



Analisis Kestabilan *Box Tunnels* Pada Aliran Sungai Araren Likupang

Angeline P. Matantu^{#a}, Roski. R. I. Legrans^{#b}, Agnes T. Mandagi^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^apatriciamatantu1212@gmail.com, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^catmandagi@gmail.com

Abstrak

Pembangunan *box tunnels* yang berada pada aliran Sungai Araren Likupang yang terletak di dalam kawasan penambangan emas di Kabupaten Minahasa Utara, memerlukan adanya suatu analisis geoteknik terhadap kestabilan dinding tanah galian dan daya dukung tanah dasar, serta analisis kekuatan *box tunnels* sendiri. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian geoteknik terhadap penggunaan *box tunnels*, yang meliputi kestabilan galian tanah pada lokasi konstruksi, daya dukung tanah dasar dan deformasi tanah dasar. Perangkat lunak PLAXIS 2D digunakan sebagai alat bantu dalam melakukan analisis. Data yang digunakan dalam analisis adalah data sekunder berupa lebar sungai Araren di lokasi konstruksi, tinggi air rata-rata sungai Araren di lokasi konstruksi serta data parameter batuan hasil penyelidikan laboratorium. Parameter tanah yang digunakan dalam analisis adalah hasil konversi kuat geser batuan Generalized Hoek-Brown ke parameter kuat geser Mohr-Coulomb. Hasil analisis menunjukkan bahwa galian tanah pada setinggi 7.3 m untuk menempatkan *box tunnels* dalam keadaan stabil ($H_{maks} = 9.6$ m). Untuk menganalisis daya dukung tanah dasar, beban kendaraan Volvo ADT 35G digunakan sebagai beban eksternal, dimana beban tersebut diaplikasikan dengan skenario pembebanan berdasarkan pergerakan kendaraan tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor keamanan terkecil dari skenario pembebanan terbesar adalah 1.01. Sedangkan deformasi yang terjadi pada *box tunnels* adalah 78 mm, dan tekanan tanah aktif terhadap konstruksi *box tunnels* adalah 67.81 kN/m.

Kata kunci: Sungai Araren, *box tunnels*, kestabilan dinding galian, faktor keamanan, deformasi

1. Pendahuluan

Box tunnel adalah struktur bawah tanah berbentuk kotak yang digunakan untuk berbagai keperluan seperti jalan bawah tanah, saluran drainase, atau jalur kereta api. Konstruksi *box tunnel* biasanya dilakukan dengan metode jacked box tunnel, di mana segmen beton precast didorong ke dalam tanah menggunakan sistem hidrolik.

Box tunnels yang direncanakan dibangun pada perlintasan Sungai Araren adalah alternatif konstruksi selain CWP (*Corrugated Water Pipe*) yang saat ini digunakan dalam kawasan penambangan emas di Kabupaten Minahasa Utara. Untuk memastikan penempatan *box tunnels* tersebut memenuhi persyaratan kestabilan di lokasi konstruksi, maka dilakukan analisis geoteknik yang meliputi kestabilan dinding tanah galian, daya dukung tanah dasar dan deformasi tanah dasar.

2. Landasan Teori

Jacked box tunnels adalah teknik konstruksi yang melibatkan pemasangan *box tunnels* secara horizontal ke dalam tanah dengan menggunakan sistem hidrolik. Metode ini cocok untuk lokasi dengan ruang terbatas atau kondisi tanah yang tidak stabil. Proses ini dimulai dengan pembuatan *shaft* (lubang vertikal) di kedua ujung lokasi konstruksi, yang digunakan sebagai titik awal dan akhir pemasangan *box tunnels* (Chapman et al., 2017). *Box tunnels* kemudian didorong secara bertahap menggunakan sistem hidrolik, sementara tanah di depannya digali menggunakan mesin bor atau alat berat khusus. Proses ini memerlukan pemantauan terus-menerus untuk

memastikan bahwa *box tunnels* bergerak lurus dan tidak mengalami deformasi (Megaw & Bartlett, 2019). Analisis kestabilan *box tunnels* dilakukan dengan rangkaian perhitungan sebagai berikut:

1. Perhitungan dinding tanah galian: $H = \frac{2c'}{y \sin \beta \cos \beta} \left[\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{y_s}{y}\right)x^2\right)} \right];$
2. Perhitungan faktor keamanan terhadap daya dukun tanah dasar: $FK_u = \frac{q_{ult}}{P_{max}}$, q_{ult} menggunakan persamaan $q_{ult} = C'N'$ dengan beban maksimum pada kondisi $P_{max} = \gamma_m H + q;$
3. Perhitungan deformasi *box tunnel*: $\delta t = \frac{q.R^4}{E.I};$
4. Perhitungan tegangan tanah aktif menggunakan metode Rankine (1857): $P_a = \frac{1}{2} K_a \cdot \gamma \cdot H^2 - 2c\sqrt{K_a} \cdot H$

3. Metode Penelitian

Penelitian dilakukan melalui studi literatur yakni mempelajari tentang konstruksi terowongan khususnya *box tunnel* serta analisis kestabilannya. Tahap analisis diawali dengan pengumpulan data, yakni data sekunder berupa data hasil penyelidikan batuan laboratorium, peta aliran sungai Araren dan potongan melintang sungai Araren pada lokasi *box tunnel*. Parameter kuat geser tanah yang digunakan dalam analisis adalah hasil konversi parameter kuat geser batuan dari *generalized* Hoek-Brown ke Mohr Coulumb. Analisis dilakukan dengan metode empiris serta metode numerik dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D.



Gambar 1. Lokasi Box Tunnels
(Sumber: Google Earth 1°33'38"N 125°06'42")

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Parameter Kuat Geser Tanah

Parameter kuat geser Mohr-Coulomb untuk lapisan batuan yang digunakan dalam analisis diperoleh melalui konversi dari parameter kuat geser Generalized Hoek-Brown. Jenis tanah/batuan di lokasi konstruksi adalah SLS-COX (tanah pasir bercampur yang teroksidasi sempurna) dan VBA-COX (batuan basalt yang teroksidasi sebagian).

Tabel 1. Data Parameter Kuat Geser Hasil Uji Laboratorium

Rock-mass Unit	Weathering	Unit Weight (kN/m³)	Mohr-Coulomb Parameters		Hoek-Brown Parameters								
			c (kPa)	ϕ (°)	m _i	UCS (MPa)				GSI			
						Mean	St. Dev	Min	Max	Mean	St. Dev	Min	Max
SLS	COX	19*	19*	35*					-				
RTM	COX	18.3	-		17	3.0	2.3	0.7	5.3	28	2	26	33
RTC	COX	19.1	-		21	5.0	2.2	2.8	7.2	30	4	26	34
	POX	22.7	-		21	37.5	19.9	17.6	57.4	54	7	47	61
VAF	COX	21	-		21	8.1	6.6	1.5	14.7	34	9	25	51
	POX	23.7	-		21	37.5	19.1	18.4	56.6	50	8	42	58
VBA	COX	20.2	-		25	7.2	6.5	0.7	13.7	33	9	24	51
	POX	23.6	-		25	44.3	19.9	24.4	64.2	46	7	39	53
VPF	All	No Data in 2018 or previous studies. RTC properties for pyroclastic flow deposit used for VPF also											
Veins	All	23.3	-		19	24.7	17.4	7.3	42.1	36	11	14	50
Fault	All	26.5 ^λ	118 ^λ	24 ^λ					-				

Parameter kuat geser pada Tabel 1 yang dikonversi dari *Generalized Hoek-Brown* ke Mohr Coulomb yakni VBA-POX.

Tabel 2. Parameter Kuat Geser Mohr-Coulomb VBA-POX (konversi dari Generalized Hoek-Brown)

DATA	VALUE	UNIT
y	23.60	kN/m ³
φ'	36.10	deg
c'	18.18	kPa

4.2. Analisis Dinding Tanah Galian

Buddhima Indraratna dkk dalam *Geotechnical Problems and Solutions* memberikan solusi empiris untuk menghitung tinggi dinding tanah galian untuk *box tunnel* dimana sudut kemiringan galian mendekati longsor adalah 90° menghasilkan tinggi dinding maksimum, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$H = \frac{2c'}{y \sin \beta \cos \beta}$$

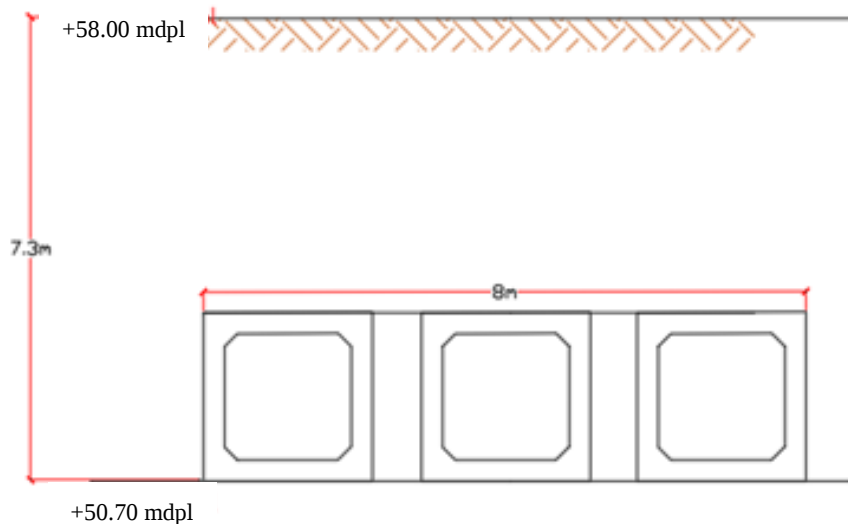
Dengan memperhatikan keseimbangan gaya pada arah vertikal dan horizontal, maka:

$$H = \frac{2c'}{y \sin \beta \cos \beta} \left[\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{y_s}{y}\right)x^2\right)} \right]$$

Dengan mengasumsikan kondisi *near-failure* $\beta = 90^\circ$, maka

$$H = \frac{2 \times 5,282}{19 \sin 90^\circ \cos 90^\circ} \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{11.5}{19}\right)(0.3)^2} \right] = 9,07 \times 1,05 = 9,59 \text{ m}$$

Sehingga tinggi dinding galian maksimum adalah 9,6 m.



Gambar 2. Rencana Penempatan Box Tunnels

Box tunnels yang digunakan berukuran 200x200x100 cm, dengan jarak antar *box tunnels* 1 m. Penempatan *box tunnels* adalah pada elevasi 50.70 mdpl dan berada pada jarak 7.3 m dari permukaan sehingga membutuhkan pekerjaan galian. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tinggi galian yang diizinkan adalah 9.6 m. Dengan demikian dinding tanah galian setinggi 7.3 m untuk menempatkan *box tunnels* dalam kondisi stabil.

4.3. Analisis Daya Dukung Tanah

Daya dukung tanah dasar dianalisis akibat beban konstruksi *box tunnels*, beban timbunan di atas *box tunnels* dan beban eksternal akibat pergerakan kendaraan Volvo ADT 35G. Pergerakan kendaraan tersebut ditampilkan melalui skenario beban gardan dimana terdapat 10 (sepuluh) skenario beban yang disebabkan oleh pertemuan roda kendaraan pada jalur kiri dan roda kendaraan pada jalur kanan. Hasil survey lokasi penelitian menunjukkan bahwa pada perlintasan tersebut hanya memungkinkan dilewati 2 (dua) unit Volvo ADT 35G, yakni masing-masing pada jalur kiri dan jalur kanan.

Asumsi beban gardan adalah berdasarkan spesifikasi kendaraan Volvo ADT 35G, yakni gardan depan memikul 30-40% dari total berat, dan gardan belakang (dua gardan) memikul 60-70% dari total berat, yang dibagi rata pada masing-masing gardan belakang. Berikut perhitungan beban gardan:

Berat kosong : 28.950 kg = 289,5 kN

Berat total dengan muatan penuh : 63.800 kg = 625,66 kN

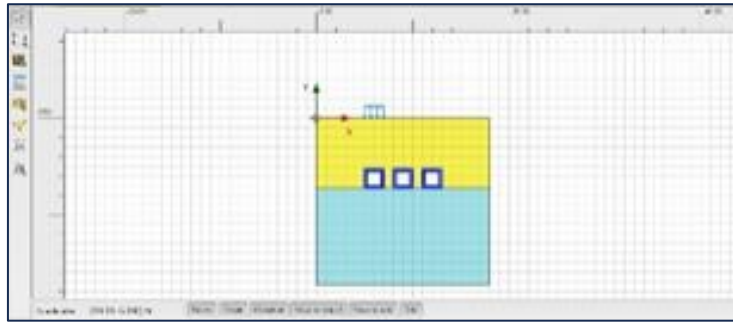
Maka Beban per gardan untuk Volvo ADT 35G adalah sebagai berikut

1. Gardan Depan (30-40%):
Beban depan = $0,35 \times 625,66 = 218,981$ kN

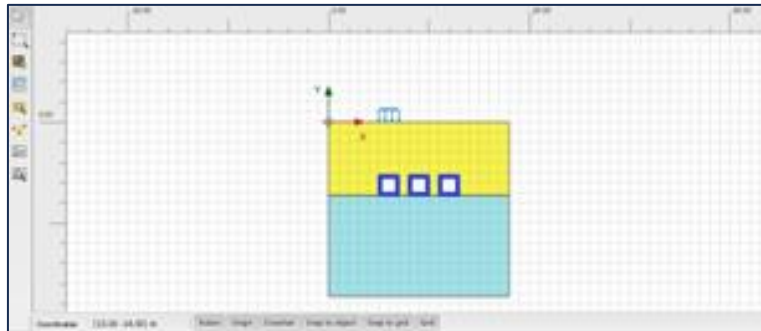
2. Gardan Belakang (60-70%):
Beban belakang total: $0,65 \times 625,66 = 406,679$ kN

Distribusi beban gardan pada 10 skenario beban (A1-C10), yang dianalisis menggunakan PLAXIS 2D dengan terdiri atas fase-fase sebagai berikut:

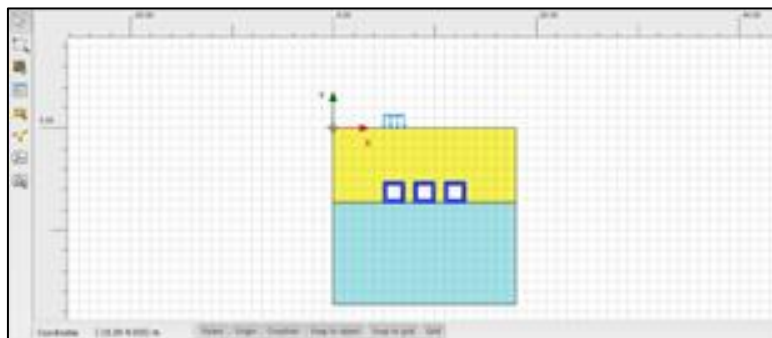
- Initial phase: mengaktifkan lapisan VBA-POX (H = 10 m)
- Fase 1: mengaktifkan box tunnels
- Fase 2: mengaktifkan lapisan SLS-COX (H = 7,3 m)
- Fase 3: mengaktifkan beban eksternal (berdasarkan skenario)
- Fase 4: menghitung faktor keamanan



Gambar 3. Pemodelan Box Tunnels pada PLAXIS 2D dengan Skenario A1 (Roda Belakang Volvo ADT 35G pada Jalur Kanan berpapasan dengan Roda Depan Volvo ADT 35G pada Jalur Kiri di atas Box Tunnels A)



Gambar 4. Pemodelan Box Tunnels pada PLAXIS 2D dengan Skenario A2 (Roda Belakang Volvo ADT 35G pada Jalur Kanan berpapasan dengan Roda Belakang Volvo ADT 35G pada Jalur Kiri di atas Box Tunnels A)



Gambar 5. Pemodelan Box Tunnels pada PLAXIS 2D dengan Skenario A3 (Roda Belakang Volvo ADT 35G pada Jalur Kanan berpapasan dengan Roda Belakang Volvo ADT 35G pada Jalur Kiri di atas Box Tunnels A)

Tabel 3. Hasil Perhitungan Beban Per-Gardan

Box tunnels	Jalur	Pemodelan									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	Kanan	406.68	218.98	406.68	-	-	-	-	-	-	218.98
	Kiri	218.98	218.98	406.68	-	-	-	-	-	-	406.68
B	Kanan	-	-	-	406.68	218.98	406.68	-	-	-	-
	Kiri	-	-	-	218.98	218.98	406.68	-	-	-	-
C	Kanan	-	-	-	-	-	-	406.68	218.98	406.68	406.68
	Kiri	-	-	-	-	-	-	218.98	218.98	406.68	218.98
JUMLAH BEBAN (kN)		625.66	437.96	813.36	625.66	437.96	813.36	625.66	437.96	813.36	1,251.32

Tabel 4. Faktor Keamanan terhadap Daya Dukung Tanah Dasar

Skenario	Fku Empiris	Fku PLAXIS 2D
A1	1.12	1.50
A2	1.70	1.67
A3	1.30	1.39
B4	1.00	1.48
B5	1.70	1.69
B6	1.30	1.39
C7	1.00	1.51
C8	1.70	1.68
C9	1.30	1.38
C10	1.50	1.88

Nilai faktor keamanan yang diperoleh menunjukkan bahwa tanah dasar dapat memikul beban yang diakibatkan oleh *box tunnels*, timbunan tanah SLS-COX dan beban eksternal pada skenario beban eksternal terbesar.

4.4. Deformasi Box Tunnel

Deformasi pada *box tunnel* dianalisis secara empiris dan secara numerik (PLAXIS 2D), menggunakan beban terbesar dari 10 (sepuluh) skenario beban yang digunakan yakni pada skenario A3, B6 dan C9. Deformasi maksimum yang diizinkan pada *box tunnel* adalah 100 mm.

Tabel 5. Deformasi pada Box Tunnel

Skenario	Deformasi (mm)	
	Metode Empiris	PLAXIS 2D
Model A3	70	60
Model B6	70	10
Model C9	20	80

4.5. Tegangan Tanah Aktif

Perhitungan tekanan tanah menggunakan teori Rankine untuk menghitung koefisien tekanan tanah aktif. Gaya tekan tanah aktif yang bekerja setinggi dinding galian (7,3 m) terhadap dinding *box tunnels* dihitung menggunakan metode empiris dengan mempertimbangkan kedalaman galian (H=7,3m). Secara empiris nilai gaya tekan aktif adalah sebesar 67,802 kN/m, dan gaya tekan aktif dari hasil PLAXIS 2D sebesar 68,04 kN/m.

5. Kesimpulan

Hasil analisis kestabilan *box tunnels* pada aliran Sungai Araren yang melintas dalam kawasan penambangan emas menunjukkan bahwa dinding galian tanah setinggi 7.3 m untuk penempatan *box tunnels* dalam kondisi stabil. Tanah dasar yang merupakan jenis batuan VBA-POX memiliki daya dukung yang memenuhi persyaratan ($FK \geq 1$) untuk memikul beban *box tunnels*, timbunan tanah serta beban eksternal akibat pergerakan kendaraan Volvo ADT 35G. Selain itu, deformasi yang terjadi pada *box tunnels* akibat beban timbunan dan beban eksternal tidak melampaui deformasi yang diizinkan (≤ 100 mm). Dengan demikian *box tunnels* berukuran 200×200×100 cm yang ditempatkan pada kedalaman 7.3 m dari permukaan tanah dalam kondisi stabil dan dapat digunakan dalam konstruksi.

Referensi

- Bilotta E., et.al. (2022). Handboook on Tunnels and Underground Works, Volume 1. Concept – Basic Principles of Design. CRC Press.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., & Swolfs, W. M. (2020). Plaxis 2D Reference Manual. Plaxis bv.
- BSNI. (2017). SNI 8460:2017 – Persyaratan Perancangan Geoteknik.
- Chen, Y., Zhang, Y., & Wang, L. (2020). Influence of Groundwater Pressure on Tunnel Stability in River-Crossing Construction. *Journal of Geotechnical Engineering*, 146(4), 04020021.
- Chen, R., Xie, F., & Liu, J. (2021). Stability and Performance Analysis of *Box tunnelss* under Complex Geological Conditions. *Tunneling and Underground Space Technology*, 110, 103753.
- Craig, R.F. (2012). *Soil Mechanics* (8th ed.). CRC Press.
- Das, B. M. (2019). Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning.
- Hoek, E., & Brown, E.T. (2019). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39(6), 889-902.
- Indraratna, B., Heitor, A., Jayan, S. Vinod. (2020). Geotechnical Problems and Solutions: A Practical Perspective. CRC Press.
- Liu, J., Zhang, Y., & Li, C. (2021). Numerical Analysis of *Box tunnels* Stability Using PLAXIS 2D: A Case Study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(10), 04021091.
- Meriam, J. L., & Kraige, L. G. (2012). Engineering Mechanics: Dynamics (7th ed.). Wiley.
- Nguyen, H., Pham, D., & Tran, Q. (2021). Ground Settlement Mitigation Techniques for River Tunneling. *Tunneling and Underground Space Technology*, 115, 104731.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). Soil Mechanics in Engineering Practice. Wiley.
- Volvo CE. (2021). Volvo ADR35G Technical Specifications. Volvo Construction Equipment.
- Wang, J., & Song, Z. (2018). Impact of Soil-Water Interaction on Tunnel Stability in River Crossing Projects. *Geotechnical Journal*, 45(3), 102-112.
- Wang, P., Zhang, Z., & Liu, J. (2020). Influence of Pore Water Pressure on Tunnel Stability during River Crossing. *Geotechnical Journal*, 49(7), 715-726.
- Wang, J., Zhang, L., & Liu, Y. (2020). Stability Analysis of *Box tunnelss* in River Flow Conditions. *Journal of Geotechnical Engineering*, 146(5), 04020035.
- Whitlow, R. (2001). Basic Soil Mechanics (4th ed.). Pearson Education.