = 129.078.000 \text{ Nmm}$, $P_u = 930.900 \text{ N}$, $\beta_1 = 0,85$, $\rho_b = 0,0325$

$$\begin{aligned} A_{S_{\max}} &= 0,75 \cdot \rho_b \cdot b \cdot d \\ &= 6340 \text{ mm}^2 \\ A_{S_{\min}} &= \frac{1,4}{f_y} \cdot b \cdot d \\ &= 910 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka dicoba luas tulangan $As_1 = 1000 \text{ mm}^2$ dan coba As' dengan persamaan $As' = As_2 = 1000 \text{ mm}^2$, sehingga diketahui $A_{stotal} = 2000 \text{ mm}^2$

Menghitung eksentrisitas

$$\begin{aligned} e &= \frac{Mu}{Pu} \\ &= \frac{129.078.000 \text{ Nmm}}{930.900 \text{ N}} \\ &= 138,659 \end{aligned}$$

Letak garis netral dalam keadaan seimbang

$$\begin{aligned}
 Cb &= \frac{600 \cdot d}{(600 + fy)} = \frac{600 \cdot 260}{600 + 400} = 156 \text{ mm} \\
 &= \frac{600 \cdot 260}{600 + 400} = 156 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Tinggi blok tekan dalam keadaan seimbang

$$\begin{aligned}
 ab &= \beta_1 \cdot Cb \\
 &= 0.85 \cdot 156 \\
 &= 132,60 \text{ mm} \\
 \epsilon_s' &= 0,003 \cdot \frac{cb - d'}{cb} \\
 &= 0,003 \cdot \frac{156 - 40}{156} \\
 &= 0.00223 \\
 F_s' &= \epsilon_s' \cdot E \\
 &= 0.00223 \cdot 200000 \\
 &= 446
 \end{aligned}$$

Jika $F_s' \geq F_y$, maka $F_s' = F_y$!

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{As \cdot fy}{0,85 \cdot f_c' \cdot b} \\
 &= \frac{200 \cdot 400}{0,85 \cdot 30 \cdot 1000} \\
 &= 31,37 \\
 Cc &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot ab \\
 &= 0,85 \cdot 30 \cdot 1000 \cdot 132,60 \\
 &= 3.381.300 \\
 Cs &= As' \cdot F_s' \\
 &= 1000 \cdot 400 \\
 &= 400.000 \\
 Ts &= As \cdot fy
 \end{aligned}$$

Kontrol momen

$$\begin{aligned}
 \phi M_{nb} &= 0.8 \cdot [Cc \cdot (h/2 - a/2) + Cs \cdot (h/2 - d') + Ts \cdot (h/2 - d')] \\
 &= 0.8 \cdot [3.381.300 \cdot (300/2 - 31,37/2) + 400.000 \cdot (300/2 - 40) + 800.000 \cdot (300/2 - 40)] \\
 &= 468.924.000 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

$$\phi M_{nb} = 468.924.000 > M_u = 129.078.000 \rightarrow \text{OK}$$

Kontrol Pnb

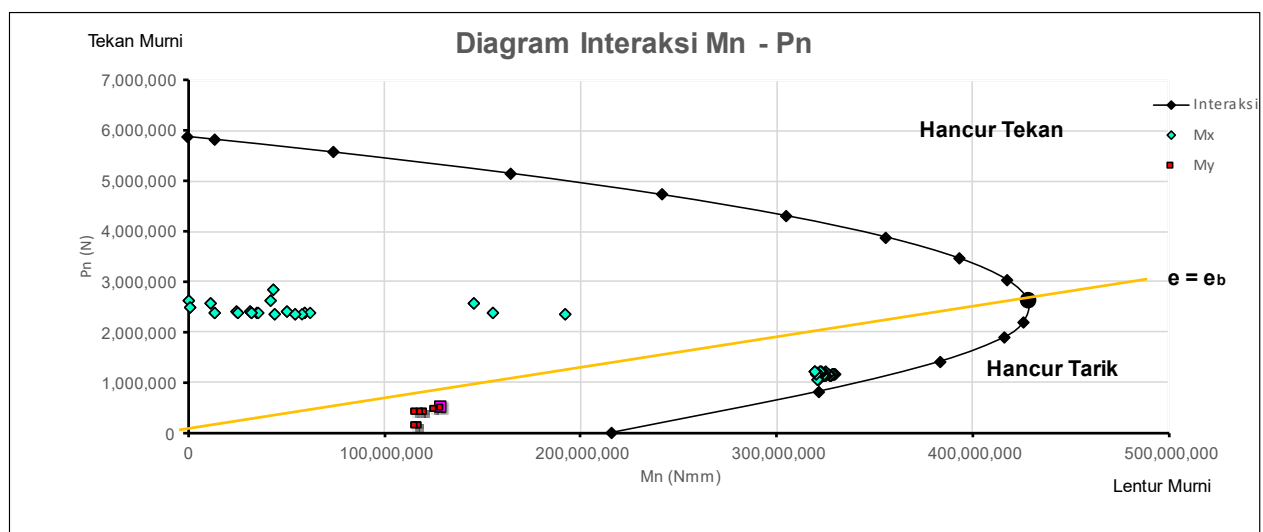
$$\begin{aligned}
 \phi P_{nb} &= 0.65 \cdot (0.85 f_c' ab \cdot b + As' \cdot fs' - As \cdot fy) \\
 &= 0.65 \cdot (0.85 \cdot 30 \cdot 132,60 \cdot 1000 + 1000 \cdot 400 - 2000 \cdot 400) \\
 &= 1.937.845 \text{ N} > P_u = 930.900 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Dikarenakan $\phi P_{nb} \geq P_u$, maka terjadi hancur di daerah tarik. Rumus persamaan P_n untuk kasus hancur baja di daerah tarik adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \phi P_n &= 0.65 \cdot 0.85 f_c' \cdot b \cdot d \left[\left(\frac{h - 2 \cdot e}{2d} \right) + \sqrt{\left(\frac{h - 2 \cdot e}{2d} \right)^2 + 2 \cdot m \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \\
 \phi P_n &= 0.65 \cdot 0.85 f_c' \cdot b \cdot d \left[\left(\frac{300 - 2 \cdot 138,66}{2 \cdot 260} \right) + \sqrt{\left(\frac{300 - 2 \cdot 138,66}{2 \cdot 260} \right)^2 + 2 \cdot 15,69 \cdot 0,006 \cdot \left(1 - \frac{40}{260} \right)} \right] \\
 \phi P_n &= 2.010.619 \text{ N} > P_u 930.900 \text{ N} \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

Penulangan daerah tarik yang digunakan yaitu tulangan BjTS D16 – 200

Penulangan daerah tekan yang digunakan yaitu tulangan BjTS D16 – 200



Gambar 13 Diagram interaksi elemen

Tabel 2. Kontrol Elemen

Arah X										
	L/C	MX kN-m/m	SX N/mm2	Pu	Mu	e	pnb	Hancur	Pn	Kontrol
696	17	329.942	-3.922	1,176,600.00	329,942,000.00	280.42	1467245	hancur tarik!	3,662,014.49	OK
696	18	329.76	-3.92	1,176,000.00	329,760,000.00	280.41	1467245	hancur tarik!	3,662,014.49	OK
701	17	329.337	-3.899	1,169,700.00	329,337,000.00	281.56	1467245	hancur tarik!	3,662,014.49	OK
691	17	329.337	-3.899	1,169,700.00	329,337,000.00	281.56	1467245	hancur tarik!	3,662,014.49	OK
701	18	329.158	-3.897	1,169,100.00	329,158,000.00	281.55	1467245	hancur tarik!	3,662,014.49	OK
671	15	43.561	-9.513	2,853,900.00	43,561,000.00	15.26	1467245	hancur tekan!	2,863,799.20	OK
631	15	43.561	-9.513	2,853,900.00	43,561,000.00	15.26	1467245	hancur tekan!	2,863,799.20	OK
671	16	41.959	-8.812	2,643,600.00	41,959,000.00	15.87	1467245	hancur tekan!	2,863,799.20	OK
631	16	41.959	-8.812	2,643,600.00	41,959,000.00	15.87	1467245	hancur tekan!	2,863,799.20	OK
675	15	0.715	-8.773	2,631,900.00	715,000.00	0.27	1467245	hancur tekan!	2,863,799.20	OK
Arah Y										
806	15	129.078	1.614	484,200.00	129,078,000.00	266.58	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
766	15	129.078	1.614	484,200.00	129,078,000.00	266.58	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
806	16	125.876	1.53	459,000.00	125,876,000.00	274.24	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
766	16	125.876	1.53	459,000.00	125,876,000.00	274.24	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
806	20	120.673	1.395	418,500.00	120,673,000.00	288.35	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
806	15	129.078	1.614	484,200.00	129,078,000.00	266.58	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
766	15	129.078	1.614	484,200.00	129,078,000.00	266.58	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
806	16	125.876	1.53	459,000.00	125,876,000.00	274.24	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
766	16	125.876	1.53	459,000.00	125,876,000.00	274.24	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK
806	20	120.673	1.395	418,500.00	120,673,000.00	288.35	1467245	hancur tarik!	2,010,618.91	OK

e. Lendutan

Berdasarkan (RSNI T-12-2004), pembatasan lendutan pada jembatan bertujuan untuk memastikan kenyamanan dan rasa aman pengendara. Batas lendutan ini ditetapkan sebesar $L/800$ dan diperoleh dari analisis struktur menggunakan kombinasi LAYAN. Dengan demikian, lendutan yang diizinkan untuk Jembatan Kali Lekso yang memiliki bentang utama 50 meter harus mematuhi batasan tersebut. Lendutan pada struktur pelengkung.

$$\delta \text{ izin} = \frac{L}{800} = \frac{50.000}{800} = 62,50 \text{ mm}$$

**Gambar 14.** Lendutan pada struktur cangkang

Lendutan akibat LAYAN 4 diketahui dari STAADPro adalah sebagai berikut:

Tabel 3 Output Lendutan maks akibat LAYAN 4

Node	L/C	Y-trans mm
843	25	-36,807
838	25	-36,807
844	25	-36,151
839	25	-36,151

Sumber: Output STAADPro Connect

$$\delta_{maks} < \delta_{izin}$$

$$36,807 \text{ mm} < 62,50 \text{ mm} \rightarrow OK$$

Lendutan akibat LAYAN 2 pada pelat lantai kendaraan

$$\delta \text{ izin} = \frac{L}{300} = \frac{50.000}{300} = 166,67 \text{ mm}$$

