

# Pengaruh Beban Terpusat di Perkerasan Lentur pada Tanah Lempung Lunak dengan Perkuatan *Stone Column*

PITA ULI ARTHA WIJAYA PANJAITAN<sup>1\*</sup>, SYAHRIL<sup>1</sup>,  
INDRA NOER HAMDHAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Indonesia

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

## ABSTRAK

*Daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi pada tanah lempung lunak beresiko mengalami penurunan yang mengakibatkan rusaknya struktur perkerasan lentur. Metode perbaikan tanah stone column efektif meningkatkan daya dukung, mengurangi penurunan dan mendistribusikan beban secara lebih merata. Meskipun aplikasi stone column telah banyak diteliti, tetapi penelitian mengenai pengaruhnya terhadap perkerasan lentur di bawah beban terpusat masih terbatas. Metode penelitian meliputi mendesain tebal perkerasan lentur dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024 dan analisis numerik dengan software PLAXIS 3D. Stone column diameter 0,8 m dan jarak 2,2 m meningkatkan safety factor sebesar 142,67% dan daya dukung sebesar 70,19%, serta mereduksi displacement sebesar 74,67%. Temuan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam merancang perkerasan lentur yang efisien dan berkelanjutan, serta mendukung program strategis pemerintah yang disebabkan oleh meningkatnya pembangunan infrastruktur.*

**Kata kunci:** perkerasan lentur, tanah lempung lunak, safety factor, displacement, daya dukung

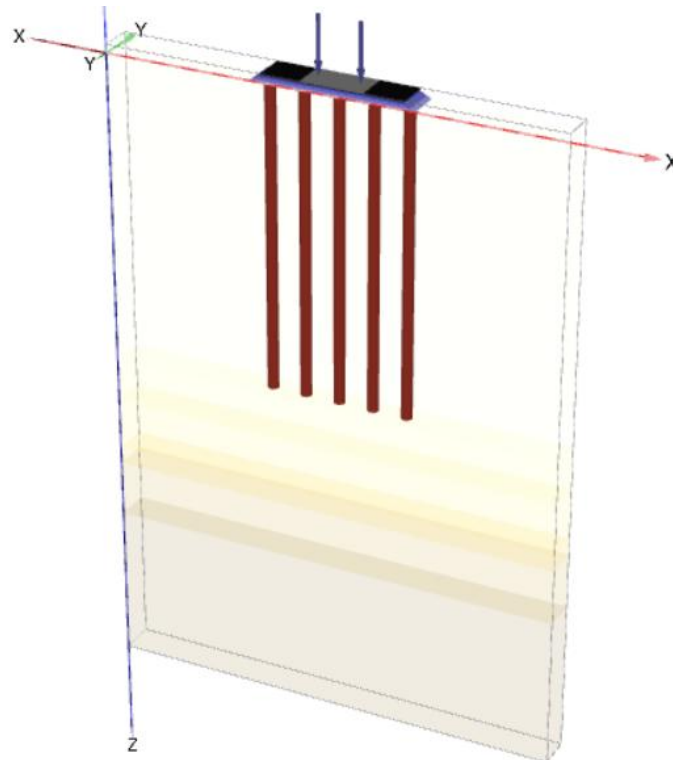
## ABSTRACT

*Soft clay soils' low bearing capacity and high compressibility are at risk of settlement, damaging the flexible pavement structure. The stone column soil improvement method effectively increases bearing capacity, reduces settlement and distributes loads more evenly. Although the application of stone columns has been widely researched, research on their effect on the flexible pavement under centred load is limited. The research method includes designing the thickness of flexible pavement using the Pavement Design Manual 2024 method and numerical analysis with PLAXIS 3D software. Stone columns of 0.8 m diameter and 2.2 m spacing increased the safety factor by 142.67%, bearing capacity by 70.19%, and reduced displacement by 74.67%. The findings of this research can contribute to designing efficient and sustainable flexible pavements and supporting the government's strategic programs caused by increased infrastructure development.*

**Keywords:** flexible pavement, soft clay soil, safety factor, displacement, bearing capacity

## 1. PENDAHULUAN

Perkerasan lentur merupakan elemen krusial dalam infrastruktur transportasi, berguna untuk mendistribusikan beban lalu lintas ke tanah dasar di bawah perkerasan. Namun, tantangan besar muncul ketika perkerasan ini dibangun di atas tanah lempung lunak, yang banyak dijumpai di Indonesia, seperti di kawasan Gedebage Bandung, dikenal memiliki daya dukung rendah, kompresibilitas tinggi, dan karakteristik geser yang lemah. Tanah lempung lunak sering kali mengalami penurunan yang signifikan dan deformasi tidak merata [20] ketika diberi beban terpusat dari kendaraan berat, seperti truk dan bus (**Gambar 1**).



**Gambar 1. Pemodelan beban terpusat pada perkerasan lentur**

Hal ini dapat menyebabkan kerusakan struktural pada perkerasan, termasuk retak fatik, alur (*rutting*), dan amblesan lokal, yang tidak hanya mengancam keselamatan pengguna jalan tetapi juga meningkatkan biaya pemeliharaan dan perbaikan [2]. Dalam konteks ini, metode perbaikan tanah menjadi sangat penting untuk memastikan kinerja jangka panjang dari perkerasan lentur [12]. Meskipun berbagai teknik konvensional seperti *preloading*, *vertical drain*, dan stabilisasi kimiawi telah diterapkan, sering kali metode tersebut tidak cukup efektif atau memiliki dampak lingkungan yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, penggunaan *stone column* sebagai teknik perkuatan tanah telah menarik perhatian para insinyur geoteknik. *Stone column* adalah kolom vertikal yang terbuat dari material granular, yang ditanam ke dalam tanah lunak untuk meningkatkan stabilitas dan daya dukung serta mengurangi penurunan [7,14,17,18,21]. Mekanisme kerja *stone column* melibatkan transfer beban vertikal melalui gesekan kulit kolom dan tahanan ujung, pemampatan lateral tanah lempung yang meningkatkan kekuatan geser serta drainase pori air berlebih yang mempercepat proses konsolidasi. Meskipun aplikasi *stone column* telah banyak diteliti dalam konteks fondasi dangkal atau tanggul, penelitian mengenai pengaruhnya terhadap perkerasan lentur di bawah beban terpusat masih terbatas. Beban dinamis dari kendaraan memiliki karakteristik unik yang dapat memengaruhi stabilitas kolom dan interaksi dengan lapisan perkerasan. Oleh karena itu,

penelitian ini bertujuan untuk mencari tahu pengaruh variasi parameter *stone column*, seperti diameter, jarak antar kolom, dan kedalaman kolom terhadap reduksi penurunan, peningkatan daya dukung dan stabilitas jalan pada tanah lempung lunak dengan bantuan *software* PLAXIS 3D. Selain itu, penelitian ini juga akan mendesain tebal perkerasan lentur dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024. Dengan meningkatnya pembangunan infrastruktur di Indonesia, terutama di daerah dengan kondisi tanah lempung lunak, temuan dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam merancang perkerasan lentur yang lebih berkelanjutan dan efisien secara biaya serta mendukung program strategis pemerintah dalam percepatan pembangunan jalan nasional.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Perkuatan Tanah

Salah satu dari banyaknya metode perkuatan tanah yang dapat digunakan adalah *stone column*, efisien dalam memperbaiki sifat tanah lempung lunak. Cara kerja metode ini adalah dengan mencampurkan tanah dasar dengan campuran stabilisasi lalu dipadatkan sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah serta mengurangi penurunan [5,9,22]. Metode ini menyebabkan tanah di sekitar *stone column* menjadi lebih padat, pengaplikasiannya sama seperti fondasi tiang tanpa *pile cap* [11]. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa penggunaan *stone column* pada tanah lempung lunak efektif mengurangi penurunan tanah dan meningkatkan daya dukung dan stabilitas tanah. Kedalaman dan jumlah *stone column* terbukti berpengaruh secara signifikan terhadap performa yang diberikan *stone column*, dengan peningkatan daya dukung hingga dua kali lipat dibandingkan tanah asli [15-16]. Pemodelan numerik PLAXIS 3D dalam merancang *stone column* sangat penting untuk dilakukan, untuk menentukan jarak dan diameter *stone column* yang efisien serta pengaruhnya terhadap penurunan tanah dan distribusi tegangan [3].

### 2.2 Desain Perkerasan Metode Manual Desain Perkerasan 2024

Karakteristik yang fleksibel memungkinkan perkerasan lentur untuk mendistribusikan beban lalu lintas secara merata sampai ke lapisan tanah dasar [1]. Akan tetapi, penurunan tanah akibat beban lalu lintas terlebih lagi jika dibangun di atas tanah lempung lunak menjadi permasalahan utama yang sering terjadi. Penurunan tanah menyebabkan terjadinya deformasi pada permukaan perkerasan jalan yang dapat mengakibatkan struktur perkerasan rusak dan tidak stabil, menurunkan kualitas perkerasan secara keseluruhan, serta memperpendek masa pakai jalan. Selain beban lalu lintas, penurunan tanah juga dipengaruhi oleh baik alam maupun aktivitas manusia. Berdasarkan peraturan SNI 8460:2017, *safety factor* tanah harus  $> 1,5$  [4]. Tahapan desain tebal perkerasan lentur dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024, yaitu menentukan faktor pertumbuhan kumulatif ( $R$ ) dan nilai beban sumbu standar ekivalen kumulatif (CESAL) selama umur rencana dengan **Persamaan 1** dan **Persamaan 2**.

$$R = \frac{(1+0,01 i)^{UR}-1}{0,01 i} \quad (1)$$

$$CESAL = (\sum LHR_{JK} \times VDF_{JK}) \times 365 \times DD \times DL \times R \quad (2)$$

dengan:  $UR$  = umur rencana perkerasan jalani,  $i$  = faktor laju pertumbuhan lalu lintas,  $LHR_{JK}$  = lalu lintas harian rata-rata tiap jenis kendaraan,  $VDF_{JK}$  = faktor ekivalen beban tiap jenis kendaraan,  $DD$  = faktor distribusi arah,  $DL$  = faktor distribusi lajur.

Setelahnya, tentukan tebal lapisan fondasi jalan, jenis struktur perkerasan serta tebal perkerasan. Tebal lapisan fondasi jalan dan jenis struktur perkerasan dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

**Tabel 1. Tebal Lapisan Fondasi Jalan**

CBR tanah dasar [%]	Kelas kuat tanah dasar	Deskripsi	Perkerasan lentur		Perkerasan kaku
			Beban lalu lintas dengan umur rencana 40 tahun (juta ESA5)		
			< 10	> 10	
			<b>Tebal minimum perbaikan tanah dasar [mm]</b>		
5	SG5	Perbaikan tanah dengan material timbunan pilihan (CBR ≥ 10%)	200	200	200
4	SG4				
3	SG3		300	400	400
2,5	SG2,5			600	600
Kuat tanah dasar < 2,5% atau tanah lunak			Tebal tanah lunak lebih dari 1 m harus ada penanganan geoteknik, sedangkan tebal tanah lunak kurang dari 1 m dapat diganti dengan tanah timbunan sesuai dengan ketentuan SG2,5.		
Tanah ekspansif			Perbaikan harus sesuai dengan ketentuan geoteknik mengenai potensi muai, dimana tebal lapisan lebih dari 600 mm dengan material yang potensi muai kurang dari 1,5%. Lapisan perbaikan SG2,5 harus ditambahkan di atas lapisan lebih dari 600 mm.		

**Tabel 2. Jenis Struktur Perkerasan**

Struktur perkerasan	Bagan desain	ESA5 [juta] dalam 20 tahun				
		0 – 1	1 – 4	4 – 10	> 10 – 30	> 30
AC modifikasi					-	2
AC dengan CTB	3, 3A, 3B	-	-	-	2	-
AC modifikasi dengan CTB					-	2
AC dengan lapis fondasi agregat	3, 3A, 3B	-	1, 2	1, 2	2	-
HRS tipis di atas lapis fondasi agregat	4	2	2	-	-	-
Burda atau burtu dengan lapis fondasi agregat	5	3	3	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi <i>soil cement</i>	6	2	2	-	-	-
AC/HRS dengan lapis fondasi agregat dan perbaikan tanah dasar (dengan stabilisasi semen)	7	2	2	-	-	-
Perkerasan kaku dengan lalu lintas berat	8	-	-	-	2	2
Perkerasan kaku dengan lalu lintas rendah	8A	-	-	1, 2	-	-
Perkerasan tanpa penutup (japat dan jalan kerikil)	9	1	-	-	-	-

Keterangan: 1 (kontraktor kecil hingga medium), 2 (kontraktor besar dengan sumber daya yang memadai), 3 (membutuhkan keahlian & tenaga ahli khusus hingga kontraktor spesialis burtu/burda)

Desain tebal perkerasan lentur dengan metode Manual Desain Perkerasan 2024 perlu adanya data CBR (*California Bearing Ratio*) tanah dan survei LHR (lalu lintas harian rata-rata). CBR tanah dalam desain perkerasan lentur adalah 4,4% dari pengujian sebelumnya [13]. Sedangkan survei LHR didapat dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional Kota Bandung (Jalan Soekarno Hatta), dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3. Survei Lalu Lintas Jalan Soekarno Hatta**

Gol. kendaraan	Jenis kendaraan	Weekday [kend/hari]	Weekend [kend/hari]	Total [kend/hari]
1	Sepeda motor dan kendaraan roda 3	45.011	21.365	66.376
2	Kendaraan ringan – sedan, <i>jeep</i> , dan <i>station wagon</i>	41.465	14.652	56.117
3	Kendaraan ringan – angkutan umum sedang	3.349	2.266	5.615
5A	Bus kecil	563	326	889
5B	Bus besar	222	117	339
6B	Truk 2 sumbu truk sedang	960	361	1.321
7A2	Truk 3 sumbu berat	175	168	343

### 2.3 Analisis Numerik Elemen Hingga

*Software* yang banyak digunakan dalam memodelkan permasalahan geoteknik seperti perilaku tanah dan struktur dibawah pembebanan adalah PLAXIS 3D. *Software* ini dapat memodelkan interaksi antara tanah, perkerasan dan *stone column* dalam bentuk tiga dimensi. Pemodelan

*Pengaruh Beban Terpusat di Perkerasan Lentur pada Tanah Lempung Lunak dengan Perkuatan Stone Column*

dengan *software* ini sangat mencerminkan kondisi lapangan secara realistis [8], yang disebabkan oleh data geometri yang lebih teliti dan kompleks [6]. PLAXIS 3D memiliki beberapa jenis model material yaitu *soft soil*, *mohr coulomb*, *linear elastic*, dan lainnya, dengan beberapa tipe drainase seperti *undrained* dan *drained*, serta dapat memodelkan tahapan konstruksi dan menentukan titik yang ingin ditinjau. Analisis numerik elemen hingga PLAXIS 3D memodelkan tanah asli dan tanah dengan perkuatan *stone column*. Model diberikan beban perkerasan dan beban lalu lintas, sehingga didapatkan nilai *safety factor*, *displacement* dan daya dukung, serta desain diameter dan jarak *stone column* yang efektif meningkatkan *safety faktor* dan daya dukung perkerasan, serta mengurangi *displacement* pada perkerasan akibat beban. Variasi diameter dan jarak juga diberikan pada model PLAXIS 3D, yang mana variasi diameter yaitu 0,7 m; 0,8 m; 0,9 m dan variasi jarak yaitu 2 m; 2,1 m; 2,2 m. Proses *running software* yang lama [10] mengakibatkan adanya keterbatasan dalam penelitian ini yaitu model yang memiliki lebar total 29 m dengan lebar jalan 9 m, tanah lempung lunak sampai kedalaman tanah keras 40,5 m dengan *groundwater level* 1 m. Parameter seperti *stone column*, lapisan tanah lempung lunak, perkerasan lentur dan beban lalu lintas diperlukan untuk memodelkan penelitian ini dengan menggunakan *software* PLAXIS 3D. Parameter *stone column* dengan model material *Mohr coulomb*, merupakan tanah lempung lunak yang distabilisasi menggunakan 8% abu batok kelapa sawit dan 9% aspal emulsi, dapat dilihat pada **Tabel 4** [13].

**Tabel 4. Survei Lalu Lintas Jalan Soekarno Hatta**

Parameter	Nama	Satuan	Stone column
Model material	Model	-	<i>Mohr coulomb</i>
Tipe drainase	Jenis	-	<i>Undrained A</i>
Berat isi tanah <i>unsaturated</i>	$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	14,88
Berat isi tanah <i>saturated</i>	$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	19,18
Modulus elastisitas	$E$	kN/m <sup>2</sup>	7109
Rasio poisson	$\nu$	-	0,35
Kohesi	$C_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	50
Sudut geser	$\phi$	°	32
Sudut dilatasi	$\psi$	°	0
Permeabilitas	Kx, Ky, Kz	m/day	0,00014

Parameter lapisan tanah lempung lunak yang terdiri dari 6 lapisan dengan model material *soft soil*, terletak di kawasan Gedebage, Bandung, Jawa Barat, dapat dilihat pada **Tabel 5**. Parameter perkerasan lentur yang terdiri dari lapisan fondasi agregat kelas B, lapisan fondasi agregat kelas A, AC *base*, AC BC, AC WC, merupakan parameter dari penelitian sebelumnya [19], dapat dilihat pada **Tabel 6**. Lapisan fondasi agregat kelas B dan lapisan fondasi agregat kelas A dengan model material *Mohr coulomb*. Sedangkan, AC *base*, AC BC, dan AC WC dengan model material *linear elastic*. Parameter beban lalu lintas berdasarkan peraturan SNI 8460-2017, yang mana pada penelitian ini beban lalu lintas yang dipilih adalah 15 kPa dengan kelas jalan I, dapat dilihat pada **Tabel 7** [4].

**Tabel 5. Parameter Lapisan Tanah Lempung Lunak**

Parameter	Lapisan 1	Lapisan 2	Lapisan 3	Lapisan 4	Lapisan 5	Lapisan 6
Model material	<i>Soft soil</i>					
Tipe drainase	<i>Undrained A</i>					
Kedalaman tanah (Hi)	19,9 m	22,7 m	26 m	27,1 m	30,7 m	40,5 m
$\gamma_{unsat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	5,87	2,94	3,99	18,50	3,81	20,50
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	13,35	11,37	12,20	20,50	12,08	22,50
$C_c$	2,318	2,708	3,730	0,259	2,098	0,130
$C_s$	0,232	0,271	0,373	0,026	0,210	0,013
$C_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	12,9	8,0	16,1	5,0	6,9	1,0
$\phi$ (°)	16,3	18,9	20,0	23,9	20,0	34,5
$\psi$ (°)	0	0	0	0	0	0
Kx, Ky, Kz (m/day)	8,64E-05	8,64E-05	0,00864	86,4	0,864	86,4

**Tabel 6. Parameter Perkerasan Lentur**

Parameter	AC WC	AC BC	AC base	lapisan fondasi agregat kelas A	lapisan fondasi agregat kelas B
Model	<i>Linear elastic</i>			<i>Mohr coulomb</i>	
Tipe drainase	<i>Non-porous</i>			<i>Undrained A</i>	
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15	22	23	22	21
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15	22	23	23	22
$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	11.000	13.000	13.000	15.000	15.000
$\nu$	0,35	0,3	0,3	0,3	0,3
$C_{ref}$ (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	50	50
$\phi$ (°)	-	-	-	30	30
$\psi$ (°)	-	-	-	0	0

**Tabel 7. Beban Lalu Lintas**

Kelas jalan	Beban lalu lintas [kPa]
I	15
II	12
III	12

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Tebal Perkerasan Metode Manual Desain Perkerasan 2024

Data CBR sebesar 4,4% dan survei LHR dari Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional Kota Bandung untuk ruas Jalan Soekarno Hatta, merupakan data yang dibutuhkan untuk mendesain tebal perkerasan lentur. Berikut adalah tahapan dalam mendesain tebal perkerasan lentur. Pertama, pada penelitian ini umur rencana perkerasan jalan ( $UR$ ) dengan jenis perkerasan lentur adalah 20 tahun. Faktor laju pertumbuhan lalu lintas ( $i$ ) di pulau Jawa dan merupakan jalan perkotaan adalah 4,8. Setelah umur rencana perkerasan jalan dan faktor laju pertumbuhan lalu lintas telah ditentukan, maka selanjutnya akan dihitung faktor pertumbuhan kumulatif ( $R$ ) selama umur rencana dengan menggunakan **Persamaan 1**. Faktor pertumbuhan kumulatif selama umur rencana dibagi menjadi 2 yaitu selama 3 tahun permulaan periode beban normal muatan sumbu terberat 12 ton dan 17 tahun sisa dari umur rencana perkerasan jalan yang telah ditentukan.

$$R(2025 - 2028) = \frac{(1 + 0,01 \times 4,8)^3 - 1}{0,01 \times 4,8} = 3,15$$

$$R(2028 - 2045) = \frac{(1 + 0,01 \times 4,8)^{17} - 1}{0,01 \times 4,8} = 25,39$$

Kedua, faktor distribusi arah ( $DD$ ) untuk jalan dua arah yang umumnya digunakan adalah 0,5 dan faktor distribusi jalur ( $DL$ ) untuk dua lajur tiap arah adalah 80%. Faktor ekuivalen beban ( $VDF$ ) yang terbagi menjadi 2 yaitu  $VDF_4$  dan  $VDF_5$ . Penentuan faktor ekuivalen beban diambil berdasarkan provinsi di Indonesia yaitu provinsi Jawa Barat – lintas tengah, yang terdiri dari  $VDF$  beban aktual dan  $VDF$  beban normal. Setelah  $DD$ ,  $DL$  dan  $VDF$  ditentukan, maka nilai beban sumbu standar ekuivalen kumulatif ( $CESAL$ ) akan dihitung menggunakan **Persamaan 2**. Namun, sebelum nilai  $CESAL$  dihitung, nilai beban sumbu standar ekuivalen ( $ESA$ ) yang terdiri dari  $ESA_4$  dan  $ESA_5$  harus dihitung terlebih dahulu. Dalam mendesain tebal perkerasan lentur, kegunaan nilai  $ESA_4$  dan  $ESA_5$  dapat disesuaikan dengan kebutuhan perencanaan. Nilai  $CESAL$  dapat dilihat pada **Tabel 8** dan **Tabel 9**, berdasarkan tabel tersebut desain tebal perkerasan lentur menggunakan nilai terbesar yaitu  $CESAL_5$ .

Ketiga, berdasarkan **Tabel 1**, CBR (*California Bearing Ratio*) tanah dasar sebesar 4,4% termasuk ke dalam kategori kelas kuat tanah dasar SG4 dan dari hasil perhitungan nilai  $CESAL_5$  yang melebihi 10 juta maka dapat ditentukan tebal lapisan fondasi perkerasan yang diperlukan adalah setebal 200 mm. Keempat, pemilihan jenis struktur perkerasan dipengaruhi oleh

*Pengaruh Beban Terpusat di Perkerasan Lentur pada Tanah Lempung Lunak dengan Perkuatan Stone Column*

volume lalu lintas dan umur rencana, serta mempertimbangkan biaya terkecil selama umur rencana, tingkat kesulitan pengerjaan konstruksi, kemampuan sumber daya manusia dan waktu pelaksanaan pengerjaan konstruksi, maka berdasarkan **Tabel 2** jenis struktur perkerasan yang dipilih adalah AC dengan lapis fondasi agregat. Setelah tebal lapisan fondasi perkerasan dan jenis struktur perkerasan ditentukan, maka tebal perkerasan masuk ke dalam kategori Bagan Desain 3A yaitu perkerasan lentur aspal dengan lapis fondasi agregat. Tebal lapisan perkerasan dapat dilihat pada **Gambar 2**, didapatkan hasil bahwa tebal perkerasan adalah 530 mm.

**Tabel 8. Nilai CESAL4**

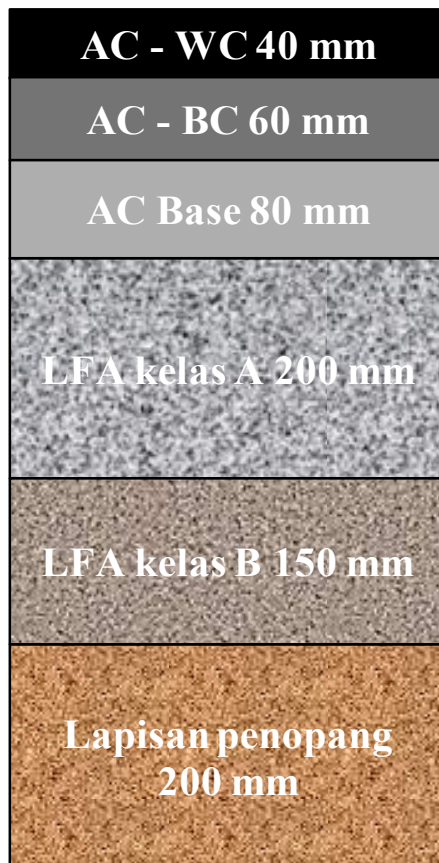
Gol. kend	LHR 2019	LHR 2025	LHR 2028	VDF 4 Aktual	VDF 4 Normal	ESA4	
						Beban aktual (2025 – 2028)	Beban normal (2028 – 2045)
Gol. 1	66.376	87.938	101.219	0	0	0	0
Gol. 2	56.117	74.347	85.575	0	0	0	0
Gol. 3	5.615	7.439	8.563	0	0	0	0
Gol. 5A	889	1.178	1.356	0,3	0,3	162.310	1.507.862
Gol. 5B	339	449	517	1,2	1,2	247.572	2.299.956
Gol. 6B	1.321	1.750	2.014	3,5	1,1	2.813.793	8.215.503
Gol. 7A2	343	454	523	5,7	3,1	1.189.845	6.011.661
Jumlah CESAL4						4.413.519	18.034.983
						22.448.502	

**Tabel 9. Nilai CESAL5**

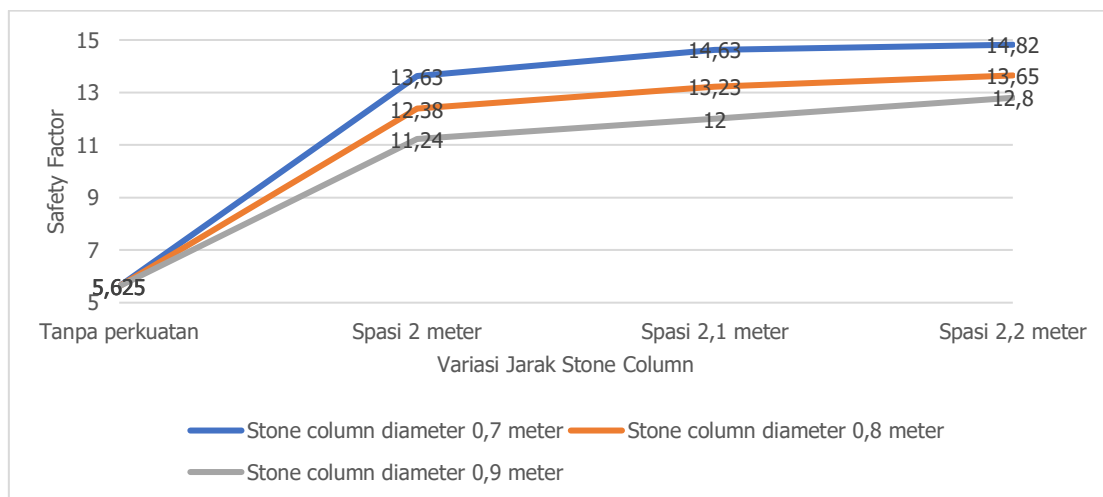
Gol. kend	LHR 2019	LHR 2025	LHR 2028	VDF 5 Aktual	VDF 5 Normal	ESA5	
						Beban aktual (2025 – 2028)	Beban normal (2028 – 2045)
Gol. 1	66.376	87.938	101.219	0	0	0	0
Gol. 2	56.117	74.347	85.575	0	0	0	0
Gol. 3	5.615	7.439	8.563	0	0	0	0
Gol. 5A	889	1.178	1.356	0,3	0,3	108.206	1.005.242
Gol. 5B	339	449	517	1,2	1,2	268.203	2.491.619
Gol. 6B	1.321	1.750	2.014	3,5	1,1	3.939.310	7.468.639
Gol. 7A2	343	454	523	5,7	3,1	1.920.451	7.756.982
Jumlah CESAL5						6.236.170	18.722.482
						24.958.652	

### 3.2 Analisis Numerik PLAXIS 3D

Pemodelan dengan menggunakan *software* PLAXIS 3D memodelkan tanah asli dan tanah dengan perkuatan *stone column*, dengan variasi diameter yaitu 0,7 m; 0,8 m; 0,9 m dan variasi jarak yaitu 2 m; 2,1 m; 2,2 m. *Software* PLAXIS 3D menyajikan hasil dari *safety factor*, *displacement*, dan daya dukung, yang dapat dilihat pada **Gambar 3 hingga Gambar 5**. Pertama, berdasarkan SNI 8460:2017 *safety factor* harus > 1,5. Pada **Gambar 3**, diketahui bahwa *safety factor* tanah asli pada fase konstruksi beban lalu lintas selama 10 tahun adalah 5,625. Sedangkan *safety factor* paling besar pada tanah dengan perkuatan *stone column* terdapat pada model *stone column* diameter 0,7 meter dan jarak 2,2 meter; dengan *safety factor* sebesar 14,82 dan dapat meningkatkan *safety factor* tanah asli sebesar 163,47%. Pada kedua model, baik model tanah asli dan model tanah dengan perkuatan *stone column* sudah memenuhi syarat *safety factor*.



Gambar 2. Tebal lapisan perkerasan

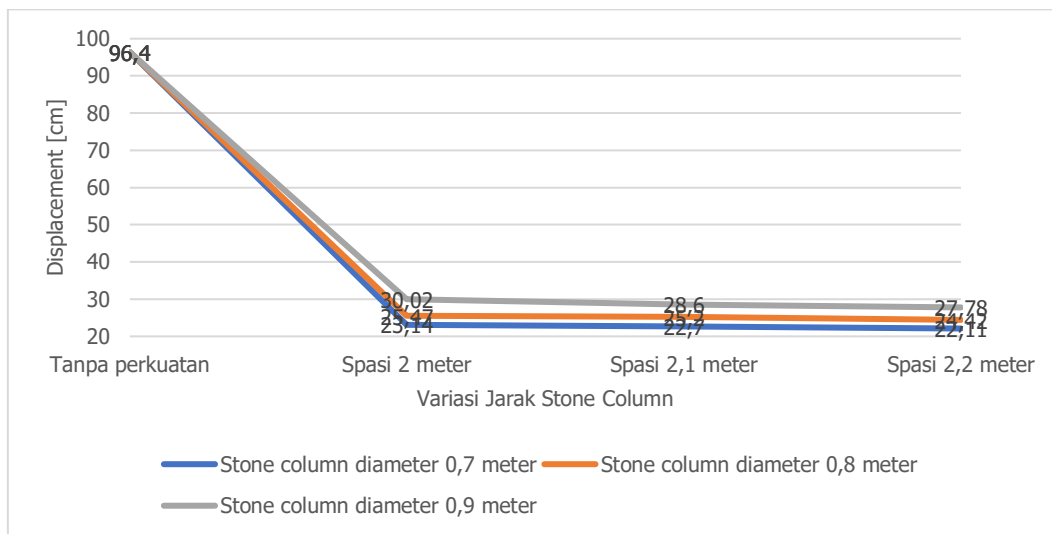


Gambar 3. Grafik *safety factor*

Kedua; batas penurunan tanah yang ditetapkan berdasarkan pedoman SNI 8460:2017 adalah 2,5 cm pertahun; sehingga jika model tanah asli dan model tanah dengan perkuatan *stone column* dimodelkan selama 10 tahun maka batas penurunan tanah adalah 25 cm selama 10 tahun. Berdasarkan **Gambar 4**, *displacement* tanah asli pada fase konstruksi beban lalu lintas selama 10 tahun adalah 96,4 cm dan belum memenuhi syarat. Sedangkan pada tanah dengan perkuatan *stone column*; model *stone column* diameter 0,7 meter dan jarak 2,2 meter memiliki nilai *displacement* paling kecil yaitu 22,11 cm; dapat mengurangi *displacement* tanah asli sebesar 77,06%. Akan tetapi; pada model *stone column* diameter 0,8 meter dan spasi 2,2

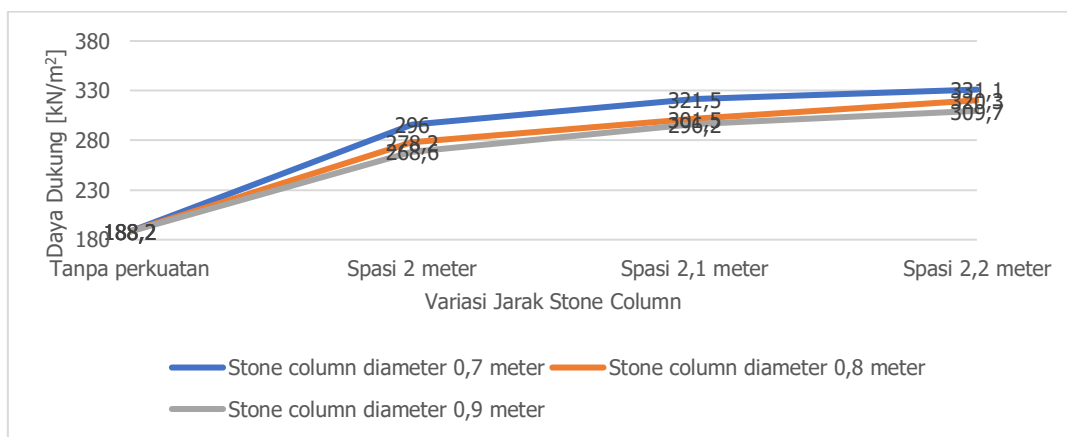
*Pengaruh Beban Terpusat di Perkerasan Lentur pada Tanah Lempung Lunak dengan Perkuatan Stone Column*

meter sebenarnya sudah memenuhi syarat yaitu 24,42 cm serta dapat mengurangi *displacement* tanah asli sebesar 74,67%.



**Gambar 4. Grafik displacement**

Ketiga, perbandingan daya dukung tanah asli dan tanah dengan perkuatan *stone column* pada fase konstruksi beban lalu lintas selama 10 tahun dapat dilihat pada **Gambar 5**. Model tanah asli memiliki daya dukung sebesar 188,2 kN/m<sup>2</sup>. Sedangkan model *stone column* diameter 0,7 meter dan spasi 2,2 meter memiliki daya dukung paling besar yaitu 331,1 kN/m<sup>2</sup> dan dapat meningkatkan daya dukung tanah asli sebesar 75,93%.



**Gambar 5. Grafik daya dukung**

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini telah mendesain tebal perkerasan lentur dengan menggunakan metode Manual Desain Perkerasan 2024 dan mengeksplor variasi parameter *stone column*, seperti diameter, jarak antar kolom terhadap reduksi penurunan tanah, peningkatan daya dukung dan stabilitas jalan pada tanah lempung lunak dengan *software* PLAXIS 3D. Tebal perkerasan lentur yang terdiri dari lapisan fondasi agregat kelas B, lapisan fondasi agregat kelas A, AC base, AC BC, AC WC adalah 53 cm. Semakin kecil diameter dan semakin jauh jarak *stone column*, maka *safety factor* dan daya dukung semakin besar serta displacement semakin kecil. Pada penelitian ini, model *stone column* dengan kombinasi diameter 0,8 meter dan jarak 2,2 meter dipilih untuk memperkuat kondisi tanah asli. Model *stone column* dengan diameter 0,8 meter

dan jarak 2,2 meter mampu meningkatkan kondisi tanah asli secara signifikan. *Safety factor* yang dihasilkan mencapai 13,65; meningkat sebesar 142,67% dibandingkan tanah asli. *Displacement* berkurang menjadi 24,42 cm dan dapat mereduksi sebesar 74,67%. Selain itu, daya dukung tanah meningkat menjadi 320,3 kN/m<sup>2</sup>; atau naik sebesar 70,19% dari kondisi tanah asli. Perlu adanya eksplorasi penggunaan bahan stabilisasi tambahan lainnya, yang juga dapat meningkatkan kekuatan dan stabilitas tanah, serta mengurangi penurunan tanah. Penggunaan *software* lainnya dapat memperkuat hasil prediksi perilaku *stone column* secara akurat. Terakhir, analisis biaya dan manfaat dari penggunaan *stone column* dibandingkan dengan metode perbaikan tanah lainnya penting untuk menentukan kelayakan ekonomi teknik ini dalam proyek infrastruktur.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. (1993). "*AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*"; American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [2] K., Abizar, & S., Widodo, (2021). "Analisa Perbandingan Biaya Siklus Hidup Perkerasan Lentur dan Perkerasan Kaku Pada Rencana Pembangunan Outer Ring Road (ORR) Kota Pontianak". *Jurnal Teknik Sipil*, 21(2). <https://doi.org/10.26418/jtsft.v21i2.59215>
- [3] N. R., Alkhorshid, G. L. S., Araujo, & E. M., Palmeira, (2021). "Consolidation of Soft Clay Foundation Improved by Geosynthetic - Reinforced Granular Columns: Numerical Evaluation", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(5), pp. 1173-1181. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.03.004>
- [4] Badan Standardisasi Nasional, (2017). "SNI 8460:2017 tentang *Persyaratan Perancangan Geoteknik*", Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [5] W. Q., Feng, D. Y., Tan, J. H., Yin, J. Q., Qin, & W. B., Chen, (2020). "Experimental and Numerical Studies on the Performances of Stone Column and Sand Compaction Pile - Reinforced Hong Kong Marine Clay", *International Journal of Geomechanics*, 20(8), pp. 1-6. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001739](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001739)
- [6] D., Hidayat, Y. M., Purwana, & F. P., Pramesti, (2016). "Analisis Material Ringan dengan Mortar Busa Pada Konstruksi Timbunan Jalan", *Prosiding SEMNASTEK (Seminar Nasional Sains dan Teknologi)*, pp. 1-10.
- [7] D., Kusumaningrum, G. S., Utami, & J. C., Atmaja, (2021). "Soil Improvement Planning Combination of Preloading and Stone Column (Case Study) in Sidorukun District, Gresik, Jawa Timur". *Jurnal IPTEK Media Komunikasi Teknologi*, 25(2), pp. 117-126. <https://doi.org/10.31284/j.iptek.2021.v25i2.2128>
- [8] H., Leung, C., Gani, W., Okada, & S., Terzaghi, (2016). "Comparison of The Effectiveness of Deep Soil Mix Columns Using 2-D and 3-D Plaxis", *Plaxis Practice*, pp. 20-22.
- [9] B. T., Lima, M. S. S., Almeida, & I., Hosseinpour, (2019). "Field Measured and Simulated Performance of a Stone Columns - Strengthened Soft Clay Deposit", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 16(6), pp. 776-785. <https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1653506>
- [10] S. M., Marandi, M., Anvar, & M., Bahrami, (2016). "Uncertainty Analysis of Safety Factor of Embankment Built on Stone Column Improved Soft Soil Using Fuzzy Logic A-Cut Technique", *Computers and Geotechnics*, 75, pp. 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.01.014>
- [11] J. K., Mitchell, (1981). "Soil Improvement: State of The Art Report", *10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 509-565. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [12] J. K., Mitchell, & T. R., Huber, (1985). "Performance of A Stone Column Foundation", *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(2), pp. 205-223. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:2\(205\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:2(205))

- [13] M., Morissa, & S., Syahril, (2021). "Effect of Addition of Palm Shell Ash and Asphalt Emulsion for Bearing Capacity on Clay Soils", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1098/2/022059>
- [14] K. G., Prakash, & A., Krishnamoorthy, (2023). "Effectiveness of Stone and Deep Mixing Lime Columns on Stability of Embankments Constructed on Soft Consolidating Soil", *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, pp. 533–552. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02269-5>
- [15] S. S. G., Prasad, & P. V. V., Satyanarayana, (2016). "Improvement of Soft Soil Performance Using Stone Columns Improved with Circular Geogrid Discs", *Indian Journal of Science and Technology*, 9(30), pp. 1–6. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i30/99186>
- [16] H. F., Shehata, T. M., Sorour, & A. L., Fayed, (2018). "Effect of Stone Column Installation on Soft Clay Behavior", *International Journal of Geotechnical Engineering*, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1080/19386362.2018.1478245>
- [17] S. K., Tan, & S. S., Liew, (2012). "Performance of Reinforced Soil Wall Supported by Stone Column", *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE)*, pp. 1461–1466. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [18] A., Vahedian, S., Mahini, & S. A., Aghdaei, (2014). "A Short State of The Art Review on Construction and Settlement of Soft Clay Soil Reinforced with Stone Column". *IJET International Journal of Engineering and Technology*, 6(5), pp. 420–426. <https://doi.org/10.7763/ijet.2014.v6.735>
- [19] Y., Widiastuti, (2016). "Aplikasi Program Plaxis dalam Analisis Numerik Deformasi Lapis Fondasi Jalan Poncosari – Greges Yogyakarta", *RENOVASI : Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, pp. 1–17.
- [20] A., Yousefi, H., Jahanian, & M., Azadi, (2020). "Effect of Adding Cement and Nanocement on Mechanical Properties of Clayey Soil", *European Physical Journal Plus*, 135(649), pp. 1–16. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00639-7>
- [21] I. G. N. A., Yudistira, & Y., Lastiasih, (2023). "Analysis of Soft Soil Setting with Reinforcement Grouped Stone Column", *Riwayat: Educational Journal of History and Humanities*, 6(4), pp. 3183–3189. <https://doi.org/10.24815/jr.v6i4.36738>
- [22] H., Zhou, G., Zheng, X., He, X., Xu, T., Zhang, & X., Yang, (2018). "Bearing Capacity of Strip Footings On C- $\Phi$  Soils with Square Voids", *Acta Geotechnica*, 13(7). <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0630-0>