

BAB 5

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Umum

Dalam Bab pembahasan ini, fokus akan diberikan pada analisa potensi likuifaksi berdasarkan data SPT serta alternatif perbaikannya menggunakan metode *Stone Column*. Langkah-langkah analisis akan diuraikan secara terperinci, disertai dengan interpretasi hasil dan implikasinya terhadap penelitian ini. Perhitungan pada bab ini hanya dipaparkan contoh perhitungan pada titik DB-01 namun keseluruhan analisa semua titik tetap dipaparkan. Data yang dibutuhkan untuk menganalisa potensi likuifaksi antara lain yaitu data N-SPT, muka air tanah, profil tanah, dan percepatan gempa.

Langkah awal dalam menganalisis likuifaksi adalah menentukan apakah tanah tersebut rentan terhadap likuifaksi. Hal ini dilakukan dengan mencari nilai CSR dan CRR, lalu membandingkan kedua nilai tersebut untuk mendapatkan nilai faktor keamanan (FS). Berdasarkan data FS ini, dapat disimpulkan apakah lapisan tanah tersebut aman atau tidak dari potensi likuifaksi.

5.2 Pengumpulan Data Parameter Tanah

Tahap pengumpulan data adalah langkah penting untuk menentukan penyelesaian masalah secara ilmiah. Data yang dikumpulkan mencakup data primer dan data sekunder.

Bagian ini membahas proses pengumpulan data parameter tanah yang merupakan tahap krusial dalam penelitian ini. Pengumpulan data dilakukan dengan cermat untuk memperoleh informasi yang akurat dan relevan terkait karakteristik tanah di lokasi studi.

Berdasarkan hasil pengujian di lapangan menggunakan SPT (*Standard Penetration Test*) didapatkan nilai N-SPT per lapisan tanah secara vertikal dan untuk menentukan hubungan antara N-SPT dengan konsistensi tanah pasir dan lempung dapat dilihat berdasarkan **Tabel 5.1** dan **Tabel 5.2**

Tabel 5.1 Hubungan N-SPT Dengan Konsistensi Tanah Pasir

Consistency	Relative Density (%)	N-SPT (blows per ft)	Angle of Internal Friction (deg)	Unit Weight	
				Moist (psf)	Submerged (psf)
Very loose	0 - 15	0 - 4	< 28	< 100	< 60
Loose	16 - 35	5 - 10	28 - 30	95 - 125	55 - 65
Medium	36 - 65	11 - 30	31 - 36	110 - 130	60 - 70
Dense	66 - 85	31 - 50	37 - 41	110 - 140	65 - 85
Very dense	86 - 100	> 51	> 41	> 130	> 75

Sumber : Mayerhoff, 1956

Tabel 5.2 Hubungan N-SPT Dengan Konsistensi Tanah Lempung

Consistency	Unconfined Compression Strength, q_u (KN/m ²)	N-SPT (blows per ft)	Saturated Unit Weight (KN/M ³)
Very Soft	0 - 25	0 - 2	< 16
Soft	25 - 50	2 - 4	16 - 19
Medium	50 - 100	4 - 8	17 - 20
Stiff	100 - 200	8 - 15	18 - 20
Very Stiff	200 - 400	15 - 30	19 - 22
Hard	> 400	> 30	> 20

Sumber : Terzaghi & Peck, 1967

Tabel 5.3 Karakteristik N-SPT DB-01

Borehole Log DB-01 Bethesda Hospital Serang						
Layer	Elevasi (m)	MAT (m)	Kondisi Tanah	Tebal Tanah (m)	Jenis Tanah	N-SPT
1	1	8	Tidak Jenuh	1	Batu	50
2	2		Tidak Jenuh	1	Lempung	3
3	4		Tidak Jenuh	2	Lempung	10
4	6		Tidak Jenuh	2	Lanau	37
5	8		Tidak Jenuh	2	Pasir	50
6	10		Jenuh	2	Pasir	50
7	12		Jenuh	2	Pasir	50
8	14		Jenuh	2	Pasir	50
9	16		Jenuh	2	Pasir	50
10	18		Jenuh	2	Pasir	50

Borehole Log DB-01 Bethesda Hospital Serang						
Layer	Elevasi (m)	MAT (m)	Kondisi Tanah	Tebal Tanah (m)	Jenis Tanah	N- SPT
11	20	8	Jenuh	2	Pasir	50
12	22		Jenuh	2	Pasir	50
13	24		Jenuh	2	Pasir	50
14	26		Jenuh	2	Pasir	50
15	28		Jenuh	2	Pasir	50
16	30		Jenuh	2	Lanau	50
17	32		Jenuh	2	Lanau	50
18	34		Jenuh	2	Lanau	38
19	36		Jenuh	2	Lanau	47
20	38		Jenuh	2	Lanau	50
21	40		Jenuh	2	Lanau	50

Sumber : PT Totalindo Eka Persada Tbk

Adapun untuk menentukan berat volume dengan korelasi nilai N-SPT dapat dilihat pada **Tabel 5.4 dan Tabel 5.5**

Tabel 5.4 Korelasi Empiris antara Nilai N-SPT dengan Kekuatan Tekan Bebas dan Berat Jenis untuk Tanah Kohesif

N SPT (blows/ft)	Konsistensi	q_u (Unconfined Compressive Strength) tons / ft ²	γ_{sat} kN/ m ³
< 2	Very soft	< 0,25	16 – 19
2 – 4	Soft	0,25 – 0,50	16 – 19
4 – 8	Medium	0,50 – 1,00	17 – 20
8 – 15	Stiff	1,00 – 2,00	19 – 22
15 – 30	Very stiff	2,00 – 4,00	19 – 22
> 30	Hard	> 4,00	19 – 22

Sumber : Soil Mechanics, Lambe & Whitman, from Terzaghi and Peck 1948, Internasional Edition 1969

Tabel 5.5 Korelasi N-SPT dengan Berat Volume

SPT Penetration, N-Value (blows/ foot)	γ (kN/m ³) Range	
0 - 4	10.997	15.710
4 - 10	14.139	18.067
10 - 30	17.281	20.423
30 - 50	17.281	21.994
>50	20.423	23.565

Sumber : Bowles, 1996

Tabel 5.6 Berat Volume pada DB-01

Borehole Log DB-01 Bethesda Hospital Serang					
Layer	Elevasi	MAT	Deskripsi Tanah	N-SPT	γ
	(m)				(kN/m ²)
1	1	8	Batu	50	23.565
2	2		Lempung Berlumpur, Coklat Tua, Lembab, Plastisitas Rendah	3	15.710
3	4		Lempung Berlumpur, Coklat Keabu-abuan, Lunak Lembab, Plastisitas Tinggi	10	18.067
4	6		Lempung Berlumpur, Coklat Keabu-abuan, Lunak Lembab, Plastisitas Tinggi	37	21.994
5	8		Pasir Tersemen Berwarna Keputihan, Abu-Abu Kekuningan, Basah, Sangat Padat, Bergradasi Buruk	50	23.565
6	10			50	23.565
7	12		Pasir Tersemen Berwarna Keputihan, Abu-Abu Kekuningan, Basah, Sangat Padat, Bergradasi Buruk	50	23.565
8	14			50	23.565
9	16			50	23.565
10	18			50	23.565
11	20			50	23.565
12	22			50	23.565
13	24			50	23.565
14	26			50	23.565
15	28			50	23.565
16	30		Lanau Berpasir Abu-Abu, Lembab, Keras, Plastisitas Rendah	50	23.565
17	32		Lanau Berpasir, Abu-Abu Kecoklatan Keputihan, Lembab, Keras, Plastisitas Rendah	50	23.565
18	34			38	21.994
19	36			47	21.994
20	38		Lanau Tersementasi Berwarna Coklat Keabu-Abuan, Lembab, Keras, Plastisitas Rendah	50	23.565
21	40			50	23.565

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Selanjutnya yaitu mencari nilai *shear wave velocity* (V_s). Nilai V_s (m/s) didapatkan dari rumus korelasi dengan N-SPT sebagai berikut :

$$V_s = 97(N-SPT)^{0,314}$$

Nilai *shear wave velocity* (V_s) pada layer 5

$$N-SPT = 50$$

$$\begin{aligned}
 V_{s\text{Layer}10} &= 97(N-SPT)^{0,314} \\
 &= 97(50)^{0,314} \\
 &= 331,321 \text{ m/s} \\
 &= 1087,010 \text{ ft/s}
 \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (Vs) pada layer 16

$$\text{N-SPT} = 30$$

$$\begin{aligned} V_{\text{SLayer10}} &= 97(\text{N-SPT})^{0,314} \\ &= 97(30)^{0,314} \\ &= 331,321 \text{ m/s} \\ &= 1087,010 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (Vs) pada layer 17

$$\text{N-SPT} = 32$$

$$\begin{aligned} V_{\text{SLayer10}} &= 97(\text{N-SPT})^{0,314} \\ &= 97(32)^{0,314} \\ &= 331,321 \text{ m/s} \\ &= 1087,010 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (Vs) pada layer 18

$$\text{N-SPT} = 34$$

$$\begin{aligned} V_{\text{SLayer10}} &= 97(\text{N-SPT})^{0,314} \\ &= 97(34)^{0,314} \\ &= 303,965 \text{ m/s} \\ &= 997,261 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (Vs) pada layer 19

$$\text{N-SPT} = 36$$

$$\begin{aligned} V_{\text{SLayer10}} &= 97(\text{N-SPT})^{0,314} \\ &= 97(36)^{0,314} \\ &= 324,945 \text{ m/s} \\ &= 1066,094 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (Vs) pada layer 20

$$\text{N-SPT} = 38$$

$$\begin{aligned} V_{\text{SLayer10}} &= 97(\text{N-SPT})^{0,314} \\ &= 97(38)^{0,314} \\ &= 331,321 \text{ m/s} \\ &= 1087,010 \text{ ft/s} \end{aligned}$$

Nilai *shear wave velocity* (V_s) pada layer 21

$$N\text{-SPT} = 40$$

$$V_{s\text{Layer10}} = 97(N\text{-SPT})^{0,314}$$

$$= 97(40)^{0,314}$$

$$= 331,321 \text{ m/s}$$

$$= 1087,010 \text{ ft/s}$$

Tabel 5.7 *Shear wave velocity* DB-01

<i>Shear wave velocity</i> (V_s) DB-01			
Depth	N-SPT	V_s	V_s
		(m/s)	ft/s
1	50	331.321	1087.010
2	3	136.958	449.338
4	10	199.881	655.778
6	37	301.430	988.945
8	50	331.321	1087.010
10	50	331.321	1087.010
12	50	331.321	1087.010
14	50	331.321	1087.010
16	50	331.321	1087.010
18	50	331.321	1087.010
20	50	331.321	1087.010
22	50	331.321	1087.010
24	50	331.321	1087.010
26	50	331.321	1087.010
28	50	331.321	1087.010
30	50	331.321	1087.010
32	50	331.321	1087.010
34	38	303.965	997.261
36	47	324.945	1066.094
38	50	331.321	1087.010
40	50	331.321	1087.010

Sumber : Hasil Analisis, 2024

5.3 Motion Gempa Sintetik

Dalam analisis nilai percepatan gempa di permukaan, ditemukan variasi yang signifikan di berbagai lokasi, yang mempengaruhi secara langsung respons struktural dan kerentanan masyarakat terhadap guncangan gempa. Data gempa

yang diperlukan yaitu data riwayat gempa, PGA, ΔT . Riwayat gempa di dapatkan melalui website *PEER Strong Motion Database* menggunakan data kejadian gempa Borrego Mountain pada tahun 1968. Database ini menyediakan kumpulan data gerakan tanah dari berbagai kejadian gempa di seluruh dunia, memungkinkan para peneliti untuk menganalisis pola, intensitas, dan dampak gempa secara lebih mendalam.

Karena tidak tersedia rekaman gempa dengan magnitudo dan jarak yang sama dengan gempa yang ditentukan, maka perlu dicari rekaman percepatan seismik yang karakteristiknya sesuai dengan karakteristik gempa dominan di lokasi yang ditinjau. *Ground motion* yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari pencatatan *accelerogram* alami yang memenuhi kriteria jarak dan magnitudo gempa di wilayah Cilegon.

Gambar 5.1 Input Data Kejadian Gempa

Sumber : PEER *Ground motion*, 2024

Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Rjb(km)	Rrup(km)	Vs30(m/s)	Lowest useable freq (Hz)	Initial-Search SF	H1 Acc. File Name
Borrego Mtn	1968	San Onofre - So Cal Edison	6.63	strike slip	129.11	129.11	442.88	0.1625	1.0	BORREGO_SON033.AT

Gambar 5.2 Data Kejadian Gempa

Sumber : PEER *Ground motion*, 2024

Langkah berikutnya adalah menganalisis respon spektrum yang nantinya dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan nilai percepatan dan amax. Untuk

mendapatkan respon spektrum dengan cepat, dapat dilakukan dengan menginput lokasi kajian ke dalam desain spektra Indonesia, dan hasilnya bisa dibandingkan dengan analisis manual yang telah dibuat. Grafik respon spektrum menggunakan desain spektra Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 5.4** berikut.

Jenis Input:

Nama Kota ▼

Kota:

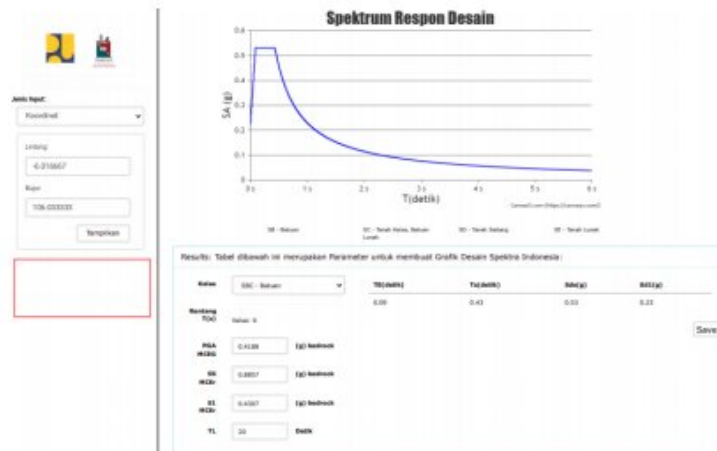
Cilegon ▼

Tampilkan



Gambar 5.3 Input Nama Kota yang Ditinjau

Sumber : rsa.ciptakarya.pu.go.id



Gambar 5.4 Grafik Respon Spektrum

Sumber : rsa.ciptakarya.pu.go.id

Setelah menginput koordinat maka akan dihasilkan grafik respon spektrum, berikut hasil dari perhitungan grafik respon spektrum melalui desain spektra Indonesia.

$$PGA = 0,4188 \text{ g}$$

$$SS = 0,8857 \text{ g}$$

$$S1 = 0,4307 \text{ g}$$

TL = 20 detik
 T0 = 0,09 detik
 Ts = 0,43 detik
 Sds = 0,53 g
 Sd1 = 0,23 g

5.4 Nilai Percepatan Gempa Maksimum di Permukaan

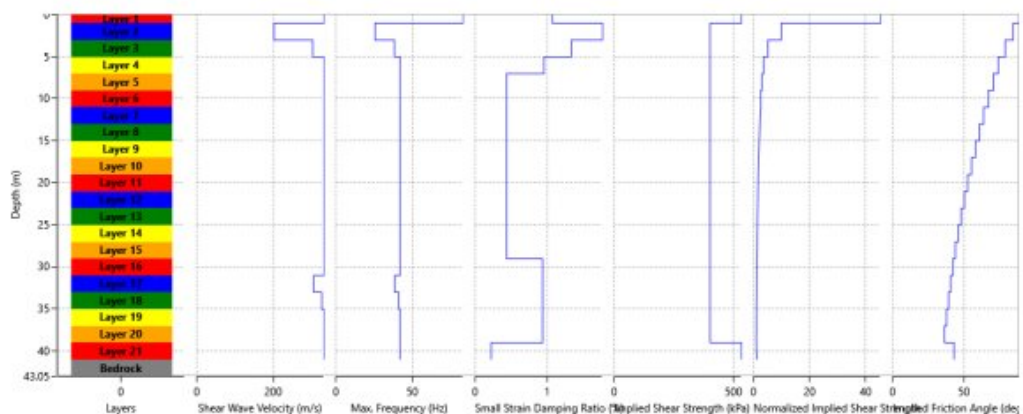
Percepatan maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) adalah nilai percepatan tanah tertinggi yang terjadi di permukaan suatu wilayah dalam periode waktu tertentu akibat getaran gempa bumi (Massinai et al., 2016). Analisis ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak DeepSoil, dengan menginput data percepatan pada batuan dasar (*ground motion*) sintetik serta data properti tanah. Adapun langkah-langkah menggunakan *software DeepSoil* sebagai berikut:

- a. Memasukan data profil tanah

Basic Soil Properties	
Parameter	Value
Thickness (m)	1
Unit Weight (kN/m ³)	23.565
Shear Wave Velocity	331.321
Effective Vertical Stress	11.7825
Shear Strength (kPa)	558.979

Gambar 5.5 Input Data Profil Tanah DB-01

Sumber : Hasil Analisis,2024



Gambar 5.6 Soil Profile Plot pada DB-01

Sumber : Hasil Analisis,2024

b. Memasukan data riwayat gempa

```

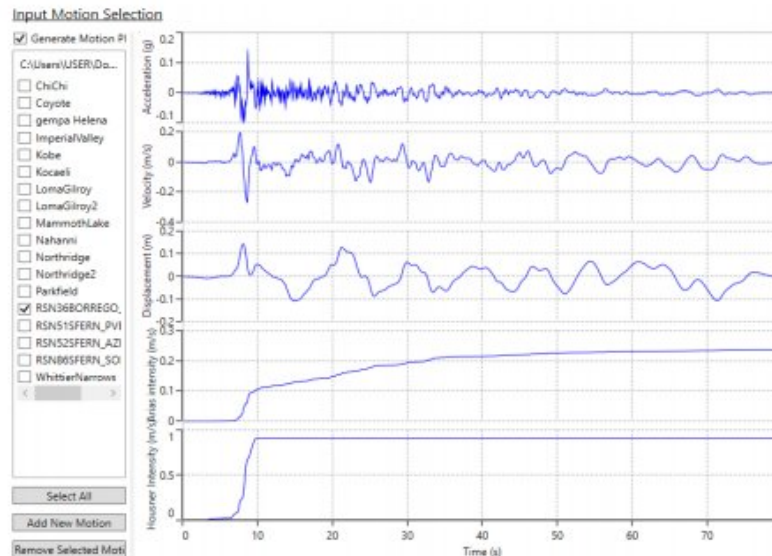
Line:[1]: PEER NGA STRONG MOTION DATABASE RECORD
Line:[2]: Borrego Mtn, 4/9/1968, San Onofre - So Cal Edison, 33
Line:[3]: ACCELERATION TIME SERIES IN UNITS OF G
Line:[4]: NPTS= 9041, DT= .0050 SEC,
Line:[5]: -.1179558E-03 -.1179976E-03 -.1180434E-03 -.1180875E-03 -.1181336E-03
Line:[6]: -.1181768E-03 -.1182207E-03 -.1182631E-03 -.1183048E-03 -.1183434E-03
Line:[7]: -.1183831E-03 -.1184168E-03 -.1184463E-03 -.1184646E-03 -.1184719E-03
Line:[8]: -.1184606E-03 -.1184293E-03 -.1183828E-03 -.1183459E-03 -.1183413E-03
Line:[9]: -.1183991E-03 -.1185326E-03 -.1187556E-03 -.1190789E-03 -.1195246E-03
Line:[10]: -.1201110E-03 -.1208715E-03 -.1218335E-03 -.1230361E-03 -.1245010E-03
Line:[11]: -.1262323E-03 -.1282113E-03 -.1302346E-03 -.1319454E-03 -.1330854E-03
Line:[12]: -.1335345E-03 -.1333358E-03 -.1326002E-03 -.1314669E-03 -.1299457E-03
Line:[13]: -.1279401E-03 -.1252889E-03 -.1218467E-03 -.1174711E-03 -.1120878E-03
Line:[14]: -.1058177E-03 -.9970021E-04 -.9520254E-04 -.9327079E-04 -.9410600E-04
Line:[15]: -.9728278E-04 -.1020702E-03 -.1077682E-03 -.1139045E-03 -.1203521E-03
Line:[16]: -.1271266E-03 -.1342498E-03 -.1417684E-03 -.1498334E-03 -.1584254E-03
Line:[17]: -.1671263E-03 -.1753665E-03 -.1828901E-03 -.1897318E-03 -.1962334E-03
Line:[18]: -.2027752E-03 -.2097589E-03 -.2173900E-03 -.2257591E-03 -.2336533E-03
Line:[19]: -.2388775E-03 -.2397047E-03 -.2356272E-03 -.2271582E-03 -.2153989E-03
Line:[20]: -.1994115E-03 -.1753536E-03 -.1393127E-03 -.8960777E-04 -.2685808E-04
Line:[21]: .4480033E-04 .1191757E-03 .1916353E-03 .2605291E-03 .3268560E-03
Line:[22]: .3876108E-03 .4351870E-03 .4645856E-03 .4752390E-03 .4708037E-03
Line:[23]: .4520191E-03 .4170251E-03 .3652287E-03 .2979912E-03 .2177206E-03
Line:[24]: .1272694E-03 .2888724E-04 .6872005E-04 .1514903E-03 .2061154E-03
Line:[25]: -.2254790E-03 -.2120479E-03 -.1747104E-03 -.1245791E-03 -.7051757E-04
Line:[26]: -.1709663E-04 .3486687E-04 .8726054E-04 .1427192E-03 .2033713E-03
Line:[27]: .2583659E-03 .2862777E-03 .2718505E-03 .2121318E-03 .1164132E-03

```

Gambar 5.7 Input Data Riwayat Gempa

Sumber : Hasil Analisis,2024

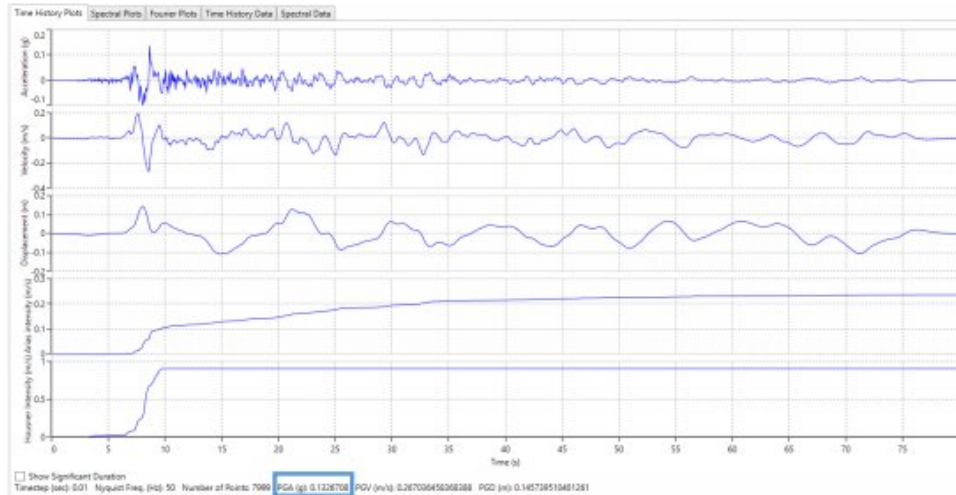
c. Memproses data gempa yang telah diinput



Gambar 5.8 Proses Data Gempa

Sumber : Hasil Analisis,2024

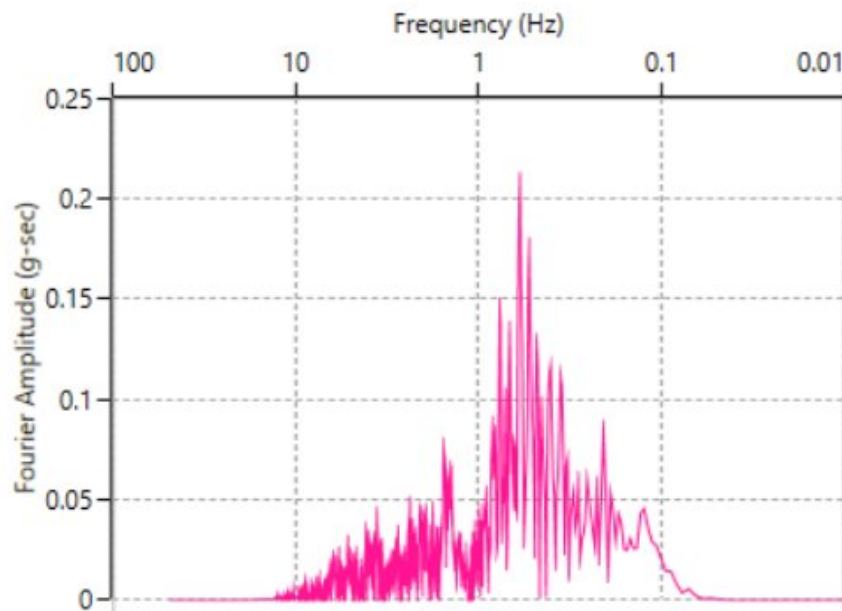
d. Percepatan gempa maksimum hasil dari proses output



Gambar 5.9 Percepatan Gempa Maksimum (amax)

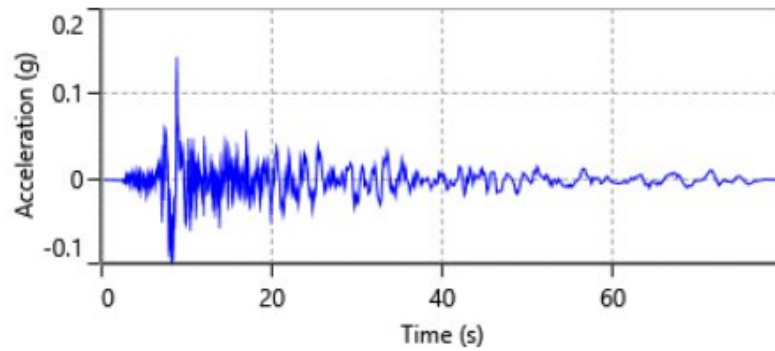
Sumber : Hasil Analisis,2024

Berdasarkan hasil analisa didapatkan nilai PGAdi DB-01 sebesar 0,1326708 g. Berdasarkan hasil output analisa *DeepSoil* didapatkan nilai amplifikasi nilai percepatan gempa di batuan dasar sampai di permukaan tanah, respon spectra percepatan, respon spectra kecepatan dan respon spectra pergerakan di permukaan tanah.



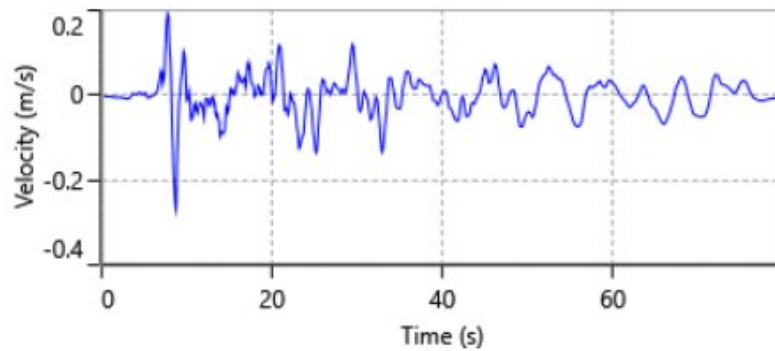
Gambar 5.10 Faktor Amplifikasi DB-01

Sumber : Hasil Analisis,2024



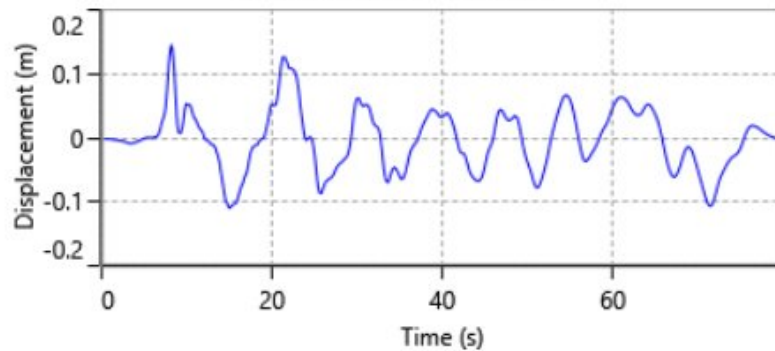
Gambar 5.11 *Acceleration DB-01*

Sumber : Hasil Analisis,2024



Gambar 5.12 *Velocity DB-01*

Sumber : Hasil Analisis,2024



Gambar 5.13 *Displacement DB-01*

Sumber : Hasil Analisis,2024

5.5 Analisis Potensi Likuifaksi

Likuifaksi adalah fenomena di mana tanah jenuh kehilangan kekuatannya dengan cepat akibat getaran gempa bumi, yang menyebabkan peningkatan tekanan air dan penurunan daya ikat dalam lapisan tanah. Potensi likuifaksi dapat diidentifikasi menggunakan data laboratorium atau data lapangan, salah satunya adalah data SPT.

5.6 Analisis Data SPT

Perhitungan analisis likuifaksi menggunakan data SPT memerlukan bantuan perangkat lunak yaitu Microsoft Excel, yang nantinya akan digunakan untuk membuat grafik guna mempermudah analisis potensi likuifaksi pada tanah tersebut.

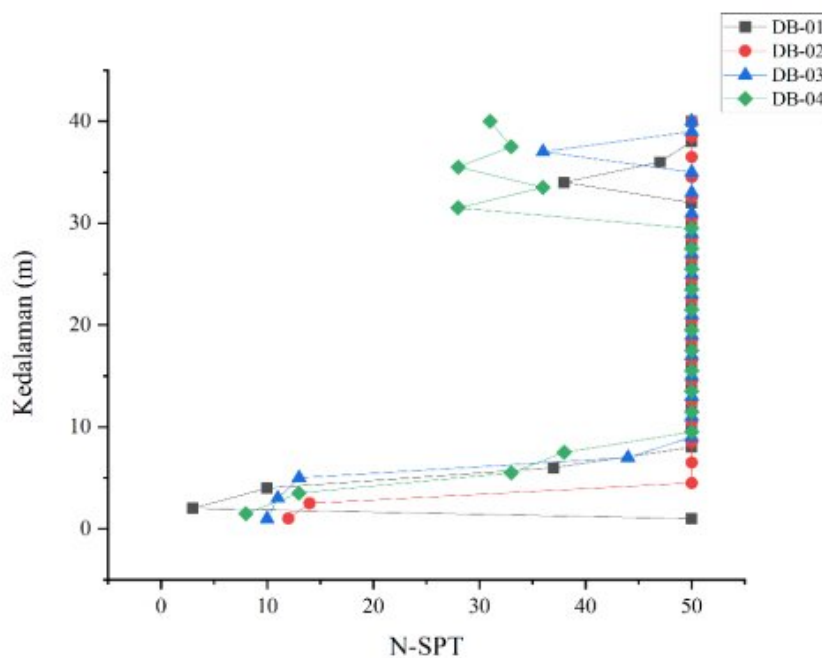
Kedalaman Lapisan : 40 meter

Percepatan gravitasi : $9,81 \text{ m/s}^2$

Berat volume air (γ_w) : $9,81 \text{ kN/m}^3$

Adapun grafik hubungan antara nilai N-SPT dengan kedalaman dapat dilihat pada

Gambar 5.14



Gambar 5.14 Grafik Hubungan Nilai N-SPT dengan Kedalaman

Sumber : Hasil Analisis, 2024

a. Menghitung Percepatan Gempa Maksimum di Permukaan (a_{max})

Didapatkan hasil analisis percepatan gempa maksimum (a_{max}) menggunakan software *DeepSoil* yaitu sebesar 0,1326708 g.

b. Menghitung Berat Isi Tanah Kering

1) Nilai *dry density* pada layer 5

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 23,565 - 9,81\end{aligned}$$

$$= 13,755 \text{ kN/m}^3$$

2) Nilai *dry density* pada layer 16

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 23,565 - 9,81 \\ &= 13,755 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

3) Nilai *dry density* pada layer 17

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 23,565 - 9,81 \\ &= 13,755 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

4) Nilai *dry density* pada layer 18

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 21,994 - 9,81 \\ &= 12,184 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

5) Nilai *dry density* pada layer 19

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 12,184 - 9,81 \\ &= 12,184 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

6) Nilai *dry density* pada layer 20

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 23,565 - 9,81 \\ &= 13,755 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

7) Nilai *dry density* pada layer 21

$$\begin{aligned}\gamma' &= \gamma - \gamma_{\text{water}} \\ &= 23,565 - 9,81 \\ &= 13,755 \text{ kN/m}^3\end{aligned}$$

c. Menghitung Tegangan Efektif

1) Nilai tegangan efektif pada layer 5

$$\begin{aligned}\sigma' &= \gamma' \times h \\ &= 13,755 \times 8 \\ &= 110,04 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

2) Nilai tegangan efektif pada layer 16

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 30$$

$$= 412,65 \text{ kN/m}^2$$

- 3) Nilai tegangan efektif pada layer 17

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 32$$

$$= 440,16 \text{ kN/m}^2$$

- 4) Nilai tegangan efektif pada layer 18

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 34$$

$$= 414,25 \text{ kN/m}^2$$

- 5) Nilai tegangan efektif pada layer 19

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 36$$

$$= 438,62 \text{ kN/m}^2$$

- 6) Nilai tegangan efektif pada layer 20

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 38$$

$$= 522,69 \text{ kN/m}^2$$

- 7) Nilai tegangan efektif pada layer 21

$$\sigma' = \gamma' \times h$$

$$= 13,755 \times 40$$

$$= 550,20 \text{ kN/m}^2$$

- d. Menghitung Nilai Koefisien Tegangan Reduksi (rd)

- 1) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 5

$$rd = \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)}$$

$$= \frac{(1-0,4113(8)^{0,5}+0,04052(8)+0,001753(8)^{1,5})}{(1-0,4177(8)^{0,5}+0,05729(8)-0,006205(8)^{1,5}+0,001210(8)^2)}$$

$$= 1,282$$

- 2) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 16

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(30)^{0,5}+0,04052(30)+0,001753(30)^{1,5})}{(1-0,4177(30)^{0,5}+0,05729(30)-0,006205(30)^{1,5}+0,001210(30)^2)} \\
 &= 1,472
 \end{aligned}$$

3) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 17

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(32)^{0,5}+0,04052(32)+0,001753(32)^{1,5})}{(1-0,4177(32)^{0,5}+0,05729(32)-0,006205(32)^{1,5}+0,001210(32)^2)} \\
 &= 1,449
 \end{aligned}$$

4) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 18

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(34)^{0,5}+0,04052(34)+0,001753(34)^{1,5})}{(1-0,4177(34)^{0,5}+0,05729(34)-0,006205(34)^{1,5}+0,001210(34)^2)} \\
 &= 1,471
 \end{aligned}$$

5) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 19

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(36)^{0,5}+0,04052(36)+0,001753(36)^{1,5})}{(1-0,4177(36)^{0,5}+0,05729(36)-0,006205(36)^{1,5}+0,001210(36)^2)} \\
 &= 1,494
 \end{aligned}$$

6) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 20

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(38)^{0,5}+0,04052(38)+0,001753(38)^{1,5})}{(1-0,4177(38)^{0,5}+0,05729(38)-0,006205(38)^{1,5}+0,001210(38)^2)} \\
 &= 1,519
 \end{aligned}$$

7) Nilai koefisien tegangan reduksi pada layer 21

$$\begin{aligned}
 rd &= \frac{(1-0,4113z^{0,5}+0,04052z+0,001753z^{1,5})}{(1-0,4177z^{0,5}+0,05729z-0,006205z^{1,5}+0,001210z^2)} \\
 &= \frac{(1-0,4113(40)^{0,5}+0,04052(40)+0,001753(40)^{1,5})}{(1-0,4177(40)^{0,5}+0,05729(40)-0,006205(40)^{1,5}+0,001210(40)^2)} \\
 &= 1,545
 \end{aligned}$$

e. Menghitung Tegangan Total

1) Nilai tegangan total pada layer 5

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 23,565 \times 8 \\
 &= 188,52 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

2) Nilai tegangan total pada layer 16

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 23,565 \times 30 \\
 &= 706,95 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

3) Nilai tegangan total pada layer 17

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 23,565 \times 32 \\
 &= 754,08 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

4) Nilai tegangan total pada layer 18

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 21,994 \times 34 \\
 &= 747,79 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

5) Nilai tegangan total pada layer 19

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 21,994 \times 36 \\
 &= 791,784 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

6) Nilai tegangan total pada layer 20

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \gamma \times h \\
 &= 23,565 \times 38 \\
 &= 895,47 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

7) Nilai tegangan total pada layer 21

$$\begin{aligned}
\sigma &= \gamma \times h \\
&= 23,565 \times 40 \\
&= 942,60 \text{ kN/m}^2
\end{aligned}$$

f. Menghitung Nilai CSR

Perhitungan nilai CSR menggunakan rumus Youd & Idriss (2001) sebagai berikut ini.

1) Nilai CSR pada layer 5

$$\begin{aligned}
\text{CSR} &= 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \\
&= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{g} \right) \times \left(\frac{188,52}{110,04} \right) \times 1,282 \\
&= 0,189
\end{aligned}$$

2) Nilai CSR pada layer 16

$$\begin{aligned}
\text{CSR} &= 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \\
&= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{g} \right) \times \left(\frac{706,95}{412,65} \right) \times 1,427 \\
&= 0,211
\end{aligned}$$

3) Nilai CSR pada layer 17

$$\begin{aligned}
\text{CSR} &= 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \\
&= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{g} \right) \times \left(\frac{754,08}{440,16} \right) \times 1,449 \\
&= 0,214
\end{aligned}$$

4) Nilai CSR pada layer 18

$$\begin{aligned}
\text{CSR} &= 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \\
&= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{g} \right) \times \left(\frac{747,796}{414,256} \right) \times 1,471 \\
&= 0,229
\end{aligned}$$

5) Nilai CSR pada layer 19

$$\text{CSR} = 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d$$

$$= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{\text{g}} \right) \times \left(\frac{791,784}{438,624} \right) \times 1,494$$

$$= 0,233$$

6) Nilai CSR pada layer 20

$$\text{CSR} = 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{\text{g}} \right) \left(\frac{\sigma_{\text{vo}}}{\sigma'_{\text{vo}}} \right) \text{rd}$$

$$= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{\text{g}} \right) \times \left(\frac{895,47}{522,69} \right) \times 1,519$$

$$= 0,224$$

7) Nilai CSR pada layer 21

$$\text{CSR} = 0,65 \left(\frac{\alpha_{\max}}{\text{g}} \right) \left(\frac{\sigma_{\text{vo}}}{\sigma'_{\text{vo}}} \right) \text{rd}$$

$$= 0,65 \times \left(\frac{0,1326708 \text{ g}}{\text{g}} \right) \times \left(\frac{942,60}{550,20} \right) \times 1,545$$

$$= 0,228$$

Berikut adalah hasil rekapitulasi perhitungan nilai CSR pada setiap lapisan tanah di semua titik :

Tabel 5.8 Perhitungan Nilai CSR pada DB-01

Layer	Depth m	Thickness m	N-SPT	γ kN/m ²	γ_{water} kN/m ³	γ' kN/m ³	σ teg total kN/m ²	σ' teg efektif kN/m ²	a_{max} g	Rd	CSR
1	1	1	50	23.565	9.81	13.755	23.565	13.755	0.1326708	0.973	0.144
2	2	1	3	15.71	9.81	5.9	31.42	11.8	0.1326708	0.875	0.201
3	4	2	10	18.067	9.81	8.257	72.268	33.028	0.1326708	1.782	0.336
4	6	2	37	21.994	9.81	12.184	131.964	73.104	0.1326708	1.326	0.206
5	8	2	50	23.565	9.81	13.755	188.52	110.04	0.1326708	1.282	0.189
6	10	2	50	23.565	9.81	13.755	235.65	137.55	0.1326708	1.276	0.189
7	12	2	50	23.565	9.81	13.755	282.78	165.06	0.1326708	1.281	0.189
8	14	2	50	23.565	9.81	13.755	329.91	192.57	0.1326708	1.292	0.191
9	16	2	50	23.565	9.81	13.755	377.04	220.08	0.1326708	1.304	0.193
10	18	2	50	23.565	9.81	13.755	424.17	247.59	0.1326708	1.319	0.195
11	20	2	50	23.565	9.81	13.755	471.3	275.1	0.1326708	1.335	0.197
12	22	2	50	23.565	9.81	13.755	518.43	302.61	0.1326708	1.351	0.200
13	24	2	50	23.565	9.81	13.755	565.56	330.12	0.1326708	1.369	0.202
14	26	2	50	23.565	9.81	13.755	612.69	357.63	0.1326708	1.388	0.205
15	28	2	50	23.565	9.81	13.755	659.82	385.14	0.1326708	1.407	0.208
16	30	2	50	23.565	9.81	13.755	706.95	412.65	0.1326708	1.427	0.211
17	32	2	50	23.565	9.81	13.755	754.08	440.16	0.1326708	1.449	0.214
18	34	2	38	21.994	9.81	12.184	747.796	414.256	0.1326708	1.471	0.229
19	36	2	47	21.994	9.81	12.184	791.784	438.624	0.1326708	1.494	0.233
20	38	2	50	23.565	9.81	13.755	895.47	522.69	0.1326708	1.519	0.224
21	40	2	50	23.565	9.81	13.755	942.6	550.20	0.1326708	1.545	0.228

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.9 Perhitungan Nilai CSR pada DB-02

Layer	Depth m	Thickness m	N-SPT	γ kN/m ²	γ_{water} kN/m ³	γ' kN/m ³	σ kN/m ²	σ' kN/m ²	a_{max} g	Rd	CSR
1	1	1	12	20.423	9.81	10.613	20.423	10.613	0.1326708	0.973	0.161
2	2.5	1.5	14	20.423	9.81	10.613	51.0575	26.5325	0.1326708	0.733	0.122
3	4.5	2	50	23.565	9.81	13.755	106.0425	61.8975	0.1326708	1.506	0.222
4	6.5	2	50	23.565	9.81	13.755	153.1725	89.4075	0.1326708	1.307	0.193
5	8.5	2	50	23.565	9.81	13.755	200.3025	116.9175	0.1326708	1.279	0.189
6	10.5	2	50	23.565	9.81	13.755	247.4325	144.4275	0.1326708	1.277	0.189
7	12.5	2	50	23.565	9.81	13.755	294.5625	171.9375	0.1326708	1.284	0.190
8	14.5	2	50	23.565	9.81	13.755	341.6925	199.4475	0.1326708	1.295	0.191
9	16.5	2	50	23.565	9.81	13.755	388.8225	226.9575	0.1326708	1.308	0.193
10	18.5	2	50	23.565	9.81	13.755	435.9525	254.4675	0.1326708	1.323	0.195
11	20.5	2	50	23.565	9.81	13.755	483.0825	281.9775	0.1326708	1.339	0.198
12	22.5	2	50	23.565	9.81	13.755	530.2125	309.4875	0.1326708	1.356	0.200
13	24.5	2	50	23.565	9.81	13.755	577.3425	336.9975	0.1326708	1.374	0.203
14	26.5	2	50	23.565	9.81	13.755	624.4725	364.5075	0.1326708	1.392	0.206
15	28.5	2	50	23.565	9.81	13.755	671.6025	392.0175	0.1326708	1.412	0.209
16	30.5	2	50	23.565	9.81	13.755	718.7325	419.5275	0.1326708	1.433	0.212
17	32.5	2	50	23.565	10.81	12.755	765.8625	414.5375	0.1326708	1.454	0.232
18	34.5	2	50	23.565	11.81	11.755	812.9925	405.5475	0.1326708	1.477	0.255
19	36.5	2	50	23.565	12.81	10.755	860.1225	392.5575	0.1326708	1.500	0.284
20	38.5	2	50	23.565	13.81	9.755	907.2525	375.5675	0.1326708	1.525	0.318
21	40	1.5	50	23.565	14.81	8.755	942.6	350.2	0.1326708	1.545	0.359

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.10 Perhitungan Nilai CSR pada DB-03

Layer	Depth m	Thickness m	N-SPT	γ kN/m ²	γ_{water} kN/m ³	γ' kN/m ³	σ kN/m ²	σ' kN/m ²	a_{max} g	Rd	CSR
1	1	1	10	20.423	9.81	10.613	20.423	10.613	0.1326708	0.973	0.161
2	3	2	11	20.423	9.81	10.613	61.269	31.839	0.1326708	0.223	0.037
3	5	2	13	20.423	9.81	10.613	102.115	53.065	0.1326708	1.405	0.233
4	7	2	44	21.994	9.81	12.184	153.958	85.288	0.1326708	1.295	0.202
5	9	2	50	23.565	9.81	13.755	212.085	123.795	0.1326708	1.277	0.189
6	11	2	50	23.565	9.81	13.755	259.215	151.305	0.1326708	1.278	0.189
7	13	2	50	23.565	9.81	13.755	306.345	178.815	0.1326708	1.286	0.190
8	15	2	50	23.565	9.81	13.755	353.475	206.325	0.1326708	1.298	0.192
9	17	2	50	23.565	9.81	13.755	400.605	233.835	0.1326708	1.311	0.194
10	19	2	50	23.565	9.81	13.755	447.735	261.345	0.1326708	1.326	0.196
11	21	2	50	23.565	9.81	13.755	494.865	288.855	0.1326708	1.343	0.198
12	23	2	50	23.565	9.81	13.755	541.995	316.365	0.1326708	1.360	0.201
13	25	2	50	23.565	9.81	13.755	589.125	343.875	0.1326708	1.378	0.204
14	27	2	50	23.565	9.81	13.755	636.255	371.385	0.1326708	1.397	0.206
15	29	2	50	23.565	9.81	13.755	683.385	398.895	0.1326708	1.417	0.209
16	31	2	50	23.565	9.81	13.755	730.515	426.405	0.1326708	1.438	0.212
17	33	2	50	23.565	10.81	12.755	777.645	420.915	0.1326708	1.460	0.233
18	35	2	50	23.565	11.81	11.755	824.775	411.425	0.1326708	1.483	0.256
19	37	2	36	21.994	12.81	9.184	813.778	339.808	0.1326708	1.506	0.311
20	39	2	50	23.565	13.81	9.755	919.035	380.445	0.1326708	1.532	0.319
21	40	1	50	23.565	14.81	8.755	942.6	350.2	0.1326708	1.545	0.359

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.11 Perhitungan Nilai CSR pada DB-04

Layer	Depth m	Thickness m	N-SPT	γ kN/m ²	γ_{water} kN/m ³	γ' kN/m ³	σ kN/m ²	σ' kN/m ²	a_{max} g	Rd	CSR
1	1.5	1.5	8	15.71	9.81	5.9	23.565	8.85	0.1326708	0.939	0.220
2	3.5	2	13	20.423	9.81	10.613	71.4805	37.1455	0.1326708	4.883	0.826
3	5.5	2	33	21.994	9.81	12.184	120.967	67.012	0.1326708	1.355	0.215
4	7.5	2	38	21.994	9.81	12.184	164.955	91.38	0.1326708	1.288	0.204
5	9.5	2	50	23.565	9.81	13.755	223.8675	130.6725	0.1326708	1.276	0.192
6	11.5	2	50	23.565	9.81	13.755	270.9975	158.1825	0.1326708	1.280	0.193
7	13.5	2	50	23.565	9.81	13.755	318.1275	185.6925	0.1326708	1.289	0.194
8	15.5	2	50	23.565	9.81	13.755	365.2575	213.2025	0.1326708	1.301	0.196
9	17.5	2	50	23.565	9.81	13.755	412.3875	240.7125	0.1326708	1.315	0.198
10	19.5	2	50	23.565	9.81	13.755	459.5175	268.2225	0.1326708	1.330	0.200
11	21.5	2	50	23.565	9.81	13.755	506.6475	295.7325	0.1326708	1.347	0.203
12	23.5	2	50	23.565	9.81	13.755	553.7775	323.2425	0.1326708	1.365	0.205
13	25.5	2	50	23.565	9.81	13.755	600.9075	350.7525	0.1326708	1.383	0.208
14	27.5	2	50	23.565	9.81	13.755	648.0375	378.2625	0.1326708	1.402	0.211
15	29.5	2	50	23.565	9.81	13.755	695.1675	405.7725	0.1326708	1.422	0.214
16	31.5	2	28	20.423	9.81	10.613	643.3245	334.3095	0.1326708	1.443	0.244
17	33.5	2	36	21.994	10.81	11.184	736.799	374.664	0.1326708	1.465	0.230
18	35.5	2	28	20.423	11.81	8.613	725.0165	305.7615	0.1326708	1.488	0.258
19	37.5	2	33	21.994	12.81	9.184	824.775	344.4	0.1326708	1.513	0.244
20	40	2.5	31	21.994	13.81	8.184	879.76	327.36	0.1326708	1.545	0.259

Sumber : Hasil Analisis, 2024

g. Menghitung Nilai Faktor Koreksi $(N1)_{60cs}$

Untuk menghitung nilai N_{60} dengan metode Youd-Idriss (2001) digunakan rumus sebagai berikut.

$$CN = \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'}{p_a})}$$

$$(N1)_{60} = Nm \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS$$

Keterangan :

CN = Faktor koreksi tegangan efektif,

CE = Faktor koreksi rasio energi,

CB = Faktor koreksi diameter lubang,

CR = Faktor koreksi panjang rod,

CS = Faktor koreksi metode sampling, dan

Nm = Faktor koreksi nilai SPT terstruktur

1) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 5

$$\begin{aligned} CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'}{p_a})} \\ &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{110,04}{98,066})} \\ &= 0,947 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (N1)_{60} &= Nm \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\ &= 50 \times 0,947 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\ &= 35,528 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\ &= 0 + 1 \times 35,528 \\ &= 35,528 \end{aligned}$$

2) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 16

$$\begin{aligned} CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'}{p_a})} \\ &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{412,650}{98,066})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,407 \\
(N1)_{60} &= Nm \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\
&= 30 \times 0,407 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
&= 15,255 \\
(N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
&= 0 + 1 \times 15,255 \\
&= 15,255
\end{aligned}$$

3) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 17

$$\begin{aligned}
CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_p}{pa})} \\
&= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{440,160}{98,066})} \\
&= 0,387 \\
(N1)_{60} &= Nm \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\
&= 32 \times 0,387 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
&= 14,503 \\
(N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
&= 0 + 1 \times 14,503 \\
&= 14,503
\end{aligned}$$

4) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 18

$$\begin{aligned}
CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_p}{pa})} \\
&= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{414,256}{98,066})} \\
&= 0,406 \\
(N1)_{60} &= Nm \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\
&= 34 \times 0,406 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
&= 11,559 \\
(N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
&= 0 + 1 \times 11,559 \\
&= 11,559
\end{aligned}$$

5) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 19

$$\begin{aligned}
 CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_v}{p_a})} \\
 &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{438,624}{98,066})} \\
 &= 0,388 \\
 (N1)_{60} &= N_m \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\
 &= 36 \times 0,388 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
 &= 13,670 \\
 (N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
 &= 0 + 1 \times 13,670 \\
 &= 13,670
 \end{aligned}$$

6) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 20

$$\begin{aligned}
 CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_v}{p_a})} \\
 &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{522,690}{98,066})} \\
 &= 0,337 \\
 (N1)_{60} &= N_m \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS \\
 &= 38 \times 0,337 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
 &= 12,634 \\
 (N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
 &= 0 + 1 \times 12,634 \\
 &= 12,634
 \end{aligned}$$

7) Nilai $(N1)_{60cs}$ pada layer 21

$$\begin{aligned}
 CN &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_v}{p_a})} \\
 &= \frac{2,2}{(1,2 + \frac{550,200}{98,066})} \\
 &= 0,323 \\
 (N1)_{60} &= N_m \times CN \times CE \times CB \times CR \times CS
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 40 \times 0,323 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1 \\
&= 12,113 \\
(N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \times (N1)_{60} \\
&= 0 + 1 \times 12,113 \\
&= 12,113
\end{aligned}$$

h. Menghitung nilai $CRR_{7,5}$

Untuk mencari nilai CRR dengan metode Youd – Idriss (2001) dapat dilakukan dengan persamaan dibawah ini

1) Nilai $CRR_{7,5}$ pada layer 5

$$\begin{aligned}
CRR_{7,5} &= \frac{1}{34-(N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(10.(N1)_{60cs}+45)^2} - \frac{1}{200} \\
&= \frac{1}{34-35,528} + \frac{35,528}{135} + \frac{50}{(10.(35,528+45))^2} - \frac{1}{200} \\
&= -0,395 \\
MSF &= \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \\
&= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}} \\
&= 1,237 \\
CRR &= CRR_{7,5} \times MSF \\
&= -0,395 \times 1,237 \\
&= -0,489
\end{aligned}$$

2) Nilai $CRR_{7,5}$ pada layer 16

$$\begin{aligned}
CRR_{7,5} &= \frac{1}{34-(N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(10.(N1)_{60cs}+45)^2} - \frac{1}{200} \\
&= \frac{1}{34-15,255} + \frac{15,255}{135} + \frac{50}{(10.(15,255+45))^2} - \frac{1}{200} \\
&= 0,162 \\
MSF &= \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \\
&= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}}
\end{aligned}$$

$$= 1,237$$

$$\text{CRR} = \text{CRR}_{7,5} \times \text{MSF}$$

$$= 0,162 \times 1,237$$

$$= 0,201$$

3) Nilai $\text{CRR}_{7,5}$ pada layer 17

$$\text{CRR}_{7,5} = \frac{1}{34 \cdot (\text{N1})_{60\text{cs}}} + \frac{(\text{N1})_{60\text{cs}}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (\text{N1})_{60\text{cs}} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$= \frac{1}{34 \cdot 14,503} + \frac{14,503}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (14,503 + 45))^2} - \frac{1}{200}$$

$$= 0,155$$

$$\text{MSF} = \frac{10^{2,24}}{\text{Mw}^{2,56}}$$

$$= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}}$$

$$= 1,237$$

$$\text{CRR} = \text{CRR}_{7,5} \times \text{MSF}$$

$$= 0,155 \times 1,237$$

$$= 0,191$$

4) Nilai $\text{CRR}_{7,5}$ pada layer 18

$$\text{CRR}_{7,5} = \frac{1}{34 \cdot (\text{N1})_{60\text{cs}}} + \frac{(\text{N1})_{60\text{cs}}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (\text{N1})_{60\text{cs}} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$= \frac{1}{34 \cdot 11,559} + \frac{11,559}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (11,559 + 45))^2} - \frac{1}{200}$$

$$= 0,127$$

$$\text{MSF} = \frac{10^{2,24}}{\text{Mw}^{2,56}}$$

$$= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}}$$

$$= 1,237$$

$$\text{CRR} = \text{CRR}_{7,5} \times \text{MSF}$$

$$= 0,127 \times 1,237$$

$$= 0,157$$

5) Nilai $CRR_{7,5}$ pada layer 19

$$\begin{aligned}
 CRR_{7,5} &= \frac{1}{34 \cdot (N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N1)_{60cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \\
 &= \frac{1}{34 \cdot 13,670} + \frac{13,670}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (13,670 + 45))^2} - \frac{1}{200} \\
 &= 0,146 \\
 MSF &= \frac{10^{2,24}}{Mw^{2,56}} \\
 &= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}} \\
 &= 1,237 \\
 CRR &= CRR_{7,5} \times MSF \\
 &= 0,146 \times 1,237 \\
 &= 0,181
 \end{aligned}$$

6) Nilai $CRR_{7,5}$ pada layer 20

$$\begin{aligned}
 CRR_{7,5} &= \frac{1}{34 \cdot (N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N1)_{60cs} + 45)^2} - \frac{1}{200} \\
 &= \frac{1}{34 \cdot 12,634} + \frac{12,634}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (12,634 + 45))^2} - \frac{1}{200} \\
 &= 0,137 \\
 MSF &= \frac{10^{2,24}}{Mw^{2,56}} \\
 &= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}} \\
 &= 1,237 \\
 CRR &= CRR_{7,5} \times MSF \\
 &= 0,137 \times 1,237 \\
 &= 0,169
 \end{aligned}$$

7) Nilai $CRR_{7,5}$ pada layer 21

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 \cdot (N1)_{60cs}} + \frac{(N1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N1)_{60cs} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{34-12,113} + \frac{12,113}{135} + \frac{50}{(10.(12,113+45))^2} - \frac{1}{200} \\
&= 0,132 \\
\text{MSF} &= \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \\
&= \frac{10^{2,24}}{6,9^{2,56}} \\
&= 1,237 \\
\text{CRR} &= \text{CRR}_{7,5} \times \text{MSF} \\
&= 0,132 \times 1,237 \\
&= 0,163
\end{aligned}$$

Berikut adalah hasil rekapitulasi perhitungan nilai CSR pada setiap lapisan tanah di semua titik :

Tabel 5.12 Perhitungan Nilai CRR pada DB-01

Layer	Depth (m)	Thickness (m)	N-SPT	σ (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)	Faktor SPT Terukur	N(60)	N(60) _{cs}	CSR	CRR _{7,5}	MSF	CRR
						CN						
1	1	1	50	23.565	13.755	1.641	61.555	61.555	0.144	0.415	1.238	0.513
2	2	1	3	31.420	11.800	1.666	3.749	3.749	0.201	0.063	1.238	0.078
3	4	2	10	72.268	33.028	1.432	10.737	10.737	0.336	0.120	1.238	0.148
4	6	2	37	131.964	73.104	1.131	31.381	31.381	0.206	0.610	1.238	0.754
5	8	2	50	188.520	110.040	0.947	35.528	35.528	0.189	-0.396	1.238	-0.490
6	10	2	50	235.650	137.550	0.845	31.699	31.699	0.189	0.665	1.238	0.823
7	12	2	50	282.780	165.060	0.763	28.615	28.615	0.189	0.393	1.238	0.486
8	14	2	50	329.910	192.570	0.695	26.077	26.077	0.191	0.315	1.238	0.390
9	16	2	50	377.040	220.080	0.639	23.953	23.953	0.193	0.273	1.238	0.337
10	18	2	50	424.170	247.590	0.591	22.149	22.149	0.195	0.244	1.238	0.302
11	20	2	50	471.300	275.100	0.549	20.598	20.598	0.197	0.223	1.238	0.276
12	22	2	50	518.430	302.610	0.513	19.250	19.250	0.200	0.206	1.238	0.255
13	24	2	50	565.560	330.120	0.482	18.067	18.067	0.202	0.193	1.238	0.238
14	26	2	50	612.690	357.630	0.454	17.021	17.021	0.205	0.181	1.238	0.224
15	28	2	50	659.820	385.140	0.429	16.090	16.090	0.208	0.171	1.238	0.212
16	30	2	50	706.950	412.650	0.407	15.256	15.256	0.211	0.163	1.238	0.201
17	32	2	50	754.080	440.160	0.387	14.503	14.503	0.214	0.155	1.238	0.192
18	34	2	38	747.796	414.256	0.406	11.559	11.559	0.229	0.127	1.238	0.157
19	36	2	47	791.784	438.624	0.388	13.671	13.671	0.233	0.147	1.238	0.182
20	38	2	50	895.470	522.690	0.337	12.634	12.634	0.224	0.137	1.238	0.170
21	40	2	50	942.600	550.200	0.323	12.114	12.114	0.228	0.132	1.238	0.164

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.13 Perhitungan Nilai CRR pada DB-02

Layer	Depth (m)	Thickness (m)	N-SPT	σ (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)	Faktor SPT Terukur	N(60)	CSR	CRR7,5	MSF	CRR
						CN					
1	1	1	12	20.423	10.613	1.682	15.135	0.161	0.161	1.238	0.200
2	2.5	1.5	14	51.058	26.533	1.496	15.708	0.122	0.167	1.238	0.207
3	4.5	2	50	106.043	61.898	1.201	45.053	0.222	0.238	1.238	0.295
4	6.5	2	50	153.173	89.408	1.042	39.068	0.193	0.087	1.238	0.108
5	8.5	2	50	200.303	116.918	0.920	34.487	0.189	-1.804	1.238	-2.233
6	10.5	2	50	247.433	144.428	0.823	30.867	0.189	0.543	1.238	0.672
7	12.5	2	50	294.563	171.938	0.745	27.935	0.190	0.367	1.238	0.455
8	14.5	2	50	341.693	199.448	0.680	25.512	0.191	0.302	1.238	0.374
9	16.5	2	50	388.823	226.958	0.626	23.475	0.193	0.265	1.238	0.327
10	18.5	2	50	435.953	254.468	0.580	21.740	0.195	0.238	1.238	0.295
11	20.5	2	50	483.083	281.978	0.540	20.243	0.198	0.218	1.238	0.270
12	22.5	2	50	530.213	309.488	0.505	18.940	0.200	0.203	1.238	0.251
13	24.5	2	50	577.343	336.998	0.475	17.794	0.203	0.190	1.238	0.235
14	26.5	2	50	624.473	364.508	0.447	16.779	0.206	0.178	1.238	0.221
15	28.5	2	50	671.603	392.018	0.423	15.873	0.209	0.169	1.238	0.209
16	30.5	2	50	718.733	419.528	0.402	15.060	0.212	0.161	1.238	0.199
17	32.5	2	50	765.863	414.538	0.405	15.201	0.232	0.162	1.238	0.201
18	34.5	2	50	812.993	405.548	0.412	15.463	0.255	0.165	1.238	0.204
19	36.5	2	50	860.123	392.558	0.423	15.856	0.284	0.169	1.238	0.209
20	38.5	2	50	907.253	375.568	0.437	16.402	0.318	0.174	1.238	0.216
21	40	1.5	50	942.600	350.200	0.461	17.292	0.359	0.184	1.238	0.228

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.14 Perhitungan Nilai CRR pada DB-03

Depht (m)	Thickness (m)	N-SPT	σ (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)	Faktor SPT Terukur	N(60)	CSR	CRR7,5	MSF	CRR
					CN					
1	1	10	20.423	10.613	1.682	12.613	0.161	0.137	1.238	0.169
3	2	11	61.269	31.839	1.443	11.904	0.037	0.130	1.238	0.161
5	2	13	102.115	53.065	1.264	12.320	0.233	0.134	1.238	0.166
7	2	44	153.958	85.288	1.063	35.078	0.202	-0.673	1.238	-0.833
9	2	50	212.085	123.795	0.893	33.504	0.189	2.261	1.238	2.798
11	2	50	259.215	151.305	0.802	30.078	0.189	0.473	1.238	0.586
13	2	50	306.345	178.815	0.728	27.287	0.190	0.347	1.238	0.429
15	2	50	353.475	206.325	0.666	24.970	0.192	0.291	1.238	0.360
17	2	50	400.605	233.835	0.614	23.016	0.194	0.257	1.238	0.318
19	2	50	447.735	261.345	0.569	21.345	0.196	0.233	1.238	0.288
21	2	50	494.865	288.855	0.531	19.901	0.198	0.214	1.238	0.265
23	2	50	541.995	316.365	0.497	18.640	0.201	0.199	1.238	0.246
25	2	50	589.125	343.875	0.467	17.529	0.204	0.187	1.238	0.231
27	2	50	636.255	371.385	0.441	16.543	0.206	0.176	1.238	0.218
29	2	50	683.385	398.895	0.418	15.662	0.209	0.167	1.238	0.206
31	2	50	730.515	426.405	0.397	14.870	0.212	0.159	1.238	0.196
33	2	50	777.645	420.915	0.401	15.021	0.233	0.160	1.238	0.198
35	2	50	824.775	411.425	0.408	15.291	0.256	0.163	1.238	0.202
37	2	36	813.778	339.808	0.472	12.733	0.311	0.138	1.238	0.171
39	2	50	919.035	380.445	0.433	16.242	0.319	0.173	1.238	0.214
40	1	50	942.600	350.200	0.461	17.292	0.359	0.184	1.238	0.228

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.15 Perhitungan Nilai CRR pada DB-04

Layer	Depth (m)	Thickness (m)	N-SPT	σ (kN/m ²)	σ' (kN/m ²)	Faktor SPT Terukur	N(60)	CSR	CRR7,5	MSF	CRR
						CN					
1	1.5	1.5	8	23.565	8.850	1.705	10.231	0.220	0.115	1.238	0.143
2	3.5	2	13	71.481	37.146	1.393	13.586	0.826	0.146	1.238	0.181
3	5.5	2	33	120.967	67.012	1.168	28.911	0.215	0.406	1.238	0.503
4	7.5	2	38	164.955	91.380	1.032	29.411	0.204	0.431	1.238	0.534
5	9.5	2	50	223.868	130.673	0.869	32.577	0.192	0.939	1.238	1.162
6	11.5	2	50	270.998	158.183	0.782	29.328	0.193	0.427	1.238	0.528
7	13.5	2	50	318.128	185.693	0.711	26.668	0.194	0.329	1.238	0.408
8	15.5	2	50	365.258	213.203	0.652	24.451	0.196	0.281	1.238	0.348
9	17.5	2	50	412.388	240.713	0.602	22.574	0.198	0.250	1.238	0.310
10	19.5	2	50	459.518	268.223	0.559	20.965	0.200	0.228	1.238	0.282
11	21.5	2	50	506.648	295.733	0.522	19.570	0.203	0.210	1.238	0.260
12	23.5	2	50	553.778	323.243	0.489	18.349	0.205	0.196	1.238	0.242
13	25.5	2	50	600.908	350.753	0.461	17.271	0.208	0.184	1.238	0.227
14	27.5	2	50	648.038	378.263	0.435	16.313	0.211	0.174	1.238	0.215
15	29.5	2	50	695.168	405.773	0.412	15.456	0.214	0.165	1.238	0.204
16	31.5	2	28	643.325	334.310	0.477	10.024	0.244	0.113	1.238	0.140
17	33.5	2	36	736.799	374.664	0.438	11.831	0.230	0.130	1.238	0.160
18	35.5	2	28	725.017	305.762	0.510	10.700	0.258	0.119	1.238	0.148
19	37.5	2	33	824.775	344.400	0.467	11.556	0.244	0.127	1.238	0.157
20	40	2.5	31	879.760	327.360	0.485	11.271	0.259	0.124	1.238	0.154

Sumber : Hasil Analisis, 2024

i. Menghitung Faktor Keamanan (FS)

Analisis faktor keamanan menggunakan metode Youd-Idriss (2001) bisa dilihat di analisis berikut ini.

1) Nilai faktor keamanan pada layer 5

$$\begin{aligned} FS &= \frac{CRR}{CSR} \\ &= \frac{-0,489}{0,189} \\ &= -2,585 \end{aligned}$$

2) Nilai faktor keamanan pada layer 16

$$\begin{aligned} FS &= \frac{CRR}{CSR} \\ &= \frac{0,201}{0,211} \\ &= 0,954 \end{aligned}$$

3) Nilai faktor keamanan pada layer 17

$$\begin{aligned} FS &= \frac{CRR}{CSR} \\ &= \frac{0,191}{0,214} \\ &= 0,896 \end{aligned}$$

4) Nilai faktor keamanan pada layer 18

$$\begin{aligned} FS &= \frac{CRR}{CSR} \\ &= \frac{0,157}{0,229} \\ &= 0,686 \end{aligned}$$

5) Nilai faktor keamanan pada layer 19

$$\begin{aligned} FS &= \frac{CRR}{CSR} \\ &= \frac{0,181}{0,233} \\ &= 0,781 \end{aligned}$$

6) Nilai faktor keamanan pada layer 20

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{CRR}{CSR} \\
 &= \frac{0,169}{0,224} \\
 &= 0,756
 \end{aligned}$$

7) Nilai faktor keamanan pada layer 21

$$\begin{aligned}
 FS &= \frac{CRR}{CSR} \\
 &= \frac{0,163}{0,228} \\
 &= 0,717
 \end{aligned}$$

Berikut adalah hasil rekapitulasi perhitungan nilai faktor keamanan pada setiap lapisan tanah di semua titik :

Tabel 5.16 Perhitungan Nilai Faktor Keamanan DB-01

Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	N-SPT	CSR	CRR	FS	Keterangan
1	1	Batu	50	0.144	0.513	3.572	NL
2	2	Lempung	3	0.201	0.078	0.389	NL
3	4	Lempung	10	0.336	0.148	0.440	NL
4	6	Lanau	37	0.206	0.754	3.656	NL
5	8	Pasir	50	0.189	0.490	2.586	NL
6	10	Pasir	50	0.189	0.823	4.362	NL
7	12	Pasir	50	0.189	0.486	2.569	NL
8	14	Pasir	50	0.191	0.390	2.042	NL
9	16	Pasir	50	0.193	0.337	1.751	NL
10	18	Pasir	50	0.195	0.302	1.551	NL
11	20	Pasir	50	0.197	0.276	1.400	NL
12	22	Pasir	50	0.200	0.255	1.279	NL
13	24	Pasir	50	0.202	0.238	1.178	NL
14	26	Pasir	50	0.205	0.224	1.093	NL
15	28	Pasir	50	0.208	0.212	1.019	NL
16	30	Pasir	50	0.211	0.201	0.954	L
17	32	Pasir	50	0.214	0.192	0.897	L
18	34	Pasir	38	0.229	0.157	0.687	L
19	36	Pasir	47	0.233	0.182	0.782	L
20	38	Lanau	50	0.224	0.170	0.756	NL
21	40	Lanau	50	0.228	0.164	0.717	NL

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.17 Perhitungan Nilai Faktor Keamanan DB-02

Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	N-SPT	CSR	CRR	FS	Keterangan
1	1	Lanau	12	0.161	0.200	1.238	NL
2	2.5	Lempung	14	0.122	0.207	1.701	NL
3	4.5	Pasir	50	0.222	0.295	1.327	NL
4	6.5	Pasir	50	0.193	0.108	0.560	NL
5	8.5	Pasir	50	0.189	-2.233	-11.815	L
6	10.5	Pasir	50	0.189	0.672	3.563	NL
7	12.5	Pasir	50	0.190	0.455	2.397	NL
8	14.5	Pasir	50	0.191	0.374	1.956	NL
9	16.5	Pasir	50	0.193	0.327	1.694	NL
10	18.5	Pasir	50	0.195	0.295	1.509	NL
11	20.5	Pasir	50	0.198	0.270	1.367	NL
12	22.5	Pasir	50	0.200	0.251	1.252	NL
13	24.5	Pasir	50	0.203	0.235	1.156	NL
14	26.5	Pasir	50	0.206	0.221	1.074	NL
15	28.5	Pasir	50	0.209	0.209	1.002	NL
16	30.5	Pasir	50	0.212	0.199	0.939	L
17	32.5	Pasir	50	0.232	0.201	0.866	L
18	34.5	Pasir	50	0.255	0.204	0.799	L
19	36.5	Pasir	50	0.284	0.209	0.737	L
20	38.5	Pasir	50	0.318	0.216	0.680	L
21	40	Pasir	50	0.359	0.228	0.635	L

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.18 Perhitungan Nilai Faktor Keamanan DB-03

Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	N-SPT	CSR	CRR	FS	Keterangan
1	1	Lempung	10	0.161	0.169	1.050	NL
2	3	Lempung	11	0.037	0.161	4.358	NL
3	5	Pasir	13	0.233	0.166	0.712	NL
4	7	Pasir	44	0.202	-0.833	-4.129	NL
5	9	Pasir	50	0.189	2.798	14.830	NL
6	11	Pasir	50	0.189	0.586	3.101	NL
7	13	Pasir	50	0.190	0.429	2.257	NL
8	15	Pasir	50	0.192	0.360	1.880	NL
9	17	Pasir	50	0.194	0.318	1.643	NL
10	19	Pasir	50	0.196	0.288	1.471	NL
11	21	Pasir	50	0.198	0.265	1.336	NL
12	23	Pasir	50	0.201	0.246	1.226	NL
13	25	Pasir	50	0.204	0.231	1.134	NL
14	27	Pasir	50	0.206	0.218	1.055	NL
15	29	Pasir	50	0.209	0.206	0.986	L
16	31	Pasir	50	0.212	0.196	0.925	L
17	33	Pasir	50	0.233	0.198	0.853	L
18	35	Pasir	50	0.256	0.202	0.787	L
19	37	Pasir	36	0.311	0.171	0.549	L
20	39	Lanau	50	0.319	0.214	0.670	NL
21	40	Lanau	50	0.359	0.228	0.635	NL

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Tabel 5.19 Perhitungan Nilai Faktor Keamanan DB-04

Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	N-SPT	CSR	CRR	SF	Keterangan
1	1.5	Lempung	8	0.220	0.143	0.649	NL
2	3.5	Lempung	13	0.826	0.181	0.219	NL
3	5.5	Lanau	33	0.215	0.503	2.338	NL
4	7.5	Lanau	38	0.204	0.534	2.612	NL
5	9.5	Pasir	50	0.192	1.162	6.046	NL
6	11.5	Pasir	50	0.193	0.528	2.740	NL
7	13.5	Pasir	50	0.194	0.408	2.101	NL
8	15.5	Pasir	50	0.196	0.348	1.778	NL
9	17.5	Pasir	50	0.198	0.310	1.565	NL
10	19.5	Pasir	50	0.200	0.282	1.407	NL
11	21.5	Pasir	50	0.203	0.260	1.282	NL
12	23.5	Pasir	50	0.205	0.242	1.179	NL
13	25.5	Pasir	50	0.208	0.227	1.092	NL
14	27.5	Pasir	50	0.211	0.215	1.017	NL
15	29.5	Pasir	50	0.214	0.204	0.951	L
16	31.5	Lempung	28	0.244	0.140	0.574	NL
17	33.5	Lempung	36	0.230	0.160	0.698	NL
18	35.5	Lempung	28	0.258	0.148	0.573	NL
19	37.5	Lempung	33	0.244	0.157	0.645	NL
20	40	Lempung	31	0.259	0.154	0.594	NL

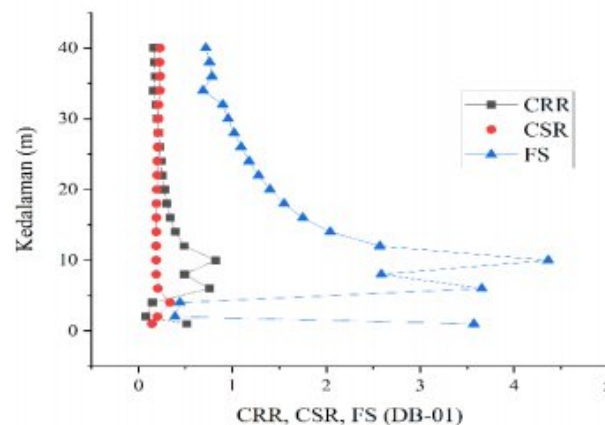
Sumber : Hasil Analisis, 2024

Keterangan

L = *Liquefaction*

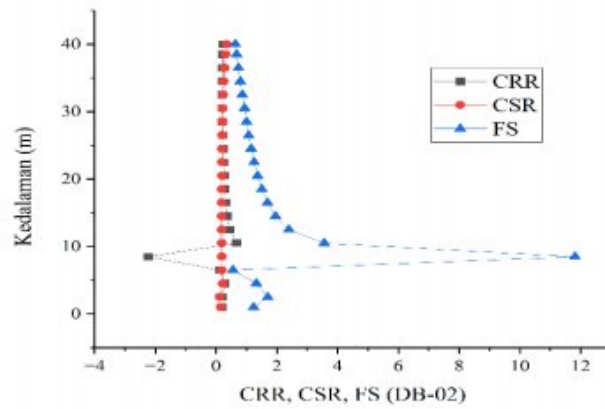
NL = *Non liquefaction*

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan maka dapat digambarkan hasilnya dalam bentuk grafik hubungan CSR, CRR, FS terhadap kedalaman.



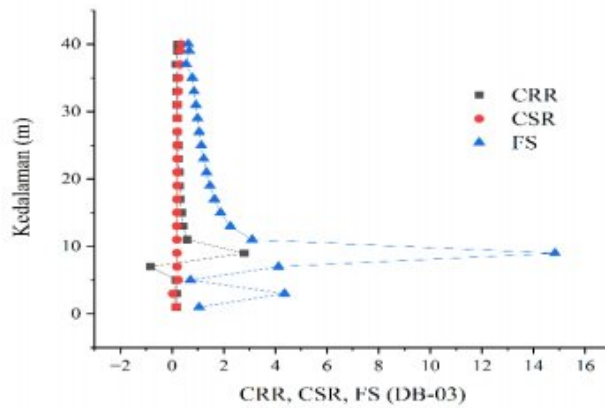
Gambar 5.15 Grafik CRR, CSR, FS vs Kedalaman (DB-01)

Sumber : Hasil Analisis, 2024



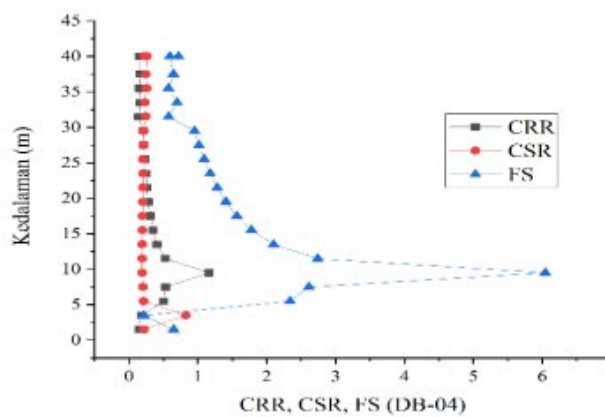
Gambar 5.16 Grafik CRR, CSR, FS vs Kedalaman (DB-02)

Sumber : Hasil Analisis,2024



Gambar 5.17 Grafik CRR, CSR, FS vs Kedalaman (DB-03)

Sumber : Hasil Analisis,2024



Gambar 5.18 Grafik CRR, CSR, FS vs Kedalaman (DB-04)

Sumber : Hasil Analisis,2024

Berdasarkan **Gambar 5.16**, **Gambar 5.17**, **Gambar 5.18**, warna abu-abu merupakan nilai CRR terhadap kedalaman sedangkan warna merah merupakan nilai CSR terhadap kedalaman dan warna biru merupakan nilai faktor keamanan terhadap kedalaman. Pada grafik diatas menunjukkan bahwa Potensi likuifaksi terjadi pada pasir jenuh air yang memiliki $FS < 1$ sehingga pada keempat titik *bore hole* dengan kedalaman tertentu yang memiliki nilai $FS < 1$ maka lokasi tersebut berpotensi terjadi likuifaksi sehingga pada area tersebut perlu diberikan perbaikan tanah dengan *Stone Column*. Pada titik DB-01, DB-02, DB-03, DB-04 berpotensi likuifaksi dengan beberapa variasi kedalaman. Lapisan yang paling dalam mengalami potensi likuifaksi ada pada titik DB-02 dengan kedalaman 40 m.



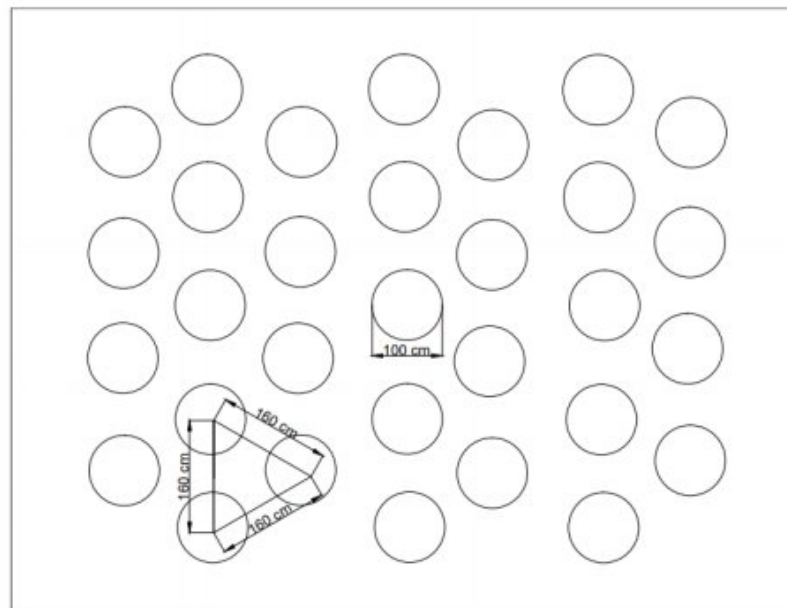
Gambar 5.19 Peta Zona Likuifaksi Bethsaida *Hospital* Serang

Sumber : Dokumen Penulis, 2024

5.6 Analisis Perbaikan Tanah Menggunakan *Stone Column*

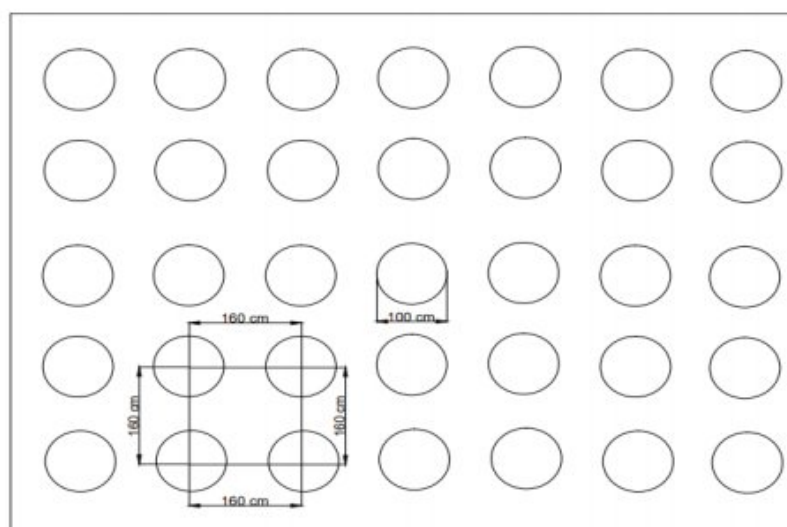
Stone Column adalah teknik perbaikan tanah lunak yang digunakan untuk menaikkan daya dukung tanah, mengurangi penurunan segera (*settlement*), mempercepat pemampatan, dan mengurangi terjadinya likuefaksi yang ditemukan oleh Louis Menard di France pada tahun 1960. Dalam proses desain *Stone Column* menggunakan metode Priebe (1995) untuk mengevaluasinya, sehingga didapatkan desain *Stone Column* yang paling optimum untuk mengatasi potensi kerusakan

yang akan terjadi akibat likuifaksi. Desain *Stone Column* melibatkan penentuan diameter, kedalaman, dan spasi antar kolom yang optimal, serta pemilihan material batu pecah yang sesuai. Desain ini harus disesuaikan dengan karakteristik tanah, untuk memastikan distribusi beban yang efektif dan peningkatan kapasitas dukung tanah secara keseluruhan. Dapat dilihat pola pemasangan segitiga sama sisi dan persegi pada **Gambar 5.20** dan **Gambar 5.21**, dan juga ilustrasi pemasangan *Stone Column* pada **Gambar 5.22**



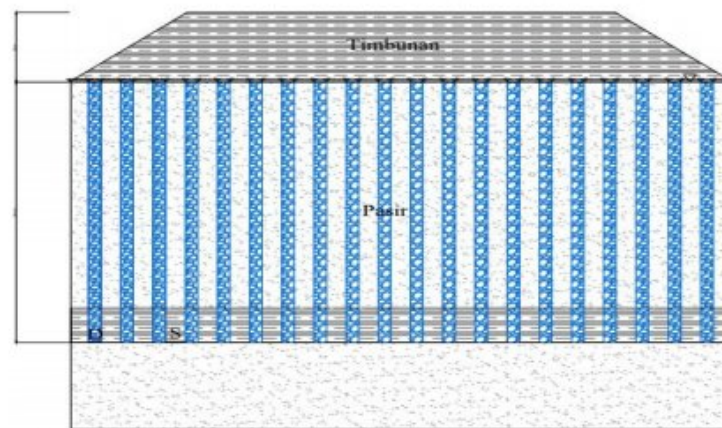
Gambar 5.20 Pola Pemasangan *Stone Column* Segitiga Sama Sisi

Sumber : Dokumen Penulis, 2024



Gambar 5.21 Pola Pemasangan *Stone Column* Persegi

Sumber : Dokumen Penulis, 2024



Gambar 5.22 Tampak Depan Ilustrasi Pemasangan *Stone Column*

Sumber : Dokumen Penulis, 2024

Perhitungan yang akurat sangat penting dalam desain *Stone Column* untuk memastikan keamanan dan efisiensi struktur yang dibangun di atas tanah yang telah diperbaiki. Langkah-langkah perhitungan *Stone Column* mencakup penentuan diameter dan spasi kolom sebagai berikut.

a. *Stone Column* Pola Segitiga Sama Sisi

1) *Preliminary Design*

- a) Diameter (D) = 1 m
- b) *Pattern* = Pola Segitiga Sama Sisi
- c) Spasi = 1,6 m

2) Diameter Ekuivalen (D_e)

Diameter ekuivalen merupakan tributary area yang terbentuk disekeliling *Stone Column*

$$\begin{aligned} D_e &= 1,05 \times S \\ &= 1,05 \times 1,6 \\ &= 1,68 \text{ m} \end{aligned}$$

3) *Replacement Ratio* (A_r)

Analisis dalam perencanaan *Stone Column* cukup kompleks karena perbaikan dilakukan pada area yang sangat luas dengan jumlah *Stone Column* yang sangat banyak. Untuk menyederhanakan analisis, area tersebut dapat dibagi menjadi unit-unit sel dengan luas A yang dianggap terdiri dari satu kolom dengan penampang A_c dan mempengaruhi tanah di sekitarnya. Parameter A_r digunakan sebagai berikut.

$$Ar = \frac{Ac}{A}$$

Dimana Ac adalah luas penampang *Stone Column*, A adalah luas unit cell. Untuk menghitung nilai Ac dan A sebagai berikut.

$$\begin{aligned} Ac &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 1^2 \\ &= 0,785 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4} \times \pi \times De^2 \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 1,68^2 \\ &= 2,216 \end{aligned}$$

4) Faktor Perbaikan

Persamaan faktor perbaikan yang diusulkan Priebe (1995) dapat dinyatakan n_0 sebagai berikut :

$$n_0 = 1 + \frac{Ac}{A} \left[\frac{5 \cdot \frac{Ac}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{Ac}{A})} - 1 \right]$$

Dimana K_{ac} adalah koefisien tekanan tanah aktif, nilai sudut geser material *Stone Column* pada sudut $40^\circ - 45^\circ$ terbukti efektif karena mampu meningkatkan daya dukung tanah yang cukup besar, nilai sudut geser yang diambil yaitu 45° . Selanjutnya untuk menghitung K_{ac} sebagai berikut.

$$\begin{aligned} K_{ac} &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2} \right) \\ &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{45}{2} \right) \\ &= 0,311 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_0 &= 1 + \frac{Ac}{A} \left[\frac{5 - \frac{Ac}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{Ac}{A})} - 1 \right] \\ &= 1 + \frac{0,785}{2,216} \left[\frac{5 - \frac{0,785}{2,216}}{4 \cdot (0,311) (1 - \frac{0,785}{2,216})} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$= 3,047$$

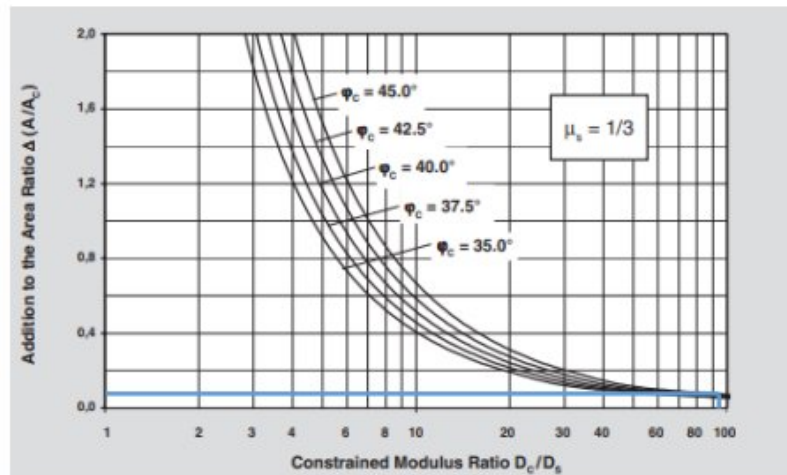
5) Mereduksi Nilai dari Faktor Perbaikan (n_1)

Material pengisi kolom yang sudah padat akan tetap mengalami pemampatan. Karena itu, setiap beban yang menyebabkan penurunan tidak dibarengi dengan penggelembungan pada kolom.

Persamaan faktor perbaikan yang diusulkan Priebe (1995) dapat dinyatakan n_1 sebagai berikut :

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{\bar{A}_c}{A}}{4K_{ac} \left(1 - \frac{\bar{A}_c}{A}\right)} - 1 \right]$$

Untuk mendapatkan nilai ΔA melalui pembacaan grafik kompreibilitas *Stone Column* pada gambar 5.22 yang mana karena nilai ϕ_c diasumsikan 45° dan peralatan kontruksi *Stone Column* diasumsikan memiliki performa yang baik, maka didapatkan hasil D_c/D_s mendekati 100.



Gambar 5.23 Grafik Kompreibilitas *Stone Column*

Sumber : Priebe, H.J. (1995)

Berdasarkan pembacaan grafik kompreibilitas *Stone Column* pada Gambar 5.5 menghasilkan nilai $\Delta A/A_c$ sebesar 0,05 yang mana nilai $\Delta A/A_c$ akan digunakan dalam perhitungan $\bar{A}_c/A$ sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{\bar{A}_c}{A} &= \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \frac{\Delta A}{A_c}} \\ &= \frac{1}{\frac{2,216}{0,785} + 0,05} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 0,404 \\
n1 &= 1 + \frac{\overline{Ac}}{A} \left[\frac{5 - \frac{\overline{Ac}}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{\overline{Ac}}{A})} - 1 \right] \\
&= 1 + 0,404 \left[\frac{5 - 0,404}{4 \cdot (0,311) (1 - 0,404)} - 1 \right] \\
&= 3,101
\end{aligned}$$

Didapatkan nilai *improvement factor* terkoreksi adalah sebesar 3,101 untuk pola pemasangan pola segitiga.

b. *Design Stone Column* Pola Pemasangan Persegi

1) Preliminary Desain

- a) Diameter (D) = 1 m
- b) *Pattern* = Pola Persegi
- c) Spasi = 1,6 m

2) **Diameter Ekuivalen (De)**

Diameter ekuivalen merupakan tributary area yang terbentuk disekeliling *Stone Column*

$$\begin{aligned}
De &= 1,13 \times S \\
&= 1,13 \times 1,6 \\
&= 1,808 \text{ m}
\end{aligned}$$

3) Replacement Ratio (Ar)

Analisis dalam perencanaan *Stone Column* cukup kompleks karena perbaikan dilakukan pada area yang sangat luas dengan jumlah *Stone Column* yang sangat banyak. Untuk menyederhanakan analisis, area tersebut dapat dibagi menjadi unit-unit sel dengan luas A yang dianggap terdiri dari satu kolom dengan penampang Ac dan mempengaruhi tanah di sekitarnya. Parameter Ar digunakan sebagai berikut.

$$Ar = \frac{Ac}{A}$$

Dimana Ac adalah luas penampang *Stone Column*, A adalah luas unit cell. Untuk menghitung nilai Ac dan A sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 1^2 \\
 &= 0,785
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{1}{4} \times \pi \times D_e^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 1,808^2 \\
 &= 2,566
 \end{aligned}$$

4) Faktor Perbaikan

Persamaan faktor perbaikan yang diusulkan Priebe (1995) dapat dinyatakan n_0 sebagai berikut :

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{A_c}{A})} - 1 \right]$$

Dimana K_{ac} adalah koefisien tekanan tanah aktif, nilai sudut geser material *Stone Column* pada sudut $40^\circ - 45^\circ$ terbukti efektif karena mampu meningkatkan daya dukung tanah yang cukup besar, nilai sudut geser yang diambil yaitu 45° . Selanjutnya untuk menghitung K_{ac} sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 K_{ac} &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_c}{2} \right) \\
 &= \tan^2 \left(45^\circ - \frac{45}{2} \right) \\
 &= 0,311
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n_0 &= 1 + \frac{A_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{A_c}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{A_c}{A})} - 1 \right] \\
 &= 1 + \frac{0,785}{2,566} \left[\frac{5 - \frac{0,785}{2,566}}{4 \cdot (0,311) (1 - \frac{0,785}{2,566})} - 1 \right] \\
 &= 2,662
 \end{aligned}$$

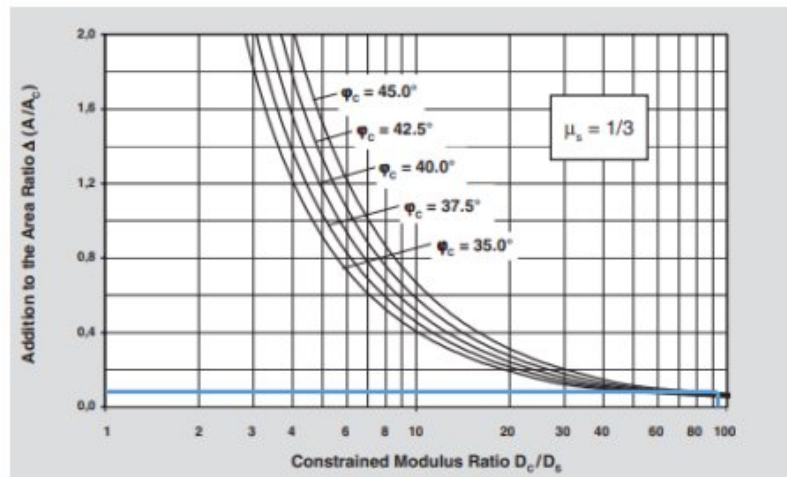
5) Mereduksi Nilai dari Faktor Perbaikan (n_1)

Material pengisi kolom yang sudah padat akan tetap mengalami pemampatan. Karena itu, setiap beban yang menyebabkan penurunan tidak dibarengi dengan penggelembungan pada kolom.

Persamaan faktor perbaikan yang diusulkan Priebe (1995) dapat dinyatakan n_1 sebagai berikut :

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[\frac{5 - \frac{\bar{A}_c}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{\bar{A}_c}{A})} - 1 \right]$$

Untuk mendapatkan nilai ΔA melalui pembacaan grafik kompreibilitas *Stone Column* pada gambar 5.1 yang mana karena nilai ϕ_c diasumsikan 45° dan peralatan kontruksi *Stone Column* diasumsikan memiliki performa yang baik, maka didapatkan hasil D_c/D_s mendekati 100.



Gambar 5.24 Grafik Kompreibilitas *Stone Column*

Sumber : Priebe, H.J. (1995)

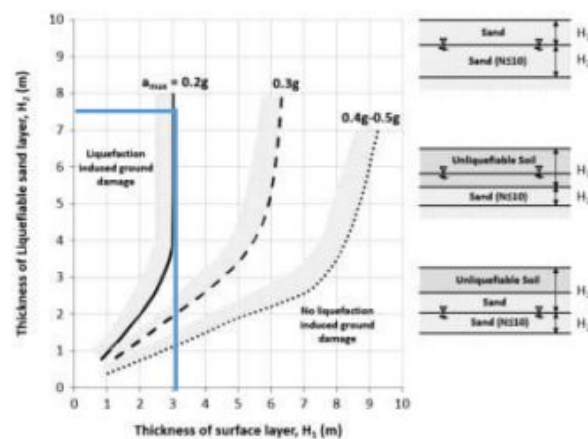
Berdasarkan pembacaan grafik kompreibilitas *Stone Column* pada Gambar 5.23 menghasilkan nilai $\Delta A/A_c$ sebesar 0,05 yang mana nilai $\Delta A/A_c$ akan digunakan dalam perhitungan $\bar{A}_c/A$ sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \frac{\bar{A}_c}{A} &= \frac{1}{\frac{A}{A_c} + \frac{\Delta A}{A_c}} \\ &= \frac{1}{\frac{2,216}{0,785} + 0,05} \\ &= 0,355 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 n1 &= 1 + \frac{\overline{Ac}}{A} \left[\frac{5 - \frac{\overline{Ac}}{A}}{4K_{ac} (1 - \frac{\overline{Ac}}{A})} - 1 \right] \\
 &= 1 + 0,355 \left[\frac{5 - 0,355}{4 \cdot (0,311) (1 - 0,355)} - 1 \right] \\
 &= 2,705
 \end{aligned}$$

Didapatkan nilai *improvement factor* terkoreksi adalah sebesar 2,705 untuk pola pemasangan pola segitiga.

Berdasarkan grafik Ishihara (1985) dapat digunakan untuk merancang kedalaman stone column pada tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi. Dalam grafik ini, evaluasi potensi likuifaksi suatu lapisan tanah bergantung pada ketebalan lapisan yang tidak terlikuifaksi yang berada diatas lapisan tanah yang terlikuifaksi. Pada Gambar 5.25 menunjukan bahwa kurva kemiringan untuk a_{max} sebesar 0,1326708g, maka tebal lapisan tanah yang diperlukan adanya perbaikan yaitu sedalam 7,5 meter.



Gambar 5.25 Grafik Mitigasi Potensi Likuifaksi berdasarkan Lapisan Terlikuifaksi

Sumber : Ishihara (1985)

c. Faktor Keamanan Perbaikan DB-01

Faktor keamanan setelah adanya perbaikan didapatkan dengan cara mengalikan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan nilai *improvement factor* terkoreksi lalu dibagi dengan nilai *cyclic stress ratio* (CSR). Untuk nilai *improvement factor* terkoreksi dengan pola pemasangan segitiga sama sisi didapatkan sebesar 3,101 dan

dengan pola pemasangan persegi didapatkan sebesar 2,705. Dari hasil nilai (n1) yang didapatkan menunjukkan bahwa jenis pola pemasangan segitiga sama sisi lebih besar dibandingkan jenis pola pemasangan persegi, maka pola pemasangan yang digunakan konfigurasi pola segitiga sama sisi agar pengaplikasian lebih efisien dan ekonomis. Berdasarkan kajian teori, pola segitiga lebih efektif dan gaya yang bekerja lebih stabil serta penurunan tanah akan lebih seragam (Fajarwati & Kusuma, 2021).

1) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 16

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,201 \times 3,101}{0,211} \\ &= 2,960 \end{aligned}$$

2) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 17

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,192 \times 3,101}{0,214} \\ &= 2,781 \end{aligned}$$

3) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 18

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,157 \times 3,101}{0,229} \\ &= 2,131 \end{aligned}$$

4) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 19

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,182 \times 3,101}{0,233} \\ &= 2,425 \end{aligned}$$

Tabel 5.20 Rekapitulasi Faktor Keamanan Perbaikan DB-01

Pattern	Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	CSR	CRR	FS	FS'
Segitiga Sama Sisi	16	30	Pasir	0.211	0.201	0.954	2.960
	17	32	Pasir	0.214	0.192	0.897	2.781
	18	34	Pasir	0.229	0.157	0.687	2.131
	19	36	Pasir	0.233	0.182	0.782	2.425

Sumber : Hasil Analisis, 2024

d. Faktor Keamanan Perbaikan DB-02

1) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 16

$$\begin{aligned}
 FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\
 &= \frac{0,199 \times 3,101}{0,212} \\
 &= 2,913
 \end{aligned}$$

2) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 17

$$\begin{aligned}
 FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\
 &= \frac{0,201 \times 3,101}{0,232} \\
 &= 2,685
 \end{aligned}$$

3) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 18

$$\begin{aligned}
 FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\
 &= \frac{0,204 \times 3,101}{0,255} \\
 &= 2,477
 \end{aligned}$$

4) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 19

$$\begin{aligned}
 FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\
 &= \frac{0,209 \times 3,101}{0,284} \\
 &= 2,285
 \end{aligned}$$

5) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 20

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,216 \times 3,101}{0,318} \\ &= 2,108 \end{aligned}$$

6) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 21

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,228 \times 3,101}{0,359} \\ &= 1,970 \end{aligned}$$

Tabel 5.21 Rekapitulasi Faktor Keamanan Perbaikan DB-02

Pattern	Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	CSR	CRR	FS	FS'
Segitiga Sama Sisi	16	30.5	Pasir	0.212	0.199	0.939	2.913
	17	32.5	Pasir	0.232	0.201	0.866	2.685
	18	34.5	Pasir	0.255	0.204	0.799	2.477
	19	36.5	Pasir	0.284	0.209	0.737	2.285
	20	38.5	Pasir	0.318	0.216	0.680	2.108
	21	40	Pasir	0.359	0.228	0.635	1.970

Sumber : Hasil Analisis, 2024

e. Faktor Keamanan Perbaikan DB-03

1) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 15

$$\begin{aligned} FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\ &= \frac{0,206 \times 3,101}{0,209} \\ &= 3,057 \end{aligned}$$

2) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 16

$$FS' = \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR}$$

$$= \frac{0,196 \times 3,101}{0,212}$$

$$= 2,868$$

3) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 17

$$FS' = \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR}$$

$$= \frac{0,198 \times 3,101}{0,233}$$

$$= 2,645$$

4) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 18

$$FS' = \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR}$$

$$= \frac{0,202 \times 3,101}{0,256}$$

$$= 2,441$$

5) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 19

$$FS' = \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR}$$

$$= \frac{0,171 \times 3,101}{0,311}$$

$$= 1,703$$

Tabel 5.22 Rekapitulasi Faktor Keamanan Perbaikan DB-03

Pattern	Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	CSR	CRR	FS	FS'
Segitiga Sama Sisi	15	29	Pasir	0.209	0.206	0.986	3.057
	16	31	Pasir	0.212	0.196	0.925	2.868
	17	33	Pasir	0.233	0.198	0.853	2.645
	18	35	Pasir	0.256	0.202	0.787	2.441
	19	37	Pasir	0.311	0.171	0.549	1.703

Sumber : Hasil Analisis, 2024

f. Faktor Keamanan Perbaikan DB-04

1) Nilai faktor keamanan perbaikan pada Layer 15

$$\begin{aligned}
 FS' &= \frac{CRR \text{ Perbaikan} \times n1}{CSR} \\
 &= \frac{0,204 \times 3,101}{0,214} \\
 &= 2,951
 \end{aligned}$$

Tabel 5.23 Rekapitulasi Faktor Keamanan Perbaikan DB-04

Pattern	Layer	Depth (m)	Jenis Tanah	CSR	CRR	FS	FS'
Segitiga Sama Sisi	15	29.5	Pasir	0.214	0.204	0.951	2.951

Sumber : Hasil Analisis, 2024

Setelah pemasangan *Stone Column*, faktor keamanan tanah terhadap kegagalan geser dan penurunan diferensial meningkat secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kapasitas dukung tanah serta distribusi beban yang lebih merata melalui *Stone Column*, sehingga memberikan stabilitas tambahan dan mengurangi risiko deformasi berlebih pada struktur di atasnya.