

EVALUASI RISIKO LIKUIFAKSI DENGAN PENDEKATAN DETERMINISTIK DAN PROBABILISTIK TERHADAP PENILAIAN FAKTOR KEAMANAN

Sumiyati Gunawan^{1*} dan Vienti Hadsari¹

^{1*}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Jl. Babarsari 44, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta
e-mail: sumiyati.gunawan@uajy.ac.id

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta,
Jl. Babarsari 44, Caturtunggal, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta
e-mail: vienti.hadsari@uajy.ac.id

ABSTRAK

Likuifaksi merupakan salah satu permasalahan penting dalam rekayasa geoteknik, khususnya di wilayah rawan gempa dengan kondisi tanah pasir lepas dan muka air tanah tinggi. Penilaian potensi likuifaksi secara akurat sangat penting untuk menjamin kestabilan dan keselamatan infrastruktur. Metode deterministik banyak digunakan untuk mengevaluasi faktor keamanan (SF) terhadap likuifaksi berdasarkan korelasi empiris dan parameter input tetap. Pendekatan ini sering kali tidak mampu merepresentasikan variabilitas dan ketidakpastian alami pada kondisi bawah permukaan dan beban gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi risiko likuifaksi dengan menggunakan pendekatan deterministik dan probabilistik dalam penilaian faktor keamanan. Studi kasus pada lokasi Babarsari Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, dengan data 16 titik pengeboran, dianalisis menggunakan prosedur standar deterministik, kemudian dilanjutkan dengan analisis probabilistik yang mempertimbangkan ketidakpastian parameter dengan pendekatan Lind_Hasofer. Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara kedua pendekatan dalam nilai faktor keamanan serta interpretasi tingkat kegagalan. Hasil analisa $SF_{\text{deterministik}} \approx 1$, menghasilkan nilai ketahanan, $R_o \approx 60\%$ dan nilai kegagalan, $P_f \approx 40\%$, ini menegaskan bahwa pendekatan deterministik memberikan estimasi yang sederhana dan konservatif, sedangkan pendekatan probabilistik menawarkan penilaian yang lebih komprehensif dan berbasis risiko. Perbandingan ini menunjukkan pentingnya integrasi metode probabilistik dalam praktik geoteknik, terutama untuk proyek-proyek yang berada di daerah dengan tingkat bahaya seismik tinggi. Rekomendasi diberikan untuk pemilihan pendekatan yang tepat berdasarkan skala proyek, ketersediaan data, dan tingkat risiko yang dapat diterima.

Kata kunci: likuifaksi, faktor-keamanan, probabilitas kegagalan, reliabilitas

1. PENDAHULUAN

Gempa bumi merupakan bencana alam yang dapat memicu berbagai dampak ikutan, salah satunya adalah likuifaksi pada tanah jenuh. Di Indonesia, fenomena ini sering terjadi di wilayah dataran aluvial dengan muka air tanah dangkal. Salah satu wilayah dengan potensi tinggi terhadap likuifaksi adalah Kabupaten Sleman, Yogyakarta, yang memiliki sebaran tanah pasir jenuh dengan kandungan butir halus bervariasi.

Fenomena likuifaksi sering menjadi penyebab utama kerusakan pada infrastruktur pasca gempa, khususnya di daerah dengan tanah pasir lepas jenuh air. Evaluasi risiko likuifaksi secara tepat sangat penting untuk perencanaan konstruksi yang aman. Pendekatan deterministik umumnya menggunakan nilai faktor keamanan (FS) sebagai indikator, namun, pendekatan ini memiliki keterbatasan karena tidak mempertimbangkan variasi alami sifat tanah maupun ketidakpastian parameter input. Pendekatan probabilistik mempertimbangkan ketidakpastian parameter tanah dan beban gempa melalui probabilitas kegagalan (P_f) dan reliabilitas (R_o), oleh karena itu, pendekatan probabilistik mulai banyak digunakan untuk memberikan gambaran risiko yang lebih komprehensif.

Kajian dilakukan menggunakan 16 titik data uji SPT serta parameter empiris yang dikoreksi terhadap kondisi lokal. Penelitian ini bertujuan untuk: 1) Menganalisis hubungan antara FS deterministik dengan P_f dan R_o ; 2) Menentukan model hubungan matematis antara FS dan parameter probabilistik; 3) Memberikan rekomendasi untuk manajemen risiko likuifaksi di lapangan. Penelitian ini berkontribusi pada *risk-based design* dan *performance-based design* pada *engineering construction* karena metode probabilistik yang digunakan memperhitungkan variabilitas tanah dan gempa di lapangan, yang tidak diperhitungkan oleh metode deterministik, yang pada umumnya dipakai untuk penilaian likuifaksi. Selain itu, penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai probabilitas terjadinya likuifaksi, meskipun pada SF aman terhadap likuifaksi ($SF \geq 1$) yang didapatkan melalui metode deterministik

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kandungan butir halus dalam pasir dapat meningkatkan ketahanan tanah terhadap likuifaksi dibandingkan pasir bersih pada nilai NSPT yang sama. ketahanan likuifaksi, cyclic resistance, akan meningkat seiring bertambahnya nilai $(N_1)_{60CS}$, yang dipengaruhi oleh kandungan butir halus dan kepadatan tanah (Sumiyati G et al., 2025) dan (Sumiyati, G & Hadsari, 2024).

Metode deterministik tradisional menghitung faktor keamanan (FS) = CRR/CSR, dengan CRR didapat dari korelasi $(N_1)_{60CS}$ terhadap CSR pada M7.5. Pembaruan signifikan meliputi database kasus lapangan yang lebih luas serta revisi komponen koreksi (CN, K_σ , rd) oleh (Idriss & Boulanger, 2004).

Probabilitas kegagalan lebih dari 0.4, terjadi peningkatan probabilitas *cyclic stress* yang signifikan hingga mendekati 0.5 pada probabilitas kegagalan ± 0.7 dan menunjukkan hampir semua nilai safety factor deterministik ± 1 atau bahkan lebih rendah. (Sumiyati & Hadsari, 2025).

(Cetin et al., 2004), menyajikan kurva *triggering* berbasis SPT dengan formulasi deterministik dan probabilistik. Studi lanjutan menunjukkan pembaruan kurva terhadap database yang disempurnakan, dengan pergeseran kecil pada CSR untuk $N_{1,60,cs} > \sim 15$. Hal ini menegaskan sensitivitas hasil terhadap kurasi database kasus lapangan.

(Moss et al., 2006), (Idriss IM, 2014), mengembangkan model CPT probabilistik dengan pendekatan Bayesian dan pembaruan data, menyediakan peta kontur peluang *triggering* untuk rentang q_{clNcs} tertentu. Prosedur CPT probabilistik/deterministik ini kini menjadi rujukan untuk *forward analysis* desain

(Juang et al., 1999), merumuskan metode berbasis reliabilitas untuk pemetaan $FS \leftrightarrow Pf/\beta$ dan pengembangan limit state berbasis data lapangan. Teknik komputasi meliputi MCS (Monte Carlo) dan FORM/SORM untuk efisiensi. dan menangkap ketidakpastian parameter tanah dan beban, banyak studi memformulasikan fungsi kinerja berbasis CSR & CRR, lalu menghitung probabilitas kegagalan (Pf), indeks reliabilitas (β), dan reliability $Ro = 1 - Pf$.

3. METODOLOGI

Data dan lokasi studi

Data yang digunakan berasal dari pengujian lapangan 16 titik borlog *Standard Penetration Test* (SPT) di wilayah Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia. Kandungan butir halus bervariasi 5%, 15%, 20%, 35%, 45% dan 5 variasi kekuatan gempa yaitu: 5 SR, 6.8 SR, 7.2 SR, 7.5 SR dan 8 SR. Menggunakan data lapangan dan laboratorium untuk analisis, berikut dijelaskan metodologi dalam penelitian ini:

3.1 Pendekatan deterministik

Nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dihitung berdasarkan korelasi empiris, sedangkan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) diperoleh dari parameter percepatan gempa rencana Faktor keamanan (FS) dihitung menggunakan persamaan: $FS = CRR / CSR$. Kriteria deterministik mengklasifikasikan tanah berpotensi likuifaksi jika $FS < 1$, dan aman jika $FS \geq 1$.

Metode evaluasi potensi likuifaksi yang diusulkan oleh (Seed HB, 1979) dan prosedurnya disempurnakan oleh (Seed HB, 1979) sebagai berikut:

a. Menghitung CSR

Peak ground acceleration (a_{max}) pada suatu lokasi, G gravity, σ_v total stress, σ'_v efektif stress, p_a *atmosfir stress* = 100kPa, MSF *magnitude factor*, N_m *N_{SPT} value in the field*, C_E *energy factor* ($\sim 0,6$), C_B *borehole factor* ($\sim 1,0$), C_s *sampler factor* ($\sim 1,1$), C_R *length correction factor* terlihat pada Tabel 1, menentukan *Cyclic stress ratio* (CSR) seperti dijelaskan pada Persamaan 1 di bawah,

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_o} \cdot \frac{1}{MSF} \cdot \frac{1}{K_\sigma} = \frac{0.65 \cdot \frac{a_{maks}}{g} \cdot \sigma_v \cdot r_d}{\sigma'_o} \cdot \frac{1}{MSF} \cdot \frac{1}{K_\sigma} \quad (1)$$

b. Menghitung CRR

Cyclic Resistance Ratio (CRR), menganalisis kandungan fraksi halus (FC), koreksi $(N_1)_{60}$ menjadi nilai resistansi penetrasi standar pasir bersih $(N_1)_{60CS}$. (Idriss IM, 2014) menentukan CRR untuk tanah berpasir dengan fraksi halus seperti persamaan 2 sampai dengan Persamaan 4 berikut:

$$CRR = \exp \left\{ \frac{(N_1)_{60CS}}{14,1} + \left[\frac{(N_1)_{60CS}}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60CS}}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60CS}}{25,4} \right]^4 - 2,8 \right\} \quad (2)$$

$$(N_1)_{60CS} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \quad (3)$$

$$\text{fine correction factor } \Delta(N_1)_{60} = \exp \left\{ 1.63 + \frac{9.7}{FC+0.1} + \left[\frac{15.7}{FC+0.1} \right]^2 \right\} \quad (4)$$

c. *Safety Factor* (SF)

Angka aman adalah perbandingan ketahanan tanah terhadap likuifaksi dan tegangan tanah akibat likuifaksi, bervariasi terhadap kedalaman, sehingga potensi likuifaksi dievaluasi pada segmen kedalaman tertentu dari profil tanah, seperti Persamaan 5 di bawah ini,

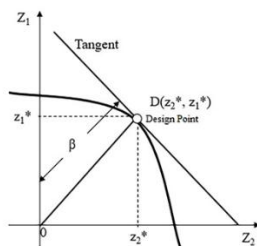
$$\text{Safety factor} \rightarrow SF = \frac{CRR}{CSR} \geq 1 \quad (5)$$

3.2 Pendekatan probabilistik

Evaluasi probabilitas kegagalan sistem pada likuifaksi, yang disebabkan oleh kompleksitas dan heterogenitas tanah serta sifat probabilistik gempa bumi, tidak dapat diselesaikan hanya dengan pendekatan deterministik. Analisis probabilistik, seperti metode indeks reliabilitas Hasofer–Lind, menjadi sangat relevan untuk mengatasi permasalahan tersebut.

a. Indeks Reliabilitas Hasofer–Lind (βHL)

Indeks Hasofer–Lind mendefinisikan jarak terpendek / titik desain / *Most Probable Point* (MPP) dari titik asal menuju permukaan *limit state* dalam ruang variabel acak yang telah ditransformasikan ke dalam variabel normal standar independen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Indeks Reliabilitas Hasofer–Lind

Formulasi dasarnya disampaikan oleh (Cornell, 1967), Suatu struktur dengan kapasitas tahanan R yang menerima beban Q membentuk permukaan kegagalan sebagaimana dijelaskan pada Persamaan (6):

$$M = g(R, Q) = R - Q \quad (6)$$

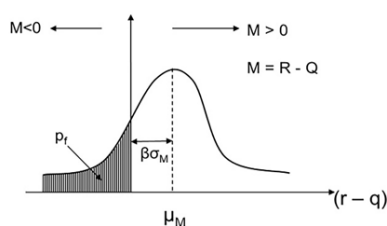
Bentuk variabel tereduksi dapat dituliskan pada Persamaan (7) berikut:

$$g(R, Q) = (\mu_R + ZR \cdot \sigma_R) - (\mu_Q + ZQ \cdot \sigma_Q) = (\mu_R - \mu_Q) + ZR \cdot \sigma_R - ZQ \cdot \sigma_Q \quad (7)$$

Dengan demikian, persamaan bidang runtuh: $M = R - Q = 0$ mendefinisikan indeks reliabilitas β , sebagaimana pada Persamaan (8), dengan μ_M dan σ_M masing-masing menyatakan nilai rata-rata dan simpangan baku dari M .

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (8)$$

Konsep indeks reliabilitas untuk kasus fundamental (R, Q) mengasumsikan variabel acak berdistribusi normal. Kondisi aman ditentukan oleh $M > 0$, sedangkan kegagalan ditentukan oleh $M < 0$. Indeks reliabilitas merupakan jarak terdekat menuju $M = 0$. Persamaan Cornell, $\mu_M = \beta \sigma_M$, juga ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Indeks Reliabilitas: R dan Q Normal

Apabila R dan Q berdistribusi normal serta saling independen, maka dengan menggunakan Persamaan (9) dan (10) dapat diperoleh hasil perhitungan yang relevan.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2}} \quad (9)$$

$$\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_Q^2} = \sigma_M \quad (10)$$

b. Prosedur Persamaan Simultan

Tahapan untuk menentukan indeks reliabilitas Lind-Hasofer, dijelaskan sebagai berikut:

Formulasikan fungsi batas keamanan beserta parameter yang sesuai untuk variabel acak yang terlibat, misalnya percepatan puncak tanah (a_{max}/g) di suatu lokasi sebagai x_1 ; tegangan total σ_v sebagai x_2 ; faktor kedalaman r_d sebagai x_3 ; tegangan efektif σ'_v sebagai x_4 ; faktor magnitudo MSF sebagai x_5 ; faktor tegangan atmosfer k_s sebagai x_6 ; dan nilai tahanan standar penetrasi pasir bersih (N1)60CS sebagai x_7 . Dengan demikian, Persamaan (11) dan (12) dapat dituliskan kembali menjadi Persamaan (13):

$$G(x) = CRR - CSR \quad (11)$$

$$g() = \exp\left\{\left[\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1}\right] + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right]^2 - \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} - \frac{0.65 \frac{a_{max}}{g} \sigma_v r_d}{\sigma'_o} \frac{1}{MSF} \frac{1}{k_s} \quad (12)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_7) = \exp\left\{\frac{x_7}{14.1} + \left[\frac{x_7}{126}\right]^2 - \left[\frac{x_7}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{x_7}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} - \frac{0.65 x_1 x_2 x_3}{x_4} \frac{1}{x_5} \frac{1}{x_6} \quad (13)$$

Fungsi batas dalam bentuk variabel tereduksi Z_i , sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (14), berfungsi menjelaskan secara jelas hubungan antara variabel asli dan variabel terstandar dalam kerangka analisis reliabilitas.

$$Z_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (14)$$

Dengan menyetarakan Persamaan (12) menjadi nol, dan mengganti dengan Persamaan (14), diperoleh indeks reliabilitas Lind-Hasofer sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (15), berikut ini,

$$\beta = \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\mu_2) - \mu_6 \sigma_4 \left[\exp\left\{\frac{x_7}{14.1} + \left[\frac{x_7}{126}\right]^2 - \left[\frac{x_7}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{x_7}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} \right]}{\left[\exp\left\{\frac{x_7}{14.1} + \left[\frac{x_7}{126}\right]^2 - \left[\frac{x_7}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{x_7}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} \right] \left(\sigma_6 \alpha_6 \sigma_4 \beta \alpha_4 + \sigma_6 \alpha_6 \mu_4 + \sigma_4 \mu_6 - \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\sigma_2 \alpha_2)}{\left[\exp\left\{\frac{x_7}{14.1} + \left[\frac{x_7}{126}\right]^2 - \left[\frac{x_7}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{x_7}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} \right]} \right)} \quad (15)$$

Substitusi ini memungkinkan reformulasi masalah dalam bentuk standar. Selanjutnya, persamaan batas diekspresikan dalam bentuk β dan α_i , yang mendefinisikan permukaan kondisi batas dalam ruang transformasi. Kemudian diperoleh fungsi $g(x)$, yang merupakan fungsi kinerja untuk penilaian reliabilitas. Proses ini menghasilkan Persamaan (16) hingga (19), di bawah ini:

$$g() = \left[\exp\left\{\frac{x_7}{14.1} + \left[\frac{x_7}{126}\right]^2 - \left[\frac{x_7}{23.6}\right]^3 + \left[\frac{x_7}{25.4}\right]^4 - 2.8\right\} \right] - \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\sigma_2 \beta \alpha_2 + \mu_2)}{(\sigma_6 Z_6 + \mu_6)(\sigma_4 Z_4 + \mu_4)} \quad (16)$$

$$\frac{\delta g}{\delta Z_2} = - \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\sigma_2)}{(\sigma_6 Z_6 + \mu_6)(\sigma_4 Z_4 + \mu_4)} \quad (17)$$

$$\frac{\delta g}{\delta Z_4} = \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\sigma_2 Z_2 + \mu_2)}{(\sigma_6 Z_6 + \mu_6)(\sigma_4 Z_4 + \mu_4)^2} \quad (18)$$

$$\frac{\delta g}{\delta Z_6} = \frac{\frac{0.65 x_1 \cdot x_3}{x_5} (\sigma_2 Z_2 + \mu_2)}{(\sigma_4 Z_4 + \mu_4)(\sigma_6 Z_6 + \mu_6)^2} \quad (19)$$

Persamaan-persamaan tersebut memungkinkan kita mengekspresikan α_i sebagai fungsi dari seluruh nilai α_i dan β , sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (20) hingga (22), berikut:

$$\alpha_2 = \frac{\left[\frac{\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2)}{(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)} \right]}{\sqrt{\left(\left(\frac{\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2)}{(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4) 2(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6) 2} \right)^2 \right)}} \quad (20)$$

$$\alpha_4 = \frac{\left[\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4) 2(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)} \right]}{\sqrt{\left(\left(\frac{\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2)}{(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4) 2(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6) 2} \right)^2 \right)}} \quad (21)$$

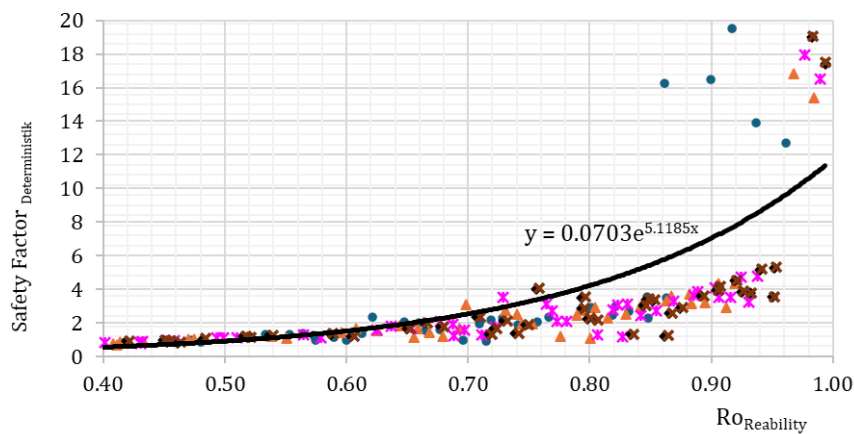
$$\alpha_6 = \frac{\left[\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6) 2} \right]}{\sqrt{\left(\left(\frac{\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2)}{(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4) 2(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6)} \right)^2 + \left(\frac{\left[\frac{0.65 X_1 \cdot X_3}{X_5} (\sigma_2 \beta_{\alpha_2} + \mu_2) \right]}{(\sigma_4 \beta_{\alpha_4} + \mu_4)(\sigma_6 \beta_{\alpha_6} + \mu_6) 2} \right)^2 \right)}} \quad (22)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1. Memperllihatkan hasil hubungan antara *Safety Factor* deterministik dan ketahanan / Reabilitas R_o yang memiliki korelasi positif exponential, $y = 0.0703 e^{5.1185x}$, y adalah nilai *Safety Factor* deterministik dan x adalah nilai Ketahanan / Reabilitas R_o .

Pada $SF_{\text{deterministik}} \approx 1$, terlihat bahwa ketahanan, $R_o \approx 0.6$. Hal ini memperlihatkan keterbatasan metode deterministik, terutama di zona ambang ($FS \approx 1$) yang hanya memiliki ketahanan yang cukup rendah sekitar 60%.

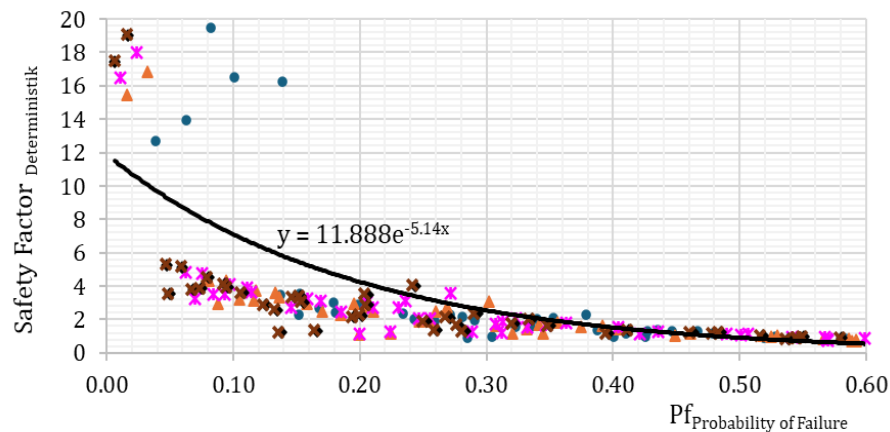
Pada $SF_{\text{deterministik}} \approx 2$, terlihat bahwa ketahanan, $R_o \approx 0.8$. Hal ini memperlihatkan keterbatasan metode deterministik, terutama di zona ambang ($FS \approx 2$) memiliki ketahanan sekitar 80%.



Gambar 1. Hubungan FS deterministik dan Reliabilitas (R_o)

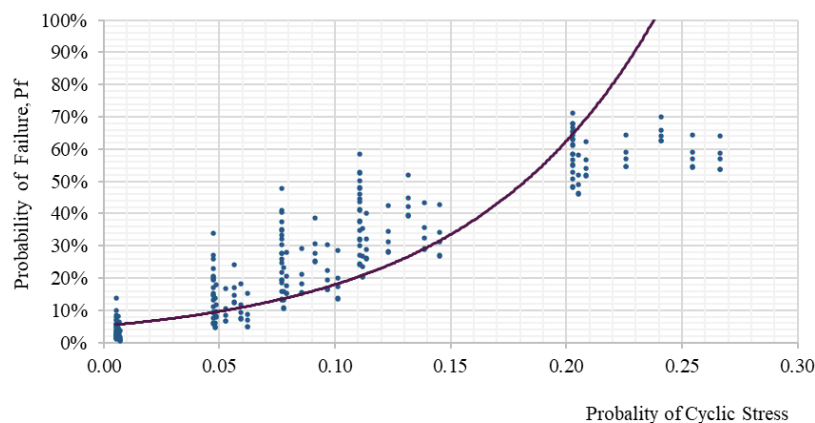
Hal di atas selaras dengan hasil yang tersaji pada Gambar 2. FS memiliki korelasi negatif eksponensial terhadap Pf, yaitu $y=11.888e^{-5.14x}$; y adalah nilai *Safety Factor* deterministik dan x adalah nilai Kegagalan Pf. Menunjukkan bahwa meskipun analisis deterministik mengklasifikasikan tanah aman ($FS \geq 1$), pendekatan probabilistik justru mengungkap adanya peluang kegagalan yang signifikan yaitu $Pf \approx 0.4$.

Hasil ini memperlihatkan konsistensi antara pendekatan deterministik dan probabilistik: ketika pendekatan probabilistik menunjukkan peluang kegagalan besar, maka pendekatan deterministik memberikan nilai faktor keamanan rendah, sehingga keduanya saling melengkapi dalam memberikan gambaran risiko.



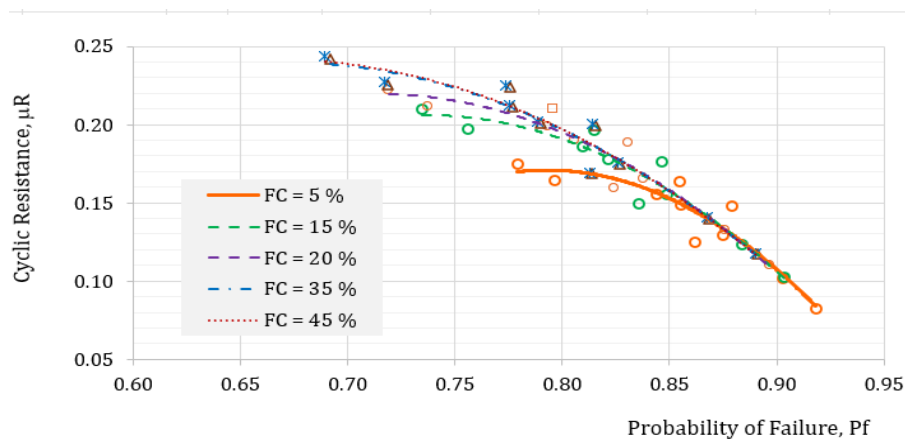
Gambar 2. Hubungan FS deterministik dan *Probability of Failure* (Pf)

Gambar 3. menunjukkan hubungan eksponensial positif antara *Probability Cyclic Stress* dan *Probability of Failure* (Pf). Pada nilai *cyclic stress* kurang dari 0.05, probabilitas kegagalan <10%, namun seiring peningkatan *cyclic stress* hingga lebih besar dari 0.165, Pf melonjak signifikan mencapai lebih dari 40%, yang tercatat pada Gambar 2 merupakan ambang batas dari *Safety factor* deterministik, $SF \approx 1$. Hal ini menegaskan bahwa *cyclic stress* (CSR) merupakan parameter pengendali utama dalam memicu likuifaksi, sehingga kenaikan beban gempa secara langsung meningkatkan risiko kegagalan.



Gambar 3. Hubungan *Probability Cyclic Stress* dan *Probability of Failure* (Pf)

Gambar 4. menunjukkan variasi *cyclic resistance* pada berbagai kandungan butir halus (5%–45%). Tanah dengan FC rendah (5%) mengalami penurunan *cyclic resistance* tajam pada $Pf > 0,8$, menandakan rentan terhadap likuifaksi. Sebaliknya, FC lebih tinggi (15%–45%) menghasilkan kurva *cyclic resistance* yang lebih stabil, dengan nilai lebih besar pada rentang Pf yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa butir halus berperan penting dalam memperkuat struktur tanah dan meningkatkan ketahanan terhadap likuifaksi. Temuan ini sejalan dengan studi Sumiyati & Hadsari (2024, 2025) yang menyatakan bahwa fraksi butir halus meningkatkan *cyclic resistance*, namun terbatas pada maksimal FC $\approx 35\%$. Namun, meskipun FC tinggi memberikan *cyclic resistance* yang lebih baik pada Pf rendah sampai dengan menengah, seluruh kurva menunjukkan kecenderungan konvergen pada Pf tinggi lebih dari 0.85. Hal ini mengindikasikan bahwa ketika probabilitas kegagalan sangat besar, pengaruh fine content menjadi semakin kecil, dan tanah pada akhirnya tetap rentan terhadap likuifaksi.



Gambar 4. Hubungan Kandungan Butir Halus (FC) terhadap *Cyclic Resistance* dan *Probability of Failure* (Pf)

Temuan ini konsisten dengan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan adanya efek ambang (*threshold effect*) dari kandungan butiran halus, artinya, peningkatan FC dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban siklik hingga batas tertentu, tetapi tidak sepenuhnya menghilangkan risiko likuifaksi pada kondisi ekstrem.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis deterministik dan probabilistik terhadap potensi likuifaksi, diperoleh beberapa temuan utama sebagai berikut:

- Ketahanan, R_o berkorelasi positif dengan *Safety Factor* deterministik, yaitu $y = 0.0703 e^{5.1185x}$.
- $SF_{\text{deterministik}} \approx 1$, ketahanan, $R_o \approx 60\%$.
- Probabilitas kegagalan (Pf) meningkat eksponensial seiring dengan kenaikan tegangan siklik, terutama pada beban menengah hingga tinggi.
- Kegagalan, Pf berkorelasi negatif dengan *Safety Factor* deterministik, yaitu $y = 11.888e^{-5.14x}$.
- $SF_{\text{deterministik}} \approx 1$, Kegagalan, Pf $\approx 40\%$.
- Point b. dan point d. menunjukkan bahwa metode deterministik cenderung menyederhanakan kondisi di lapangan, sedangkan pendekatan probabilistik mampu menangkap ketidakpastian dan risiko residual, terutama pada nilai FS mendekati 1
- Kandungan butir halus, FC meningkatkan *cyclic resistance* tanah, namun pada kondisi probabilitas kegagalan $> 85\%$, pengaruh FC cenderung menurun sehingga risiko likuifaksi tetap signifikan.
- Pendekatan probabilistik lebih representatif dalam menggambarkan ketidakpastian kondisi tanah dibandingkan metode deterministik tunggal, sehingga keduanya sebaiknya digunakan secara komplementer untuk evaluasi risiko likuifaksi.
- Kombinasi pendekatan deterministik dan probabilistik, ditambah analisis karakteristik tanah (FC), memberikan kerangka kerja yang lebih komprehensif untuk evaluasi risiko likuifaksi. Pendekatan ini penting dalam praktik rekayasa geoteknik di wilayah rawan gempa seperti Sleman, DIY.

6. IMPLIKASI PRAKTIS DI LAPANGAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, diperoleh sejumlah implikasi praktis yang penting untuk diaplikasikan di lapangan. Implikasi ini memberikan arahan dalam perencanaan, evaluasi, dan mitigasi risiko likuifaksi, sehingga hasil penelitian tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan teknis sebagai berikut:

- Zona dengan Pf tinggi (> 0.4) perlu perhatian khusus.
Area yang menunjukkan probabilitas kegagalan tinggi harus dihindari untuk pembangunan fasilitas vital (rumah sakit, jembatan, tangki bahan kimia) kecuali dilakukan perbaikan tanah.
- Safety Factor* deterministik < 2 menandakan kondisi kritis, karena hasil menunjukkan R_o sekitar 80% Lokasi dengan SF rendah sebaiknya diprioritaskan untuk mitigasi, seperti perbaikan densifikasi, penguatan fondasi, atau penggunaan sistem drainase vertikal untuk mengurangi tekanan pori berlebihan.
- Pengaruh fine content (FC) harus dipertimbangkan dalam evaluasi.

Tanah dengan FC kurang dari 15% lebih rentan terhadap likuifaksi, sehingga diperlukan penguatan tambahan. Sementara FC tinggi dapat meningkatkan resistensi, namun tidak menghilangkan risiko sepenuhnya pada kegagalan, P_f besar.

- d. Pendekatan probabilistik dapat dijadikan dasar perencanaan berbasis risiko.
Dengan mengombinasikan hasil probabilistik dan deterministik, perencana dapat menentukan zona aman, zona rawan, dan zona kritis secara lebih akurat, sehingga keputusan desain lebih adaptif terhadap variabilitas tanah.
- e. Mitigasi berbasis level risiko.
 - a. $P_f < 0.05$: dapat dianggap aman, pembangunan dapat dilanjutkan dengan pengawasan standar.
 - b. $0.05 \leq P_f \leq 0.4$: perlu evaluasi tambahan, serta desain fondasi yang lebih konservatif.
 - c. $P_f > 0.4$: perlu tindakan mitigasi langsung sebelum pembangunan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder, L. F., Kayen, R. E., & Moss, R. E. S. (2004). Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(12), 1314–1340. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2004\)130:12\(1314\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2004)130:12(1314))
- Cornell, C. A. (1967). Bounds on the reliability of structural systems. *ASCE*, 1(93), 171–200.
- Idriss, I. M., & Boulanger, R. W. (2004). Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential During Earthquakes by Invited Paper The Joint The 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE) Semi-empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potentia. *11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 32–56.
- Idriss IM, B. (2014). Spt-Based Liquefaction Triggering Procedures. *Department Of Civil & Environmental Engineering College Of Engineering University Of California At Davis, Center for Geotechnical Modeling Department of Civil and Environmental Engineering University of California Davis, California, December*, 136.
- Juang, C. H., Rosowsky, D. V., & Tang, W. H. (1999). RELIABILITY-BASED METHOD FOR ASSESSING LIQUEFACTION POTENTIAL OF SOILS. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 125(August), 684–689.
- Moss, R. E., Seed, R. B., Kayen, R. E., Stewart, J. P., Der Kiureghian, A., & Cetin, K. O. (2006). CPT-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of In Situ Seismic Soil Liquefaction Potential. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(8), 1032–1051. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2006\)132:8\(1032\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:8(1032))
- Seed HB. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *J Geotechn Eng Div ASCE*, 105(2), 201–255.
- Sumiyati, G., & Hadsari, V. (2024). Liquefaction Resistance Due to Fines Content. *Proceeding Th6 6th ICRMCE*, 2, 165–175.
- Sumiyati, G., & Hadsari, V. (2025). The Impact of Effective Stress and Fines Content on Cyclic Resistance based on Probability of Failure. *Studia Geotechnica et Mechanica*.
- Sumiyati, G., Hadsari, V., Ananda, H., & Christina, M. N. (2025). Fine Content's Impact on Liquefaction-Induced Volumetric Deformation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1488(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1488/1/012055>