

PENDEKATAN KORELASI KANDUNGAN FRAKSI HALUS DALAM MENENTUKAN POTENSI PLASTISITAS PADA LEMPUNG BERPLASTISITAS RENDAH

Hendra Saputra

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Jaya
Jl. Cendrawasih Raya Bintaro Jaya, Kota Tangerang Selatan, Banten 15413, Indonesia

*Corresponding author: hndra.saputra@gmail.com

Abstract

Plasticity is a significant geotechnical characteristic that is affected by the fine-grained fraction of soil. This paper describes an alternate method for determining plasticity potential in low plasticity (CL) clays by comparing fine fraction (FC) concentration to sand content. The study used descriptive statistics and Pearson correlation to investigate the relationship that exists between consistency limits (LL, PI), grain fractions (sand, silt, clay), and derived parameters (FC, sand-silt-clay spectrum, and sand fraction ratio). Two categorisation systems, Casagrande (1948) and Moreno-Maroto (2021), were examined, revealing disparities between the CL and ML classifications, particularly at the plasticity transition region. After eliminating outliers thru the interquartile range (IQR), 61 samples were analysed, indicating significant correlations: a positive relationship between sand content and sand ratio (SR), and negative correlations between sand content and FC, as well as FC and SR. The results show that FC can be used as an alternative to predict plasticity potential behavior. The study emphasises the limits of traditional plasticity indices and recommends incorporating fine fraction analysis to improve geotechnical assessments. This approach provides a simplified, statistically proven way for assessing plasticity potential, particularly in low-plasticity clays with minimal site-specific data.

Keywords: clay plasticity, fine fraction content, low-plasticity clay, Pearson correlation, soil classification

Abstrak

Plastisitas merupakan karakteristik geoteknik yang signifikan yang dipengaruhi oleh fraksi halus tanah. Makalah ini menjelaskan sebuah metode alternatif untuk menentukan potensi plastisitas pada lempung dengan plastisitas rendah (CL) dengan membandingkan konsentrasi fraksi halus (FC) dengan kandungan pasir. Penelitian ini menggunakan statistik deskriptif dan korelasi Pearson untuk menyelidiki hubungan antara batas konsistensi (LL, PI), fraksi butiran (pasir, lanau, lempung), dan parameter turunannya (FC, spektrum pasir-lanau-lempung, dan rasio fraksi pasir). Dua sistem kategorisasi, Casagrande (1948) dan Moreno-Maroto (2021), telah diperiksa dan menunjukkan perbedaan antara klasifikasi CL dan ML, terutama pada daerah transisi plastisitas. Setelah menghilangkan penciran melalui rentang interkuartil (IQR), 61 sampel dianalisis, yang menunjukkan korelasi yang signifikan: hubungan positif antara kandungan pasir dan rasio pasir (SR), dan korelasi negatif antara kandungan pasir dan FC, serta FC dan SR. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FC dapat dijadikan alternatif memprediksi perilaku potensial plastisitas. Studi ini menekankan batas-batas indeks plastisitas tradisional dan merekomendasikan untuk memasukkan analisis fraksi halus untuk meningkatkan penilaian geoteknik. Pendekatan ini memberikan cara yang disederhanakan dan terbukti secara statistik untuk menilai potensi plastisitas, terutama pada lempung dengan plastisitas rendah dengan data spesifik lokasi yang minimal.

Kata Kunci : kandungan fraksi halus, klasifikasi tanah, korelasi pearson, lempung plastisitas rendah, plastisitas lempung

PENDAHULUAN

Plastisitas tanah adalah kemampuan tanah untuk mengalami deformasi tanpa mengalami retakan atau perubahan bentuk (Dhir et al., 2017). Sifat ini secara umum terdapat pada tanah yang memiliki kandungan mineral lempung atau bahan organik (Knappett & Craig, 2019), sehingga menjadi parameter penting untuk dipahami dalam analisis geoteknik. Atterberg (1911) mengembangkan batas-batas konsistensi tanah, yang mencakup batas cair, batas plastis dan batas susut. Batas-batas ini mempertimbangkan kandungan air di dalam tanah untuk menggambarkan fase tanah dari padat, plastis hingga cair. Dengan mengetahui rentang batas antara batas plastis dan batas cair, karakteristik plastisitas tanah dapat ditentukan berdasarkan persentase kandungan air dalamnya. Pengujian untuk mencari konsistensi tanah ini tergolong sederhana, mudah dan cepat, sehingga ideal untuk menilai sifat-sifat tanah selama tahap awal investigasi geoteknik (Ahmed & Agaiby, 2020; Vardanega & Haigh, 2014; Yusof & Zabidi, 2018). Selain itu, pemahaman tentang batas-batas Atterberg diperlukan untuk mengetahui informasi yang berkaitan dengan kekuatan tanah, permeabilitas, kompresibilitas, dan potensi kembang susut (Manafi, 2019a; Shakoor, 2016; Yusof & Zabidi, 2018). Informasi-informasi lain inilah yang berpengaruh penting dalam perancangan dan desain geoteknik.

Rentang batas antara batas plastis dan batas cair dinamakan Indeks plastisitas (PI). Parameter ini diperoleh dari selisih antara batas cair (LL) dan batas plastis (PL). Semakin besar indeks plastisitas menunjukkan semakin besar pula kisaran kadar air di saat tanah masih bersifat plastis. Selain itu, parameter ini pada sistem *Unified Soil Classification System* (USCS) menjadi klasifikasi penting untuk membagi jenis tanah menjadi lempung maupun lanau serta memahami perilakunya dalam kondisi yang berbeda (Dolinar, 2010; Manafi, 2019b). Meskipun demikian, parameter PI saja tidak cukup tepat untuk dapat menggambarkan keseluruhan sifat plastisitas tanah. Selain kadar air, kandungan mineral di dalam tanah juga memiliki peran besar dalam mempengaruhi sifat plastisitas (Dumbleton & West, 1966; Won et al., 2021). Pendekatan potensial plastisitas yang dikembangkan oleh (Firincioglu & Bilsel, 2023) mempertimbangkan hal tersebut dalam penelitiannya. Selain itu pendekatan yang dilakukan dapat memberikan tidak hanya parameter tunggal untuk menentukan plastisitas tanah tetapi menyajikan gambaran lebih luas dalam penentuannya.

Potensial plastisitas ditujukan untuk mengurangi model tunggal dalam menentukan sifat plastisitas tanah. Pengujian tersebut, dilakukan dengan menganalisis sampel yang memiliki kandungan mineral montmorillonite dan kalsium karbonat. Firincioglu & Bilsel menggunakan metode statistik dan analisis multivariat sebagai opsi untuk membuktikan kesederhanaan dan efisiensi pengujian secara statistik. Dalam analisis, sampel yang digunakan memiliki rentang karakteristik luas, dengan 79% adalah tanah dengan lempung plastisitas tinggi (CH). Hasil yang didapatkan adalah adanya korelasi positif antara potensial plastisitas dengan nilai gabungan antara nilai PI dan persentase kandungan pasir dalam tanah. Sejalan dengan pernyataan tersebut bahwa mengukur menilai plastisitas tanah juga dipengaruhi faktor mineralogi. Pedoman dengan cara konvensional dinilai tidak logis dan tidak konsisten, sehingga dapat menyesatkan untuk tujuan geoteknik (Okkels, 2018). Dalam batasan kekeliruan ini fraksi lanau bukan penyebab tanah berada di bawah garis A. Menurut Okkels, hal tersebut terjadi atas dominasi dari konsistensi mineral di dalamnya. Hasil serupa juga dikemukakan Zolfaghari dan Gui pada kajian yang dilakukan oleh Nazilia & Cahyadi bahwa pengaruh C organik terhadap IP tergantung dari jenis mineral liat yang mengikat bahan organik (Zulfa & Bowo, 2023). Meskipun demikian, plastisitas tanah akan lebih efektif untuk mempertimbangkan keberadaan fraksi halus daripada kandungan pasir. Hal ini dikarenakan fraksi butiran halus secara signifikan mempengaruhi berbagai sifat tanah, termasuk kompresibilitas volume, respons tekanan pori, kerentanan likuefaksi, dan kekuatan geser (Ghahremani et al., 2006; Hussain & Sachan, 2019; Jradi et al., 2022; Papadopoulou & Tika, 2016; Tsai et al., 2010; Wang et al., 2023).

Sehingga tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk membuat pendekatan lain terhadap potensial plastisitas yang dikembangkan oleh Firincioglu & Bilsel. Pendekatan ini bertujuan menggunakan kadar fraksi butiran halus sebagai variabel pengganti persentase kandungan pasir. Hal ini didasarkan pada pengaruh negatif pasir terhadap kandungan plastisitas, disebabkan pasir tidak memiliki sifat kohesi sehingga tidak dapat menyimpan air dengan baik (Afriani & Juansyah, 2016; Zulfa & Bowo, 2023). Hal lain adalah potensi keretakan atau deformasi yang dimiliki saat terjadi perubahan kelembapan (Artamonova & Sheshenin, 2024; Guimarães et al., 2019). Pada analisis ini sampel tanah yang akan digunakan merupakan sampel dengan klasifikasi lempung plastisitas rendah (CL). Pemilihan karakteristik sampel ini dimaksudkan untuk menghindari pengaruh mineralogi yang kompleks dalam analisis dan mengembangkan pada sampel yang lebih besar dari penelitian terdahulu. Dalam menentukan klasifikasi tanah akan ditambahkan grafik yang dikembangkan oleh Moreno & Maroto (Moreno-Maroto et al., 2021) sebagai alternatif lainnya, selain (Casagrande, 1948). Penelitian ini diharapkan dapat menjadi opsi mencari potensi plastisitas terhadap parameter lain yang lebih mudah, ketika data pada lokasi terbatas.

METODE

Dalam penelitian ini sampel yang digunakan berjumlah 151 sampel. Deskriptif statistik pada data yang dimiliki disajikan pada Tabel 1. Keseluruhan sampel didapatkan dari laporan-laporan pengujian laboratorium dan jurnal publikasi (Afolagboye et al., 2021; Reiffsteck, 2005; Zulfa & Bowo, 2023). Sampel-sampel tanah merupakan sampel tanah pada kedalaman 1 m hingga 35 m di bawah permukaan. Keseluruhan sampel telah dipilih yang hanya memiliki persentase komposisi butiran lengkap. Komposisi ini berisikan butiran dari fraksi butir kasar (krikil dan pasir) hingga fraksi butir halus (lempung dan lanau). Pengujian batas cair, batas plastis dan batas susut yang digunakan dalam sampel penelitian merupakan hasil pengujian dengan metode uji batas – batas Atterberg.

Tabel 1. Statistik deskriptif parameter parameter konsistensi dan fraksi butiran tanah

Par.	LL (%)	PI(%)	Gravel (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
count	151,00	151,00	151,00	151,00	151,00	151,00
mean	96,07	55,47	30,78	24,00	41,59	34,00
std	56,69	16,89	14,70	16,02	26,82	35,00
min	1,00	32,00	15,00	0,00	2,62	0,00
25%	49,50	43,38	20,14	12,50	23,73	11,00
50%	94,00	51,00	25,00	24,00	39,00	33,00
75%	134,00	65,09	36,50	36,50	49,67	52,53
max	199,00	109,00	87,00	57,00	244,35	332,00

Dari sampel yang ada akan diklasifikasikan sampel yang memiliki klasifikasi CL dari 2 metode grafik yang berbeda (Casagrande, pada Gambar 2a dan Moreno & Maroto, pada Gambar 2b). Metode statistik Pearson (R) digunakan untuk mencari korelasi dari 6 parameter (indeks plastisitas; persentase butiran pasir; persentase butiran lanau; persentase butiran lempung; persentase kandungan fraksi halus (*fine fraction content*), Persamaan [1]; persentase spektrum pasir-lanau-lempung (*sand-silt-clay spectrum*) Persamaan [2]; dan rasio fraksi pasir (*sand fraction ratio*), Persamaan [3]).

$$FC = SiC + CC \dots\dots\dots [1]$$

FC adalah persentase kandungan fraksi halus (*fine fraction content*); SiC adalah persentase butiran lanau; CC adalah persentase butiran lempung.

$$S = FC + SC \dots\dots\dots [2]$$

S adalah spektrum pasir-lanau-lempung (*sand-silt-clay spectrum*); FC adalah persentase kandungan fraksi halus (*fine fraction content*); SC adalah persentase butiran pasir.

$$SR = SC / S \dots\dots\dots [3]$$

SR adalah rasio fraksi pasir (*sand fraction ratio*); SC adalah persentase butiran pasir; S adalah spektrum pasir-lanau-lempung (*sand-silt-clay spectrum*).

Untuk mengeksplorasi hubungan antara persentase fraksi halus (variabel bebas) dan persentase butiran pasir (variabel terikat) digunakan analisis regresi linier dan regresi polinomial. Model faktor tunggal dilakukan untuk analisis regresi dengan persamaan seperti pada Tabel 2, dimana nilai $\hat{y}$ merupakan variabel respons untuk x yang diberikan.

Tabel 2. Model regresi

Model Regresi	Persamaan
Linier regresi	$\hat{y} = b_0 + b_1x$
Polinomial	$\hat{y} = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots + b_nx^n$

Keterangan dari tabel 2: $b_0, b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ adalah koefisien regresi; n adalah derajat polinomial. Pada tahap akhir dilakukan evaluasi pengujian performa model. Indikator kualitas—seperti MSE, MAE, R^2 , serta uji signifikansi F dan T—untuk akan digunakan untuk menilai seberapa akurat model statistik dalam memprediksi hasil yang didapatkan terhadap hasil model awal.

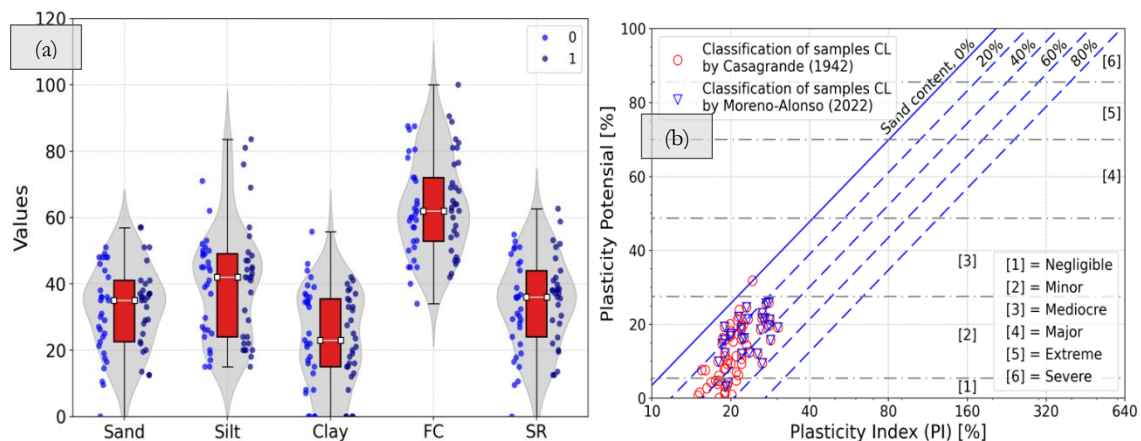
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari 151 data yang dimiliki, persebaran data menunjukkan bahwa CL merupakan data yang paling dominan dengan persentase 45% pada klasifikasi Cassagrande berdasarkan Tabel 3. Sebaliknya pada klasifikasi Moreno & Maroto CH adalah sampel dominan dengan persentase 36,4% berdasarkan Tabel 3. Terdapat 1 sampel berada tepat di batas pemisah *low plasticity* dan *high plasticity* (LL = 50%) pada klasifikasi Cassagrande, sama halnya dengan 2 sampel pada klasifikasi Moreno & Maroto. Data yang memenuhi kriteria yang dibutuhkan berjumlah 68 sampel. Jumlah ini lebih besar dari sampel yang digunakan pada pengujian terdahulu, yaitu 12% dari 207 total sampel (Firincioglu & Bilsel, 2023).

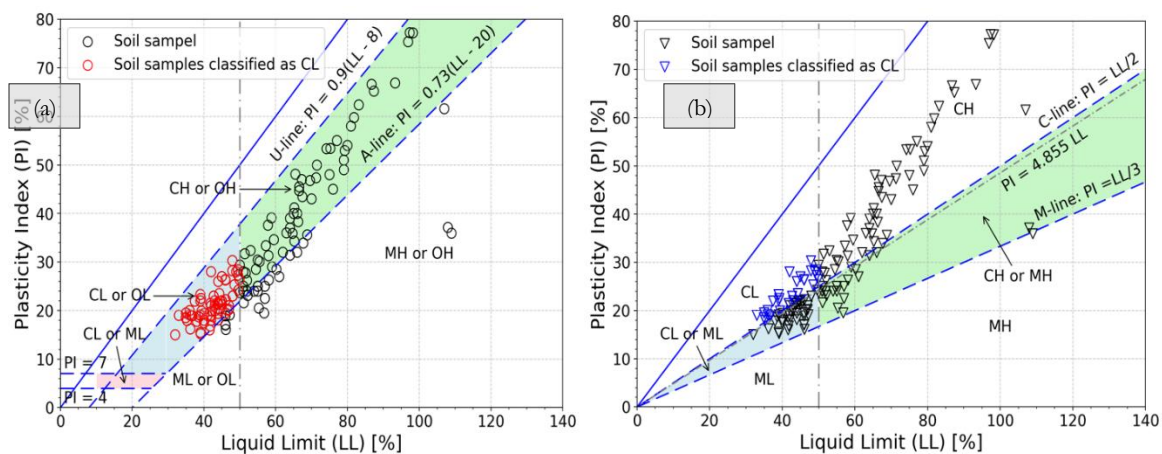
Tabel 3. Persebaran data klasifikasi sampel

Klasifikasi Cassagrande	Jumlah Sampel	Rentang LL	Rentang PI	Klasifikasi Moreno & Maroto	Jumlah Sampel	Rentang LL	Rentang PI
CL	68	32.0 – 49.9	15.0 – 30.3	CL	29	33.0 – 49.9	17.9 – 30.3
ML	5	46.0 – 47.2	16.1 – 19.1	CL or ML	43	32.0 – 49.6	15 – 24.2
CH	57	50.1 – 107.7	24.0 – 87.0	CH	55	50.1 – 107.7	26.2 – 87.0
MH	20	51.1 – 109.0	19.5 – 61.58	CH or MH	22	51.0 – 109.0	19.5 – 37.1

Dari total 68 sampel yang dianalisis dengan statistik IQR (*Interquartile Range*) didapatkan 7 sampel adalah pencilan (*oulier*). Pengecekan digunakan untuk meningkatkan keandalan analisis statistik. Hasilnya, jumlah sampel yang baik untuk studi selanjutnya diturunkan menjadi 61 sampel ditunjukkan pada Gambar 2a. Total persebaran sampel hasil pengamatan disajikan pada Gambar 2a & 2b. Pada Tabel 3 dapat dilihat kesesuaian klasifikasi pada kategori CH pada klasifikasi Cassagrande dan Moreno & Maroto. Namun, untuk karakteristik CL, MH, dan ML, terdapat perbedaan rentang klasifikasi. Hal ini disebabkan grafik Cassagrande secara tegas memisahkan zona CL, MH, dan ML, sedangkan grafik Moreno & Maroto tidak dapat mengklasifikasikan tanah secara pasti pada rentang $PI=LL/3$ hingga $PI=LL/2$ karena sifat transisi antara lanau dan lempung (Moreno-Maroto & Alonso-Azcárate, 2015, 2017).



Gambar 1. a) *Box plot* distribusi fraksi tanah; b) Hubungan antara *plasticity index* (PI) dan *plasticity potential* pada 61 sampel uji



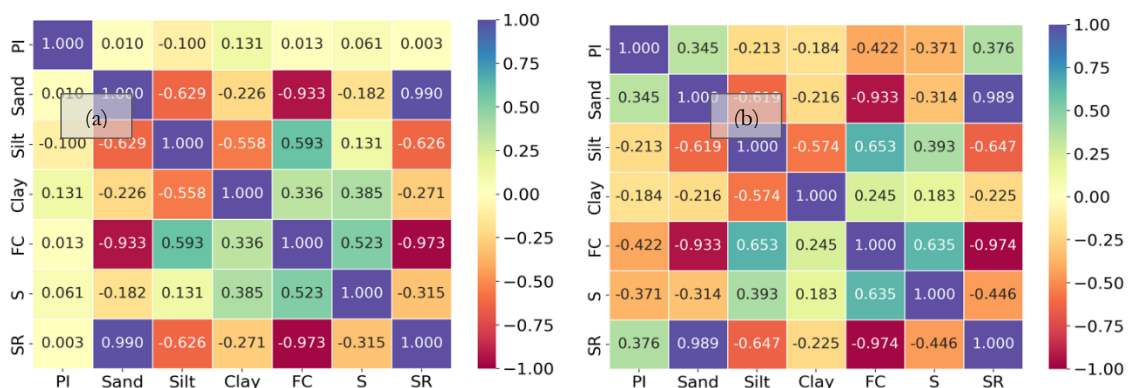
Gambar 2. Hubungan antara *liquid limit* (LL) dan *plasticity index* (PI) klasifikasi tanah
 a) diagram Cassagrande ; dan b) diagram Moreno & Maroto

Tabel 4. Statistik deskriptif parameter konsistensi dan fraksi butiran tanah klasifikasi cl cassagrande

Par.	PI (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	FC (%)	S (%)	SR (%)
count	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0	61.0
mean	20.9	32.4	39.7	23.7	63.4	95.8	34.1
std	3.3	12.8	16.8	14.3	14.8	5.4	13.7
min	15.0	0.0	15.0	0.0	34.0	80.0	0.0
25%	18.9	22.5	24.0	15.0	52.8	93.0	24.0
50%	20.2	35.0	42.0	23.0	62.0	98.0	36.0
75%	22.2	41.0	49.0	35.5	72.0	100.0	44.0
max	28.4	57.0	83.6	55.7	100.0	100.0	62.6

Dari Gambar 1b. keseluruhan sampel CL diinterpretasikan sebagai potensi plastisitas pada rentang yang dapat diabaikan (*negligible*) hingga minor. Pada Tabel 4 direpresentasikan data statistik deskriptif parameter konsistensi dan fraksi butiran tanah klasifikasi pada data sampel. Selanjutnya dari 61 sampel dilanjutkan dengan mencari korelasi antar variabel yang telah ditentukan pada metode, menggunakan statistik korelasi Pearson (R).

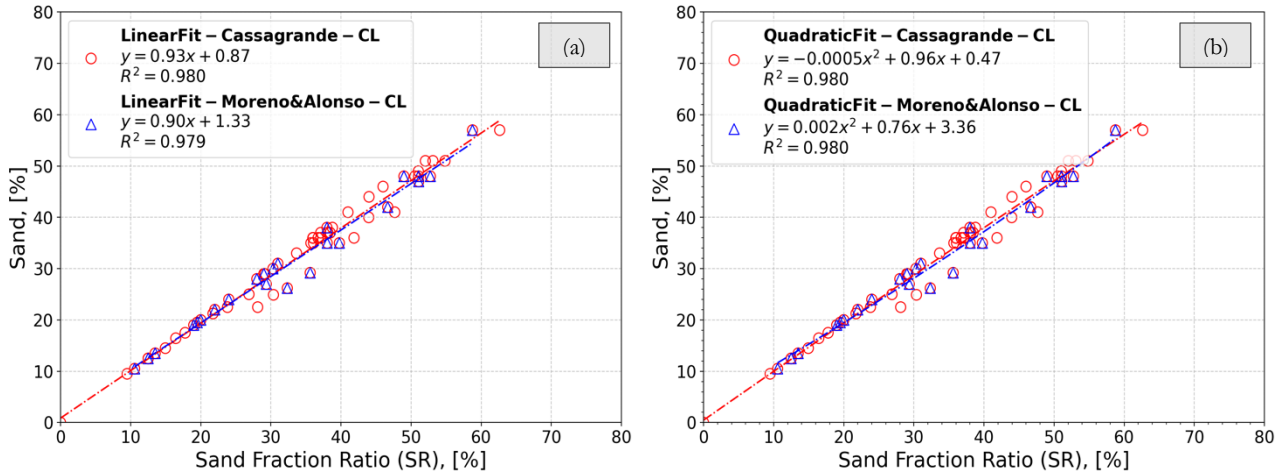
Hasil korelasi Pearson (R) dalam Gambar 3 memberikan informasi besarnya korelasi yang baik pada 3 hubungan parameter: 1) Persentase butiran pasir (*sand*) terhadap rasio fraksi pasir (SR); 2) Persentase butiran pasir (*sand*) terhadap persentase kandungan fraksi halus (FC); dan 3) persentase kandungan fraksi halus (FC) terhadap rasio fraksi pasir (SR). Hubungan parameter *sand* terhadap SR berkontribusi positif, sedangkan untuk parameter *sand* terhadap FC dan FC terhadap SR berkontribusi negatif pada variabel dependen. Hasil hubungan parameter 1) dan 3) dapat digunakan untuk menentukan pendekatan kadar fraksi butiran halus bertingkat sebagai variabel pengganti persentase kandungan pasir dengan langkah distribusi bertingkat. Meski pun demikian, hubungan parameter 2) dapat digunakan sebagai pendekatan pembanding dari hasil. Hasil akhir akan didapatkan 2 persamaan: 1) Model regresi substitusi bertingkat; dan 2) Model regresi substitusi langsung.



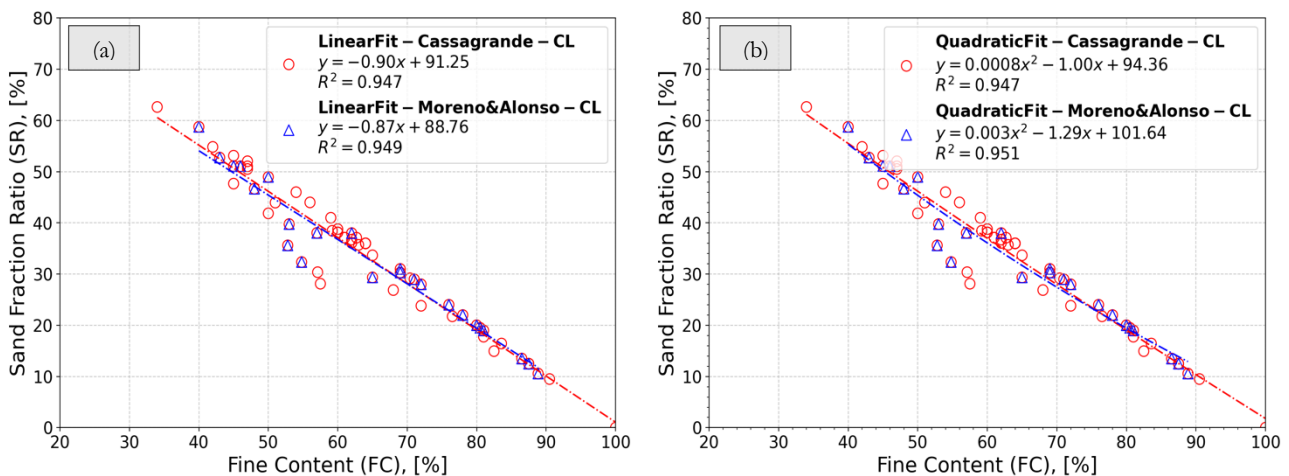
Gambar 3. Matriks korelasi dan skala klasifikasi parameter konsistensi dan fraksi butiran tanah: a) Cassagrande CL klasifikasi; b) Moreno & Maroto CL klasifikasi.

Koefisien determinasi (R^2) juga diperoleh, karena memberikan informasi tentang seberapa baik sebuah model regresi cocok dengan data. Nilai koefisien determinasi R^2 berdasarkan model regresi yang digunakan Tabel 5 menunjukkan besar varians nilai untuk variabel dependen (dari 97,9% hingga 98,0%) pada parameter *sand* terhadap SR Gambar 4b. Persamaan polinomial kuadrat pada ke dua data klasifikasi menghasilkan koefisien determinasi yang sebanding, begitupun dengan persamaan linier Casagrande (98%). Tetapi berbeda pada persamaan linier Moreno & Maroto menghasilkan nilai koefisien determinasi lebih rendah, yaitu 97,9%. Pada Gambar 4a Nilai koefisien determinasi R^2 pada parameter FC terhadap SR didapatkan polinomial kuadrat Moreno & Maroto lebih baik dibandingkan persamaan liniernya, dan nilai dari linier dan polinomial kuadrat Cassagrande Gambar 5. Maka, persamaan linier dan polinomial kuadrat yang ada akan digunakan untuk membuat model persamaan pendekatan terhadap Persamaan [4] Firincioglu & Bilsel. Untuk model regresi substitusi langsung Persamaan [4] akan langsung di substitusi pada linier dan polinomial kuadrat hasil Gambar 6. Dari hasil linier dan polinomial kuadrat dapat diketahui bahwa R^2 hubungan *fine content* (FC) terhadap *sand* secara lebih kecil (87,0% hingga 97,2%).

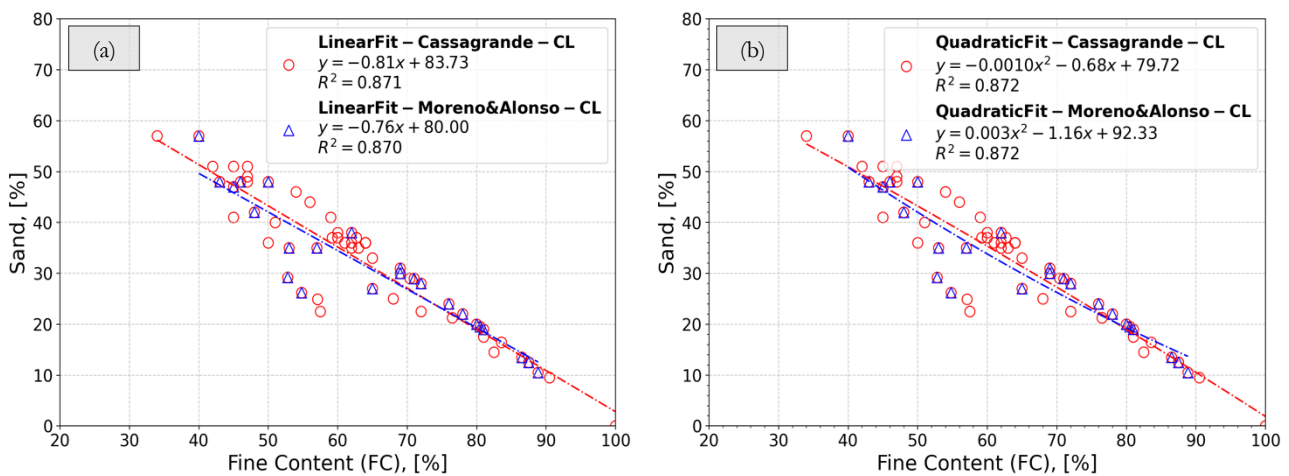
Potensial plastisitas (%) = $31.9 \ln(PI) - 0.44(SC) - 69.9$ [4]
 PI adalah indeks plastisitas (%); SC adalah persentase butiran pasir (%).



Gambar 4. Perbandingan hubungan *sand fraction ratio* (SR) terhadap *sand*: a) *linear fit* dan b) *quadratic fit*



Gambar 5. Perbandingan hubungan *fine content* (FC) terhadap *sand fraction ratio* (SR): a) *linear fit* dan b) *quadratic fit*



Gambar 6. Perbandingan hubungan *fine content* (FC) terhadap *sand*: a) *linear fit* dan b) *quadratic fit*

Tabel 5. Model regresi Casagrande dan Moreno & Maroto terhadap parameter signifikan korelasi

Model Regresi	Hubungan parameter SR terhadap <i>Sand</i>		Hubungan parameter FC terhadap SR	
	Persamaan	R ²	Persamaan	R ²
Linier Casagrande	$0.93 * (SR) + 0.87$	0.980	$-0.90 * (FC) + 91.25$	0.947
Kuadrat Casagrande	$-0.0005 * (SR)^2 + 0.96 * (SR) + 0.47$	0.980	$0.0008 * (FC)^2 - 1.00 * (FC) + 94.36$	0.947
Linier Moreno & Maroto	$0.90 * (SR) + 1.33$	0.979	$-0.87 * (FC) + 88.76$	0.949
Kuadrat Moreno & Maroto	$0.002 * (SR)^2 + 0.76 * (SR) + 3.36$	0.980	$0.003 * (FC)^2 - 1.29 * (FC) + 101.64$	0.951

Tabel 6. Plastisitas potensial model regresi substitusi bertingkat Casagrande dan Moreno & Maroto

Model Regresi	Plastisitas potensial parameter FC
Linier Casagrande	$31.9 * \ln (PI) + 0.388 * (FC) - 107.62$
Kuadrat Casagrande	$31.9 * \ln (PI) + (1.408 * 10^{-10}) * (FC)^4 - (3.52 * 10^{-7}) * (FC)^3 - (8.47 * 10^{-5}) * (FC)^2 + 0.38 * (FC) - 108$
Linier Moreno & Maroto	$31.9 * \ln (PI) + 0.344 * (FC) - 105.63$
Kuadrat Moreno & Maroto	$31.9 * \ln (PI) + (7.92 * 10^{-9}) * (FC)^4 - (6.81 * 10^{-6}) * (FC)^3 - (3.0 * 10^{-3}) * (FC)^2 + 0.663 * (FC) - 114.5$

PI adalah indeks plastisitas (%); SC adalah persentase butiran pasir (%); SR adalah rasio fraksi pasir (%); FC adalah persentase kandungan fraksi halus (%), merupakan parameter utama dalam analisis. Proses substitusi dilakukan dengan mengganti nilai SC pada Persamaan [4] menggunakan model regresi antara hubungan SR terhadap *Sand* Tabel 5. Hasil substitusi ini kemudian diintegrasikan kembali ke dalam model regresi FC terhadap SR Tabel 5, sehingga diperoleh Persamaan akhir dengan variabel independen PI dan pendekatan alternatif untuk FC Tabel 6.

Tabel 7. Model regresi substitusi plastisitas potensial Casagrande dan Moreno & Maroto terhadap parameter signifikan korelasi

Model Regresi	Hubungan parameter FC terhadap <i>Sand</i>		Plastisitas potensial parameter FC	
	Persamaan	R ²	Persamaan	
Linier Casagrande	$-0.81 * (FC) + 83.73$	0.871	$31.9 * \ln (PI) + 0.3564 * (FC) - 106.74$	
Kuadrat Casagrande	$-0.001 * (FC)^2 - 0.68 * (FC) + 79.72$	0.872	$31.9 * \ln (PI) + 0.00044 * (FC)^2 - 0.2992 * (FC) - 105$	
Linier Moreno & Maroto	$-0.76 * (FC) + 80.00$	0.870	$31.9 * \ln (PI) + 0.3344 * (FC) - 105.1$	
Kuadrat Moreno & Maroto	$0.003 * (FC)^2 - 1.16 * (FC) + 92.33$	0.872	$31.9 * \ln (PI) - 0.00132 * (FC)^2 + 0.5104 * (FC) - 110.5$	

PI adalah indeks plastisitas (%); FC adalah persentase kandungan fraksi halus (%). Model regresi substitusi langsung dari substitusi pada Persamaan [4] didapatkan persamaan substitusi pada Tabel 7. Untuk plastisitas potensial, semua model memadukan komponen logaritmik $31.9 * \ln(PI)$ dengan variasi polinomial FC.

Tabel 8. Evaluasi kinerja model regresi dengan metode substitusi bertingkat dan langsung

Model Regresi	MSE	R ²	MAE	F-value	p-value	T-Test	p-value
[1] Linier Casagrande substitusi bertingkat	5.55	0.90	2.07	522.5	0.00	-4.325	0.00
[2] Kuadrat Casagrande substitusi bertingkat	4.08	0.93	1.42	732.4	0.00	0.765	0.45
[3] Linier Moreno & Maroto substitusi bertingkat	3.87	0.89	1.45	47.33	0.00	-0.312	0.76
[4] Kuadrat Moreno & Maroto substitusi bertingkat	19.53	0.43	3.61	16.55	0.00	5.506	0.00
[5] Linier Casagrande substitusi langsung	4.01	0.93	1.47	745.25	0.00	-0.09	0.92
[6] Kuadrat Casagrande substitusi langsung	4.01	0.93	1.44	747.01	0.00	-0.008	0.99
[7] Linier Moreno & Maroto substitusi langsung	3.83	0.89	1.43	65.54	0.00	-0.09	0.93
[8] Kuadrat Moreno & Maroto substitusi langsung	3.79	0.89	1.48	176.53	0.00	-0.406	0.69

Pada Tabel 8 evaluasi kinerja model substitusi bertingkat model [1] Kuadrat Casagrande lebih baik dengan R² tertinggi (0.93), MSE rendah (4.08), dan MAE terendah (1.42), meskipun uji-T tidak signifikan ($p\text{-value}=0.45$) Tabel 8. Sebaliknya, model [4] Kuadrat Moreno & Maroto memiliki performa buruk dengan MSE sangat tinggi (19.53)

dan R^2 rendah (0.43), meski uji-T signifikan ($p\text{-value}=0.00$). Model [1] linier Casagrande dan [2] Moreno & Maroto menunjukkan R^2 stabil ($\sim 0.89\text{--}0.90$) tetapi MSE dan MAE lebih tinggi dibandingkan model kuadrat Casagrande. Secara umum, model substitusi bertingkat Casagrande (kuadrat) unggul dalam akurasi prediksi.

Untuk evaluasi kinerja] model substitusi langsung menunjukkan konsistensi lebih baik dengan MSE dan MAE yang lebih rendah secara keseluruhan Tabel 8. Model [5] linier Casagrande dan [6] kuadrat Casagrande mencatat R^2 tertinggi (0.93) dengan MSE rendah (~ 4.01) dan MAE pada 1.44–1.47. Model [8] kuadrat Moreno & Maroto mencapai MSE terendah (3.79) meski R^2 sama dengan model [7] linier (0.89). Namun, sebagian besar model substitusi langsung memiliki nilai $p\text{-value}$ uji-T yang tidak signifikan ($p\text{-value}>0.05$), kecuali model linier Casagrande substitusi bertingkat ($p\text{-value}=0.00$). Performa terbaik pada metode ini ditunjukkan oleh model [6] kuadrat Casagrande substitusi langsung karena kombinasi R^2 tinggi, error rendah, dan F-value signifikan (747.01; $p\text{-value}=0.00$) dengan Persamaan [5]. Alternatif lain yang dapat digunakan adalah model [2] kuadrat Casagrande substitusi bertingkat Persamaan [6].

$$PP (\%) = 31.9 \ln(PI) + 0.00044(FC)^2 - 0.2992(FC) - 105 \dots\dots\dots [5]$$

$$PP (\%) = 31.9 \ln(PI) + 1.408 \cdot 10^{-10}(FC)^4 - 3.52 \cdot 10^{-7}(FC)^3 - 8.47 \cdot 10^{-5}(FC)^2 + 0.38(FC) - 108 \dots\dots\dots [6]$$

KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan metode alternatif untuk menentukan potensi plastisitas pada lempung dengan plastisitas rendah (CL) dengan menggunakan kandungan fraksi halus (FC) sebagai parameter utama. Melalui analisis korelasi Pearson dan regresi linier serta polinomial, penelitian ini menemukan bahwa terdapat hubungan yang signifikan antara kandungan pasir (*sand*), fraksi halus (FC), dan rasio fraksi pasir (SR). Hasil analisis menunjukkan bahwa FC dapat menjadi prediktor yang valid untuk menilai potensi plastisitas tanah, menggantikan pendekatan menggunakan kandungan pasir. Evaluasi performa model menunjukkan bahwa model kuadrat Casagrande substitusi langsung memberikan hasil terbaik dengan R^2 tertinggi dan kesalahan prediksi yang rendah. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa analisis fraksi halus (FC) merupakan pendekatan yang akurat dan dapat menilai potensi plastisitas tanah lempung berplastisitas rendah. Metode ini dapat diterapkan dalam investigasi geoteknik dengan data lokasi yang terbatas, serta memberikan alternatif lain selain potensial plastisitas yang sudah ada.

REKOMENDASI

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk memperluas cakupan sampel dengan mempertimbangkan variasi mineralogi tanah serta kondisi lingkungan yang lebih beragam guna menguji validitas model yang diusulkan pada berbagai kondisi geoteknik. Selain itu, metode regresi yang lebih kompleks, seperti model machine learning, dapat diintegrasikan untuk meningkatkan akurasi prediksi plastisitas tanah.

REFERENSI

- Afolagboye, L. O., Talabi, A. O., & Owoyemi, O. O. (2021). The use of Polidori's plasticity and activity charts in classifying some residual lateritic soils from Nigeria. *Heliyon*, 7(8), e07713. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07713>
- Afriani, L., & Juansyah, Y. (2016). Pengaruh Fraksi Pasir dalam Campuran Tanah Lempung terhadap Nilai CBR dan Indeks Plastisitas untuk Meningkatkan Daya Dukung Tanah Dasar. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Lampung*, 20(1).
- Ahmed, S. M., & Agaiby, S. S. (2020). Strength and stiffness characterization of clays using Atterberg limits. *Transportation Geotechnics*, 25, 100420. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100420>
- Artamonova, N., & Sheshenin, S. (2024). On Identification of Parameters of a Nonlinear Consolidation Model of Sandy Soil. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 0, 31–44. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2024.1.04>
- Casagrande, A. (1948). Classification and Identification of Soils. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 113(1), 901–930. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006109>

- Dhir, R. K., Ghataora, G. S., & Lynn, C. J. (2017). Geotechnical Applications. In *Sustainable Construction Materials* (pp. 185–207). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100987-1.00007-X>
- Dolinar, B. (2010). Predicting the normalized, undrained shear strength of saturated fine-grained soils using plasticity-value correlations. *Applied Clay Science*, 47(3–4), 428–432. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.12.013>
- Dumbleton, M. J., & West, G. (1966). Some factors affecting the relation between the clay minerals in soils and their plasticity. *Clay Minerals*, 6(3), 179–193. <https://doi.org/10.1180/claymin.1966.006.3.05>
- Firincioglu, B. S., & Bilsel, H. (2023). Unified Plasticity Potential of Soils. *Applied Sciences*, 13(13), 7889. <https://doi.org/10.3390/app13137889>
- Ghahremani, M., Ghalandarzadeh, A., & Moradi, M. (2006). Effect of Plastic Fines on the Undrained Behavior of Sands. *Soil and Rock Behavior and Modeling*, 48–54. [https://doi.org/10.1061/40862\(194\)5](https://doi.org/10.1061/40862(194)5)
- Guimarães, A., da Motta, L. M. G., & Castro, C. D. (2019). Permanent deformation parameters of fine – grained tropical soils. *Road Materials and Pavement Design*, 20, 1664–1681. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1473283>
- Hussain, M., & Sachan, A. (2019). *Volume Compressibility and Pore Pressure Response of Kutch Soils with Varying Plastic and Non-plastic Fines* (pp. 651–665). https://doi.org/10.1007/978-981-13-6713-7_52
- Jradi, L., El Dine, B. S., Dupla, J.-C., & Canou, J. (2022). Influence of low fines content on the liquefaction resistance of sands. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(12), 6012–6031. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1927195>
- Knappett, J., & Craig, R. F. (2019). *Craig's Soil Mechanics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351052740>
- Manafi, M. S. G. (2019a). Soil Plasticity Variability and Its Effect on Soil Classification. *Geotechnical Testing Journal*, 42(2), 457–470. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170273>
- Manafi, M. S. G. (2019b). Soil Plasticity Variability and Its Effect on Soil Classification. *Geotechnical Testing Journal*, 42(2), 457–470. <https://doi.org/10.1520/GTJ20170273>
- Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2015). An accurate, quick and simple method to determine the plastic limit and consistency changes in all types of clay and soil: The thread bending test. *Applied Clay Science*, 114, 497–508. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.06.037>
- Moreno-Maroto, J. M., & Alonso-Azcárate, J. (2017). Plastic Limit and Other Consistency Parameters by a Bending Method and Interpretation of Plasticity Classification in Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 40(3), 467–482. <https://doi.org/10.1520/GTJ20160059>
- Moreno-Maroto, J. M., Alonso-Azcárate, J., & O'Kelly, B. C. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. *Applied Clay Science*, 200, 105955. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>
- Okkels, N. (2018, January). *Modern guidelines for classification of fine soils Lignes directrices modernes pour la classification des sols fins*.
- Papadopolou, A. I., & Tika, T. M. (2016). The effect of fines plasticity on monotonic undrained shear strength and liquefaction resistance of sands. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 88, 191–206. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.04.015>
- Reiffsteck, P. (2005). *Evaluation of erosion of soil used in dykes and earth embankments which are subjected to flood*.
- Shakoor, A. (2016). *Atterberg Limits* (pp. 1–4). https://doi.org/10.1007/978-3-319-12127-7_22-1
- Tsai, P.-H., Lee, D.-H., Kung, G. T.-C., & Hsu, C.-H. (2010). Effect of content and plasticity of fines on liquefaction behaviour of soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 43(1), 95–106. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-019>
- Vardanega, P. J., & Haigh, S. K. (2014). Some Recent Developments in the Determination of the Atterberg Limits. *Advances in Transportation Geotechnics and Materials for Sustainable Infrastructure*, 48–55. <https://doi.org/10.1061/9780784478509.007>
- Wang, M., Chen, P., Yi, P., & Ma, T. (2023). Effect of Fines Content on Pore Distribution of Sand/Clay Composite Soil. *Sustainability*, 15(12), 9216. <https://doi.org/10.3390/su15129216>

- Won, J., Park, J., Kim, J., & Jang, J. (2021). Impact of Particle Sizes, Mineralogy and Pore Fluid Chemistry on the Plasticity of Clayey Soils. *Sustainability*, 13(21), 11741. <https://doi.org/10.3390/su132111741>
- Yusof, N. Q. A. M., & Zabidi, H. (2018). Reliability of Using Standard Penetration Test (SPT) in Predicting Properties of Soil. *Journal of Physics: Conference Series*, 1082, 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1082/1/012094>
- Zulfa, N. I., & Bowo, C. (2023). Tekstur dan Bahan Organik Tanah Serta Hubungannya dengan Batas Atterberg dan Aktivitas Liat. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 10(2), 327–334. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2023.010.2.16>