

# HUBUNGAN HASIL KORELASI STRATIGRAFI BAWAH PERMUKAAN DENGAN KESTABILAN TEROWONGAN STUDI KASUS: TEROWONGAN MRT JAKARTA

Luthfi Effendi<sup>1\*</sup>, Teuku Faisal Fathani<sup>1</sup> dan Wahyu Wilopo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

<sup>2</sup>Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

Email: [lutheffendi@gmail.com](mailto:lutheffendi@gmail.com)

---

## ABSTRAK

Pada perhitungan stabilitas terowongan, mengetahui kondisi bawah permukaan, jenis tanah dan parameternya merupakan hal yang sangat penting. Karena itu, korelasi data bor harus dilakukan sebaik mungkin agar dapat menggambarkan kondisi bawah tanah yang akurat. Penelitian ini akan menguji kestabilan terowongan MRT Jakarta stasiun bawah tanah Senayan-Istora. Berdasarkan hasil korelasi data bor, jenis tanah dibagi menjadi lima satuan tanah yang terdiri dari lempung N-SPT rendah, lanau N-SPT rendah, lanau N-SPT tinggi, pasir N-SPT rendah, dan pasir N-SPT tinggi. Tekanan muka terowongan divalidasi dengan pembacaan tekanan muka terowongan di lapangan. Secara umum metode yang paling mendekati hasil pembacaan di lapangan adalah metode COB Commisie L510. Stabilitas tubuh terowongan dihitung dengan metode Carranza-Torres, menghasilkan gaya yang paling besar 137,93 kN/m<sup>2</sup> dari kapasitas dukung lining terowongan 726 kN/m<sup>2</sup>. Stabilitas terowongan terhadap gaya angkat menghasilkan faktor aman paling kecil sebesar 2,26 dari rekomendasi faktor aman 1,5. Hasil korelasi akan berdampak pada stabilitas terowongan, karena stabilitas terowongan didasarkan pada jenis, tebal dan kekuatan tanah di mana terowongan tersebut dibangun.

**Kata kunci:** faktor aman, stratigrafi, terowongan

---

## 1. PENDAHULUAN

Pembangunan angkutan cepat terpadu atau *mass rapid transit* (MRT) merupakan solusi yang dipilih untuk menangani kemacetan di DKI Jakarta. Penelitian ini akan membahas hubungan kondisi stratigrafi bawah permukaan dengan stabilitas terowongan. Objek dari penelitian ini adalah terowongan bawah tanah dari stasiun bawah tanah Senayan hingga stasiun bawah tanah Istora. Stabilitas terowongan yang dibahas terdiri dari stabilitas terowongan saat penggalian dengan metode Leca & Dormieux (1990) dan COB Commisie L510 (1996), stabilitas tubuh terowongan dengan metode Carranza-Torres (2013), stabilitas terowongan terhadap gaya angkat dengan metode yang diusulkan pada *Civil Design Criteria – Revision A4* (2002). Keadaan stratigrafi bawah tanah diketahui dengan melakukan korelasi dari 18 titik bor. Hasil dari korelasi ini kemudian digunakan sebagai gambaran kondisi bawah permukaan terowongan untuk menghitung stabilitas terowongan.

## 2. STUDI PUSTAKA

### 2.1. Stabilitas Muka Terowongan

Metode perhitungan stabilitas muka terowongan yang digunakan adalah Leca & Dormieux (1990) dan COB commisie L510 (1996). *Centrum Ondergouds Bouwen* (COB) *commissie* merupakan suatu komisi yang mengatur mengenai pembangunan bangunan bawah tanah asal Belanda, dan metode ini sudah banyak dijadikan acuan untuk menentukan perkiraan besar tekanan muka terowongan. Persamaan (1) digunakan untuk mengetahui tekanan minimal terowongan agar tidak terjadi keruntuhan, sedangkan Persamaan (2) digunakan untuk mengetahui tekan maksimal yang dapat diberikan terhadap terowongan agar tidak terjadi *blow-out*.  $\sigma_T$  merupakan tekanan kritis muka terowongan, sedangkan  $\sigma'_v$  merupakan tekanan overburden.

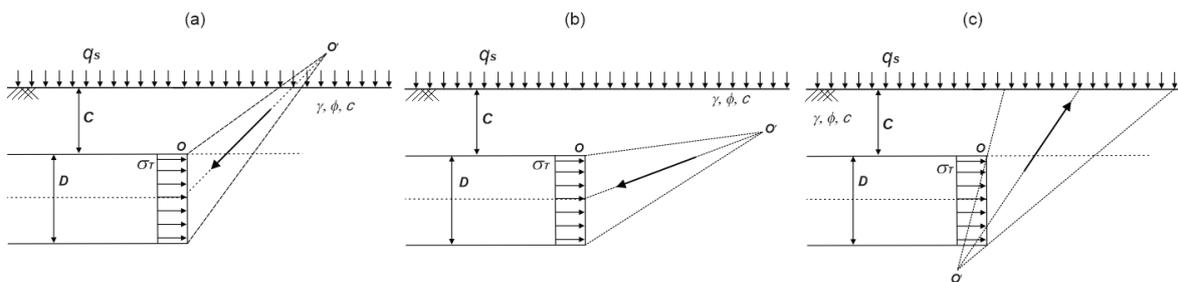
$$\sigma_{Tmin} = k_a \sigma'_v - 2c\sqrt{k_a} + 20 \text{ kpa} \quad (1)$$

$$\sigma_{Tmax} = k_o \sigma'_v + 20 \text{ kpa} \quad (2)$$

Metode Leca and Dormieux (1990), merupakan Metode yang didasari dari penelitian yang dilakukan oleh Chambon dan Corte yang melakukan uji sentrifuge. Leca dan Dormieux pada prinsipnya menggunakan konsep analitis batas untuk memperkirakan kondisi kestabilan dari muka terowongan pada tanah kohesif, kemudian membandingkannya dengan pengujian sentrifuge yang dilakukan oleh Chambon dan Corte. Leca dan Dormieux mendapatkan tekanan muka terowongan dengan persamaan berikut:

$$\sigma_T = N_s q_s + N_y D \gamma \quad (3)$$

$N_s$  dan  $N_y$  merupakan koefisien non-dimensional,  $q_s$  merupakan beban dipermukaan tanah ( $\text{kN/m}^2$ ), dan  $D$  merupakan diameter terowongan (m). Metode Leca & Dormieux mempunyai tiga model yaitu Model SI, ditunjukkan pada Gambar 1a yang merupakan keruntuhan muka terowongan dari permukaan tanah. Model SII, ditunjukkan pada Gambar 1b yang merupakan keruntuhan muka terowongan yang terjadi di bawah permukaan tanah. Model SIII, ditunjukkan pada Gambar 1c yang merupakan keruntuhan muka terowongan akibat *blow-out*, yang merupakan kondisi naiknya permukaan tanah karena dorongan dari bawah tanah.



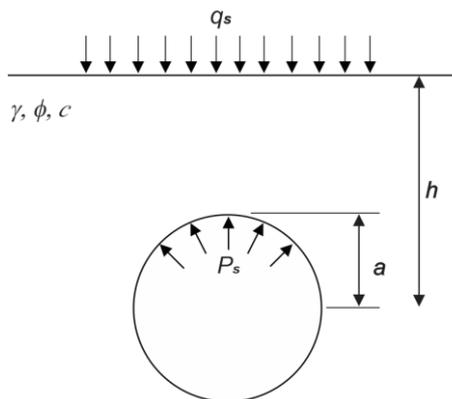
Gambar 1: Model Leca & Dormieux (1990)

## 2.2 Stabilitas Tubuh Terowongan

Metode Carranza-Torres (2013) dapat digunakan untuk menghitung stabilitas tubuh terowongan. Metode ini merupakan modifikasi dari metode yang diajukan oleh Caquot-Kerisel pada tahun 1956 yang ditunjukkan pada Gambar 2. Metode ini menggunakan kesetimbangan batas pada bagian puncak (*crown*) dari terowongan silinder dangkal. Kuat geser tanah pada metode ini didefinisikan dengan Mohr-Coulomb dengan parameter  $c$  dan  $\phi$ , yang menunjukkan kohesi dan sudut gesek internal. Pada sistem terowongan ada gaya yang dihasilkan dari sistem penyangga terowongan yaitu  $p_s$ . Beban yang bekerja pada permukaan adalah  $q_s$ . Metode ini dapat mengetahui berapa kekuatan  $p_s$  minimum yang dibutuhkan dari Persamaan (4).

$$\frac{p_s}{\gamma h} = \left( \frac{q_s}{\gamma h} + 2 \frac{c}{\gamma h} \frac{\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \right) \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi - 1)} - \frac{1}{k(N_\phi - 1) - 1} \left[ \left( \frac{h}{a} \right)^{-k(N_\phi - 1)} - \left( \frac{h}{a} \right)^{-1} \right] - 2 \frac{c}{\gamma h} \frac{\sqrt{N_\phi}}{N_\phi - 1} \quad (4)$$

$p_s$  merupakan tekanan dukung sistem penyangga ( $\text{kN/m}^2$ ),  $q_s$  beban di permukaan tanah ( $\text{kN/m}^2$ ),  $a$  adalah jari-jari terowongan (m),  $k$  adalah faktor bentuk ( $k = 1$  untuk terowongan silinder memanjang), nilai  $N_\phi$  adalah koefisien reaksi pasif.



Gambar 2: Model Caquot-Kerisel (Carranza-Torres, 2013)

### 2.3 Stabilitas Terowongan terhadap Gaya angkat

Pada terowongan yang sangat dekat dengan permukaan tanah, akan cenderung terjadi gaya tekan ke atas oleh air sehingga bisa menyebabkan *uplift* pada terowongan. Faktor aman terhadap *uplift* ini didapatkan dengan membandingkan rasio antara besarnya gaya angkat/*uplift* ( $U$ ) dengan gaya yang menahan ( $R$ ). *Civil Design Criteria – Revision A4* menyarankan ratio antara  $R/U$  tidak boleh berada di bawah 1,2. Nilai  $U$  bisa dihitung dengan Persamaan (5) dan Persamaan (6) untuk menghitung nilai  $R$ .

$$U = \gamma_w \frac{\pi D^2}{4} - W \quad (5)$$

$$R = \gamma' D \left( h_w + \frac{D}{2} - \frac{\pi D}{8} \right) + \gamma_b D (H - h_w) + 2S \left( H + \frac{D}{2} \right) \quad (6)$$

$W$  merupakan berat total dari terowongan (kN/m),  $S$  merupakan rata-rata kuat geser tanah dari titik tengah terowongan hingga permukaan.

### 3. METODE PENELITIAN

Keadaan tanah bawah permukaan didapatkan dengan melakukan korelasi data bor, dengan mencari hubungan dan persamaan jenis tanah dari suatu data bor dengan data bor lainnya. Sehingga bisa menggambarkan kondisi bawah permukaan seakurat mungkin. Pembagian jenis tanah dilakukan berdasarkan jenis dan kekuatan tanah yang ditunjukkan dari nilai N-SPT. Setelah didapatkan kondisi tanah di sekitar terowongan maka perhitungan stabilitas terowongan bisa dilakukan dengan metode perhitungan stabilitas yang telah diutarakan sebelumnya. Perhitungan stabilitas dilakukan pada setiap *section* yang berjarak 50 meter, *section* ini bisa dilihat pada Gambar 4. Hasil perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk grafik. Stabilitas ini dihitung dengan variasi muka air tanah, yang bertujuan untuk mengetahui stabilitas terowongan jika berada pada kondisi air tanah yang berbeda-beda. 4 kasus kondisi air tanah yang digunakan adalah:

1. Kondisi kering, tanpa air tanah.
2. Kondisi banjir, air tanah 2 meter di atas muka tanah.
3. Kondisi air tanah dari laporan pengeboran.
4. Kondisi air tanah tinggi, 1 meter di bawah permukaan tanah.

Karena metode perhitungan stabilitas terowongan menggunakan model material homogen maka harus dilakukan perhitungan rerata pada parameter tanah terlebih dahulu, untuk mengubah kondisi tanah yang beragam menjadi kondisi homogen. Data tanah pada daerah ini bisa dilihat pada Tabel 1.

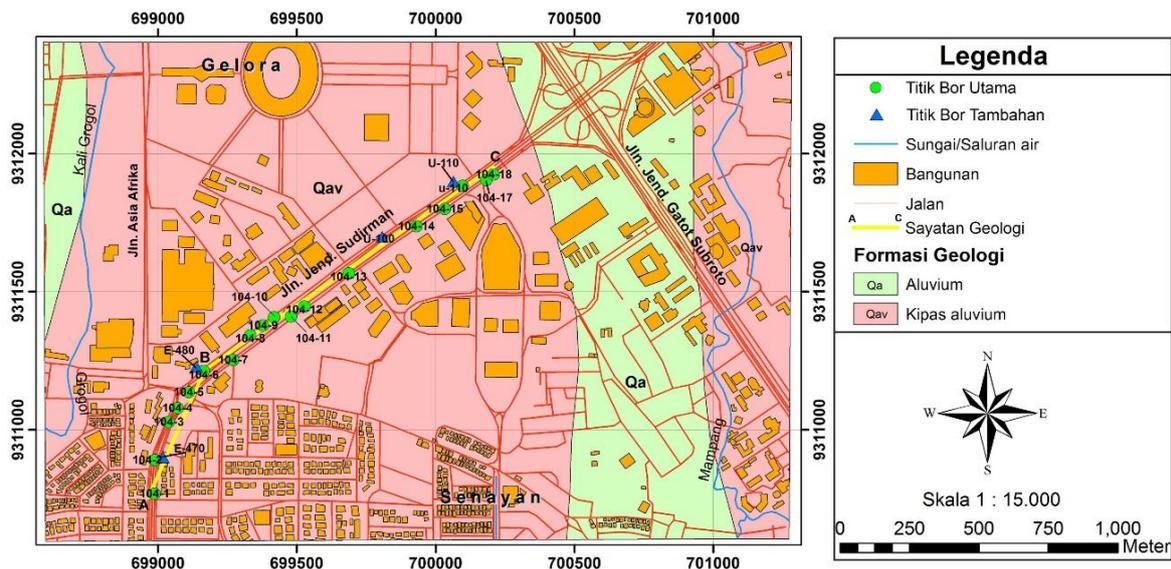
**Tabel 1:** Data Parameter Tanah

	Lempung N-SPT < 20	Lanau N-SPT < 20	Lanau N-SPT > 20	Pasir N-SPT > 20	Pasir N-SPT < 20
$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,37	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> ) 16,08	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> ) 16,05	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> ) 15,64	$\gamma_b$ (kN/m <sup>3</sup> ) 15,66
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,03	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) 10,45	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) 10,51	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) 9,75	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) 9,94
$\phi$ (°)	8,50	$\phi$ (°) 23,38	$\phi$ (°) 26,00	$\phi$ (°) 31,00	$\phi$ (°) 30,00
$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	20,00	$c$ (kN/m <sup>2</sup> ) 24,25	$c$ (kN/m <sup>2</sup> ) 18,33	$c$ (kN/m <sup>2</sup> ) 0,00	$c$ (kN/m <sup>2</sup> ) 10,00
$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	5,10	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) 6,12	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) 5,80	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) 7,42	$\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> ) 6,21
$\gamma_{sar}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,10	$\gamma_{sar}$ (kN/m <sup>3</sup> ) 16,12	$\gamma_{sar}$ (kN/m <sup>3</sup> ) 15,80	$\gamma_{sar}$ (kN/m <sup>3</sup> ) 17,42	$\gamma_{sar}$ (kN/m <sup>3</sup> ) 16,21
$G_s$	2,69	$G_s$ 2,54	$G_s$ 2,67	$G_s$ 2,49	$G_s$ 2,66
$e$	2,32	$e$ 1,52	$e$ 1,88	$e$ 1,01	$e$ 1,67
$\nu$	0,40	$\nu$ 0,30	$\nu$ 0,30	$\nu$ 0,30	$\nu$ 0,30

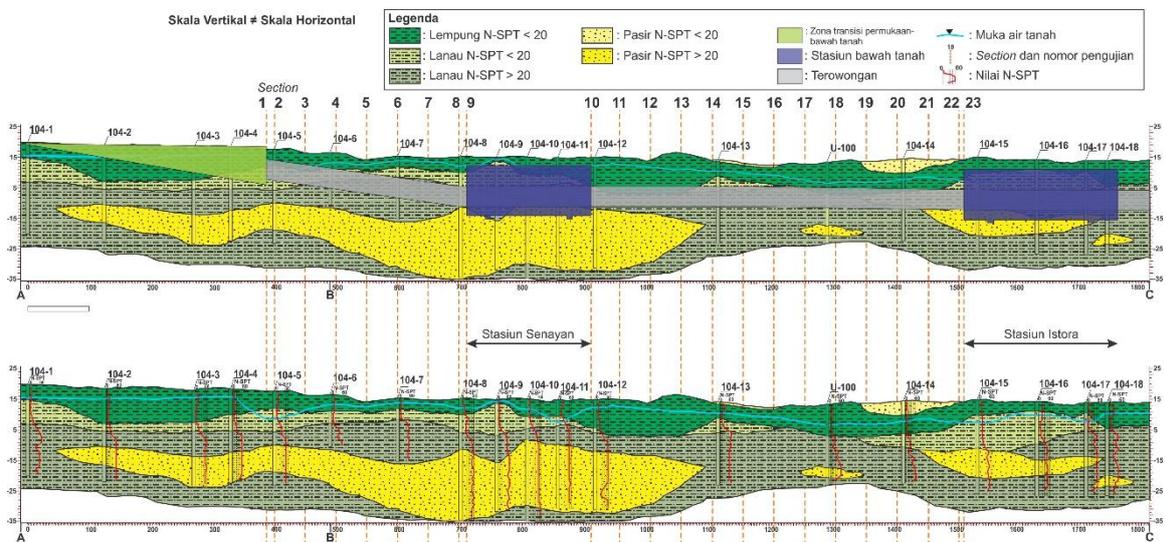
## 4. HASIL DAN DISKUSI

### 4.1 Korelasi Data Bor

Korelasi data pemboran ini dilakukan dengan lithokorelasi dengan mencocokkan litologi dari masing-masing lubang bor yang didasarkan pada kesamaan dari jenis litologi tanah yang terdapat pada laporan hasil pengeboran. Pembagian nilai N-SPT dari tanah akan dibagi menjadi dua kelompok, yaitu; tanah yang memiliki nilai N-SPT tinggi dan tanah yang memiliki nilai N-SPT rendah. N-SPT 0-20 akan digolongkan pada tanah dengan nilai N-SPT rendah, sedangkan tanah dengan nilai N-SPT >21 akan digolongkan pada tanah dengan nilai N-SPT tinggi. Nilai N-SPT 20 dipilih sebagai titik tengah karena nilainya berada pada bagian tengah dari densitas tanah medium (N-SPT 11-30), sehingga bisa dianggap merupakan titik transisi dari nilai N-SPT rendah ke nilai N-SPT tinggi. Lokasi titik bor ditunjukkan pada Gambar 3 dan hasil korelasi ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3: Lokasi titik bor dan peta geologi (sumber: Turkandi dkk., 1992)

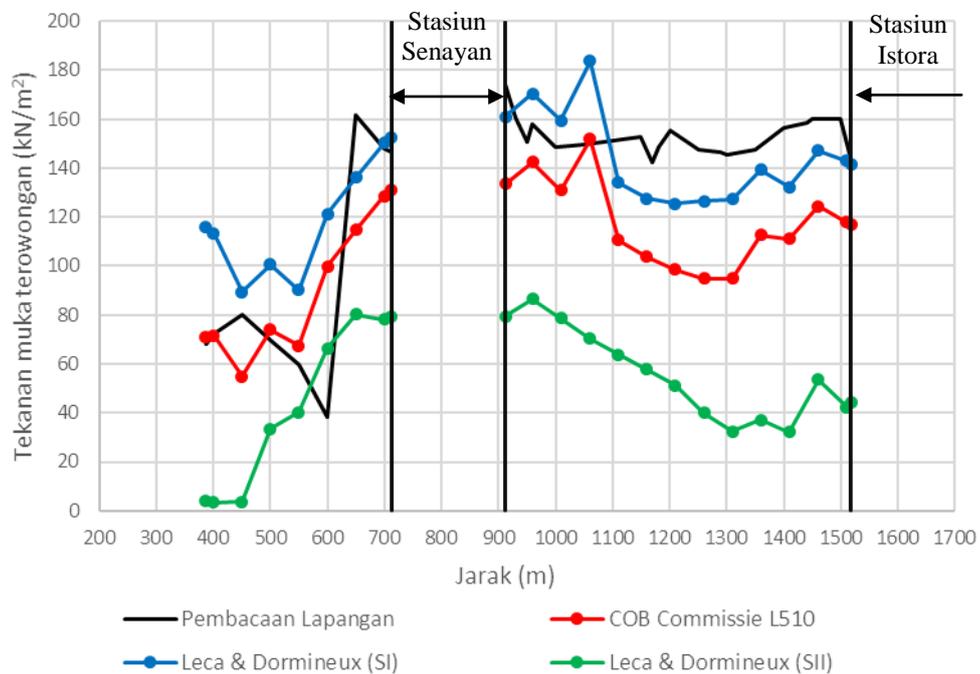


Gambar 4: Hasil korelasi data bor

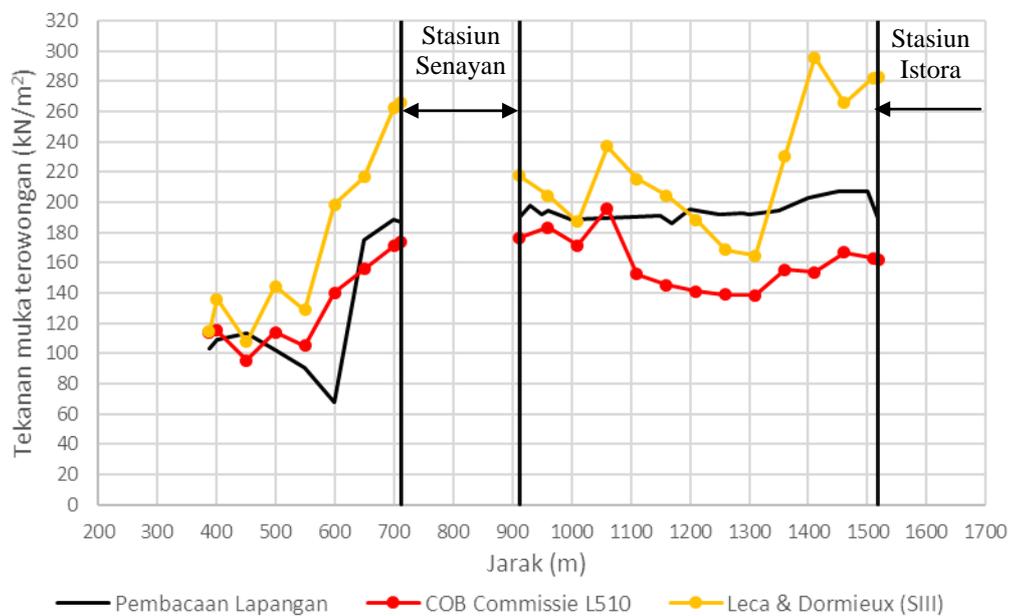
### 4.2 Analisis Tekanan Muka Terowongan

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan tekanan minimal terowongan saat penggalian dan Gambar 6 merupakan grafik tekanan maksimal terowongan. Garis hitam pada grafik merupakan hasil pembacaan di lapangan, sedangkan garis lainnya merupakan metode perhitungan yang dilakukan. Metode yang paling

mendekati pembacaan di lapangan adalah metode Leca & Dormineux model keruntuhan S1. Hal ini sesuai dengan hasil dari peneliti terdahulu. Hakim (2016) mengatakan bahwa metode yang paling mendekati hasil pembacaan lapangan adalah metode Leca & Dormineux model keruntuhan S1 dan COB Commisise L510. Menentukan metode yang paling baik untuk digunakan sebetulnya tidak bisa dilakukan hanya dengan mencocokkan data hasil perhitungan dengan data pembacaan di lapangan. Selain itu kelengkapan data juga kurang, dimana seharusnya untuk membandingkan hasil pembacaan di lapangan dibutuhkan data tinggi muka air tanah pada saat penggalian terowongan dilakukan. Nilai tekanan dukung terowongan sangat dipengaruhi oleh variasi tinggi muka air tanah, kedalaman terowongan dan juga jenis tanah. Pada terowongan dangkal dan muka air tanah rendah maka tekanan muka terowongan akan menjadi lebih rendah.



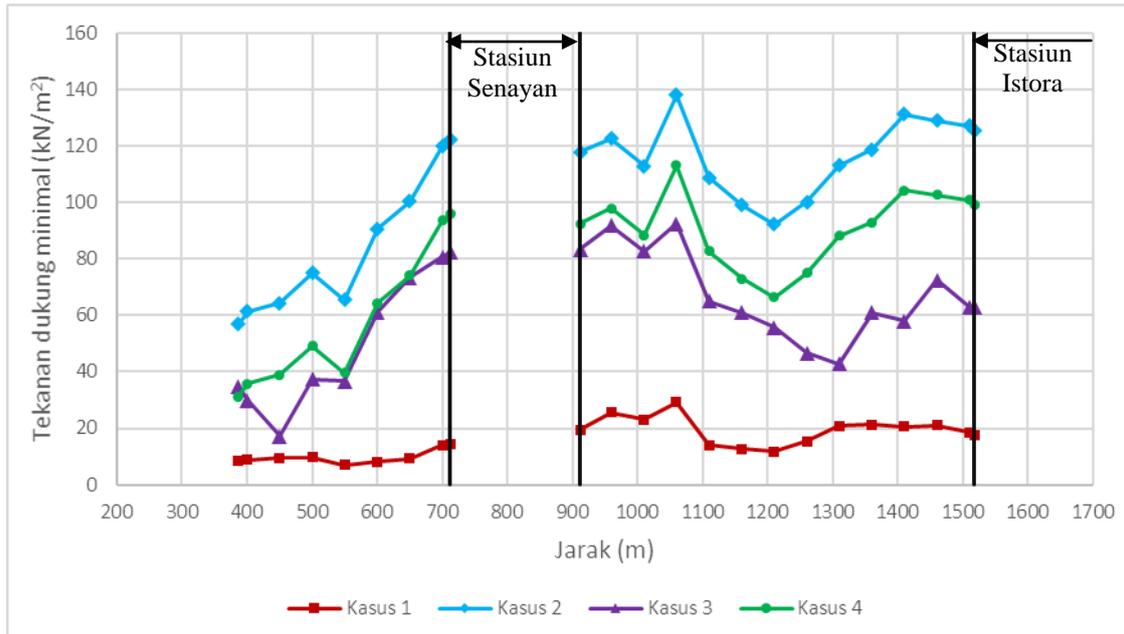
**Gambar 5:** Grafik tekanan muka terowongan minimal



**Gambar 6:** Grafik tekanan muka terowongan maksimal

### 4.3 Analisis Kestabilan Tubuh Terowongan

Kestabilan tubuh terowongan dihitung dengan metode Carranza-Torres, metode ini menghitung kesetimbangan batas pada bagian puncak terowongan. Dimana gaya yang menahan terowongan terdiri dari kapasitas dukung terhadap gaya axial dari *lining* terowongan, sedangkan gaya yang melawan adalah beban di permukaan, tekanan lateral tanah hingga kedalaman terowongan dan juga tekanan air. Stabilitas ini dihitung dengan variasi muka air tanah, yang bertujuan untuk mengetahui stabilitas terowongan jika berada pada kondisi air tanah yang berbeda-beda. Empat kondisi air tanah yang digunakan adalah Kondisi kering (kasus 1), Kondisi banjir, air tanah 2 meter di atas muka tanah (kasus 2), Kondisi air tanah dari laporan pengeboran (kasus 3), Kondisi air tanah tinggi, 1 meter di bawah permukaan tanah (kasus 4). Pada Gambar 7 terlihat bahwa tinggi air akan mempengaruhi stabilitas terowongan. Pada kasus 2 gaya yang bekerja pada terowongan jauh lebih besar jika dibandingkan kasus 1 yang tidak ada air tanah.



Gambar 7: Grafik hasil perhitungan Carranza-Torres pada 4 kondisi air tanah

Berdasarkan data *lining* terowongan, *lining* terowongan ini dapat menahan gaya  $726 \text{ kN/m}^2$ . Sedangkan untuk gaya yang paling besar dalam menekan terowongan adalah sebesar  $137,93 \text{ kN/m}^2$  (kasus 2). Nilai tekanan yang paling besar dengan kapasitas dukung *lining* cukup jauh sehingga terowongan ini cukup aman terhadap beban gaya aksial. Jika faktor aman dihitung maka, nilai faktor aman yang paling kecil adalah 5,2. Nilai ini didapat dengan membandingkan gaya yang menahan ( $726 \text{ kN/m}^2$ ) dengan gaya yang menggerakkan ( $137,93 \text{ kN/m}^2$ ). Dengan nilai faktor aman 5,2 maka terowongan ini cukup aman, karena berdasarkan *Civil Design Criteria – Revision A4* faktor aman terowongan paling tidak harus lebih besar dari 1,5. Gaya yang menekan terowongan terbesar ditemui pada kasus 2, dimana kasus 2 ini merupakan kondisi dengan air tanah yang paling tinggi. Sehingga ada gaya tekanan air yang lebih besar jika dibandingkan kasus air tanah lainnya.

### 4.4 Analisis Kestabilan Terowongan Terhadap Gaya Angkat

Pada terowongan yang sangat dekat dengan permukaan tanah, akan cenderung terjadi gaya tekan ke atas oleh air sehingga bisa menyebabkan *uplift* pada terowongan. Faktor aman terhadap *uplift* ini didapatkan dengan membandingkan rasio antara besarnya gaya angkat/*uplift* ( $U$ ) dengan gaya yang menahan ( $R$ ). Berdasarkan *Civil Design Criteria – Revision A4* faktor aman terowongan paling tidak harus lebih besar dari 1,2 dan lebih besar dari 1,5 jika besarnya beban permukaan tidak diketahui dengan secara mendetail. Angka aman pada setiap *section* dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2:** Faktor aman terhadap gaya angkat

Section	Kedalaman Terowongan (m)	SF Terhadap Uplift (R/U)			
		Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
1	4.2	4.84	2.26	5.57	3.44
2	4.7	5.59	2.67	6.55	3.88
3	5	5.83	2.80	6.16	4.01
4	6.2	7.69	3.86	6.43	5.14
5	5.3	6.90	3.45	5.04	4.74
6	8	11.23	5.94	7.72	7.35
7	9	12.70	6.78	8.30	8.22
8	10.7	15.30	8.10	11.27	9.60
9	10.9	15.57	8.23	11.50	9.74
10	10.4	12.58	6.56	9.05	7.91
11	10.6	11.67	5.93	8.01	7.21
12	9.7	10.53	5.31	7.28	6.57
13	12	13.49	6.91	11.01	8.23
14	9.6	12.79	6.70	9.58	8.12
15	8.6	11.32	5.90	8.71	7.27
16	8	10.13	5.28	8.10	6.60
17	8.8	10.28	5.34	8.72	6.63
18	9.9	11.10	5.73	9.77	7.00
19	10	12.25	6.30	11.51	7.64
20	11	15.20	7.96	15.17	9.43
21	11	14.52	7.54	12.72	8.96
22	11.1	15.27	7.92	14.33	9.39
23	11	15.36	7.96	14.21	9.47

Secara umum besarnya faktor aman meningkat dengan bertambahnya kedalaman terowongan. Tetapi tidak selalu terowongan dengan kedalaman ( $h$ ) yang lebih dalam mempunyai faktor aman yang lebih besar. Pengaruh jenis tanah juga berpengaruh terhadap nilai faktor aman, karena berat volume tanah dan juga kuat geser tanah sepanjang tanah di atas terowongan berpengaruh terhadap besarnya gaya yang menahan *uplift* ( $R$ ). Sehingga tidak hanya disebabkan oleh kedalaman terowongan, bergantung dengan jenis tanahnya faktor aman terhadap *uplift* bisa lebih tinggi atau bisa lebih rendah.

Nilai faktor aman yang paling rendah diperoleh pada *section* 1 dengan kondisi air banjir dengan nilai SF 2.26. Kondisi yang memiliki nilai faktor aman paling rendah terdapat pada kasus 2, hal ini disebabkan oleh tinggi air ( $hw$ ) yang paling tinggi dibandingkan dengan kondisi lainnya. Tinggi air yang semakin tinggi akan mengakibatkan turunnya nilai  $R$ . Sehingga dapat disimpulkan bahwa *section* terowongan yang memiliki faktor aman paling rendah adalah yang *section* yang memiliki kedalaman terowongan yang cukup dekat dengan permukaan tanah, memiliki jenis tanah yang mempunyai kuat geser tanah yang rendah, dan yang terakhir memiliki ketinggian air tanah yang tinggi.

#### 4.5 Pengaruh Stratigrafi Tanah terhadap Kestabilan Terowongan

Pengaruh stratigrafi bawah tanah terhadap kestabilan terowongan bisa kita ketahui dengan membandingkan beberapa kondisi bawah permukaan. Perbandingan ini akan menggunakan kondisi kasus 3, dimana air tanah mengikuti kondisi air tanah saat pemboran. Parameter yang akan divariasikan adalah jenis tanah, yang terdiri dari tanah hasil korelasi, tanah lempung N-SPT rendah, lanau N-SPT rendah, lanau N-SPT tinggi, dan pasir N-SPT tinggi. Pada perbandingan ini terowongan akan berada pada satu jenis tanah saja, hal ini dilakukan untuk memudahkan melihat perbedaan kestabilan masing-masing tanah. Tabel 3 menunjukkan perbedaan nilai kestabilan terowongan jika terowongan berada dalam satu jenis tanah saja.

**Tabel 3:** Hasil perbandingan kestabilan terowongan dengan jenis tanah yang berbeda

Metode	Hasil korelasi	Lempung N-SPT < 20	Lanau N-SPT < 20	Lanau N-SPT > 20	Pasir N-SPT > 20
COB Commissie (kN/m <sup>2</sup> )	min: 128,56	min: 145,70	min: 121,64	min: 119,29	min: 141,3
	max: 171,25	max: 186,87	max: 159,31	max: 166,38	max: 157,2
Carranza-Torres (kN/m <sup>2</sup> )	80,61	91,91	79,32	70,71	108,52
Faktor aman <i>uplift</i>	11,27	7,86	13,39	13,66	14,07

Hal ini bisa dilihat pada metode kestabilan tubuh terowongan Carranza-Torres (2013). Berdasarkan stratigrafi hasil korelasi data bor, tubuh terowongan paling tidak harus menahan gaya sebesar 80,61 kN/m<sup>2</sup>, jika terowongan berada pada tanah lempung dengan N-SPT rendah maka gaya yang dibutuhkan *lining* terowongan menjadi 91,91 kN/m<sup>2</sup>. Sedangkan jika terowongan berada pada tanah yang relatif kuat seperti pada lanau N-SPT tinggi, maka gaya dukung terowongan berkurang menjadi 70,71 kN/m<sup>2</sup>. Hal yang menarik terjadi jika terowongan berada pada tanah pasir dengan N-SPT tinggi, seharusnya tanah pasir memiliki kekuatan dukung yang lebih besar dari pada lanau, akan tetapi pada kasus ini jika terowongan berada pada tanah pasir maka daya dukung yang dibutuhkan terowongan meningkat menjadi 108,52 kN/m<sup>2</sup>. Hal ini bisa terjadi dikarenakan tanah pasir tidak memiliki kohesi ( $c = 0$ ), sehingga pada perhitungan kestabilan metode Carranza-Torres (2013) memperoleh nilai daya dukung *lining* terowongan yang lebih besar.

Pada stabilitas terowongan saat penggalian semakin lemah tanah tempat terowongan berada maka tekanan minimum dari penggalian akan semakin besar. Hal ini bisa dilihat pada tanah lempung N-SPT rendah yang membutuhkan tekanan minimal sebesar 145,7 kN/m<sup>2</sup>, sedangkan pada tanah yang relatif lebih kuat yaitu lanau N-SPT tinggi hanya membutuhkan tekanan minimal sebesar 119,29 kN/m<sup>2</sup>. Dalam kasus ini tanah pasir kembali menunjukkan nilai yang sedikit berbeda dimana tekanan minimal terowongan saat penggalian pada tanah pasir sebesar 141,3 kN/m<sup>2</sup>. Hal ini kembali disebabkan oleh tidak adanya kohesi pada pasir. Jika melihat rumus tekanan minimal metode COB Commissie pada Persamaan (1), maka dapat diketahui bahwa nilai kohesi berfungsi untuk menurunkan tekanan minimum terowongan. Karena nilai kohesi dari tanah pasir ini adalah nol, maka tidak ada faktor pengurang dalam tekanan minimal, yang kemudian mengakibatkan besarnya nilai tekanan minimal pada tanah pasir ini.

Pada nilai faktor aman terowongan terhadap gaya angkat (*uplift*), tanah lempung dengan N-SPT rendah memiliki faktor aman terendah sedangkan tanah pasir N-SPT tinggi memiliki faktor aman yang paling tinggi. Berbeda dengan sebelumnya kali ini tanah pasir merupakan tanah yang paling baik jika ditinjau dari faktor aman *uplift*. Hal ini dikarenakan tanah pasir memiliki nilai kuat geser yang cukup tinggi, dan nilai kuat geser tanah akan sangat mempengaruhi besarnya faktor aman *uplift*.

## 5. KESIMPULAN

Korelasi tanah dibagi menjadi menjadi lima satuan tanah, berdasarkan jenis tanah dan juga nilai N-SPT. Terdiri dari Lempung N-SPT rendah, lanau N-SPT rendah, Lanau N-SPT tinggi, pasir N-SPT rendah, dan pasir N-SPT tinggi. Nilai N-SPT pada daerah ini cukup baik, pada kedalaman 13 meter nilai N-SPT >30. Metode terbaik untuk menghitung tekanan minimal maupun maksimal dari muka terowongan masih belum dapat disimpulkan, dikarenakan kurangnya data muka air tanah pada saat penggalian terowongan. Walaupun demikian metode Leca & Dormieux model S1 (1990) dan COB commissie L510 (1996) memiliki hasil yang cukup mendekati hasil pembacaan di lapangan. Gaya yang paling besar dalam menekan terowongan adalah sebesar 137,93 kN/m<sup>2</sup>. Sedangkan kapasitas dukung *lining* terowongan adalah 726 kN/m<sup>2</sup>, sehingga bisa dikatakan tubuh terowongan cukup kuat untuk mendukung beban tanah dan beban permukaan. Stabilitas terowongan terhadap gaya angkat memiliki faktor aman 2,26.

Pengaruh stratigrafi bawah tanah terhadap kestabilan terowongan bergantung pada parameter tanah. Pada tanah lempung yang memiliki  $\phi$  dan  $c$  yang kecil akan membutuhkan gaya dukung tubuh terowongan sebesar  $91,91 \text{ kN/m}^2$ . Sedangkan pada tanah pasir daya dukung tubuh terowongan yang diperlukan menjadi  $108,52 \text{ kN/m}^2$ , ini disebabkan karena pasir tidak memiliki nilai kohesi. Dari hal ini bisa dikatakan bahwa semua perhitungan tergantung dari hasil korelasi bawah permukaan, karena hasil korelasi mempengaruhi tebal tipisnya lapisan tanah, posisi terowongan dan juga tinggi muka air. Sehingga untuk memberikan perhitungan yang akurat diperlukan korelasi bawah permukaan yang akurat dan sesuai dengan kaidah ilmu geologi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Carranza-Torres, C., Reich, T dan Saftner, D. (2013). Stability of shallow circular tunnels in soils using analytical and numerical models, *Proceedings of the 61st Minnesota Annual Geotechnical Engineering Conference*. United States.
- Bouwen, C.O. (1996). *L 510-01 Inventarisatie Ontwerpmethoden Boortunnels Voor weg- en rail-Verbindingen*, Werkrapport COB-uitvoeringscommissie
- Hakim, I. (2016). Analisis Stabilitas Muka Terowongan Berdasarkan Metode Earth Pressure Balance Studi Kasus: Terowongan MRT Jakarta. *Skripsi*. Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Leca, E dan Dormieux, L. (1990). Upper and Lower Bound Solution for the Face Stability of Shallow Circular tunnel in Frictional. *Geotechnique*. Vol.40 pp.581-606.
- Turkandi, T., Sidarto, Agustiyanto, D.A., dan Hadiwidjono. (1992). *Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Jawa, skala 1:100.000*, Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jenderal Geologi dan Sumberdaya Mineral, Pusat Pengembangan Geologi, Bandung.