

Analisis Sifat Fisik Tanah Berpengaruh Terhadap Kuat Geser Tanah Wilayah Pesisir Menggunakan ANFIS

Ewis Oktareza^{1*}, Ferry Fatnanta², Imam Suprayogi³

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Riau, Kampus Bina Widya KM. 12,5
Simpang Baru, Pekanbaru, 28293, Indonesia

* ewis.oktareza7172@grad.unri.ac.id

Abstrak

Tanah pesisir didominasi lempung marin dan tanah organik tinggi dengan kuat geser rendah, kompresibilitas tinggi, dan sensitif terhadap kadar air serta salinitas, sehingga meningkatkan risiko kegagalan infrastruktur. Penelitian ini mengevaluasi kinerja metode soft computing, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), dalam memprediksi kuat geser tak terdrainase (C_u) serta menentukan parameter sifat fisik tanah paling dominan. Data terdiri dari 190 tanah pesisir, meliputi kadar air, berat isi, berat jenis, Atterberg limit, dan liquidity index. ANFIS diterapkan menggabungkan jaringan saraf dan logika fuzzy untuk menangkap hubungan nonlinier dan ketidakpastian data. Hasil menunjukkan ANFIS memiliki performa terbaik ($R_{All} = 0,8443$; $RMSE = 0,1673$). Analisis ANFIS dengan performa terbaik mengidentifikasi Plastic Limit (PL) dan Specific Gravity (G_s) sebagai faktor utama yang mempengaruhi kuat geser (C_u). Penelitian ini menunjukkan bahwa komposisi mineral dan densitas partikel tanah di wilayah pesisir berdampak signifikan pada kuat geser tanah, serta efektivitas ANFIS dapat dijadikan alat prediksi awal untuk perencanaan geoteknik dan mitigasi risiko infrastruktur pesisir.

Kata kunci: sifat fisik tanah, kuat geser tak terdrainase, wilayah pesisir, ANFIS

1. Pendahuluan

Wilayah pesisir Provinsi Riau merupakan kawasan strategis nasional yang mendukung aktivitas permukiman, transportasi, industri, serta konektivitas regional. Namun demikian, kawasan ini didominasi oleh tanah lunak pesisir berupa lempung marin dan tanah berkadar organik tinggi yang dicirikan oleh kuat geser rendah, kompresibilitas tinggi, serta sensitivitas signifikan terhadap perubahan kadar air dan salinitas. Karakteristik tersebut meningkatkan kerentanan infrastruktur pesisir terhadap penurunan berlebih, ketidakstabilan timbunan, dan kegagalan fondasi yang berdampak pada kerugian ekonomi serta risiko keselamatan publik. Studi-studi terkini menunjukkan bahwa ketidakakuratan estimasi parameter kuat geser tanah lunak menjadi salah satu faktor dominan dalam kegagalan infrastruktur di kawasan pesisir dan estuari. Berbagai studi internasional dalam lima tahun terakhir menunjukkan bahwa ketidakakuratan estimasi kuat geser tanah lunak merupakan salah satu penyebab utama kegagalan infrastruktur pesisir dan estuari [1–4].

Pendekatan konvensional berbasis korelasi empiris dan pengujian laboratorium tunggal sering kali tidak mampu merepresentasikan hubungan nonlinier antara sifat fisik tanah, kondisi hidrologi, dan parameter mekanik tanah lunak yang kompleks [5–7]. Tantangan ini semakin diperparah oleh perubahan iklim yang meningkatkan intensitas curah hujan, fluktuasi muka air laut, dan intrusi air asin, sehingga memengaruhi perilaku mekanik tanah pesisir secara signifikan [8,9].

Perkembangan metode berbasis kecerdasan buatan, seperti *Artificial Neural Network* (ANN) dan *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), telah menunjukkan kemampuan dalam memodelkan hubungan nonlinier multivariat secara lebih adaptif dan akurat dibandingkan metode konvensional. Namun, penerapan pendekatan tersebut pada karakteristik tanah lunak pesisir tropis, khususnya di Provinsi Riau, masih terbatas dan belum terdokumentasi secara komprehensif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi model prediksi kuat geser tanah lunak pesisir Provinsi Riau berbasis kecerdasan buatan guna meningkatkan akurasi estimasi parameter geoteknik serta menyediakan dasar ilmiah bagi mitigasi risiko kegagalan infrastruktur pesisir yang berkelanjutan dan adaptif terhadap dinamika hidrologi.

2. Metode

2.1 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari Laboratorium Mekanika Tanah dan Batuan Universitas Riau. Dataset terdiri dari 190 sampel tanah yang meliputi parameter sifat fisik tanah, yaitu kadar air (w), berat volume (γ), berat jenis (G_s), *Atterberg limits* (LL, PL, dan PI), serta kuat geser tak terdrainase (C_u) yang diperoleh dari pengujian *triaxial Unconsolidated Undrained* (UU). Tanah yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Kabupaten Siak (Desa Benteng Hulu, Buantan Besar, Kampung Rempak, Merempan Hilir, Merempan Hulu, Sabak Permai, Sungai Mempura) dan Kabupaten Bengkalis (Jangkang, Selat Baru, Teluk Pambang, Buruk Bakul, Sungai Selari, Dompas, Pangkalan Jambi) Provinsi Riau.

2.2 Praproses Data

Tahapan pertama pada penelitian ini adalah pengumpulan data, kemudian dilakukan penyusunan dan penyesuaian data menggunakan Microsoft Excel. Data yang telah tersusun selanjutnya dibagi menjadi dua bagian, yaitu data pelatihan (*training*) dan data pengujian (*testing*). Tiga skenario pembagian data digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

- Variasi A : 70% data *training* dan 30% data *testing*
- Variasi B : 80% data *training* dan 20% data *testing*
- Variasi C : 85% data *training* dan 15% data *testing*

Pembagian data ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proporsi data pelatihan terhadap kinerja model ANFIS dalam memprediksi kuat geser tanah. Pembagian data ini diterapkan dengan multi input 7 variabel, dan single output 1 variabel menggunakan *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS).

2.3 Rancangan Pemodelan

Pemodelan pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode ANFIS untuk memprediksi pengaruh sifat fisik tanah terhadap kuat geser. Pemodelan menggunakan ANFIS digunakan sebagai model hibrida yang menggabungkan kemampuan pembelajaran ANN dengan sistem logika *fuzzy*, dimana setiap variabel input direpresentasikan dalam bentuk *membership function* dan menghasilkan aturan *fuzzy* (*rule base*) untuk menangkap hubungan nonlinier dan ketidakpastian data tanah. Proses

pelatihan ANFIS dilakukan dengan metode *hybrid learning* yang mengombinasikan *least-squares estimator* dan *backpropagation* untuk mempercepat konvergensi. Kedua model ini kemudian dibandingkan berdasarkan kinerja prediksi menggunakan parameter RMSE, R All untuk menentukan pendekatan yang paling akurat dalam memetakan hubungan antara sifat fisik tanah dan kuat geser di wilayah pesisir Riau.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pemodelan Menggunakan ANFIS dalam Prediksi Kuat Geser Tanah

Pemodelan kuat geser tak terdrainase (Cu) berdasarkan hasil uji *triaxial Unconsolidated Undrained* (UU) pada tanah pesisir dilakukan menggunakan ANFIS dengan variasi pembagian data 70:30, 80:20, dan 85:15 (*training:testing*). Variasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh proporsi data pelatihan terhadap akurasi dan kemampuan generalisasi model. Hasil menunjukkan bahwa pada ketiga variasi diperoleh nilai R training sebesar 1, yang mengindikasikan kemampuan model dalam mempelajari pola data pelatihan secara sangat baik. Namun, nilai R testing yang lebih rendah menunjukkan bahwa kemampuan generalisasi model masih terbatas. Berdasarkan kriteria evaluasi berupa nilai R All tertinggi dan RMSE terendah, variasi 85:15 dipilih sebagai model terbaik dengan R All sebesar 0,84433 dan RMSE checking sebesar 0,1673. Nilai tersebut menunjukkan korelasi yang kuat secara keseluruhan serta tingkat kesalahan prediksi yang relatif kecil pada data pengujian. Oleh karena itu, konfigurasi ini ditetapkan sebagai model representatif dalam prediksi Cu. Hasil pemodelan ANFIS dengan jaringan terbaik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pemodelan Terbaik Menggunakan ANFIS

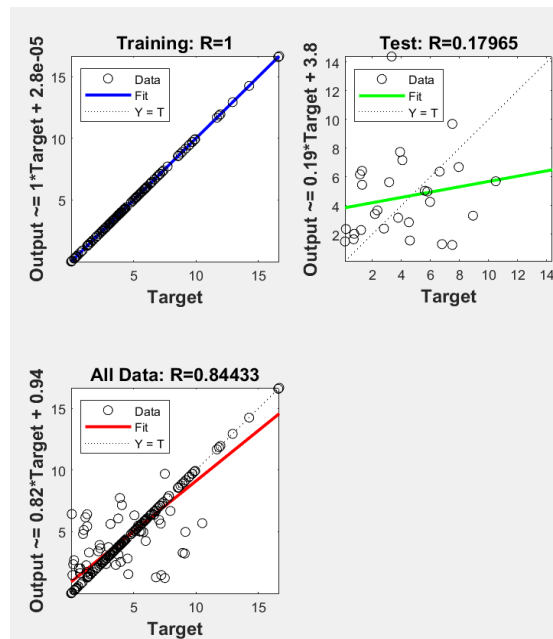
Variasi	Epoch	Clustering Radius	R Training	R Testing	R All	RMSE Training	RMSE Checking
70:30	1000	0.1	1	0.3037	0.5119	1.41E-06	0.3855
80:20	1000	0.1	1	0.2765	0.6257	1.54E-07	0.3371
85:15	1000	0.2	1	0.1797	0.8443	2.75E-07	0.1673

Berdasarkan Tabel 1 seluruh model menghasilkan nilai R training sebesar 1, yang menunjukkan bahwa model mampu mempelajari pola data pelatihan dengan sangat baik. Namun demikian, nilai R testing yang relatif lebih rendah menunjukkan bahwa kemampuan generalisasi model terhadap data baru masih terbatas.

Variasi pembagian data 85:15 menghasilkan nilai R All tertinggi sebesar 0,8443 dan RMSE terendah sebesar 0,1673. Nilai RMSE yang relatif kecil menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan prediksi yang rendah, sehingga dapat diandalkan untuk estimasi awal parameter kuat geser tanah pesisir. sehingga konfigurasi ini dipilih sebagai model terbaik. Hasil ini menunjukkan bahwa proporsi data pelatihan yang lebih besar mampu meningkatkan kemampuan model ANFIS dalam menangkap hubungan nonlinier antara parameter sifat fisik tanah dan kuat geser tak terdrainase (Cu).

Perbedaan antara nilai R training dan R testing mengindikasikan adanya potensi *overfitting*, khususnya pada konfigurasi dengan *clustering radius* kecil. Upaya mengurangi potensi *overfitting*, diperlukan pendekatan lanjutan seperti optimasi parameter *clustering radius*, penggunaan *cross-validation*, serta pengujian pada dataset yang lebih besar dan bervariasi. Kondisi ini terjadi ketika model membentuk aturan *fuzzy* yang terlalu kompleks sehingga sangat menyesuaikan diri terhadap data pelatihan, namun kurang optimal dalam memprediksi data baru. Temuan ini sejalan dengan

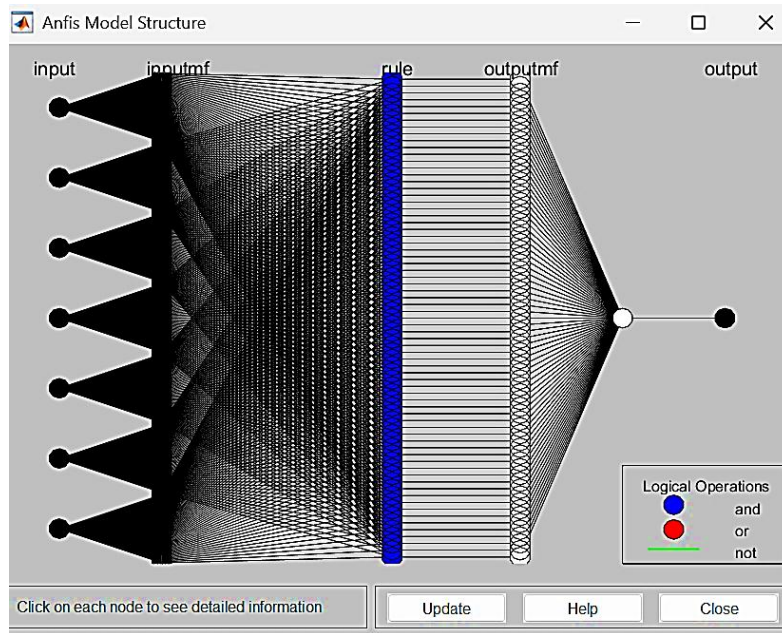
penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa ANFIS dapat menghasilkan kompleksitas aturan yang tinggi apabila parameter klaster tidak dioptimasi secara tepat [10]. Hasil regresi model ANFIS pada jaringan terbaik dapat dilihat pada Gambar 1.



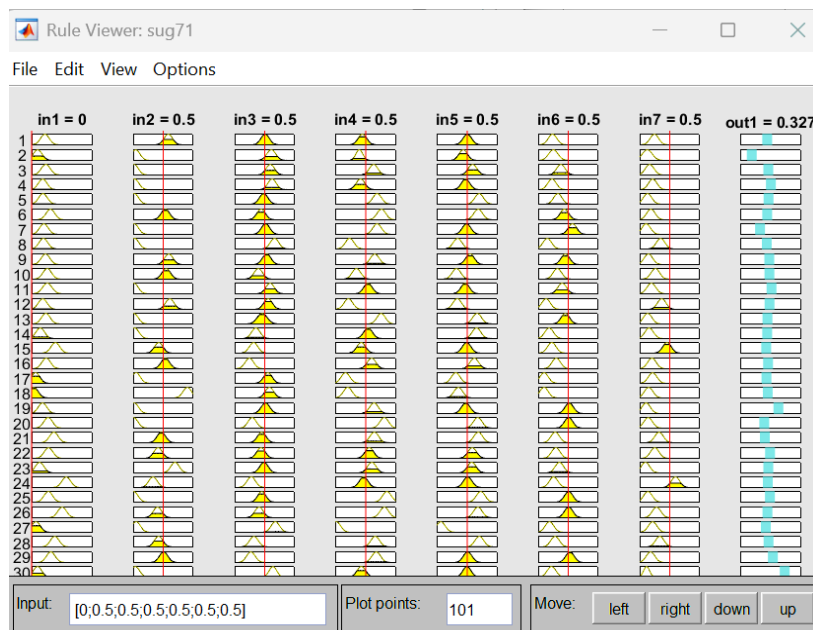
Gambar 1. Hasil regresi model ANFIS pada konfigurasi jaringan terbaik yang menunjukkan hubungan antara nilai C_u hasil pengujian laboratorium dan hasil prediksi model.

Proporsi pembagian data pelatihan terbukti berperan penting dalam meningkatkan performa model. Beberapa penelitian terkini melaporkan bahwa peningkatan jumlah data training mampu meningkatkan akurasi dan stabilitas model *neuro-fuzzy* dalam prediksi parameter geoteknik [11], [12]. Hasil penelitian ini memperkuat temuan tersebut, variasi 85:15 menghasilkan performa terbaik karena distribusi data yang lebih memadai memungkinkan ANFIS membangun fungsi keanggotaan dan aturan inferensi yang lebih representatif terhadap karakteristik tanah pesisir. Studi komparatif dalam satu dekade terakhir menunjukkan bahwa pendekatan *neuro-fuzzy* memiliki keunggulan dibanding ANN konvensional dalam menangkap hubungan nonlinier kompleks pada tanah lunak [13], [14]. Dengan demikian, pemilihan ANFIS dalam penelitian ini secara metodologis tepat dan konsisten dengan perkembangan penelitian geoteknik berbasis kecerdasan buatan. Model struktur ANFIS pada jaringan terbaik dapat dilihat pada Gambar 2.

Upaya memahami mekanisme inferensi pada model yang telah terpilih, dilakukan analisis terhadap struktur aturan (*rule base*) menggunakan tampilan *Rule Viewer* ANFIS sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Visualisasi ini menggambarkan kontribusi masing-masing parameter input terhadap *output* kuat geser tak terdrainase (C_u) berdasarkan derajat keanggotaan dan aturan *fuzzy* yang terbentuk.

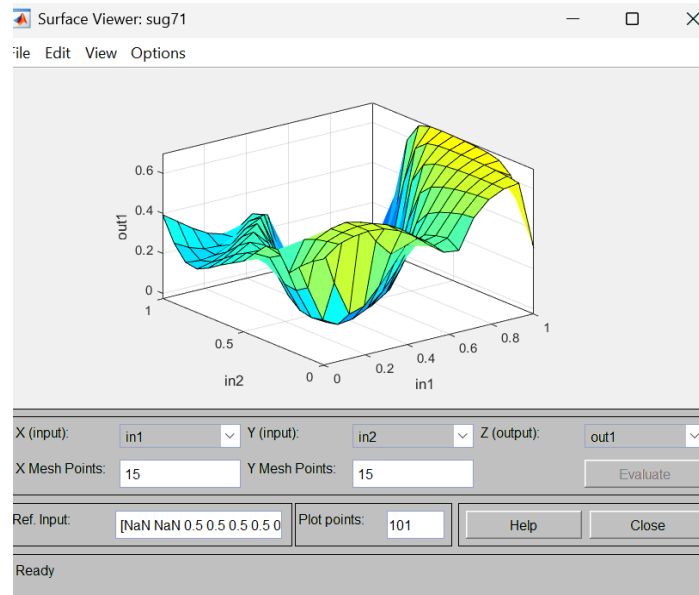


Gambar 2. Struktur model ANFIS pada jaringan terbaik yang menggambarkan hubungan antara variabel input sifat fisik tanah dan output kuat geser tak terdrainase (C_u)



Gambar 3. Tampilan rule viewer pada model ANFIS terbaik yang menunjukkan kontribusi masing-masing parameter input terhadap nilai kuat geser tak terdrainase (C_u)

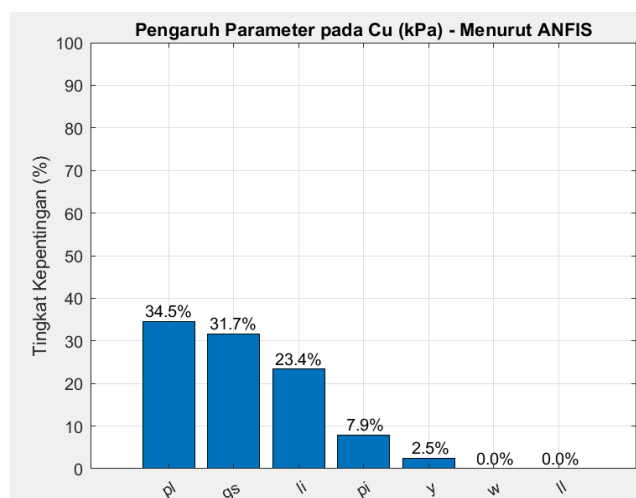
Representasi permukaan respon (*response surface*) dari model ANFIS terbaik dapat dilihat pada Gambar 4, memperlihatkan pola hubungan antara variabel input terhadap output C_u . Pola kontur yang tidak linier menunjukkan bahwa hubungan antar parameter tanah dan kuat geser bersifat kompleks serta dipengaruhi oleh gabungan beberapa parameter yang saling memengaruhi.



Gambar 4. *Response surface* model ANFIS yang menunjukkan hubungan nonlinier antara variabel input tanah terhadap nilai Cu

3.3 Parameter Sifat Fisik Tanah yang Berpengaruh terhadap Kuat Geser Tanah Pesisir

Analisis sensitivitas parameter dalam memprediksi kuat geser tak terdrainase (Cu) menunjukkan bahwa model ANFIS dengan komposisi 85% data training dan 15% data testing memberikan nilai koefisien korelasi (R) dan RMSE terbaik, sehingga dipilih sebagai model utama dalam menentukan pengaruh parameter. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya [10], [15], yang menyatakan bahwa pendekatan soft computing mampu memodelkan hubungan kompleks antara sifat tanah dan kuat geser secara lebih akurat. Kombinasi sistem fuzzy dan jaringan saraf pada ANFIS dilaporkan lebih efektif dalam menangkap perilaku nonlinier tanah dibandingkan pendekatan ANN konvensional. Parameter yang berpengaruh terhadap kuat geser tanah pesisir ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil analisis sensitivitas parameter sifat fisik tanah yang mempengaruhi kuat geser tak terdrainase (Cu).

Merujuk hasil pemodelan ANFIS terbaik, parameter yang paling dominan memengaruhi Cu adalah Plastic Limit (PL) dengan kontribusi 34,5%, diikuti oleh *Specific Gravity* (Gs) sebesar 31,7%, Liquidity Index (LI) sebesar 23,4%, Plasticity Index (PI) sebesar 7,9%, dan *unit weight* (γ) 2,5% sedangkan parameter kadar air (w) dan parameter lainnya menunjukkan kontribusi yang sangat kecil atau mendekati nol.

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa Plastic Limit (PL) dan *Specific Gravity* (Gs) merupakan parameter dominan yang memengaruhi kuat geser tak terdrainase (Cu). Dominasi parameter plastisitas dalam prediksi kuat geser telah banyak dilaporkan dalam penelitian sebelumnya. Beberapa studi menyatakan bahwa parameter *Atterberg limit* (LL, PL, dan PI) memiliki korelasi signifikan terhadap kekuatan geser tanah lempung jenuh [16], [17]. Kontribusi Gs sebesar 30,6% dalam penelitian ini juga menunjukkan bahwa komposisi mineral dan densitas partikel tanah memengaruhi struktur mikro dan mekanisme kohesi tanah. Temuan serupa dibuktikan bahwa variabel yang berkaitan dengan mineralogi dan plastisitas tanah memberikan pengaruh dominan dalam model prediksi berbasis ANFIS [18], [19].

Penelitian lain juga menunjukkan bahwa kombinasi parameter plastisitas dan indeks fisik tanah mampu meningkatkan akurasi prediksi kuat geser pada tanah heterogen menggunakan pendekatan *soft computing* [20]. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bukti empiris bahwa karakteristik plastisitas dan komposisi mineral merupakan faktor utama dalam menentukan perilaku geser tanah pesisir pada kondisi tak terdrainase.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi kinerja metode *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) dalam memprediksi kuat geser tak terdrainase (Cu) tanah pesisir serta mengidentifikasi parameter sifat fisik tanah yang paling berpengaruh. Hasil analisis menunjukkan bahwa model ANFIS dengan rasio pembagian data 85% *training* dan 15% *testing* memberikan kinerja terbaik dengan nilai R All sebesar 0,8443 dan RMSE sebesar 0,1673, yang menunjukkan tingkat akurasi prediksi yang baik. Analisis sensitivitas mengindikasikan bahwa *Plastic Limit* (PL) dan *Specific Gravity* (Gs) merupakan parameter dominan yang memengaruhi kuat geser tanah pesisir. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik plastisitas dan komposisi mineral tanah memiliki peranan penting dalam menentukan perilaku mekanik tanah, khususnya pada kondisi tanah lempung jenuh. Dengan demikian, model ANFIS yang dikembangkan tidak hanya mampu merepresentasikan hubungan nonlinier antar parameter tanah secara efektif, tetapi juga berpotensi menjadi alternatif metode prediksi yang efisien dalam praktik rekayasa geoteknik, terutama sebagai alat bantu estimasi awal dalam perencanaan dan mitigasi risiko pembangunan infrastruktur di wilayah pesisir.

Referensi

- [1] B. T. Pham, C. Qi, L. S. Ho, T. Nguyen-Thoi, N. Al-Ansari, M. D. Nguyen, H. D. Nguyen, H.-B. Ly, H. V. Le, and I. Prakash, "A novel hybrid soft computing model using random forest and particle swarm optimization for estimation of undrained shear strength of soil", *Sustainability*, vol. 12, no. 6, (2020), p. 2218. (Journal)
- [2] F. E. Jalal, Y. Xu, M. Iqbal, M. F. Javed, and B. Jamhiri, "ANN-based swarm intelligence for predicting expansive soil swell pressure and compression strength", *Scientific Reports*, vol. 14, (2024), p. 14597. (Journal)

- [3] X. Liu, Z. Lu, Y. Zhu, Q. Le, and J. Wei, "Estimation of the shear strength of sand-clay mixtures based on ANN and low-field NMR", *Scientific Reports*, vol. 15, (2025), p. 71. (Journal)
- [4] A. Sungur, M. F. Yazıcı, and N. Keskin, "Prediction of the shear strength of glass fiber-reinforced clay soil by ANFIS", *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, vol. 9, no. 4, (2022), pp. 1255–1264. (Journal)
- [5] M. Golafshani, F. E. Jalal, and Y. Xu, "Predictive modeling of swell pressure and UCS of expansive soils using ANN, ANFIS, and GEP", *Journal of Environmental Management*, vol. 289, (2021), p. 112420. (Journal)
- [6] D. H. Nguyen and D. K. Bui, "ANN vs SVM for marine clay strength prediction", *Neural Computing and Applications*, (2023). (Journal)
- [7] W. Cao, "A comparative study of hybrid adaptive neuro-fuzzy inference systems to predict the unconfined compressive strength of rocks", *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 72, no. 3, (2025). (Journal)
- [8] Y. Wang, J. Smith, and Z. Lee, "Coastal embankment soil behavior under soft computing models", *Ocean Engineering*, (2021). (Journal)
- [9] D. J. Armaghani, "Soft ground AI prediction models", *Geoscience Frontiers*, (2022). (Journal)
- [10] Y. Lou, X. Zhang, and H. Li, "ANFIS modeling and overfitting issues in geotechnical prediction," *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017.
- [11] M. Hossain and M. Ghosh, "Effect of clustering parameter in ANFIS soil modeling," *Engineering with Computers*, 2019.
- [12] A. Gómez, J. Martinez, and L. Torres, "Data partition strategies in neuro-fuzzy engineering models," *Soft Computing*, 2020.
- [13] B. Moghaddam, A. Rezaei, and S. Karimi, "Hybrid neuro-fuzzy approaches in geotechnical prediction," *Neural Computing and Applications*, 2020.
- [14] P. Kumar and A. Singh, "Comparative study of ANN and ANFIS for soil strength modeling," *Computers and Geotechnics*, 2021.
- [15] M. Mehdizadeh and S. Mohammadzadeh, "Application of adaptive neuro-fuzzy inference systems in the prediction of soil shear strength", *Arabian Journal of Geosciences*, (2022). (Journal)
- [16] K. Sharma, R. Singh, and M. Kumar, "Relationship between Atterberg limits and shear strength using AI," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019.
- [17] J. Zhao, L. Wang, and Y. Chen, "Soil index properties influence on shear strength prediction," *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2018.
- [18] A. Rahman and B. Basu, "Mineralogical effects in ANFIS-based soil strength modeling," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2021.
- [19] M. El-Sayed and A. Al-Osta, "Influence of specific gravity on cohesive soil behavior," *Ground Improvement*, 2022.
- [20] S. Liang and F. Yin, "Neuro-fuzzy prediction of undrained shear strength in marine clay," *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 2023.