



Evaluasi Daya Dukung Tanah Formasi Kasai untuk Zonasi Ketahanan Geoheritage Danau Rayo, Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan

Budhi Setiawan*, Salsabila Az Zahra, Harnani

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Abstrak

Danau Rayo di Kabupaten Musi Rawas Utara, Sumatera Selatan, merupakan situs *geoheritage* dengan karakteristik geologi yang kompleks dan diduga terbentuk akibat proses tumbukan meteorit purba. Keterbatasan informasi mengenai kondisi geoteknik dan tingkat daya dukung tanah di kawasan ini menjadi kendala dalam penyusunan zonasi konservasi dan pengelolaan kawasan berbasis ilmiah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik geoteknik Formasi Kasai sebagai dasar penentuan zonasi ketahanan *geoheritage* Danau Rayo. Analisis dilakukan melalui pengujian sifat fisik dan mekanik tanah untuk memperoleh nilai daya dukung tanah (q_a) sebagai indikator kestabilan geologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kawasan Danau Rayo terbagi ke dalam dua zona utama, yaitu zona *basin* dengan nilai $q_a < 100 \text{ kN/m}^2$ yang mencerminkan tingkat ketahanan geoteknik rendah dan dikaitkan dengan material yang bersifat lepas serta belum terkonsolidasi secara optimal, serta zona *rim* dengan nilai $q_a > 100 \text{ kN/m}^2$ yang menunjukkan tingkat ketahanan tinggi karena tersusun atas material yang lebih kompak dan stabil. Berdasarkan hasil tersebut, zona *basin* direkomendasikan sebagai zona konservasi inti, sedangkan zona *rim* dinilai lebih sesuai untuk pengembangan geowisata berbasis konservasi. Studi ini menegaskan bahwa parameter daya dukung tanah dapat dimanfaatkan sebagai dasar ilmiah dalam penentuan zonasi konservasi dan pengelolaan *geoheritage* berbasis kestabilan tanah melalui pendekatan geoteknik dan spasial.

Kata kunci: Danau Rayo; daya dukung tanah; Formasi Kasai; *geoheritage*; geoteknik; geowisata

Abstract

Danau Rayo, located in Musi Rawas Utara Regency, South Sumatra, is a geoheritage site characterized by complex geological conditions and hypothesized to have formed through an ancient meteoritic impact. The limited availability of information regarding geotechnical conditions and soil bearing capacity in this area poses a challenge for the development of scientifically based conservation zoning and site management. This study aims to evaluate the geotechnical characteristics of the Kasai Formation as a basis for determining the geoheritage resilience zoning of Danau Rayo. The analysis was conducted through laboratory testing of soil physical and mechanical properties to obtain soil bearing capacity values (q_a) as indicators of geological stability. The results indicate that the Danau Rayo area can be divided into two main zones: the basin zone, with q_a values $< 100 \text{ kN/m}^2$, reflecting low geotechnical resilience associated with loose and poorly consolidated materials; and the rim zone, with q_a values $> 100 \text{ kN/m}^2$, indicating high resilience due to more compact and stable materials. Based on these findings, the basin zone is recommended as a core conservation zone, while the rim zone is considered more suitable for conservation-oriented geotourism development. This study demonstrates that soil bearing capacity parameters can be effectively used as a scientific basis for conservation zoning and geoheritage management, grounded in ground stability, through an integrated geotechnical and spatial approach.

Keywords: bearing capacity; *geoheritage*; geotechnical characteristics, geotourism, Kasai Formation, Rayo Lake

*) Korespondensi: budhi.setiawan@unsri.ac.id

Diajukan : 14 Oktober 2025

Diterima : 6 Januari 2026

Diterbitkan : 16 Maret 2026

PENDAHULUAN

Berdasarkan Dinas Pariwisata Sumatera Selatan Danau Rayo merupakan salah satu objek wisata danau yang terletak di Desa Sungai Jernih, Kecamatan Rupit yang memiliki luas sekitar 100 hektar dan memiliki kedalaman 40 meter. Danau Rayo ini merupakan danau alami yang memiliki topografi *circular* yang sangat jarang ditemui. Berdasarkan investigasi tim penyusun Rencana Induk *Geopark* Musi Rawas Utara sementara memberikan *preliminary result* yang mengarah pada hipotesis Danau Rayo sebagai *impact crater lake*. *Impact crater lake* terbentuk sebagai hasil tumbukan meteorit atau asteroid yang menabrak permukaan bumi. Kawah tumbukan merupakan struktur geologi khas yang memiliki ciri morfologi lingkaran, breksi dampak, serta keberadaan mineral bertekanan tinggi seperti *coesite* dan *stishovite*. Apabila di dalam depresi terisi atau terakumulasi air, maka akan membentuk *impact crater lake* (French, 1998). Keunikan morfologi Danau Rayo menunjukkan bentuk dan elevasi sekeliling danau terutama di sisi tenggara mendukung interpretasi sebagai struktur dampak yang telah mengalami pelapukan intensif dan erosi sehingga fitur rim tidak lagi terlihat jelas (Sari et al., 2024). Karakteristik morfologi tersebut merekam proses geologi masa lalu yang terwujud dalam bentang alam, litologi, serta sifat material penyusunnya.

Keberadaan Danau Rayo tidak hanya mencerminkan ekspresi geomorfologi setempat, tetapi juga merepresentasikan dinamika proses geologi dan evolusi lingkungan wilayah sekitarnya. Rekaman proses geologi ini memberikan nilai ilmiah yang penting bagi kajian kebumih, khususnya dalam memahami sejarah pembentukan dan perkembangan bentang alam. Dengan karakteristik tersebut, Danau Rayo memiliki potensi *geoheritage* sebagai objek geologi yang bernilai ilmiah, edukatif, dan konservasi, sehingga keberadaannya layak untuk diidentifikasi, dilindungi, dan dimanfaatkan secara berkelanjutan.

Geoheritage ialah suatu warisan geologi yang berupa unsur-unsur kegeologian yang dapat berupa bentang alam, singkapan batuan, mineral, dan lain sebagainya yang memiliki nilai penting bagi ilmu pendidikan, budaya, dan ekonomi. *Geoheritage* dapat meliputi *geosite* yang merupakan kawasan yang memiliki nilai ilmiah tinggi yang layak dilindungi demi keberlanjutan

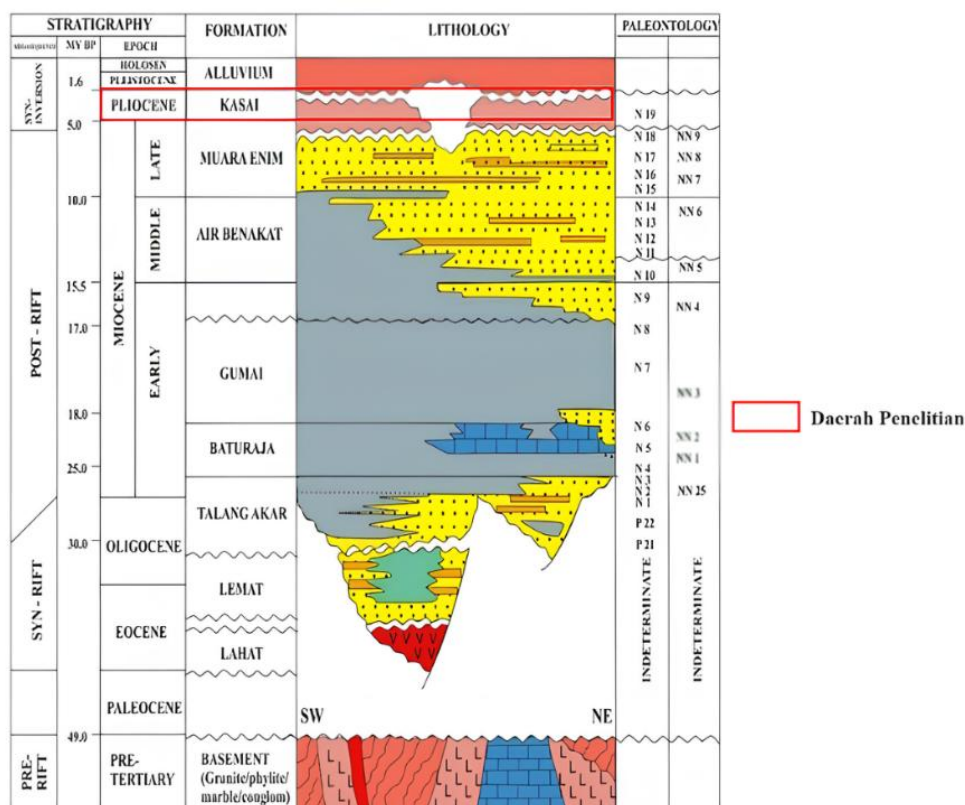
pengetahuan geologi (Brilha, 2018). *Geoheritage* bukan hanya penting untuk pendidikan, tetapi juga sebagai potensi pariwisata berbasis geologi (*geotourism*) (Geology Society of America (GSA), 2011). Danau Rayo yang memiliki indikasi struktur dampak yang berpotensi kuat menjadi kandidat *geoheritage* karena memiliki nilai pendidikan atau ilmiah, estetika, dan konservasi yang tinggi.

Analisis geoteknik berperan penting dalam konservasi *geoheritage* karena memungkinkan evaluasi kondisi bawah permukaan, sifat fisik dan mekanik tanah serta batuan, dan tingkat kestabilan kawasan. Salah satu aspek utama dalam kajian ini adalah penilaian daya dukung tanah (*bearing capacity*) untuk menilai kemampuan tanah dan batuan dalam menahan beban alami maupun akibat aktivitas manusia. Kawasan Danau Rayo tersusun oleh Formasi Kasai (Qtk) yang didominasi oleh tuf, tuf batuapung dengan sisipan batupasir tufan, setempat konglomeratan, serta kayu terkarsikan (Suwarna et al., 1992), yang secara langsung memengaruhi parameter geoteknik seperti kohesi dan sudut geser dalam. Oleh karena itu, analisis geoteknik pada Formasi Kasai (Qtk) menjadi penting sebagai dasar pendukung konservasi *geoheritage* Danau Rayo dan perencanaan pengembangan wilayah berbasis kondisi geologi setempat.

TINJAUAN PUSTAKA

Formasi Kasai (Qtk)

Formasi Kasai (Qtk) merupakan formasi termuda di Cekungan Sumatera Selatan yang tersusun atas litologi tuf, tuf batuapung sisipan batupasir tufan, setempat konglomeratan, dan kayu terkarsikan (Suwarna et al., 1992). Formasi Kasai terendapkan di atas Formasi Muara Enim secara tidak selaras pada fase akhir regresi dengan lingkungan berupa transisi fluvial dengan ketebalan 850 – 1.200 m. Pada bagian tengah Formasi Kasai terdapat batupasir (sedang - kasar) dengan struktur silang siur dan terdapat bidang erosi serta batulempung yang mencirikan lingkungan pengendapan kanal (sungai). Di bagian atas Formasi Kasai terdiri dari perselingan batupasir halus, tufa, dan lempung tufa. Pada lapisan batupasir terdapat struktur laminasi paralel dan silang siur paralel yang mengindikasikan lingkungan pengendapan berupa dataran banjir sedangkan batulempung



Gambar 1. Stratigrafi Regional Cekungan Sumatera Selatan (*Ginger & Fielding, 2005*)

dan batubara mengindikasikan lingkungan pengendapan danau atau rawa (Gambar 1).

Deformasi Pasca-Impak

Deformasi pasca impak terjadi pada tahap modifikasi setelah tahap ekskavasi selesai pada pembentukan kawah. Pada tahap ini, deformasi kawah lebih kompleks karena melibatkan interaksi antara gravitasi, kekuatan material, serta mekanisme kerusakan batuan. Material yang jatuh kembali ke dasar kawah memicu proses *slumping* dan *overturned flap*, disertai terbentuknya deformasi plastis permanen pada batuan target. Selain itu, retakan dan fragmentasi berkembang di sekitar dasar serta dinding kawah, sehingga menghasilkan zona lemah yang berpengaruh terhadap kestabilan kawah (Caldwell et al., 2021).

Hasil pemodelan 3D Danau Rayo menunjukkan adanya elevasi residual yang menyerupai rim di sisi tenggara serta litologi yang menunjukkan *sorting* baik porositas tinggi dan permeabilitas yang mendukung interpretasi sebagai zona slip akibat tumbukan meteor (Sari et al., 2024). Hal ini memperkuat pendekatan morfologi dan geoteknik dalam menilai potensi geoharitage berbasis struktur impak.

Geoheritage dan Ketahanan Geologi

Konsep *geoheritage* merujuk pada suatu kawasan yang memiliki nilai kegeologian dan meliputi aspek ilmiah, pendidikan, budaya estetika, serta ekonomi yang dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan (Gray, 2013). *Geoheritage* dapat disebut sebagai inti dari pengembangan geowisata dan edukasi masyarakat yang mencakup dua nilai yaitu nilai intrinsik berupa ilmu, pendidikan, dan estetika, serta nilai instrumental berupa manfaat bagi masyarakat melalui pariwisata, budaya, dan ekonomi lokal (Reynard & Brilha, 2017).

Ketahanan geologi ialah kemampuan suatu *geosite* untuk tetap bertahan terhadap tekanan baik alami maupun antropogenik agar tidak mengalami kerusakan secara permanen. Ketahanan geologi ini berhubungan erat dengan aspek *vulnerability* dan *degradation risk*. Suatu *geosite* dapat dikatakan memiliki ketahanan geologi yang tinggi apabila unsur geologinya sulit rusak, terlindungi secara hukum, jauh dari aktivitas manusia yang berpotensi merusak, serta berada dalam kondisi konservasi yang baik (Brilha, 2016).

Penilaian *geoheritage* dilakukan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menetapkan

prioritas konservasi, serta pemanfaatannya. Menurut Brilha (2016) penilaian *geoheritage* dibagi ke dalam empat aspek, yaitu nilai ilmiah, potensi pendidikan, potensi pariwisata, dan risiko degradasi. Nilai ilmiah menekankan pada representativitas, kelangkaan, integritas, dan nilai referensi. Potensi pendidikan dan pariwisata berkaitan dengan aksesibilitas, visibilitas, daya tarik, serta fasilitas pendukung lainnya. Selain aspek nilai, penilaian *geoheritage* juga perlu mempertimbangkan tingkat kerentanan dan risiko degradasi yang dapat mengancam keberlanjutan situs tersebut. Konsep ini dikenal sebagai *geoheritage risk assessment*, yang menekankan evaluasi terhadap potensi ancaman alami maupun antropogenik, seperti ketidakstabilan lereng, erosi, degradasi material geologi, serta tekanan aktivitas manusia. Risiko degradasi ialah dengan menilai tingkat kerentanan situs akibat faktor alamiah dan antropogenik. Dalam konteks ini, parameter geoteknik seperti daya dukung tanah menjadi indikator penting untuk menilai tingkat kerentanan fisik suatu situs *geoheritage*, sehingga

dapat mendukung penentuan zona konservasi dan pemanfaatan secara berkelanjutan.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Danau Rayo, Kecamatan Rupit, Kabupaten Musi Rawas Utara. Daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Kasai (Qtk) yang tersusun atas litologi tuff, batupasir, dan konglomerat pada daerah penelitian. Formasi Kasai diperkirakan diendapkan pada akhir Pliosen hingga awal Pleistosen (Suwarna et al., 1992). Data yang diambil didasarkan pada kebutuhan analisis geoteknik daerah penelitian.

Pengambilan Sampel

Data primer diambil langsung di lapangan berupa sampel tanah *undisturb* pada tujuh lokasi penelitian dengan kode sampel BR1, BR2, BR3, BR4, BR5, BR6, dan BR7 (Tabel 1). Sampel tanah diambil menggunakan metode *core sampling*, dimana sampel tanah yang diambil ialah inti tanah dengan menggunakan tabung inti (*core barrel*) yang dipasang pada alat bor.

Tabel 1. Lokasi Penelitian Titik Bor

No	Kode Sampel	Koordinat Titik Bor	Kedalaman Titik Bor	Kedalaman Muka Air Tanah dari Permukaan Tanah
1	BR1	48 M 264201 E 9708187 N	2 m	0,3 m
2	BR2	48 M 264671 E 9708043 N	2,2 m	1 m
3	BR3	48 M 264675 E 9707652 N	2 m	0,5 m
4	BR4	48 M 264242 E 9707495 N	2,2 m	0,3 m
5	BR5	48 M 264003 E 9707775 N	4 m	0,3 m
6	BR6	48 M 264050 E 9707350 N	2,4 m	1,5
7	BR7	48 M 264772 E 9707529 N	2,6 m	-



Gambar 2. a). Pengambilan Sampel Tanah *Undisturbed* pada Daerah Penelitian; b). Sampel Tanah *Undisturbed*.

Analisis Laboratorium

Pengujian di laboratorium dilakukan untuk mendapatkan tiga parameter utama di dalam penelitian, yaitu berat volume tanah (γ), kohesi (c), dan sudut geser dalam (ϕ). Uji kuat geser langsung (*direct shear test*) dilakukan untuk memperoleh nilai kekuatan geser tanah yang berupa sudut geser dalam (ϕ) dan kohesi tanah (c). Kohesi merupakan gaya tarik menarik antar partikel tanah. Bersama dengan sudut geser dalam, kohesi merupakan parameter kekuatan geser tanah yang menentukan kekuatan tanah terhadap deformasi akibat tegangan yang bekerja pada tanah. Nilai kohesi dan sudut geser dalam ini digunakan untuk menentukan perilaku tanah jika terjadi perubahan kondisi fisiknya akibat perubahan iklim, pembebanan, pemotongan/penggalian, dan rekayasa lainnya (Kusuma, 2019).

Pengujian berat volume tanah dilakukan untuk mengetahui hubungan antara massa tanah dengan volume total tanah termasuk volume pori-porinya. Pengujian ini menggunakan metode *ring* sampel. Setelah sampel diperoleh, dilakukan penimbangan untuk mendapatkan berat basah tanah, kemudian sampel dikeringkan dalam oven untuk memperoleh nilai berat kering tanah. Nilai berat volume basah didapatkan dari perbandingan berat tanah basah terhadap volume ring, sedangkan berat volume kering diperoleh dari perbandingan berat tanah kering dengan volume yang sama.

Daya Dukung Tanah Metode Terzaghi

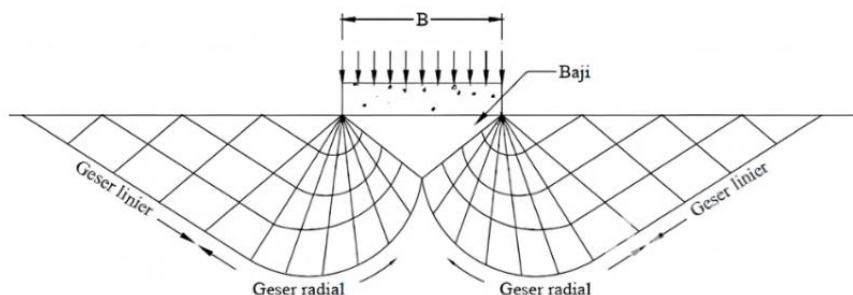
Daya dukung tanah merupakan kemampuan tanah dalam mendukung beban fondasi yang bekerja di atasnya (Hardiyatmo, 2003). Metode Terzaghi digunakan dalam penelitian ini karena merupakan pendekatan klasik yang fundamental dan masih luas diterapkan dalam analisis daya dukung tanah fondasi dangkal, serta mampu merepresentasikan hubungan langsung antara

daya dukung tanah dengan parameter mekanik utama, yaitu kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat volume tanah (γ), yang seluruhnya diperoleh dari hasil pengujian laboratorium di lokasi penelitian.

Pemilihan metode ini dinilai sesuai dengan kondisi geoteknik kawasan Danau Rayo yang didominasi oleh tanah berbutir pasir dengan tingkat plastisitas rendah hingga sedang, kondisi pembebanan dangkal, serta skala area penelitian yang relatif terbatas, sehingga asumsi dasar Metode Terzaghi, seperti homogenitas tanah secara lokal dan mekanisme keruntuhan geser umum, masih dapat diterima. Selain itu, penggunaan Metode Terzaghi memberikan hasil yang konservatif dan sistematis, sehingga efektif untuk tujuan penelitian ini dalam mengidentifikasi perbedaan zona ketahanan rendah dan tinggi antara area basin dan rim, serta sebagai dasar evaluasi dan rekomendasi pemanfaatan lahan di kawasan Danau Rayo.

Pada analisa daya dukung Terzaghi bentuk fondasi diasumsikan memanjang tak berhingga yang diletakkan pada tanah homogen dan dibebani dengan beban terbagi rata q_u . Beban total fondasi per satuan panjang P_u merupakan beban terbagi rata yang dikalikan dengan lebar fondasi (B). Karena adanya beban total tersebut, pada tanah yang terletak tepat di bawah fondasi akan membentuk suatu baji tanah yang menekan tanah ke bawah yang digambarkan pada Gambar 3.

Daya dukung tanah dibatasi oleh aman terhadap runtuhnya tanah (q_{ult}/SF) dan aman terhadap penurunan akibat konsolidasi tanah sehingga penurunan lokal tidak terlalu besar. Faktor-faktor daya dukung tanah dipengaruhi oleh nilai parameter tanah (γ , ϕ , c), kedalaman fondasi (D_f), ukuran dan bentuk fondasi, sifat tanah terhadap penurunan, dan kedalaman muka air tanah. Perhitungan kapasitas daya dukung tanah menurut Terzaghi dibagi menjadi:



Gambar 3. Pembebanan Fondasi dan Bentuk Bidang Geser (Hardiyatmo, 2003)

- Fondasi Menerus
 $qu = c.Nc + Po.Nq + 0,5 \gamma.B.N\gamma$
- Fondasi Bujur Sangkar
 $qu = 1,3 c.Nc + Po.Nq + 0,4 \gamma.B.N\gamma$
- Fondasi Lingkaran
 $qu = 1,3 c.Nc + Po.Nq + 0,3 \gamma.B.N\gamma$

Dimana:

Qu = daya dukung batas (kN/m^2)

Qa = daya dukung yang diizinkan (kN/m^2)

SF = *Safety Factor*

B = Lebar Fondasi (m)

Df = Kedalaman/Panjang Fondasi (m)

γ = berat volume tanah (kN/m^3)

$Nc, Nq, N\gamma$ = Faktor daya dukung, fungsi dari ϕ

Φ = sudut geser dalam ($^\circ$)

Analisis daya dukung dapat digunakan untuk menginterpretasi zona stabil dan zona lemah dengan membandingkan nilai daya dukung pada berbagai lokasi. Suatu lokasi penelitian dapat dikatakan sebagai zona stabil jika memiliki nilai daya dukung yang tinggi, sehingga aman untuk penempatan beban (Yanakieva et al., 2022). Sedangkan, dikatakan zona lemah jika memiliki nilai daya dukung yang rendah yang dapat menurunkan kapasitas dukung dan meningkatkan risiko kegagalan atau penurunan (Hong et al., 2023).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Geoteknik Formasi Kasai

Berikut merupakan beberapa hasil pengujian pada tujuh sampel tanah yang diperoleh dari tujuh lokasi penelitian yang berbeda.

Distribusi nilai berat volume tanah, kohesi, dan sudut geser dalam

Berat volume tanah pada tujuh sampel menunjukkan bahwa nilai berat volume tanah jenuh (γ_{sat}) pada ketujuh sampel lebih tinggi dibandingkan dengan nilai berat volume tanah basah (γ_b) dan berat volume tanah kering (γ_d). Grafik distribusi berat volume tanah menunjukkan bahwa nilai berat volume baik berat volume jenuh, berat volume basah, ataupun berat volume kering bervariasi. (Tabel 2 dan Gambar 4).

Berdasarkan hasil pengujian kuat geser langsung (*direct shear test*) didapatkan nilai kohesi (c) dan sudut geser dalam (ϕ) dari ketujuh sampel. Nilai kohesi mencerminkan besarnya gaya ikat antar partikel tanah, sedangkan sudut geser dalam menunjukkan kontribusi gaya gesekan antar butiran.

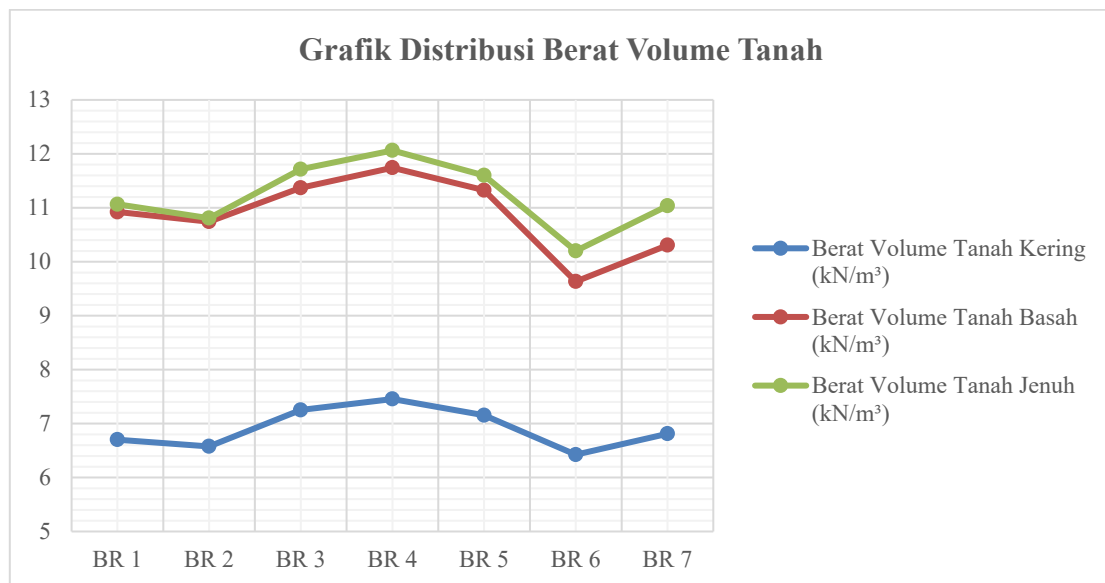
Grafik distribusi menunjukkan bahwa kohesi tertinggi terdapat pada titik bor BR7 yaitu sebesar $57,75 \text{ kN/m}^2$ dan terendah terdapat pada titik bor BR4 yaitu sebesar $5,19 \text{ kN/m}^2$. Hal tersebut mengindikasikan bahwa semakin besar nilai kohesi pada suatu tanah maka tanah akan lebih plastis, sedangkan kohesi yang rendah mengindikasikan bahwa tanah tersebut memiliki karakteristik lebih lepas atau granular. Sehingga, tanah pada titik bor BR7 lebih plastis dibanding titik bor lainnya. Parameter sudut geser dalam (ϕ) pada grafik distribusi memperlihatkan bahwa tanah pada titik bor BR5 memiliki kekuatan geser yang lebih tinggi, sedangkan tanah pada titik bor BR1 memiliki kekuatan geser paling rendah (Tabel 3 dan Gambar 5).

Tabel 2. Hasil Pengujian Berat Volume Tanah

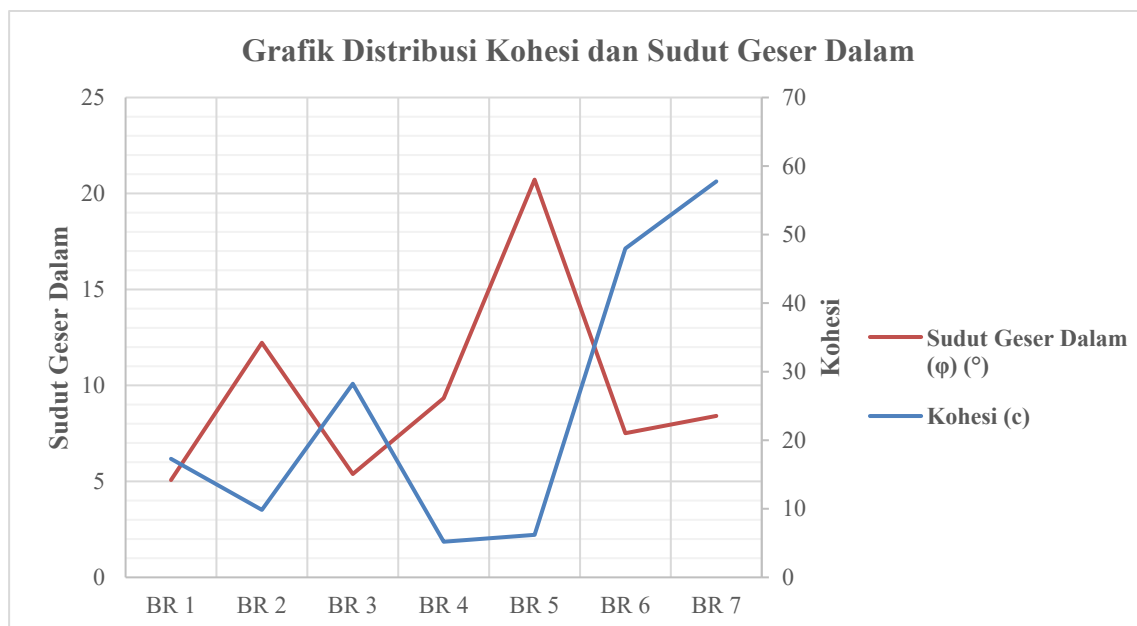
Kode Sampel	Kedalaman (m)	Berat Volume Tanah Kering (kN/m^3)	Berat Volume Tanah Basah (kN/m^3)	Berat Volume Tanah Jenuh (kN/m^3)
BR 1	0,7 - 1	6,702	10,922	11,065
BR 2	1,6 - 2	6,578	10,743	10,808
BR 3	1,7 - 1,85	7,252	11,370	11,714
BR 4	2,2 - 2,3	7,455	11,742	12,063
BR 5	1 - 1,5	7,154	11,326	11,600
BR 6	0,5 - 1	6,424	9,633	10,200
BR 7	1,2 - 1,5	6,812	10,306	11,037
Rata - Rata		6,911	10,863	11,212
Standar Deviasi		0,381	0,738	0,628

Tabel 3. Hasil Pengujian *Direct Shear Test*

Kode Sampel	Kedalaman (m)	Kohesi (c)	Sudut Geser Dalam (ϕ) ($^{\circ}$)
BR 1	0,7 - 1	17,29	5,07
BR 2	1,6 - 2	9,85	12,22
BR 3	1,7 - 1,85	28,24	5,38
BR 4	2,2 - 2,3	5,20	9,34
BR 5	1 - 1,5	6,20	20,72
BR 6	0,5 - 1	47,98	7,51
BR 7	1,2 - 1,5	57,76	8,41
Rata - Rata		24,64	9,807
Standar Deviasi		20,998	5,391



Gambar 4. Grafik Distribusi Berat Volume Tanah



Gambar 5. Grafik Distribusi Nilai Kohesi dan Sudut Geser Dalam

Korelasi Litologi Dengan Parameter Geoteknik

Berdasarkan hasil deskripsi langsung di lapangan, sampel tanah pada ketujuh titik memiliki litologi yang berbeda yang mencerminkan variasi litologi pada daerah penelitian (Tabel 4). Litologi sangat berpengaruh terhadap nilai parameter geoteknik seperti kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), dan berat volume tanah (γ). Pada tanah berbutir halus seperti lempung cenderung memiliki kohesi yang tinggi dikarenakan adanya ikatan elestristastik antar mineral lempung, sedangkan nilai sudut geser dalamnya cenderung rendah yang diakibatkan oleh lemahnya gesekan antar butir. Pada tanah berbutir kasar seperti pasir cenderung memiliki kohesi yang rendah dengan sudut geser dalam yang tinggi yang diakibatkan oleh dominasi kekuatan gesek antar butirnya. Untuk parameter berat volume (γ) dipengaruhi oleh kepadatan dan porositas litologi. Tanah dengan butir kasar seperti pasir biasanya memiliki berat volume yang lebih besar dibanding dengan tanah berbutir halus seperti lempung.

Daya Dukung Tanah

Penelitian ini berfokus pada analisis daya dukung fondasi dangkal dengan asumsi lebar fondasi sebesar 1,5 meter dan kedalaman fondasi 2 meter yang digunakan untuk merepresentasikan dimensi umum fondasi dangkal yang lazim diterapkan pada bangunan ringan hingga menengah, seperti fasilitas pendukung dan infrastruktur semi permanen di kawasan *geoheritage* Danau Rayo.

Kedalaman 2 m dipilih untuk mengurangi pengaruh lapisan tanah permukaan yang

umumnya bersifat lepas dan jenuh air, khususnya di zona *basin*, sehingga parameter geoteknik yang digunakan dalam perhitungan lebih mencerminkan kondisi tanah yang relatif stabil. Sementara itu, lebar fondasi 1,5 m dianggap cukup representatif untuk mengevaluasi respons daya dukung tanah terhadap parameter kohesi, sudut geser dalam, dan berat volume tanah, serta memberikan hasil yang konservatif dan konsisten dalam membandingkan ketahanan geoteknik antar zona penelitian.

Kondisi muka air tanah (MAT) bervariasi pada setiap titik bor, dimana pada titik bor BR1, BR2, BR3, BR4, BR5, dan BR6 muka air tanahnya berada di atas dasar fondasi, sedangkan muka air tanah pada titik bor BR7 berada di bawah dasar fondasi tetapi kedalamannya masih lebih kecil daripada lebar fondasi ($z < B$). *Safety factor* (SF) yang digunakan dalam penelitian ini ialah 3 Badan Standardisasi Nasional [BSN], 2017). Berdasarkan variabel tersebut, nilai daya dukung ultimit (q_u) dan daya dukung yang diizinkan (q_a) diperoleh untuk fondasi berbentuk menerus, bujur sangkar, dan lingkaran (Tabel 5 dan Tabel 6).

Tabel 4. Litologi pada Tiap Titik Bor

Kode Sampel	Kedalaman Sampel (m)	Litologi
BR1	0,7-1	Pasir
BR2	1,6-2	Pasir lempungan
BR3	1,7 - 1,85	Lempung pasir
BR4	2,2 - 2,3	Pasir lempungan
BR5	1 - 1,5	Pasir lempungan
BR6	0,5 - 1	Lempung pasir
BR7	1,2 - 1,5	Pasir lempungan

Tabel 5. Nilai Daya Dukung Ultimit (q_u)

Kode Sampel	<i>General Shear Failure (q_u)</i>			<i>Local Shear Failure (q_u)</i>		
	Menerus	Bujur Sangkar	Lingkaran	Menerus	Bujur Sangkar	Lingkaran
BR 1	135,329	173,190	173,002	123,554	158,303	158,266
BR 2	139,991	169,541	168,913	111,029	136,146	136,071
BR 3	238,060	304,139	303,854	221,747	283,590	283,533
BR 4	77,606	92,100	91,559	50,020	62,176	62,007
BR 5	169,839	203,303	200,081	107,140	130,007	129,524
BR 6	417,677	532,831	532,773	389,217	497,174	497,156
BR 7	585,041	737,520	735,665	486,773	618,459	617,841
Rata-rata	251,935	316,089	315,121	212,783	269,408	269,200
Standar Deviasi	183,431	234,347	234,217	164,442	210,711	210,629

Tabel 6. Nilai Daya Dukung Diizinkan (qa)

Kode Sampel	General Shear Failure (qa)			Local Shear Failure (qa)		
	Menerus	Bujur Sangkar	Lingkaran	Menerus	Bujur Sangkar	Lingkaran
BR 1	45,110	57,730	57,667	41,185	52,768	52,755
BR 2	46,664	56,514	56,304	37,010	45,382	45,357
BR 3	79,353	101,380	101,285	73,916	94,530	94,511
BR 4	25,869	30,700	30,520	16,673	20,725	20,669
BR 5	56,613	67,768	66,694	35,713	43,336	43,175
BR 6	139,226	177,610	177,591	129,739	165,725	165,719
BR 7	195,014	245,840	245,222	162,258	206,153	205,947
Rata-rata	83,978	105,363	105,040	70,928	89,803	89,733
Standar Deviasi	61,144	78,116	78,072	54,814	70,237	70,210

Pada Tabel 5 dan Tabel 6 menunjukkan bahwa nilai daya dukung tertinggi ialah pada tipe fondasi bujur sangkar dan nilai daya dukung terendah ialah pada tipe fondasi menerus. Jenis keruntuhan *general shear failure* untuk daya dukung ultimit dan daya dukung yang diizinkan untuk tiap titik bor memiliki nilai daya dukung paling besar, sedangkan jenis keruntuhan *local shear failure* memiliki nilai daya dukung yang rendah. Berdasarkan hasil perhitungan daya dukung fondasi dangkal pada masing-masing titik bor, maka lokasi penelitian yang memiliki nilai daya dukung terbesar ialah BR6 dan BR7.

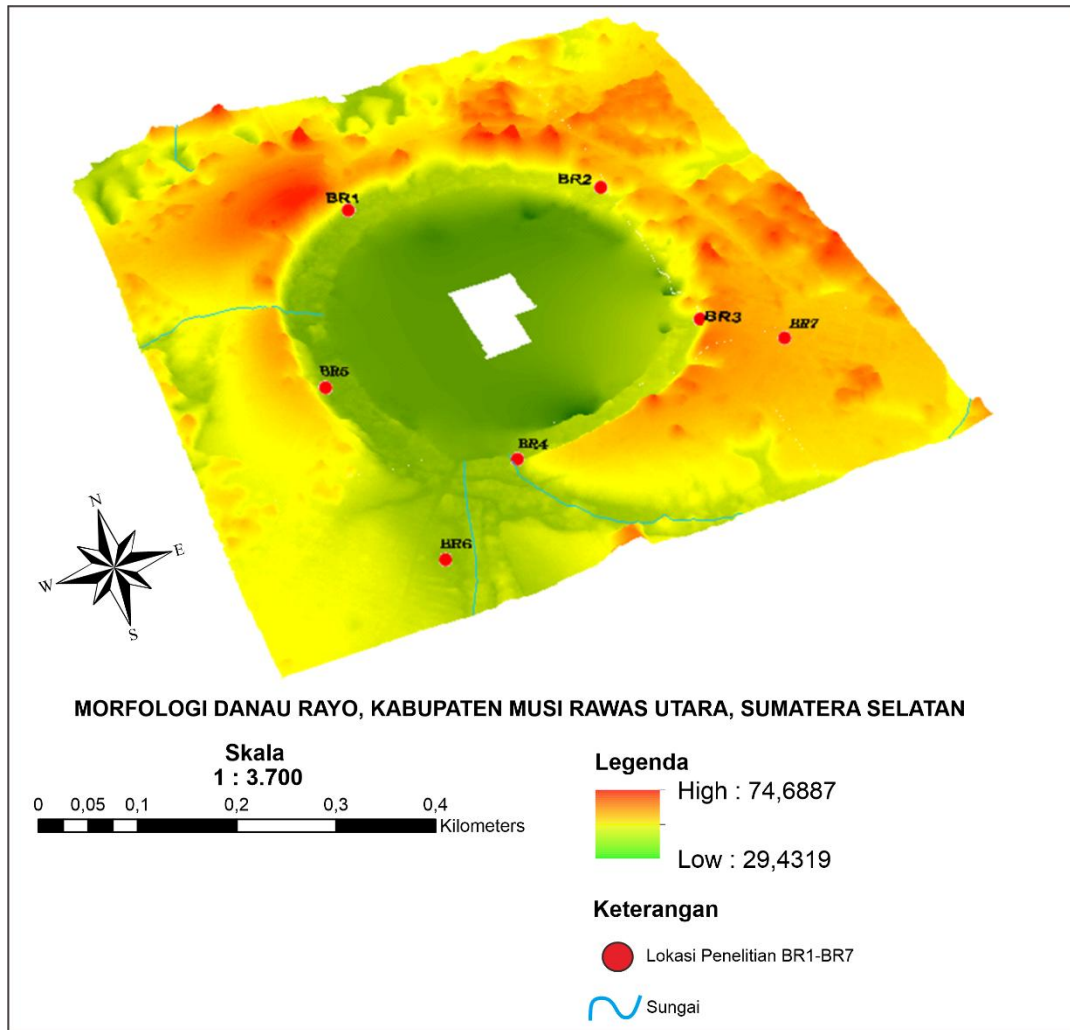
Daerah penelitian terbagi menjadi dua zonasi daya dukung berdasarkan nilai daya dukung yang diizinkan (qa), yaitu ketahanan rendah atau zona lemah pada BR1, BR2, BR3, BR4, dan BR5 dengan nilai $qa < 100 \text{ kN/m}^2$ dan ketahanan tinggi atau zona stabil pada BR6 dan BR7 dengan nilai $qa > 100 \text{ kN/m}^2$. Zona ketahanan rendah berada pada bagian *basin*, di mana nilai daya dukung rendah disebabkan oleh adanya tumbukan meteor yang menghasilkan material beragam dan tidak beraturan akibat fragmentasi batuan serta proses redeposisi pasca tumbukan. Sebaliknya, zona ketahanan tinggi berada pada bagian *rim*, yang tersusun atas material lebih kompak dan stabil karena tidak secara langsung dipengaruhi oleh energi tumbukan, sehingga memiliki konsolidasi dan kapasitas dukung tanah yang lebih tinggi (Gambar 6).

Implikasi Terhadap Ketahanan Geoheritage

Perbedaan nilai daya dukung di daerah penelitian memiliki implikasi langsung terhadap ketahanan *geoheritage*. Zona *basin* yang menunjukkan nilai daya dukung rendah mengindikasikan kondisi tanah yang tidak stabil akibat material hasil tumbukan meteor (Sari et al., 2024) dimana proses pelapukan dan erosi pasca-impak menyebabkan hilangnya jejak rim dan menciptakan zona lemah dengan litologi granular dan tidak terkonsolidasi. Hal ini menjadikan bagian *basin* rentan terhadap deformasi, penurunan tanah (*settlement*), maupun erosi, sehingga perlu dijaga dari aktivitas pembangunan yang berpotensi mengganggu kestabilan.

Sebaliknya, pada bagian *rim* memiliki nilai daya dukung tinggi karena tersusun atas material yang lebih kompak dan stabil, sehingga secara geoteknik lebih layak untuk pembangunan fasilitas penunjang konservasi *geoheritage*, tanpa menimbulkan risiko besar terhadap kerusakan geologis maupun degradasi lanskap alami.

Nilai daya dukung dari tiga jenis fondasi tersebut digunakan sebagai dasar operasional zonasi konservasi geologi. Zona *basin* direkomendasikan sebagai zona konservasi inti dengan pembatasan aktivitas pembangunan, sedangkan zona *rim* dapat difungsikan sebagai zona penyangga dan pemanfaatan terbatas. Pendekatan ini mendukung prinsip konservasi berkelanjutan yaitu menjaga keseimbangan antara pelestarian nilai ilmiah dan peningkatan manfaat, edukatif, serta ekonomi bagi masyarakat sekitar.



Gambar 6. Morfologi daerah penelitian. Lokasi penelitian BR1, BR2, BR3, BR4, dan BR5 memiliki daya dukung rendah dan terletak di sekitar *basin*, sedangkan lokasi penelitian BR6 dan BR7 memiliki daya dukung tinggi dan terletak di sekitar *rim*.

KESIMPULAN

Analisis geoteknik terhadap Formasi Kasai di kawasan Danau Rayo, Musi Rawas Utara, menunjukkan bahwa karakteristik tanah dan batuan berpengaruh langsung terhadap ketahanan *geoheritage*. Nilai daya dukung tanah (q_a) membedakan dua zona utama, yaitu *basin* dengan ketahanan rendah akibat material hasil tumbukan meteor yang tidak terkonsolidasi, dan *rim* dengan ketahanan tinggi karena tersusun atas material yang lebih kompak dan stabil. Perbedaan ini menjadi dasar penting dalam penentuan zonasi konservasi dan rencana pemanfaatan kawasan. Zona *basin* sebaiknya dipertahankan sebagai zona konservasi inti dengan pembatasan konstruksi berat. Pemanfaatan dibatasi untuk struktur ringan non-struktural menggunakan fondasi dangkal tipe bujur sangkar. Sementara

itu, zona *rim* direkomendasikan untuk pembangunan struktur permanen dan semi permanen dengan pilihan fondasi bujur sangkar, persegi, atau lingkaran, sesuai beban dan karakteristik tanah. Dengan demikian, hasil analisis geoteknik Formasi Kasai dapat mendukung upaya konservasi serta pengembangan wilayah berbasis geologi yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Riset dan Pengembangan, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas dukungan pendanaan melalui Program Bantuan Operasional Perguruan Tinggi Negeri (BOPTN) skema Penelitian, sesuai

dengan Kontrak Pelaksanaan Program Nomor: 109/C3/DT.05.00/PL/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017—Persyaratan perancangan geoteknik*.
- Brilha, J. (2016). Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage*, 8(2), 119–134. DOI: doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3
- Brilha, J. (2018). Chapter 4 - Geoheritage: Inventories and Evaluation. In E. Reynard & J. Brilha (Eds.), *Geoheritage* (pp. 69–85). Elsevier. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00004-6
- Caldwell, W. K., Euser, B., Plesko, C. S., Larmat, C., Lei, Z., Knight, E. E., Rougier, E., & Hunter, A. (2021). Benchmarking numerical methods for impact and cratering applications. *Applied Sciences*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/app11062504>
- French, B. M. (1998). *Traces of Catastrophe A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*.
- Geology Society of America (GSA). (2011). *Position Statement: Geoheritage*.
- Ginger, D., & Fielding, K. (2005). The petroleum systems and future potential of the South Sumatra Basin. *Proceeding Indonesian Petroleum Association 30th Annual Convention*.
- Gray, M. (2013). *Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature*. John Wiley & Sons.
- Hardiyatmo, H. C. (2003). *Mekanika Tanah 2* (3rd ed.). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hong, Y., Du, H., & Chen, M. (2023). Bearing Capacity Analysis of the Weak Basement, Progressive Destruction Analysis, and Evaluation of the Dump on an Inclined Strip Section Using the Upper-Limit Method: A Case Study in an Anonymous Open-Cast Coal Mine. *Sustainability*, 15(13). DOI: <https://doi.org/10.3390/su151310240>
- Kusuma, W. B. (2019). *Karakteristik Sifat Fisik dan Daya Dukung Tanah Endapan Aluvium Daerah Caruban*. *Jurnal Nasional Pengelolaan Energi MigasZoom*, 1(2), 15-27. DOI: doi.org/10.37525/mz/2019-2/227
- Reynard, E., & Brilha, J. (2017). *Geoheritage: assessment, protection, and management*. Elsevier.
- Sari, M., Setiawan, B., & Idarwati. (2024). Danau Rayo from the geoscience perspective: Is it a product of a meteor crater? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1424(1), 012008. DOI: 10.1088/1755-1315/1424/1/012008
- Suwarna, N., Gafoer, S., Amin, T. C., & Hermanto, B. (1992). Peta Geologi Lembar Sarolangun, Sumatra. *Bandung: Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi*.
- Yanakieva, A., Baltov, A., & Nikolova, G. (2022). Determination of the Safety Zones According to the Bearing Capacity of Overloaded Structural Elements. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences*, 75(12), 1822–1829.