

# KORELASI SIFAT FISIK-SIFAT MEKANIS LEMPUNG BOBONARO DI TIMOR, SERTA IMPLIKASINYA DALAM PEKERJAAN GEOTEKNIK

Adept T. Titu-Eki<sup>1\*</sup>, Nugraha K. F. Dethan<sup>2</sup>

<sup>1\*)</sup>Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana  
Jl. Adisucipto, Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur, 85228, Indonesia

<sup>2\*)</sup>Program Studi Matematika, Fakultas Pertanian, Universitas Timor  
Jl. El Tari KM 07, Sasi, Kefamenanu, Nusa Tenggara Timur, 85613, Indonesia

(\*)Penulis korespondensi: titueki.adept@staf.undana.ac.id

Received : Februari 2023; Accepted: Mei 2023; Published : Mei 2023

## Abstract

*Many geotechnical problems like slope failures and other infrastructure damage are common in civil and mining projects on the Bobonaro Clay Complex in Timor. Obtaining relevant geotechnical data for a complete engineering analysis is often time-consuming and expensive. Therefore, a study on the relationship between the parameters can be a powerful tool in these situations. Here we used multiple linear regression analysis to determine the correlation between the physical properties (clay content and plasticity index) and mechanical properties (angle of internal friction and cohesion) of the Bobonaro Clay. The data are 53 clay samples from Kupang, East Nusa Tenggara Province. These samples were from geotechnical drilling and Atterberg tests, grain size-hydrometer analysis, and unconsolidated-undrained Triaksial tests. Of all the correlation attempts, we found that only the clay content – plasticity index, and clay content – angle of internal friction exhibited a moderate correlation with a positive trend. The results of the multiple linear regression correlation also failed to express a good model; therefore, it was replaced by simple linear regression analysis. The various factors that need to be considered in a geotechnical correlation study, along with the significance and uniqueness of the Bobonaro clay, are also addressed in this article.*

**Keywords:** Bobonaro clay; shear strength; multiple liniear regression

## Abstrak

Banyak permasalahan geoteknik seperti kegagalan lereng dan kerusakan infrastruktur lainnya sering dihadapi pada pekerjaan sipil maupun tambang yang berada pada Kompleks Lempung Bobonaro di Timor. Untuk dapat memperoleh data-data geoteknik yang relevan untuk melakukan kajian teknik yang lengkap, kadang dibutuhkan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Oleh karena itu, studi hubungan antar parameter dapat dijadikan alat yang berguna dalam hal ini. Disini kami melakukan analisis regresi liniear berganda untuk mengetahui korelasi antara sifat fisik (kadar lempung dan indeks plastisitas) dengan sifat mekanis (sudut geser dalam dan kohesi) lempung Bobonaro. Data yang dianalisa adalah sebanyak 53 sampel lempung yang berasal dari Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Sampel ini didapati dari pemboran geotek dan hasil pengujian Atterberg, analisis ayakan- hidrometer, dan uji triaksial UU. Dari semua korelasi yang dilakukan, didapati bahwa hanya kadar lempung – indeks plastisitas, dan kadar lempung – sudut geser dalam yang memiliki korelasi dengan kategori sedang, serta menunjukkan trend yang positif. Hasil korelasi regresi liniear berganda pun gagal untuk mendapatkan model yang baik, sehingga kita dapat menggantikannya menggunakan analisis regresi liniear sederhana. Berbagai faktor yang perlu dipertimbangkan dalam studi korelasi geoteknik, serta signifikansi dan keunikan lempung Bobonaro juga didiskusikan dalam artikel ini.

**Kata kunci:** lempung Bobonaro; kuat geser; regresi liniear berganda

## PENDAHULUAN

Lempung Bobonaro merupakan bagian dari satuan batuan Kompleks Bobonaro (Rosidi dkk, 1979), yang secara litologi terdiri atas lempung bersisik (*scaly clay*) dan bongkah-bongkah

(fragmen) asing dengan berbagai macam ukuran. Lempung ini tersebar luas dan mendominasi  $\pm 35\%$  dari permukaan pulau Timor (**Gambar 1**). Asal-usul satuan ini masih menjadi perdebatan hingga sekarang, dan telah diinterpretasikan sebagai

endapan *syn-orogenic* yang terbentuk sebagai produk melangé, olistostrome, maupun intrusi *shale diapirism* (Audley-Charles, 1965a; Hamilton, 1979, Barber dkk, 1986; Barber, 2013). Secara geoteknik, studi mengenai Lempung Bobonaro masih tergolong langka, walaupun telah banyak ditemui kegagalan struktur pada lempung yang sering dijuluki “tanah problematik” ini.

Masalah kestabilan lereng di lempung Bobonaro telah banyak didapati di pulau Timor, seperti pada pekerjaan tambang Mangan di daerah Fatuleu, Wini, dan Supul, serta pekerjaan pembangunan infrastruktur bendungan di Rotiklot (Belu), Temef (Timor Tengah Selatan), Raknamo dan Manikin (Kupang). Demikian juga kerusakan yang terdapat pada pekerjaan infra-struktur jalan, khususnya Jalan Timor Raya yang melalui satuan lempung Bobonaro (Fernandez, 2007; Saleh & Fitra, 2022). Walaupun sifat kembang-susut lempung ini yang sering disoroti sebagai persoalan utama dalam pekerjaan geotek, hal yang masih kurang mendapat perhatian adalah sifat mekanisnya, seperti nilai kuat geser lempung.

Tanah secara umum dapat runtuh/gagal (*fail*) disaat butir-butir tanah bergeser diatas satu sama lain sepanjang permukaan runtuh. Kekuatan geser tanah merupakan perlawanan internal tanah terhadap tegangan yang bekerja sepanjang bidang geser tersebut, dan biasanya dideskripsikan dengan kriteria Mohr-Coulomb:

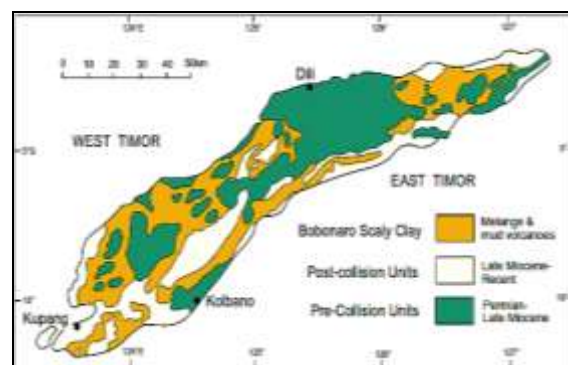
$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (1)$$

dimana  $\tau$  adalah kuat geser,  $\sigma$  adalah tegangan normal,  $\phi$  adalah sudut geser, dan  $C$  adalah kohesi. Dari persamaan ini, nampak bahwa kuat geser tanah terdiri dari dua komponen independen, yakni gesekan/friksi ( $\sigma \tan \phi$ ) dan kohesi ( $C$ ). Nilai-nilai ini dapat diperoleh dari uji kuat tekan triaksial (*Triaksial compression test*) maupun uji kuat geser (*direct shear test*).

Parameter-parameter tanah yang digunakan dalam kajian geoteknik secara umum dapat diklasifikasi menjadi dua, yakni sifat fisik (kadar air, berat jenis, Atterberg limit, dan lain-lain) dan sifat mekanis (sudut geser, kohesi, dan lain-lain). Untuk mengetahui semua karakteristik/sifat fisik-mekanis tanah, butuh waktu dan biaya yang tidak sedikit, apalagi dengan adanya tuntutan proyek/pekerjaan dalam jumlah yang banyak dan jangka waktu pengerjaan yang terbatas. Oleh sebab itu, adanya keperluan untuk meng-estimasi sebagian karakteristik tersebut dari parameter yang sudah tersedia, dan/ atau diperoleh dari pengujian-pengujian sebelumnya.

Tujuan studi ini adalah untuk mengetahui bagaimana hubungan antara sifat fisik dan sifat mekanis yang terlekat pada lempung Bobonaro, serta meninjau karakteristik serta implikasinya terhadap pekerjaan-pekerjaan geoteknik. Yang

merepresentasi-kan sifat fisik disini adalah kadar lempung dan indeks plastisitas, sedangkan untuk sifat mekanisnya, yang akan ditinjau adalah nilai sudut geser dalam, dan kohesi. Alasan memilih kadar lempung dan indeks plastisitas sebagai parameter representatif dari sifat fisik lempung, adalah karena asumsi adanya pengaruh kehadiran fragmen-fragmen asing dalam matriks lempung *mélange* yang dicurigai memengaruhi nilai kuat geser tanah, dan selebihnya, sebagai salah satu penyebab kegagalan struktur. Atas dasar asumsi ini, maka kehadiran/ketidakhadiran fragmen dapat direpresentasikan dengan kadar lempung dan indeks plastisitas, sebab fraksi lempung dan indeks plastisitas akan cenderung lebih sedikit dengan kehadiran fragmen-fragmen tersebut.



**Gambar 1.** Sebaran Lempung Bobonaro di Timor (warna oranye). Gambar diambil dari Barber, 2013.

## PENELITIAN TERDAHULU

Studi mengenai Lempung Bobonaro di Timor sudah dilakukan sejak tahun 1960an, namun penelitian-penelitian tersebut lebih mengarah ke karakteristik umum, litostratigrafi, dan signifikansinya terhadap evolusi tektonik dan geodinamika Timor dan Indonesia Timur. Studi menyangkut sifat fisik-mekanis lempung Bobonaro baru mendapat perhatian sejak tahun 1990an, saat pekerjaan infrastruktur di Timor mulai ber-kembang. Studi yang berkaitan dengan sifat fisik dan teknis/mekanis tanah lempung Bobonaro beberapa diantaranya; menyangkut kerusakan jalan dan lereng (Fernandez, 2007; Saleh & Fitra, 2022; Saleh, 2023), pertimbangan sebagai material timbunan bendungan urugan (Affandi, 2000), sifat kimia (Audley-Charles, 1965b; Yassir, 1987; Lisboa dkk, 2019; Funay dkk, 2022) dan korelasi akan sifat kembang-susutnya (Vong, 2016). Tentunya masih terdapat studi-studi lainnya yang belum terekam, namun yang menjadi persoalan ialah pengarsipan data yang buruk dan akses publik yang masih belum memadai.

Dengan adanya keterbatasan data dan kajian geoteknik, maka studi empiris sangat berguna dalam penentuan/ estimasi nilai-nilai parameter yang dibutuhkan dalam analisa keteknikan. Ada beberapa penelitian yang melakukan kajian yang mirip dengan studi ini, berkaitan dengan korelasi antar-parameter

(sifat fisik-mekanis) lempung. Yang pertama adalah hubungan antara indeks plastisitas dengan kadar lempung, dan telah diketahui secara umum bahwa indeks plastisitas cenderung akan meningkat dengan meningkatnya kadar lempung, atau dengan kata lain, kedua parameter ini berkorelasi positif (Yin, 1999; Akayuli dkk, 2013; Ma'arif & Gofar, 2021). Beberapa studi juga menyatakan bahwa kadar lempung berkorelasi negatif dengan nilai sudut geser, atau dengan kata lain; semakin tinggi kadar lempung, maka semakin kecil nilai sudut geser lempung (Tiwari & Marui, 2005; Akayuli dkk, 2013; Rambe dkk, 2016). Hal ini berlaku bagi tanah residual, maupun lempung tipe *mélange*, seperti di Siprus (Charalambous dkk, 1986). Walaupun demikian, ada juga kasus dimana kadar lempung dan nilai sudut geser berkorelasi positif, seperti data-data yang dirangkum oleh Štuhec dkk (2019). Studi-studi lainnya juga telah menyimpulkan bahwa nilai kohesi tanah akan meningkat dengan meningkatnya kadar lempung dalam tanah tersebut (Akayuli, 2013; Nurdian dkk, 2015; Rambe dkk, 2016; Wibisono dkk, 2018).

Menyangkut korelasi parameter indeks plastisitas lempung, beberapa penelitian menyimpulkan bahwa indeks plastisitas dan sudut geser dalam saling berelasi. Secara umum, hubungan indeks plastisitas dengan sudut geser adalah; semakin kecil indeks plastisitas, maka semakin tinggi nilai sudut geser dalam, atau dengan kata lain berkorelasi negatif (Montgomery, 1974; Terzaghi dkk, 1996; Bowles, 1997; Masada, 2009; Sorensen & Okkels, 2013; Kluger dkk, 2019; Štuhec dkk, 2019). Hal ini berlaku umum untuk lempung dengan berbagai variasi komposisi mineralogi (Tiwari & Marui, 2005). Hasil yang berbeda terdapat dalam pengujian Nurdian dkk (2015), dimana *trend* korelasi negatif ini berlaku saat pengujian menggunakan *direct shear test*, sedangkan pada pengujian triaksial *unconsolidated undrained*, hasil yang didapatkan berupa korelasi positif. Secara kontras, terdapat juga beberapa kasus yang mencatat bahwa nilai sudut geser dapat menjadi tinggi, walaupun indeks plastisitasnya tinggi (berkorelasi positif), seperti dalam studi Ahmed (2018). Yang terakhir adalah hubungan antara indeks plastisitas dengan nilai kohesi pada lempung. Ada banyak variasi hasil korelasi terhadap kedua parameter ini; berkorelasi positif dengan sifat hubungan yang kuat (Tchakalova & Ivanov, 2021; Ramadhani, 2015) berkorelasi positif dengan sifat hubungan yang sangat lemah (Ardhani dkk, 2022), berkorelasi negatif (Verdiyanti dkk, 2022), dan bahkan dapat juga menunjukkan hasil non-korelatif (Montgomery, 1974).

## DATA DAN METODOLOGI

Data yang digunakan dalam studi ini diperoleh dari proyek pekerjaan pembangunan Bendungan Manikin di Kecamatan Taebenu, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur.

10 titik pemboran coring telah dilakukan sepanjang pekerjaan *conduit* terowongan yang berfungsi sebagai saluran pengelak dan kemudian akan dialihfungsikan sebagai saluran pelimpah. Terowongan ini dibangun melalui bukit-bukit yang secara litologi terdiri dari satuan lempung Bobonaro dengan ketebalan >300 m. Lempung Bobonaro cenderung lebih tebal pada daerah selatan pulau Timor, tempat dimana terakumulasinya endapan *syn-post orogenic* (awal-akhir Neogene) secara dominan, sebab terletak dekat *collision-front* antara lempeng Australia dan Busur Banda. Di sebagian area bendungan juga hadir Formasi Noele (batugamping klastik dan napal berumur Plio-Pleistosen) yang ditindih oleh batugamping koral berumur kuartar dengan ketebalan yang bervariasi.

Pengambilan sampel hasil pengeboran *coring* dilakukan pada setiap interval 5 meter, sehingga total sampel yang digunakan dalam kajian ini berjumlah 53 (Tabel 1). Sampel tersebut diuji di Laboratorium Banyu Bumi Sangkara di Bandung.

Jenis pengujian yang dilakukan ialah Triaksial *Unconsolidated Undrained* (UU), dimana pada pengujian triaksial ini, tidak diperkenankan adanya perubahan kadar air pada benda uji, sehingga sampel tidak terkonsolidasi, dan air pori tidak teralir saat diaplikasikan tegangan geser. Metode ini berbeda dengan *Consolidated Undrained* (CU) dan *Consolidated Drained* (CD) dimana hasil yang diperoleh berupa nilai tegangan efektif, sedangkan pada pengujian UU hanya memperoleh nilai tegangan total. Tegangan efektif dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2)$$

dimana  $\sigma'$  adalah tegangan efektif,  $\sigma$  adalah tegangan total, dan  $u_w$  adalah tekanan air pori. Proses pengujian UU berlangsung lebih cepat dan tidak melalui tahap saturasi maupun konsolidasi, sedangkan CU dan CD dimulai selama tahap saturasi yang kemudian berlanjut ke tahap konsolidasi. Analisis ayakan dan hidrometer juga dilakukan untuk menentukan nilai kadar lempung, sedangkan indeks plastisitas didapati dari pengujian Atterberg limit, dengan menerapkan sistem klasifikasi tanah USCS.

Metode analisis korelasi yang digunakan dalam studi ini adalah regresi linier berganda, dengan tujuan untuk mengetahui ketergantungan variabel terikat dengan satu atau lebih variabel bebas. Data dianalisa menggunakan *software* StudioR untuk mencari hubungan antar variabel bebas dan mengestimasi kuat-hubungan antar variabel menggunakan korelasi Pearson dan uji-F. Uji-F digunakan untuk menentukan signifikansi dari semua model regresi, lalu mendeteksi jika variabel terikat dapat digunakan untuk mem-prediksi model. Metode regresi linier berganda ini akan diterapkan pada parameter sudut geser dalam ( $\phi$ ) dan kohesi

(C), masing-masing sebagai variabel terikat, dan kadar lempung serta indeks plastisitas sebagai variabel bebas.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hubungan Antar Parameter

Untuk kemudahan dalam penjelasan hasil analisa korelasi antar parameter, maka diberlakukan simbol dan singkatan sebagai berikut: Indeks plastisitas (IP), kadar lempung/ *clay content* (CC), sudut geser dalam/ *angle of internal friction* (AI atau  $\phi$ ), dan kohesi (atau C). **Tabel 2** menunjukkan nilai korelasi antar variabel (berpasangan), dan **Gambar 2** menunjukkan grafik sebar (scatterplot) untuk melihat pola umum hubungan antara 2 variabel dari setiap parameter.

Untuk mendapat gambaran besar mengenai hubungan antar variabel, telah disertakan garis (dan bidang) persamaan regresi yang terdapat dalam **Gambar 3, 4, 5**. Metode yang digunakan untuk memperoleh persamaan-persamaan ini adalah Metode Kuadrat Terkecil (Least Square Method). Secara umum, model yang digunakan untuk memperoleh persamaan regresi pada **Gambar 3** adalah

$$y = \beta_0 + \beta_1 x, \quad (3)$$

di mana  $y$  merupakan variabel terikat,  $x$  sebagai variabel bebas, dan  $\beta_0$  dan  $\beta_1$  sebagai koefisien regresi. Sedangkan model yang digunakan untuk memperoleh persamaan (bidang) regresi pada **Gambar 4, 5**, adalah

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2, \quad (4)$$

di mana  $y$  merupakan variabel terikat,  $x_1$  dan  $x_2$  sebagai variabel bebas, dan  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  dan  $\beta_2$  merupakan koefisien regresi. Untuk penjelasan lebih lanjut tentang bagaimana memperoleh koefisien-koefisien regresi, lihat Frost (2019).

**Tabel 1.** Data tanah hasil pengeboran geotek di Taebenu (Kupang), dan pengujian *Atterberg*, analisis ayakan-hidrometer, serta pengujian Triaksial UU di Bandung.

| Sampel Code | Depth (m)   | Plasticity Index (%) | Clay Content (%) | Angle of Internal Friction (°) | Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> ) | Soil Type |
|-------------|-------------|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| INA GT-76   | 05.00-05.50 | 41,30                | 74,90            | 11,54                          | 2,76                           | CH        |
|             | 09.00-09.50 | 51,11                | 70,00            | 4,86                           | 1,16                           | CH        |
|             | 14.50-15.00 | 30,67                | 67,02            | 13,64                          | 2,73                           | CH        |
|             | 21.00-21.50 | 52,41                | 67,80            | 17,52                          | 4,42                           | CH        |
|             | 24.00-24.50 | 36,03                | 66,60            | 43,73                          | 0,81                           | CH        |
|             | 25.00-25.50 | 31,43                | 66,20            | 29,87                          | 0,59                           | CH        |
|             | 37.00-37.50 | 44,16                | 74,50            | 27,41                          | 1,92                           | CH        |
|             | 05.00-05.50 | 40,43                | 63,50            | 21,32                          | 0,17                           | CH        |
|             | 09.50-10.00 | 35,23                | 67,55            | 11,77                          | 0,71                           | CH        |
|             | 14.50-15.00 | 33,10                | 67,55            | 17,69                          | 0,13                           | CH        |
| INA GT-16   | 19.50-20.00 | 31,34                | 62,65            | 0,19                           | 1,64                           | CH        |
|             | 25.00-25.50 | 30,75                | 63,45            | 30,07                          | 0,47                           | CH        |
|             | 29.00-29.50 | 31,42                | 72,55            | 27,12                          | 0,95                           | CH        |
|             | 34.50-35.00 | 25,55                | 63,50            | 27,23                          | 0,33                           | CH        |
|             | 40.50-41.00 | 30,98                | 65,20            | 8,07                           | 1,54                           | CH        |
|             | 45.00-45.50 | 33,59                | 58,85            | 16,65                          | 1,81                           | CH        |
|             | 49.50-50.00 | 35,76                | 66,75            | 9,62                           | 2,09                           | CH        |
|             | 54.50-55.00 | 37,99                | 67,55            | 21,87                          | 1,70                           | CH        |
|             | 59.00-59.50 | 34,69                | 62,20            | 11,02                          | 1,87                           | CH        |

| Sampel Code | Depth (m)   | Plasticity Index (%) | Clay Content (%) | Angle of Internal Friction (°) | Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> ) | Soil Type |
|-------------|-------------|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------|
| INA GT-19   | 65.00-65.50 | 33,33                | 55,45            | 14,28                          | 2,00                           | CH        |
|             | 04.00-04.50 | 23,66                | 57,85            | 3,71                           | 0,10                           | CL        |
|             | 09.00-09.50 | 34,25                | 67,95            | 7,82                           | 0,31                           | CL        |
|             | 14.50-15.00 | 18,25                | 52,25            | 5,60                           | 1,95                           | CL        |
|             | 19.00-19.50 | 34,36                | 55,25            | 12,69                          | 1,00                           | CH        |
|             | 24.00-24.50 | 27,37                | 63,55            | 7,29                           | 1,60                           | CL        |
|             | 29.50-30.00 | 24,77                | 63,68            | 16,07                          | 0,76                           | CL        |
|             | 34.50-35.00 | 19,93                | 59,76            | 27,12                          | 0,40                           | CL        |
|             | 40.00-40.50 | 28,36                | 63,68            | 8,56                           | 0,95                           | CL        |
|             | 44.50-45.00 | 35,45                | 61,50            | 2,07                           | 0,94                           | CH        |
| INA GT-22   | 54.00-54.50 | 24,59                | 53,55            | 10,30                          | 0,79                           | CL        |
|             | 59.50-60.00 | 25,58                | 60,75            | 3,53                           | 0,97                           | CL        |
|             | 65.00-65.50 | 27,11                | 56,95            | 5,22                           | 2,67                           | CL        |
|             | 69.00-69.50 | 21,92                | 46,56            | 1,75                           | 3,71                           | CL        |
|             | 74.00-74.50 | 31,28                | 61,05            | 5,70                           | 1,74                           | CH        |
|             | 79.50-80.00 | 27,54                | 69,70            | 14,52                          | 0,77                           | CL        |
|             | 38.40-38.90 | 26,35                | 45,70            | 17,10                          | 0,12                           | CL        |
|             | 42.90-43.40 | 43,91                | 56,70            | 16,39                          | 0,28                           | CH        |
|             | 04.50-05.00 | 30,01                | 50,41            | 18,63                          | 0,26                           | CH        |
|             | 09.50-10.00 | 30,35                | 51,36            | 3,60                           | 0,81                           | CH        |
| INA GT-23   | 14.50-15.00 | 28,14                | 54,08            | 6,20                           | 0,44                           | CH        |
|             | 19.50-20.00 | 32,63                | 50,88            | 8,69                           | 0,48                           | CH        |
|             | 36.00-36.50 | 29,47                | 49,00            | 2,68                           | 0,14                           | CH        |
|             | 40.00-40.50 | 37,99                | 71,00            | 10,70                          | 0,33                           | CH        |
| INA GT-28   | 27.00-27.50 | 32,57                | 62,23            | 13,50                          | 0,72                           | CH        |
|             | 31.00-31.50 | 29,57                | 47,05            | 12,98                          | 0,17                           | CH        |
| INA GT-24   | 36.20-36.70 | 26,34                | 40,55            | 10,63                          | 1,04                           | CL        |
|             | 39.20-39.70 | 20,79                | 46,98            | 13,55                          | 0,30                           | CL        |
| INA GT-25   | 32.50-33.00 | 51,31                | 50,07            | 2,37                           | 0,39                           | CH        |
|             | 35.50-36.00 | 39,13                | 59,7             | 4,46                           | 1,46                           | CH        |
| INA GT-26   | 30.20-30.70 | 38,35                | 45,15            | 9,64                           | 0,11                           | CH        |
|             | 33.70-34.20 | 23,95                | 29,12            | 1,45                           | 0,01                           | CL        |
| INA GT-27   | 53.50-54.00 | 40,77                | 62,50            | 14,50                          | 0,96                           | CH        |
|             | 56.00-56.50 | 39,24                | 50,38            | 1,35                           | 0,25                           | CH        |

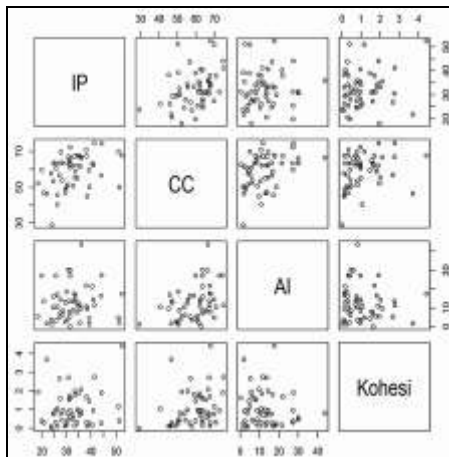
Hasil *output* statistik regresi linear sederhana antara IP sebagai variabel terikat, dan CC sebagai variabel bebas, terlihat bahwa CC merupakan prediktor signifikan untuk IP (pada level signifikansi 0.05). Hasil uji statistik F juga mengindikasikan (pada level signifikansi 0.05) bahwa CC benar-benar berelasi dengan IP (**Gambar 3.a**). Korelasi Pearson antara dua variabel ini adalah 0.38, yang berarti korelasi kategori sedang. Hal ini sesuai dengan asumsi umum bahwa CC berkorelasi dengan IP. Yang sedikit berbeda dalam *output* ini adalah korelasi yang nampak antara IP dan CC lebih lemah daripada penelitian-penelitian sebelumnya, seperti Yin (1999) dan Akayuli, dkk (2013).

Dari *output* statistik regresi linear sederhana antara AI sebagai variabel terikat dan CC sebagai variabel bebas, menunjukkan bahwa CC merupakan prediktor signifikan untuk AI (pada level signifikansi 0.05). Hasil uji statistik F menunjukkan adanya korelasi antara CC dengan AI (**Gambar 3.b**). Korelasi Pearson antara dua variabel ini adalah 0.39, yakni masuk ke dalam korelasi kategori sedang. Hal ini sesuai dengan asumsi umum bahwa CC berkorelasi dengan AI. Dari *output* statistik ini, AI dan CC memiliki korelasi positif, yakni kenaikan dalam CC akan menyebabkan kenaikan pada AI pula. Hal ini sama seperti yang dilaporkan oleh Štuhec dkk (2019) dimana AI dan CC berkorelasi positif, namun berbeda dengan Akayuli, dkk (2013), di mana AI dan CC berkorelasi negatif.

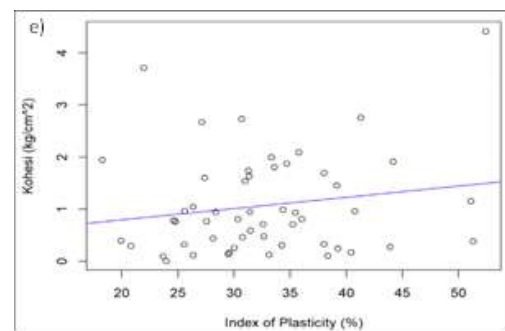
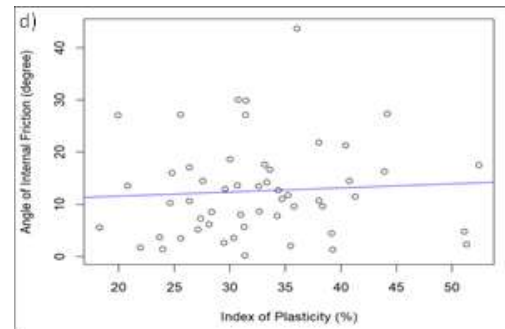
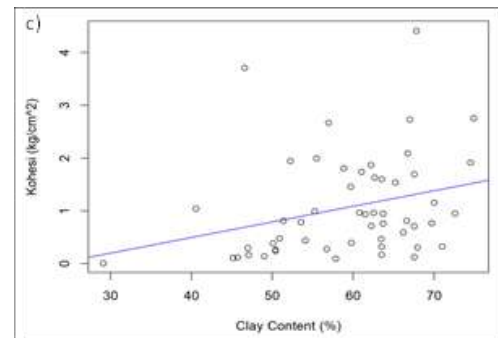
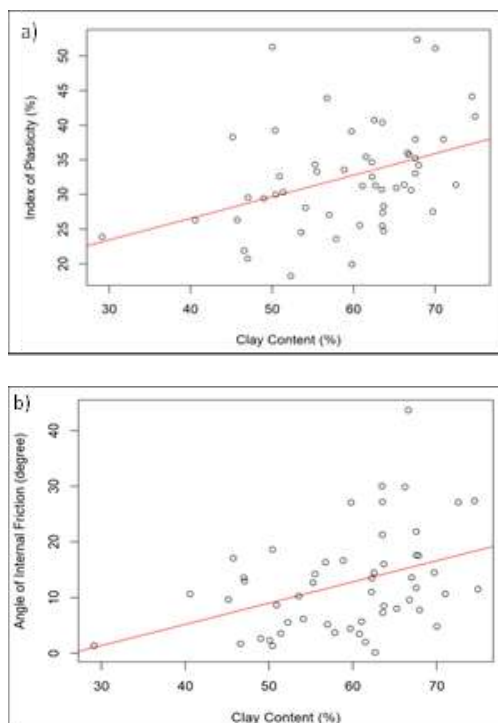
**Tabel 2.** Korelasi (in pair) dari keempat parameter

| IP | CC | AI | Kohesi |
|----|----|----|--------|
|----|----|----|--------|

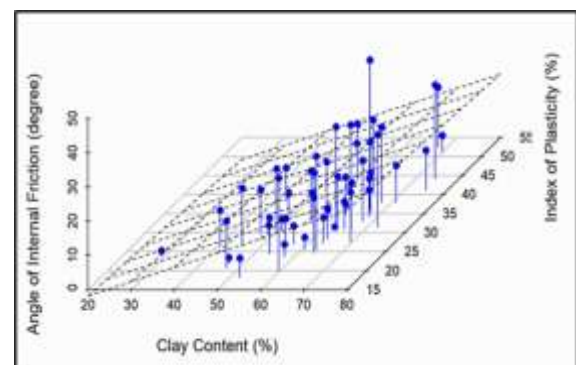
|        | IP         | CC        | AI         | Kohesi     |
|--------|------------|-----------|------------|------------|
| IP     | 1.00000000 | 0.3816101 | 0.06674113 | 0.17242867 |
| CC     | 0.38161013 | 1.0000000 | 0.39246816 | 0.28932528 |
| AI     | 0.06674113 | 0.3924682 | 1.00000000 | 0.09588326 |
| Kohesi | 0.17242867 | 0.2893253 | 0.09588326 | 1.00000000 |



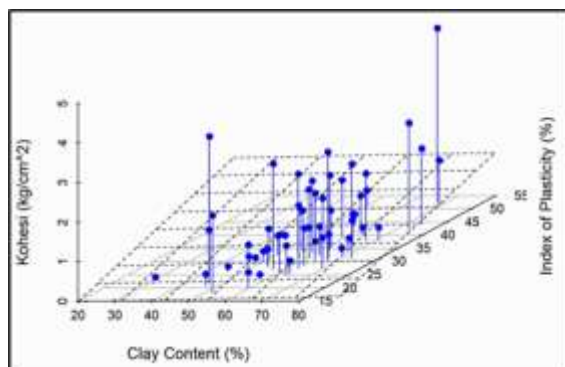
**Gambar 2.** Scatterplot (in pair) untuk keempat parameter



**Gambar 3.** Hasil korelasi antar variabel; (a) CC-IP dengan nilai korelasi 0.38 (b) CC-AI dengan nilai korelasi 0.39 (c) CC-Kohesi dengan nilai korelasi 0.29 (d) IP-AI tidak berelasi (e) IP-Kohesi tidak berelasi.



**Gambar 4.** Korelasi  $AI = CC + IP$



**Gambar 5.** Korelasi Kohesi CC+IP

Berdasarkan *output* statistik regresi linear sederhana antara Kohesi sebagai variabel terikat dan CC sebagai variabel bebas, terlihat bahwa CC merupakan prediktor signifikan untuk Kohesi (pada level signifikansi 0.05). Hasil uji *statistic* F menunjukkan bahwa CC berelasi dengan Kohesi (**Gambar 3c**). Korelasi Pearson antara dua variabel ini adalah 0.29, yakni korelasi kategori lemah. Hal ini sedikit berbeda dengan hasil analisis dari penelitian-penelitian sebelumnya, seperti oleh Akayuli, dkk (2013), yang menunjukkan bahwa CC dan Kohesi memiliki tingkat korelasi yang tinggi.

Uji *statistic* F mengindikasikan (pada level signifikansi 0.05) bahwa IP- AI dan IP-Kohesi tidak berelasi (**Gambar 3d dan 3e**). Hal ini sangat berbeda dengan anggapan umum bahwa IP tanah dengan AI berelasi, seperti dalam Terzaghi dkk (1996), Bowles (1997) dan lain-lain. Sebaliknya, sifat non-korelatif antara IP-Kohesi lebih dapat diterima jika disandingkan terhadap berbagai studi sebelumnya.

Dari *output* statistik regresi linear berganda antara AI sebagai variabel terikat, dan CC beserta IP sebagai variabel bebas, terlihat bahwa hanya CC saja yang merupakan prediktor signifikan untuk AI (pada level signifikansi 0.05) (**Gambar 4**). Ini berarti variabel IP dapat dikeluarkan dan kita dapat menggunakan regresi linear sederhana antara AI dan CC. Sedangkan pada *output* regresi linear berganda antara Kohesi sebagai variabel terikat, dan CC beserta IP sebagai variabel bebas, terlihat dari uji F (dengan level signifikansi 0.05) (**Gambar 5**) bahwa model regresi berganda ini bukan model yang baik, sehingga perlu dilakukan uji multikolinearitas dan lainnya untuk mengambil kesimpulan lebih lanjut.

Berdasarkan penjelasan diatas, nampak bahwa hanya dua jenis hubungan antar parameter (in pair) yang berelasi dengan korelasi kategori sedang, yakni CC–IP dan CC–AI. Hasil regresi linear berganda pada studi ini gagal untuk mendapatkan model yang baik (**Gambar 4 & 5**), sehingga hubungan antar variabel hanya dapat dinyatakan dalam persamaan linear sederhana. Persamaan regresi linear sederhana untuk kadar lempung dan indeks plastisitas (CC–IP, **Gambar 3a**) adalah:

$$\text{Indeks Plastisitas} = 14.087 + 0.312X \quad (5)$$

dimana X adalah persentase kadar lempung. Sedangkan persamaan regresi linear sederhana untuk kadar lempung (CC) dan sudut geser dalam (AI) (**Gambar 3b**) adalah:

$$\text{Sudur Geser Dalam} = -10.085 + 0.382X \quad (6)$$

dimana X adalah persentase kadar lempung.

### Pertimbangan dalam Pekerjaan Geoteknik

Seperti yang telah dibahas sebelumnya, korelasi antar-parameter seringkali digunakan dalam pekerjaan-pekerjaan geoteknik, sebab cara ini dapat menyediakan estimasi parameter (data) dengan cepat dan hemat biaya melalui pengujian-pengujian sederhana. Walaupun demikian, ada beberapa faktor yang perlu diper-timbangkan dalam mengandalkan hasil korelasi ini, sehingga dapat diaplikasikan dengan tepat dalam pekerjaan-pekerjaan geoteknik. Faktor-faktor tersebut dapat berupa kondisi geologi di lokasi proyek, tinjauan pada studi-studi sebelumnya, serta pengalaman *engineer* di lapangan, maupun dalam melakukan analisa.

Contoh, di dalam studi ini, hasil korelasi antara CC–AI menunjukkan korelasi positif, sebanding dengan hasil yang ditampilkan dalam Štuhec dkk (2019), dimana hasil korelasi CC–AI dalam kajiannya menunjukkan deviasi yang terkecil diantara pengujian lainnya. Walaupun demikian, Štuhec dkk (2019) pun mengakui bahwa kedua parameter ini pada umumnya tidak berelasi. Hal ini berbeda dengan hasil korelasi negatif yang didapatkan dalam Akayuli, dkk (2013). Tren korelasi yang bervariasi ini mungkin dikarenakan sampel yang diuji Akayuli, dkk (2013) memiliki persentase lempung yang sedikit (<40%) dibandingkan Štuhec dkk (2019) yang memiliki jumlah sampel yang lebih banyak (n=230), dengan presentasi kadar lempung yang bervariasi. Di lain pihak, Akayuli, dkk (2013) memiliki penjelasan yang logis terhadap hasil korelasi negatifnya. Dengan mengutip Wang dkk (2009), mereka menyatakan bahwa pada kondisi tanah dengan kuantitas butiran halus yang sedikit, butiran halus tersebut akan cenderung mengisi rongga-rongga butiran kasar. Oleh karena beban yang diterapkan (dalam pengujian) lebih banyak ditanggung oleh butiran-butiran kasar, butiran-butiran yang halus ini memiliki pengaruh yang kecil terhadap tanah secara keseluruhan (sebab hanya berfungsi untuk mengisi kekosongan rongga), sehingga nilai sudut gesernya menjadi besar.

Dalam kesimpulannya, Štuhec dkk (2019) menyebutkan bahwa indeks plastisitas merupakan indikator tidak langsung untuk mengestimasi nilai kuat geser pada tanah kohesif. Namun hal ini nampaknya tidak berlaku pada satuan lempung Bobonaro, sebab semua parameter kuat geser dalam

studi ini tidak berelasi dengan indeks plastisitas. Hal yang sama juga didapati pada lempung organik, dimana nilai gudit geser tidak berkorelasi dengan indeks plastisitas (Montgomery, 1974).

Faktor-faktor eksternal lainnya juga patut menjadi pertimbangan dalam hal korelasi antar parameter tanah. Salah satu yang dapat dipertimbangkan adalah mineralogi lempung. Studi komposisi mineralogi lempung Bobonaro menyatakan bahwa lempung ini didominasi oleh Smektit (montmorillonite) (Audley-Charles, 1965b; Affandi, 2000; Fernandez, 2007). Kontras dengan ini, studi lainnya mendapatkan dominasi mineral illit (Barber dkk, 1986; Yassir, 1987; Lisboa dkk, 2019; Funay dkk, 2022), illit-smektit (Harris dkk, 1998), serta kaolinit (Lisboa dkk, 2019). Terlepas dari variasi konten mineralogi lempung Bobonaro (yang tentunya dapat diteliti lebih lanjut untuk mengetahui sifat homogenitas lempung ini di daerah Timor), persentase *montmorillonite* dalam tanah pada batasan tertentu, dapat berpengaruh terhadap besarnya nilai kuat geser. Hubungan ini sebanding dengan korelasi CC-AI dan CC-Kohesi dalam studi ini, sebab persentase lempung (CC) Bobonaro dapat mencerminkan persentase mineral lempung *montmorillonite*. Beberapa studi lainnya juga menemukan bahwa persentase *montmorillonite* berkorelasi negatif terhadap  $\phi'$  (Hattab dkk, 2015; Putri dkk, 2016) dan berkorelasi positif terhadap C (Putri dkk, 2016; Charkley dkk, 2019).

Berdasarkan Terzaghi (1996), *montmorillonite*-Na (dengan sodium/ natrium yang dominan) memiliki nilai sudut geser efektif yang kecil dengan kisaran nilai 15-35°. Biasanya  $\phi$  yang besar akan menunjukkan kadar lempung yang kecil pula, dan ini berlaku terhadap setiap indeks plastisitas. Hal ini sesuai dengan model dalam studi kami.

Selain sudut geser, tipe lempung dengan komposisi *montmorillonite*-Na yang dominan cenderung memiliki sifat kembang-susut yang tinggi (Chen, 1975) dan dispersif yang tinggi pula (Bell & Maud, 1994; Djarwadi, 2009). Hal ini nampak pada lempung Bobonaro yang memiliki komposisi mineralogi yang sama (*montmorillonite*-Na, berdasarkan hasil pengujian XRD lempung Bobonaro di Bendungan Manikin, Kupang. Konten mineralogi lempung ini akan dibahas dalam artikel terpisah). Jadi selain dari kegagalan akibat sifat kuat geser yang lemah, sifat destruktif lainnya seperti kembang-susut dan dispersif patut diperhatikan pula.

Sesuai hasil dan pembahasan diatas, dapat disimpulkan bahwa estimasi korelasi tidak mungkin diandalkan sepenuhnya jika data hasil korelasi berasal dari daerah yang berbeda. Atau dengan kata lain, dalam memprediksi sifat tanah, faktor ketergantungan daerah (regional dependency) itu sangat tinggi. Oleh karena itu, ketidakakuratan dapat diperoleh jika korelasi tersebut diterapkan ke daerah lain dengan mineralogi lempung yang bervariasi, gradasi, kondisi tegangan (stress) yang berbeda dan/

atau faktor eksternal lainnya. Maka dalam konteks ini, estimasi parameter tanah pada daerah yang sama (secara geologi) diekspektasikan dapat menunjukkan estimasi yang lebih akurat dibandingkan korelasi umum yang sering digunakan. Walaupun demikian, korelasi umum dapat diterapkan pada parameter-parameter yang sudah jelas hubungannya, seperti hubungan antara kadar lempung-indeks plastisitas, yang pada umumnya menunjukkan korelasi yang sama (berkorelasi positif) terhadap segala jenis lempung.

Korelasi antar parameter baiknya hanya dilakukan pada tahap awal proyek dimana waktu dan biaya tidak memungkinkan untuk melakukan banyak macam pengujian. Perlu adanya ketelitian dan perhatian pada saat mencoba mengekstrapolasikan data geoteknik antara lokasi pengambilan sampel atau lokasi studi yang berbeda, sebab bisa didapati perbedaan litologi dan karakteristik geoteknik yang belum diketahui sebelumnya. Semisal data geotek di Timor Leste yang diterapkan di Timor Barat, pada batasan tertentu akan memiliki nilai geotek yang berbeda sehingga akan berdampak pada analisa keteknikan secara keseluruhan, walaupun secara karakteristik litologi sama-sama mengindikasinya sebagai lempung Bobonaro. Ini juga nampak pada kandungan mineralogi dalam lempung Bobonaro yang menunjukkan variasi di berbagai daerah di Pulau Timor (Audley-Charles, 1965b; Yassir, 1987; Lisboa dkk, 2019). Permasalahan ini juga yang ditekankan dalam studi Charalambous dkk (1986) di area *ophiolite complex* dan *mélange* di Siprus.

Selain itu, menyangkut metode pengujian kuat geser tanah lempung, akan ada perbedaan antara hasil pengujian menggunakan *direct shear test* dengan uji triaksial, walaupun kadang perbedaannya tidak signifikan. Hal ini disampaikan dalam Medzvieckas dkk (2017) dan Nurdian (2015), dimana nilai  $\phi$  akan cenderung menunjukan nilai yang lebih besar saat penggunaan *direct shear test* dibandingkan pengujian triaksial. Sedangkan nilai C untuk uji triaksial cenderung menunjukan nilai yang lebih besar dibandingkan uji kuat geser (Nurdian, 2015). Namun patut pula dipertimbangkan jenis tanah dan lingkungan pengendapannya, sebab pada lingkungan fluvial dan lakustrin, nilai  $\phi$  cenderung lebih kecil pada pengujian *direct shear*, dibandingkan uji triaksial (Castellanos & Brandon, 2013). Selain itu, perlu dipertimbangkan metode pengujian triaksial yang digunakan, khususnya menyangkut saturasi dan konsolidasi (UU, CU, atau CD), sesuai kebutuhan dan peruntukan analisa. Selebihnya, untuk mendapatkan estimasi yang lebih akurat, sampel tanah dari lapangan yang akan digunakan dalam pengujian harus yang telah mengalami sedikit atau tanpa gangguan (Yin, 1999).

### Signifikansi Lempung Bobonaro

Terdapatnya perbedaan hasil korelasi antar-parameter dalam studi ini, dibandingkan dengan

studi-studi lainnya, dapat mengindikasikan dua hal: Ke-salahan atau perbedaan metode pengambilan dan/ atau pengujian sampel, dan/ atau keunikan karakteristik lempung Bobonaro dibandingkan dengan lempung lainnya. Pernyataan terakhir akan menjadi perhatian utama dalam diskusi ini, sebab lempung Bobonaro tergolong sebagai material endapan sin-orogenik, hadir sebagai matriks dari fragmen batuan asing, sehingga karakteristiknya akan menunjukkan keunikan tersendiri dibandingkan jenis lempung lainnya.

Sebagai contoh, salah satu hal yang dapat menjadi pertimbangan dalam keakuratan studi ini, adalah pengabaian kehadiran *exotic rock* pada sampel-sampel tanah. Sebab, seperti yang dijelaskan di pendahuluan, kehadiran batuan asing (*exotic rock*) ini dapat mempengaruhi kadar lempung dari setiap sampel. Pada data kami, kadar lempung pada setiap sampel lempung tergolong tinggi, bahkan sangat tinggi (**Tabel 1**). Ini yang diinginkan dalam studi, sebab untuk mempertimbangkan kehadiran fragmen-fragmen dalam analisis lereng atau analisis keteknikan lainnya, akan membutuhkan metode yang non-konvensional.

Kitapun dapat berasumsi bahwa nilai kuat geser dapat dipengaruhi oleh bongkahan asing (*exotic rocks*) yang hadir dalam lempung Bobonaro. Hal ini dapat diperlihatkan dalam **Persamaan 6**, dimana nilai kadar lempung (yang juga merepresentasikan kehadiran fragmen-fragmen asing dalam sampelnya) dapat mempengaruhi besar-kecilnya nilai sudut geser dalam. Ukuran bongkahan/ fragmen asing ini bervariasi, nampak dalam skala/ satuan milimeter hingga kilometer (Audley-Charles, 1965b), sehingga dapat berupa bukit-bukit kecil “tertanam” dalam lempung Bobonaro di berbagai area di Timor. Kehadiran fragmen-fragmen kecil dalam matriks lempung akan menurunkan nilai kuat geser secara keseluruhan (massa batuan). Indeks plastisitas juga seharusnya menurun, selaras dengan kehadiran fragmen (sesuai dengan studi ini, nampak dalam korelasi CC-IP, **Gambar 3.a.**). Selain itu, dominannya *shear zones* dan *microfractures* yang sangat umum pada lempung bersisik, seperti yang terdokumentasi dalam Laurich, dkk (2017) di Swiss sebagai sistem orogenik tua dan Liu dkk, (2021) dimana rekahan-rekahan tersebut hadir sebagai akibat tegangan tektonik. Kehadiran struktur-struktur dalam kompleks ini patut menjadi pertimbangan dalam kajian geologi teknik secara keseluruhan.

Perlu ditekankan disini bahwa yang disebut sebagai Formasi/ Kompleks Lempung Bobonaro (disingkat Tmb dalam Rosidi, 1979) adalah tanah lempung, dan bukan batulempung. Kekeliruan dalam pengklasifikasian/ penyebutan ini sering didapati di beberapa proyek di Timor, sehingga akan dapat mempengaruhi metode pendekatan dalam analisa. Dasar pernyataan ini dapat ditinjau dari genesa pembentukannya, dan definisi dari batulempung itu sendiri. Sesuai pengamatan di lapangan, warna

lempung Bobonaro ini cenderung akan mengikuti warna fragmen asing yang tertanam didalamnya. Bongkahan/ fragmen ini tidak dapat diprediksi keberadaannya, maupun ukurannya, dan hanya akan diketahui/ terekspos setelah penggalian atau pengeboran dilaksanakan.

Faktor kedalaman sampel juga tidak dipertimbangkan dalam kajian ini. Beberapa studipun menunjukkan bahwa  $\phi$  memiliki nilai yang bervariasi sesuai kedalaman (dalam artian faktor kedalaman tidak berpengaruh), kecuali dekat permukaan yang cenderung nilai sudut geser dalamnya lebih tinggi (Ahmed, 2018), demikian juga berlaku untuk kadar lempung (Kluger dkk, 2019). Beda halnya dengan nilai kuat geser tak tersaturasi/ terdrainase untuk tanah *deltaic*, yang biasanya bertambah tinggi terhadap kedalaman (Montgomery, 1974).

Korelasi terhadap karakteristik tanah yang sering dikaji merupakan tanah residual hasil pelapukan dan erosi (contoh pada Akayuli dkk, 2013), sedangkan lempung Bobonaro merupakan endapan *mélange* (sin-orogenik). Hal ini dapat menunjukkan perbedaan hasil pengujian dengan tanah residual yang dimana sifatnya akan dipengaruhi oleh kadar lempung yang umumnya dipengaruhi oleh kedalaman dan proses pelapukan (Salih, 2012). Namun berdasarkan pengalaman dan observasi yang cukup lama di lapangan, serta berbagai tinjauan terhadap hasil pengujian laboratorium, lempung Bobonaro yang berada dibawah 0.5 meter dari permukaan tanah itu sudah tidak dipengaruhi oleh proses erosi. Berbeda kasus jikalau lempung Bobonaronya merupakan hasil rombakan ulang, seperti hasil longoran, dan sebagainya. Oleh karena itu, sifat kuat geser lempung boleh dikatakan tidak dipengaruhi oleh faktor kedalaman, seperti juga nampak pada distribusi data yang telah diperoleh (**Tabel 1**). Walaupun demikian, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkonfirmasi ini.

## KESIMPULAN DAN PENELITIAN LANJUTAN

Hasil korelasi antar parameter di studi ini menampilkan bahwa kadar lempung merupakan variabel bebas yang baik untuk AI dan  $\phi$ , namun tidak demikian terhadap C. Hasil regresi linier berganda terhadap nilai kuat geser sebagai variabel terikat dan sifat fisik lempung sebagai variabel bebas, gagal untuk mendapatkan model yang baik. Secara umum, nilai dan kategori hasil korelasi antar parameter tanah yang didapatkan dalam studi ini dapat dirangkum sebagai berikut:

- kadar lempung-indeks plastisitas, berkorelasi positif dengan nilai korelasi 0.38, kategori sedang.
- kadar lempung-sudut geser dalam, berkorelasi positif dengan nilai korelasi 0.39, kategori sedang.
- kadar lempung- kohesi, berkorelasi positif dengan nilai korelasi 0.29, kategori lemah.

- indeks plastisitas-sudut geser dalam, tidak berelasi
- indeks plastisitas-koheksi, tidak berelasi

Studi hubungan antar parameter seperti ini dapat dijadikan alat yang berguna dalam analisa awal desain pekerjaan geoteknik, atau bisa menjadi bagian integral dari kajian geoteknik yang sesungguhnya. Hal-hal lain yang dapat dipertimbangkan dalam menggunakan korelasi dalam kajian geoteknik adalah seperti mineralogi lempung, kondisi tegangan, genesa, dan lingkungan pengendapan, sebab faktor ketergantungan kondisi geologi masing-masing daerah sangat tinggi.

Studi ini bisa menjadi landasan untuk studi korelasi dan karakteristik lempung Bobonaro selanjutnya, dan/ atau tanah non-residual lainnya. Beberapa diantaranya dapat berupa; perbandingan sifat fisik lainnya (bobot isi, kadar air, derajat kejenuhan, porositas, permeabilitas) terhadap sifat mekanis lempung, dan konten mineralogi terhadap sifat mekanis lempung (contoh dalam Tiwari & Marui, 2005). Dengan lebih banyak studi-studi hubungan antar parameter, kita dapat menyatakan rumus prediktabilitas untuk keperluan pekerjaan geoteknik ke depannya. Selain itu, perlu juga mempertimbangkan pengaruh kehadiran fragmen-fragmen asing terhadap kestabilan struktur yang dibangun.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Inakko Internasional Konsulindo (konsultan supervisi) dan Balai Wilayah Sungai Nusa Tenggara II (Kementerian PUPR) atas kepercayaan yang diberikan kepada ATE untuk terlibat dalam pekerjaan Proyek Pembangunan Bendungan Manikin di Kupang, sehingga mendapatkan kesempatan untuk meneliti lempung Bobonaro secara komprehensif. Terima kasih juga kepada Maria V. G. Pake (Fani) dari Teknik Pertambangan Undana yang telah merangkum sebagian besar dari data-data pengujian geotek, dan kepada reviewer anonim yang telah memberikan beberapa masukan atas tulisan ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, D., 2000, Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif Bobonaro sebagai Bahan Timbunan di Lokasi Bendungan di Nusa Tenggara Timur. Magister Tesis, Institut Teknologi Bandung.
- Ahmed, S.M., 2018. Assessment of clay stiffness and strength parameters using index properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(3), pp.579-593.
- Akayuli, C., Ofosu, B., Nyako, S.O. and Opuni, K.O., 2013. The influence of observed clay

content on shear strength and compressibility of residual sandy soils. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 3, Issue 4, pp. 2538-2542.

- Ardhanihan, Fahrul, Elsa Tri Mukti, dan R. M. Rustamadji. 2022. Korelasi Batas Cair dan Indeks Plastisitas terhadap Nilai Kohesi Tanah Pada Uji Triaksial UU (Unconsolidated-Undrained) Tanah Lempung pada Kabupaten Mempawah." *JeLAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang* 9, No. 1.
- Audley-Charles, M.G., 1965a. A Miocene gravity slide deposit from eastern Timor. *Geological Magazine*, 102(3), pp.267-276
- Audley-Charles, M.G., 1965b. The geology of the Portuguese timor. PhD Thesis, University of London.
- Barber, A.J., 2013. The origin of *mélanges*: Cautionary tales from Indonesia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76, pp.428-438.
- Barber, A.J., Tjokrosapoetro, S. and Charlton, T.R., 1986. Mud volcanoes, shale diapirs, wrench faults, and melanges in accretionary complexes, eastern Indonesia. *AAPG bulletin*, 70(11), pp.1729-1741.
- Bell, F.G. and Maud, R.R., 1994. Dispersive soils: a review from a South African perspective. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 27(3), pp.195-210.
- Bowles, J.E., 1997. Foundation analysis and design. *Fifth Edition*. McGraw-Hill.
- Castellanos, B.A. and Brandon, T.L., 2013, September. A comparison between the shear strength measured with direct shear and Triaksial devices on undisturbed and remolded soils. In *Proceedings of the 18th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Paris* (Vol. 1, pp. 317-320).
- Charalambous, M., Hobbs, P.R.N. and Northmore, K.J., 1986. Supplementary Geotechnical and Mineralogical Data for Cohesive Soil Samples from Selected Sites Across Cyprus: Engineering Geology of Cohesive Soils Associated with Ophiolites, with Particular References to Cyprus. *Rep. EGARP Res. Group Br. Geol. Surv., No. EGARP-KW 86/5; Rep. Geol. Surv. Cyprus, No.G/EG/16*.
- Charkley, F.N., Zhang, K. and Mei, G., 2019. Shear strength of compacted clays as affected by

- mineral content and wet-dry cycles. *Advances in Civil Engineering*, 2019, pp.1-8.
- Chen, F.H., 1975. *Foundations on expansive soils*. (Vol. 12). Elsevier.
- Djarwadi, D., Uji Dispersivitas inti kedap air bendungan tipe urugan dengan kandungan mineral lempung montmorillonite dengan Crump Test. *Prosiding Konferensi Teknik Sipil*, 3, pp.6-7.
- Fernandez, G.W., 2007. Kajian Karakteristik Lempung Bobonaro di Provinsi Nusa Tenggara Ti-mur. *Puslitbang Jalan dan Jembatan*, Bandung.
- Frost, J., 2019. *Regression analysis: An intuitive guide for using and interpreting linear models*. Statistics By Jim Publishing.
- Funay, C.M.S., Ernawati, R., dan Bargawa, W.S., 2022. Identifikasi Mineral Liat Pada Lempung Bobonaro di Area Disposasi Tambang Mangan. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 10(1).
- Hamilton, W., 1979. Tectonics of the Indonesian region. *USGS Professional Paper*, 1078, 345p.
- Harris, R.A., Sawyer, R.K. and Audley- Charles, M.G., 1998. Collisional melange development: Geologic associations of active melange- forming processes with exhumed melange facies in the western Banda orogen, Indonesia. *Tectonics*, 17(3), pp.458-479.
- Hattab, M., Hammad, T. and Fleureau, J.M., 2015. Internal friction angle variation in a kaolin/ montmorillonite clay mix and microstructural identification. *Géotechnique*, 65(1), pp.1-11.
- Kluger, M.O., Kreiter, S., Moon, V.G., Orense, R.P., Mills, P.R. and Mörz, T., 2019. Undrained cyclic shear behaviour of weathered tephra. *Géotechnique*, 69 (6), pp. 489-500.
- Laurich, B., Urai, J.L. and Nussbaum, C., 2017. Microstructures and deformation mechanisms in Opalinus Clay: Insights from scaly clay from the Main Fault in the Mont Terri Rock Laboratory (CH). *Solid Earth*, 8(1), pp.27-44.
- Lisboa, J.V.V., Silva, T.P., de Oliveira, D.P.S. and Carvalho, J.F., 2019. Mineralogical and Geochemical characteristics of the Bobonaro *mélange* of western East Timor: provenance implications. *Comunicação Geológicas*, 106.
- Liu, Z., Qiu, H., Jiang, Z., Liu, R., Wei, X., Chen, F., Wei, F., Wang, D., Su, Z. and Yang, Z., 2021. Types and quantitative characterization of microfractures in the continental shale of the Da'anzhai member of the Ziliujing Formation in Northeast Sichuan, China. *Minerals*, 11(8), p.870.
- Masada, T., 2009. *Shear strength of clay and silt embankments* (No. FHWA / OH – 2009 / 7). Ohio Research Institute for Transportation and the Environment.
- Ma'arif, A. dan Gofar, N., 2021, October. Pengaruh Kandungan Lempung Terhadap Sifat Plastisitas Tanah. dalam *Bina Dharma Conference on Engineering Science (BDCES)* (Vol. 3, No. 2, pp. 419-429).
- Medzvieckas, J., Dirgėlienė, N. and Skuodis, Š., 2017. Stress-strain states differences in specimens during Triaxial compression and direct shear tests. *Procedia Engineering*, 172, pp.739-745.
- Montgomery, R.L., 1974. Correlation of engineering properties of cohesive soils bordering the Mississippi River from Donaldsonville to Head of Passes, LA. *US Army Engineer Waterways Experiment Station, Soils and Pavements Laboratory*.
- Nurdian, S., Setyanto, S. and Afriani, L., 2015. Korelasi Parameter Kekuatan Geser Tanah dengan Menggunakan Uji Triaksial dan Uji Geser Langsung Pada Tanah Lempung Substitusi Pasir. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain (JRSDD)*, 3(1), pp.13-25.
- Ramadhani, T., Iswan, I. and Jafri, M., 2015. Hubungan Batas Cair dan Plastisitas Indeks Tanah Lempung yang Disubstitusi Pasir Terhadap Nilai Kohesi Tanah pada Uji Direct Shear. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 3(2), pp.291-302.
- Rambe, R.P., Afriani, L. and Iswan, I., 2016. Pengaruh Fraksi Lempung Terhadap Nilai Kohesi dan Indeks Plastisitas. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 4(2), pp.205-214.
- Rosidi, H.M.D., Tjokrosapoetro, S. and Gafoer, S., 1979. Peta Geologi Lembar Kupang-Atambua – Timor (Skala 1:250.000), *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, Bandung.
- Roy, S. and Dass, G., 2014. Statistical models for the prediction of shear strength parameters at Sirsa, India. *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 4(4), pp.483-498.
- Saleh, M. 2023. Analisa Stabilitas Lereng Ditinjau dari Aspek Pembasahan- Pengeringan dan Infiltrasi Air Hujan Tanah Lempung Khas

- Bobonaro. Masters thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Saleh, M. dan Fitra, A.M., 2022. Studi Karakteristik Tanah Problematis Lempung Bobonaro Pada Jalan Perbatasan RI-RDTL Sektor Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Prosiding KRTJ-HPJI*, pp.19-25.
- Salih, A.G., 2012. Review on granitic residual soils' geotechnical properties. *Electronic Journal of Geo-technical Engineering*, 17(3), pp.2645-2658.
- Sorensen, K.K. and Okkels, N., 2013, September. Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clays. In *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris* (Vol. 1, pp. 423-428).
- Štuhec, D., Ivandić, K., Strelec, S. and Dodigović, F., 2019. The analysis of some cohesive soils engineering characteristics in Croatia. In *Proceedings of the XVII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE-2019)*. Harpa Conference Centre, Iceland (pp. 1-5).
- Tchakalova, B. and Ivanov, P., 2021. Correlation between effective cohesion and plasticity index of clay. *Geologica Balcanica* 51(3), pp. 45-49.
- Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G., 1996. *Soil mechanics in engineering practice*. John Wiley & sons.
- Tiwari, B. and Marui, H., 2005. A new method for the correlation of residual shear strength of the soil with mineralogical composition. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131 (9), pp. 1139 - 1150.
- Verdiyanti, N.E., Mukti, E.T. and Rustamaji, R.M., 2022. Hubungan Batas Cair Dan Indeks Plastisitas Terhadap Nilai Kohesi Tanah Pada Uji Direct Shear Tanah Lempung Pada Kabupaten Mempawah. *Je- LAST: Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 9(1).
- Vong, E.A., 2016. Studi Efek Pengembangan Terhadap Kuat Geser Dan Perubahan Volume Tanah Lempung Bobonaro. *Jurnal Rekayasa Infra-struktur*, 1(4), Pp.190201.
- Wang, S., Chan, D. and Lam, K.C., 2009. Experimental study of the effect of fines content on dynamic compaction grouting in completely decomposed granite of Hong Kong. *Construction and Building Materials*, 23(3), pp.1249-1264.
- Wibisono, G., Nugroho, S.A. and Umam, K., 2018, March. The influence of sand's gradation and clay content of direct sheart test on clayey sand. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 316, No. 1, p. 012038). IOP Publishing.
- Yassir, N.A., 1987. Mud Volcanoes and the Behaviour of Overpressured Clays and Silts. Ph.D. Thesis, University of London.
- Yin, J.H., 1999. Properties and behaviour of Hong Kong marine deposits with different clay contents. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(6), pp.1085-1095.