

**Ranah Research**

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i3><https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Pengaruh Keberadaan Material Butir Pasir terhadap Sifat Mekanik Timbunan pada Studi Kasus Disposal Pit SJS PT Bukit Asam (Persero) Tbk Unit Pertambangan Tanjung Enim

Muhammad Qistan Hafits¹, Eddy Ibrahim², Taufik Toha³

¹Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia, mqhafits@bukitasam.co.id

²Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia, eddyibrahim@ft.unsri.ac.id

³Teknik Pertambangan, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia, ttoha@unsri.id

Corresponding Author: mqhafits@bukitasam.co.id¹

Abstract: Embankment slope stability is a critical challenge in open-pit coal mining operations, particularly within the Tanjung Enim Mining Unit (UPTE) of PT Bukit Asam Tbk. This study investigates the influence of varying *clay* and *sand* compositions on the physical and mechanical properties of embankment geomaterials to determine the optimal configuration for operational stability. An experimental research design was conducted using material samples from Pit SJS, involving five composition variations: 100% *clay*; 75% *clay* – 25% *sand*; 50% *clay* – 50% *sand*; 25% *clay* – 75% *sand*; and 100% *sand*. Geotechnical parameters were evaluated through Standard Proctor compaction tests and Direct Shear tests to determine maximum dry density, optimum moisture content, bearing capacity, cohesion, and internal friction angle. The results demonstrate that both maximum dry density and bearing capacity exhibit an increasing trend as *sand* content rises, reaching peak values at the 50% *clay* – 50% *sand* composition before declining at higher *sand* ratios. Conversely, optimum moisture content significantly decreases as *sand* content increases. Shear strength analysis reveals that cohesion reaches its maximum at the 50/50 ratio, while pure *sand* (100% *sand*) exhibits significant "apparent cohesion" due to the interlocking effect of *sand* grains, which enhances shear resistance despite the material's non-cohesive theoretical nature. Slope stability simulations indicate that the 50% *clay* – 50% *sand* mixture provides the most superior mechanical performance for structured benching, ensuring a Safety Factor (SF) 1.35. This study concludes that an equal balance of *clay* and *sand* optimizes stability by combining cohesive bonding with high bearing capacity and grain interlocking.

Keyword: *Clay-sand mixture, embankment stability, bearing capacity, interlocking effect, maximum dry density, geotechnical properties*

Abstrak: Stabilitas lereng timbunan merupakan tantangan kritis dalam operasional penambangan batubara terbuka, khususnya di Unit Pertambangan Tanjung Enim (UPTE) PT Bukit Asam Tbk. Penelitian ini menyelidiki pengaruh variasi komposisi lempung dan pasir terhadap sifat fisik dan mekanik geomaterial timbunan untuk menentukan konfigurasi optimal bagi stabilitas operasional. Desain penelitian eksperimental dilakukan dengan menggunakan sampel material dari Pit SJS, yang melibatkan lima variasi komposisi: 100% lempung; 75% lempung – 25% pasir; 50% lempung – 50% pasir; 25% lempung – 75% pasir; dan 100%

pasir. Parameter geoteknik dievaluasi melalui uji pemadatan *Standard Proctor* dan uji Geser Langsung (*Direct Shear*) untuk menentukan kepadatan kering maksimum, kadar air optimum, daya dukung, kohesi, dan sudut geser dalam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kepadatan kering maksimum dan daya dukung menunjukkan tren peningkatan seiring dengan bertambahnya kandungan pasir, mencapai nilai puncak pada komposisi 50% lempung – 50% pasir sebelum menurun pada rasio pasir yang lebih tinggi. Sebaliknya, kadar air optimum menurun secara signifikan seiring dengan meningkatnya kandungan pasir. Analisis kuat geser mengungkapkan bahwa kohesi mencapai nilai maksimum pada rasio 50/50, sementara pasir murni (100% pasir) menunjukkan "kohesi semu" (*apparent cohesion*) yang signifikan akibat efek saling mengunci (*interlocking*) antar butir pasir, yang meningkatkan ketahanan geser meskipun secara teoritis material tersebut bersifat tidak kohesif. Simulasi stabilitas lereng menunjukkan bahwa campuran 50% lempung – 50% pasir memberikan nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor/SF*) sebesar 1,35. Penelitian ini menyimpulkan bahwa keseimbangan yang setara antara lempung dan pasir mengoptimalkan stabilitas dengan menggabungkan ikatan kohesif dengan daya dukung yang tinggi serta efek saling mengunci antar butiran.

Kata Kunci: Komposisi Lempung-Pasir, embankment stability, bearing capacity, efek interlocking, bobot isi kering maksimum, parameter geoteknik

PENDAHULUAN

Aktivitas penambangan batubara di ruang terbuka akan selalu menghadapi permasalahan mengenai kestabilan lereng, salah satunya adalah lereng timbunan (Arif, 2016). Permasalahan tersebut telah menjadi fenomena global. Pada rentang tahun 2002 hingga 2020, di berbagai negara benua eropa dan asia, terjadi peningkatan frekuensi kejadian dan korban jiwa signifikan yang diakibatkan oleh kelongsoran tanah/*landslide*. Peningkatan tersebut berdampak secara linear terhadap biaya langsung penanggulangan bencana (belum termasuk biaya tidak langsung (Kwan et.al, 2022). Di Indonesia juga terdapat beberapa kejadian longsor pada timbunan diantaranya pada old dump Tambang Air Laya PT. Bukit Asam Tbk, (Rosihan,dkk, 2025) dan Inpit dump Pit Bara Anugrah Sejahtera (Rachmad,dkk, 2020). Berdasarkan data statistik Departemen Geoteknik PTBA, kelongsoran pada lereng timbunan UPTA tahun 2022-2024 tercatat telah terjadi sebanyak lebih dari 10 (sepuluh) kali. Sehingga, lereng-lereng yang terbentuk dari operasional tambang perlu dilakukan analisis kestabilan lerengnya diantaranya adalah lereng timbunan. Lereng timbunan berasal dari hasil penggalian batuan tanah penutup/*overburden* (Arif, 2016).

Formasi batuan di PT. Bukit Asam, Tbk, termasuk Pit SJS sebagai area penelitian, merupakan formasi batuan sedimen pembawa batubara dengan stratigrafi berupa tanah pucuk/top soil, batulempung/*claystone*, batulanau/*siltstone* batupasir/*sandstone* (Nafian,dkk, 2021). Sehingga, pada lereng timbunan akan ditemukan adanya perpaduan komposisi tanah dengan sifat fisik dan mekanik yang berbeda berdasarkan stratigrafi batuan asalnya. Keberadaan fraksi pasir dalam tanah timbunan sangat menentukan perilaku geoteknik timbunan seperti: kepadatan, kuat geser, permeabilitas, drainase dan erosi (Tanh et.al, 2022). Berdasarkan teori mekanika tanah, porositas pasir lebih besar dibandingkan dengan lempung maupun lanau yang menyebabkan tanah pasir berpotensi lebih besar terisi oleh air. Keberadaan air meningkatkan tegangan air pori sehingga akan mengoreksi kepadatan dan kohesi tanah sehingga berdampak terhadap nilai faktor keamanannya (Blanco et.al, 2022).

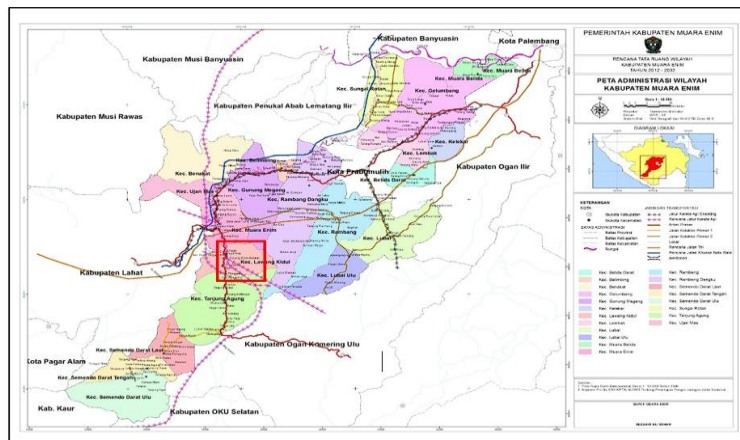
Sehingga, pada lokasi penelitian berdasarkan dari jenis batuan asalnya, skema komposisi campuran tanah pasir dengan material halus seperti *clay* yang dapat menutup pori di antara butiran besar dan meningkatkan kerapatan tanah timbunan, menjadi potensi stabilitas timbunan sebagai geomaterial konstruksi (Tanh et.al 2022). Lebih lanjut bahwa,

kondisi area penelitian yang akan selalu berhadapan dengan material pasir serta, sampai dengan saat ini, masih belum adanya kajian internal yang mendalam di PTBA terkait pengaruh komposisi tanah, maka hal inilah yang menjadi latar belakang penleiti untuk mengkaji mengenai pengaruh komposisi tanah berbutir pasir terhadap sifat mekanik timbunan.

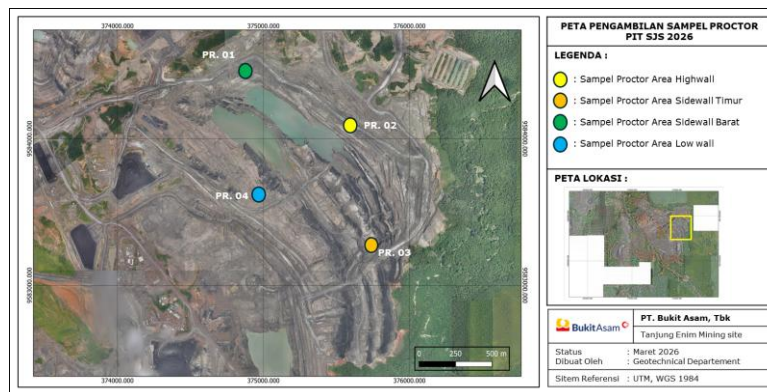
METODE

Penelitian ini termasuk kedalam jenis penelitian Eksperimental. Penelitian dilakukan di Pit SJS PT Bukit Asam dengan koordinat UTM N 374000 – 376000 dan E 9583000 – 9585000 48S , Tbk pada tanggal 01 Oktober 2025 - 21 November 2025 yang terletak pada kecamatan Lawang Kidul Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim Provinsi Sumatera Selatan. Daerah penelitian merupakan area tambang batubara aktif yang berada pada Cekungan Sumatera Selatan dan termasuk dalam Formasi Muara Enim berumur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir yang merupakan formasi utama pembawa batubara di daerah Muara Enim dan Lahat. Secara regional, daerah ini tersusun oleh urutan batuan sedimen Tersier mulai dari Formasi Lahat, Talang Akar, Baturaja, Gumai, Air Benakat, Muara Enim, hingga Kasai.

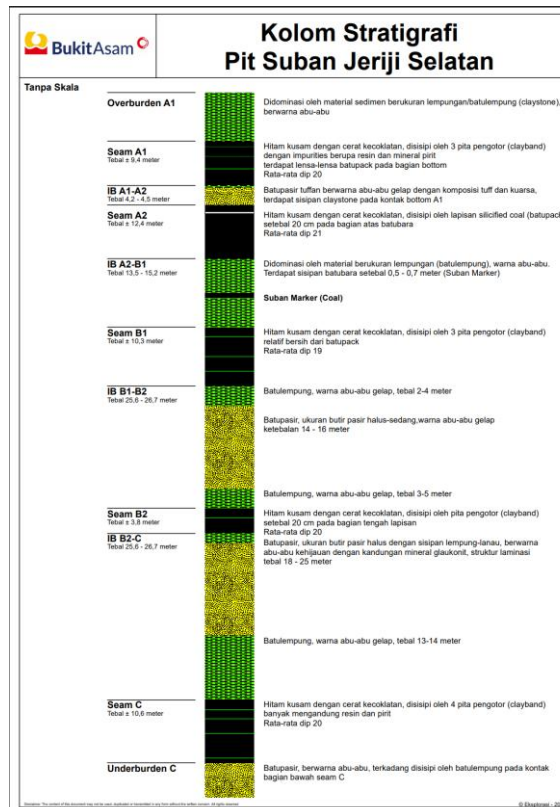
Formasi Kasai sebagai pembawa batupasir, formasi Muara Enim sebagai pembawa batulempung, batupasir-lanau dan batubara serta fromasi air benakat sebagai pembawa batupasir. Terdapat lima seam utama yaitu Seam A1, A2, B1, B2, dan Seam C dengan ketebalan bervariasi antara 3–15 meter, dimana Seam A1 berkisar 8–11 meter, Seam A2 6–15 meter, Seam B1 7–15 meter, Seam B2 3–6 meter, dan Seam C 6–15 meter. Secara litologi, daerah ini didominasi oleh perselingan batulempung (*claystone*), batulanau (*siltstone*), dan batupasir (*sandstone*) berwarna abu-abu hingga kecokelatan, dengan interburden antar seam berkisar 3–40 meter. Adapun kesampaian daerah, lokasi dan stratigrafi daerah penelitian diperlihatkan pada gambar 1 dan gambar 2 .



Gambar 1. Peta kesampaian daerah

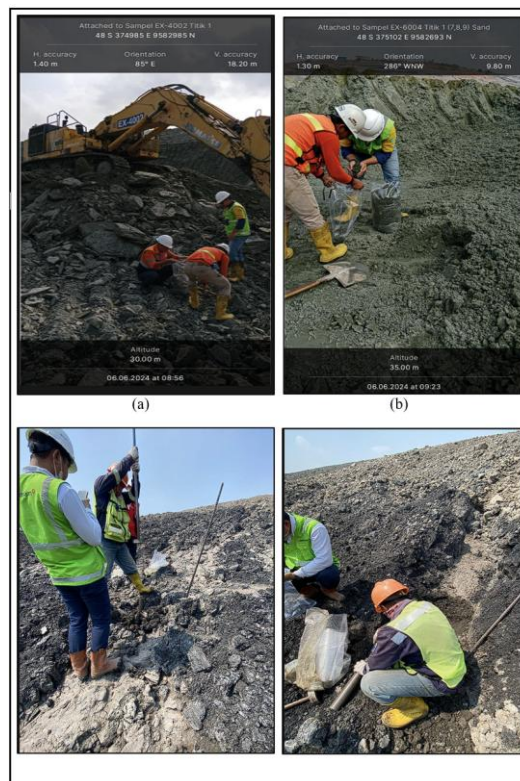


(a)



(b)

Gambar 2. (a) Peta Lokasi Penelitian (b) Stratigrafi Daerah Penelitian Data Primer meliputi data sampel karung untuk masing-masing tanah lempung (clay) dan pasir (sand) dari area front gali. Hal ini bertujuan untuk menjaga kemurnian sampel.



Gambar 3. (a) Sampling Karung Material Clay; (b) Sampling Karung Material Pasir

Data sekunder meliputi data peta topografi, data litologi dan dokumen standard pengujian kuat geser langsung, pemadatan ringan (proctor standard) serta jurnal ilmiah penelitian terkait.

Proses adalah metode untuk memecahkan masalah penelitian, yang mencakup sebagai berikut:

a. Identifikasi Masalah

Tahapan identifikasi masalah merupakan bagian awal (pendahuluan) yang melatarbelakangi penelitian ini. Hal ini berdasarkan kejadian-kejadian yang dialami Peneliti selama bekerja di lapangan sebagai geotechnical engineer. Kemudian, Peneliti melakukan konsultasi dan diskusi dengan pembimbing untuk mendetailkan pokok permasalahan yang terjadi serta parameter apa saja yang perlu diteliti. Kemudian Peneliti melakukan studi pustaka dengan mempelajari referensi terkait topik penelitian.

b. Pengumpulan data

Berdasarkan studi pustaka, Peneliti melakukan pengumpulan data untuk mendapatkan parameter yang diteliti. Data yang diperlukan dibagi menjadi 2 (dua), yaitu: data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data yang didapatkan dengan melakukan pengambilan sampel langsung di lapangan, yaitu: Data sampel mold menggunakan tube dengan ukuran panjang 45 – 50 cm dan berdiameter NQ sebanyak minimal 12 sampel. Sampel karung untuk masing-masing tanah lempung (*clay*) dan pasir (*sand*) dari area front gali minimal 300 kg (12 karung) untuk masing-masing jenis tanah. Satu karung sampel berkapasitas sekitar 25 kg. Data sekunder merupakan data yang diperoleh dari departement lain seperti data situasi dan data litologi serta referensi / jurnal yang relevan terhadap topik penelitian.

c. Preparasi dan Pengujian Sampel

Pengambilan sampel yang dilakukan pada tahapan sebelumnya, dilakukan preparasi sesuai jenis pengujiannya. Pada penelitian ini, akan dilakukan 2 (dua) jenis pengujian untuk semua variasi komposisi tanah, yaitu: Pengujian Kuat Geser Langsung (*drained, consolidated/Cdc*) yang mengacu kepada ASTM D.3080/D3080M-11 dan Pemadatan Tanah Ringan (*Proctor Standard*) yang mengacu kepada SNI 1742:2008. Sampel yang dilakukan pengujian pemadatan dan kuat geser diatur dengan variasi komposisi sebagai berikut:

- a. Material butir *clay* 100%
- b. Material butir *clay* 75% + material butir pasir 25%
- c. Material butir *clay* 50% + material butir pasir 50%
- d. Material butir *clay* 25% + material butir pasir 75%
- e. Material butir pasir 100%



Gambar 4. Set Alat Uji Proctor dan Direct Shear

d. Analisis Hasil Uji Laboratorium

Data hasil pengujian laboratorium dilakukan analisis mengenai hubungan variasi komposisi material lempung dan pasir terhadap:

1. Respon terhadap pemadatan melalui parameter kering (γ_d maks), kadar air optimum (w_{opt}), *bearing capacity* saat kondisi optimum.
2. Sifat Mekanik Timbunan melalui uji *Direct Shear* saat kondisi optimum melalui parameter kohesi (C) dan sudut geser dalam (ϕ) (Giovanni et.al 2020, Julita, dkk 2022, Tao et.al 2025, Wei et.al 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan variasi komposisi tersebut, didapatkan hasil pengujian proctor standard nilai bobot isi kering maksimum (γ_{dmaks}), kadar air optimum (w_{opt}) dan bearing capacity (dalam kPa) pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1: Hasil Pengujian Proctor Standard pada Variasi Komposisi Material

Sampel_PR_01						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
$\gamma_{Dry_{Max}}$	kN/m ³	16.16	16.44	17.46	16.45	15.7
w_{opt}	%	18.46	16.16	15.63	15.78	16.01
<i>Bearing Capacity</i>	kPa	567.92	672.2	749.19	543.72	487
Sampel_PR_02						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
$\gamma_{Dry_{Max}}$	kN/m ³	15.85	16.20	17.10	16.14	15.40
w_{opt}	%	17.04	14.92	14.43	14.57	14.78
<i>Bearing Capacity</i>	kPa	545.12	645.21	719.11	521.89	467.45
Sampel_PR_03						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
$\gamma_{Dry_{Max}}$	kN/m ³	14.41	14.72	15.54	14.67	14.00
w_{opt}	%	24.58	21.52	20.81	21.01	21.32
<i>Bearing Capacity</i>	kPa	496.93	588.17	655.54	475.75	426.12
Sampel_PR_04						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
$\gamma_{Dry_{Max}}$	kN/m ³					
w_{opt}	%	23.34	20.43	19.76	19.95	20.24
<i>Bearing Capacity</i>	kPa	505.37	598.16	666.67	483.83	433.36

Setelah tahapan pengujian proctor standard, pengujian selanjutnya adalah direct shear. Sampel yang akan diuji adalah sampel yang telah mencapai titik optimum (kondisi bobot isi kering maksimum dan kadar air optimum). Pengujian ini untuk mengetahui nilai parameter nilai kuat geser pada variasi komposisi tanah yaitu: nilai kohesi (Cr) dalam satuan kPa dan sudut geser dalam residual (Φ_r) dalam satuan derajat.

Tabel 2: Hasil Pengujian Direct Shear Pada kondisi γ_{dmaks} dan w_{opt} pada Setiap Variasi Komposisi Material

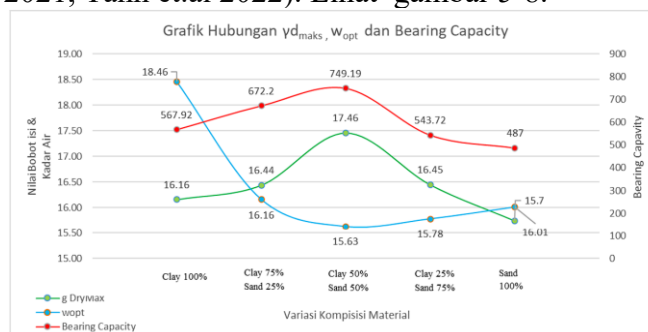
Sampel_PR_01						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
γ_{DryMax}	kN/m ³	16.16	16.44	17.46	16.45	15.7
w_{opt}	%	18.46	16.16	15.63	15.78	16.01
Cohesi Residual, Cr	kPa	15.85	15.91	29.31	20.73	30.82
Phi Residual, Φ_r	(°)	14.82	14.95	13.91	13.52	23.23
Bearing Capacity	kPa	567.92	672.2	749.19	543.72	487

Sampel_PR_02						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
γ_{DryMax}	kN/m ³	15.85	16.20	17.10	16.14	15.40
w_{opt}	%	17.04	14.92	14.43	14.57	14.78
Cohesi Residual, Cr	kPa	8.28	8.31	15.31	10.83	16.11
Phi Residual, Φ_r	(°)	18.48	18.53	17.24	16.76	28.79
Bearing Capacity	kPa	545.12	645.21	719.11	521.89	467.45

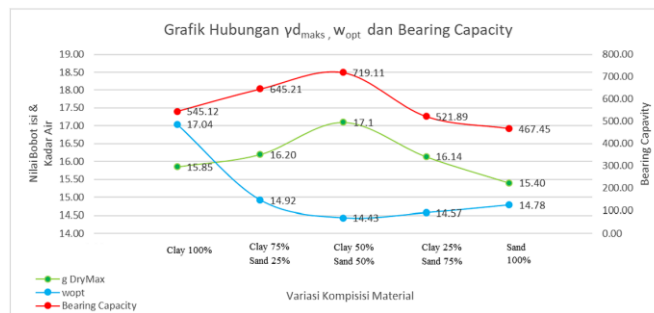
Sampel_PR_03						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
γ_{DryMax}	kN/m ³	14.41	14.72	15.54	14.67	14.00
w_{opt}	%	24.58	21.52	20.81	21.01	21.32
Cohesi Residual, Cr	kPa	17.25	17.32	31.90	22.56	33.57
Phi Residual, Φ_r	(°)	18.36	18.41	17.13	16.65	28.61
Bearing Capacity	kPa	496.93	588.17	655.54	475.75	426.12

Sampel_PR_04						
Mat. Prop	Satuan	Variasi Komposisi Clay - Sand Material				
		clay 100% sand 0%	clay 75% sand 25%	clay 50% sand 50%	clay 25% sand 75%	sand 100% clay 0%
γ_{DryMax}	kN/m ³					
w_{opt}	%	23.34	20.43	19.76	19.95	20.24
Cohesi Residual, Cr	kPa	21.07	21.15	38.96	27.56	40.98
Phi Residual, Φ_r	(°)	15.04	15.12	14.07	13.68	23.50
Bearing Capacity	kPa	505.37	598.16	666.67	483.83	433.36

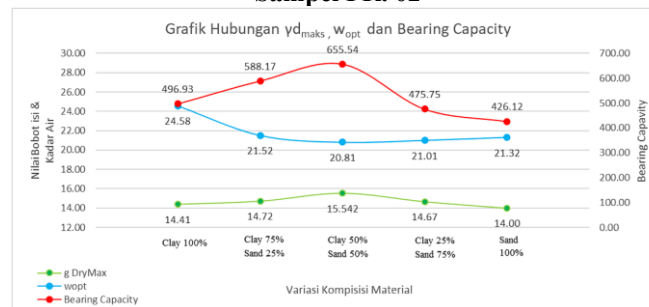
Berdasarkan hasil pengujian Tabel 1 dan 2, terlihat hubungan antara nilai bearing capacity dan bobot isi kering maksimum (γ_{dmaks}) yang memiliki trend cenderung meningkat seiring bertambahnya komposisi material pasir sampai dengan perbandingan 50% clay - 50% sand. Kemudian mengalami trend penurunan setelah itu seiring bertambahnya komposisi material pasir menjadi 75% hingga 100%, berbanding terbalik dengan kadar air optimum (w_{opt}). Seiring bertambahnya komposisi material pasir sampai dengan perbandingan 50% clay - 50% sand, nilai (w_{opt}) cenderung mengalami trend penurunan signifikan dan relatif linear seiring bertambahnya komposisi material pasir menjadi 75% hingga 100%. Hal ini mengindikasikan bahwa, komposisi clay-sand pada jumlah tertentu, keberadaan material sand akan memperbaiki struktur tanah dan drainasinya sehingga air akan mencapai kondisi setimbang (Julita,dkk 2021, Tanh et.al 2022). Lihat gambar 5-8.



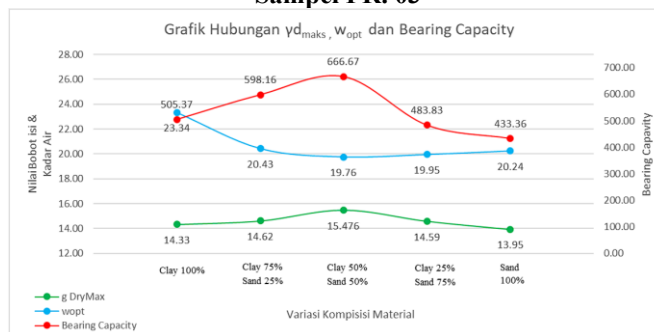
Gambar 5. Grafik Hubungan (γ_{dmaks}), (w_{opt}) dan Bearing Capacity pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 01



Gambar 6. Grafik Hubungan ($\gamma_{d_{maks}}$), (w_{opt}) dan Bearing Capacity pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 02

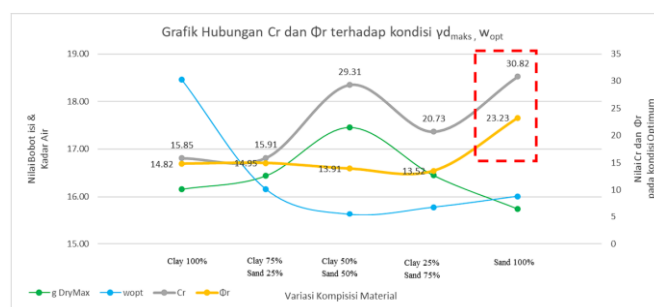


Gambar 7. Grafik Hubungan ($\gamma_{d_{maks}}$), (w_{opt}) dan Bearing Capacity pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 03

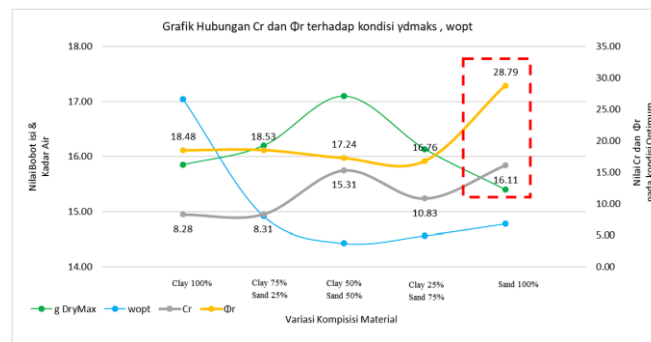


Gambar 8. Grafik Hubungan ($\gamma_{d_{maks}}$), (w_{opt}) dan Bearing Capacity pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 04

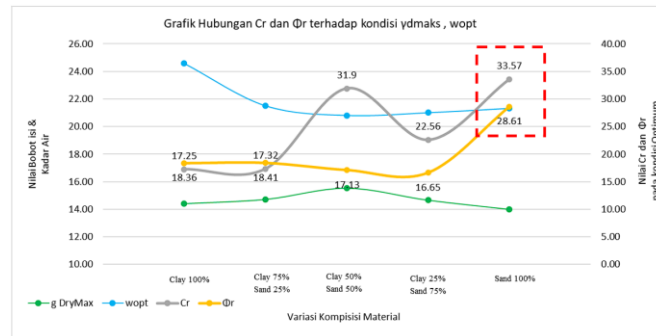
Selanjutnya, ketika variasi tanah mencapai kondisi optimum dan dilakukan uji geser langsung, didapatkan nilai kohesi (C_r) memiliki trend yang cukup variatif. C_r mengalami trend peningkatan seiring bertambahnya komposisi material pasir sampai mencapai nilai tertinggi pada komposisi material *clay* 50% - *sand* 50%. Kemudian mengalami penurunan saat komposisi 25% *clay* - 75% *sand* namun kembali naik pada komposisi 100% *sand*. Sedangkan nilai sudut geser dalam (Φ_r) memiliki trend yang relatif menurun pada komposisi 100% *clay* sampai dengan 25% *clay* - 75% *sand* kemudian nilai Φ_r mengalami peningkatan signifikan pada komposisi 100% *sand* lihat gambar 9-12.



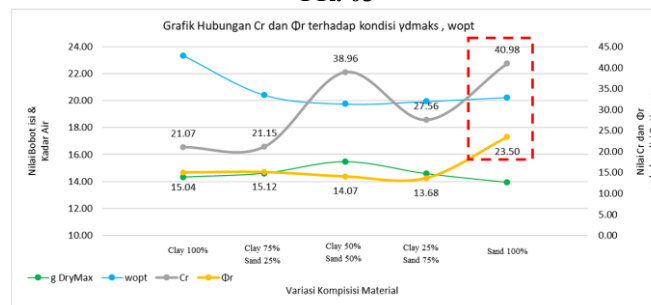
Gambar 9. Grafik Hubungan (C_r) dan (Φ_r) Kondisi Optimum pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 01



Gambar 10. Grafik Hubungan (Cr) dan (Φr) Kondisi Optimum pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 02



Gambar 11. Grafik Hubungan (Cr) dan (Φr) Kondisi Optimum pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 03



Gambar 12. Grafik Hubungan (Cr) dan (Φr) Kondisi Optimum pada Variasi Komposisi Material Sampel PR. 04

Secara teori, tanah pasir merupakan tanah berbutir kasar yang dengan tingkat kelolosan <50% satuan massa pada saringan no.200 dan bersifat plastis/non-kohefif (Darwis, 2018). Namun, dari hasil pengujian (gambar 9-12), pada kondisi 100% sand, memiliki nilai kohesi sehingga, menjadi bertolak-belakang antara teori dengan hasil uji. Hal ini disebabkan karena pada saat variasi komposisi 100% sand dilakukan uji pemadatan ringan, terjadi penguncian butiran kasar pasir yang mengisi rongga porinya (*interlocking*) yang akan menghambat pergerakan dan mendistribusikan beban. Seolah-olah material pasir memiliki efek tahanan geser. Padahal yang terjadi adalah peningkatan nilai *friction*-nya (sudut geser dalam). Hal ini disebut efek “kohesi semu”. Sehingga, pada kondisi komposisi 100% sand, yang berkontribusi adalah murni nilai *friction* nya dan bukan kohesinya. (Julita,dkk 2021, Tanh et.al 2022). Sehingga, perlu diketahui oleh *engineer* bahwa, variasi komposisi material 100% sebenarnya tidak memiliki kohesi dan tidak memungkinkan untuk dibentuk sebagai bench timbunan. Material pasir akan terbentuk curah mengikuti sudut alaminya/*angle of repose*.

KESIMPULAN

Keberadaan material pasir, berdasarkan hasil pengujian laboratorium pada lokasi penelitian, ternyata memiliki pengaruh terhadap nilai sifat mekanik timbunan. Hal ini terlihat bahwa material timbunan mencapai kondisi puncak pada variasi komposisi 50% clay – 50%

sand. Hal ini dikarenakan, pada komposisi tersebut, keberadaan material *clay* menyediakan kohesi tanah sampai batas puncak elastisnya sedangkan material pasir akan meningkatkan nilai bearing capacity-nya. Terdapat efek kohesi semu pada variasi komposisi 100% *sand* akibat interlocking yang membuat seolah-olah material pasir memiliki efek tahanan geser. Penelitian lebih lanjut mengenai komposisi mineral organik dan anorganik pada material *clay* dan pasir perlu dilakukan untuk mendapatkan gambaran lebih detail mengenai material properties terutama pengaruhnya terhadap air dan respon terhadap perlakuan pemadatan.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Magister Teknik Pertambangan Universitas Sriwijaya dan seluruh pihak terkait atas dukungan dan fasilitas yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada seluruh karyawan PT Bukit Asam Tbk yang telah berpartisipasi dan kontribusi secara aktif dalam pengumpulan data penelitian.

REFERENSI

- Biao Liu, Zhaorui Jing, Jinman Wang, Yu Feng. (2023). Effect of soil compaction on hydraulic properties and macropore structure: Evidence from opencast mine in the Loess Plateau of China. *Ecological Engineering* vol 192 106988 p. 1-10 doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106988.
- Blanco-Canqui, Humberto., Raihanah Hassim, Charles Shapiro, Paul Jasa, Hans Klopp. (2022). How does no-till Effect Soil-Profile Compactibility in the long term. *Geoderma* vol. 452 116016 p. 1-4 doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116016.
- Carl Wersall, K. Rainer Massarsch, Johan Spross. (2022). Heavy vibratory plate compaction of silty *sand*: A field study. *Soils and Foundations* vol. 62 p. 1-16 doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101208.
- Charlotte J.W. van Verseveld dan Julia Gebert. (2020). Effect of compaction and soil moisture on the effective permeability of *sands* for use in methane oxidation systems. *Waste Management* vol. 107 p. 44-53 doi.org/10.1016/j.wasman.2020.03.038.
- Cun Zhang, Yanghong Chen, Zhaopeng Ren, Fangtian Wang. (2024). Compaction and seepage characteristics of broken coal and rock masses in coal mining: A review laboratory test. *Rock Mechanics Bulletin* vol. 3 100102 p. 1-16 doi.org/10.1016/j.rockmb.2024.100102.
- Darwis. (2018). *Dasar-Dasar Mekanika Tanah*. Yogyakarta: Pena Indis
- Giovanni Spagnoli dan Satoru Shimobe. (2020). An Overview on the Compaction Characteristics of Soil Laboratory Test. *Engineering Geology* vol. 278 105830 p. 1-13 doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105830.
- Holger Pankrath, Marco Barthel, Alexander Knut, Matteo Bracciale, Ralf Thiele. (2015). Dynamic Soil Compaction-recent Methods and Research Tool for Innovative Heavy Equipment Approaches. The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum. *Procedia Engineering* p. 391-394 doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.096.
- Irwandi Arif. (2016). *Geoteknik Tambang*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka
- Julita Andrini Repadi, Fathol Bari, Junaidi, Febrin Anas Ismail, Andriani, Abdul Hakim. (2021). Slip Surface *Clay-Sand* Mixture Slope Test Using Scaled Laboratory Models. *International Journal for GEOMATE* Vol 21 p. 17-23 doi.org/10.21660/2021.85.j2137
- Kementrian PUPR. (2016). *Diklat Perencanaan Teknis Rawa Modul 04*. Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumberdaya Air dan Konstruksi.
- M. Algadri Nafian, Yan Rizal. 2021. *Geologi Batubara Daerah Tanjung Enim, Kab. Muara Enim, Prov. Sumatera Selatan*. Bandung: *Bulleting of Geology* Vol. 05 No. 2 e-ISSN 2580 – 0752.
- Meng Li, Yang Zhao, Jixiong Zhang, Xiao Wang, Dan Ma, Shihao Xing, Linlin Xie. (2025). *Experimental Investigation Compaction Deformation and Seepage Mechanism of*

- Granular Waste Rock Backfill Materials for Mitigation Mining-Induced Water Hazards. Vol 10/Issue 18 p 1-13 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.5c0114>
- Nidhi Murali, Pratik Gujar, Pijush Gosh. (2022). Performance of *clay*-epoxy interface at different points on proctor curve. *Applied Clay Science* vol. 226 p. 1-11 doi.org/10.1016/j.clay.2022.106553.
- Rosihan Pebrianto, Budhi Setiawan, Eddy Ibrahim, Edy Sutriyono. (2025). Optimization Re-Digging Waste Dump on Exploitation Air Laya Coal Mine in South Sumatra Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* Vol 12 no. 4 p. 7953-7963 doi.org/10.15243/jdmlm.2025.124.7953.
- SNI 1742-2008. Cara Uji Kepadatan Ringan untuk Tanah.
- Tao Li, Yongfei Lin, Ling Zeng, Xiaowei Tang, Gang Yang, Shun Liu. (2025). Influence of *clay* content on static shear strength of *sand-clay* mixture. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* vol. 200 p. 1-19 doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109721.
- Tati Andriani, Zufaldi Zakaria, Dicky Muslim, Agus Wiramsya Oscar. (2017). Analisis Stabilitas Lereng Area Timbunan Menggunakan Metoda Kesetimbangan Batas pada Tambang Terbuka Batubara Daerah Purwajaya, Kecamatan Loa Janan, Kabupaten Kutai Kartanegara. Bandung: Universitas Padjajaran.
- Thanh Liem Vo, Wiliam Nash, Marco Del Galdo, Mohammad Rezanian, Rich Crane, Mohaddesh Mousavi Nezhad, Liberato Ferrea. (2022). Coal mining wastes valorization as raw geomaterials in construction: A review with new perspectives. *Journal of Cleaner Production*. Vol 336 130213 p. 1-19 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130213>
- Wei Hu, Pawel Polaczyk, Hongren Gong, Yuetan Ma, Baoshan Huang. (2022). Visualization and Quantification of Soil Laboratory Impact Compaction. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* vol. 14 p. 616-619 doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.001
- Weixu Wang, Hongbiao Ling, Xiaoyan Hu, Jiaying, Zhang, Zhen Lu, Yong Guo, Yongxin Gu, Haidong Zhao. (2025). A Review of coal-based solid waste cementitious materials and their applications. *Journal of Building Engineering* vol. 111. Building Engineering 113405 p. 1-12 doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113405.
- Yuda Yudistira, Sulwan Permana, Ida Farida. (2015). Analisa Kepadatan Tanah pada Timbunan di Saluran Irigasi dengan Metode Pengujian Proctor dan *Sandcone*. Garut: Jurnal STT-Garut ISSN: 2302-7312 Vol. 13 No.1 2025 p. 1-13.
- Yu-Xiao Li, David Airey, Wei-Qiang Feng. (2023). Effectiveness of rolling dynamic compaction with a three-sided compactor on unsaturated *sand*. *Transportation Geotechnics* vol. 42 101093 p. 1-11 doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101093.
- Zhaoxinyu Liu, Shuangjiao Liu, Lina Gao, Junying Li, Xinju Li, Zhaorui Jing, Wen Song. (2024). Long-term recovery of compacted reclaimed farmland soil in coal mining subsidence area. *Ecological Indicators* vol. 168 p. 1-10 doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112758.