



ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI PASIR PANTAI ANYER SEBAGAI SUBGRADE JALAN YANG DISTABILISASI DENGAN BAKTERI SPOROSARCINA SP

Eva Ezra Finesia Simbolon^{1*)}, Nisa Firia¹⁾, Dewi Amalia¹⁾, Lim Aswin¹⁾

¹⁾Politeknik Negeri Bandung, Bandung, Indonesia
surel: *)dewi.amalia@polban.ac.id

ARTIKEL INFO

Kata Kunci:

gempa bumi, likuefaksi, tanah pasir pantai, *Sporosarcina Sp*, subgrade

Keywords:

earthquake, liquefaction, coastal sandy soil, *Sporosarcina Sp*, subgrade

ABSTRACT

Earthquakes are natural disasters that can cause significant damage to infrastructure, particularly the subgrade layer, and induce secondary effects such as liquefaction. This impact phenomenon is indicated by loose soil material, such as sand, losing its strength and exhibiting a fluid-like behaviour due to specific shocks or pressures. As a result, the soil becomes unstable so that it is unable to support the load above it. The use of loose sand as a subgrade requires repair or replacement with stronger, more stable soil, which can be addressed with the proper stabilisation method. Currently, a more environmentally friendly soil stabilisation method has been found, known as bio-grouting or MICP (Microbially Induced Calcite Precipitation). This study was conducted to develop and apply *Sporosarcina Sp* bacteria on Anyer beach sand with four methods, including A (injection, 10 ml of bacteria), A1 (soaking, 10 ml of bacteria), B (injection, 100 ml of bacteria), and C (injection, only nutrients). The results of soil stabilisation using four methods in a 14-day incubation period can increase the CBR value of the soil by more than 40% compared to the initial condition. The CBR value of the soil, which was originally around 2.25%, became 3.156% (method A), 3.016% (method A1), and 3.367% (method B). The increase in the SF value, which was previously around 0.20-0.21, was shown after stabilisation, and the SF value was obtained with a range of 2-5.6 in methods A, A1, and B. This value has increased significantly and can reduce the potential for liquefaction in sand as a road subgrade with a depth range of 0-1 m, as shown at the research location.

DOI: 10.58499/jatan.v42i1.1315

diterima: 19 Juli 2024;

direvisi: 10 Mei 2025;

disetujui: 31 Mei 2025

PENDAHULUAN

Perencanaan rekayasa konstruksi di Indonesia harus mempertimbangkan faktor gempa. Hal ini disebabkan oleh letak geografis Indonesia yang berada pada pertemuan 2 lempeng benua dan 2 lempeng samudra serta pada jalur gunung api vulkanik aktif (*ring of fire*) (Djauhari, 2009). Selain itu, Indonesia juga berada pada pertemuan empat lempeng tektonik utama di bumi. Keempat lempeng itu adalah Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Filipina. Kondisi inilah yang menyebabkan Indonesia rentan mengalami gempa bumi. Gempa bumi dapat menghasilkan *secondary effect* yang merujuk pada proses permukaan nontektonik yang berkaitan langsung dengan getaran gempa yang disebut likuefaksi (Day, 2001).

Untuk meningkatkan stabilitas tanah dan mencegah kerusakan infrastruktur, perlu dilakukan upaya pencegahan dan mitigasi terhadap likuefaksi. Pemasangan dinamis dengan beban di atasnya dan stabilisasi tanah dengan bahan kimia adalah dua teknik yang umum digunakan untuk meningkatkan stabilitas tanah.

Menurut Suherman (1999), metode pemadatan secara dinamis merupakan salah satu opsi dalam berbagai metode perbaikan tanah dasar yang bertujuan mengurangi risiko likuefaksi dan mengurangi *settlement*. Metode ini menghasilkan gelombang kompresi yang dapat menimbulkan tekanan air pori yang berpotensi merusak struktur tanah.

Metode lainnya adalah metode stabilisasi dengan bahan kimia. Stabilisasi kimiawi merupakan usaha untuk meningkatkan kekuatan dan daya dukung tanah dengan cara mengurangi atau menghilangkan sifat-sifat teknis tanah yang kurang menguntungkan (mencampurkan tanah dengan bahan kimia seperti kapur) (Harneini, 2007). Menurut Jawad *et al.* (2014), penambahan kapur sebagai bahan stabilisasi tanah memiliki kekurangan, yaitu reaksi kimia yang terjadi dapat merusak ekosistem tanah. Kerusakan pertama adalah karbonasi kapur dan yang kedua adalah reaksi dengan garam sulfat yang ada di dalam tanah. Jika pasir lepas digunakan sebagai *subgrade*, diperlukan perbaikan atau penggantian tanah yang lebih kokoh dan stabil.

Saat ini telah ditemukan metode baru dalam stabilisasi tanah yang ramah lingkungan yang dikenal



sebagai *Bio-Grouting* atau *Microbially Induced Calcite Precipitation* (MICP). Metode ini merupakan cara perbaikan tanah menggunakan metabolisme mikroorganisme untuk menghasilkan kalsit (CaCO_3). Kalsit ini akan berfungsi sebagai pengikat partikel tanah sehingga daya dukung pada tanah akan meningkat. Telah ditemukan beberapa jenis bakteri yang memiliki kemampuan untuk menghidrolisis urease sehingga dapat mengendapkan kalsium karbonat (CaCO_3) yang dapat bertindak sebagai bahan perekat antara butiran-butiran tanah untuk meningkatkan kekuatan struktur tanah itu sendiri. Bakteri-bakteri ini meliputi *Sporosarcina pasteurii*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus pasteurii*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Bacillus cereus* (Whiffin *et al.* 2007).

ESDM (2019) pantai Anyer termasuk ke dalam zona berpotensi mengalami likuefaksi sedang-tinggi. Selain itu, menurut BMKG (2024), tercatat setidaknya ada 11 kasus gempa bumi di Anyer dari tahun 2019-2024 yang ditunjukkan pada Lampiran 1. Menurut Desain Spektra Indonesia (2017), nilai percepatan tanah maksimum di Pantai Anyer, Banten berkisar di angka 0,4g-0,5g. Anyer memiliki nilai PGA >0,25, yaitu termasuk dalam daerah yang memiliki potensi likuefaksi. Selain dari kondisi zona gempanya di Pantai Anyer, kondisi muka air tanah (MAT) di Pantai Anyer, Banten juga tergolong dangkal (IAGI, 2009). Berdasarkan peta kedalaman muka air tanah Pantai Anyer, Banten hanya berkisar 0-0,5m dari permukaan tanah. Di samping itu, hal ini juga diperkuat dengan data geoteknik berupa stratifikasi tanah di daerah pesisir Pantai Anyer yang menunjukkan nilai N-SPT di daerah tersebut berkisar antara 0-10 dengan jenis tanah pasir lepas sehingga dengan kondisi tersebut sangat berpotensi likuefaksi.

Dari permasalahan tersebut, akan dilakukan stabilisasi tanah pasir pantai Anyer dengan MICP. Pasir pantai ini akan distabilisasi dengan 10ml dan 100ml larutan sementasi bakteri yang kemudian akan dilakukan pemeraman dengan masa peram 7 hari dan 14 hari. Metode dalam proses stabilisasi ada 4, yaitu metode A (suntik, 10 ml bakteri), metode A1 (rendam, 10 ml bakteri), metode B (suntik, 100 ml bakteri), dan metode C (suntik, hanya nutrisi). Untuk metode B dan metode C terlebih dahulu dijenuhkan dengan bakteri selama 24 jam. Setiap harinya terhadap setiap sampel dengan metode berbeda akan dilakukan pengecekan pH efluen. Hasil pengujian yang paling optimum akan digunakan dalam perencanaan teknis *subgrade* jalan. Dalam penelitian ini yang merupakan penelitian lanjutan dari penelitian Lim *et al.* (2019), akan dilakukan pengembangan dan kolaborasi dari penelitian sebelumnya untuk melihat kemampuan

bakteri lokal padang sebagai bahan stabilisasi tanah pasir pantai dalam mengurangi potensi likuefaksi. Dari penelitian ini diharapkan sampel yang diuji dapat tersementasi secara merata sehingga penelitian ini dapat dijadikan rujukan untuk mengurangi potensi likuefaksi, dapat diterapkan sebagai stabilisasi tanah baru untuk *subgrade* jalan yang lebih ramah lingkungan, dan sebagai acuan penelitian lanjutan yang ingin mengembangkan potensi bakteri lokal pada kasus lainnya.

HIPOTESIS

Berdasarkan pendahuluan dan tujuan yang telah dikemukakan, hipotesis yang akan diuji dalam penelitian, yaitu (1) metode *bio-grouting* yang tergolong efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi potensi likuefaksi pada pasir pantai Anyer dan (2) terdapat masa peram untuk mendapatkan sampel yang paling optimal dalam perencanaan teknis *subgrade* jalan.

METODOLOGI

Material

Penelitian ini berfokus pada beberapa komponen material yang digunakan, yaitu bakteri *Sporosarcina* yang berasal dari pasir Pantai Padang dan pasir yang diperoleh dari Pantai Anyer, Banten.

Lokasi Penelitian

Lokasi pengambilan sampel pasir pada penelitian ini adalah sepanjang daerah Anyer Lor-Mercusuar.

Metode Penelitian

Tahapan penelitian ini meliputi beberapa langkah penting. Pertama, persiapan material dilakukan untuk memastikan ketersediaan semua komponen yang dibutuhkan. Setelah itu, dilakukan pengembang biakan bakteri untuk digunakan dalam penelitian ini. Kemudian, dilakukan pengujian karakteristik tanah yang terbagi dalam dua jenis pengujian, yaitu uji sifat fisik dan uji mekanik tanah. Pengujian karakteristik tanah dilakukan untuk mengetahui jika tanah yang dianalisis berpotensi likuefaksi, akan dilakukan stabilisasi tanah. Selanjutnya, tanah akan distabilisasi dengan empat metode di antaranya, metode A (suntik, 10 ml bakteri), metode A1 (rendam, 10 ml bakteri), metode B (suntik, 100 ml bakteri), dan metode C (suntik, hanya nutrisi). Untuk metode B dan metode C terlebih dahulu dijenuhkan dengan bakteri selama 24 jam. Sampel pasir yang sudah dilakukan pemeraman selama 7 hari dan

14 hari akan dilanjutkan dengan pengujian karakteristik tanah setelah stabilisasi. Terakhir, dilakukan analisis keefektifan metode *bio-grouting* dalam meningkatkan stabilitas dan nilai CBR tanah,

serta mereduksi potensi likuefaksi untuk mengevaluasi hasil dari penelitian ini. Campuran nutrisi yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Campuran Nutrisi dalam 1 Liter

Bahan Kimia	Kebutuhan per L	Satuan
Urea	30,03	gram
CaCl ₂	55,50	gram
NB	3	gram
NH ₄ Cl	10	gram
NaHCO ₃	2,12	gram

HASIL DAN ANALISIS

Hasil Pengujian Karakteristik Tanah Kondisi Asli

Pengujian kondisi asli (*initial*) untuk mengetahui sifat fisik dan sifat teknik tanah pasir Pantai Anyer, Banten sebelum stabilisasi.

Hasil Sifat Fisik Tanah

Hasil rekapitulasi sifat fisik tanah dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Rekapitulasi Sifat Fisik Tanah

Uraian	Hasil	Satuan
Kadar Air (ω)	0,41	%
Berat Isi (γ)	1,51	gr/cm ³
Berat Jenis (G_s)	2,63	
Lolos Saringan No. 200	0,06	%
Kerikil	0	%
Pasir Sedang	92,74	%
Pasir Halus	7,08	%
Analisa Lanau	0,17	%
Ukuran Lempung	0	%
Butir D10 (mm)	0,61	mm
D30 (mm)	0,74	mm
D50 (mm)	0,87	mm
D60 (mm)	0,94	mm
Cu	1,52	
Cc	0,96	
γ_{sat}	19,02	kN/m ³

Berdasarkan Tabel 2, pasir tersebut memiliki klasifikasi sebagai berikut.

Dengan:

Cu = 1.523 < 10% => Potensi likuefaksi

Cc = 0.960

Jenis tanah/ klasifikasi umum:

SP = Pasir gradasi jelek

A-3 = Kelompok tanah yang terdiri dari pasir halus dengan sedikit sekali butir-butir halus dengan

sedikit sekali butir-butir lolos saringan 200 dan tidak plastis.

Simbols:

ASTM = SP

AASHTO = A-3

Hasil Sifat Teknik Tanah

Selanjutnya diperoleh hasil pengujian sifat teknik dipasir Pantai Anyer pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sifat Teknis Pasir Pantai Anyer

Pengujian	Hasil	Satuan	Ket.
Direct Shear	Sudut Geser Dalam	28,97	°
	Kohesi	14,65	kPa
Permeabilitas	Sampel 1	1.88x10 ⁽⁻²⁾	cm/s
	Sampel 2	1.626x10 ⁽⁻²⁾	cm/s
CBR		2,24	%

Hasil Pengujian Karakteristik Tanah Setelah Stabilisasi

Pada pasir Pantai Anyer selanjutnya dilakukan stabilisasi menggunakan Bakteri *Sporosarcina Sp.* dengan pemeraman selama 7 hari dan 14 hari kemudian dilakukan pengujian kondisi setelah stabilisasi untuk mengetahui sifat fisik dan sifat tekniknya.

Hasil Sifat Fisik Tanah

Berat Isi

Untuk pengujian berat isi tanah pasir Pantai Anyer, Banten setelah distabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* didapatkan hasil untuk setiap metode pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Berat Isi Setelah Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

γ (g/cm ³) Setelah stabilisasi (14 hari)			
A	A1	B	C
1,63	1,65	1,63	-

Dari Tabel 4 dapat dilihat terdapat kenaikan berat isi pada pasir Pantai Anyer setelah distabilisasi, yaitu pada metode A, metode A1, dan metode B. Hal ini diakibatkan oleh kalsit yang terbentuk sehingga mengikat dan memenuhi rongga pasir yang lepas. Sementara itu, untuk metode C, tidak terdapat perubahan nilai berat isi karena tidak terbentuknya proses pengendapan kalsit.

Berat Jenis

Untuk pengujian berat jenis tanah pasir Pantai Anyer, Banten setelah distabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* di dapatkan hasil untuk setiap metode pada Tabel 5.

Tabel 5. Berat jenis tanah pasir setelah distabilisasi

Gs Setelah Stabilisasi (14 hari)			
A	A1	B	C
2,54	2,52	2,52	-

Berat Isi Jenuh (γ_{sat})

Nilai γ_{sat} diperoleh dari korelasi berat isi kering pasir Pantai Anyer yang telah di stabilisasi

dengan masa peram 14 hari berdasarkan J.E Bowles (1997).

Tabel 6. Nilai γ_{sat} Korelasi Berat Isi Kering Pasir Pantai setelah distabilisasi

gsat (kN/m ³) Setelah Stabilisasi (14 hari)			
A	A1	B	C
19.51	19.59	19.45	-

Dari Tabel 6 dapat dilihat terjadi peningkatan γ_{sat} pada pasir Pantai Anyer dengan masa peram 14 hari pada metode A, metode A1, dan metode B hingga lebih dari 2%. Sementara itu, untuk metode C tidak terjadi peningkatan γ_{sat} karena tidak terbentuknya proses pengendapan kalsit.

Hasil Sifat Teknik Tanah

Direct shear (Kuat Geser Langsung)

Nilai sudut geser dalam dan kohesi pasir Pantai Anyer, Banten setelah stabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8.

Tabel 7. Nilai Sudut Geser dalam Pasir setelah distabilisasi

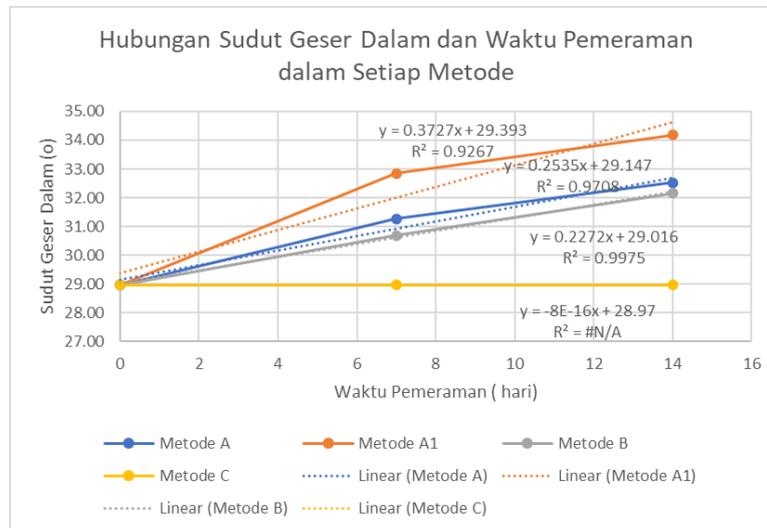
Metode	Nilai Sudut Geser Dalam (°)	Konsistensi
A	31,28	medium
A1	32,85	medium
B	30,70	medium
C	28,97	loose

Tabel 8. Nilai Sudut Geser dalam Pasir setelah distabilisasi

Metode	Nilai Sudut Geser Dalam (°)	Konsistensi
A	32,52	medium
A1	34,19	medium
B	32,15	medium
C	28,97	loose

Dari Tabel 7 dan Tabel 8 dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan nilai sudut geser dalam dari kondisi awal dengan masa peram 7 hari hingga lebih dari 11%, yaitu pada metode A1. Kenaikan nilai sudut geser dalam kondisi awal dengan masa peram 14 hari kenaikan terjadi hingga lebih dari 15%, yaitu pada metode A1. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan

bahwa kondisi tanah yang awalnya berada pada konsistensi lepas, setelah distabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp.*, konsistensi tanahnya akan berubah menjadi *Medium-Dense* dengan peningkatan sudut geser dalam yang cukup signifikan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peningkatan Nilai Sudut Geser Dalam (Φ) Selama Waktu Pemeraman pada Setiap Metode

Kuat Tekan Bebas

Berdasarkan ASTM WK27337, hasil pengujian kuat tekan bebas menggunakan Pocket Penetrometer

pada Pasir Pantai Anyer dengan masa peram 14 hari dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Kuat Tekan Bebas Menggunakan Pocket Penetrometer

Metode	qu (kg/cm ²)
A	2,25
A1	2,15
B	2,40
C	0

Berdasarkan Tabel 9, untuk metode A, metode A1, dan metode B didapat hasil kuat tekan bebas > 2. Sementara itu, untuk metode C tidak didapat nilai kuat tekan bebas k tidak terjadi proses sementasi. Selanjutnya, hasil dari kuat tekan bebas ini akan dikorelasikan ke dalam nilai CBR tanah.

CBR Tanah

Untuk nilai CBR setelah stabilisasi dengan masa peram 14 hari menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. CBR Setelah Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

Metode	UCS (kg/cm ²)	Korelasi CBR %	Keterangan
A	2,25	3,15	
A1	2,15	3,01	Tidak Memenuhi
B	2,40	3,36	syarat <i>subgrade</i> jalan
C	-	-	

Dari Tabel 38 dapat disimpulkan bahwa terjadi kenaikan nilai CBR tanah pasir Pantai anyer setelah distabilisasi pada metode A 40,34%, metode A1 34,10%,

dan metode B 49,70%. Sementara itu, untuk metode C tidak terjadi kenaikan nilai CBR tanah karena tidak terjadi proses pembentukan kalsit. Nilai CBR tanah

yang distabilisasi memang meningkat, tetapi belum memenuhi syarat CBR untuk material tanah timbunan pilihan dengan nilai CBR minimal 10%.

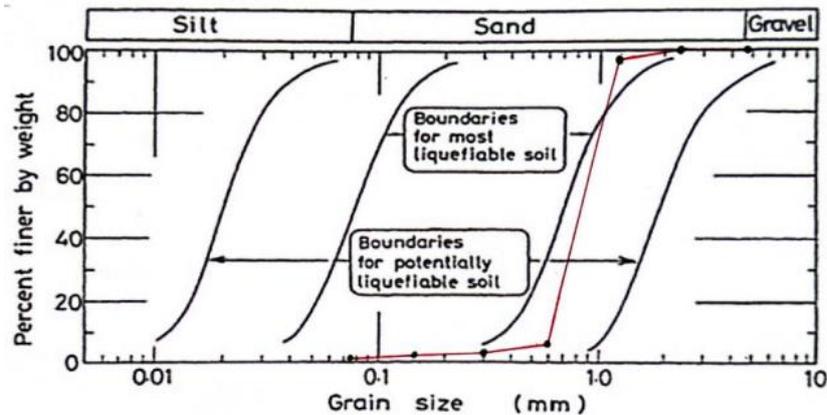
Analisis Potensi Likuefaksi

Kondisi Asli

Analisis Kurva Gradasi Ukuran Butir

Likuefaksi cenderung terjadi pada tanah yang memiliki perubahan volume cukup tinggi yang

ditandai oleh seragam atau tidaknya ukuran butir tanah tersebut. Dari distribusi ukuran butir tanah dapat digambarkan grafik distribusi butir tanah pada sampel yang diplotkan ke dalam grafik distribusi ukuran butir yang berpotensi likuefaksi (Tsuchida, 1970). Dari grafik itu pula dapat diketahui tingkat keseragaman tanah yang mana tanah berbutir seragam lebih rentan terhadap likuefaksi. Distribusi ukuran butir tanah pasir Pantai Anyer, Banten terhadap potensi likuefaksi dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Distribusi Ukuran Butir Tanah Pasir Pantai Anyer, Banten Terhadap Potensi Likuefaksi

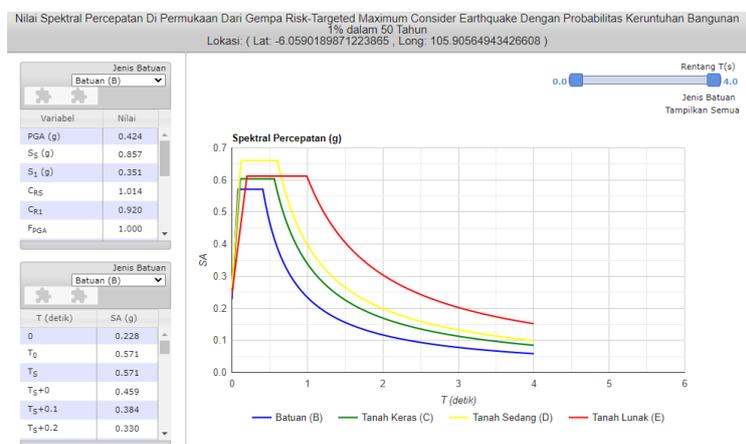
Berdasarkan distribusi ukuran butir tanah pasir Pantai Anyer, Banten terhadap potensi likuefaksi dapat dilihat bahwa ukuran gradasi pasir tersebut berada pada kisaran ukuran 0,075mm – 1,18mm yang pada rentang tersebut ukuran pasir masuk ke dalam zona berpotensi untuk mengalami likuefaksi sehingga perlu dilakukan adanya stabilisasi tanah.

Analisis CSR (cyclic stress ratio)

Cyclic stress ratio (CSR) adalah nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang disebabkan oleh gempa dengan tegangan vertikal

efektif pada likuifaksi) CSR setiap susunan lapisan tanah.

Untuk analisis CSR, sebelum dilakukan stabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp.* ini, diasumsikan bahwa tanah yang diambil di lapangan hanya berkisar 1 meter dari permukaan tanah. Berdasarkan data MAT Pesisir Pantai Anyer, Banten sehingga didapat nilai CSR yang ditinjau per 0,30m. Selanjutnya, dilakukan perhitungan CRR per 0,30 cm dengan nilai PGA (percepatan puncak pada batuan dasar) 0,424g berdasarkan Desain Spektra yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Nilai PGA untuk Pantai Anyer
Sumber: Desain Spektra PUSKIM, 2019

Analisis Potensi Likuefaksi Pasir Pantai Anyer sebagai Subgrade Jalan yang Distabilisasi dengan Bakteri *Sporosarcina Sp* (E. E. F. Simbolon dkk.)

Nilai PGA tersebut diperoleh dengan memasukkan koordinat Pantai Anyer (Lat:-6.0590189871223865, Long:105.90564943426608) yang selanjutnya akan dikalikan dengan FPGA sehingga didapatkan amax (percepatan gempa permukaan). Untuk mendapatkan FPGA maka harus interpolasi berdasarkan kelas Situs. Pada perhitungan ini

digunakan pendekatan nilai N-SPT yang didapat dari Proyek Penggantian Jembatan Kalanggeta dan Jembatan Cipaku karena daerah tersebut masih berdekatan dengan Pantai Anyer yang ditinjau. Untuk nilai N-SPT tersebut dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11. Nilai N-SPT Proyek Penggantian Jembatan Kalanggeta dan Jembatan Cipaku

Kedalaman	Nilai SPT
0.5	1
2	5
4	6
6	2
8	2
10	5
12	43
14	53
16	1
18	1
20	43
22	30
24	60

Dari nilai N-SPT tersebut, hitungan untuk nilai penetrasi rata-rata agar mendapatkan kelas situs tanah dengan rumus sebagai berikut.

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{N_i}} \dots\dots\dots(1)$$

Dengan nilai N-SPT pada kedalaman 0-24m < 15, tanah tersebut masuk dalam kategori kelas Situs Tanah Lunak (SE). Dari kategori tersebut, didapat interpolasi

nilai FPGA sesuai SNI 1726-2019 untuk kelas situs SE dengan PGA 0,424, nilai FPGA nya yaitu 1,352. Dengan demikian, untuk amax dapat dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{amax} &= \text{PGA} \times \text{FPGA} \\ \text{amax} &= 0,424 \times 1,352 = 0,573\text{g} \end{aligned}$$

$$\text{CSR} = 0,65 \times \left(\frac{\text{amax}}{g}\right) \times \frac{\sigma}{\sigma'} \times rd \dots\dots\dots(2)$$

Hasil Perhitungan CSR pada kondisi awal dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Hasil Perhitungan CSR pada Kondisi Awal

Z (m)	γ_{sat} KN/m ³	Σ	u	σV	rd	a max	CSR
0,30	19,02	5,70	2,94	2,76	0,99	0,57	0,76
0,60	19,02	11,41	5,88	5,52	0,99	0,57	0,76
0,90	19,02	17,11	8,82	8,29	0,99	0,57	0,76

Analisis CRR (cyclic resistance ratio)

Nilai *cyclic resistance ratio* (CRR) adalah nilai tahanan lapisan tanah terhadap tegangan siklik. CRR dapat diperoleh lewat pengujian di laboratorium atau melalui hasil pengujian lapangan.

Untuk analisis CRR, nilai N-SPT yang digunakan adalah hasil korelasi dari γ_{sat} pasir Pantai Anyer awal, yaitu 1,51 g/cm³. Dari hasil korelasi didapatkan nilai N-SPT tanah pada kondisi awal adalah 9.

Selanjutnya, dilakukan perhitungan CRR berdasarkan rumus sebagai berikut.

$$(N1)_{60} = N_M \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

(N_i)₆₀ = nilai SPT terkoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%;

- N_M = 9
- C_N = 1,792
- C_E = 1,3
- C_B = 1
- C_R = 0,75
- C_S = 1

$$(N1)_{60} = 15,725$$

Selanjutnya, dilakukan koreksi terhadap Fines Content dengan rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned} (N1)_{60cs} &= \alpha + \beta \cdot (N1)_{60} \\ (N1)_{60cs} &= 0 + 1 \cdot 1,747 \\ (N1)_{60cs} &= 15,725 \end{aligned}$$

Nilai CRR dihitung pada skala gempa (Mw) 7,5 dan pasir murni dengan (N1) 60cs < 37,5 (Idriss dkk. 2004):

$$CRR_{7,5} = \exp \left(\left(\frac{(N1)_{60cs}}{14,1} \right) + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{126} \right)^2 - \left(\frac{(N1)_{60cs}}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right) \dots \dots \dots (4)$$

Contoh Perhitungan CRR7,5 untuk nilai N-SPT 9 kedalaman 0,3m:

$$CRR_{7,5} = \exp \left(\left(\frac{15,725}{14,1} \right) + \left(\frac{15,725}{126} \right)^2 - \left(\frac{15,725}{23,6} \right)^3 + \left(\frac{15,725}{25,4} \right)^4 - 2,8 \right) = 0,162 \dots \dots \dots (5)$$

Hasil perhitungan CRR sebelum stabilisasi pada Pantai Anyer, Banten dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Perhitungan CRR untuk nilai N-SPT 9 Sebelum Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

N-SPT	CN	CE	CB	CR	CS	(N1)60	(N1)60 cs	CRR 7,5
9	1,79	1,30	1,00	0,75	1,00	15,72	15,72	0,16
9	1,75	1,30	1,00	0,75	1,00	15,37	15,37	0,15
9	1,71	1,30	1,00	0,75	1,00	15,04	15,04	0,15

Dari hasil perhitungan CRR diperoleh nilai (N1)_{60cs} < 37,5 yang berarti tanah berpotensi untuk mengalami likuefaksi,

Safety Factor (SF)

Menghitung nilai SF untuk menentukan pada lokasi tersebut terjadi atau tidaknya potensi likuefaksi dapat menggunakan nilai CRR dan CSR. Berikut

merupakan perhitungan SF sebelum dilakukan stabilisasi tanah

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \dots \dots \dots (6)$$

Hasil perhitungan *safety factor* pada daerah Pantai Anyer, Banten dapat dilihat pada Tabel 14.

Tabel 14. Hasil Perhitungan SF untuk Kondisi Pasir Pantai Anyer Awal dengan rentang kedalaman 0,3-0,9 m

N-SPT	Z(m)	CRR 7,5	CSR	SF	Keterangan (SF>1,1)
9	0,30	0,16	0,76	0,21	
9	0,60	0,15	0,76	0,21	Tidak Memenuhi
9	0,90	0,15	0,76	0,20	

Keterangan:

SF > 1 = Tanah tidak berpotensi likuefaksi

SF = 1 = Tanah kritis

SF < 1 = Tanah berpotensi likuefaksi

Berdasarkan perhitungan *safety factor*, rata-rata menunjukkan nilai SF<1 yang berarti tanah pada kedalaman tersebut sangat berpotensi untuk mengalami likuefaksi sehingga tanah pasir Pantai Anyer, Banten perlu untuk dilakukan stabilisasi tanah.

Kondisi Setelah Stabilisasi

Analisis CSR

Analisis CSR setelah dilakukan stabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp.* ini, diasumsikan bahwa tanah yang distabilisasi di lapangan hanya berkisar 1meter dari permukaan tanah dengan 4 metode. Berdasarkan data MAT Pesisir Pantai Anyer, Banten maka didapat nilai CSR yang ditinjau per 0,30 m pada Tabel 15.

Tabel 15. Perhitungan CSR Setelah Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

PERHITUNGAN LIKUEFAKSI								
METODE	Z (m)	γ_{sat} KN/m ³	σ	u	σ_v	rd	a max	CSR
A	0,30	19,51	5,85	2,943	2,91	0,997705	0,573	0,748
	0,60	19,51	11,70	5,886	5,82	0,99541	0,573	0,746
	0,90	19,51	17,56	8,829	8,73	0,993115	0,573	0,744
A1	0,30	19,59	5,88	2,943	2,93	0,997705	0,573	0,745
	0,60	19,59	11,76	5,886	5,87	0,99541	0,573	0,743
	0,90	19,59	17,63	8,829	8,80	0,993115	0,573	0,741
B	0,30	19,45	5,84	2,943	2,89	0,997705	0,573	0,750
	0,60	19,45	11,67	5,886	5,78	0,99541	0,573	0,748
	0,90	19,45	17,51	8,829	8,68	0,993115	0,573	0,747
C	-	-	-	-	-	-	-	-

Analisis CRR

Dalam analisis CRR Pasir Pantai Anyer setelah dilakukan stabilisasi, diperlukan data N-SPT. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan korelasi dari nilai berat isi tanah setelah stabilisasi dengan nilai N-

SPT tanah berdasarkan Tabel J.E Bowles (1997) untuk tanah nonkohesif sehingga didapat perkiraan nilai N-SPT untuk setiap metode yang dapat dilihat pada Tabel 16.

Tabel 16 Nilai N-SPT Pasir Pantai Anyer yang Distabilisasi

Metode	γ (kN/m ³)	N-SPT
A	16,29	22
A1	16,51	23
B	16,27	22
C	-	-

Nilai korelasi N-SPT yang didapat selanjutnya digunakan untuk perhitungan CRR yang ditunjukkan pada Tabel 17.

Tabel 17. Perhitungan CRR Setelah Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

Metode	N-SPT	CN	CE	CB	CR	CS	(N1)60	(N1)60 cs	CRR 7,5
A	22	1,790	1,3	1	0,75	1	38,151	38,151	2,369
	22	1,749	1,3	1	0,75	1	37,269	37,269	1,873
	22	1,709	1,3	1	0,75	1	36,427	36,427	1,522
A1	23	1,790	1,3	1	0,75	1	40,020	40,020	4,160
	23	1,748	1,3	1	0,75	1	39,087	39,087	3,105
	23	1,708	1,3	1	0,75	1	38,196	38,196	2,399
B	22	1,790	1,3	1	0,75	1	38,049	38,049	2,303
	22	1,749	1,3	1	0,75	1	37,174	37,174	1,828
	22	1,710	1,3	1	0,75	1	36,338	36,338	1,490
C	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1. Safety Factor (SF)

Untuk hasil perhitungan SF setelah stabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* pada setiap

metode dapat dilihat pada Tabel 18,

Tabel 18. Hasil Perhitungan SF Setelah Stabilisasi menggunakan *Sporosarcina Sp*

Metode	N-SPT	Z(m)	CRR 7,5	CSR	SF	Keterangan (SF>1,1)
A	22	0,3	2,369	0,7479	3,2	Memenuhi
	22	0,6	1,873	0,7461	2,5	Memenuhi
	22	0,9	1,522	0,7444	2,0	Memenuhi
A1	23	0,3	4,160	0,7445	5,6	Memenuhi
	23	0,6	3,105	0,7428	4,2	Memenuhi
	23	0,9	2,399	0,7411	3,2	Memenuhi
B	22	0,3	2,303	0,7500	3,1	Memenuhi
	22	0,6	1,828	0,7483	2,4	Memenuhi
	22	0,9	1,490	0,7466	2,0	Memenuhi
C	-	-	-	-	-	Tidak Memenuhi

Berdasarkan Tabel 18, dapat dilihat setelah distabilisasi nilai SF berkisar antara 2-5,6 untuk metode A, metode A1, dan metode B yang artinya tanah tersebut sudah tidak rentan mengalami likuefaksi.

PEMBAHASAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, didapatkan peningkatan nilai CBR tanah yang semula berkisar di 2,25% menjadi 3,156% untuk metode A, 3,016% untuk metode A1, dan 3,367% untuk metode B. Sementara itu, untuk metode C tidak terjadi

pengendapan kalsit sehingga tidak terdapat peningkatan nilai CBR tanah. Selain itu, dalam mereduksi potensi likuefaksi, didapatkan nilai Safety Factor yang semula berkisar 0,20-0,21 sehingga tanah tersebut berpotensi likuefaksi karena SF<1. Setelah stabilisasi didapat nilai SF dengan kisaran 2-5,6 pada metode A, metode A1, dan metode B dan nilai tersebut sangat jauh meningkat dan juga dapat mereduksi potensi likuefaksi. Untuk metode C tidak terjadi pengendapan kalsit sehingga tidak terdapat peningkatan nilai CBR tanah maupun Safety Factor

pada perhitungan likuefaksi. Dalam hal ini dapat terlihat bahwa stabilisasi tanah dengan Metode *Bio-Grouting* menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp.* efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi potensi likuefaksi pada pasir Pantai Anyer.

Waktu pemeraman yang paling efektif adalah 14 hari, yaitu pada metode A, metode A1, dan metode B karena sampel yang dihasilkan sudah mengeras dan sesuai untuk selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan bebas. Untuk sampel dengan waktu pemeraman 7 hari, sampel belum sepenuhnya tersementasi, yaitu pada metode A, metode A1, dan metode B sehingga masih agak lepas. Untuk metode C tidak terjadi adanya perubahan tanah (tidak terjadi proses pengendapan kalsit) sehingga sampel tidak dapat diuji lebih lanjut.

Metode A, metode A1, dan metode B belum optimal untuk digunakan dalam perencanaan *Subgrade* jalan karena nilai CBR tanah belum memenuhi syarat untuk perencanaan *subgrade*, yaitu <6% juga tidak memenuhi syarat sebagai *subgrade*. Namun, jika dibandingkan dengan nilai CBR sebelum dilakukan stabilisasi menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* maka sudah terjadi peningkatan dari nilai CBR tanah.

Selain itu, karena *Sporosarcina sp.* termasuk ke dalam bakteri nonpatogenik, dan menurut (Montana State University, 2024) berdasarkan tingkat *biosafety level*, bakteri ini masuk ke dalam kategori *Risk Group 1*, yang berarti risiko infeksi sangat rendah sehingga jika digunakan dalam stabilisasi tanah masih aman untuk kesehatan dan lingkungan dengan catatan tetap berlakukan SOP seperti penggunaan APD lengkap dan menjaga kebersihan selama proses stabilisasi menggunakan bakteri.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Stabilisasi pasir Pantai Anyer menggunakan bakteri *Sporosarcina Sp* menunjukkan adanya peningkatan nilai SF yang sebelumnya berkisar 0,20-0,21 setelah stabilisasi didapat nilai SF dengan kisaran 2-5,6 pada metode A, metode A1, dan metode B. Nilai tersebut sangat jauh meningkat dan dapat mereduksi potensi likuefaksi pada pasir pantai anyer sebagai *subgrade* jalan dengan rentang kedalaman 0-1m.

Kuat tekan bebas (q_u) untuk metode A = 221 kPa, A1 = 211 kPa, dan B = 235 kPa. Sementara itu, untuk metode C (suntik, hanya nutrisi) tidak membentuk tanah tersementasi karena kuat dugaan bahwa bakteri loncat ke dalam kalsit sehingga kuat tekan bebasnya tidak dapat diukur.

Sampel dengan metode A, metode A1, metode B dengan masa peram 7 hari belum siap untuk dilakukan pengujian lebih lanjut karena kondisi pasir

masih lepas dan basah. Sampel dengan masa peram 14 hari lebih baik dan siap untuk diuji walaupun belum semua bagian sampel tersementasi dengan baik jika dibandingkan dengan sampel masa peram 7 hari.

Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait analisis potensi likuefaksi di bawah kedalaman perencanaan *subgrade* karena likuefaksi tidak hanya terjadi pada lapisan tanah atas, tetapi bisa juga terjadi pada lapisan tanah yang lebih dalam. Untuk pengaplikasian metode *biogrouting* di lapangan pada kedalaman lebih dari perencanaan *subgrade*, penelitian bisa menggunakan alat *jet grouting* yang selanjutnya dapat langsung ditancapkan *Perforated PVC* sebagai jalur masuknya oksigen dalam proses pemeraman. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan uji aktivitas urease agar kemampuan bakteri *Sporosarcina Sp.* dalam mengendapkan kalsium karbonat dapat diketahui secara pasti.

Selain itu, perlu dilakukan analisis dan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan bakteri *Sporosarcina Sp.* terhadap dampak lingkungan dan Kesehatan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dalam penelitian penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles J.S. 1991. Sifat-Sifat Fisis Dan Geoteknik Tanah (Mekanika Tanah). Kedua. Jakarta: Erlangga.
- Day, and Robert W. 2001. *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Direktorat Bina Teknik Jalan dan Jembatan DITJEN Bina Marga Kementerian PUPR. n.d. 2019. "Desain Spektra Indonesia."
- Djauhari, Noor. 2009. *Pengantar Geologi*. Edited by Teknik Geologi. Bogor : Fakultas Teknik, Universitas Pakuan.
- Harnaeni, Senja Rum. 2007. "Review of Cbr Value of Stabilized-Clay Using Limestone" 7:163–69.
- Idriss, M, and Ross W Boulanger. 2004. Soil-Liquefaction-During-Earthquakes-M.-Idriss-and-Ross-W.-Boulanger.
- Jawad, Ibtahaj Taha, Mohd Raihan Taha, Zaid Hameed Majeed, and Tanveer A. Khan. 2014. "Soil Stabilization Using Lime: Advantages, Disadvantages and Proposing a Potential Alternative." *Research Journal of Applied Sciences*,

- Engineering and Technology* 8 (4): 510–20.
<https://doi.org/10.19026/rjaset.8.1000>.
- Seed, H. B, and I.M Idriss. 1971. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential." *Journal of the Spil Mechanics and Foundations Divisions, ASCE* 97 (September):1249–73.
- Suherman. 1999. "Peningkatan Daya Dukung Tanah Dasar Dengan Teknik Pemadatan Dinamis." *Jurnal Jalan Jembatan* 16:61–70.
- Whiffin, Victoria S., Leon A. van Paassen, and Marien P. Harkes. 2007. "Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique." *Geomicrobiology Journal* 24 (5): 417–23.
<https://doi.org/10.1080/01490450701436505>.
- Youd, T.L, and I.M Idriss. 2001. "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Naveed, M., Duan, J., Uddin, S., Suleman, M., Hui, Y., & Li, H. (2020). Application of microbially induced calcium carbonate precipitation with urea hydrolysis to improve the mechanical properties of soil. *Ecological Engineering*.
- Lim, Aswin, Dary Aulia Muhammad, and Anastasia Sri Lestari. "Studi Eksperimental Kemampuan Biosementasi Bakteri Lokal Pada Tanah Pasir Lepas." *Jurnal Teknik Sipil* 26, no. 2 (August 1, 2019): 129–38.
<https://doi.org/10.5614/jts.2019.26.2.5>.