

ANALISIS KESTABILAN TEROWONGAN MENGGUNAKAN DATA PEMANTAUAN DEFORMASI MASSA BATUAN DENGAN TOTAL STATION PADA TEROWONGAN KERETA API NOTOG

Zati Hulwani¹, Budi Sulistianto², Nuhindro Priagung Widodo³, Eko Septiyanto⁴, Ahmad Na'im Musyafiq⁵

¹⁻³ Program Studi Magister Rekayasa Pertambangan, Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung

⁴⁻⁵ PT Pembangunan Perumahan (Persero) Tbk., Jakarta 13760, Indonesia

e-mail: *¹zatihulwani95@gmail.com

ABSTRAK

Pada masa kini, penggunaan terowongan baik untuk keperluan pertambangan maupun sipil seperti sarana transportasi (kereta api, saluran air untuk pembangkit listrik tenaga air) semakin berkembang. Kestabilan terowongan menjadi salah satu faktor yang sangat penting dan membutuhkan perhatian yang lebih bagi kelangsungan dan kelancaran kegiatan transportasi. Penelitian ini dilakukan di terowongan kereta api Notog BH 1440 yang berlokasi di jalur antara Cirebon - Kroya (Cikro), Jawa Tengah, Indonesia. Analisis deformasi berdasarkan hasil pemantauan massa batuan dengan mengukur *displacement* massa batuan di sekitar terowongan. Pengukuran deformasi (*displacement*) massa batuan menggunakan *total station* pada STA 395 dengan 3 titik pantau, A = dinding kiri (sebelah Timur), B = atap, dan C = dinding kanan (sebelah Barat). Besar deformasi terowongan pada setiap titik yaitu, titik A = 2,4 mm, titik B = 1,5 mm, dan titik C = 2,2 mm, terowongan dikategorikan masih dalam keadaan stabil. Penentuan kriteria kestabilan terowongan didasarkan pada laju perpindahan menurut Zhenxiang (1984), Cording (1974), dan UG Geotech PT. Freeport (2000). Berdasarkan hasil pengolahan data pemantauan *displacement* massa batuan didapatkan kestabilan terowongan pada titik A stabil; titik B relatif stabil menurut Zhenxiang (1984) dan Cording (1974) – stabil menurut UG Geotech PT. Freeport (2000); dan titik C stabil.

Kata-kata kunci: kestabilan terowongan, pemantauan deformasi, laju perpindahan, dan *total station*.

PENDAHULUAN

Terowongan memiliki pengaruh yang penting pada kehidupan manusia. Hal ini dapat dilihat dari penggunaan terowongan sebagai media transportasi lalu lintas (kereta api), untuk keperluan pertambangan, saluran air pembangkit listrik tenaga air, dan sebagainya. Penggunaan terowongan sebagai media transportasi banyak digunakan karena memiliki beberapa keuntungan jika dibandingkan dengan jalur transportasi di atas permukaan. Keuntungan dari penggunaan terowongan tersebut yaitu mengurangi dampak terhadap lingkungan di permukaan, jarak tempuh menjadi lebih pendek, tidak akan terganggu oleh cuaca, serta dapat menghubungkan dua daratan yang dipisahkan oleh laut, sungai, dan danau.

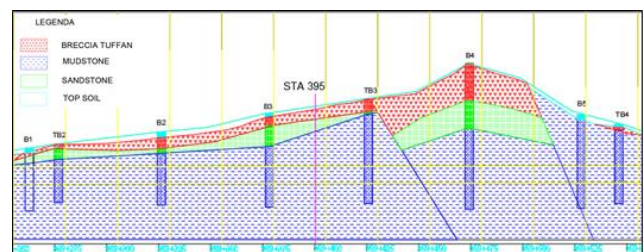
Penelitian ini dilakukan di terowongan kereta api Notog BH 1440 memiliki panjang 550 meter, tinggi 9,11 meter, dan diameter 10,50 meter, yang berlokasi di jalur antara Cirebon - Kroya (Cikro). Kondisi batuan terdiri dari breksi tufaan, *sandstone*, dan *mudstone* seperti terlihat pada Gambar-1. Lokasi pemantauan *displacement* berada di titik 395 STA dengan elevasi rel berada di 33 m di bawah permukaan topografi.

Kestabilan terowongan menjadi salah satu faktor yang sangat penting bagi kelangsungan dan kelancaran kegiatan sesuai kegunaannya seperti kegiatan transportasi kereta api, saluran air, dan sebagainya karena akan digunakan untuk jangka waktu yang lama. Kestabilan terowongan perlu diperhatikan dengan baik sejak tahap konstruksi sampai nanti saat sudah berfungsi. Hal tersebut dapat dicapai dengan membuat rancangan terowongan yang aman.

Ketidakstabilan terowongan dipengaruhi oleh empat faktor, yaitu ketidakstabilan karena hadirnya struktur geologi; ketidakstabilan karena *over stress* (tegangan yang tinggi di sekitar lokasi terowongan); ketidakstabilan karena proses pelapukan dan *swelling rock*; dan ketidakstabilan karena pengaruh hidrologi dan hidrogeologi [3]. Geometri dan bentuk terowongan, kondisi massa batuan di sekitar

terowongan, kedalaman terowongan, beban permukaan, metode penggalian dan jenis perkuatan/penyanggaan yang digunakan juga sangat mempengaruhi kestabilan terowongan.

Metode observasi, merupakan metode yang didasarkan pada hasil pengamatan langsung terhadap perpindahan yang terjadi pada massa batuan di sekeliling terowongan merupakan salah satu cara untuk mengetahui kestabilan terowongan [3]. Deformasi massa batuan dapat diukur dengan menggunakan beberapa alat yaitu *multiple point borehole extensometer* (MPBX), konvergenmeter, *total station*, *laser distometer*, dan lain sebagainya. Pada penelitian ini, analisis kestabilan terowongan dilakukan dengan menggunakan data hasil monitoring deformasi yang diukur menggunakan *total station*.



Gambar-1. Penampang Vertikal Memanjang Terowongan Notog BH 1440

PENGUMPULAN DATA

Data-data yang dikumpulkan meliputi data pemantauan deformasi massa batuan, serta titik pantau yang akan diukur.

Pemantauan Deformasi Massa Batuan

Pemantauan adalah pengamatan terhadap struktur rekayasa baik secara visual maupun dengan bantuan peralatan [4]. Beberapa alat yang digunakan untuk pemantauan massa batuan yaitu konvergenmeter, *laser*

distometer, MPBX, total station, dan lain sebagainya. Hasil pemantauan massa batuan menggunakan *total station* berupa koordinat dan elevasi (X, Y, dan Z). Hasil besar perpindahan massa batuan dapat dihitung dari selisih antara koordinat dan elevasi akhir dan awal dari data yang didapatkan saat pengukuran di lapangan.

Perhitungan perpindahan pada setiap sumbu dan resultan perpindahan pada ketiga sumbu XYZ dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\Delta X = X_n - X_1 \quad (1)$$

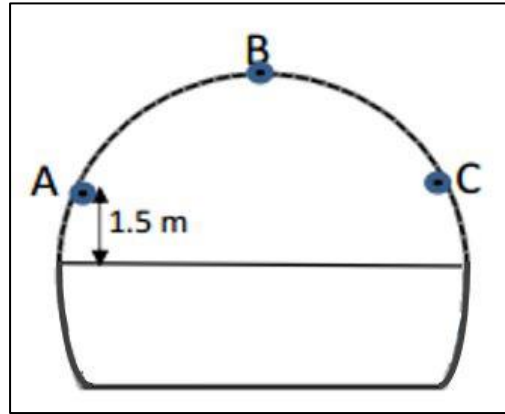
$$\Delta Y = Y_n - Y_1 \quad (2)$$

$$\Delta Z = Z_n - Z_1 \quad (3)$$

$$R = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2} \quad (4)$$

Data Perpindahan

Pada STA 395 dipasang target untuk pemantauan deformasi terowongan menggunakan *total station* dengan jumlah titik pantau sebanyak 3 titik yaitu titik A, B dan C (Gambar-2). Pemantauan deformasi terowongan pada STA 395 dilakukan selama 11 hari dengan titik acuan (BM) berada pada *inlet*. Data yang dihasilkan dari pemantauan dengan *total station* berupa data koordinat X (*Easting*), Y (*Northing*), Z (*Vertikal*). Tabel-1 merupakan tabel data hasil pengukuran koordinat titik target dengan *total station*.



Gambar-2. Titik Pemantauan Deformasi Terowongan pada Penampang STA 395 Mengarah ke Outlet

Kriteria Kestabilan Terowongan

Kriteria kestabilan terowongan dapat ditentukan berdasarkan laju perpindahan pada setiap titik pantau menurut Zhenxiang (1984) (Tabel-2), Cording (1974) (Tabel-3), UG Geotech PT. Freeport (2000) (Tabel-4) dari hasil pemantauan deformasi massa batuan di lapangan. Laju perpindahan dapat dihitung menggunakan rumus.

$$v = \frac{u_a - u_o}{t_a - t_o} \quad (5)$$

Dimana, v = laju perpindahan (mm/hari); u_a = besar perpindahan terakhir (mm); u_o = besar perpindahan hari sebelumnya (mm); t_a = waktu pengukuran terakhir; dan t_o = waktu pengukuran hari sebelumnya.

Tabel-1. Hasil Pengukuran Pemantauan Massa Batuan menggunakan *Total Station*

TRANSFORMASI KOORDINAT HASIL MONITORING STA 395											
No.	Tanggal	Jam	Koordinate A			Koordinate B			Koordinate C		
			X'	Y'	Z	X'	Y'	Z	X'	Y'	Z
1	22/02/2018	15:00	-329844,247	-110203,616	29,346	-329840,004	-110205,043	32,632	-329835,764	-110206,577	29,223
2	23/02/2018	22:00	-329844,246	-110203,615	29,346	-329840,004	-110205,044	32,633	-329835,766	-110206,575	29,226
3	24/02/2018	10:00	-329844,247	-110203,613	29,343	-329840,003	-110205,045	32,632	-329835,767	-110206,577	29,225
4	25/02/2018	10:00	-329844,246	-110203,616	29,346	-329840,005	-110205,044	32,631	-329835,766	-110206,576	29,226
5	26/02/2018	10:45	-329844,248	-110203,621	29,343	-329840,011	-110205,045	32,633	-329835,768	-110206,577	29,225
6	27/02/2018	13:45	-329844,246	-110203,617	29,347	-329840,006	-110205,044	32,632	-329835,766	-110206,576	29,225
7	28/02/2018	14:00	-329844,247	-110203,616	29,346	-329840,006	-110205,045	32,633	-329835,767	-110206,574	29,223
8	01/03/2018	21:30	-329844,247	-110203,616	29,346	-329840,006	-110205,045	32,632	-329835,766	-110206,573	29,225
9	02/03/2018	11:00	-329844,247	-110203,613	29,345	-329840,004	-110205,046	32,633	-329835,768	-110206,577	29,225
10	03/03/2018	13:45	-329844,246	-110203,615	29,344	-329840,005	-110205,043	32,632	-329835,765	-110206,575	29,226
11	04/03/2018	09:30	-329844,247	-110203,613	29,344	-329840,004	-110205,044	32,633	-329835,766	-110206,577	29,225

Tabel-2. Kriteria Kestabilan Zhenxiang (1984) [5]

Kriteria Kestabilan Zhenxiang (1984)	
Laju Perpindahan (mm/hari)	Kriteria Kestabilan
$\leq 0,2$	Stabil
$0,2 - 3$	Relatif Stabil
≥ 3	Tidak Stabil

Tabel-3. Kriteria Kestabilan Cording (1974) [1]

Kriteria Kestabilan Cording (1974)	
Laju Perpindahan (mm/hari)	Kriteria Kestabilan
$< 0,001$	Stabil
$> 0,05$	Relatif Stabil
≥ 1	Tidak Stabil

Tabel-4. Kriteria Kestabilan UG Geotech PT. Freeport Indonesia (2000)

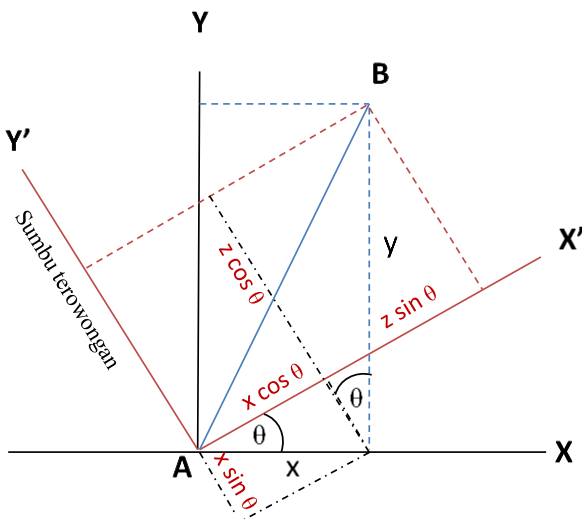
Kriteria Kestabilan UG Geotek PTFI (2000)	
Rate of Convergence (Vc), mm/day	Classification
$V_c < 1$	Negligible
$1 < V_c < 2$	Moderate
$2 < V_c < 3$	Severe
$3 < V_c < 5$	Very Severe
$V_c > 5$	Extremely Severe

HASIL DAN DISKUSI

Data Pemantauan Deformasi Massa Batuan

Pada saat melakukan pengolahan data terhadap data hasil monitoring harus dibuat pemodelan untuk mengetahui kondisi deformasi yang terjadi sesuai dengan lokasi penelitian. Hal ini dikarenakan arah utara terowongan yang tidak sama dengan arah utara sebenarnya, oleh karena itu perlu dilakukan transformasi dengan merotasi sumbu koordinat agar memudahkan saat penentuan besar dan arah perpindahan pada penampang tunnel. Berikut penjelasan mengenai transformasi koordinat dapat dilihat pada Gambar-3 dan persamaan berikut.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \cos \theta - Y \sin \theta \\ X \sin \theta + Y \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

**Gambar-3.** Transformasi Sumbu Koordinat [2]

Posisi awal titik mempunyai koordinat (X, Y, Z) yang kemudian dirotasi pada sumbu Z sebesar θ , maka koordinat titik B akan menjadi (X', Y', Z). Berdasarkan hasil transformasi didapatkan sudut rotasi sebesar 169° . Hasil perhitungan perpindahan dan resultan perpindahannya diberikan pada Tabel-5.

Tabel-5. Hasil Perpindahan dan Resultan Perpindahan STA 395

No.	Tanggal	Jam	Perpindahan Pin A (m)				Perpindahan Pin B (m)				Perpindahan Pin C (m)			
			ΔX	ΔY	ΔZ	Resultan	ΔX	ΔY	ΔZ	Resultan	ΔX	ΔY	ΔZ	Resultan
1	22/02/2018	15:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	23/02/2018	22:00	0,001	0,002	-0,001	0,002	0,001	-0,001	0,001	0,002	-0,002	0,002	0,003	0,004
3	24/02/2018	10:00	0,001	0,003	-0,003	0,004	0,002	-0,002	0,000	0,003	-0,003	0,001	0,002	0,004
4	25/02/2018	10:00	0,001	0,001	-0,001	0,002	0,000	-0,001	-0,001	0,001	-0,002	0,001	0,003	0,004
5	26/02/2018	10:45	-0,001	-0,005	-0,003	0,006	-0,006	-0,002	0,001	0,007	-0,004	0,001	0,002	0,004
6	27/02/2018	13:45	0,001	0,000	0,001	0,001	-0,001	-0,001	0,000	0,001	-0,002	0,001	0,002	0,003
7	28/02/2018	14:00	0,000	0,000	-0,001	0,001	-0,001	-0,002	0,001	0,002	-0,002	0,004	0,000	0,004
8	01/03/2018	21:30	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,002	0,000	0,002	-0,002	0,004	0,002	0,005
9	02/03/2018	11:00	0,001	0,003	-0,001	0,003	0,000	-0,003	0,001	0,003	-0,004	0,001	0,002	0,004
10	03/03/2018	13:45	0,001	0,002	-0,002	0,003	-0,001	0,000	0,000	0,001	-0,001	0,002	0,003	0,004
11	04/03/2018	09:30	0,001	0,003	-0,002	0,004	0,001	-0,001	0,001	0,002	-0,002	0,000	0,002	0,003

Besar dan Arah Perpindahan

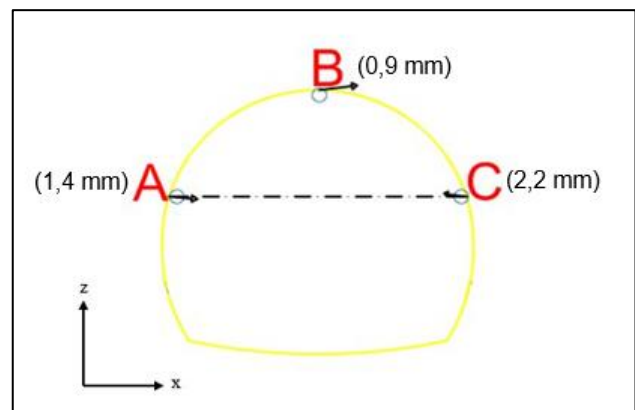
Berdasarkan hasil perhitungan data monitoring setelah dilakukan transformasi dapat dihitung besar dan arah perpindahan pada STA 395. Besar perpindahan 2D yang dihitung hanya pada sumbu X yang mewakili perpindahan horizontal dan komponen Z yang mewakili perpindahan vertikal (Tabel-6). Sedangkan besar perpindahan pada 3D dihitung pada ketiga sumbu yaitu X, Y, dan Z (Tabel-7). Arah perpindahan dapat dilihat pada Gambar-4.

Tabel-6. Hasil Besar Perhitungan Besar Perpindahan 2D Data Monitoring pada STA 395

Posisi	Perpindahan (m)		
	ΔX	ΔZ	Resultan
Pin A	0,0010	-0,0010	0,0014
Pin B	0,0008	0,0005	0,0009
Pin C	-0,0020	0,0010	0,0022

Tabel-7. Hasil Besar Perhitungan Besar Perpindahan 3D Data Monitoring pada STA 395

Posisi	Perpindahan (m)			
	ΔX	ΔY	ΔZ	Resultan
Pin A	0,0010	0,0020	-0,0010	0,0024
Pin B	0,0008	-0,0012	0,0005	0,0015
Pin C	-0,0020	0,0004	0,0010	0,0022

**Gambar-4.** Sketsa Arah Deformasi Terowongan (2D)

Berdasarkan hasil perhitungan besar perpindahan yang ditunjukkan pada Tabel-6, besar perpindahan secara 2D pada setiap titik adalah pin A sebesar 0,0014 m (1,4 mm), pin B sebesar 0,0009 m (0,9 mm), dan pin C sebesar 0,0022 m (2,2 mm). Sedangkan untuk besar perpindahan secara 3D berdasarkan hasil perhitungan besar perpindahan yang ditunjukkan pada Tabel-7, pin A sebesar 0,0024 m (2,4 mm), pin B sebesar 0,0015 m (1,5 mm), dan pin C sebesar 0,0022 m (2,2 mm).

Laju Perpindahan

Penentuan kriteria kestabilan terowongan didasarkan pada laju perpindahan. Menurut Zhenxiang (1984) dan Cording (1974), dan UG Geotech PT. Freeport (2000) dapat dijadikan salah satu acuan dalam menentukan kestabilan terowongan. Berdasarkan hasil pengolahan data monitoring di STA 395 didapatkan laju perpindahan pada setiap titik yaitu, A = -0.41122 mm/hari, B = 0.35460 mm/hari, dan C = -0.31055 mm/hari.

Penentuan kriteria kestabilan terowongan didasarkan pada laju perpindahan menurut Zhenxiang (1984), Cording (1974), dan UG Geotech PT. Freeport (2000). Berdasarkan hasil pengolahan data pemantauan displacement massa batuan didapatkan kestabilan terowongan pada titik A stabil; titik B relatif stabil menurut Zhenxiang (1984) dan Cording (1974) – stabil menurut UG Geotech PT. Freeport (2000); dan titik C stabil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan besar perpindahan yang ditunjukkan pada Tabel-6, besar perpindahan secara 2D pada setiap titik adalah pin A sebesar 0,0014 m (1,4 mm), pin B sebesar 0,0009 m (0,9 mm), dan pin C sebesar 0,0022 m (2,2 mm). Sedangkan untuk besar perpindahan secara 3D berdasarkan hasil perhitungan besar perpindahan yang ditunjukkan pada Tabel-7, pin A sebesar 0,0024 m (2,4 mm), pin B sebesar 0,0015 m (1,5 mm), dan pin C sebesar 0,0022 m (2,2 mm). Dari hasil analisis laju perpindahan, menurut kriteria kestabilan terowongan Zhenxiang (1984) dan Cording (1974), dan UG Geotech PT. Freeport (2000) pada titik A stabil, titik B relatif stabil menurut Zhenxiang (1984) dan Cording (1974) – stabil menurut UG Geotech PT. Freeport (2000), dan titik C stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Prof., Dr., Ir., Budi Sulistianto, M.T. dan Dr. Eng. Nuhindro Priagung Widodo, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah mendidik dan membimbing penulis, dan kepada Dr. Eng. Tri Karian, S.T. M.T., dosen yang telah membantu dalam penelitian ini, serta karyawan Laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang ITB, yang telah membantu dalam segala pembelajaran di laboratorium Geomekanika dan Peralatan Tambang serta dalam penyelesaian tesis ini. Dan juga terima kasih kepada PT. Pembangunan Perumahan, yang telah memberikan penulis kesempatan untuk melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cording J. Edward, Mahar W. James, dan Brierley S. Gray., *Observations for Shallow Chamber in Rock*. Proceedings of The International Symposium Field Measurements in Rock Mechanics. Volume II. Zurich, 4-6 April 1977. AA. Balkema, Rotterdam, halaman 485-508 (1979).
- [2] Hakim, Romla Noor. 2016. *Monitoring Deformasi Dinding dan Atap Terowongan Tambang Emas Bawah Tanah Menggunakan Total Station Reflektorless*. Prosiding SNRT (Seminar Nasional Riset Terapan).

- [3] Hoek, E., dan Brown, E.T. 1980. *Underground Excavation in Rocks*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.
- [4] Rai, M. A., Suseno, K., dan Ridho, K.W. 2014. *Mekanika Batuan*. Penerbit ITB. Bandung.
- [5] Zhenxiang, X. A., *Tunnel Design Method Using Field Measurement Data*. Proceedings of ISRM Symposium Design and Performance of Underground Excavation. Cambridge UK, 3-6 September, 1984. British Geotechnical Society, London. Halaman 221-229.