



MODEL INDEKS LIKUIFAKSI BERBASIS STANDARD PENETRATION TEST MENGGUNAKAN *MULTI-GENE GENETIC PROGRAMMING*

Y. Bosco Hendro P^{1,*}, Widjojo A. Prakoso²⁾

^{1), 2)} Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Kampus UI Depok, 16424, Indonesia
Email: y.bosco@ui.ac.id

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima: Nov 2022
Disetujui: Nov 2022
Dipublikasikan: Juni 2023

Keywords:

potensi likuifaksi, model indeks likuifaksi, standard penetration test, multi-gene genetic programming

Abstrak

Gempa dan rangkaian fenomena khusus di Palu dan berbagai belahan dunia mengakibatkan likuifaksi yang melibatkan fatalitas dan kerugian ekonomi yang luar biasa. Evaluasi potensi likuifaksi berdasarkan *standard penetration test* data menggunakan telah digunakan secara luas. Model indeks likuifaksi diperlukan untuk penetapan kurva kondisi batas antara kasus likuifaksi dan non-likuifaksi dengan mempertimbangkan masalah bias dalam metode deterministik. Penelitian ini bertujuan untuk menetapkan model indeks likuifaksi sebagai relasi antara $(N_1)_{60}$ dan $CSR_{7.5}$ menggunakan *multi-gene genetic programming (MGGP)* untuk penyusunan kurva kondisi batas dan perbandingannya dengan model dari penelitian terdahulu. Model indeks likuifaksi yang dibangun berdasarkan data SPT menggunakan MGGP menghasilkan performa keberhasilan prediksi 93% untuk *testing datasets*.

Kata Kunci: potensi likuifaksi, model indeks likuifaksi, standard penetration test, multi-gene genetic programming

Abstract

Earthquake and series of specific phenomena in Palu and any other parts of the world contributed to a liquefaction that was involving massive fatalities and economic loss. The liquefaction potential evaluation on the basis of the standard penetration test data using deterministic approach has been widely applied. A liquefaction index model is required for the determination of a limit state between liquefaction and non-liquefaction cases by the consideration of bias issues in deterministic method. The purpose of the research is to determine a liquefaction index model in relating $(N_1)_{60}$ and $CSR_{7.5}$ using multi-gene genetic programming (MGGP) to develop limit state curve and its comparison with previous studies. The developed liquefaction index model based on SPT data using MGGP resulted in a performance in terms of successful prediction of 93% for testing of datasets.

Keywords: potensi likuifaksi, model indeks likuifaksi, standard penetration test, multi-gene genetic programming

PENDAHULUAN

Gempa Palu M_w 7,5 2018 menjadi pemicu likuifaksi tipe longoran aliran yang mengakibatkan lebih dari 4.340 korban jiwa dan kerugian ekonomi sekitar Rp 13,6 Triliun [1]. Saluran irigasi, film air, efek gempa susulan, dan efek kombinasi merupakan rangkaian fenomena penyebab longoran aliran [2],[3].

Evaluasi potensi likuifaksi berdasarkan pendekatan tegangan menggunakan data standard penetration test (SPT) merupakan metode deterministik yang paling umum digunakan, tetapi probabilitas likuifaksi (P_L) tidak akurat akibat ketidakpastian parameter dan model tidak dilibatkan dalam perhitungan [4]. Penetapan nilai faktor keamanan (F_s) yang spesifik sulit dilakukan dan nilainya tidak selalu mewakili interpretasi fenomena likuifaksi secara fisik sehingga teknik probabilitas menggunakan teknologi cerdas diperlukan untuk evaluasi probabilitas likuifaksi melalui kurva batas likuifaksi dan non-likuifaksi. Teknik komputasi dan algoritma genetik telah digunakan dalam lingkup rekayasa termasuk bidang geoteknik [5], [6], [7], [8].

Penelitian ini bertujuan untuk menetapkan model indeks likuifaksi daerah Lolu, Palu, Sulawesi Tengah berdasarkan data SPT pasca gempa Palu 2018 dengan menggabungkan data likuifaksi di Chiayi-Tainan dan Taichung, Taiwan pasca gempa Chi-Chi 1999. Hipotesis penelitian adalah untuk membuktikan apakah model indeks likuifaksi tersebut bersesuaian atau berbeda dengan model yang diusulkan oleh penelitian terdahulu [9], [10], [7].

Fokus penelitian mengenai penetapan model indeks likuifaksi berdasarkan data SPT menggunakan *multi-gene genetic programming* (MGGP) dibatasi pada aspek sebagai berikut: lokasi penelitian di Palu dan Taiwan; data gempa berupa magnitudo momen (M_w) dan percepatan gravitasi maksimum (a_{max}); data tanah terdiri dari nilai SPT (N_m), distribusi ukuran butir (FC), dan muka air tanah (z_w); model sebagai relasi antara $(N_1)_{60}$ dan $CSR_{7,5}$; analisis probabilitas tidak mencakup analisis reliabilitas; dan menggunakan bahasa pemrograman Python.

EVALUASI POTENSI LIKUIFAKSI

Metode simplifikasi berdasarkan SPT diawali oleh Seed and Idriss [11], direvisi oleh Seed et al. [12], ditinjau kembali oleh Youd et al. [13], dan disempurnakan oleh Idriss and Boulanger [9] dengan melibatkan faktor reduksi tegangan (r_d), faktor skala magnitudo (MSF), dan faktor koreksi *overburden* (K_σ). Dalam metode deterministik ini, potensi likuifaksi dievaluasi

berdasarkan faktor keamanan (F_s), yang didefinisikan sebagai rasio antara *cyclic resistance ratio* ($CRR_{7,5}$) dan *cyclic stress ratio* ($CSR_{7,5}$).

Faktor keamanan dalam metode deterministik dihitung tanpa mempertimbangkan ketidakpastian parameter, ketidakpastian model, dan *error* yang dihasilkan sehingga faktor keamanan terhadap likuifaksi tidak selalu berasosiasi dengan kondisi aman [14], [15]. Faktor keamanan, $F_s \leq 1$ tidak selalu likuifaksi dan $F_s > 1$ tidak selalu non-likuifaksi. Dengan demikian, fungsi kondisi batas sebagai kurva batas yang memisahkan kasus likuifaksi dan non-likuifaksi dijumpai bias dengan catatan bahwa nilai konservatif lebih besar pada kasus likuifaksi [4], [7]. Evaluasi probabilistik untuk mengatasi masalah bias dalam evaluasi deterministik dilakukan dengan meninjau potensi likuifaksi sebagai indeks likuifaksi (LIP), probabilitas likuifaksi (P_L), dan relasi probabilitas likuifaksi terhadap faktor keamanan ($P_L - F_s$) [4], [6], [7].

Dalam evaluasi potensi likuifaksi berbasis CPT dan SPT, data lapangan yang digunakan terutama adalah pengukuran pasca gempa. Boulanger and Idriss [16] mengamati data CPT di Moss Landing, California sebelum dan sesudah gempa Loma Prieta 1989 serta mencatat bahwa peningkatan q_{cN} tidak signifikan ($< 15\%$) terhadap kedalaman kritis dan tidak dijumpai variabilitas spasial terhadap q_{cN} . Data riwayat kasus likuifaksi yang tersedia tidak mencukupi untuk memisahkan efek q_{cN} . Efek dari pembebanan gempa menghasilkan peningkatan nilai konservatif yang kecil dalam kurva korelasi pemicu likuifaksi atau kurva kondisi batas. Kajian potensi likuifaksi berdasarkan data CPT pasca gempa di Balara, Petobo, dan Jono-Oge menghasilkan nilai faktor keamanan terhadap likuifaksi, $F_s = 0,2$ dan indeks potensi likuifaksi, $LPI = 25,3$ untuk tanah pasir halus dengan sisipan lempung dengan muka air tanah pada kedalaman 2,5 m [1], [17].

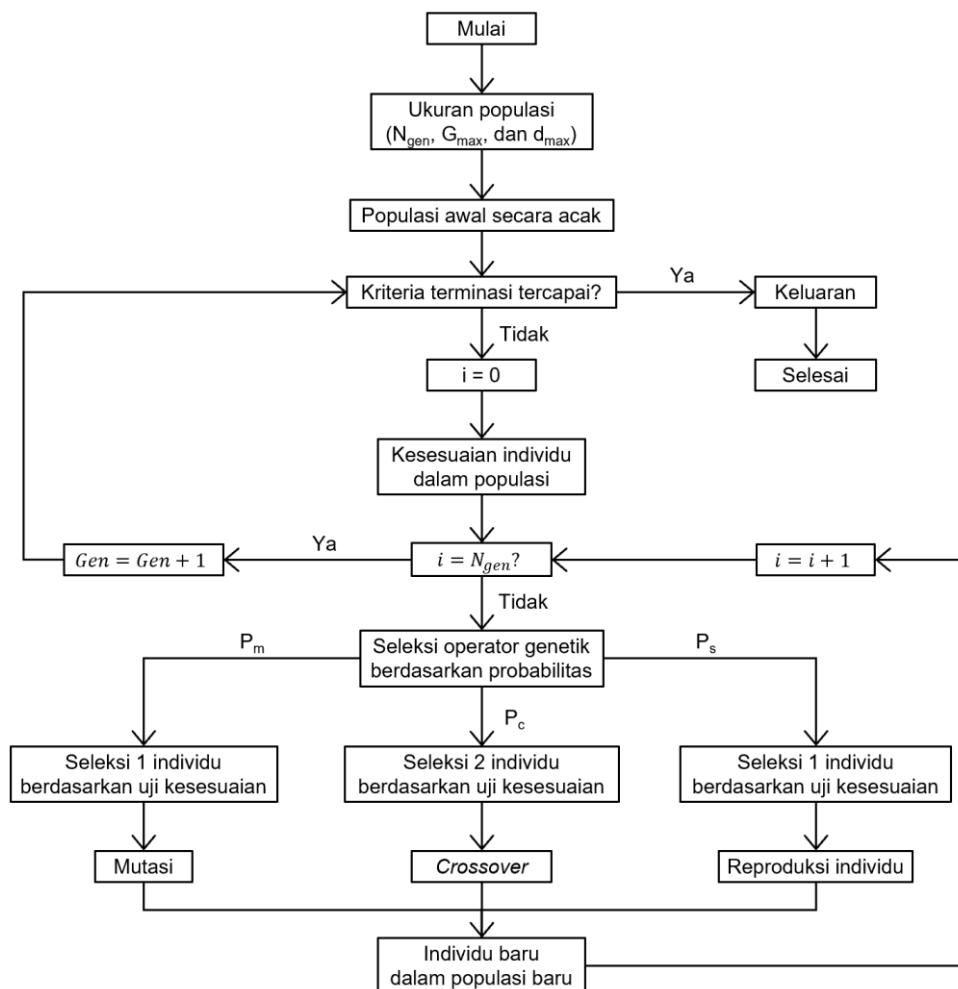
MULTI-GENE GENETIC PROGRAMMING UNTUK EVALUASI POTENSI LIKUIFAKSI

Salah satu teknik mesin pencari, yaitu *multi-gene genetic programming* (MGGP) telah dikembangkan untuk penyusunan model prediksi likuifaksi berbasis data pengujian lapangan. MGGP mempunyai keunggulan dalam penyusunan model atau persamaan matematika hasil prediksi yang kompak dan eksplisit serta berguna untuk analisis lanjut [4], [10], [7].

MGGP merupakan bagian dari *genetic programming* (GP) yang diinisiasi oleh Koza [18] dan Ferreira [19]. Model prediksi MGGP telah berhasil menyediakan solusi untuk permasalahan geoteknik yang sulit [5], [8] dan evaluasi potensi likuifaksi [14], [6], [7]. MGGP adalah mesin pencari solusi optimum berdasarkan teori seleksi alam melalui operasi uji kesesuaian genetik yang direpresentasikan dalam bentuk bilangan biner, yang ditunjukkan secara skematis dalam Gambar

1. Model MGGP dibangun berdasarkan pembelajaran adaptif dari kasus yang disediakan dalam *datasets*.

Proses algoritma genetik dimulai dengan transformasi output yang diharapkan menjadi bilangan biner, yaitu likuifaksi = 1, non-likuifaksi = 0. *Datasets* yang terdiri dari pasangan data fungsi obyektif dan variabel input didefinisikan dalam mesin pencari dan dipecah secara acak. Proses algoritma genetik dijalankan berdasarkan parameter MGGP yang ditetapkan, terutama parameter jumlah generasi (N_G) dan jumlah gen maksimum (G_{max}), melalui *training* dari 70 – 80% *datasets* dan *testing* 20 – 30% dari *datasets* untuk pemenuhan fungsi obyektif. Pembentukan individu baru dihasilkan dari kombinasi gen melalui reproduksi, perkawinan silang, dan mutasi dengan probabilitas berturut-turut adalah P_s , P_c , dan P_m . Set fungsi dan terminal berevolusi secara mandiri dari generasi ke generasi. Mekanisme evolusi yang mewakili algoritma iterasi berlanjut sampai dengan tercapainya kriteria terminasi. Kriteria terminasi pencarian model terbaik adalah nilai ambang kesesuaian *root mean square error*, $RMSE = 0$ atau nilai generasi maksimum [18], [19].



Gambar 1. Diagram alir tipikal prosedur MGGP (Bagheripour et al., 2012; Muduli, 2013).

PERKEMBANGAN MODEL INDEKS LIKUIFAKSI

Model indeks likuifaksi (LI_p) yang menyatakan relasi antara $(N_1)_{60}$ dan $CSR_{7.5}$ disusun oleh Muduli and Das [10]. Model tersebut diperbaharui dengan melibatkan variabel FC oleh Muduli and Das [6] dan selanjutnya oleh Goharzay et al. [7] dengan menambahkan variabel σ'_v .

- Muduli and Das [10]

$$LI_p = 2.824 \tanh(8.2 CSR_{7.5}) - 5.152 \tanh\left(\frac{CSR_{7.5}}{(N_1)_{60}}\right) + 1.5 \times 10^{-5} \left(\frac{CSR_{7.5}}{(N_1)_{60}}\right)^2 - \frac{0.089(N_1)_{60}}{\exp(CSR_{7.5})} - 0.964 \tag{1}$$

- Muduli and Das [6]

$$LI_p = 1.823 \tanh[6.024 CSR_{7.5}] - 0.0368[(N_1)_{60} + CSR_{7.5} - \cos(N_1)_{60}] + \frac{26.16 CSR_{7.5} \sin(FC)}{\sigma'_v} - 0.3728 \tag{2}$$

- Goharzay et al. [7]

$$LI_p = CSR_{7.5} + \{CSR_{7.5}\{[(N_1)_{60} \sigma'_v CSR_{7.5}][19.213012 + (N_1)_{60}\}]^3 [\sigma'_v - (N_1)_{60}]^3\} + [(N_1)_{60}]^3 - \{(N_1)_{60} + [(N_1)_{60} + FC]CSR_{7.5}\} + \{\sin\{[6.100097(N_1)_{60} - 6.100097]CSR_{7.5} - 9.691376\}\}^2 \tag{3}$$

Model indeks likuifaksi disusun berdasarkan data likuifaksi dan non-likuifaksi dengan rentang 160 – 288 kasus di Iran, Taiwan, dan seluruh dunia menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Gene XPro Tools 4 seperti yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Studi kasus yang digunakan dalam penyusunan model indeks likuifaksi.

Peneliti Terdahulu	Studi Kasus	Ukuran Dataset	Perangkat Pemodelan
Bagheripour et al. [14]	Babolsar, Iran	180	MATLAB
Muduli and Das [10]	Gempa Chi Chi, Taiwan, 1999	288	MATLAB
Muduli and Das [6]	Berbagai gempa di seluruh dunia	198	MATLAB
Goharzay et al. [7]	Berbagai gempa di seluruh dunia	160	Gene XPro Tools 4

HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Dalam penelitian ini, model indeks likuifaksi disusun berdasarkan data gempa dan tanah di Palu, Sulawesi Tengah [20], [21], [22], [23], [24], [25] dan Chiayi-Tainan serta Taichung, Taiwan [26]. *Datasets* kasus likuifaksi dan non-likuifaksi yang terdiri dari nilai faktor keamanan (F_s) nilai

SPT terkoreksi ((N_1)₆₀), dan *cyclic resistance ratio* pada magnitudo momen M_w 7,5 ($CSR_{7,5}$) disusun dari 200 kasus dan 288 kasus berturut-turut berasal dari Palu dan Taiwan.

Data likuifaksi di Palu mempunyai karakteristik penyebaran nilai (N_1)₆₀ yang lebar tetapi nilai $CSR_{7,5}$ terbatas pada rentang 0,18 – 0,26 seperti yang dirangkum dalam Tabel 2. Distribusi data likuifaksi di Taiwan mempunyai rentang yang lebar untuk kedua nilai, yaitu (N_1)₆₀ dan $CSR_{7,5}$ masing-masing pada rentang 0,93 – 49,29 b/f dan 0,04 – 0,82. Data dari Palu terdiri dari 149 kasus likuifaksi dan 51 non-likuifaksi. Data dari Taiwan tersusun oleh 164 kasus likuifaksi dan 124 non-likuifaksi.

Tabel 2. Ringkasan data untuk penyusunan model indeks likuifaksi dalam penelitian.

Type	Variabel	Nilai min.	Nilai maks.	COV min.	COV maks.
Input	d (m)	1	20,3	0,34	1,11
	(N_1) ₆₀ (b/f)	0	51,69	0,39	1,69
	(N_1) ₆₀ Palu	0	51,69	0,37	1,37
	(N_1) ₆₀ Taiwan	0,93	49,29	0,37	1,47
	$CSR_{7,5}$	0,04	0,82	0,36	1,25
	$CSR_{7,5}$ Palu	0,18	0,26	0,09	0,10
	$CSR_{7,5}$ Taiwan	0,04	0,82	0,41	2,21
Output	LI	0	1	-	-

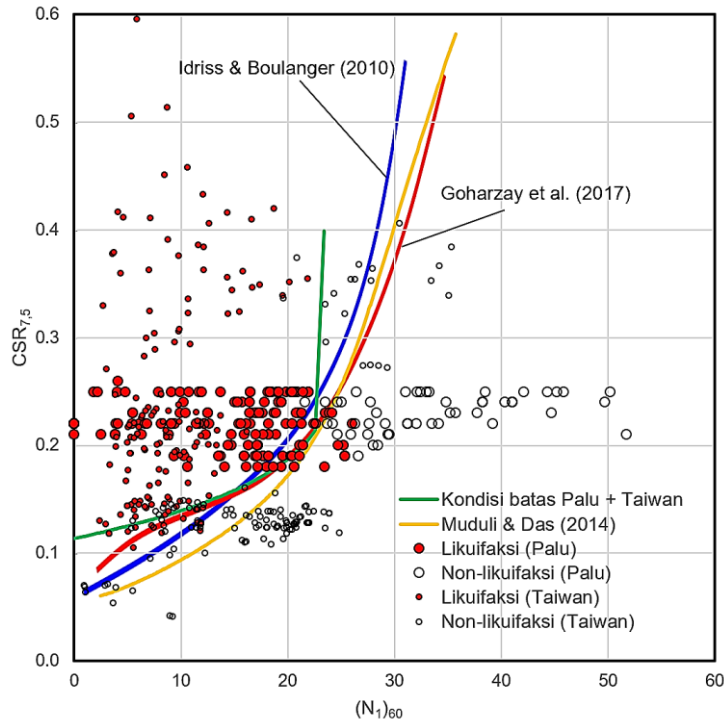
Parameter MGGP untuk penyusunan model indeks likuifaksi (LI_p) ditetapkan sebagai berikut: fungsi obyektif, $f(X) = [likuifaksi = 1, non-likuifaksi = 0]$; vektor variable input, $X = \{(N_1)_{60} \text{ dan } CSR_{7,5}\}$; nilai populasi, $N_{pop} = 6.000$ individu; generasi maksimum, $N_G = 300$; domain kepala gen, $h = 4$; probabilitas perkawinan silang, $P_c = 0,9$; probabilitas reproduksi, $P_s = 0,05$; probabilitas mutasi, $P_{m \text{ subtree}} = 0,01$, $P_{m \text{ hoist}} = 0,01$, $P_{m \text{ point}} = 0,01$; kombinasi fungsi = 3 operator (+, -, dan \times); *verbose* = 2; kondisi acak 38, *datasets training* 75%; dan *datasets testing* 25%; serta metode pencarian = *symbolic classifier*.

Analisis potensi likuifaksi dengan penetapan faktor keamanan (F_s) dilakukan dengan menggunakan Ms. Excel (Microsoft). Penyusunan model indeks likuifaksi (LI_p) menggunakan MGGP dilakukan dengan Phyton (Phyton Software Foundation). Penyusunan kurva kondisi batas dilakukan dengan Solver Add-in pada Ms. Excel.

Model indeks likuifaksi yang dihasilkan dalam penelitian evaluasi potensi likuifaksi di Palu yang digabungkan dengan data di Taiwan adalah:

$$\begin{aligned}
 LI_p = & -0.139 (N_1)_{60} + 4 CSR + 0.746 \\
 & + (7.538 CSR - 5.9) \times (1.249 CSR^2 \times (0.746 + 1.13 (N_1)_{60}) - 20.799 CSR + 2.588)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Performa model yang dihasilkan oleh MGGP diukur melalui keberhasilan prediksi dari *training* dan *testing datasets*. Model indeks likuifaksi (LI_p) yang dihasilkan melalui MGGP mempunyai performa keberhasilan prediksi sebesar 90,71% dan 93,44% masing-masing untuk *training* dan *testing datasets*.



Gambar 2. Kurva kondisi batas berdasarkan model indeks likuifaksi (LI_p) terhadap sebaran data $CSR_{7,5}$ dan $(N_1)_{60}$.

Berdasarkan model indeks likuifaksi dalam Persamaan (4), kurva kondisi batas yang memisahkan kasus likuifaksi dan non-likuifaksi disusun melalui penyelesaian persamaan $LI_p = 0$ menggunakan setiap nilai $(N_1)_{60}$ untuk memperoleh nilai $CSR_{7,5}$. Gambar 2 menunjukkan perbandingan antara hasil penelitian untuk data Palu dan Taiwan dengan kurva kondisi batas yang diinisiasi oleh Idriss and Boulanger [9] serta diperbaharui oleh Muduli and Das [10] dan Goharzay et al. [7] menggunakan metode MGGP. Ketiga kurva kondisi batas dari peneliti terdahulu mempunyai kecenderungan dan rentang yang mendekati. Kurva kondisi batas hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang sama untuk data yang berasal dari Palu. Penyimpangan kurva yang cukup signifikan terjadi pada plot data dari Taiwan pada rentang nilai $(N_1)_{60} = 0 - 8$ dan $(N_1)_{60} = 23$. Di samping itu, kurva kondisi batas ini terhenti pada nilai data $(N_1)_{60} = 23,4, CSR_{7,5} = 0,4$; di mana, data kasus likuifaksi dan non-likuifaksi yang berasal dari Taiwan tidak tersedia. Hipotesis awal mengenai generalisasi penerapan model untuk evaluasi potensi likuifaksi adalah bahwa model indeks likuifaksi (LI_p) tidak hanya bersifat situs spesifik tetapi model tersebut lebih dikontrol oleh kontribusi *datasets* yang dilibatkan dalam penyusunan model. Pemodelan indeks

likuifaksi berdasarkan data SPT menggunakan MGGP dalam bahasa pemrograman Python berhasil dilakukan dengan catatan observasi penelitian sebagai berikut:

- Pencarian model indeks likuifaksi (LI_p) hanya menggunakan data dari Palu menghasilkan kurva kondisi batas yang mempunyai kecenderungan yang berbeda secara signifikan terhadap model yang telah dibangun oleh peneliti terdahulu. Hal ini dikontrol oleh penyebaran nilai $CSR_{7,5}$ terkonsentrasi pada rentang 0,18 – 0,26 serta plot kasus likuifaksi dan non-likuifaksi mempunyai penyebaran yang berkebalikan dengan kecenderungan kurva dari peneliti terdahulu. Berdasarkan hasil pengamatan tersebut, maka data likuifaksi yang berasal dari Taiwan dilibatkan dalam penetapan model indeks likuifaksi (LI_p).
- Model indeks likuifaksi (LI_p) dalam penelitian ini dapat disusun dari data $(N_1)_{60}$ dan $CSR_{7,5}$ tetapi hasilnya berbeda cukup signifikan terhadap model indeks likuifaksi (LI_p) penelitian terdahulu (Idriss and Boulanger [9], Muduli and Das [10], Goharzay et al. [7]). Perbedaan tersebut dikontrol oleh kombinasi parameter MGGP dalam pencarian model indeks likuifaksi terbaik menggunakan MGGP.
- Kombinasi dari parameter yang menjadi input operasi MGGP akan menentukan kompleksitas model matematika dan performa keberhasilan prediksi dari model. Hal ini berarti bahwa metode MGGP tidak berjalan secara otomatis tetapi kontrol terhadap parameter input menjadi kunci keberhasilan model dan performa prediksi. Catatan dalam penelitian, ukuran populasi dan generasi maksimum yang digunakan oleh Muduli and Das [6] adalah $N_{pop} = 1.000 - 5.000$ dan $G_{max} = 100 - 500$. Goharzay et al. (2017) menggunakan parameter $N_{pop} = 10.000$, $h = 6 - 8$, dan 22 fungsi operator. Parameter probabilitas MGGP ditetapkan menurut *default* pemrograman menurut Koza [18] dan Ferreira [19].
- Parameter dominan yang berkontribusi dalam pemenuhan kriteria terminasi adalah kondisi acak, ukuran populasi, generasi maksimum, dan jumlah operator fungsi. Empat parameter tersebut tidak berbanding lurus terhadap performa keberhasilan prediksi model sehingga kombinasi optimum dari parameter merupakan solusi indeks likuifaksi (LI_p) terbaik. Pengaruh signifikan terhadap model yang dihasilkan dengan performa keberhasilan > 90% terjadi pada kondisi acak pemecahan data set = 36 – 40, nilai populasi, $N_{pop} = 6.000 - 8.000$ individu, generasi maksimum, $N_G = 200 - 400$. Catatan, domain kepala gen (h) tidak memberikan kontribusi signifikan terhadap pembentukan model.
- Performa keberhasilan prediksi model yang dihasilkan oleh pemrograman tidak selalu mempunyai manifestasi fisik secara matematis ketika model indeks likuifaksi (LI_p) tidak dapat ditransformasi menjadi kurva kondisi batas. Hal ini disebabkan oleh kemunculan salah satu parameter $(N_1)_{60}$ atau $CSR_{7,5}$ yang hanya terjadi pada satu nodal. Penyebab lain adalah ketika parameter menjadi pembagi dan bernilai 0 atau fungsi log untuk nilai negatif, maka

pencarian titik data hipotetik $CSR_{7,5}$ pada kondisi $LI = 0$ menghasilkan nilai *error* #DIV/0!. Berdasarkan pertimbangan kondisi tersebut, maka operator fungsi dibatasi menjadi 3 (+, -, dan \times). Penambahan fungsi trigonometri (sin, cos, dan tan) menambah kompleksitas model sehingga tidak bersifat kompak.

SIMPULAN

Keluaran penting dari penelitian dirangkum dalam kesimpulan sebagai berikut:

Persamaan model indeks likuifaksi (LI_p) berdasarkan data SPT yang terdiri dari 488 kasus likuifaksi dan non-likuifaksi menggunakan MGGP dalam bahasa pemrograman Python mempunyai performa keberhasilan prediksi 93,44% melalui *datasets testing*.

Penelitian lanjut dari penetapan model indeks likuifaksi (LI_p) berdasarkan SPT menggunakan MGGP merupakan rangkaian penyusunan model probabilitas likuifaksi berbasis reliabilitas berdasarkan data tanah (Muduli and Das [6], Goharzay et al. [7]):

- Model *cyclic resistance ratio* (CRR),
- Model faktor keamanan (F_s),
- Model probabilitas likuifaksi (P_L) menggunakan metode *first-order reliability method* (FORM),
- Relasi F_s - P_L menggunakan Bayesian *mapping function*.

MGGP merupakan metode yang efisien untuk penetapan model indeks likuifaksi dan penyusunan kurva kondisi batas antara likuifaksi dan non-likuifaksi. Dalam perspektif generalisasi penggunaan model pada aspek terapan, diperlukan panelitian lanjut yang melibatkan data dengan rentang nilai dan cakupan wilayah yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN), *Kajian Gempa Palu Provinsi Sulawesi Tengah 28 September 2018 (M7.4)*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2018.
- [2] W.A. Prakoso, *Lessons Learned from Desa Lolu, Sigi: Recommendations for Future Development of Palu*. National Workshop on Joint Research, Assessment & Mitigation of Liquefaction Hazards. Depok: Universitas Indonesia, 2019.
- [3] W.A. Prakoso, M. Irsyam, M.I. Tanjung, and D.S. Harnito, *Liquefaction Studies in Indonesia: An Update*. Universitas Indonesia & Indonesia Society for Geotechnical Engineering: GeoTalk XVIII, 2021.
- [4] C.H. Juang, J. Ching, Z. Luo, and C.S. Ku, *New Models for Probability of Liquefaction Using Standard Penetration Tests Based on An Updated Database of Case Histories*. Engineering Geology, 2012, pp-85-93.
- [5] A.H. Gandomi and A.H. Alavi, *A New Multi-Gene Genetic Programming Approach to Non-Linear System Modeling. Part II: Geotechnical and Earthquake Engineering Problems*. Neural Comput. & Applic. 21, 2012, pp-189-201.

- [6] P.K. Muduli and S.K. Das, *Model Uncertainty of SPT-Based Method for Evaluation of Seismic Soil Liquefaction Potential using Multi-Gene Genetic Programming*. Soils and Foundations, 55(2), 2015, pp-258-275.
- [7] M. Goharzay, Noorzad A., A.M. Ardakani, and M. Jalal, *A Worldwide SPT-Based Soil Liquefaction Triggering Analysis Utilizing Gene Expression Programming and Bayesian Probabilistic Method*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9, 2017, pp-683-693.
- [8] A. Keshavarza and H. Tofighi, *Gene Expression Programming Models for Liquefaction-Induced Lateral Spreading*. Scientia Iranica A 27(6), 2020, pp-2704-2718.
- [9] I.M. Idriss and R.W. Boulanger, *SPT-Based Liquefaction Triggering Procedures*. California: University of California, 2010.
- [10] P.K. Muduli and S.K. Das, *Evaluation of Liquefaction Potential of Soil Based on Standard Penetration Test Using Multi-Gene Genetic Programming Model*. Acta Geophys. 62, 2014, pp-529-543.
- [11] H.B. Seed and I.M. Idriss, *Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 97 (9), 1971, pp-1249-1273.
- [12] H.B. Seed, K. Tokimatsu, L.F. Harder, and R. Chung, *Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations*. ASCE Journal of Geotechnical Engineering 111 (12), 1985, pp-1425-1445.
- [13] T.L. Youd, I.M. Idriss, R.D. Andrus, I. Arango, G. Castro, J.T. Christian, R. Dobry, W.D.L. Finn, L.F. Harder Jr., M.E. Hynes, K. Ishihara, J.P. Koester, S.S.C. Liao, W.F. Marcuson III, G.R. Martin, J.K. Mitchell, Y. Moriwaki, M.S. Power, P.K. Robertson, R.B. Seed, and K.H. Stokoe II, *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 127 (10), 2001, pp-817-833.
- [14] M.H. Bagheripour, I. Shooshpasha, and M. Afzalirad, *A Genetic Algorithm Approach for Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Reliability Method*. J. Earth Syst. Sci. 121 (1), 2012, pp-45-62.
- [15] P.K. Muduli, *Evaluation of Liquefaction Potential of Soil using Genetic Programming*. Doctoral Dissertation. Rourkela: National Institute of Technology Rourkela, 2013.
- [16] R.W. Boulanger and I.M. Idriss, *CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures*. Davis: University of California, 2014.
- [17] M. Irsyam, A.S. Muntohar, W.A. Prakoso, D. Djarwadi, N.R. Hanifa, and A. Rudyanto, *Damages Associated with Geotechnical Problems in 2018 Palu Earthquake, Indonesia – A Summary on the Impact of Palu-Donggala Mw 7.4 Earthquake on Urban Area of Palu, Donggala, and Sigi*, 2018.
- [18] J.R. Koza, *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Natural Selection*. Cambridge: The MIT Press, 1992.
- [19] C. Ferreira, *Gene Expression Programming: A New Adaptive Algorithm for Solving Problems*. Complex Systems 13(2), 2001, pp-87-129.
- [20] M.D. Alamsyah, *Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Data CPT pada Zona yang Mengalami Pergerakan Lateral Kecil di Desa Lolu, Kota Palu*. Depok: Universitas Indonesia, 2020.
- [21] M.G. Natakusumah, *Studi Potensi Likuifaksi Berdasarkan Gradasi Butiran dan Uji Standard Penetration Test di Desa Lolu pada Daerah yang Mengalami Perpindahan Lateral Kecil*. Depok: Universitas Indonesia, 2020.
- [22] Nurizkatilah, *Analisis Potensi Likuifaksi di Desa Lolu Kota Palu Menggunakan Metode Standard Penetration Test dan Uji Laboratorium Gradasi Butiran pada Area dengan Pergerakan Lateral Besar*. Depok: Universitas Indonesia, 2020.
- [23] I. Yulianti, *Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Data Cone Penetration Test dan Uji Gradasi Butiran dengan Studi Kasus Likuifaksi di Desa Lolu pada Zona dengan Pergerakan Lateral Besar Akibat Gempa Sulawesi Tengah 2018*. Depok: Universitas Indonesia, 2020.

- [24] W. Rahayu, Nurizkatilah, and E. Bahsan, *Analysis of Liquefaction Potential in Lolu Village, Palu using SPT Method and Laboratory Test of Grain Size Distribution*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 622 012016, 2021.
- [25] W. Rahayu, I. Yuliyanti, and E. Bahsan, *Analysis of Potential Liquefaction using Cone Penetration Test Data and Grain Size Distribution Test with Case Study of Liquefaction in Lolu Village*. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 622 012015, 2021.
- [26] J.H. Hwang and C.W. Yang, *Verification of Critical Cyclic Strength Curve by Taiwan Chi-Chi Earthquake Data*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 21, 2001, pp-237-257.