



Terbit *online* pada laman web jurnal :
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

SAINSTEK

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



Analisis Penurunan Subgrade Tanah Lunak Menggunakan Perkuatan Mortar Foam dengan Metode Numerik

Ulfa Jusi^{a*}, Pratikso^b, Harnedi Maizir^c

^a Program Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Jalan Raya Kaligawe km.4. Terboyo Kulon, Genuk, Semarang, Jawa Tengah Indonesia, 50112

^b Program Studi Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Jalan Raya Kaligawe km.4. Terboyo Kulon, Genuk, Semarang, Jawa Tengah Indonesia, 50112

^c Program Studi Teknik Sipil, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Jl. Dirgantara No.4 Arengka Raya Pekanbaru-Riau, Indonesia. 28125

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 02 Desember 2024

Revisi Akhir: 30 Desember 2024

Diterbitkan Online: 31 Desember 2024

KATA KUNCI

Tanah lunak, Subgrade, Penurunan, Mortar Busa, Plaxis 2D

KORESPONDENSI

Telepon: 08127546873

E-mail: ulfajusi@sttp-yds.ac.id

ABSTRACT

Tanah lunak subgrade pada konstruksi jalan akan menimbulkan permasalahan jika tidak dilakukan perbaikan terhadap daya dukungnya. Karena daya dukung yang baik subgrade akan dapat memikul beban yang terdapat di atasnya. Perilaku timbunan terhadap beban yang diterimanya akan mempunyai pengaruh terhadap penurunan. Kondisi penurunan pada subgrade juga dipengaruhi keadaan cuaca disekitarnya, yang kadang kala terjadi genangan air (banjir). Alternatif yang dilakukan antara lain dengan melakukan perkuatan terhadap tanah lunak subgrade. Salah satunya dengan menambahkan lapisan perkuatan mortar busa. Mortar busa adalah material ringan yang terdiri dari campuran semen, pasir dan *foam* dengan densitas 0,8 Mpa untuk lapisan bawah dan *subgrade*. Penelitian ini bertujuan mengetahui penurunan yang terjadi pada tanah lunak *subgrade* dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm berdasarkan analisa numerik *Plaxis 2D* versi 2023 dalam kondisi subgrade kering dan kondisi subgrade terendam air. Pembebanan terpusat dilakukan secara bertahap dengan variasi 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN. Ketebalan tanah dasar *subgrade* 60 cm. Hasil analisa menunjukkan bahwa mortar busa dapat memperkecil penurunan yang terjadi akibat variasi beban yang diberikan. Penurunan yang terjadi pada kondisi subgrade tergenang air adalah sebesar 0,988 mm dan pada kondisi kering sebesar 0,961 mm. Artinya terjadi kenaikan angka penurunan sebesar 2,7 % disebabkan adanya genangan air pada permukaan subgrade. Penurunan yang terjadi < 20 mm masih memenuhi spesifikasi kriteria untuk kelas jalan I, dalam Panduan Geoteknik 4 tahun 2002

sehingga akan menimbulkan kerusakan pada konstruksi yang akan dibangun di atasnya. [4][5]

1. PENDAHULUAN

Tanah lunak adalah tanah yang prolematik, karena mempunyai karakteristik kuat dukung dan kuat geser yang rendah. [1] [2] Tanah lempung yang tergolong tanah lunak ini merupakan jenis tanah kohesif dan indeks plastisitas yang sedang hingga tinggi serta sifat kembang susut yang tinggi juga. [3] Karena mengandung air mengakibatkan tanah lempung memiliki daya dukung yang rendah

Dalam berbagai kondisi yang dipengaruhi oleh cuaca, dan musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan, kadangkala menyebabkan terjadi genangan air di berbagai tempat. Genangan ini mengakibatkan bertambahnya kandungan air pada tanah lunak. Tanah lunak *sub grade* yang terdapat pada konstruksi jalan akan mengalami banyak permasalahan jika *subgrade* tersebut dalam

keadaan banjir. Konstruksi jalan harus dibangun dengan *subgrade* yang baik agar tidak terjadi penurunan yang menyebabkan kerusakan yang terus menerus, baik terhadap beban sendiri maupun beban lalu lintas yang ada di atasnya. sehingga perlu diperlukan suatu metode yang dianggap sebagai penyelesaian dari agar tidak menjadi permasalahan yang lebih serius tentang penurunan yang terjadi pada konstruksi jalan pada saat kering dan terendam genangan air.[6]

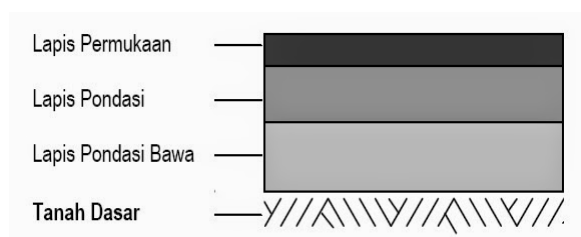
Penggunaan lapisan timbunan ringan mortar busa sebagai perkuatan merupakan salah satu cara untuk mengatasi penurunan. [5] [7] Mortar busa merupakan material ringan yang terdiri dari campuran semen, pasir dan *foam* telah banyak dipakai pada pekerjaan konstruksi bangunan sipil lainnya, seperti pada oprit jembatan, dinding penahan tanah dan terowongan. [8][9] [10] Dengan komposisi tersebut mortar ringan dapat mengapung di air sehingga diharapkan dapat memberikan daya dukung yang optimal terhadap konstruksi jalan di atasnya.[11]

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui penurunan yang terjadi pada tanah lunak *subgrade* dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm berdasarkan analisa numerik *Plaxis* 2D versi 2023 dalam kondisi kering dan terendam air. Simulasi model penelitian terdiri dari pembebanan terpusat dengan variasi 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN dan 20 kN. Ketebalan tanah dasar *subgrade* 60 cm.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sub Grade

Tanah dasar adalah berupa tanah asli atau tanah galian ataupun berupa tanah timbunan, yang merupakan permukaan dasar untuk perletakan bagian-bagian perkerasan jalan sangat tergantung dari sifat-sifat serta daya dukung dari tanah dasar. [12]



Gambar 1. Struktur Lapisan Pakerasan Jalan

Pada pekerjaan pembangunan jalan salah satunya adalah pekerjaan lapisan tanah dasar (*subgrade*), yang merupakan lapisan paling bawah (tanah) yang berfungsi untuk menumpu lapisan perkerasan dan berpengaruh terhadap konstruksi perkerasan jalan di atasnya sehingga *subgrade* sangat berpengaruh terhadap baik buruknya perkerasan jalan. [3]

Sub grade (tanah dasar) berfungsi [11]:

1. Sebagai lapisan paling bawah pada lapisan perkerasan di atasnya.
2. Sebagai penerima beban akibat berat perkerasan di atasnya ditambah beban akibat muatan kendaraan yang menyebar.

Permasalahn deformasi yang terjadi pada tanah dasar bisa berbentuk penurunan dan pengembangan dari struktur tanah dasar. Hal ini terjadi karena beban lalu lintas yang ada di atasnya. Hal ini telah menjadi perhatian serius seiring dengan meningkatnya arus lalu lintas dan tingkat beban kendaraan. [1]

Tinggi minimum permukaan tanah dasar di atas muka air tanah dan level muka air banjir seperti ditunjukkan pada Tabel berikut [13]:

Tabel 1: Tinggi Minimum Tanah Dasar di Atas Muka Air Tanah dan Muka Air Banjir

Kelas Jalan (Berdasarkan spesifikasi penyediaan prasarana jalan)	Tinggi tanah dasar di atas muka (mm)	Tinggi tanah dasar di atas muka air banjir (mm)
Jalan bebas hambatan	1200 (jika ada drainase bawah permukaan di median) 1700 (tanpa drainase bawah permukaan di median)	500 (banjir 50 tahun)
Jalan raya	1200 (tanah lunak jenuh atau gambut tanpa lapis drainase) 800 (tanah lunak jenuh atau gambut dengan lapis drainase) 600 (tanpa dasar normal)	
Jalan sedang	600	500 (banjir 10 tahun)
Jalan kecil	400	NA

2.2. Mortar Busa

Teknologi mortar busa adalah metode campuran rasio tertentu antara semen, pasir, dengan *foam* (busa). [14] Dengan penambahan *foam* pada campuran mortar, maka material campuran akan mengembang hingga sampai dengan 4 kali volume awal sehingga kebutuhan material dapat dikurangi bila dibandingkan dengan material tanpa campuran *foam*. Metode ini dimaksudkan untuk mendapatkan nilai berat isi dan kekuatan dapat direncanakan sesuai kebutuhan.[15]

Material ringan mortar busa dengan memanfaatkan *foam* (busa) untuk membentuk timbunan ringan memiliki beberapa kriteria yang harus dipenuhi sebagai berikut [16]:

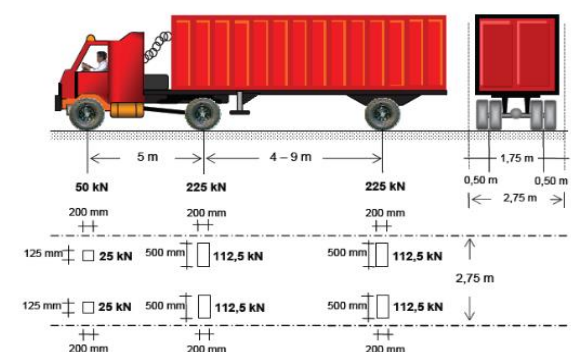
1. Memiliki berat yang ringan, sehingga nilai kepadatan dari material campuran mortar busa tersebut mempunyai nilai densitas 0,5–1,2 ton/m³.
2. Mempunyai nilai *flow* (kekentalan adukan) yang diindikasikan untuk memudahkan pelaksanaan dilapangan. Nilai *flow* yang disyaratkan pada pedoman geoteknik umumnya berkisar 180 + 20 mm.
3. Saat pelaksanaan mudah disemprotkan dengan menggunakan alat mesin penyemprot dan dapat padat sendiri, karena berperilaku seperti mortar beton, dimana material campuran tersebut dapat mengeras sesuai dengan waktu pemeraman (*curing time*) yang ditetapkan.
4. Mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sesuai dengan jenis penggunaan konstruksinya, seperti kuat tekannya dalam umur 14 hari mencapai 800 kPa untuk lapis fondasi bawah atau *subbase*

Tabel 2: Kriteria Desain Mortar Busa

No	Desain Mix Formula	Kuat Tekan Minimum 14 hari	
		kPa	Kg/cm ²
1	Lapis fondasi bawah atau <i>subbase</i>	800	8
2	Lapis fondasi atau <i>base</i>	2.000	20

2.3. Pembebanan

Pada tinjauan jalan kelas 1 pembebanan berdasarkan Direktorat Jendral Bina Marga beban truk T digunakan sebagai beban lalu lintas dengan permodelan kondisi paling kritis, beban gandar terbesar yaitu 112,5 kN dianggap sebagai beban terpusat. [17] Pembebanan sebesar 20 kN diasumsikan sebagai beban terpusat



Gambar 2. Pembebanan Truk T

2.4. Plaxis 2D

Plaxis 2D merupakan program elemen hingga dua dimensi yang dikembangkan untuk analisis deformasi, stabilitas dan aliran air tanah dalam rekayasa geoteknik. Program ini

dilengkapi dengan fitur untuk menangani berbagai aspek struktur geoteknik dan proses konstruksi menggunakan prosedur komputasi.[18]

Lines digunakan untuk mengekspresikan ikatan geometri, model, dan diskontinuitas pada geometri seperti dinding, lempengan, dan lain-lain. *Lines* dapat memiliki beberapa fungsi dan metrial yang berbeda. *Cluster* adalah area tertutup yang sepenuhnya dibatasi oleh garis. Dalam satu *cluster* hanya terdapat satu material (homogen). *Cluster* dapat diaplikasikan sebagai lapisan atas. Proses simulasi dalam *Plaxis* terdiri 3 tahap yaitu [6]:

1. Model *Input* data

Membuat geometri model sehingga menghasilkan model elemen hingga yang sesuai dengan kondisi sebenarnya

2. *Calculation*

Proses perhitungan dilakukan setelah selesai membuat pemodelan. Pada tahap perhitungan ini perlu memilih jenis perhitungan yang sesuai.

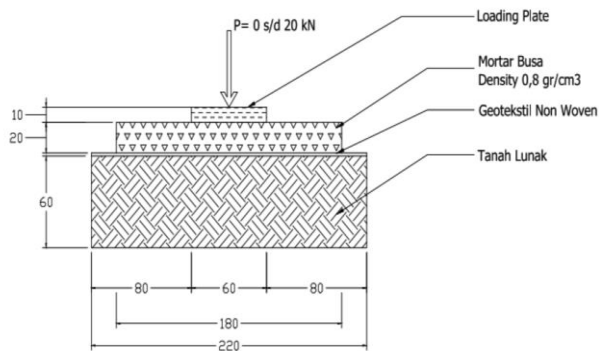
3. *Output*

Proses *output* dari program perhitungan dilakukan sampai keseimbangan tercapai. Keluaran utama yang dapat diperoleh adalah deformasi *mesh*, penurunan profil, jumlah tegangan pada lapisan tanah, dan gaya-gaya yang ditanggung oleh struktur yang dimodelkan. Proses diskritisasi akan akan berlangsung secara otomatis dalam *Plaxis*.

3. METODOLOGI

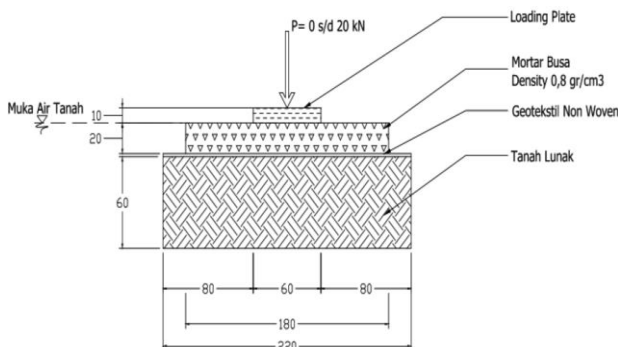
Tahapan penelitian dilakukan adalah :

1. Pengujian tanah asli yang dilakukan di laboratorium untuk mendapatkan nilai propertis tanah asli yang akan dijadikan parameter input pada aplikasi *Plaxis* 2D versi 2023
2. *Job Mix Design* mortar busa dengan ketentuan berdasarkan kriteria desain timbunan ringan mortar busa untuk bangunan jalan dan jembatan
3. Metode numerik pertama dengan aplikasi *Plaxis* 2D versi 2023. Perkuatan lapisan mortar busa tebal 20 cm dengan kondisi kering. Paramater *subgrade* adalah model *Mohr-Coulomb* pada *subgrade*. Sedangkan untuk mortar busa dan pelat beton K-250 digunakan model *linear elastic* ketebalan tanah dasar *subgrade* 60 cm dengan pelat beton K-250 tebal 10 cm di atasnya. Pada model ini diberi beban terpusat vertikal secara bertahap dari 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15, kN, dan 40 kN. Model numeriknya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3. Model Geometrik Perkuatan Mortar Busa pada Subgrade Kondisi Kering

- Metode numerik kedua dengan menggunakan perkuatan mortar busa tebal 20 cm pada lapisan subgrade 60 cm dengan pelat beton K-250 tebal 10 cm di atasnya dengan Muka Air Tanah (MAT) pada permukaan subgrade (60 cm). Pada model dengan perkuatan mortar busa 20 cm ini diberi beban terpusat vertikal secara bertahap dari 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 40 kN. Model numeriknya dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 4. Model Geometrik dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm Kondisi MAT pada Subgrade

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian-pengujian awal yang dilakukan seperti pengujian tanah lunak subgrade melalui uji propertis, *Job Mix Design* mortar busa, pelat beton K-250 dan data spesifikasi geotekstil non woven akan menjadi parameter-parameter data input pada aplikasi numerik *Plaxis 2D* versi 2023. Dalam hal ini penggunaan geotekstil non woven adalah sebagai separator/pemisah pada tanah lunak subgrade dan mortar busa.

Tabel 1. Data Propertis Tanah Lunak

No	Jenis Pengujian	Hasil	Satuan
1	Bulk unit weight (γ_b)	17,84	kN/m ³
2	Angka pori (e)	0,88	-

3	Kohesi (c)	20,59	kN/m ²
4	Sudut geser (ϕ)	6,331	°

Tabel 2. *Job Mix Design* Mortar Busa

No	Semen (kg)	Air (kg)	Pasir (kg)	Busa (kg)	Total (kg)
1	270	135	406,599	46,749	0,858

Parameter Geotekstil Non Woven tipe Polyester (PET) dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

Tabel 3. Spesifikasi Geotekstil

No	Item	Test Methode	150 gr	Satuan
1	Tensile Strenght	ASTM D4595-11	7,1	kN/m
2	Elongation	ASTM D4594-11	≥50	%

Parameter-parameter data yang akan diinput pada aplikasi *Plaxis 2D* versi 23 :

Tabel 4. Data Parameter Propertis Material

No	Tipe Material	Model Material	Tipe Drainase	γ_b (kN/m ³)	e	Eu (kN/m ²)	ν_u	Su (kN/m ²)
1	Tanah lunak subgrade	Mohr-Coulomb	Undrained C	17,84	088	2000	0,2	20,59
2	Pelat beton K-250	Linear Elastic	Non-Porous	24	-	21289390	0,2	-
3	Mortar busa	Linear Elastic	Non-Porous	24	-	2000	0,2	-
4	Geotekstil	Geogrid	Tensile strenght / Elongation= 7,1/ 50 % = 14,2					

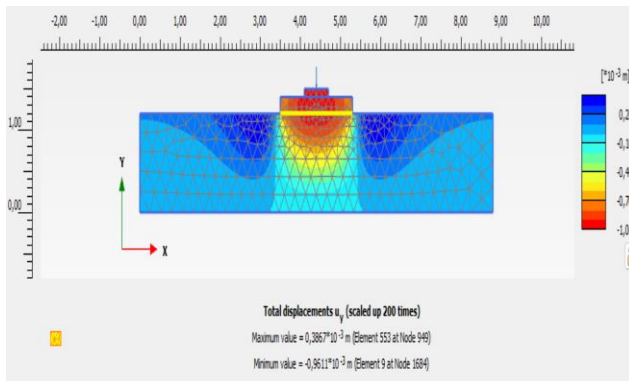
Permodelan menggunakan analisa numerik *Plaxis 2 D* versi 2023 dilakukan dengan 2 tipe permodelan yaitu permodelan dengan kondisi kering dan permodelan dalam kondisi terendam air di permukaan subgrade

Hasil analisis numerik menggunakan aplikasi *Plaxis 2D* versi 2023 subgrade dengan mortar busa dalam kondisi kering, diberikan beban terpusat secara bertahap dari 0 kN, 5 kN, 10 kN, 15 kN, dan 20 kN ditampilkan Tabel berikut

Tabel 5. Hasil Analisis Model Numerik *Plaxis 2D Subgrade* dengan Mortar Busa Dalam Kondisi Kering

No	Beban (kN)	Safety Factor (SF)	Displacement (mm)
1	0	42,64	0
2	5	13,28	0,893
3	10	7,863	0,911
4	15	5,854	0,938
5	20	4,330	0,961

Penurunan maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 0,961 mm. Kriteria dalam Panduan Geoteknik 4 tahun 2002, kriteria penurunan timbunan dikelompokkan berdasarkan kelas jalan. Untuk kelas jalan I, kecepatan penurunan setelah konstruksi < 20 mm. Displacement yang terjadi ditampilkan pada Gambar berikut

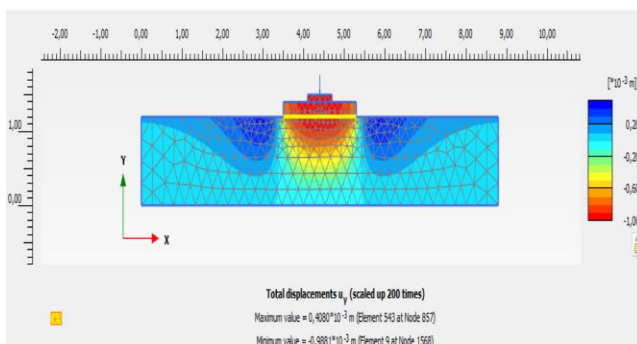


Gambar 5. Model *Subgrade* dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm dalam Kondisi Kering

Tabel 5. Hasil Analisis Model Numerik *Plaxis* 2D dengan Mortar Busa 20 cm dalam Kondisi MAT di *Subgrade*

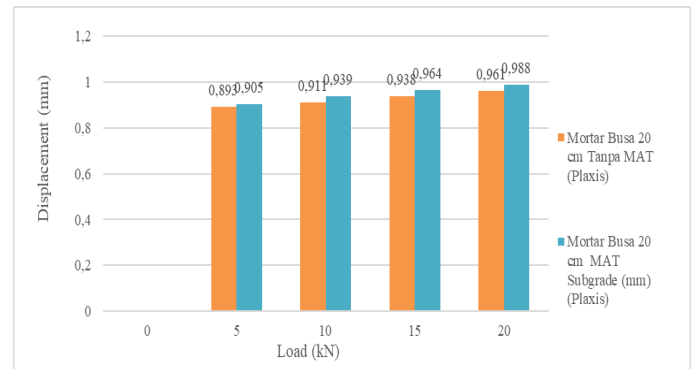
No	Beban (kN)	Safety Factor (SF)	Displacement (mm)
1	0	42,640	0
2	5	13,290	0,905
3	10	7,863	0,939
4	15	5,854	0,964
5	20	4,330	0,988

Penurunan maksimum terjadi pada beban 20 kN sebesar 0,988 mm. Kriteria dalam Panduan Geoteknik 4 tahun 2002, kriteria penurunan timbunan dikelompokkan berdasarkan kelas jalan. Untuk kelas jalan I, kecepatan penurunan setelah konstruksi < 20 mm. Hasil yang diperoleh dari model numerik *Plaxis* 2D versi 2023, penurunan tanah yang terjadi setelah diberi mortar busa 20 cm yaitu < 20 mm. Untuk nilai *safety factor* pada seluruh beban dengan adanya mortar busa nilainya > 1,2. Mortar busa menjadikan tanah aman terhadap beban yang diberikan, yaitu beban maksimum 20 kN. *Displacement* yang terjadi ditampilkan pada Gambar berikut :



Gambar 6. Model *Subgrade* dengan Perkuatan Mortar Busa Tebal 20 cm MAT pada *Subgrade*

Gambar 7. Menampilkan perbedaan penurunan yang terjadi pada *subgrade* dengan mortar busa tebal 20 cm dalam kondisi kering dan kondisi tergenang air MAT di permukaan *subgrade*



Gambar 7. Diagram Perbandingan Penurunan yang Terjadi dalam Kondisi Kering dan Terendam Air

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan penelitian ini adalah penurunan yang terjadi pada *subgrade* dengan perkuatan mortar busa tebal 20 cm dalam kondisi tergenang air sebesar 0,988 mm lebih besar dari penurunan yang terjadi pada perkuatan mortar busa dalam kondisi kering sebesar 0,961 mm. Hal ini disebabkan oleh tekanan air pada *subgrade* di tahan oleh gaya apung dari lapisan mortar busa Namun berdasarkan Panduan Geoteknik 4 tahun 2002 untuk kelas jalan I, penurunan tersebut masih dalam batas yang telah ditentukan yaitu < 20 mm

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Carvajal and M. Romana, "Analysis of the influence of soft soil depth on the subgrade capacity for flexible pavements," *18th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng. Challenges Innov. Geotech. ICSMGE 2013*, vol. 2, pp. 1249–1253, 2013.
- [2] Z. Jiang, X. Gao, X. Feng, and D. Chen, "Research on the Application of Foamed Lightweight Concrete (FLC) in the Construction of Highway Soft Soil Foundation Engineering with Buried High-Pressure Gas Pipes," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 19, 2022, doi: 10.3390/app121910119.
- [3] A. Rochim and L. Fitriyana, "Characterization of Subgrade Soil of Lowland Areas of Semarang City," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 971, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/971/1/012034.
- [4] J. Gultom, Pratikso, and A. Rochim, "Floating road construction on soft soil," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 955, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/955/1/012016.
- [5] H. Atamini and B. Moestafa, "Evaluasi Stabilitas dan Penurunan antara Timbunan Ringan Mortar Busa Dibandingkan dengan Timbunan Pilihan pada Oprit Jembatan (Studi Kasus: Flyover

- Antapani, Kota Bandung) (Hal. 90-100),” *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 4, no. 1, p. 90, 2018, doi: 10.26760/rekaracana.v4i1.90.
- [6] J. Gultom, *Konstruksi Jalan Raya Perancangan dan Pembangunan Jalan Di Atas Tanah Lunak*, 1st ed. Yokyakarta, 2022.
- [7] D. Hidayat, P. Y. Muslih, and P. F. Pungky, “Analisis Material Ringan Dengan Mortar Busa Pada Konstruksi Timbunan Jalan,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol.*, no. October, pp. 1–10, 2016.
- [8] R. Fadilah and I. N. Hamdhan, “Analisis Stabilitas dan Penurunan pada Timbunan Mortar Busa Ringan Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *J. Reka Racana*, vol. 3, no. 2, pp. 59–69, 2017, doi: 10.28926/briliant.v2i1.33.
- [9] S.-J. Ma, E.-G. Kang, and D.-M. Kim, “the Study on Development of Light-Weight Foamed Mortar for Tunnel Backfill,” *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.*, vol. 06, pp. 449–454, 2012, doi: 10.1142/s2010194512003595.
- [10] Y. Qiu, Y. Liu, L. Zhang, and Z. Wang, “Influence of Lightweight Foamed Concrete as Backfill Material on Stress and Deformation of Buttressed Earth-Retaining Wall,” *Geofluids*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/7610933.
- [11] Y. Amran and A. Surandono, “Analisa Daya Dukung Tanah (DDT) pada Sub Grade (Tanah Dasar) (Studi Kasus Ruas Jalan Ki Hajar Dewantara, 38 B Banjar Rejo Lampung Timur-Batas Kota Metro),” *TAPAK (Teknologi Apl. Konstr. ...)*, vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2017.
- [12] B. M. Das, “Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknik,” *Penerbit Erlangga*, pp. 1–300, 1995.
- [13] Menteri Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, “PERMEN PUPR Nomor 01/PRT/M/2017 Tentang Tata Cara Pelaksanaan Pengadaan Badan Usaha Untuk Pengusahaan Jalan Tol,” 2017, pp. 1–20.
- [14] Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, “Pedoman Perancangan Campuran Material Ringan Dengan Mortar Busa Untuk Konstruksi Jalan,” Jakarta, Indonesia, 2015.
- [15] Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan, “Pelaksanaan Timbunan Material Ringan Mortar Busa untuk Konstruksi Jalan,” in *Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan rakyat Republik Indonesia*, 2015.
- [16] Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, “Pedoman Perencanaan Teknis Timbunan Material Ringan Mortar Busa Untuk Konstruksi Jalan,” Jakarta, Indonesia, 2015.
- [17] Badan Penelitian dan Pengembangan Direktorat Jenderal Bina Marga Departemen Pekerjaan Umum, “RSNI T-02-2005,” in *Departemen Pekerjaan Umum*, 2005.
- [18] E. A. Robbani and I. Ikhyia, “Analisis Daya Dukung Fondasi Dangkal Menggunakan Metode Numerik dan Analitik pada Tanah Lempung Lunak yang Diperkuat dengan Granular Trench. (Hal. 41-52),” *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 5, no. 4, p. 41, 2019, doi: 10.26760/rekaracana.v5i4.41.