

Implikasi Percepatan Konsolidasi menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) terhadap Biaya Konstruksi Awal dan Biaya Pemeliharaan Infrastruktur Jalan Tol

Gibranius Berutu

Engineering Planning Group, PT Jasa Marga (Persero) Tbk.

Plaza Tol Taman Mini Indonesia Indah, Jakarta – 13550 E-mail: gibranius.berutu@jasamarga.co.id

Abstrak

Pembangunan infrastruktur jalan tol selalu menemui tantangan geoteknik yang dihadapkan dengan pengambilan keputusan berbasis biaya. Makalah ini menyajikan hasil simulasi konstruksi jalan tol diatas tanah kompresibel di daerah Subang, Jawa Barat yang berada dalam zona dataran aluvial Jawa Utara. Penurunan tanah dihitung dengan teori konsolidasi satu dimensi yang kemudian dibandingkan aspek waktu dan biaya antara konstruksi tanpa dan dengan percepatan konsolidasi menggunakan *Prefabricated Vertical Drain* (PVD). Hasil simulasi menunjukkan konstruksi jalan yang konsolidasinya dipercepat menggunakan PVD, berimplikasi pada biaya konstruksi awal yang lebih tinggi, namun relatif lebih efisien selama masa pengoperasian sehingga secara keseluruhan memberikan performa yang lebih baik.

Kata-kata Kunci: Infrastruktur, jalan tol, konsolidasi tanah, prefabricated vertical drain, tanah lunak.

Abstract

The development of toll road infrastructure always faces geotechnical issues related to cost-based decision-making. This paper presents the simulation results of toll road constructed on compressible soil located at Subang regency, West Java, which comprises the alluvial plain zone of northern Java. Computation of soil settlement using one-dimensional consolidation theory, both time and cost aspects for construction with and without accelerated consolidation using *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) are following compared. Findings indicated that the road construction where PVD applies for accelerating its consolidation has higher initial construction costs, however relatively more efficient over the operation period for doing maintenance program. In general, it provides better performance.

Keywords: Infrastructure, prefabricated vertical drain, soft soil, soil consolidation, toll road.

1. Pendahuluan

Infrastruktur jalan tol berperan melayani jasa distribusi utama yang mempunyai spesifikasi bebas hambatan agar dicapai tingkat efisiensi yang maksimal dalam penggunaan sumber daya. Oleh karena itu, dalam perancangannya berlaku kriteria geometrik dengan kecepatan rencana yang tinggi untuk memastikan waktu tempuh dan keselamatan perjalanan. Tidak jarang konstruksinya harus melewati topografi menantang dan/atau kondisi tanah yang sulit.

Permasalahan tanah lunak sering dijumpai dalam konstruksi jalan, yaitu masalah penurunan tanah. Dampak yang dirasakan adalah permukaan perkerasan yang bergelombang, beda tinggi antara jalan dengan stuktur jembatan/underpass, atau bahkan amblas. Muntaha (2011) meneliti kerusakan pada ruas jalan raya Babat-Bojonegoro-Padangan yang mengalami amblas parsial / merata di seluruh ruas jalan yang disebabkan tanah dasar di bawah konstruksi jalan memiliki konsistensi lunak. Kuswanda (2015) juga mengemukakan beberapa dokumentasi kerusakan jalan seperti turunnya oprit jembatan, longsor timbunan

badan jalan, keretakan perkerasan dan miringnya tiang lampu jalan yang teridentifikasi pada konstruksi jalan di atas lempung lunak. Hal tersebut tentu akan membahayakan pengguna jalan (Pradana, Budiman, & Andriyani, 2014), khususnya pada jalan tol yang dilalui kendaraan kecepatan tinggi, bila tidak ditangani dengan baik.

Penurunan pada tanah kompresibel biasanya terjadi dalam waktu yang sangat lama, bisa belasan atau bahkan puluhan tahun amblas (Bergado, et al, 1990). Hal itu terjadi karena tanah lunak berbutir halus (lempung dan lanau) permeabilitasnya rendah sehingga air yang ada dalam pori tanah memerlukan waktu yang lama untuk terdisipasi sedemikian sehingga tanah termampatkan karena dibebani.

Pemasangan penyalir vertikal dapat memperpendek jarak aliran air dalam pori tanah, sehingga konsolidasi lapisan tanah lunak dapat dipercepat (Za-Chieh & Penchi, 2005). Penyalir vertikal dapat berupa lubang bor yang diisi pasir dengan gradasi tertentu atau yang lebih umum dipakai saat ini adalah *Prefabricated Vertical Drains* (PVD) atau *wick drain* yang terbuat

dari inti plastik yang dibungkus *geotextile*. Waktu penurunan yang dipersingkat selama masa konstruksi akan menurunkan risiko pemeliharaan saat jalan tol sudah beroperasi untuk menjamin kuantitas layanan dan keselamatan berkendara.

2. Studi Pustaka

Chairani (2020) mengkaji efek penggunaan PVD pada tanah aluvial. Estimasi penurunan dihitung dengan dua pendekatan, yaitu korelasi N-SPT dan data laboratorium untuk mencari parameter tanah yang akan digunakan pada analisis selanjutnya. Hasil kajian menunjukkan perhitungan menggunakan data laboratorium lebih mendekati hasil pengukuran *settlement* di lapangan. Percepatan konsolidasi dirancang dengan instalasi PVD pola segitiga, jarak 150cm dan dikombinasikan dengan timbunan bertahap.

Aradea (2019) melakukan tinjauan konfigurasi PVD dan koefisien konsolidasi terhadap waktu penurunan pada Proyek PLTU Patimban di atas tanah lunak setebal 12.5m berlokasi di Subang, Jawa Barat. Berdasarkan hasil analisa, penurunan total sebesar 6.62m baru akan selesai setelah 8 tahun. Berdasarkan penelitian, Semakin kecil nilai konsolidasi arah radial maka semakin lama penurunan terjadi, semakin rapat jarak pemasangan PVD maka semakin cepat penurunan terjadi, dan penurunan yang terjadi akibat konfigurasi segitiga lebih cepat dibandingkan konfigurasi persegi. Pada kondisi PVD dipasang dengan pola segitiga berjarak 1.8m dan besaran $c_h = 1.25c_v$, waktu konsolidasi dapat dipercepat menjadi 2.39 bulan.

Pilger et al (2020) melakukan simulasi dampak lingkungan dan *cost overrun* yang terjadi akibat penyesuaian-penyesuaian pada suatu proyek konstruksi jalan. Salah satu insight penting dalam penelitian ini adalah jika data lapangan saat penyusunan studi kurang memadai, maka akan menimbulkan potensi perubahan saat proyek sudah berjalan. Modifikasi dimaksud berakibat pada perubahan jadwal konstruksi hingga penundaan penyelesaian, perubahan nilai kontrak serta efek lingkungan. Aktivitas kritis yang memberikan dampak signifikan adalah pekerjaan tanah dan pekerjaan perkerasan jalan.

3. Metode dan Batasan Penelitian

Konsolidasi tanah adalah pengurangan gradual volume tanah berpermeabilitas rendah yang jenuh air akibat teralirkannya air pori seiring dengan meningkatnya tegangan total tanah, yang prosesnya terus berlangsung sampai dengan air pori habis terdisipasi (Craig, 2004). Data yang digunakan untuk perhitungan konsolidasi dalam kajian ini didapatkan dari data primer berupa hasil bor, uji SPT dan uji laboratorium. Profil lapisan dan properti tanah untuk analisis berdasarkan data uji laboratorium dan korelasi empiris dari N-SPT. Perhitungan konsolidasi dilakukan menggunakan teori konsolidasi satu dimensi dengan memperhatikan pengaruh distribusi tegangan menurut kedalaman tanah akibat beban yang terjadi dipermukaan. Waktu

konsolidasi dan besaran penurunan *finish grade* jalan tol kemudian dihitung untuk dua kondisi, yaitu tanpa PVD dan dengan PVD. Untuk mengembalikan *finish grade* jalan yang telah turun akibat konsolidasi tanah dasar pada masa operasional, maka dilakukan *overlay* aspal dengan ketebalan kelipatan 5 cm untuk kemudahan konstruksi di lapangan. Biaya total yang dikeluarkan dihitung menggunakan konsep *time value of money*, kemudian nilai *present value*-nya dibandingkan antara kondisi tanpa PVD dan dengan PVD mana di antara keduanya yang nilainya lebih rendah.

3.1 Teori konsolidasi satu dimensi

Penimbunan badan jalan akan menambah tegangan vertikal tanah menurut kedalaman sebesar $\Delta\sigma$ dengan kondisi yang dianggap berlaku bahwa regangan arah lateral pada lapisan tanah lunak tidak terjadi, sehingga pemampatan berlaku pada arah vertikal saja (satu arah). Persamaan berikut diturunkan dari kurva hubungan e -log σ untuk menghitung penurunan akibat perubahan tegangan yang dialami tanah,

Normally consolidated soil ($\sigma'_v = \sigma_c$)

$$S_c = \frac{H}{1 + e_0} \left(C_c \log \left(\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma}{\sigma'_v} \right) \right) \quad (1)$$

Over consolidated soil dengan $\sigma'_v + \Delta\sigma \leq \sigma_c$

$$S_c = \frac{H}{1 + e_0} \left(C_r \log \left(\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma}{\sigma'_v} \right) \right) \quad (2)$$

Over consolidated soil dengan $\sigma'_v + \Delta\sigma \geq \sigma_c$

$$S_c = \frac{H}{1 + e_0} \left(C_r \log \left(\frac{\sigma_c}{\sigma'_v} \right) \right) + \frac{H}{1 + e_0} \left(C_c \log \left(\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma}{\sigma_c} \right) \right) \quad (3)$$

dengan,

S_c = penurunan konsolidasi (m)

H = tebal lapisan tanah (m)

e_0 = angka pori awal

C_c = indeks pemampatan tanah

C_r = indeks pemampatan kembali

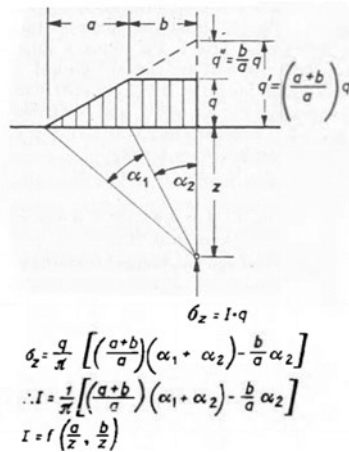
σ_c = tegangan prakonsolidasi (kg/cm^2)

Tegangan prakonsolidasi σ_c didapatkan dari kurva e -log σ (hasil pengujian spesimen tanah di laboratorium) menggunakan metode grafis yang diusulkan Casagrande. Distribusi tegangan pada lapisan tanah menurut kedalaman akibat tambahan beban q pada permukaan tanah diestimasi menggunakan nilai pengaruh I yang diusulkan oleh Osterberg (1975), yang mana I merupakan fungsi dari rasio lebar timbunan terhadap kedalaman, sehingga besaran tambahan tegangan pada tiap kedalaman adalah $\Delta\sigma = I \cdot q$.

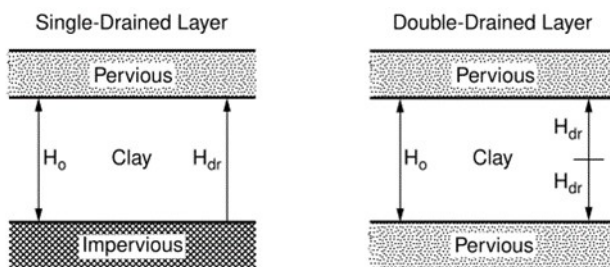
Waktu pencapaian konsolidasi dihitung dengan persamaan berikut ini,

$$t = \frac{H_{dr}^2 T_v}{c_v} \quad (4)$$

dengan,



Gambar 1. Persamaan nilai pengaruh tegangan vertikal
(Osterberg, 1975)



Gambar 2. Kondisi pengaliran pada tinjauan permasalahan konsolidasi tanah

- t = waktu pencapaian konsolidasi (detik)
 H_{dr}^2 = jarak terjauh pengaliran air pori (m)
 T_v = faktor waktu
 C_v = koef. konsolidasi vertikal (cm²/detik)

Secara sederhana, terdapat dua tipe pengaliran yang dikenal dengan *single-drained layer* dan *double-drained layer*. Pada *single-drained layer* terdapat batas lapisan kedap air disalah satu sisinya dan lapisan tidak kedap air disisi lainnya sedemikian sehingga H_{dr} adalah setebal lapisan tanah kompresibel, sedangkan pada *double-drained layer*, lapisan tanah lunak berada diantara dua lapisan tidak kedap air disetiap sisi sehingga H_{dr} adalah setengah dari tebal lapisan tanah lunak. Ilustrasi kondisi pengaliran pada permasalahan konsolidasi ditunjukkan pada **Gambar 2**.

Menurut teori konsolidasi satu dimensi Terzaghi, faktor waktu T_v dapat dihitung berdasarkan persamaan empiris terhadap derajat konsolidasi U sebagai berikut,

$$\text{untuk } U < 0.6, T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \quad (5a)$$

$$\text{untuk } U < 0.6, T_v = -0.933 \log(1 - U) - 0.085 \quad (5b)$$

3.2 Waktu konsolidasi dengan penyalir vertikal

Persamaan Barron (Barron, 1948) digunakan untuk menghitung waktu pencapaian konsolidasi dengan adanya penyalir vertikal atau PVD sebagai berikut,

$$t = \frac{d_e^2}{8c_h} F_n \ln \frac{1}{1 - U_h} \quad (6a)$$

$$F_n = \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \left(\ln(n) - \frac{3}{4} + \frac{1}{n^2} \right) \quad (6b)$$

$$U_h = 1 - e \left(\frac{-8T_h}{F_n} \right) \quad (6c)$$

$$T_h = \frac{c_h \cdot t}{d_e^2} \quad (6d)$$

dengan

d_e = diameter pengaruh per kolom drainase

1.13 x jarak PVD pola segiempat (m)

1.06 x jarak PVD pola segitiga (m)

d_w = diameter ekivalen material PVD (cm)

c_h = koef. konsolidasi horizontal, sekitar 1.2 - 3 c_{hv} (cm²/detik)

U_h = derajat konsolidasi horizontal

F_n = faktor jarak penyalir vertikal

n = rasio diameter, d_e / d_w

3.3 Batasan penelitian

Pada kajian ini, perhitungan penurunan tanah dibatasi pada tinjauan konsolidasi primer dan tidak meninjau pengaruh konsolidasi sekunder. Selain itu, analisis dilakukan terhadap data perencanaan, sehingga bersifat prediktif yang perlu dilakukan validasi melalui pengukuran lapangan saat masa pelaksanaan konstruksi.

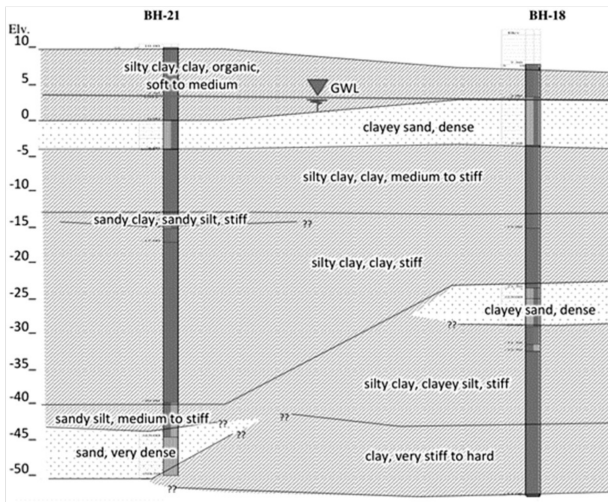
4. Data

4.1 Gambaran lokasi proyek

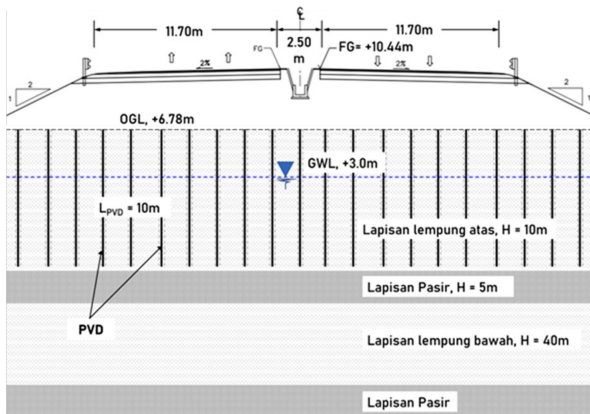
Lokasi studi yang ditinjau berjarak 10 - 12 kilometer dari pantai utara Jawa yang termasuk dalam wilayah administrasi Kabupaten Subang. Rencana trase berada pada zona dataran aluvial Jawa Utara dengan topografi yang datar. Berdasarkan peta geologi, sebagian trase melewati formasi lempung endapan pantai Rawagempol (Qac) dan formasi lempung endapan dataran banjir (Qaf) dengan tebal endapan mulai dari 8 sampai dengan 20 meter. Tata guna lahan dominan disekitar proyek adalah persawahan dan masih minim kawasan permukiman maupun perniagaan.

4.2 Data tanah

Lapisan tanah sebagaimana dideskripsikan pada **Gambar 3** dan untuk keperluan analisis data bor BH-21 akan digunakan. Tanah kompresibel bagian atas teridentifikasi memiliki ketebalan ±10m, kemudian di bawahnya dijumpai lapisan pasir setebal ±5m. Tanah kompresibel yang kedua dengan ketebalan ±40m berada di antara dua lapisan pasir. Pada peristiwa konsolidasi alami, air pori dalam lapisan lempung yang pertama akan mengalir ke lapisan pasir sebelah bawah (*single-drained layer*), sedangkan air pori pada lapisan lempung yang kedua mengalir ke lapisan pasir atas maupun bawah (*double-drained layer*). Parameter kompresibilitas diperoleh dari hasil uji laboratorium



Gambar 3. Lapisan tanah



Gambar 4. Potongan melintang badan jalan dan skema PVD (tanpa skala)

dan juga korelasi empiris. Rangkuman parameter yang digunakan dalam analisis diberikan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tegangan prakonsolidasi diperoleh dari kurva e -log σ hasil pengujian spesimen tanah pada lapisan lempung atas. Dengan menggunakan metode Cassagrande nilai σ_c diketahui adalah sebesar 1.14 kg/cm². Perbandingan nilai σ_c terhadap tegangan tanah yang terjadi disetiap kedalaman akan menentukan penggunaan persamaan (1), (2) atau (3) saat menghitung penurunan tanah.

4.3 Penyalir vertikal

PVD disimulasikan terpasang dengan konfigurasi segitiga dan jarak as ke as adalah 200 cm. Diameter ekuivalen dari material PVD ditentukan sebesar 10 cm. PVD dipasang sampai kedalaman 10 m atau setebal

lapisan lempung atas. Pada permukaan tanah, *sand blanket* digelar setebal 80 cm. Ujung atas PVD dihubungkan dengan pipa *horizontal drain* sebagai antisipasi pengaliran *sand blanket* yang kurang maksimal karena adanya kandungan lumpur dalam pasir.

4.4 Timbunan badan jalan

Elevasi *finish grade* (FG) jalan direncanakan pada +10.44 m dan elevasi muka tanah asli (OGL) adalah +6.78 m (Gambar 4). Perkerasan didesain dengan jenis fleksibel dan tebal rencana struktur adalah 0.66 m untuk melayani beban lalu lintas jalan tol mulai dari Golongan I (kendaraan penumpang roda empat) hingga Golongan V (truk dengan lima gandar atau lebih). Beban lalu lintas yang di simulasikan dalam analisis penurunan adalah sebesar 1.5 ton/m².

5. Hasil Analisis

5.1 Penurunan total

Berdasarkan hasil perhitungan, total penurunan yang terjadi adalah 1.10 m yang akan selesai lebih dari 22.24 tahun. Pekerjaan konstruksi dijadwalkan berlangsung dalam waktu 18 bulan. Jika konsolidasi dibiarkan berlangsung secara alami, maka pada akhir masa konstruksi derajat konsolidasi gabungan yang terjadi baru mencapai sekitar 41.1%, yaitu 46.7% lempung atas dan 27% lempung bawah, sehingga berpotensi menimbulkan masalah saat jalan tol sudah beroperasi, seperti retak, amblas, beda tinggi dan ketidakrataaan jalan tol sehingga sangat membahayakan kendaraan yang melaju dengan kecepatan tinggi.

Bilamana penurunan dipercepat dengan pemasangan PVD pada lapisan lempung atas, maka pada akhir masa konstruksi derajat konsolidasi lempung atas tercapai sekitar 92% sedangkan pada lempung bawah tetap 27% sehingga derajat konsolidasi gabungan adalah 65.5%. Tabel 2 menjelaskan perbandingan derajat konsolidasi yang dicapai pada lapisan lempung atas antara secara alami tanpa PVD dan dengan yang dipasang PVD, sedangkan Gambar 5 memperlihatkan plot perbedaan waktu yang signifikan antara penurunan yang dipercepat dengan PVD dan yang tidak dipasang PVD. Total penurunan pada Gambar 5 adalah gabungan lapisan lempung atas dan lempung bawah.

5.2 Perbandingan biaya

Perbandingan biaya ditinjau pada segmen jalan sepanjang 500m, yaitu biaya konstruksi awal dan biaya pemeliharaan saat masa operasional. Biaya konstruksi awal mencakup biaya untuk membangun badan jalan, perkerasan, dan marka untuk kasus tanpa PVD, serta ditambah biaya pekerjaan PVD (*sand blanket*,

Tabel 1. Parameter kompresibilitas tanah

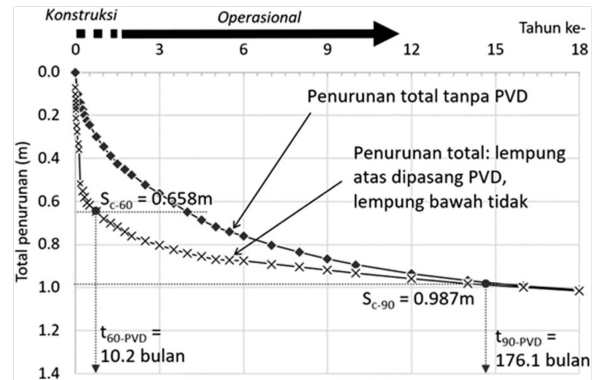
No	Layer	C_c	C_r	e_o	C_v (cm ² /detik)
1	Lempung pertama / atas	1.37	0.47	3.45	3.6x10-3
2	Lempung kedua / bawah	0.25 - 1.37	0.04 - 0.47	1.64 - 3.04	3.6x10-3 - 5.4x10-3

Tabel 2. Perbandingan derajat konsolidasi lapisan lempung atas

t bulan	U lempung atas	
	Tanpa dipasang PVD	Dipasang PVD
1	11.0%	46.3%
2	15.6%	73.1%
6	26.9%	85.6%
12	38.1%	89.3%
18	46.7%	92.0%
24	49.0%	95.5%
48	69.5%	99.2%
72	81.9%	99.7%
216	99.2%	99.7%

pemipaan *horizontal drain* dan *vertical drain*) untuk kasus dengan PVD. Biaya pemeliharaan yang diperhitungkan adalah pekerjaan pelapisan ulang atau *overlay* aspal untuk mengembalikan elevasi permukaan jalan yang mengalami penurunan akibat konsolidasi tanah di bawah timbunan jalan kembali ke elevasi *finish grade* rencana.

Pada akhir masa konstruksi, sebelum perkerasan *flexible* digelar di atas *subgrade*, diperlukan tambahan lapis



Gambar 5. Plot penurunan total lempung atas dan lempung bawah vs waktu

timbunan agar *finish grade* sesuai dengan rencana. Untuk timbunan yang tidak dipasang PVD, diperlukan tambahan lapis tanah timbunan setebal 0.42m, sedangkan untuk yang dipasang PVD perlu ditambah setebal 0.72m. Timbunan yang dipasang PVD memerlukan *leveling* lapis timbunan tanah lebih banyak karena derajat konsolidasi yang tercapai sebelum

Tabel 3. Perhitungan pelapisan ulang pada masa operasional

t bulan	Elevasi <i>Subgrade</i> setelah penambahan layer pada akhir masa konstruksi				Elevasi <i>Finish Grade</i> setelah <i>leveling</i> ACWC pada masa operasi							
	Tanpa PVD		Dengan PVD		Tanpa PVD				Dengan PVD			
	tebal layer tambahan	Elevasi	tebal layer tambahan	Elevasi	FG	Target Overlay	Over-layer	FG overlay	FG	Target Overlay	Ove-layer	FG overlay
bulan	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m
0.5		+09.73		+09.53								
1		+09.68		+09.47								
1.5		+09.66		+09.42								
2		+09.64		+09.27								
3		+09.61		+09.23								
6		+09.54		+09.16								
12		+09.43		+09.10								
18	0.4239	+09.78	0.7188	+09.78	+10.44				+10.44			
24		+09.73		+09.74	+10.39	0.0516	0.05	+10.44	+10.40	0.0413	0.05	+10.45
36		+09.64		+09.70	+10.35	0.0884	0.10	+10.45	+10.41	0.0352	0.05	+10.46
48		+09.56		+09.66	+10.37	0.0848	0.05	+10.42	+10.42	0.0228	-	+10.42
60		+09.49		+09.63	+10.35	0.0685	0.10	+10.45	+10.39	0.0496	0.05	+10.44
72		+09.44		+09.62	+10.40	0.0431	0.05	+10.45	+10.43	0.0077	-	+10.43
84		+09.40		+09.61	+10.41	0.0417	0.05	+10.46	+10.42	0.0223	-	+10.42
96		+09.37		+09.60	+10.43	0.0331	-	+10.43	+10.41	0.0345	0.05	+10.46
108		+09.34		+09.58	+10.40	0.0319	0.05	+10.45	+10.44	0.0003	-	+10.44
120		+09.31		+09.57	+10.42	0.0269	-	+10.42	+10.43	0.0149	-	+10.43
144		+09.27		+09.54	+10.38	0.0425	0.05	+10.43	+10.40	0.0405	0.05	+10.45
168		+09.24		+09.52	+10.40	0.0316	0.05	+10.45	+10.43	0.0121	-	+10.43
192		+09.21		+09.50	+10.42	0.0241	-	+10.42	+10.41	0.0303	0.05	+10.46
216		+09.19		+09.49	+10.40	0.0188	0.05	+10.45	+10.45	-0.0044	-	+10.45

Tabel 4. Perhitungan *present value* biaya pada basis tahun pertama dengan inflasi 3.5% (Rp Miliar)

No	Simulasi	Tahun ke-								
		1*	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Tanpa PVD	26.30	2.80	5.62	2.83	5.68	2.85	2.87	0.00	2.89
2	Dengan PVD	38.27	2.80	2.81	0.00	2.84	0.00	0.00	2.88	0.00

No	Simulasi (<i>lanjutan</i>)	Tahun ke- (<i>lanjutan</i>)									Total
		10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1	Tanpa PVD	0.00	0.00	2.94	0.00	2.97	0.00	0.00	0.00	3.02	60.77
2	Dengan PVD	0.00	0.00	2.94	0.00	0.00	0.00	2.99	0.00	0.00	55.53

perkerasan digelar adalah lebih tinggi daripada timbunan tanpa PVD.

Konsolidasi akan terus berjalan selama masa operasional jalan tol. Hal tersebut perlu dicermati, karena hanya lapisan lempung atas yang dipasang PVD (**Gambar 4**), sehingga konsolidasi lapisan lempung bawah tetap akan terjadi secara alami dalam waktu yang lama. Penurunan *finish grade* diperiksa menurut waktu dan kemudian ditentukan kapan permukaan jalan harus dilapis ulang untuk mengembalikan ke elevasi rencana. Rangkuman perhitungan ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Overlay Asphalt Concrete Wearing Course (ACWC) digelar dengan ketebalan 5cm atau kelipatannya, kemudian dilakukan simulasi berapa biaya yang dikeluarkan pada masa operasional akibat kegiatan pemeliharaan ini. Asumsi besaran inflasi yang digunakan dalam perhitungan adalah 3.5% per tahun dan eskalasi sektor konstruksi sebesar 4.0% per tahun.

Simulasi dilakukan selama 18 tahun atau 216 bulan yang ditunjukkan pada **Tabel 4**. Hasil perhitungan pada segmen jalan sepanjang 500 meter menunjukkan bahwa biaya konstruksi yang konsolidasinya dipercepat menggunakan PVD lebih tinggi Rp 10.97 Miliar dibandingkan tanpa PVD karena biaya konstruksi awal pada segmen jalan yang dipasang PVD adalah Rp 38.27 Miliar sedangkan tanpa PVD diperlukan biaya sebesar Rp 26.30 Miliar.

Pada masa operasional (mulai tahun ke-2), badan jalan yang penurunannya dibiarkan mengikuti waktu alami membutuhkan *overlay* ACWC dengan volume yang lebih banyak dan frekuensi yang lebih sering dibandingkan dengan jalan yang konsolidasinya dipercepat menggunakan PVD. Secara keseluruhan, total biaya yang dikeluarkan untuk pembangunan dan pemeliharaan selama 18 tahun lebih efisien jika konsolidasi dipercepat dengan PVD, yang mana nilai *total present value*-nya adalah Rp 55.53 Miliar dibandingkan tanpa percepatan konsolidasi sebesar Rp 60.77 Miliar.

Frekuensi pekerjaan *overlay* yang sering artinya juga akan lebih sering mengganggu operasional jalan tol, mempertimbangkan *window time* pekerjaan pemeliharaan yang semakin lama semakin pendek karena *Volume-to-Capacity Ratio* (VCR) jalan tol yang cenderung akan naik seiring dengan pertumbuhan lalu

lintas harian yang melewati ruas jalan itu. Pekerjaan *overlay* setidaknya akan mengurangi kapasitas jalur saat kegiatan berlangsung, karena diperlukan penutupan lajur di lokasi kerja untuk manajemen keselamatan kerja.

6. Kesimpulan

Beberapa hal yang menjadi simpulan hasil studi ini adalah:

1. Penggunaan PVD mempersingkat waktu konsolidasi, sehingga penurunan tanah yang relatif besar bisa dikonsentrasikan agar tercapai saat masa konstruksi;
2. Aplikasi PVD berdampak pada biaya konstruksi yang lebih tinggi, namun biaya pemeliharaan saat masa operasional relatif lebih efisien;
3. *Present Value* total biaya konstruksi dan pemeliharaan jalan tol yang konsolidasinya dipercepat menggunakan PVD, relatif lebih rendah dari pada yang dibiarkan terjadi secara alami atau tanpa PVD.

7. Disclaimer

Kesimpulan, pendapat, dan pandangan yang disampaikan oleh penulis dalam paper ini merupakan kesimpulan, pendapat, dan pandangan penulis dan bukan merupakan kesimpulan, pendapat, dan pandangan resmi PT Jasa Marga (Persero) Tbk.

Daftar Pustaka

- Aradea, T. M. (2019). *Pengaruh Jarak, Pola dan Koefisien Konsolidasi Horizontal terhadap Waktu Penurunan Menggunakan Metode Prefabricated Vertical Drain. II*, pp. 373-378. FTSP Universitas Trisakti.
- Barron, R. A. (1948). *Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells*. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 718-724.
- Bergado, D. T., Ahmed, S., Sampaco, C. L., & Balasubramaniam, A. S. (1990). *Settlements of Bangna-Bangpakong Highway on Soft Bangkok Clay*. *Journal of geotechnical engineering*, 116 (1), 136-155.

- Chairani, P. A. (2020). *Perancangan Efektivitas Perbaikan Tanah dengan Menggunakan Metode Prefabricated Vertical Drain*. *Indonesian Journal on Construction Engineering and Sustainable Development*, III(02), 110-115.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics (7th ed.)*. Spoon Press.
- Kuswanda, W. P. (2015). *Problematisasi Pembangunan Infrastruktur pada Tanah Lempung Lunak dan Alternatif Metoda Penanganannya*. *Semnas T. Sipil UNLAM "Pembangunan Berkelanjutan di Lahan Basah"*, (pp. 270-288). Banjarbaru.
- Muntaha, M. (2011). *Penelitian Kondisi Tanah Bawah Permukaan Jalan Raya Babat - Bojonegoro - Padangan*. *Jurnal Aplikasi*, 9(1), 24-33.
- Osterberg, J. O. (1975). *Influence Values for Vertical Stresses in a Semi-infinite Mass due to an Embankment Loading*. 393-394.
- Pilger, J. D., Machado, E. L., Lawisch-Rodriguez, A. d., Zappe, A. L., & Rodriguez-Lopez, D. A. (2020). *Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting*. (Z. Leng, Ed.) *Journal of Cleaner Production*(256), 1-12. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120731>
- Pradana, M. F., Budiman, A., & Andriyani, D. (2014). *Analisis Kecelakaan Lalu Lintas Jalan Tol Studi Kasus Ruas Jalan Tol Serang Timur - Merak KM 72 - KM 98*. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 3(2).
- Za-Chieh, M., & Penchi, L. (2005). Chapter 6. *Case Study of Ground Improvement Work at the Suvarnabhumi Airport of Thailand*. In *Geo-Engineering Book Series* (pp. 159-198). Elsevier .

