



Perencanaan Box Underpass Tunnel dengan Metode Kekuatan Batas (Ultimate Design)

(Studi Kasus: Bundaran Besar, Kota Palangka Raya, Provinsi Kalimantan Tengah)

Kristianni Toendan^{1*}, Fransisco Happy Riadi Haputra Baru², Maryanto³

¹⁻³ Universitas Palangka Raya, Indonesia

Email: toendankristianni@gmail.com^{1*}, frans@eng.upr.ac.id², maryantosipilunpar@gmail.com³

*Penulis Korespondensi: toendankristianni@gmail.com

Abstract. This study aims to design a Box Underpass Tunnel structure using the Ultimate Strength Design method to ensure structural safety, stability, and serviceability. The research applies a descriptive quantitative approach through technical analysis and structural calculations to evaluate the requirements and feasibility of a pedestrian underpass tunnel in the Bundaran Besar area, Palangka Raya City. The data utilized in this study consist of primary project data from the Menara and Bundaran Besar development obtained from the Public Works and Housing Agency of Central Kalimantan Province. The structural design uses K-300 quality concrete and U-41 reinforcing steel with a slab thickness of 45 cm. Structural modeling and analysis are performed using SAP2000 software to determine internal forces and reinforcement requirements. The analysis results show that the main reinforcement for the top slab is D19-50, wall slab is D19-150, and base slab is D19-50, while secondary reinforcement for all structural components uses D13-100. The findings confirm that the Ultimate Strength Design method provides an effective and reliable approach for designing Box Underpass Tunnel structures.

Keywords: Box Underpass Tunnel; Reinforced Concrete; SAP2000; Structural Design; Ultimate Strength Design.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain struktur Terowongan Bawah Tanah Kotak menggunakan metode Desain Kekuatan Maksimum untuk memastikan keamanan, stabilitas, dan kemampuan layanan struktural. Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif deskriptif melalui analisis teknis dan perhitungan struktural untuk mengevaluasi persyaratan dan kelayakan terowongan bawah tanah pejalan kaki di kawasan Bundaran Besar, Kota Palangka Raya. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data proyek primer dari pengembangan Menara dan Bundaran Besar yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Perumahan Provinsi Kalimantan Tengah. Desain struktural menggunakan beton mutu K-300 dan baja tulangan U-41 dengan ketebalan pelat 45 cm. Pemodelan dan analisis struktural dilakukan menggunakan perangkat lunak SAP2000 untuk menentukan gaya internal dan kebutuhan tulangan. Hasil analisis menunjukkan bahwa tulangan utama untuk pelat atas adalah D19-50, pelat dinding adalah D19-150, dan pelat dasar adalah D19-50, sedangkan tulangan sekunder untuk semua komponen struktural menggunakan D13-100. Temuan ini menegaskan bahwa metode Desain Kekuatan Maksimum memberikan pendekatan yang efektif dan andal untuk mendesain struktur Terowongan Bawah Tanah Kotak.

Kata kunci: Beton Bertulang; Box Underpass Tunnel; Perencanaan Struktur; SAP2000; Ultimate Design.

1. LATAR BELAKANG

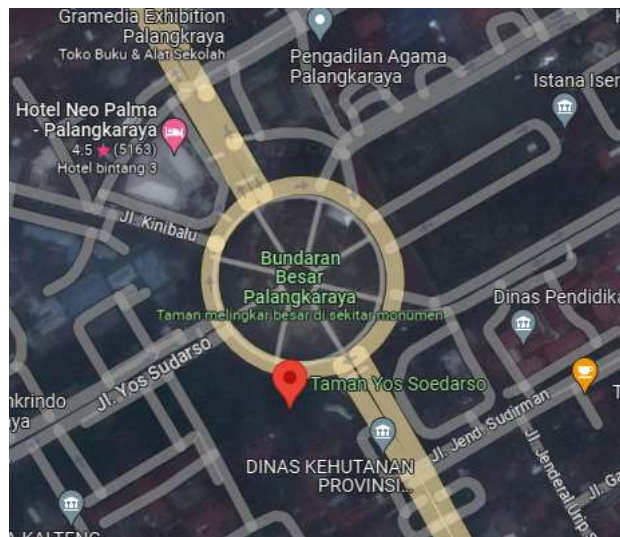
Terowongan atau terowongan jalan merupakan jalur lalu lintas tertutup dengan akses kendaraan yang umumnya dibatasi pada portal (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2010). Dalam buku yang bertajuk The Art of Tunnel, Terowongan pejalan kaki termasuk dalam kategori terowongan jalan (road tunnel) dengan ukuran penampang yang lebih kecil, radius tikungan yang pendek, serta kemiringan cukup curam (lebih dari 10%) (Szechy, 1966).

Kota Palangka Raya perlahan tapi pasti menyelesaikan renovasi Bundaran Besar. Kepala Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Provinsi Kalimantan Tengah, H.

Shalahuddin, S.T., M.T., menuturkan bahwa proyek ini menggunakan sistem kontrak tahun jamak (Multi Years Contract) (Pangkan B, 2022). Namun bagaimanapun juga, semakin kawasan tersebut ramai dikunjungi maka akan diikuti dengan kemacetan lalu lintas terutama ketika akhir pekan di malam hari (Fathurahman, 2024). Direncanakan pembangunan terowongan pejalan kaki pada rute Bundaran Besar Kota Palangka Raya menuju Taman Yos Sudarso sebagai area parkir kendaraan bermotor. Perencanaan terowongan tetap mengacu pada kaidah teknis terowongan pejalan kaki yang telah ada. Terowongan dirancang dengan tipe ganda (two cells) yang dibagi menjadi dua jalur pergerakan pejalan kaki berlawanan arah. Dimensi terowongan dibuat lebih besar untuk meningkatkan keamanan, kenyamanan, dan sirkulasi udara. Keberadaan dinding tengah pada terowongan two cells meningkatkan kekakuan dan stabilitas struktur dalam menahan beban tanah dan lalu lintas di atasnya.



Gambar 1. Box Culvert sebagai Underpass Tunnel di Bundaran Besar, Kota Palangka Raya, Provinsi Kalimantan Tengah.



Gambar 2. Lokasi Perencanaan Box Culvert sebagai Underpass Tunnel dengan Rute Bundaran Besar sampai dengan Taman Yos Sudarso.

2. KAJIAN TEORITIS

Terowongan

Terowongan atau terowongan jalan merupakan jalur lalu lintas tertutup dengan akses kendaraan yang umumnya dibatasi pada portal. Definisi ini mencakup seluruh jenis struktur terowongan, tanpa memperhatikan bentuk penampang maupun metode konstruksinya. Namun, jalan tertutup yang terbentuk akibat adanya jembatan jalan raya, jembatan kereta api, atau struktur sejenis tidak termasuk dalam kategori terowongan jalan (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2010).

Terowongan Pejalan Kaki (*Underpass Tunnel*)

Terowongan pejalan kaki atau bisa disebut juga pedestrian tunnel atau underpass tunnel adalah jenis terowongan yang dibangun di bawah permukaan tanah atau jalan untuk memungkinkan perlintasan tanpa gangguan dengan jalur lalu lintas lain di atasnya. Fungsinya terutama untuk memisahkan pergerakan lalu lintas (kendaraan, kereta api, atau pejalan kaki) sehingga mengurangi kemacetan dan meningkatkan keselamatan.

Suatu struktur bangunan, baik itu bangunan tinggi, jembatan, atau underpass sekalipun harus direncanakan untuk dapat memikul beban-beban yang bekerja pada struktur tersebut, diantaranya beban gravitasi dan beban lateral. Beban gravitasi yang bekerja pada struktur meliputi beban mati dan beban hidup. Beban mati yang bekerja pada struktur diakibatkan oleh berat struktur sendiri serta berat tambahan seperti berat tanah diatas underpass. Sedangkan yang termasuk beban lateral adalah beban tanah. Beban-beban yang dihitung dalam perancangan ini adalah berat sendiri, beban mati tambahan, beban lalu lintas, beban rem, tekanan tanah lateral dalam keadaan diam (at rest), beban angin, serta pengaruh temperatur.

3. METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (engineering research) dengan pendekatan kuantitatif dan metode analitis yang bertujuan untuk merencanakan struktur Box Underpass Tunnel menggunakan metode Kekuatan Batas (Ultimate Strength Design). Perencanaan struktur dilakukan berdasarkan standar nasional yang meliputi SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2019), SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2016), serta SNI 8460:2017 (Badan Standardisasi Nasional (BSN), 2017) tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik.

Penelitian berlokasi di kawasan Bundaran Besar Kota Palangka Raya, Provinsi Kalimantan Tengah, pada rute Taman Yos Sudarso – Bundaran Besar yang direncanakan sebagai lokasi pembangunan Box Underpass Tunnel. Data yang digunakan terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer meliputi data geoteknik berupa nilai dan grafik SPT serta uji sondir, data umum dan gambar kerja Box Underpass Tunnel eksisting, serta dokumentasi lapangan yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Provinsi Kalimantan Tengah. Data sekunder berupa peta lokasi dan standar perencanaan yang relevan.

Analisis struktur dilakukan melalui perhitungan pembebanan yang meliputi berat sendiri, beban mati tambahan, beban lalu lintas, beban rem, tekanan tanah lateral dalam kondisi diam (at rest), beban angin, serta pengaruh temperatur. Pemodelan pembebanan dilakukan menggunakan AutoCAD, sedangkan analisis struktur dilakukan dengan bantuan perangkat lunak SAP2000 untuk memperoleh gaya dalam berupa momen lentur, gaya lintang, dan gaya normal. Kombinasi pembebanan disusun berdasarkan kondisi layan dan ultimit. Selanjutnya, perhitungan kebutuhan tulangan pada pelat atas, pelat dinding, dan pelat lantai pondasi dilakukan sesuai kaidah perencanaan beton bertulang dan hasilnya digunakan sebagai dasar penyusunan gambar kerja struktur Box Underpass Tunnel.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

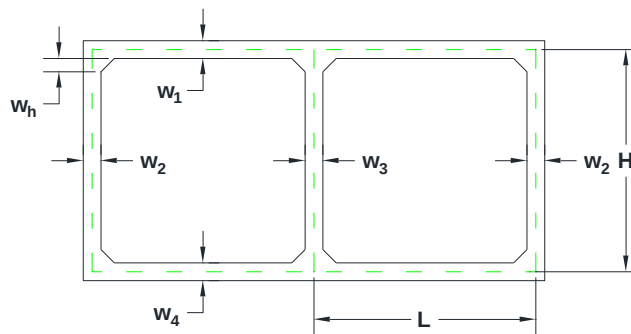
Data Umum Box Underpass Tunnel

Tabel 1. Data Umum Box Underpass Tunnel.

DIMENSI TEROWONGAN			
Lebar <i>box</i>	L=	5	m
Tinggi <i>box</i>	H=	5	m
Tebal pelat lantai atas	w_1 =	0,45	m
Tebal pelat dinding luar dan dalam	$w_2 = w_3$ =	0,45	m
Tebal pelat lantai bawah	w_4 =	0,45	m
Tebal pelat <i>haunch</i>	w_h =	0,2	m
DIMENSI LAINNYA			
Tebal pelat injak (<i>approach slab</i>)	t_s =	0,20	m
Tebal lapisan aspal	t_a =	0,05	m
Tebal genangan air hujan	t_h =	0,05	m
BAHAN STRUKTUR			
Kuat tekan beton	K- $f'_c=0,83 \times K/10 =$	300 24,90	MPa

Modulus elastik	$E_c = 4700 \times \sqrt{f'_c}$	23453	
Angka poisson	ν	0,2	
Modulus geser	$G = E_c / [2 \times (1 + \nu)]$	9772	
Koefisien muai panjang untuk beton,	α	1,0E-05	/°C
Mutu baja :			
Untuk baja tulangan dengan $\phi > 12$ mm	U-	41	
Tegangan leleh baja,		410	MPa
Untuk baja tulangan dengan $\phi \leq 12$ mm	U-	28	
Tegangan leleh baja,	$f_y = U \times 10$	280	MPa
SPECIFIC GRAVITY			
Berat beton bertulang	$w_c =$	24	kN/m ³
Berat beton tidak bertulang (beton rabat)	$w'_c =$	22	kN/m ³
Berat aspal padat	$w_a =$	22	kN/m ³
Berat jenis air	$w_w =$	10	kN/m ³
Berat tanah dipadatkan	$w_s =$	17	kN/m ³

Sumber: (PUPR Provinsi Kalimantan Tengah & PT. Gubahreka Consultant, 2021).



Gambar 3. Penampang Melintang Box Underpass Tunnel.

Pembebanan Box Underpass Tunnel

Berat Sendiri (MS)

Faktor beban ultimit : $K_{MS} = 1,3$

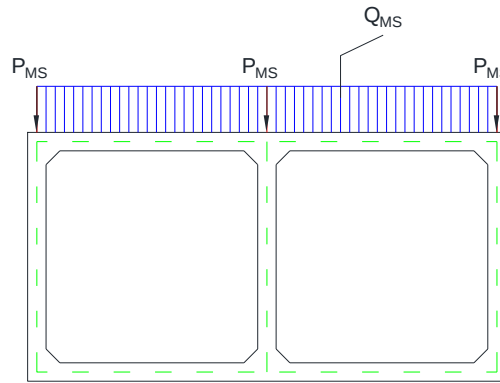
Berat sendiri (*self weight*) adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen non-struktural yang dipikulnya dan bersifat tetap. Berat sendiri *box culvert* dihitung dengan meninjau selebar 1 m (tegak lurus bidang gambar) sebagai berikut.

Berat sendiri pelat lantai atas

$$Q_{MS} = b \times w_1 \times w_c = 1 \text{ m} \times 0,45 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 10,8 \text{ kN/m}$$

Berat sendiri pelat dinding

$$P_{MS} = b \times H \times w_2 \times w_c = 1 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 0,45 \text{ m} \times 24 \text{ kN/m}^3 = 54 \text{ kN}$$



Gambar 4. Modelling Autocad akibat Berat Sendiri (MS).

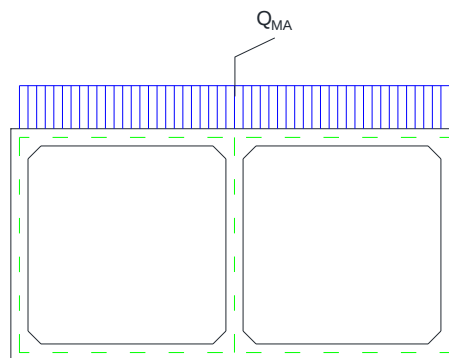
Beban Mati Tambahan (MA)

Faktor beban ultimit : $K_{MA} = 2,0$

Beban mati tambahan (*superimposed dead load*) adalah berat seluruh bahan yang menimbulkan suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non-struktural, dan mungkin besarnya berubah selama umur *underpass tunnel*. *Underpass tunnel* dianalisis harus mampu memikul beban seperti: (a) Penambahan aspal (*overlay*) di kemudian hari. (b) Genangan air hujan jika sistem drainase tidak bekerja dengan baik.

Tabel 2. Beban Mati Tambahan.

No.	Jenis	Tebal (m)	Berat (kN/m ³)	Beban (kN/m)
1	Lapisan Aspal	0.05	22	1.1
2	Air Hujan	0.05	10	0.5
			Q_{MA}	1.6



Gambar 5. Modelling Autocad akibat Beban Mati Tambahan (MA).

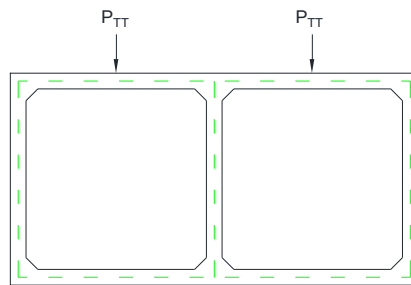
Beban Truk (TT)

Faktor beban ultimit : $K_{TT} = 1,8$

Beban hidup pada lantai jembatan berupa beban roda ganda oleh Truk (beban T) yang besarnya: $T=225 \text{ kN}$

Faktor beban dinamis untuk pembebanan truk diambil, $DLA=0,4$

Beban truk “T”: $P_{TT} = (1+DLA) \times T = 315 \text{ kN}$



Gambar 6. Modelling Autocad akibat Beban Truk (TT).

Beban Rem (TB)

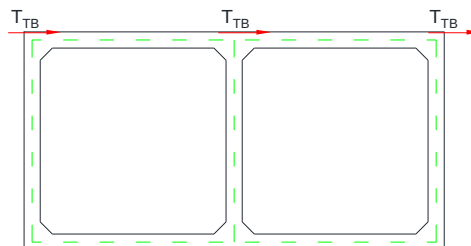
Faktor beban ultimit : $K_{TB} = 1,8$

Pengaruh percepatan dan pengereman lalu lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang jembatan dan dianggap bekerja pada permukaan lantai kendaraan.

Besar gaya rem diperhitungkan sebesar 5% dari beban “D” tanpa faktor beban dinamis.

Gaya rem per meter lebar, $T_{TB} = 5\% \times (q \times L + p) = 4,7 \text{ kN}$

$T_{TB} = 25\% \times T = 56,25 \text{ kN}$



Gambar 7. Modelling Autocad akibat Beban Rem (TB).

Tekanan Tanah (TA)

Pada bagian tanah dibelakang dinding *abutment* yang dibebani lalu lintas harus diperhitungkan adanya beban tambahan yang setara dengan tanah setebal 0,70 m yang berupa beban merata ekuivalen beban kendaraan pada bagian tersebut.

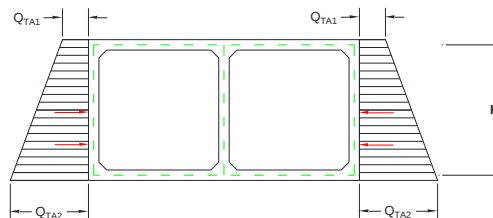
Diketahui:

- Faktor beban ultimit : $K_{TA} = 1,25$
- Tinggi (H) total = 5,45 m

- c. Berat isi tanah (w_s) = 17,2 kN/m³
- d. Sudut geser dalam tanah $\phi'_f = 35^\circ$
- e. Beban garis (*line load*) = $Q_{MS} + Q_{MA} = 10,8 + 1,6$
= 17,28 kN/m
- f. Surcharge seragam di permukaan (q) = $\frac{\text{Beban garis}}{\text{Lebar bidang distribusi}}$
 $q = \frac{17,28 \text{ kN/m}}{1 \text{ m}} = 17,28 \text{ kN/m}^2$
- g. Anggap kondisi *at-rest* (tidak bergerak)

Penyelesaian:

- a. Hitung k_0
 $k_0 = 1 - \sin \phi'_f = 1 - \sin 35^\circ = 1 - 0,57 = 0,43$
- b. Tekanan maksimum akibat berat isi
 $Q_{TA1} = 0,70 \text{ m} \times k_0 \times q = 0,70 \text{ m} \times 0,43 \times 17,28 \text{ kN/m}^2$
 $Q_{TA1} = 5,20 \text{ kN/m}$
- c. Tekanan tambahan dari surcharge (konstan)
 $Q_{TA2} = Q_{TA1} + (0,70 \text{ m} \times k_0 \times \gamma \times H)$
 $Q_{TA2} = 5,20 \text{ kN/m} + (0,70 \text{ m} \times 0,43 \times 17,2 \text{ kN/m}^3 \times 5,45 \text{ m})$
 $Q_{TA2} = 33,42 \text{ kN/m}$



Gambar 8. Modelling Autocad akibat Tekanan Tanah (TA).

Pengaruh Temperatur (ET)

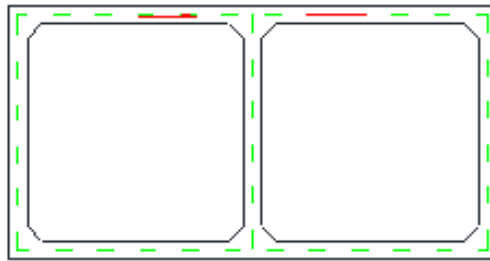
Faktor beban ultimit : $K_{ET} = 1,00$

Untuk memperhitungkan tegangan maupun deformasi struktur yang timbul akibat pengaruh temperatur, diambil perbedaan temperatur yang besarnya setengah dari selisih antara temperatur maksimum dan temperatur minimum rata-rata pada lantai jembatan.

Temperatur maksimum rata-rata	$T_{maks} = 40^\circ\text{C}$
Temperatur minimum rata-rata	$T_{min} = 15^\circ\text{C}$
Koefisien muai panjang untuk beton	$\alpha = 12 \times 10^{-6}^\circ\text{C}$
Modulus elastisitas beton	$E_c = 23453$

Perbedaan temperatur pada pzelat lantai $\Delta T = \frac{T_{\text{maks}} - T_{\text{min}}}{2} = 12,5^{\circ}\text{C}$

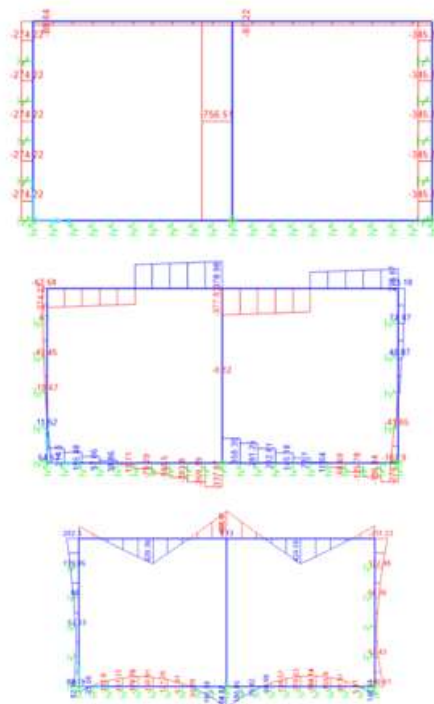
ΔT



Gambar 9. Modelling Autocad akibat Pengaruh Temperatur (ET).

Kombinasi Pembebanan

Kombinasi pembebanan terdiri dari Layan 1, Layan 2, Layan 3, Layan 4, Kuat 1, Kuat 2, Kuat 3, Kuat 4, Kuat 5, Ekstrim 1, dan Ekstrim 2. Diantara kombinasi pembebanan yang ada dipilih kombinasi Kuat 1 karena menghasilkan memiliki faktor ultimit yang besar serta momen lentur yang dihasilkan paling besar secara keseluruhan.



Gambar 10. Diagram Normal, Lintang, dan Momen Kombinasi Kuat 1.

Desain Penulangan

Penulangan Pelat Lantai Atas

$$M_{u \text{ maks}}^{-} = 465,9011 \text{ kN.m}$$

$$M_{u \text{ maks}}^{+} = 429,3894 \text{ kN.m}$$

Untuk penulangan lentur momen negatif:

Hitung A_s untuk $M_u = 465,9011 \text{ kN.m}$, $b = 1000 \text{ mm}$ dan

$$d = 390,5 \text{ mm}, R_u = \frac{M_u}{bd^2} = 3055 \text{ MPa}$$

Dari tabel Apendiks A, diperoleh $\rho_{\min} = 0,004 < \rho_{\max} = 0,01693$,
maka $\phi = 0,90$.

$$A_s = \rho b d = 0,010(1000)(390,5) = 3905 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 72,570 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 14D19 – 50 ($A_s = 3967,39 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(3967,39)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 76,86 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(3967,39)(410) \left(390,5 - \frac{76,86}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 515.418.830,0037 \text{ N.mm} = 515,419 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Untuk penulangan lentur momen positif:

Hitung A_s untuk $M_u = 429,3894 \text{ kN.m}$, $b = 1000 \text{ mm}$ dan

$$d = 390,5 \text{ mm}, R_u = \frac{M_u}{bd^2} = 2816 \text{ MPa}$$

Dari tabel Apendiks A, diperoleh $\rho_{\min} = 0,004 < \rho_{\max} = 0,01693$,
maka $\phi = 0,90$.

$$A_s = \rho b d = 0,010(1000)(390,5) = 3905 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 72,570 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 14D19 – 50 ($A_s = 3967,39 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(3967,39)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 76,86 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(3967,39)(410) \left(390,5 - \frac{76,86}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 515.418.830,0037 \text{ N.mm} = 515,419 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Hitung kebutuhan tulangan susut dan suhu, untuk $f_y = 410$ Mpa maka

$$A_{sh} = 0,0020(1000)(450) = 900 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan D13 ($A_b = 132,665 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 147,405 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 7D13 – 100 ($A_s = 928,655 \text{ mm}^2$)

Penulangan Dinding

$$V_{u \text{ maks}}^- = 107,897 \text{ kN}$$

$$M_{u \text{ maks}}^- = 211,2327 \text{ kN.m}$$

$$M_{u \text{ maks}}^+ = 202,2967 \text{ kN.m}$$

Pemeriksaan terhadap geser. Pelat atas memiliki ketebalan 450 mm. Maka:

$$d = 450 - 50 \text{ (selimut beton)} - \frac{1}{2} \cdot 19 \text{ (diameter tulangan)}$$

$$d = 390,5 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm sehingga}$$

$$\begin{aligned} \phi V_c &= \phi(0,17\lambda\sqrt{f'_c}bd) = 0,75(0,17)(1)(\sqrt{24,9})(1000)(390,5) \\ &= 248.445 \text{ N} = 248,445 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$V_{u \text{ maks}}^- = 107,897 \text{ kN} < \phi V_c, \text{ sehingga tidak dipasang tulangan geser.}$$

Untuk penulangan lentur momen negatif:

$$M_u = 211,2327 \text{ kN.m}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{211,2327 \times 10^6}{0,9 \times 1000 \times 390,5^2} = 1,53913$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85f'_c}} \right]$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85(24,9)}{410} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2(1,53913)}{0,85(24,9)}} \right] = 0,00390$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho b d = 0,00390(1000)(390,5) = 1522,95 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \frac{1,4}{f_y} b d = \frac{1,4}{410} (1000)(390,5) = 1333,42 \text{ mm}^2$$

$$\text{atau} = 0,0015bh = 0,0015(1000)(450) = 675 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 186,08 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 6D19 – 150 ($A_s = 1700,31 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(1700,31)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 32,94 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(1700,31)(410) \left(390,5 - \frac{32,94}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 234.671.804,2917 \text{ N.mm} = 234,672 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Untuk penulangan lentur momen positif:

$$M_u = 202,2967 \text{ kN.m}$$

$$R_n = \frac{M_u}{\phi b d^2} = \frac{202,2967 \times 10^6}{0,9 \times 1000 \times 390,5^2} = 1,47402$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85 f'_c}{f_y} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 R_n}{0,85 f'_c}} \right]$$

$$\rho_{\text{perlu}} = \frac{0,85(24,9)}{410} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2(1,47402)}{0,85(24,9)}} \right] = 0,00373$$

$$A_{s \text{ perlu}} = \rho b d = 0,00373(1000)(390,5) = 1465,565 \text{ mm}^2$$

$$A_{s \text{ min}} = \frac{1,4}{f_y} b d = \frac{1,4}{410} (1000)(390,5) = 1333,42 \text{ mm}^2$$

$$\text{atau} = 0,0015 b h = 0,0015(1000)(450) = 675 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000 A_b}{A_s} = 193,362 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 6D19 – 150 ($A_s = 1700,31 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(1700,31)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 32,94 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(1700,31)(410) \left(390,5 - \frac{32,94}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 234.671.804,2917 \text{ N.mm} = 234,672 \text{ kN.m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Tulangan memanjang dalam arah horizontal dapat diberikan berdasarkan kebutuhan rasio minimum tulangan sebesar 0,0020. Sehingga $A_s = 0,0020(1000)(450) = 900 \text{ mm}^2$

Dipasang 7D13 – 100 di kedua sisi dinding *underpass tunnel*.

Penulangan Pelat Pondasi

Dihitung daya dukung berdasarkan uji N-SPT

Dimensi tiang (D) = 45 cm

Panjang tiang (L) = 16 m

Luas ujung tiang (A_p) = $D^2 = 2,18 \text{ ft}^2$

Luas selimut (A_s) = $4 \times D \times L = 116,5352 \text{ ft}^2$

Mutu bahan (f'_c) = $D^2 = 253,91 \text{ kg/cm}^2$

Berat tiang (G) = $\left(\frac{45}{100}\right)^2 \times 16 \times 2,4 = 7,78 \text{ ton}$

Pengaruh ujung tiang, diasumsikan:

atas 8D $\longrightarrow$ 360 cm = 3,6 m $\longrightarrow$ elevasi: $L - 3,6 = 12,4 \text{ m}$

bawah 4D $\longrightarrow$ 180 cm = 1,8 m $\longrightarrow$ elevasi: $L + 1,8 = 17,8 \text{ m}$

Propertis Tanah

Tabel 3. Propertis Tanah.

Kedalaman (m)	N-SPT
2	6
4	12
8	12
9	7
10	9
12	9
14	15
16	15
18	16

Tahanan Ujung Tiang (Q_p)

$$Q_{p\text{tiang}} = 4 \times A_p \times N_p$$

Dimana: $Q_{p\text{tiang}}$ = Daya dukung ujung tiang (ton)

$A_{p\text{tiang}}$ = Luas penampang ujung tiang pancang (ft^2)

N_p = Nilai N – SPT di sekitar ujung tiang

N – SPT di sekitar ujung tiang (N_p) = 8D = 9

N – SPT lokasi ujung tiang = 4D = 16

$N_{\text{prata-rata}} = 13,3$

$$Q_p = 4 \times 2,18 \times 13,3 = 115,976 \text{ ton}$$

Tahanan Selimut Tiang (Q_s)

Tiang pancang beton bertulang pejal $\longrightarrow$ Tiang perpindahan besar

$$Q_{s\text{ tiang}} = \frac{A_{s\text{ tiang}} \times \bar{N}}{50}$$

N-SPT rata-rata sepanjang tiang $\bar{N} = 10,625$

$$Q_s = 24,76 \text{ ton}$$

Kekuatan Bahan Tiang (P_{tiang})

Tegangan izin beton (σ) $\rightarrow 0,25 - 0,33 f'_c$, diambil $= 0,25$

$$= 0,25 \times 253,91 = 63,48 \text{ kg/cm}^2$$

$$P_{\text{tiang}} = 63,48 \times 45^2 = 128547 \text{ kg} = 128,6 \text{ ton}$$

Daya Dukung Ultimate dan Allowable (Izin)

$$Q_{U \text{ tiang}} = Q_{P \text{ tiang}} + Q_{S \text{ tiang}}$$

$$Q_{\text{all}} = \frac{Q_U}{SF}$$

SF = angka keamanan (2,5 – 4) diambil SF = 3

$$Q_{U \text{ tiang}} = 115,976 + 24,76 = 140,736 \text{ ton} = 1380,15 \text{ kN}$$

$$Q_{\text{all}} = 46,912 \text{ ton}$$

Ditinjau pelat selebar $b = 1 \text{ m}$

Gaya reaksi satu dinding, $P_1 = 825,143 \text{ kN}$

Beban ultimit pada tanah dasar, $P_u = 3 \times P_1 = 2475,429 \text{ kN}$

Panjang pelat dasar, $L = 5 \text{ m}$

Tegangan ultimit pada dasar pondasi $Q_u = P_u / (b \times L) = 495,0858 \text{ kN/m}^2$ ($Q_u <$

$Q_{U \text{ tiang}}$ OK!)

Didapatkan gaya geser maksimum serta momen maksimum

$$M_{u \text{ maks}}^- = 184,1431 \text{ kN.m}$$

$$M_{u \text{ maks}}^+ = 355,2259 \text{ kN.m}$$

Pelat bawah memiliki ketebalan 450 mm. Maka:

$$d = 450 - 50 \text{ (selimut beton)} - \frac{1}{2} \cdot 19 \text{ (diameter tulangan)}$$

$$d = 390,5 \text{ mm}$$

Untuk penulangan lentur momen negatif:

Hitung A_s untuk $M_u = 184,1431 \text{ kN.m}$, $b = 1000 \text{ mm}$ dan

$$d = 390,5 \text{ mm}, R_u = \frac{M_u}{bd^2} = 1208 \text{ MPa}$$

Dari tabel Apendiks A, diperoleh $\rho_{\min} = 0,004 < \rho_{\text{maks}} = 0,01693$,

maka $\phi = 0,90$.

$$A_s = \rho b d = 0,010(1000)(390,5) = 3905 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 72,570 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 14D19 – 50 ($A_s = 3967,39 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(3967,39)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 76,86 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(3967,39)(410) \left(390,5 - \frac{76,86}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 515.418.830,0037 \text{ N. mm} = 515,419 \text{ kN. m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Untuk penulangan lentur momen positif:

Hitung A_s untuk $M_u = 355,2259 \text{ kN.m}$, $b = 1000 \text{ mm}$ dan

$$d = 390,5 \text{ mm}, R_u = \frac{M_u}{bd^2} = 2321 \text{ MPa}$$

Dari tabel Apendiks A, diperoleh $\rho_{\min} = 0,004 < \rho_{\max} = 0,01693$,
maka $\phi = 0,90$.

$$A_s = \rho b d = 0,010(1000)(390,5) = 3905 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan lentur D19 ($A_b = 283,385 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 72,570 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 14D19 – 50 ($A_s = 3967,39 \text{ mm}^2$)

Periksa kuat momen rencana sesuai tulangan terpasang:

$$a = \frac{A_s f_y}{0,85 f'_c b} = \frac{(3967,39)(410)}{0,85(24,9)(1000)} = 76,86 \text{ mm}$$

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) = 0,90(3967,39)(410) \left(390,5 - \frac{76,86}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 515.418.830,0037 \text{ N. mm} = 515,419 \text{ kN. m}$$

$$\phi M_n > M_u \text{ (OK)}$$

Hitung kebutuhan tulangan susut dan suhu, untuk $f_y = 410 \text{ Mpa}$ maka

$$A_{sh} = 0,0020(1000)(450) = 900 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan D13 ($A_b = 132,665 \text{ mm}^2$), dengan

$$s = \frac{1000A_b}{A_s} = 147,405 \text{ mm}$$

Dipasang tulangan 7D13 – 100 ($A_s = 928,655 \text{ mm}^2$)



Gambar 11. Tahanan Ujung Tiang.

Pembahasan

Underpass tunnel direncanakan memiliki lebar *box* sebesar 5 (lima) meter, tinggi *box* sebesar 5 (lima) meter, serta tebal pelat atas, pelat dinding, dan pelat pondasi sebesar 45 (empat puluh lima) cm. Adapun pada bagian sudut pertemuan antara pelat dan dinding terdapat haunch yang berfungsi untuk memperkuat struktur dan menyalurkan beban dari tanah di atasnya ke bagian *underpass tunnel*. Selain itu, panjang bentang *underpass tunnel* didesain sebesar 45 (empat puluh lima) meter. Sebenarnya tidak ada aturan mengenai panjang bentang bagi terowongan pejalan kaki, namun mengacu pada Kriteria Desain Dan Spesifikasi Teknis Jembatan Gantung Pejalan Kaki Tipe *Rigid* Bentang 40-120 m Tahun Anggaran 2021, dikatakan panjang bentang minimum untuk sebuah jembatan gantung pejalan kaki adalah 40 meter, jadi 45 meter memenuhi kriteria tersebut.

Analisa struktur yang dihitung pada *underpass tunnel* menggunakan kombinasi pembebanan Kuat 1. Artinya kombinasi pembebanan memperhitungkan gaya-gaya yang timbul pada *underpass tunnel* dalam keadaan normal tanpa memperhitungkan beban angin. Pada keadaan batas ini, semua gaya nominal yang terjadi dikalikan dengan faktor beban yang sesuai. Beban angin tidak perlu diperhitungkan karena *underpass tunnel* merupakan struktur tertutup dibawah tanah yang tidak mengalami paparan angin kencang selama masa pakainya. Selain itu, pada kombinasi pembebanan Kuat 1 ini terdapat momen lentur dengan nilai yang cukup besar dibandingkan dengan kombinasi pembebanan lainnya. Keterangan : warna kuning merupakan momen terbesar di tiap-tiap elemen struktur *underpass tunnel*

Elemen Struktur	Momen Ultimit										
	Kombinasi Pembebanan										
	Layan 1	Layan 2	Layan 3	Layan 4	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1	Ekstrim 2
Dinding Luar Kiri	102.263	130.404	62.9078	9.0286	202.297	164.776	33.6444	33.6444	33.6444	61.6617	61.6617
Dinding Dalam	4.6859	2.0669	6.4319	13.4158	1.7267	5.2187	17.4406	17.4406	17.4406	14.8216	14.8216
Dinding Luar Kanan	-103.72	-136.09	-99.386	-55.323	-211.23	-168.07	-95.664	-95.664	-95.664	-103.14	-103.14
Pelat Atas Kiri	-273.81	-343.92	-217.84	-40.113	-464.17	-370.7	-43.519	-43.519	-43.519	-113.641	-113.641
Pelat Atas Kanan	-278.5	-345.99	-224.27	-53.528	-465.9	-375.91	-60.959	-60.959	-60.959	-128.463	-128.463
Pelat Bawah Kiri	209.229	262.625	165.664	31.2396	354.118	282.923	33.738	33.738	33.738	87.0925	87.0925
Pelat Bawah Kanan	206.818	262.76	161.556	55.3227	355.226	280.637	95.6637	95.6637	95.6637	103.14	103.1395

Gambar 12. Momen Maksimum dalam Kombinasi Pembebanan.

Keterangan : warna kuning merupakan momen terbesar di tiap-tiap elemen struktur *underpass tunnel*

Struktur pelat lantai atas, pelat dinding, dan pelat pondasi dinyatakan aman karena kuat momen rencana (ϕM_n) lebih besar daripada momen terfaktor eksternal (M_u). Tulangan yang digunakan adalah tulangan ulir karena memiliki daya cengkeram yang lebih kuat pada beton dan tingkat ketahanan tarik yang lebih tinggi. Pada elemen struktur *underpass tunnel*, dipasang tulangan lentur D19 serta tulangan susut dan suhu D13. Diameter tulangan utama tersebut ideal karena tidak terlalu besar dan tidak terlalu kecil. Jika diameter tulangan terlalu besar, dapat terjadi kesulitan saat pengecoran beton karena ruang antar tulangan menjadi terlalu sempit, sehingga beton sulit mengisi celah dan menyebabkan beton keropos (honeycomb) dan tidak merata. Selain itu, penggunaan tulangan berlebih juga tidak ekonomis dan bisa menyebabkan kegagalan beton yang getas (brutal) alih-alih daktil (menunjukkan deformasi), sehingga tidak memberikan peringatan yang cukup sebelum ambruk.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Desain *underpass tunnel* menggunakan metode kekuatan batas (*Ultimate Design*) pada bagian perhitungan kombinasi pembebanan Kuat 1. Pada pelat lantai atas, daya dukung struktur daerah positif dikatakan aman ($\phi M_n = 515,419 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^+ = 429,3894 \text{ kN.m}$) dan di daerah negatif juga memenuhi persyaratan struktur ($\phi M_n = 515,419 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^- = 465,9011 \text{ kN.m}$). Pada pelat dinding, kapasitas momen daerah positif dikatakan aman ($\phi M_n = 234,672 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^+ = 202,2967 \text{ kN.m}$), di daerah negatif dikatakan aman ($\phi M_n = 234,672 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^- = 211,2327 \text{ kN.m}$), dan kapasitas geser juga memenuhi persyaratan struktur ($\phi V_c = 248,445 \text{ N} > V_{u \text{ maks}}^- = 107,897 \text{ kN.m}$). Pada pelat lantai pondasi, daya dukung struktur daerah positif dikatakan aman ($\phi M_n = 515,419 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^+ = 355,2259 \text{ kN.m}$) dan di daerah negatif juga memenuhi persyaratan struktur ($\phi M_n = 515,419 \text{ kN.m} > M_{u \text{ maks}}^- = 184,1431 \text{ kN.m}$).

Melalui hasil analisis di *software* SAP2000 didapatkan gaya-gaya dalam pada struktur *underpass tunnel*. Pada pelat lantai atas sebesar $M_{u \text{ maks}}^- = 484,914 \text{ kN.m}$ dan $M_{u \text{ maks}}^+ = 420,7402 \text{ kN.m}$, pelat dinding sebesar $V_{u \text{ maks}} = 97,296 \text{ kN}$, $M_{u \text{ maks}}^- = 234,137 \text{ kN.m}$, dan $M_{u \text{ maks}}^+ = 32,4855 \text{ kN.m}$, serta pelat pondasi sebesar $V_{u \text{ maks}} = 10,769 \text{ kN}$, $M_{u \text{ maks}}^- = 32,4855 \text{ kN.m}$, dan $M_{u \text{ maks}}^+ = 21,3584 \text{ kN.m}$.

Pelat lantai atas dan pelat pondasi didesain dengan desain pelat satu arah, sedangkan pelat dinding didesain dengan desain dinding *basement*. Desain dilakukan dengan asumsi lebar 1 meter. Pada tulangan primer pelat lantai atas didapatkan $\rho = 0,010$ dan $A_s = 3905 \text{ mm}^2$ sehingga dipasang tulangan D19-50, pada tulangan primer pelat dinding didapatkan $\rho = 0,00434$ dan $A_s = 1694,77 \text{ mm}^2$ sehingga dipasang tulangan D19-150, serta pada tulangan primer pelat lantai pondasi didapatkan $\rho = 0,010$ dan $A_s = 3905 \text{ mm}^2$ sehingga dipasang tulangan D19-50. Adapun untuk seluruh elemen struktur *underpass tunnel* didapatkan tulangan sekunder dengan $A_s = 900 \text{ mm}^2$ sehingga dipasang tulangan D13-100.

Hasil perhitungan setiap elemen struktur *underpass tunnel* digunakan untuk membuat produk gambar kerja berupa potongan melintang *box underpass tunnel*. Gambar dibuat menggunakan *software* AutoCAD 2025.

Saran

Struktur *underpass tunnel* sebaiknya menggunakan bentuk penampang persegi/persegi panjang (*rectangular/box*). Hal ini dikarenakan *underpass tunnel* dengan bentuk persegi paling mudah dibuat dengan metode *box culvert* atau *box jacking*, ruang dalam maksimal, mudah dipasang pencahayaan, ventilasi, dan utilitas, serta mudah diintegrasikan dengan trotoar atau jalur sepeda. Di bagian sudut-sudut *underpass tunnel* sebaiknya dipasang pelat *haunch* untuk menopang bagian tersebut dimana merupakan titik lemah terhadap tekanan tanah. Sebaiknya pada elemen struktur *underpass tunnel* digunakan tulangan ulir karena memiliki daya cengkram yang lebih kuat pada beton dan tingkat ketahanan tarik yang lebih tinggi.

Diameter tulangan utama dan tulangan sekunder harus ideal, apabila diameter tulangan terlalu besar dapat terjadi kesulitan saat pengecoran beton karena ruang antar tulangan menjadi terlalu sempit sedangkan apabila diameter tulangan terlalu kecil akan menghasilkan jarak antar tulangan (s) yang terlalu rapat sehingga menjadi tidak ekonomis dan bisa menyebabkan kegagalan beton yang getas.

DAFTAR REFERENSI

- AARoads. (2017, March 28). *Interstate 70 East – Glenwood Canyon*.
- Agus Setiawan. (2016). *Perancangan struktur beton bertulang*.
- Akers, M. (2020, September 28). *Nevada's 2nd-longest bridge opens to traffic in northwest Las Vegas*. Las Vegas Review-Journal.
- Ali Mahdi Mohammed, Ahmed Nafie Mohammed, Mohammed Abd Al-Amir Hussain, & Mutas Nather Majid. (2018). *Design of a box culvert*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16490.47041>

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2010). *Technical manual for design and construction of road tunnels Civil elements*. AASHTO.
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *SNI 1725:2016 Pembebanan untuk jembatan*. Badan Standardisasi Nasional.
- CSI America. (2025, February 24). *SAP2000 structural analysis and design*.
- Das, B. M. (2016). *Principles of foundation engineering*. Cengage Learning.
- Fathurahman. (2024, April 24). *Nama Bundaran Besar Palangkaraya diumumkan saat peresmian bersamaan HUT ke-67 Kalteng*. Tribun Kalteng.
- Hetenyi, M. (1946). *Beams on elastic foundation*. University of Michigan Press.
- Lesmana, M. O. (2023). *Analisis perhitungan struktur pada box culvert jalan kereta api (Studi kasus BH 41 lintas Medan–Binjai)*.
- Nurdiana, A., Susanti, R., Nurhdyatulloh, & Rifqi Naufaldy, M. (2021). Perencanaan Jembatan Mlulon dengan box culvert. *Journal of Civil Engineering Project*, 4(1). <https://doi.org/10.14710/potensi.2021.10788>
- Pangkan, B. (2022, January 11). *Alokasi APBD Rp125 miliar renovasi Bundaran Besar Palangkaraya, ini yang akan dibangun*. Tribun Kalteng. <https://kalteng.tribunnews.com/2022/01/11/alokasi-apbd-rp125-miliar-renovasi-bundaran-besar-palangkaraya-ini-yang-akan-dibangun>
- Pemerintah Provinsi Kalimantan Tengah, Dinas PUPR, & PT Gubahreka Consultant. (2021). *Data struktur underpass tunnel*.
- Prasetyo, S. D., & Sulardi. (2017). Perancangan box underpass dengan menggunakan metode kekuatan batas (*ultimate design*).
- Sri Muliati. (2021). *Perencanaan jembatan tipe model box culvert bentangan 6 m, Desa Podi, Kecamatan Tojo, Kabupaten Tojo Una-Una*.
- Szechy, K. (1966). *The art of tunnelling*.
- Tim Penyusun Buku Panduan Skripsi Sipil UPR. (2024). *Buku panduan skripsi Sipil UPR 2024*.
- Wood, M., Curtis, D. J., & Muir, C. (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Géotechnique*, 25(1), 115–131. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.1.115>