

Analisis Geoteknik pada Teknologi *Corrugated Mortar Busa Pusjatan (CMP)* dalam Perencanaan *Flyover Antapani*

SONNY RIANTAMA BAHARI, INDRA NOER HAMDHAN

Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional
Email: sonny.riantama@gmail.com

ABSTRAK

Jalan lintas atas (overpass) dapat dipilih untuk pengembangan jaringan jalan dalam mengurangi kemacetan yang diakibatkan oleh meningkatnya arus lalu lintas dan mengatasi konflik pada persimpangan sebidang. Pada tahun 2016 Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) telah melakukan sebuah Pilot Project Flyover Antapani di Kota Bandung dengan menggunakan teknologi struktur baja bergelombang yang dikombinasikan dengan mortar busa sebagai oprit jembatan, teknologi ini dikenal dengan nama Corrugated Mortar Pusjatan (CMP). Timbunan dengan menggunakan mortar busa dapat mengurangi besar penurunan yang terjadi dibandingkan dengan teknologi konvensional. Analisis dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 3D yang berbasis metode elemen hingga. Dari hasil analisis didapat bahwa penurunan seketika pada fondasi Flyover Antapani di Kota Bandung sudah memenuhi standar izin. Selain itu penggunaan teknologi CMP pada perencanaan Flyover Antapani yang digunakan pada jenis tanah lunak juga menunjukkan hasil serupa, sehingga efektif apabila dilaksanakan pada tanah lunak.

Kata kunci: *penurunan, mortar busa, teknologi CMP, PLAXIS 3D*

ABSTRACT

Overpass can be chosen as road network development to reduce traffic jam caused by increasing traffic flow and resolve conflict on intersection. In 2016 Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan) has done a Pilot Project Flyover Antapani in Bandung City using corrugated steel structure technology combined with foamed mortar as backfill, this technology was known as Corrugated Mortar Pusjatan (CMP). Foamed mortar embankment could reduce settlement compared to using conventional technology. Analysis was done using PLAXIS 3D program based on finite element method. It shows that immediate settlement on Flyover Antapani's foundation in Bandung City met the necessary standard. On the other side the use of CMP technology in Flyover Antapani design which applied to soft soil resulting a similar output, which will be effective if applied to soft soil.

Keywords: *settlement, foamed mortar, CMP technology, PLAXIS 3D*

1. PENDAHULUAN

Semakin berkembangnya teknologi konstruksi di Indonesia, menghasilkan beragam inovasi-inovasi baru dalam penerapannya. Pada beton misalnya, telah banyak mengalami modifikasi maupun substitusi pada bahan-bahan penyusunnya. Dalam studi kasusnya, tanah kohesi dapat diaplikasikan sebagai material campuran dengan mortar-busa. Material tersebut merupakan material setempat yang apabila dicampur dengan busa akan mengembang hingga empat kali volume awal sehingga kebutuhan material tidak banyak dan pengadaan material timbunan tidak perlu didatangkan dari lokasi lain. Keuntungan lain dari metode ini adalah nilai berat isi dan kekuatan dapat direncanakan sesuai kebutuhan. Penggunaan teknologi ini pada bidang konstruksi jalan telah berkembang dengan pesat terutama di Korea Selatan.

Dalam merencanakan sebuah konstruksi jalan raya, analisis geoteknik merupakan salah satu aspek yang sangat diperlukan untuk menunjang aspek perencanaan. Analisis geoteknik yang dilakukan pada penelitian ini adalah deformasi yang terjadi pada fondasi akibat beban yang ditimbulkan oleh beban lalu lintas dan beban timbunan. Analisis juga dilakukan untuk membandingkan penggunaan teknologi CMP pada tanah lunak. Proses pemodelan dilakukan dengan menggunakan program PLAXIS 3D yang berbasis Elemen Hingga.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi Corrugated Mortar Busa Pusjatan (CMP)

Secara umum, teknologi ini merupakan perpaduan antara material timbunan ringan mortar busa dengan struktur baja bergelombang (CSS) yang merupakan pengembangan dari konsep struktur baja-tanah. Sebelumnya struktur baja tanah hanya digunakan untuk kebutuhan saluran drainase saja. Seiring dengan berkembangnya zaman, struktur baja bergelombang mulai digunakan untuk berbagai struktur lain. Seperti struktur *underpass* maupun *overpass flyover*.

2.2 Mortar Busa Ringan

Mortar busa merupakan sebuah campuran berbahan dasar semen dengan air, busa, dan agregat halus. Campuran ini disebut mortar dikarenakan tidak adanya agregat kasar yang digunakan didalamnya. Busa dihasilkan dengan cara mencampur air dengan (*foam agent*) yang berasal dari protein nabati dengan menggunakan alat pembangkit busa (*foam generator*).

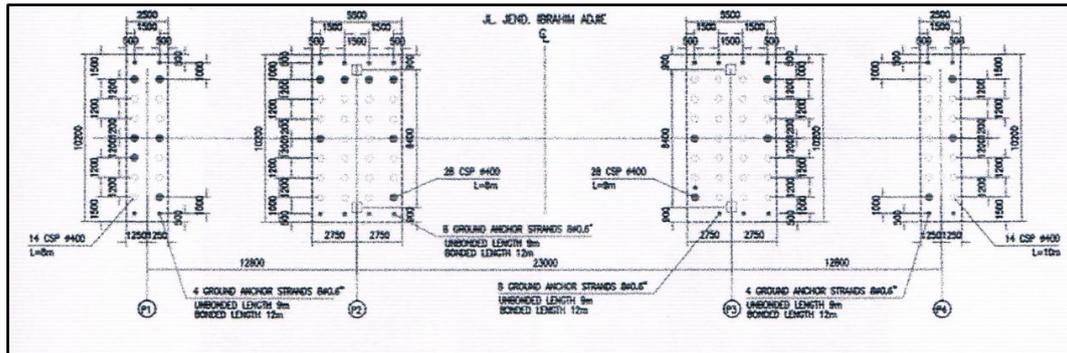
2.3 Struktur Baja Bergelombang (CSS)

Struktur baja bergelombang atau dalam istilah asing dikenal dengan beberapa istilah diantaranya *Corrugated Steel Structure* (CSS), *Corrugated Steel Pipe* (CSP, *National Corrugated Steel Pipe Association*), *Long Span Flexible Metal Culvert* (Swedia), *Burried Corrugated Metal Structure* (CMS, Australia dan Selandia Baru). Struktur baja bergelombang merupakan suatu struktur plat baja yang kekakuannya diperkuat oleh bentuk bergelombang plat baja asli.

2.4 Desain Lintas Atas Menggunakan Struktur Baja Bergelombang Persimpangan Jl. Jakarta – Jl. Ibrahim Adjie

Alinyemen vertikal dan horisontal rencana lintas pada persimpangan jalan Jakarta-Ibrahim Adjie dibuat. Trase lintas atas direncanakan terletak di bagian tengah Jl. Terusan Jakarta dengan mengambil 2 lajur bagian tengah dari jalan eksisting. Kemiringan jalan dari mulai awal pendakian diambil sebesar 8%.

Perencanaan struktur bawah meliputi 84 buah fondasi tiang dan empat buah *pile cap*. Denah *pile cap* dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Denah *pile cap* (Sumber: Pusjatan, 2017)

2.5 Penurunan Pada Tanah Lunak

Pada tanah kohesif, perilaku untuk mencapai keseimbangan dari perbedaan tekanan air pori akibat pembebanan akan memakan waktu yang sangat lama, karena air pada tanah lunak lebih sulit untuk keluar dan biasanya disertai dengan penurunan yang besar pula.

Secara umum, penurunan pada tanah yang disebabkan oleh adanya pembebanan atau penambahan beban dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok, antara lain adalah penurunan seketika dan penurunan konsolidasi. Penurunan seketika (*immediate settlement*), yaitu penurunan sebagai akibat dari deformasi elastis tanah, baik itu tanah kering, basah, ataupun jenuh air tanpa adanya perubahan yang terjadi pada kadar air. Penurunan seketika disebut juga penurunan elastis. Pasir merupakan bagian yang paling berperan besar yang menyebabkan penurunan seketika. Penurunan konsolidasi (*consolidation settlement*), yaitu penurunan sebagai akibat dari perubahan volume tanah jenuh air sebagai akibat dari keluarnya air yang menempati rongga pori tanah.

2.6 Penurunan Seketika

Analisis penurunan seketika atau penurunan elastis yang terjadi setelah tahapan konstruksi selesai perlu dilakukan, dimana besar penurunan yang terjadi harus memenuhi nilai-nilai tertentu agar unsur keamanan dan kenyamanan dapat terpenuhi. Hal lain yang perlu dipertimbangkan terkait dengan besar penurunan adalah beda penurunan yang terjadi atau disebut juga sebagai *differential settlement*. Beda penurunan yang dimaksud ialah selisih penurunan antar titik tinjauan dalam jarak-jarak tertentu. Beda penurunan menjadi penting untuk diperhatikan karena apabila penurunan di tiap titik cukup kecil namun terjadi tidak secara merata di tiap titik, maka akan menyebabkan kemiringan yang dapat menyebabkan kegagalan struktur. Pada penelitian ini dipilih beberapa acuan standar penurunan izin yang dicantumkan pada **Tabel 1**.

2.7 Fondasi Tiang

Daya dukung fondasi tiang berasal dari friksi yang dihasilkan antara tanah dengan selimut tiang dan tahanan ujung tiang. Mekanisme fondasi tiang dalam memikul beban dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu tahanan ujung tiang dan tahanan gesekan atau friksi. Daya dukung fondasi tiang dengan mekanisme tahanan ujung tiang diperoleh dari tiang yang dipancang hingga ujungnya mencapai lapisan tanah keras yang dapat mendukung beban dan tidak mengakibatkan terjadinya penurunan berlebihan. Kapasitas tiang ditentukan oleh tahanan lapisan tanah keras yang berada pada ujung tiang pancang dan beban gesekan antara selimut tiang dengan tanah. Daya dukung fondasi tiang dengan mekanisme tahanan gesekan atau friksi diperoleh dari gaya gesekan antara selimut tiang dengan tanah. Lapisan tanah keras yang sangat jauh di bawah permukaan membutuhkan tiang yang sangat panjang dan tidak ekonomis, sehingga digunakan gaya gesekan agar menghasilkan desain yang lebih ekonomis. Faktor-faktor yang memengaruhi nilai daya dukung fondasi ini antara lain panjang fondasi itu sendiri, dimensi, dan kedalaman tanah lunak.

Tabel 1. Standar Penurunan Izin

Kriteria	Tipe Jembatan	Batasan	Referensi
Penurunan seketika di tiap titik	Semua tipe	• Penurunan < 25,4 mm	(Paikowsky, 2005)
Beda penurunan seketika vertikal antar abutmen	Jembatan beton	• Penurunan < 76,2 mm • Dengan jarak $\geq 30,48$ m	(Paikowsky, 2005)
Penurunan total izin	Semua jenis struktur bawah	• Penurunan < 15 cm + b/600 • Beda penurunan tidak membentuk sudut > 1:300	RSNI 3 xxxx-20xx Persyaratan Perancangan Geoteknik

2.8 Tahanan Ujung Tiang Pada Tanah Pasir Metode Meyerhof

Tahanan ujung tiang pada tanah pasir sangat bergantung dari panjang tiang yang terbenam di lapisan tanah pasir, tetapi pada rasio pembenaman (panjang pembenaman dengan diameter penampang) tertentu daya dukung tiang akan cenderung konstan (Das, 2011). Adapun persamaan yang digunakan dapat dilihat pada **Persamaan 1**.

$$Q_p = A_p q' N_q^* \leq A_p (0,5 p_a N_q^* \tan \phi') \quad \dots(1)$$

dengan:

- Q_p = tahanan ujung tiang (kN),
- A_p = luas penampang tiang (m²),
- q' = tegangan efektif di kedalaman ujung tiang (kN/m²),
- N_q^* = faktor kapasitas pembebanan (lihat **Tabel 2**),
- p_a = tekanan atmosfer (= 100 kN/m²),
- ϕ' = sudut geser efektif tanah pada lapisan ujung tiang (°).

Nilai N_q^* menurut Metode Meyerhof dapat dilihat pada **Tabel 2** untuk tiap nilai sudut geser efektif tanah.

Tabel 2. Nilai N_q^* Metode Meyerhof

Sudut Geser Efektif Tanah, ϕ' (°)	N_q^*
38	231
39	276
40	346
41	420
42	525

(Sumber: Das, 2011)

2.9 Tahanan Friksi Pada Tanah Lempung (Metode α)

Metode ini menyatakan nilai tahanan friksi selimut tiang dipengaruhi oleh nilai α . Nilai α sendiri merupakan nilai faktor adhesi yang diperoleh dari fungsi tegangan vertikal efektif dengan kohesi *undrained* tanah (Das, 2011). Adapun persamaan yang digunakan dapat dilihat pada **Persamaan 2**.

$$Q_s = \sum \alpha c_u p \Delta L \quad \dots(2)$$

dengan:

- Q_s = tahanan friksi selimut tiang (kN),
- α = nilai faktor adhesi lapisan tanah (lihat **Tabel 3**),
- c_u = nilai kohesi *undrained* tanah (kN/m²),
- p = keliling penampang tiang (m),

ΔL = kedalaman tiang yang terbenam (m).

Variasi nilai α dapat dilihat pada **Tabel 3** untuk tiap nilai perbandingan antara kohesi *undrained* tanah dengan tekanan atmosfer.

Tabel 3. Besaran nilai α (Terzaghi et al., 1996)

$\frac{c_u}{p_a}$	α
$\leq 0,1$	1,00
0,2	0,92
0,3	0,82
0,4	0,74
0,6	0,62

2.10 Tahanan Friksi Pada Tanah Pasir

Friksi pada tanah pasir dipengaruhi oleh kedalaman tiang yang terbenam pada lapisan tanah. Nilai tahanannya semakin bertambah seiring bertambahnya kedalaman tiang yang terbenam. Akan tetapi, terdapat kedalaman tertentu dimana nilai tahanan tersebut menjadi konstan. Sekitar kedalaman $\approx 15D$ (D = diameter tiang), tahanan friksi menjadi konstan hingga mencapai ujung fondasi tiang (Das, 2011). Adapun persamaan yang digunakan dapat dilihat **Persamaan 3**.

$$Q_s = K \bar{\sigma}_0 \tan(\delta') p L \quad \dots(3)$$

dengan:

- K = koefisien tekanan tanah efektif ($K = 1,5$ untuk fondasi tiang pancang beton),
- $\bar{\sigma}_0$ = tegangan vertikal efektif tanah di bawah kedalaman yang ditinjau (kN/m^2),
- δ' = nilai sudut geser antara tanah dengan tiang = $0,8\phi'$ ($^\circ$),
- p = keliling penampang tiang (m),
- L = kedalaman tiang yang terbenam (m).

2.11 Studi Terdahulu

Terdapat beberapa studi terkait dengan mortar busa sebagai material timbunan yang sudah dilakukan sebelumnya. Adapun studi terdahulu tentang mortar busa sebagai material timbunan dapat dilihat pada **Tabel 4**.

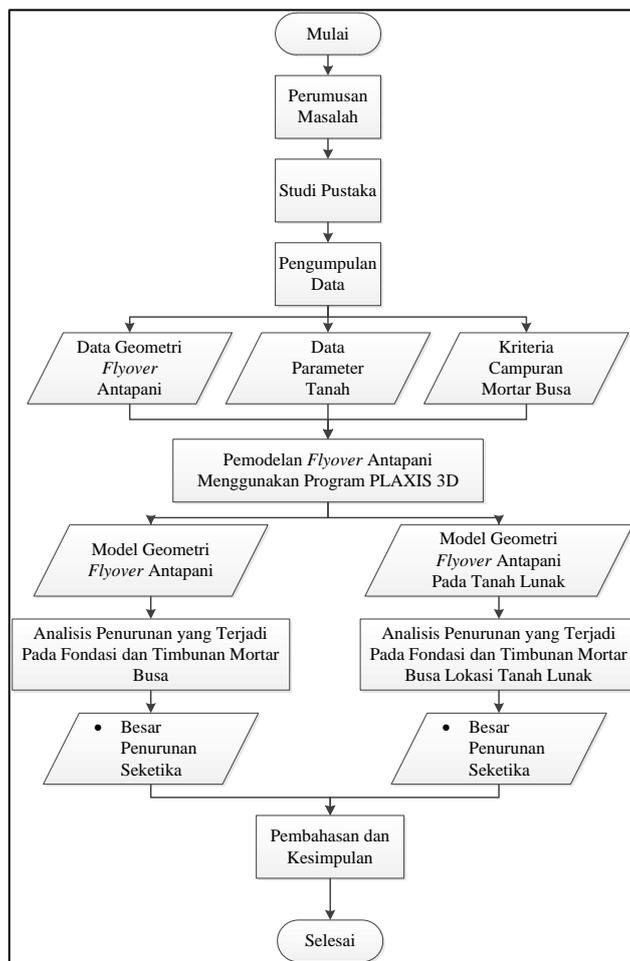
Tabel 4. Studi Terdahulu Terkait Penggunaan Mortar Busa Sebagai Material Timbunan

No.	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1.	Deni Hidayat (Universitas Sebelas Maret) 2016	Analisis Material Ringan Dengan Mortar Busa Pada Konstruksi Timbunan Jalan	Penurunan tanah dasar akibat konstruksi timbunan konvensional mengalami penurunan sebesar 6810 mm, sedangkan apabila menggunakan timbunan ringan akibat beban merata 39,9 mm dan timbunan ringan akibat beban terpusat 98,3 mm. Dalam hal ini terlihat bahwa penggunaan material ringan untuk konstruksi timbunan jalan dapat mereduksi besar penurunan dibandingkan timbunan yang menggunakan tanah urugan biasa.
2.	Rifki Fadilah (Institut Teknologi Nasional) 2016	Analisis Stabilitas dan Penurunan Pada Timbunan Mortar Busa Ringan Menggunakan Metode Elemen Hingga	Penggunaan material ringan berupa mortar busa mampu mengurangi besarnya penurunan selama masa konsolidasi berlangsung dibandingkan dengan timbunan menggunakan material tanah biasa. Dari segi stabilitas, penggunaan timbunan ringan dapat meningkatkan nilai faktor keamanan dikarenakan sifat mortar busa yang kaku seperti beton. Diperoleh nilai faktor keamanan (SF) = 6,1 dan besar penurunan sebesar 102 cm selama 12 tahun yang menyerupai kondisi aktual di lapangan.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini membahas tentang analisis penurunan seketika yang terjadi pada fondasi di *Flyover* Antapani dan penggunaan teknologi CMP pada tanah lunak. Secara umum akan dijelaskan prosedur serta langkah-langkah yang diambil dalam melakukan penelitian, yang akan ditunjukkan dalam bagan alir seperti pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

3.2 Data Parameter Tanah dan Material

Data parameter tanah diperoleh dari korelasi nilai N-SPT yang mengacu pada hasil pengujian di lapangan, sehingga bersifat pendekatan. Pemodelan lapisan tanah dilakukan hingga kedalaman 25 m, dengan urutan lapisan tanah *Clayey silt*, *Silty clay*, *Sand (a)*, *Sand (b)* dan *Sand (a)* untuk kondisi tanah asli. Pemodelan lapisan tanah pada kondisi tanah secara berurutan yaitu tanah lempung dengan konsistensi Sangat Lunak, Lunak dan tanah pasir *Sand (a)*. Data parameter tanah yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Tabel 5. Data Parameter Tanah Kondisi Tanah Asli

Parameter	Material Model	Drainage Type	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Clayey Silt	Mohr-Coulomb	Undrained	16	17	20.000	0,35	33	5
Silty Clay	Mohr-Coulomb	Undrained	17	18	30.000	0,4	47	5
Sand (a)	Mohr-Coulomb	Drained	23	24	175.000	0,3	2	40
Sand (b)	Mohr-Coulomb	Drained	19	20	100.000	0,3	2	37

Tabel 6. Data Parameter Tanah Kondisi Tanah Lunak

Parameter	Material Model	Drainage Type	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν	c (kN/m ²)	ϕ (°)
Sangat Lunak	Mohr-Coulomb	Undrained	15	16	7.500	0,3	24	10
Lunak	Mohr-Coulomb	Undrained	17	18	20.000	0,3	30	10
Sand (a)	Mohr-Coulomb	Drained	19	20	175.000	0,3	2	40

Pemodelan lapisan tanah pada kondisi tanah asli mengikuti data borlog yang diperoleh dari Pusjatan berupa empat titik lubang bor, sedangkan untuk kondisi tanah lunak menggunakan asumsi nilai N-SPT tanah lunak. Data lubang bor yang dimasukkan ke dalam model PLAXIS 3D dapat dilihat pada **Tabel 7** dan **Tabel 8**.

Tabel 7. Data Lapisan Tanah pada Lubang Bor Kondisi Tanah Asli

Parameter	Tanah Asli			
	Kedalaman (m)			
	BH 1	BH 2	BH 3	BH 4
Clayey Silt	0 – 1	0 – 1	-	-
Silty Clay	1 – 5	1 – 5	0 – 8	0 – 8
Sand (a)	5 – 9	5 – 11	8 – 17	8 – 13
Sand (b)	9 – 13,5	11 – 19	17 – 22	13 – 22
Sand (a)	13,5 – 25	19 – 25	22 – 25	22 – 25

Tabel 8. Data Lapisan Tanah pada Lubang Bor Kondisi Tanah Lunak

Parameter	Tanah Lunak
	Kedalaman (m)
	BH 1
Sangat Lunak	0 – 1
Lunak	1 – 5
Sand (a)	5 – 25

Selain data parameter tanah, data parameter material lainnya juga perlu dimasukkan. Data parameter material yang dimasukkan ke dalam model PLAXIS 3D dapat dilihat pada **Tabel 9** hingga **Tabel 14**. Hasil perhitungan daya dukung fondasi tiang dapat dilihat pada **Tabel 13**.

Daya dukung fondasi dihitung secara manual dengan menggunakan **Persamaan 1**, **Persamaan 2** dan **Persamaan 3**. Daya dukung selimut fondasi yang dihitung adalah bagian lapisan tanah teratas dan lapisan tanah pada ujung fondasi. Lubang bor BH 2 digunakan sebagai lapisan tanah untuk menghitung daya dukung fondasi tiang pada kondisi tanah asli.

Tabel 9. Data Parameter Beton dan Mortar Busa

Parameter	Material Model	Drainage Type	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Beton K-350	Linear Elastic	Non-Porous	24	24	25.332.084	0,2
Pile Cap	Linear Elastic	Non-Porous	24	24	25.743.000	0,2
Mortar Busa Sub	Linear Elastic	Non-Porous	6	6	892.635	0,2
Mortar Busa Top	Linear Elastic	Non-Porous	8	8	1.411.379	0,2

Tabel 10. Data Parameter Plates

Parameter	d (mm)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)
CSS Deep	5,45	78,5	200.000.000
CSS Exscor	7	78,5	200.000.000
Dinding Beton	200	24	25.743.000
Pelat Rigid	300	24	25.743.000

Tabel 11. Data Parameter Geogrids

Parameter	d (mm)	spasi (mm)	A (cm ² /m)	EA (kN/m)
Wiremesh M5	5	150	1,31	26.200

Tabel 12. Data Parameter Beams

Parameter	Dimensi (mm)	A (m ²)	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	I (m ⁴)
Balok dan Kolom	600 * 600	0,36	24	25.743.000	0,018
Balok Anak	300 * 300	0,09	24	25.743.000	0,000675

Tabel 13. Data Parameter Embedded Beams

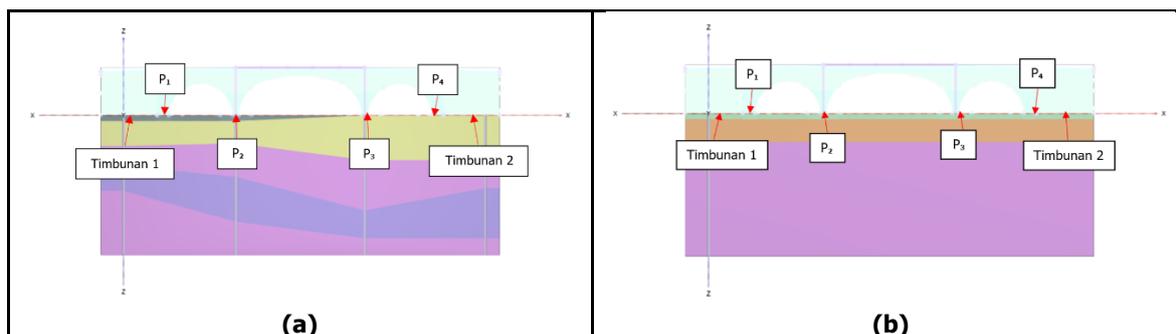
Parameter	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	Diameter (m)	Tanah Asli			Tanah Lunak		
				Q_p (kN)	Q_{sawal} (kN/m)	Q_{sakhir} (kN/m)	Q_p (kN)	Q_{sawal} (kN/m)	Q_{sakhir} (kN/m)
CSP 400	24	33.167.000	0,4	1.825	33,01	40,63	1.825	26,54	40,63
Bonded	24	25.743.000	0,4	0	200	0	0	200	0

Tabel 14. Data Parameter Anchors

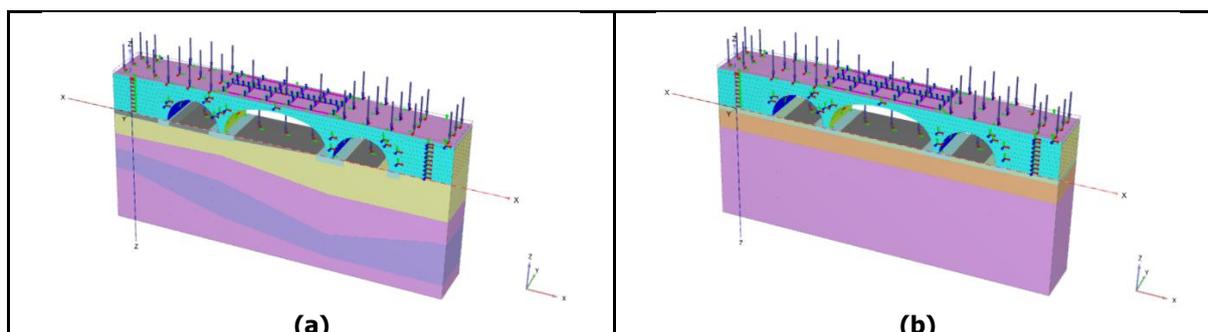
Parameter	EA (kN)
Ground Anchor Strands	650.000

3.2 Pemodelan pada PLAXIS 3D

Fondasi tiang yang digunakan memiliki kedalaman sekitar delapan meter dan terletak di 84 titik. Grup tiang tersebut kemudian dibagi menjadi empat buah *pile cap* untuk mendistribusikan beban lalu lintas, struktur dan timbunan mortar busa. Titik yang ditinjau dalam analisis ini meliputi enam buah titik di permukaan keempat buah *pile cap* tersebut dan dua titik pada oprit atau timbunan mortar busa. Titik-titik tersebut yaitu Timbunan 1, P_1 , P_2 , P_3 , P_4 dan Timbunan 2 seperti yang terlihat pada **Gambar 3**. Beban lalu lintas yang digunakan pada analisis ini sesuai standar berupa beban merata sebesar 15 kPa (Kimpraswil, 2002). Pemodelan dengan beban dapat dilihat pada **Gambar 4**.



**Gambar 3. Lokasi titik tinjau pada (a) model kondisi tanah asli;
(b) model kondisi tanah lunak**



**Gambar 4. Model dengan pembebanan pada (a) model kondisi tanah asli;
(b) model kondisi tanah lunak**

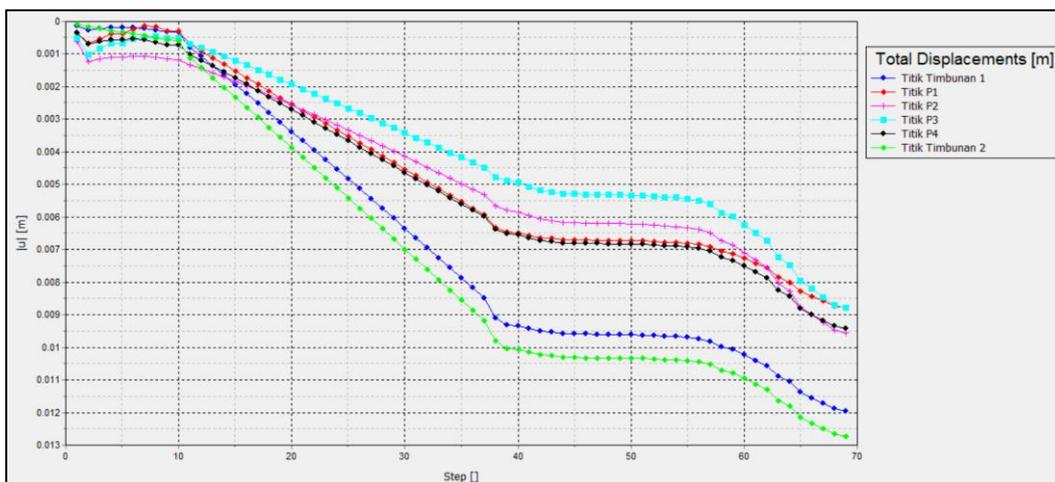
Setelah tahapan pemodelan selesai, dilanjutkan dengan tahapan *mesh* untuk menghasilkan jaring elemen hingga. Kemudian dipilih *node* titik-titik tinjau untuk keperluan gambar grafik dan penentuan tahapan-tahapan konstruksi untuk analisis. Tahapan-tahapan konstruksi yang ditentukan pada pemodelan dengan PLAXIS 3D dapat dilihat pada **Tabel 15**.

Tabel 15. Tahapan Konstruksi pada Program PLAXIS 3D

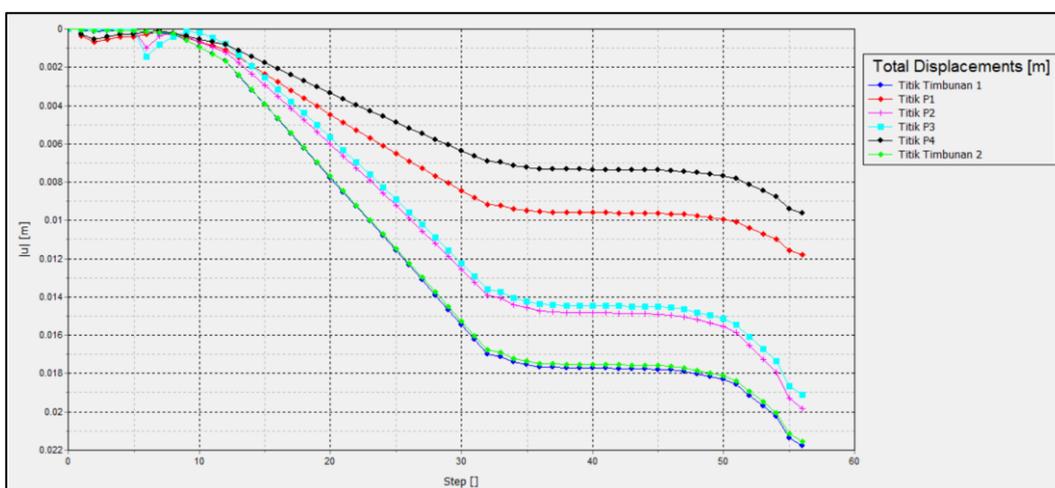
No.	Identifikasi	Tipe Perhitungan	Tipe Pembebanan
1	<i>Initial Phase</i>	<i>K0 Procedure</i>	<i>Staged Construction</i>
2	Pekerjaan Galian	<i>Plastic</i>	<i>Staged Construction</i>
3	Pemancangan <i>Pile</i>	<i>Plastic</i>	<i>Staged Construction</i>
4	Pengecoran <i>Pile Cap</i>	<i>Plastic</i>	<i>Staged Construction</i>
5	Pekerjaan Timbunan dan Struktur Jembatan	<i>Plastic</i>	<i>Staged Construction</i>
6	Pembebanan Lalu Lintas	<i>Plastic</i>	<i>Staged Construction</i>

3.4 Hasil Analisis Penurunan pada PLAXIS 3D

Hasil analisis pada PLAXIS 3D menunjukkan besarnya deformasi yang terjadi pada jaring elemen hingga. Sebelumnya telah dipilih enam titik tinjau yaitu Timbunan 1, P_1 , P_2 , P_3 , P_4 dan Timbunan 2 sebagai titik acuan untuk menghitung besar penurunan yang terjadi.



Gambar 5. Grafik hasil penurunan pada titik tinjau kondisi tanah asli



Gambar 6. Grafik hasil penurunan pada titik tinjau kondisi tanah lunak

Hasil analisis pada **Gambar 5** dan **Gambar 6** merupakan grafik penurunan terhadap langkah atau *step* perhitungan yang dilakukan oleh PLAXIS 3D. Hubungan *step* perhitungan dengan tahapan konstruksi antara kedua model dapat dilihat pada **Tabel 16**. **Tabel 17** menunjukkan bahwa pada kondisi tanah asli penurunan maksimum terjadi di Titik Timbunan 2 sebesar 12,73 mm, sedangkan pada kondisi tanah lunak penurunan maksimum terjadi di Titik Timbunan 1 sebesar 21,78 mm.

Tabel 16. Step Perhitungan PLAXIS 3D pada Tiap Tahapan Pekerjaan

No.	Identifikasi	Step Perhitungan (Tanah Asli)	Step Perhitungan (Tanah Lunak)
1.	Initial Phase	0	0
2.	Pekerjaan Galian	1 – 2	1 – 2
3.	Pemancangan <i>Pile</i>	3 – 5	3 – 5
4.	Pengecoran <i>Pile Cap</i>	6 – 10	6 – 8
5.	Pekerjaan Timbunan dan Struktur Jembatan	11 – 39	9 – 32
6.	Pembebanan Lalu Lintas	40 – 69	33 – 56

Tabel 17. Hasil Penurunan Maksimum di Titik Tinjau

Identifikasi	Tanah Asli	Tanah Lunak
	Penurunan Maksimum (cm)	Penurunan Maksimum (cm)
Titik Timbunan 1	1,195	2,178
Titik P_1	0,878	1,179
Titik P_2	0,957	1,981
Titik P_3	0,879	1,912
Titik P_4	0,942	0,960
Titik Timbunan 2	1,273	2,156

Setelah tahapan konstruksi kedua atau pekerjaan galian, dapat dilihat bahwa model mengalami peristiwa *soil heaving*. *Soil heaving* merupakan pergerakan tanah dari bawah ke permukaan yang diakibatkan oleh terjadinya *unloading* berupa pekerjaan galian, sehingga menyebabkan terjadinya pengembangan volume tanah.

Selain analisis penurunan seketika, dilakukan juga analisis beda penurunan antar titik pada pemodelan ini. Analisis beda penurunan yang ditinjau adalah beda penurunan antar titik terdekat dan titik antar abutmen. Titik terdekat yang dimaksud yaitu titik P_1 dengan P_2 , P_2 dengan P_3 , P_3 dengan P_4 dan titik antar abutmen adalah P_1 dengan P_4 .

Tabel 18. Hasil Analisis Beda Penurunan Kondisi Tanah Asli

Identifikasi	Tanah Asli			
	P_1 dengan P_2	P_2 dengan P_3	P_3 dengan P_4	P_1 dengan P_4
Jarak, l (cm)	1.280	2.300	1.280	4.860
Batas Penurunan, $\frac{l}{300}$ (cm)	4,267	7,667	4,267	16,2
Beda Penurunan (cm)	0,079	0,078	0,063	0,065

Tabel 19. Hasil Analisis Beda Penurunan Kondisi Tanah Lunak

Identifikasi	Tanah Lunak			
	P_1 dengan P_2	P_2 dengan P_3	P_3 dengan P_4	P_1 dengan P_4
Jarak, l (cm)	1.280	2.300	1.280	4.860
Batas Penurunan, $\frac{l}{300}$ (cm)	4,267	7,667	4,267	16,2
Beda Penurunan (cm)	0,802	0,069	0,952	0,219

Tabel 18 dan **Tabel 19** menunjukkan hasil analisis beda besaran penurunan antar tiap-tiap titik terdekat. Beda penurunan yang terjadi pada hasil pemodelan masih memenuhi batas penurunan yang disyaratkan, yaitu tidak membentuk sudut 1:300. Hal ini juga disertai dengan besar beda penurunan antar titik abutmen jembatan dengan jarak sekitar 48,6 meter sebesar 0,64 mm pada tanah asli dan 2,25 mm pada tanah lunak

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Besarnya penurunan akibat konstruksi dan beban lalu lintas pada *Flyover* Antapani di titik tinjau berada di rentang 8,79 mm – 12,73 mm. Dapat disimpulkan bahwa penurunan masih memenuhi standar izin penurunan seketika sebesar 25,4 mm dan standar izin penurunan total sebesar 15 cm.
2. Besarnya penurunan akibat konstruksi dan beban lalu lintas pada *Flyover* Antapani dengan variasi kondisi tanah lunak di titik tinjau berada di rentang 9,60 mm – 21,78 mm. Dapat disimpulkan bahwa penurunan masih memenuhi standar izin sebesar 25,4 mm dan standar izin penurunan total sebesar 15 cm.

3. Besar beda penurunan yang dihasilkan antar titik fondasi terdekat maupun antar abutmen jembatan untuk kedua kondisi model masih berada dalam rentang yang diizinkan dan tidak membentuk sudut lebih dari 1:300.
4. Besar beda penurunan antar titik abutmen jembatan dengan jarak sekitar 48,6 meter maksimum sebesar 0,64 mm pada tanah asli dan 2,25 mm pada tanah lunak, yang berarti memenuhi standar penurunan izin sebesar $< 76,2$ mm untuk jarak $> 30,48$ m.
5. Besar penurunan dan beda penurunan antar titik yang terjadi pada kedua kondisi pemodelan masih memenuhi standar izin. Ditinjau dari hasil analisis penurunan, teknologi CMP yang digunakan pada *Flyover* Antapani pada kedua kondisi pemodelan ini dapat dilaksanakan.

DAFTAR RUJUKAN

- Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering* (7th ed.). Belmont, California, United States of America: Cengage Learning.
- Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah. (2002). Pt-T-10-2002-B. Panduan Geoteknik 4: Desain dan Konstruksi. Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah (Kimpraswil).
- Paikowsky, S. G. (2005). Serviceability in the Design of Bridge Foundations. In T. L. Orr (Ed.), *Evaluation of Eurocode 7* (pp. 251-261). Dublin: Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College.
- Puslitbang Jalan dan Jembatan. (2017). *Laporan Pendahuluan (Inception Report) Teknologi Lintas Atas Menggunakan Struktur Baja Bergelombang*. Bandung: Puslitbang Jalan dan Jembatan (Pusjatan).
- RSNI3 xxxx-20xx. Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional.