

Analisis Potensi Likuifaksi dan Perencanaan Perbaikan Tanah pada Bangunan Pemecah Gelombang di Wilayah Pantai Bali Selatan

Mohammad Muntaha¹, Deris Faisa Ralindra^{1*}, Nadia Zhafirah Maharani¹, Amalia F.M.¹, Sungkono¹, Edy Sumirman¹, Ibnu Pudji R¹, R Buyung Anugraha A¹, Achmad Faiz Hadi Prayitno¹

Departemen Teknik Infrastruktur Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya¹

Koresponden*, Email: deris@its.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	26 Maret 2023	<i>Liquefaction is the condition of the soil that loses shear strength due to an earthquake, so the capacity of the soil decreases suddenly. Liquefaction occurs in water-saturated sand soils, such as the breakwater in South Bali coast with a magnitude earthquake of 6.8 based on BMKG data in 2011. This condition allows liquefaction to occur under the breakwater. This study aims to identify the potential and thickness of the liquefaction layer based on the N-SPT value at 4 bore hole using three methods, namely the Seed-Idriss method, the NCEER method, and the Tokimatsu-Yoshimi method, and design ground improvement with vibro compaction to overcome liquefaction problems. Based on the results of three methods analysis, the potential for liquefaction occurred in all bore hole zones with a thickness of 5 to 9 m from the ground surface. The ground improvement design uses vibro compaction with a triangular pattern, spacing 2.1 m. Ground improvement increases the liquefaction FS value, so the potential for liquefaction in all bore hole zones does not occur.</i>
Diperbaiki	01 Desember 2023	
Disetujui	03 Desember 2023	

Keywords: *liquefaction, earthquake, breakwater, vibro compaction*

Abstrak

Likuifaksi adalah kondisi tanah yang kehilangan kekuatan gesernya akibat gempa, sehingga daya dukung tanah menurun secara mendadak. Likuifaksi terjadi pada tanah pasir halus jenuh air, seperti pada struktur pemecah gelombang (*breakwater*) di pesisir pantai Bali Selatan yang merupakan wilayah dengan potensi gempa besar berkekuatan 6,8 SR berdasarkan data BMKG tahun 2011. Kondisi ini memungkinkan terjadinya likuifaksi di bawah *breakwater*. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi dan ketebalan lapisan likuifaksi berdasarkan nilai N-SPT pada 4 titik *bore hole* menggunakan 3 metode, yaitu metode Seed-Idriss, metode NCEER, dan metode Tokimatsu-Yoshimi, serta merencanakan perbaikan tanah dengan *vibro compaction* untuk mengatasi permasalahan likuifaksi. Berdasarkan hasil analisis ketiga metode, didapatkan potensi likuifaksi terjadi pada seluruh zona *bore hole* dengan ketebalan 5 hingga 9 m dari permukaan tanah. Desain perbaikan menggunakan *vibro compaction* dengan pola pemadatan segitiga, jarak 2,1 m. Perbaikan tanah meningkatkan nilai FS likuifaksi, sehingga seluruh zona *bore hole* tidak lagi menunjukkan potensi likuifaksi.

Kata kunci: likuifaksi, gempa, breakwater, vibro compaction.

1. Pendahuluan

Wilayah Bali bagian selatan, khususnya daerah pesisir pantai, didominasi oleh batuan akibat letusan gunung berapi berupa lapisan alluvium yang merupakan endapan pasir halus sampai pasir sedang, relatif sangat lepas sampai besar, karena dekat dengan zona aktif gempa. USGS dan BMKG mencatat data sejarah gempa bumi di wilayah Bali dimulai pada tahun 1800-an hingga tahun 2022, dengan gempa terbesar terjadi pada 13 Oktober tahun 2011 dengan kekuatan 6,8 SR. Dalam keadaan gempa bumi, tekanan pori tanah pasir sangat lepas atau lepas akan meningkat secara cepat sehingga menghilangkan gaya kontak antar butiran tanah dan likuifaksi dapat terjadi.

Likuifaksi adalah suatu kondisi dimana tanah non-koheesif jenuh air mengalami peningkatan tekanan air pori ketika

terjadi gempa bumi, sehingga mengakibatkan kekuatan geser tanah menghilang dan terjadi perubahan sifat seperti cairan. Saat terjadi likuifaksi, tanah tersebut tidak memiliki daya dukung untuk menahan stabilitas bangunan di atasnya, salah lepas dengan muka air tanah yang dangkal [1]. Selain itu, pantai Bali Selatan merupakan wilayah dengan potensi gempa satunya pada bangunan pemecah gelombang (*breakwater*) di wilayah pantai Bali Selatan.

Kondisi tanah di bawah *breakwater* adalah dominan pasir dengan konsistensi kepadatan *loose* hingga *dense* dan nilai N-SPT berkisar antara 5 – 48 yang berlokasi di bawah muka air tanah atau jenuh air. Berdasarkan kondisi tanah jenuh air serta wilayah dengan potensi gempa besar yang memungkinkan terjadinya likuifaksi, sehingga perlu dilakukan suatu

analisis likuifaksi pada area lokasi proyek agar zona kedalaman likuifaksi dapat diketahui. Potensi likuifaksi dianalisis menggunakan data N-SPT dengan metode yang paling umum digunakan, yaitu metode yang diusulkan oleh Seed & Idriss atau lebih dikenal dengan *simplified procedure* [2]. Metode ini kemudian dikembangkan melalui *workshop National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER)* pada tahun 1996 oleh Youd, T. L. dan Idriss, I. M., yang kemudian dikenal dengan metode NCEER [3]. Pada tahun 1983, Tokimatsu & Yoshimi mengusulkan metode yang mendekati metode Seed dengan memperhitungkan tingkat kerawanan likuifaksi [4].

Peristiwa gempa bumi tidak dapat dihindari atau diprediksi, tetapi potensi likuifaksi dapat diprediksi dan diatasi dengan perencanaan perbaikan tanah dasar. Metode perbaikan untuk mengurangi efek likuifaksi tanah meliputi berbagai metode pemadatan tanah dengan getaran, salah satu yang dapat diterapkan pada tanah pasir dengan muka air tinggi dan telah dipraktikkan lebih dari 70 tahun adalah *vibro compaction* [5].

Pemadatan dengan *vibro compaction* sangat penting untuk dilakukan karena dapat mengurangi risiko likuifaksi apabila terjadi gempa dan dapat memperbaiki stratigrafi tanah menggunakan karakteristiknya sendiri, sehingga daya dukung tanah meningkat dan bangunan *breakwater* dapat berdiri aman dan bekerja sesuai dengan fungsinya.

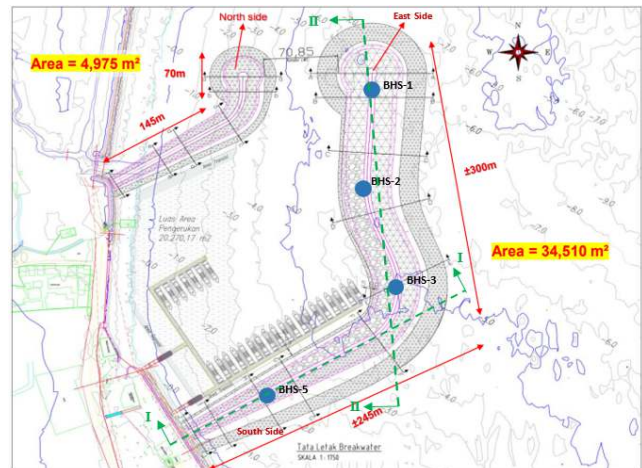
2. Metode

Tahapan Analisis Potensi Likuifaksi dan Perencanaan Perbaikan Tanah pada Bangunan Pemecah Gelombang ini dimulai pada tahap pengumpulan data sekunder. Data ini meliputi data lokasi proyek, layout perencanaan, data perencanaan bangunan *breakwater*, data penyelidikan tanah bore log atau N-SPT (Standard Penetration Test), dan data tanah hasil uji laboratorium. Berdasarkan data tanah yang telah dianalisis, maka selanjutnya dilakukan analisis potensi likuifaksi berdasarkan tiga metode yaitu metode Seed-Idriss, metode NCEER, metode Tokimatsu-Yoshimi, kemudian dari ketiga metode tersebut dikontrol terhadap nilai safety factor (FS). Jika nilai FS lebih dari 1,1 maka tanah tidak berpotensi likuifaksi dan jika kurang dari sama dengan 1,1 maka tanah berpotensi likuifaksi. Tanah yang berpotensi likuifaksi kemudian dilakukan perencanaan untuk perbaikan tanah dasar menggunakan metode *vibro compaction* dengan tujuan meningkatkan daya dukung tanahnya.

Analisis Data Tanah

Breakwater terbagi pada 3 sisi pelabuhan, yaitu Sisi Utara (*North Side*), Sisi Timur (*East Side*) dan Sisi Selatan (*South*

Side), namun yang akan dianalisis adalah sepanjang sisi timur (*east side*) dan sisi selatan (*south side*) dan terdapat 4 titik bor, yaitu titik Uji Bor 1 (BHS-1), Uji Bor 2 (BHS-2), Uji Bor 3 (BHS-3), Uji Bor 5 (BHS-5). Lokasi titik bor pada *breakwater* ditunjukkan oleh **Gambar 1**. Data N-SPT hasil uji bor ditunjukkan oleh **Tabel 1**.



Gambar 1. Layout Bangunan Pemecah Gelombang

Hasil penyelidikan lapangan dan laboratorium dari empat titik bor di sepanjang *breakwater* diketahui secara umum lapisan tanahnya berupa tanah non-kohefif (pasir, pasir berkerikil, dan pasir berlanau) pada kedalaman 0,5 m hingga 5 m. Berdasarkan nilai N-SPT, lapisan pasir tersebut memiliki konsistensi kepadatan *very loose* hingga *loose*. Sedangkan untuk lapisan pasir pada kedalaman 5 m atau lebih memiliki konsistensi kepadatan *medium dense* hingga *very dense*. Pada titik BHS-1 dan BHS-3 ditemukan lapisan berupa batuan breksi dan batuan gamping.

Data tanah bor diinterpretasikan dalam bentuk stratigrafi tanah, ditunjukkan oleh **Gambar 2** dan **Gambar 3**. Data tanah hasil uji laboratorium ditunjukkan oleh **Tabel 2**. Kondisi tanah dasar *breakwater* adalah terendam air (jenuh) dengan kedalaman air laut yang berbeda-beda sesuai elevasi dasar laut dari MSL (*Mean Sea Level*) dan elevasi HWS (*High Water Spring*) air laut. Kedalaman air laut adalah 9,65 m dari *sea bed* untuk titik BHS-1, 9,70 m untuk titik BHS-2, 2,60 m untuk titik BHS-3 dan BHS-5.

Analisa Data Gempa

Berdasarkan rata-rata nilai N-SPT lapangan, diketahui bahwa titik BHS-1, BHS-3, dan BHS-5 termasuk ke dalam situs tanah sedang (SD), sedangkan BHS-2 termasuk ke dalam situs tanah lunak (SE). Nilai percepatan puncak (a_{maks}) harus disesuaikan terhadap pengaruh situs untuk menge-

valuasi likuifaksi, dengan perhitungan menggunakan Persamaan 1.

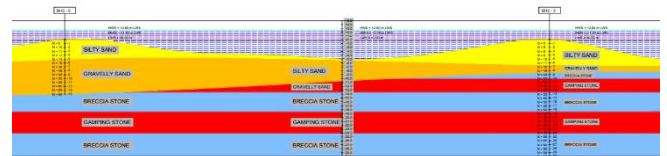
$$a_{maks} = PGA \times F_{PGA} \tag{1}$$

Tabel 1. Hasil Uji SPT

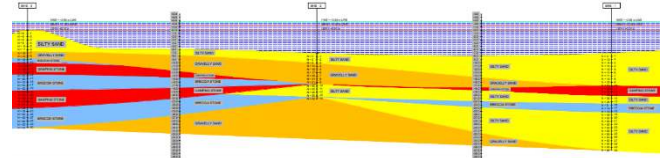
Depth (m)	N-SPT BHS-1	N-SPT BHS-2	N-SPT BHS-3	N-SPT BHS-5
0,50	0	0	0	0
1,00	0	0	0	0
1,50	0	0	0	0
2,00	13	5	8	10
2,50	13	7	8	11
3,00	14	9	9	11
3,50	14	10	9	12
4,00	14	12	9	12
4,50	13	13	10	13
5,00	12	15	10	14
5,50	11	16	11	15
6,00	10	17	11	16
6,50	11	21	20	24
7,00	11	24	30	31
7,50	12	28	39	39
8,00	12	31	48	46
8,50	24	38	49	47
9,00	36	46	49	48
9,50	48	53	50	49
10,00	60	60	50	50
10,50	58	60	50	53
11,00	56	60	50	55
11,50	53	60	50	58
12,00	51	60	50	60
12,50	46	60	50	60
13,00	42	60	50	60
13,50	37	60	50	60
14,00	32	60	50	60
14,50	26		38	
15,00	20		25	

PGA ialah percepatan tanah puncak yang terpetakan, sedangkan F_{PGA} ialah koefisien situs yang di tunjukkan pada **Tabel 3**. Besar koefisien kelas situs F_{PGA} didapat sebesar 1,17 untuk tanah sedang, dan 1,34 untuk tanah lunak. Sementara nilai PGA Kota Denpasar didapat dari PUSGEN-PUSKIM PUPR 2019 sebesar 0,428957 g, sehingga didapat nilai percepatan maksimum (a_{maks}) sebesar 0,502 g untuk tanah sedang, dan 0,576 g untuk tanah lunak. Kelas situs untuk menentukan jenis tanah berdasarkan data N-SPT, dimana tanah lunak berada pada kondisi nilai N-SPT kurang dari 15. Sebagaimana terlihat pada **Tebel 1**, titik BHS-1 tanah lunak berada hingga kedalaman 8 meter, BHS-2 tanah lunak berada hingga kedalaman 4,5 meter, BHS-3 tanah lunak berada

hingga kedalaman 6 meter, dan BHS-5 tanah lunak berada hingga kedalaman 5 meter.



Gambar 2. Stratigrafi Potongan I-I Breakwater Sisi Selatan



Gambar 3. Stratigrafi Potongan II-II Breakwater Sisi Timur

Tabel 2. Parameter Data Tanah Hasil Uji Laboratorium

Titik Bor	Kedalaman m	Physical Properties		Grain Size Distribution	Direct Shear Test	
		γ_t t/m ³	γ_{sat} t/m ³	FC %	ϕ °	C kg/cm ²
BHS - 1	3,5	1,907	1,942	6,48	35	0,077
BHS - 2	13,5	1,755	1,845	34,44	39	0,063
BHS - 3	3,5	1,907	1,942	6,48	35	0,077
BHS - 3	7,5	1,824	1,850	93,91	31	0,104
BHS - 3	2	1,830	1,916	59,82	36	0,028
BHS - 3	4	1,742	1,796	56,39	29	0,097
BHS - 3	7,5	1,819	1,915	56,39	40	0,028
BHS - 5	2	1,616	1,868	13,21	35	0,021
BHS - 5	4	1,852	1,903	14,78	37	0,063
BHS - 5	8	1,705	1,796	36,20	31	0,042

Tabel 3. Koefisien Situs F_{PGA}

Kelas Situs	PGA ≤ 0,1	PGA = 0,2	PGA = 0,3	PGA = 0,4	PGA = 0,5	PGA ≥ 0,6
SA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
SB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
SC	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
SD	1,6	1,4	1,3	1,2	1,1	1,1
SE	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1
SF	SS ^(a)					

Keterangan: SS = situs yang memerlukan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons situs-spesifik [9]

Analisis Likuifaksi

Salah satu parameter yang dapat mempengaruhi potensi likuifaksi adalah nilai tahanan standar penetrasi (N-SPT) suatu tanah. Berdasarkan batasan nilai N-SPT kemungkinan terjadinya likuifaksi, tanah pasir dengan nilai N-SPT < 30, berpotensi mengalami likuifaksi. Sementara itu, kedalaman

lapisan yang rentan terhadap bahaya likuifaksi adalah hingga kedalaman 15 m dari permukaan tanah [6].

Analisis potensi likuifaksi diperlukan untuk menentukan nilai faktor keamanan/ *factor of safety* (*FS*) terjadinya likuifaksi di suatu lokasi. Terjadinya likuifaksi jika *FS* kurang dari 1,1. Nilai *FS* didapatkan dengan membagi nilai tingkat ketahanan tanah terhadap likuifaksi/ *Cyclic Resistance Ratio* (*CRR*) dengan tegangan geser tanah yang timbul akibat gempa bumi/ *Cyclic Stress Ratio* (*CSR*) sebagaimana Persamaan 2.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2)$$

Cyclic Stress Ratio (*CSR*) dihitung dalam rasio antara tegangan geser siklik dengan pendekatan percepatan tanah (a_{maks}) dan tegangan efektif vertikal tanah. Nilai percepatan maksimum tanah (a_{maks}) ditentukan sesuai dengan SNI 8460:2017. Sedangkan nilai *magnitude* gempa (M_w) menggunakan data historis gempa daerah Bali tahun 2011 menurut USGS dan BMKG sebesar 6,8 SR.

Cyclic Resistance Ratio (*CRR*) dihitung berdasarkan nilai N-SPT terkoreksi muka air tanah (N') (Persamaan 3 dan Persamaan 4), tegangan *overburden* dan efisiensi energi (Persamaan 5), dan peningkatan *finer content* (*FC*). $(N_1)_{60}$ adalah nilai tahanan penetrasi N-SPT yang dikoreksi pada tekanan *overburden* 100 kPa (10 ton/m²) akibat palu hidrolis yang jatuh bebas berefisiensi energi 60%. $(N_1)_{60cs}$ adalah nilai $(N_1)_{60}$ yang disetarakan menjadi pasir murni (*clean sand*).

- Nilai N-SPT koreksi terhadap muka air tanah

$$N' = 15 + \frac{1}{2}(N - 15) \quad \text{untuk } N > 15 \quad (3)$$

$$N' = N \quad \text{untuk } N \leq 15 \quad (4)$$

- N-SPT koreksi terhadap *overburden* dan efisiensi energi

$$(N_1)_{60} = N' \times C_N \times C_E \times C_B \times C_R \times C_S \quad (5)$$

Perhitungan diberi contoh pada kedalaman 9 m dari permukaan tanah di titik bor 1 (BHS-1), dengan muka air tanah pada ketinggian 9,65 m dari *sea bed*. Pada kedalaman ini, berat volume tanah sebesar 1,907 t/m³, berat volume tanah *saturated* sebesar 1,942 t/m³.

Besarnya tegangan total tanah dan tegangan efektif tanah pada lapisan tersebut, dapat dilihat pada Persamaan 6 dan Persamaan 7.

Tegangan total tanah (σ_{vo})

$$\sigma_{vo} = (\gamma_w \times H_w) + (\gamma_{sat} \times z) \quad (6)$$

Tegangan efektif tanah (σ'_{vo})

$$\sigma'_{vo} = (\gamma_w \times H_w) + (\gamma_{sat} \times z) \quad (7)$$

Nilai koreksi N-SPT terhadap muka air tanah, dengan nilai N-SPT sebesar 36 pukulan/cm, sebagai berikut:

$$N' = 15 + \frac{1}{2}(36 - 15)$$

$$N' = 26$$

Nilai koreksi N-SPT terhadap efisiensi energi dan tegangan *overburden* atau disebut $(N_1)_{60}$, menggunakan beberapa faktor koreksi berdasarkan SNI 4153:2008, sebagaimana berikut.

- Faktor koreksi terhadap tegangan vertikal efektif (C_N)
- Rasio tenaga palu (C_E) = 1,0 (palu otomatis)
- Dimensi bor (C_B) = 1,0 ($d = 70$ mm)
- Panjang batang bor (C_R) = 1,0 ($L = 30$ m)
- Pengambilan sampel (C_S) = 1,0 (tabung standar)

1) Metode Seed – Idriss

- a) *Cyclic Stress Ratio* (*CSR*) secara rinci dapat dilihat pada Persamaan 8 sampai Persamaan 11.

$$rd = 1 - 0,00765z \quad z \leq 9,15 \text{ m} \quad (8)$$

$$rd = 1,174 - 0,0267z \quad 9,15 < z \leq 23 \text{ m} \quad (9)$$

$$rd = 0,744 - 0,008z \quad 23 < z \leq 30 \text{ m} \quad (10)$$

Contoh pada kedalaman 9 m :

$$rd = 1 - 0,00765(9) = 0,931$$

$$CSR = 0,65 \times \left(\frac{\alpha_{maks}}{g} \right) \times \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \times rd \quad (11)$$

- b) *Cyclic Resistance Ratio* (*CRR*) dapat dilihat pada Persamaan 12.

$$C_N = \frac{2,2}{\left(1,2 + \frac{\sigma_{vo}}{Pa} \right)} \quad (12)$$

- Nilai $(N_1)_{60}$ karena peningkatan *finer content* menggunakan Persamaan 13 dan 14.

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (13)$$

$$\Delta(N_1)_{60cs} = \exp \left[1,63 + \frac{9,7}{FC + 0,01} - \left(\frac{15,7}{FC + 0,01} \right)^2 \right] \quad (14)$$

- Nilai *CRR* pada skala gempa M_w menggunakan Persamaan 15.

$$CRR_{7,5} = \exp \left[\frac{\Delta(N_1)_{60cs}}{14,1} + \left(\frac{\Delta(N_1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{\Delta(N_1)_{60cs}}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{\Delta(N_1)_{60cs}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right] \quad (15)$$

- Nilai *CRR* koreksi *Magnitude Scaling Factor* menggunakan Persamaan 16 hingga Persamaan 19.

$$CRR_{M,\sigma_v} = CRR_{7,5} \times MSF \times K_\sigma \quad (16)$$

$$MSF = 6,9 \times \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \quad (17)$$

$$K_{\sigma} = 1 - C_{\sigma} \ln\left(\frac{\sigma'v}{Pa}\right) \leq 1,1 \quad (18)$$

$$C_{\sigma} = \frac{1}{18,9 - 2,55\sqrt{(N_1)_{60cs}}} \leq 0,3 \quad (19)$$

2) Metode NCEER

a) *Cyclic Stress Ratio* (CSR) menggunakan Persamaan 20.

$$rd = \frac{1 - 0,4113z^{0,5} + 0,04052z + 0,001753z^{1,5}}{1 - 0,4177z^{0,5} + 0,05729z - 0,006205z^{1,5} + 0,00121z^2} \quad (20)$$

b) *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat dilihat pada Persamaan 21.

$$C_N = \sqrt{\frac{Pa}{\sigma'v}} \leq 1,7 \quad (21)$$

- Nilai $(N_1)_{60}$ karena peningkatan *finest content* dapat dilihat pada Persamaan 22.

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad (22)$$

- Nilai CRR pada skala gempa Mw menggunakan Persamaan 23.

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (23)$$

- Nilai CRR koreksi *Magnitude Scaling Factor* menggunakan Persamaan 24 hingga Persamaan 26.

$$CRR_{M,\sigma'v} = CRR_{7,5} \times MSF \times K_{\sigma} \times K_{\alpha} \quad (24)$$

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{Mw^{2,56}} \quad \text{untuk } Mw < 7,5 \quad (25)$$

$$MSF = \left(\frac{Mw}{7,5}\right)^{-2,56} \quad \text{untuk } Mw > 7,5 \quad (26)$$

$$K_{\sigma} = 1, K_{\alpha} = 1$$

Untuk Mw = 6,8 SR, digunakan Persamaan 24.

3) Metode Tokimatsu – Yoshimi menggunakan Persamaan 27 dan 28.

a) *Cyclic Stress Ratio* (CSR)

$$rd = 1 - 0,015z \quad (27)$$

$$CSR = 0,1 \times (Mw - 1) \times \left(\frac{\alpha_{maks}}{g}\right) \times \left(\frac{\sigma'vo}{\sigma'v}\right) \times rd \quad (28)$$

b) *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) menggunakan (29)

Persamaan 29.

$$(N_1)_{60} = \frac{1,7}{\sigma'vo + 0,7} \times N'$$

- Nilai $(N_1)_{60}$ karena peningkatan *finest content* menggunakan Persamaan 30.

$$N_a = (N_1)_{60} + \Delta N_f \quad (30)$$

$FC \leq 5\%$	$\Delta N_f = 0$
$5\% < FC \leq 10\%$	$\Delta N_f = 1,2 \times (FC - 5)$
$10\% < FC \leq 20\%$	$\Delta N_f = 6 + 0,2 \times (FC - 10)$
$20\% < FC \leq 50\%$	$\Delta N_f = 8 + 0,1 \times (FC - 20)$
$FC > 50\%$	$\Delta N_f = 11$

Contoh pada kedalaman 9 m :

$$FC = 6,48\% \quad \Delta N_f = 1,2 \times (6,48 - 5) = 1,776$$

$$N_a = (N_1)_{60} + \Delta N_f = 28,421 + 1,776 = 30,197$$

- Nilai CRR menggunakan Persamaan 31.

$$\frac{\tau_i}{\sigma'vo} = \alpha \times C_r \times \left[\frac{16\sqrt{Na}}{100} + \left(\frac{16\sqrt{Na}}{Cs} \right)^n \right] \quad (31)$$

α	= 0,45
C_r	= 0,57
n	= 14
C_s	= 80 – 90, untuk memisahkan kondisi likuifaksi dan non likuifaksi
C_s	= 75, untuk likuifaksi ekstensif

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis likuifaksi menggunakan tiga metode perhitungan, yaitu metode Seed-Idriss, NCEER, dan Tokimatsu-Yoshimi yang menunjukkan nilai *factor of safety* (FS). Grafik hubungan antara *factor of safety* (FS) dan kedalaman likuifaksi titik BHS-1 dapat dilihat pada **Gambar 4**, titik BHS-2 pada **Gambar 5**, titik BHS-3 pada **Gambar 6**, titik BHS-5 pada **Gambar 7**.

Berdasarkan **Gambar 4** sampai dengan **Gambar 7**, dapat dilihat bahwa tanah memiliki FS kurang dari 1,1 pada kedalaman tertentu, artinya tanah tersebut tidak memiliki tahanan tanah terhadap likuifaksi (CRR) yang cukup dibandingkan dengan tegangan geser tanah akibat guncangan gempa (CSR). Potensi likuifaksi terjadi pada seluruh zona bor *hole* dengan ketebalan 5 – 9 m. Kedalaman lapisan likuifaksi pada titik BHS-1 metode Seed-Idriss adalah 9 m, NCEER 9 m, Tokimatsu-Yoshimi 8,5 m. Titik BHS-2 metode Seed-Idriss adalah 8 m, NCEER 7 m, Tokimatsu-Yoshimi 7 m. Titik

BHS-3 metode Seed-Idriss adalah 7 m, NCEER 6 m, Tokimatsu-Yoshimi 6 m. Titik BHS-5 metode Seed-Idriss adalah 7 m, NCEER 6,5 m, Tokimatsu-Yoshimi 5 m.

Perencanaan Perbaikan Tanah yang Terlikuifaksi

Berdasarkan analisis likuifaksi, dinyatakan bahwa seluruh zona bor *hole* pada kedalaman tertentu berpotensi terhadap bahaya likuifaksi. Oleh karena itu, diperlukan suatu perencanaan perbaikan tanah agar kerusakan struktur bangunan akibat likuifaksi tidak terjadi. Kedalaman yang harus diperbaiki untuk masing-masing titik bor dengan ketiga metode perhitungan likuifaksi, dapat dilihat pada **Tabel 4**.

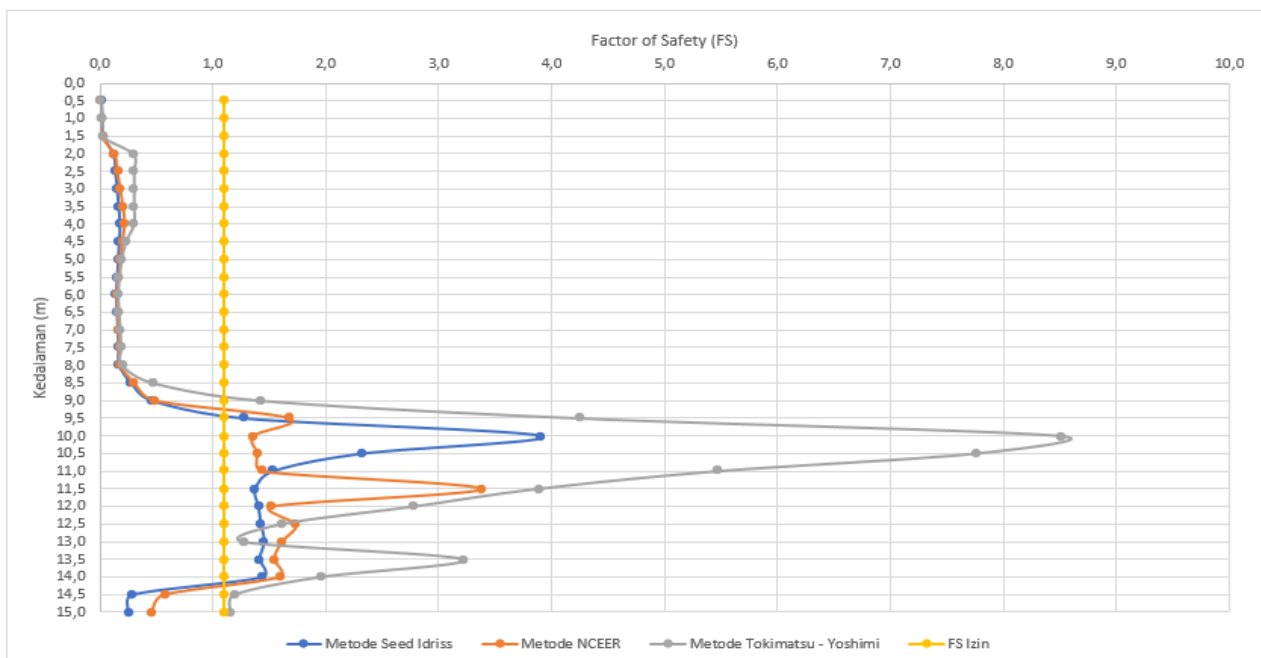
Tabel 4. Kedalaman Lapisan Tanah yang Perlu Diperbaiki

Titik Bor	Kedalaman (m)		
	Seed-Idriss	NCEER	Tokimatsu - Yoshimi
BHS - 1	0,00 – 9,00	0,00 – 9,00	0,00 – 8,50
BHS - 2	0,00 – 8,00	0,00 – 7,00	0,00 – 7,00
BHS - 3	0,00 – 7,00	0,00 – 6,00	0,00 – 6,00
BHS - 5	0,00 – 7,00	0,00 – 6,50	0,00 – 5,00

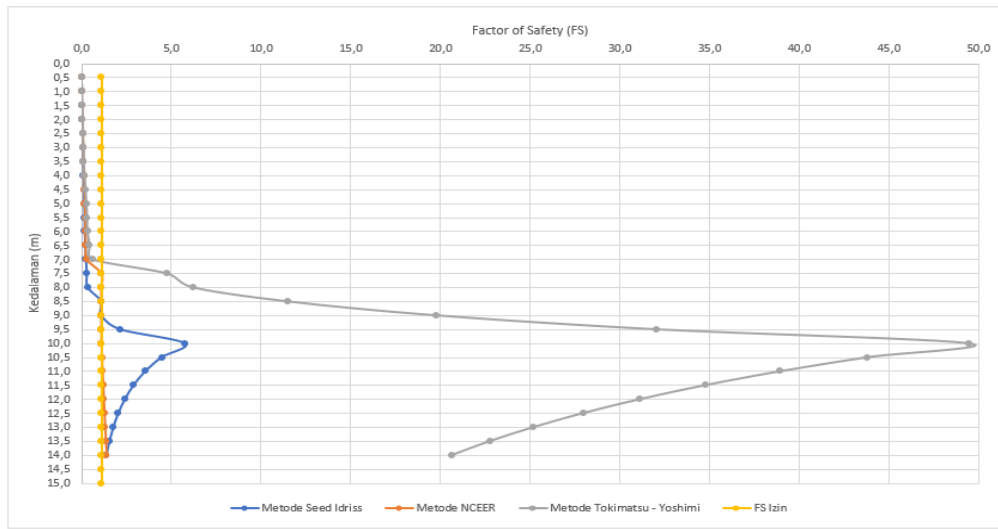
Perbaikan tanah dilakukan agar kepadatan tanah dan kuat geser tanah meningkat, sehingga tahan terhadap likuifaksi

[7]. Berdasarkan jenis tanah, beberapa pilihan metode perbaikan ditunjukkan oleh **Gambar 8**.

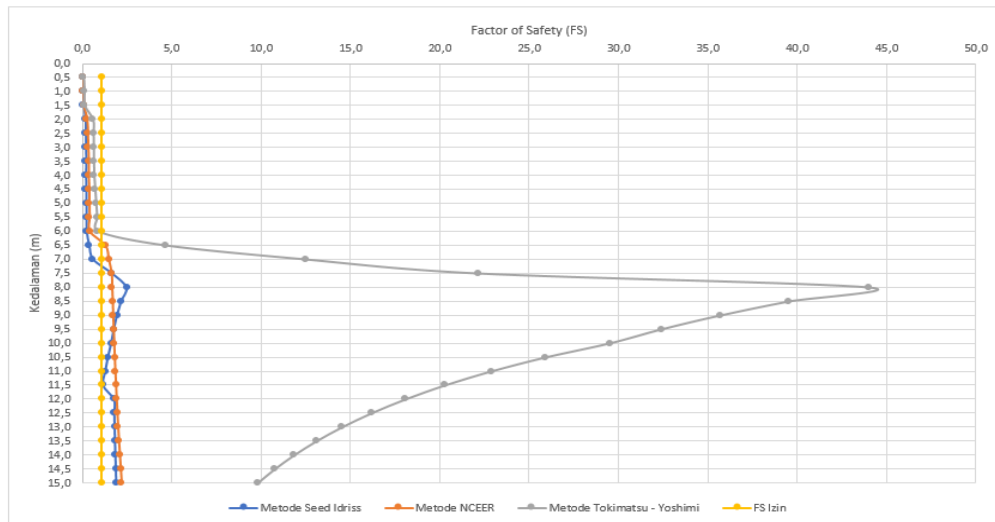
Tanah yang didominasi pasir, beberapa metode perbaikan tanah yang cocok adalah peledakan (*blasting*), vibro-kompaksi (*vibrofloatation*), kompaksi dinamik (*dynamic compaction*), *grouting*, dan campuran semen (*deep mixing cement*). Peledakan (*blasting*) umumnya diaplikasikan pada kondisi batuan yang keras. *Vibro compaction* dapat digunakan pada kondisi muka air tanah dangkal maupun dalam dengan kedalaman perbaikan maksimum mencapai 40 m. *Dynamic compaction* tidak cocok untuk kondisi muka air yang tinggi karena diperlukan tahap pengeringan (*dewatering*), kedalaman maksimum perbaikan adalah 10 m. *Grouting* dan *deep mixing cement* termasuk jenis stabilisasi menggunakan bahan kimia, sehingga tidak cocok diterapkan pada daerah pantai karena memiliki dampak buruk terhadap air laut dan ekosistem laut. Berdasarkan beberapa metode diatas, yang paling cocok dan memungkinkan untuk diterapkan adalah metode *vibro compaction*. *Vibro compaction* adalah metode perbaikan tanah atau penguatan tanah yang dilakukan dengan menggunakan getaran. Getaran tersebut menghasilkan efek kompaksi dan meratakan partikel-partikel tanah, sehingga meningkatkan kepadatan tanah secara keseluruhan.



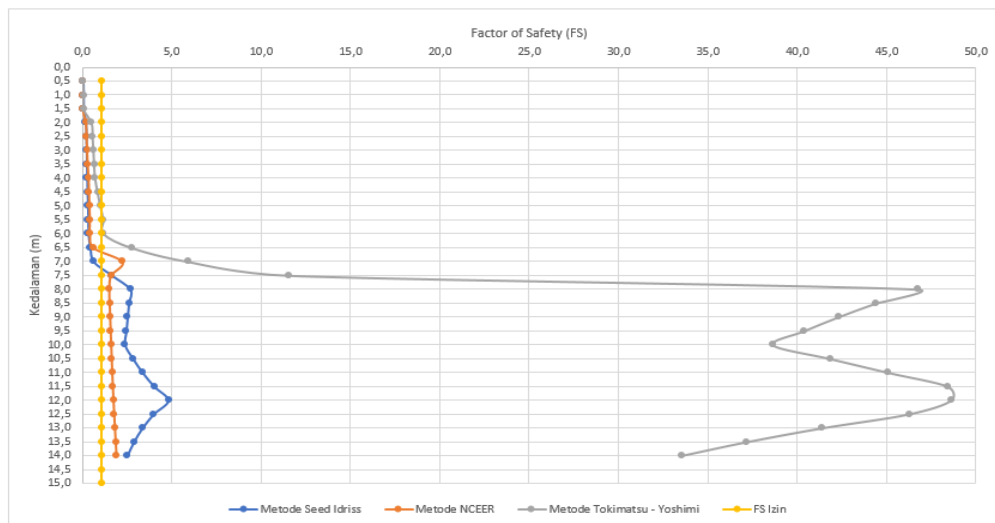
Gambar 4. Grafik Perbandingan Hasil FS Ketiga Metode Pada Titik BHS-1



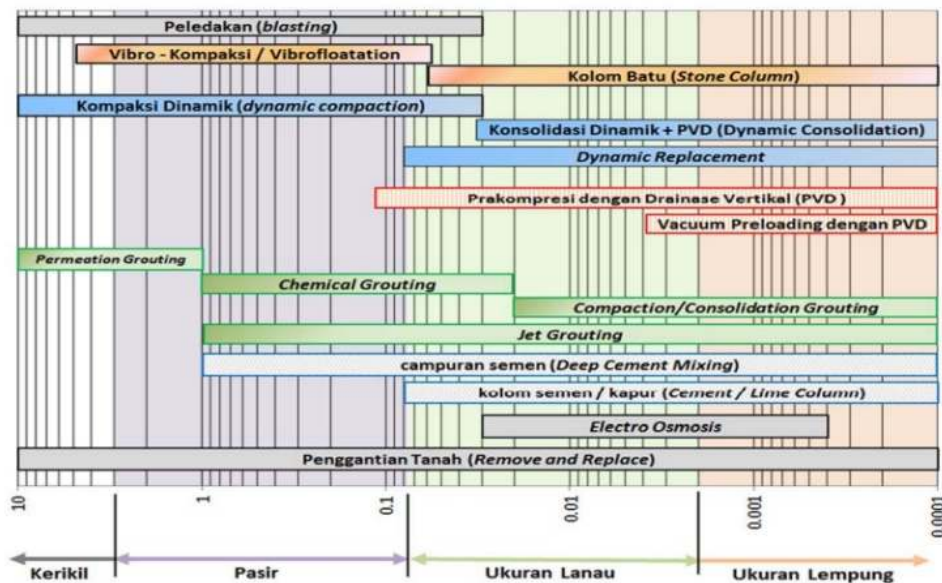
Gambar 5. Grafik Perbandingan Hasil FS Ketiga Metode Pada Titik BHS-2



Gambar 6. Grafik Perbandingan Hasil FS Ketiga Metode Pada Titik BHS-3



Gambar 7. Grafik Perbandingan Hasil FS Ketiga Metode Pada Titik BHS-5



Gambar 8. Jenis-jenis Metode Perbaikan Tanah Berdasarkan Jenis Tanah [10]

Perencanaan Perbaikan Tanah dengan Vibro Compaction

Vibro compaction paling cocok untuk kondisi tanah: [8]

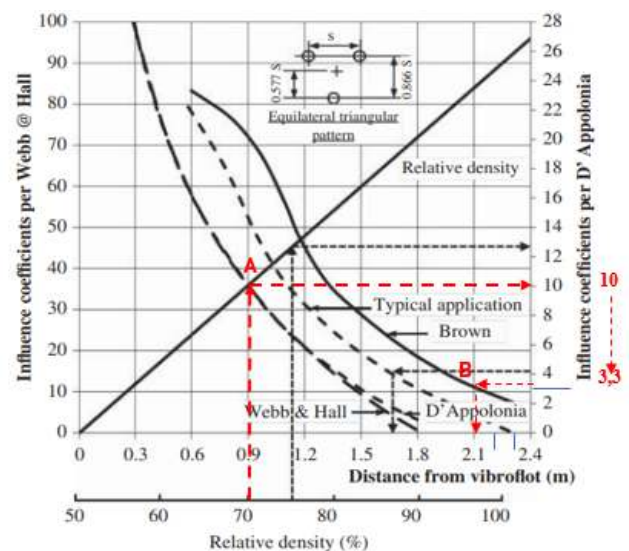
- 1) Tanah non-koheusif (pasir lepas, kerikil, pasir berkerikil)
- 2) Tanah cohesion-less, dimana tanah mempunyai maksimal 20% campuran butiran halus nya dan kurang dari 2 – 3% partikel tanah liat (clay).

Beberapa pertimbangan desain vibro compaction dijelaskan sebagai berikut.

- 1) Kriteria Kinerja
 - a) Untuk struktur pelat lantai, dasar tangka, dan tanggul, target kepadatan relatif (Dr) $\geq 60\%$.
 - b) Untuk struktur pondasi kolom dan pondasi jembatan, target kepadatan relatif (Dr) $\geq 70 - 75\%$.
 - c) Untuk pondasi mesin dan pondasi mat, target kepadatan relatif (Dr) $\geq 80\%$.

Target Dr untuk struktur breakwater diasumsikan sama dengan struktur pondasi jembatan, yaitu 70%.

- 2) Area dan Kedalaman
Kedalaman perbaikan adalah 9 m dari permukaan tanah.
- 3) Pola Pemadatan dan Jarak (Spacing)
Pola pemadatan vibro compaction dapat berbentuk persegi, persegi panjang atau segitiga. Pola pemadatan yang direncanakan adalah pola segitiga, karena pola segitiga adalah pola paling efisien dan dapat digunakan pada area perbaikan yang luas. Sedangkan, perkiraan jarak titik-titik pemadatan menggunakan bagan desain D’Appolonia dan Brown, Glover (1982), ditunjukkan pada Gambar 9.

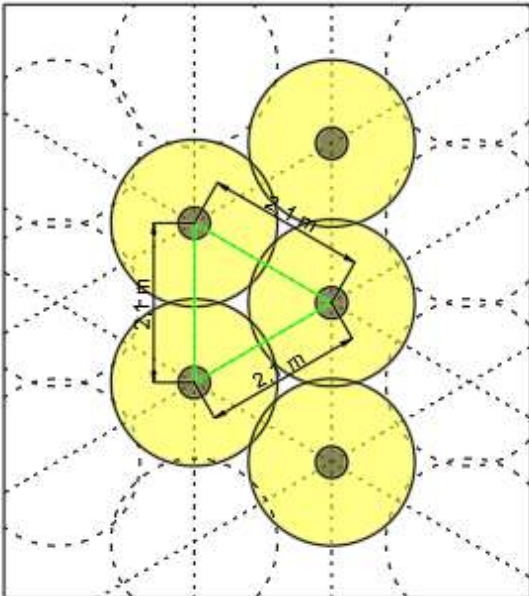


Gambar 9. Penentuan Jarak Titik-titik Pemadatan/ Spacing [8]

- a) Target kepadatan relatif (Dr) = 70%.
- b) Vibroflot berkekuatan 100 HP (Kurva Brown,1970).
- c) Dari target kepadatan relatif (Dr) pada sumbu X, ditarik garis vertikal ke atas sampai memotong garis diagonal *Relatif Density* di titik A.
- d) Dari titik A kemudian ditarik garis horizontal ke kanan menuju sumbu Y (*Influence Coefficients per D’Appolonia*), sehingga didapatkan koefisien pengaruh (I) sebesar 10.
- e) Pola pemadatan berbentuk segitiga, sehingga terdapat 3 titik vibroflot yang mempengaruhi titik berat pola segitiga. Koefisien pengaruh (I) harus dibagi dengan angka 3, dimana $y = 10/3 = 3,3$.

- f) Pada sumbu Y, dari angka 10 ditarik garis vertikal turun ke angka 3,3 kemudian tarik garis arah horizontal ke kiri sampai memotong kurva Brown di titik B.
 - g) Dari titik B kemudian ditarik garis vertikal turun menuju sumbu X (*Distance from vibroflot*), sehingga didapatkan *spacing* (S) sebesar 2,1 m.
- 4) Jenis Alat

Pada perencanaan pola dan *spacing*, digunakan vibroflot dengan tenaga minimal sebesar 100 HP (*Horse Power*). Namun, tenaga dari alat vibroflot biasanya disajikan dalam satuan kW (kilo Watt), sehingga satuan HP (*Horse Power*) harus terlebih dahulu dikonversi menjadi satuan Kw. Diperlukan suatu alat *vibro compaction* dengan tenaga minimal 75 kW.



Gambar 10. Pola Pemadatan dan *Spacing Vibro Compaction*

Parameter selanjutnya untuk menentukan jenis alat vibrator yang digunakan adalah gaya sentrifugal alat. Gaya sentrifugal (F) berkisar antara 150 kN untuk vibrator kecil dan lebih dari 700 kN untuk vibrator yang lebih besar. Karena lapisan yang berpotensi likuifaksi tidak terlalu dalam, maka cukup menggunakan vibrator kecil dengan gaya sentrifugal minimal 150 kN.

Analisis Likuifaksi Setelah Perbaikan Tanah

Pada tahapan ini dibandingkan antara *Factor of Safety* (FS) sebelum perbaikan dan setelah perbaikan. Setelah dilakukan perbaikan tanah, partikel tanah akan tersusun ulang menjadi pola yang lebih kompak dan padat. Beberapa alasan mengapa tanah menjadi lebih padat setelah proses kompaksi melibatkan perubahan struktur dan susunan

partikel tanah. Beberapa faktor yang menyebabkan tanah menjadi lebih padat setelah kompaksi adalah pengurangan porositas, penyusunan partikel, pengurangan volume, penurunan kandungan air, dan pembatasan gerakan partikel tanah. Proses kompaksi umumnya digunakan untuk meningkatkan sifat mekanis tanah, seperti daya dukung dan kestabilan tanah. Kepadatan tanah di uji menggunakan metode N-SPT. Untuk itu, dilakukan perencanaan nilai N-SPT yang akan dicapai setelah pemadatan tanah, dengan tujuan agar potensi likuifaksi berkurang. Lapisan tanah dengan nilai N-SPT < 30 akan ditingkatkan nilainya minimal dua kali lipat dari nilai N-SPT awal. Setelah itu, dilakukan kembali perhitungan analisis likuifaksi berdasarkan tiga metode pada empat titik bor.

Pada titik BHS-5 kedalaman 3 m metode Seed-Idriss, dengan N-SPT awal = 11 didapatkan FS = 0,216. N-SPT rencana setelah pemadatan = 27 (2 kali lipat dari N-SPT awal), didapatkan FS = 1,268 > 1,1. Artinya, tanah pada kedalaman 3 m sudah tidak lagi berpotensi likuifaksi setelah dilakukan pemadatan menggunakan *vibro compaction*. Hasil *Factor of Safety* (FS) setelah pemadatan dengan ketiga metode yaitu metode Seed-Idriss, metode NCEER, metode Tokimatsu-Yoshimi pada masing-masing titik bor, ditunjukkan oleh **Tabel 5** sampai **Tabel 7**.

4. Simpulan

Dari hasil analisis yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Potensi likuifaksi terjadi pada tanah pasir jenuh air dengan kandungan *finer content* (FC) < 20% dan nilai tahanan *Standar Penetration Test* (N-SPT) < 30, dengan ketebalan lapisan likuifaksi 5 – 9 m.
2. Berdasarkan hasil analisis potensi likuifaksi pada 4 titik bor menggunakan 3 metode perhitungan, didapatkan kedalaman lapisan likuifaksi pada titik BHS-1 metode Seed-Idriss adalah 9 m, NCEER 9 m, Tokimatsu-Yoshimi 8,5 m. Titik BHS-2 metode Seed-Idriss adalah 8 m, NCEER 7 m, Tokimatsu-Yoshimi 7 m. Titik BHS-3 metode Seed-Idriss adalah 7 m, NCEER 6 m, Tokimatsu-Yoshimi 6 m. Titik BHS-5 metode Seed-Idriss adalah 7 m, NCEER 6,5 m, Tokimatsu-Yoshimi 5 m.
3. Perbaikan tanah dasar pada area yang berpotensi likuifaksi di bawah *breakwater* direncanakan menggunakan alat *vibrator compaction* bertenaga minimal 75 kW untuk dapat mencapai kepadatan relatif (Dr) 70% dan FS likuifaksi lebih dari 1,1, sehingga seluruh zona bor *hole* tidak lagi menunjukkan potensi likuifaksi. Pola pemadatan yang digunakan adalah pola pemadatan segitiga (*equilateral triangular pattern*) dengan jarak (S) sebesar 2,1 m.

Tabel 5. Perbandingan Hasil *FS* Sebelum dan Setelah Pemadatan Metode Seed-Idriss

Depth (m)	BHS-1		BHS-2		BHS-3		BHS-5	
	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan
0,5	0,010	1,100	0,009	1,100	0,030	1,100	0,029	1,100
1	0,019	1,100	0,017	1,100	0,048	1,100	0,046	1,100
1,5	0,027	1,100	0,023	1,100	0,060	1,100	0,058	1,100
2	0,117	1,100	0,050	1,100	0,156	1,128	0,179	1,100
2,5	0,135	1,100	0,067	1,100	0,171	1,234	0,199	1,187
3	0,151	1,100	0,087	1,100	0,182	1,317	0,216	1,268
3,5	0,164	1,100	0,101	1,100	0,191	1,385	0,231	1,335
4	0,175	1,100	0,122	1,100	0,185	1,309	0,249	1,428
4,5	0,168	1,100	0,141	1,100	0,195	1,354	0,270	1,476
5	0,160	1,100	0,161	1,100	0,205	1,394	0,292	1,518
5,5	0,151	1,100	0,176	1,100	0,213	1,430	0,312	1,555
6	0,143	1,100	0,187	1,100	0,220	1,461	0,318	1,588
6,5	0,150	1,129	0,217	1,100	0,366	1,490	0,426	1,618
7	0,157	1,161	0,252	1,100	0,590	1,516	0,618	1,646
7,5	0,163	1,184	0,294	1,100	1,668	1,668	1,658	1,658
8	0,170	1,205	0,347	1,100	2,481	2,481	2,689	2,689
8,5	0,275	1,225	1,100	1,100	2,181	2,181	2,610	2,610
9	0,459	1,240	1,100	1,100	1,941	1,941	2,538	2,538
9,5	1,271	1,271	2,160	2,160	1,759	1,759	2,464	2,464
10	3,908	3,908	5,764	5,764	1,613	1,613	2,393	2,393
10,5	2,318	2,318	4,466	4,466	1,424	1,424	2,844	2,844
11	1,528	1,528	3,557	3,557	1,275	1,275	3,386	3,386
11,5	1,373	1,373	2,902	2,902	1,157	1,157	4,041	4,041
12	1,400	1,400	2,419	2,419	1,771	1,771	4,837	4,837
12,5	1,424	1,424	2,055	2,055	1,792	1,792	4,004	4,004
13	1,452	1,452	1,777	1,777	1,814	1,814	3,375	3,375
13,5	1,409	1,409	1,560	1,560	1,834	1,834	2,893	2,893
14	1,438	1,438	1,389	1,389	1,858	1,858	2,519	2,519
14,5	0,287	1,463			1,879	1,879		
15	0,249	1,492			1,905	1,905		

Tabel 6. Perbandingan Hasil *FS* Sebelum dan Setelah Pemadatan Metode NCEER

Depth (m)	BHS-1		BHS-2		BHS-3		BHS-5	
	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan	Sebelum Pemadatan	Setelah Pemadatan
0,5	0,008	1,100	0,007	1,100	0,035	1,100	0,024	1,760
1	0,015	1,100	0,013	1,100	0,055	1,100	0,039	2,806
1,5	0,021	1,100	0,018	1,100	0,069	1,100	0,048	1,100
2	0,131	1,100	0,047	1,511	0,254	1,100	0,221	1,100
2,5	0,157	1,100	0,069	1,100	0,287	1,196	0,255	1,150
3	0,182	1,100	0,095	1,100	0,315	1,276	0,286	1,229
3,5	0,207	1,100	0,116	1,100	0,342	1,341	0,317	1,292
4	0,220	1,100	0,150	1,100	0,333	1,267	0,369	1,382
4,5	0,199	1,100	0,174	1,100	0,367	1,311	0,393	1,429
5	0,182	1,100	0,194	1,225	0,377	1,349	0,416	1,469
5,5	0,167	1,328	0,207	1,100	0,387	1,383	0,440	1,504
6	0,154	1,100	0,216	1,100	0,397	1,414	0,442	1,537
6,5	0,161	1,100	0,248	3,557	1,280	1,442	0,651	1,567
7	0,169	1,134	0,284	1,100	1,469	1,469	2,255	2,255
7,5	0,176	1,173	1,100	1,100	1,635	1,635	1,622	1,622
8	0,184	1,211	1,100	1,100	1,662	1,662	1,520	1,520

8,5	0,307	1,248	1,100	1,100	1,689	1,689	1,545	1,545
9	0,490	1,285	1,100	1,100	1,716	1,716	1,571	1,571
9,5	1,683	1,683	1,100	1,100	1,744	1,744	1,598	1,598
10	1,360	1,360	1,100	1,100	1,774	1,774	1,625	1,625
10,5	1,399	1,399	1,132	1,132	1,805	1,805	1,655	1,655
11	1,438	1,438	1,165	1,165	1,839	1,839	1,686	1,686
11,5	3,377	3,377	1,199	1,199	1,875	1,875	1,719	1,719
12	1,523	1,523	1,234	1,234	1,913	1,913	1,755	1,755
12,5	1,742	1,742	1,272	1,272	1,954	1,954	1,793	1,793
13	1,615	1,615	1,310	1,310	1,998	1,998	1,834	1,834
13,5	1,544	1,544	1,351	1,351	2,045	2,045	1,877	1,877
14	1,592	1,592	1,393	1,393	2,094	2,094	1,923	1,923
14,5	0,573	1,642			2,146	2,146		
15	0,456	1,693			2,199	2,199		

Tabel 7. Perbandingan Hasil *FS* Sebelum dan Setelah Pematatan Metode Tokimatsu – Yoshimi

Depth (m)	BHS-1		BHS-2		BHS-3		BHS-5	
	Sebelum Pematatan	Setelah Pematatan	Sebelum Pematatan	Setelah Pematatan	Sebelum Pematatan	Setelah Pematatan	Sebelum Pematatan	Setelah Pematatan
0,5	0,008	1,654	0,007	1,436	0,058	18,744	0,043	9,925
1	0,015	2,073	0,013	1,801	0,093	21,767	0,069	11,444
1,5	0,021	2,403	0,018	2,088	0,116	23,460	0,086	12,386
2	0,296	4,131	0,057	3,059	0,578	23,461	0,529	16,779
2,5	0,304	3,788	0,077	3,559	0,603	26,007	0,584	16,141
3	0,306	3,407	0,099	2,353	0,618	24,735	0,630	15,300
3,5	0,305	3,039	0,125	4,293	0,626	23,380	0,668	14,409
4	0,303	2,703	0,171	3,597	0,644	22,578	0,727	13,542
4,5	0,232	2,967	0,216	3,015	0,700	21,801	0,867	12,652
5	0,194	5,407	0,271	2,205	0,755	21,034	1,020	10,461
5,5	0,174	3,047	0,310	2,622	0,808	20,298	1,187	11,109
6	0,163	2,545	0,332	3,071	0,861	19,601	1,200	11,734
6,5	0,172	2,576	0,457	2,601	4,658	18,948	2,769	11,038
7	0,181	2,604	0,629	2,217	12,485	18,339	5,922	9,327
7,5	0,189	2,627	4,753	10,628	22,119	22,119	11,550	11,550
8	0,197	2,649	6,217	10,405	43,984	43,984	46,754	46,754
8,5	0,471	2,815	11,503	11,503	39,536	39,536	44,431	44,431
9	1,421	2,417	19,804	19,804	35,703	35,703	42,323	42,323
9,5	4,245	4,245	32,098	32,098	32,382	32,382	40,404	40,404
10	8,505	8,505	49,461	49,461	29,494	29,494	38,657	38,657
10,5	7,754	7,754	43,827	43,827	25,916	25,916	41,845	41,845
11	5,472	5,472	38,972	38,972	22,879	22,879	45,108	45,108
11,5	3,883	3,883	34,774	34,774	20,289	20,289	48,443	48,443
12	2,778	2,778	31,133	31,133	18,070	18,070	48,646	48,646
12,5	1,613	1,613	27,963	27,963	16,160	16,160	46,255	46,255
13	1,272	1,272	25,196	25,196	14,510	14,510	41,411	41,411
13,5	3,218	3,218	22,772	22,772	13,079	13,079	37,197	37,197
14	1,957	1,957	20,642	20,642	11,832	11,832	33,520	33,520
14,5	1,194	4,025			10,743	10,743		
15	1,154	3,620			9,787	9,787		

Daftar Pustaka

[1] P. Hadiwidjojo, M. M. Samodra, and T. Amin, *Peta Geologi Lembar Bali, Nusa Tenggara, Bandung*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1998.

[2] H. B. Seed and I. M. Idriss, “Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute Monograph,” 1983.

[3] T. L. Youd and I. M. Idriss, “Liquefaction Resistance

- of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 127, no. 4, 2001.
- [4] K. Tokimatsu and Y. Yoshimi, “Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on Spt N-Value and Fines Content.,” *Soils Found.*, vol. 23, no. 4, 1983.
- [5] K. Kirsch and F. Kirsch, *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. 2017.
- [6] E. Soebowo, “Geologi Teknik Sedimen Kuarter Dan Bahaya Amblesan, Likuifaksi Di Serangan – Tuban – Tanjung Bena, Bali,” *J. Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 26, no. 1, 2016.
- [7] Darwis, *Dasar-Dasar Teknik Perbaikan Tanah*. 2017.
- [8] J. Han, *Principle and Practice of Ground Improvement*. 2015.
- [9] Standar Nasional Indonesia (SNI) 1726. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-gedung*. Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2019
- [10] Standar Nasional Indonesia (SNI) 8460. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Badan Standardisasi Nasional (BSN). 2017.