

POTENSI IMPLEMENTASI *GROUTING* DAN GEOLISTRIK DALAM KONSERVASI LUKISAN DINDING GUA PRASEJARAH: STUDI KASUS SITUS LEANG ASUE

POTENTIAL IMPLEMENTATION OF GROUTING AND GEOELECTRICAL METHODS IN THE CONSERVATION OF PREHISTORIC CAVE PAINTINGS: A CASE STUDY OF SITE LEANG ASUE

Preza Setiawan¹ dan Eliza Awalia Rahma²

¹Departemen of Civil Engineering National Ilan University, Taiwan

²Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

prezasetiawan@gmail.com; eliza.122210157@student.itera.ac.id

Abstrak. Karst Maros-Pangkep di Sulawesi Selatan merupakan salah satu kawasan karst terpenting di Indonesia yang menyimpan seni cadas tertua di dunia, seperti lukisan figuratif babi kutil sulawesi (*Sus celebensis*) yang berusia sekitar 43.900 tahun. Namun, lukisan dinding gua di kawasan ini menghadapi ancaman serius akibat faktor lingkungan, terutama infiltrasi air hujan yang mempercepat pelapukan kimiawi pada batu kapur, pertumbuhan lumut dan ganggang, serta perubahan ventilasi gua. Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi metode konservasi berbasis teknik sipil dengan pendekatan *grouting* guna mengurangi infiltrasi air dan memperkuat struktur gua. Pengukuran geolistrik dilakukan di *Leang Asue* untuk memetakan pola aliran air bawah tanah, mendeteksi potensi keretakan gua, serta mengidentifikasi posisi muka air tanah. Hasil analisis resistivitas menunjukkan bahwa air bawah tanah memiliki nilai resistivitas 2,00–100 Ωm pada kedalaman 1,25–12,4 meter, sementara batu kapur memiliki nilai resistivitas lebih tinggi (50–4000 Ωm). Selain itu, analisis curah hujan menggunakan metode distribusi *Gumbel* menunjukkan intensitas hujan tinggi di kawasan ini, mencapai 232 mm pada kala ulang 2 tahun, yang berkontribusi terhadap meningkatnya laju infiltrasi air ke dalam gua. Berdasarkan temuan ini, metode *grouting* direkomendasikan sebagai solusi konservasi dengan injeksi material mortar pada retakan untuk mengurangi infiltrasi dan memperkuat struktur gua. Penerapan metode ini diharapkan dapat meningkatkan perlindungan terhadap lukisan cadas dan memastikan kelestarian warisan budaya prasejarah yang sangat berharga.

Kata Kunci: Karst Maros-Pangkep, Lukisan Cadas, Pelapukan, Geolistrik, Konservasi, *Grouting*

Abstract. The Maros-Pangkep Karst in South Sulawesi is one of Indonesia's most significant karst regions, home to the world's oldest rock art, including the figurative painting of the Sulawesi warty pig (*Sus celebensis*), estimated to be around 43,900 years old. However, the cave paintings in this area face serious threats from environmental factors, particularly rainwater infiltration, which accelerates the chemical weathering of limestone, promotes moss and algae growth, and alters cave ventilation. This study explores a civil engineering-based conservation method using a grouting approach to reduce water infiltration and strengthen cave structures. Geoelectrical measurements were conducted at Leang Asue to map underground water flow patterns, detect potential cave fractures, and identify the water table position. Resistivity analysis results indicate that groundwater has resistivity values ranging from 2.00 to 100 Ωm at depths of 1.25–12.4 meters, while limestone exhibits higher resistivity values (50–4000 Ωm). Additionally, rainfall analysis using the Gumbel distribution method reveals high rainfall intensity in the region, reaching 232 mm for a 2-year return period, which contributes to increased water infiltration into the cave. Based on these findings, the grouting method is recommended as a conservation solution by injecting mortar material into cracks to reduce infiltration and reinforce

DOI: 10.55981/konpi.2024.123

This conference is held by the Ministry of Culture and National Research and Innovation Agency of Indonesia

©2024 The Author(s). This is an open access article CC BY-SA license

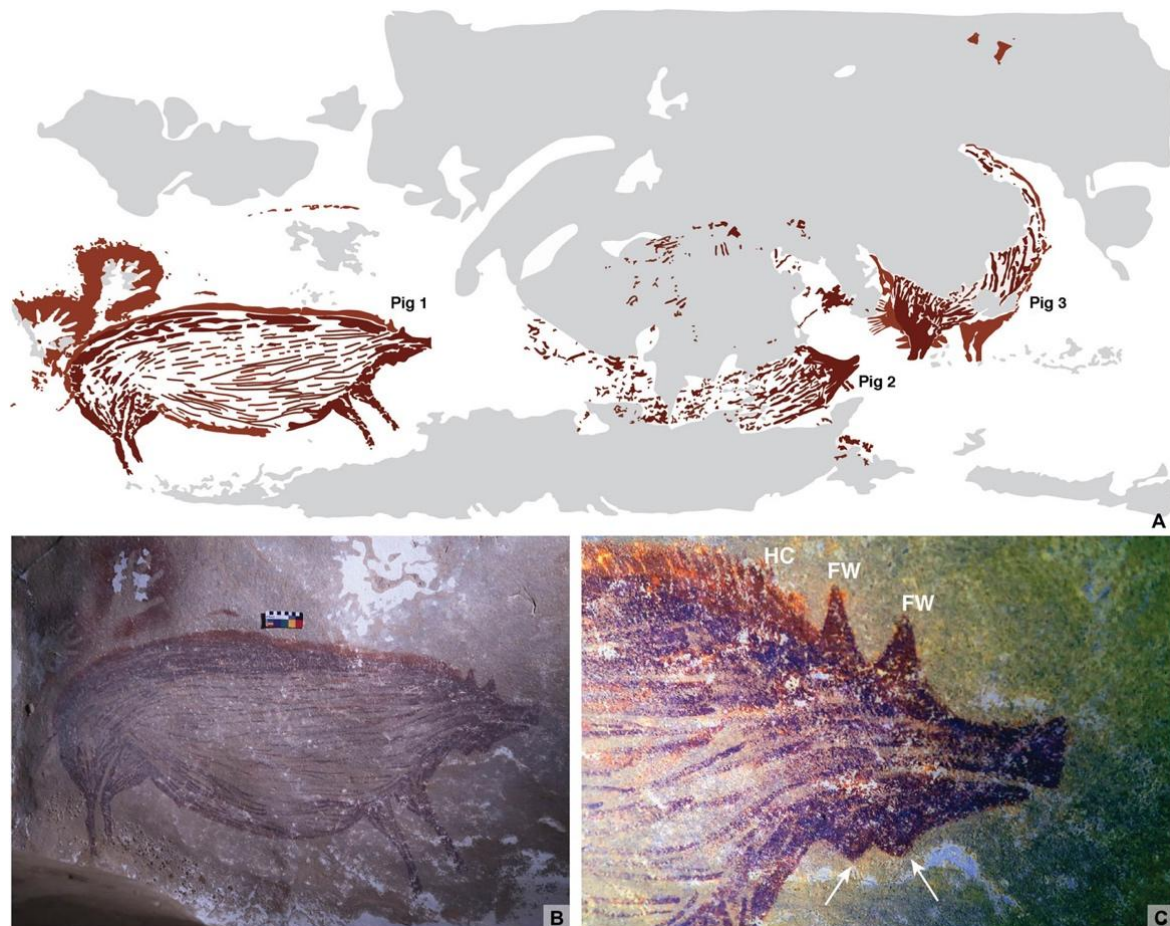
(<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

the cave structure. Implementing this method is expected to enhance the protection of rock paintings and ensure the preservation of this invaluable prehistoric cultural heritage.

Keywords: Maros-Pangkep Karst, Rock Art, Weathering, Geoelectrical Survey, Conservation, Grouting

1 Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi karst seluas sekitar 154.000 km², yang mencakup 0,08% dari luas daratan nasional. Di Sulawesi Selatan, formasi karst tersebar di beberapa kabupaten, dengan wilayah yang paling terkenal terletak di Kabupaten Maros dan Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep) (Ahmad and Hamzah 2016). Karst merupakan bentang alam yang terdiri dari batu gamping atau kapur yang tak terpisahkan dengan gua memiliki peran sebagai penyimpan air tawar raksasa (Sunkar 2014). Umumnya pada gua-gua kawasan karst sering ditemukan tinggalan arkeologis yang meliputi lukisan dinding, alat-alat batu, sisa-sisa makanan (seperti kerang atau moluska), kerangka manusia, gerabah, dan keramik. Melalui data arkeologi ini, penelitian dapat mengungkapkan gambaran kehidupan manusia masa lalu di situs-situs gua tersebut (Mansyur 2007). Kawasan Karst Maros-Pangkep memiliki nilai seni prasejarah yang diyakini sebagai seni gua (seni cadas) tertua di dunia. Lukisan figuratif babi kutil Sulawesi (*Sus celebensis*) yang terletak di *Leang Tedongnge* dianggap sebagai seni cadas paling awal di wilayah ini. Dari hasil pertanggalan seri uranium, seni cadas ini setidaknya berumur 43.900 tahun atau 43,9 ka (Brumm et al. 2021).



Gambar 1. Seni Cadas Figuratif babi kutil Sulawesi (*Sus celebensis*) pada Gua *Leang Tedongnge*, Kawasan Karst Maros Pangkep. Sumber: (Brumm et al. 2021)

Karst terbentuk melalui proses kompleks pelarutan batuan oleh air dalam berbagai kondisi iklim dan hidrogeologi, yang berpotensi menyebabkan kerusakan dinding gua akibat infiltrasi air yang melarutkan batu kapur sebagai material utama penyusunnya (Ezersky, Eppelbaum, and Legchenko 2023). Lukisan dinding gua prasejarah di Kawasan Karst Maros-Pangkep terancam oleh perubahan kondisi atmosfer selama musim hujan dan kemarau. Pelapukan kimia dari air hujan, karbonasi batu kapur, serta pertumbuhan lumut dan ganggang menyebabkan

pengelupasan lapisan batuan dan hilangnya detail lukisan. Selain itu, aliran air hujan yang tidak terkendali mempercepat degradasi fisik (Suhartono 2012; Nur Fitrah et al. 2021). Studi oleh Bourges et al. (2014) mengungkapkan bahwa gangguan terhadap keseimbangan iklim dalam gua, seperti perubahan ventilasi akibat pembukaan gua atau peningkatan infiltrasi air hujan, mempercepat pelapukan, sebagaimana terjadi di Chauvet dan beberapa gua berlukisan lainnya di Prancis. Di Chauvet, stabilitas suhu dan kelembapan memungkinkan pelestarian lukisan, sementara di Marsoulas dan Pech Merle, gangguan ventilasi dan pengeringan musiman menyebabkan pemudaran warna. Upaya mitigasi yang diterapkan mencakup optimalisasi sistem penutupan gua, pengelolaan kelembapan, serta pengendalian jumlah pengunjung. Namun, hingga kini belum ada solusi konkret untuk mengurangi dampak infiltrasi air hujan yang meningkat.

Penelitian ini berfokus pada perkembangan dan tantangan konservasi koleksi serta situs prasejarah di Indonesia, khususnya seni cadas di kawasan Karst Maros-Pangkep. Pendekatan teknik sipil diusulkan dengan menerapkan metode *grouting* pada dinding gua untuk mencegah infiltrasi air yang merusak lukisan prasejarah. Metode *grouting* dilakukan dengan cara menginjeksi mortar yang terdiri dari campuran air, agregat halus, dan semen ke dalam retakan atau rongga pada bangunan (Wang et al. 2024). Teknik ini sangat efektif dalam memperbaiki keretakan, tidak hanya pada bangunan bersejarah tetapi juga pada struktur besar seperti bendungan (dam), karena dapat memperkuat dan menstabilkan struktur yang rusak (Conde Silva 2019). *Grouting* tidak hanya dilakukan pada struktur beton, tetapi juga dapat diterapkan pada tanah untuk menghasilkan struktur yang lebih kaku dan stabil (Patel 2019). Sebelum melakukan *grouting*, pengujian geolistrik dilakukan untuk memetakan pola aliran air bawah permukaan, potensi debit air pada akuifer, posisi *water table*, dan deteksi keretakan pada struktur gua. Studi serupa pernah dilakukan oleh Funk, Flores-Orozco, and Steiner (2024), yang menyelidiki kondisi bawah permukaan yang mendukung deteksi rongga dengan pada gua *Forststra beneinbruch* pegunungan Alpen. Dengan demikian, tindakan konservasi dapat lebih tepat sasaran dan efektif. Pendekatan ini bertujuan melindungi situs lukisan dinding gua dari kerusakan lebih lanjut dan memastikan kelestarian warisan budaya yang sangat berharga.

2 Metode

Metode penelitian yang digunakan yaitu metode kualitatif, terdiri dari studi pustaka dan pengolahan data berupa data hujan yang didapatkan melalui *website* BMKG (data sekunder) dan data pengukuran geolistrik (data primer). Survey geolistrik dilakukan di salah satu Kawasan Karst Maros-Pangkep yaitu, *Leang Asue* (Gua Anjing). Metode geolistrik bertujuan untuk mendeteksi pola aliran di bawah permukaan tanah dengan mengukur nilai resistivitas (Rahmani et al. 2020; Febriani, Islami, and Muhammad 2020). Resistivitas umumnya digunakan untuk mendeteksi potensi debit akuifer dan *water table* bawah tanah (Prabowo, Hartono, and Kaeni 2022; Halik and Widodo 2008). Dalam penelitian ini, interpretasi dilakukan untuk pemetaan debit akuifer dan posisi *water table* dihubungkan dengan potensi keretakan dinding gua. Sedangkan studi pustaka diperlukan untuk melakukan perbandingan penerapan *grouting* pada situs bersejarah lainnya.

3 Hasil Penelitian

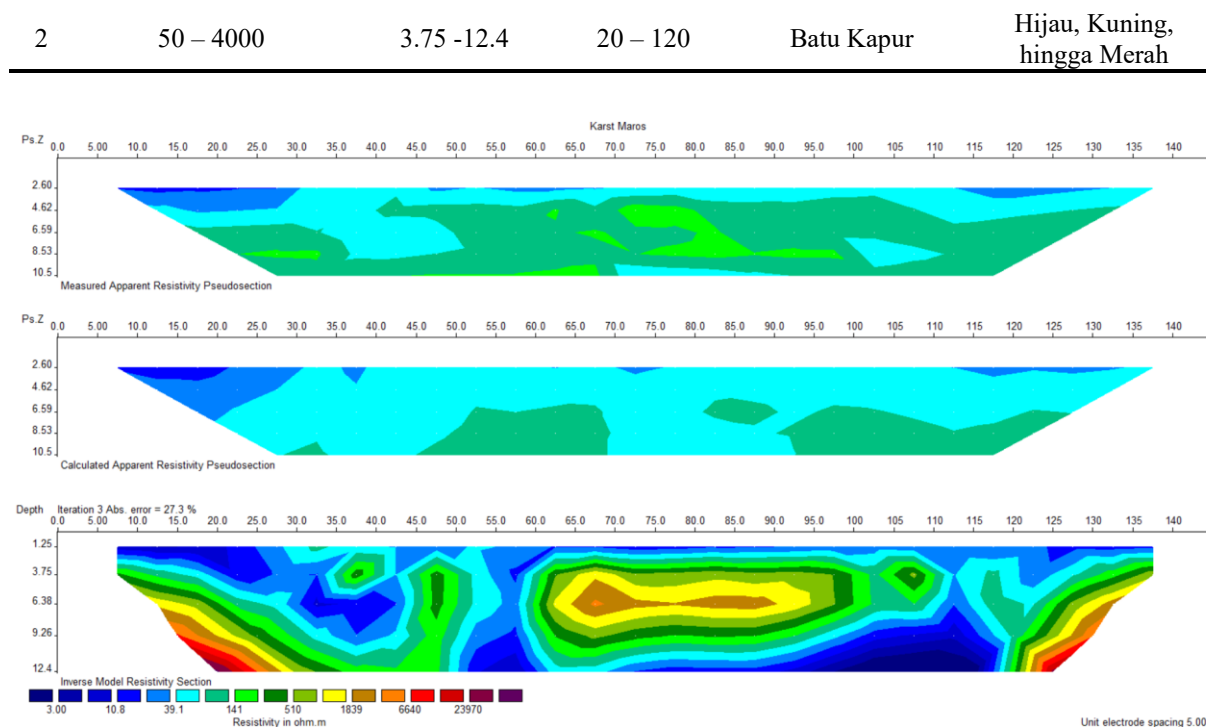
3.1 Interpretasi Data Pengukuran

Interpretasi data ini memberikan gambaran struktur bawah gua yang menunjukkan distribusi air dari permukaan. Data dianalisis menggunakan *software* Res2dinv dan konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, yang memungkinkan pemetaan kondisi hidrogeologi dengan lebih akurat (Hermawan and Eka Putra 2016).

Tabel 1 menyajikan data nilai resistivitas pengukuran pada *Leang Asue* dan praduga objek yang berada dibawah tanah *Leang Asue*, dengan mengacu pada resistivitas beberapa jenis batuan dan material tanah umum menurut Keller & Frischknecht (Bakar et al. 2024).

Tabel 1. Nilai resistivitas Leang Asue

No	Nilai Resistivitas (Ωm)	Kedalaman (m)	Jarak (m)	Praduga Material	Warna
1	2.00 – 100	1.25 – 12.4	0 – 120	Air Bawah Tanah	Biru Muda hingga Biru Tua



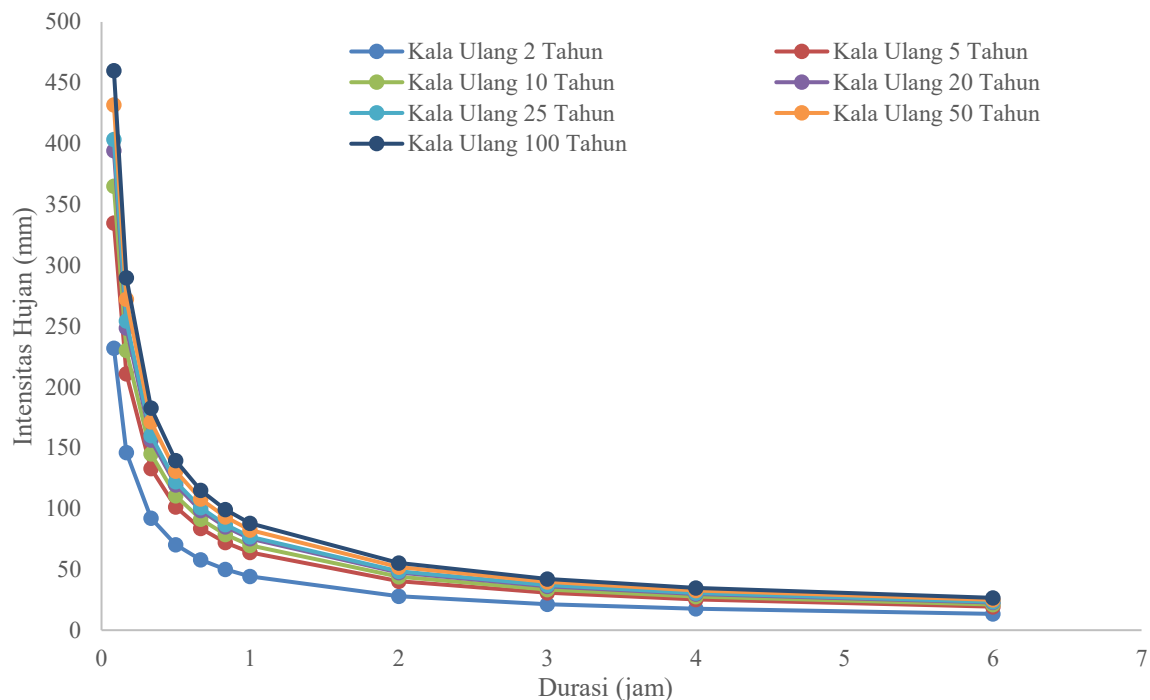
Gambar 2. Cross section nilai resistivitas dan hasil inversi Leang Asue. Sumber: (Penulis)

Nilai resistivitas di kawasan *Leang Asue* menunjukkan bahwa material air bawah tanah memiliki rentang resistivitas antara 2.00 hingga 100 Ω m, dengan kedalaman 1.25 hingga 12.4 meter dan rentang jarak 0 hingga 120 meter. Material ini diidentifikasi dengan warna biru muda hingga biru tua. Sementara itu, batu kapur sebagai material penyusun utama karst memiliki rentang resistivitas lebih tinggi, yaitu antara 50 hingga 4000 Ω m, tersebar pada kedalaman 3.75 hingga 12.4 meter dan jarak 20 hingga 120 meter, serta divisualisasikan dengan warna hijau, kuning, dan merah.

Rentang nilai resistivitas ini memberikan informasi mengenai karakteristik material dan distribusi air bawah tanah di area tersebut. Secara proses, karst terbentuk dari interaksi antara air asam dan batuan yang mudah larut, seperti batu kapur, yang juga memiliki nilai estetika (Chen et al. 2024). Karst memiliki sistem distribusi air yang unik, di mana air meresap ke bawah tanah melalui celah pori dan lubang pembuangan alami (Wu and Wang 2024). Hasil inversi pada *Leang Asue* memberikan gambaran tentang akuifer dan *water table* yang terbentuk dari proses distribusi air di kawasan tersebut. Temuan ini juga menunjukkan adanya celah pada pori-pori dan pembuangan alami yang menjadi perhatian utama peneliti, karena distribusi air tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada lukisan cadas di Karst Maros-Pangkep.

3.2 Interpretasi Data Pengukuran

Air bawah tanah (*Groundwater*) merupakan sumber air yang terdapat di pori bawah permukaan dan saluran karst, merupakan reservoir air tawar terbesar kedua setelah es kutub (Pavlovskaya 2002). Keberadaan air bawah tersebut akibat hujan mengisi air tanah yang mendukung siklus hidrologi (Winter et al. 1999). Oleh karena itu, penting untuk memetakan intensitas hujan guna memahami korelasi iklim hujan, yang dapat mempengaruhi kerusakan lukisan cadas di Karst Maros-Pangkep. Pada perhitungan data curah hujan ini peneliti menggunakan metode perhitungan distribusi data dilakukan dengan fungsi eksponensial ganda atau distribusi *Gumbel* (Purba, Lukman, and Sarifah 2021). Pendekatan *mononobe* dipilih oleh peneliti karena pendekatan curah hujan jangka pendek dan hanya memerlukan data curah hujan maksimum harian, tanpa membutuhkan data hujan per jam (Astarini, Muliadi, and Adriat 2022). Adapun data hujan yang digunakan yaitu data hujan dalam kurun waktu 10 tahun terakhir (2014-2023) pada Stasiun Meteorologi Sultan Hasanuddin, Maros.



Gambar 3. Intensitas hujan (mm) terhadap Durasi (jam) pada Stasiun Meteorologi Sultan Hasanuddin, Maros

Intensitas curah hujan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa daerah sekitar Karst Maros-Pangkep memiliki intensitas curah hujan yang tergolong cukup tinggi, yaitu 232 mm pada kala ulang 2 tahun. Intensitas curah hujan ini cenderung meningkat seiring dengan peningkatan kala ulang. Meskipun demikian, nilai ini relatif lebih rendah dibandingkan dengan wilayah terdekat, yaitu Kota Makassar, yang memiliki curah hujan sebesar 376.3 mm (Islami et al. 2024). Berdasarkan pola yang terjadi, curah hujan di daerah Karst Maros-Pangkep dikategorikan sebagai curah hujan monsunial, yang ditandai dengan hujan yang terjadi minimal satu kali dalam periode tertentu. Demikian, kita dapat mengetahui bahwa lukisan cadas yang terdapat di Karst Maros-Pangkep menghadapi ancaman kerusakan hampir setiap waktu akibat hujan. Air hujan dapat bersifat asam karena karbon dioksida yang larut dalam air hujan membentuk asam karbonat. Dalam lingkungan yang tidak tercemar, pH air hujan pada Karst Maros-Pangkep berkisar sekitar 5.6, yang menunjukkan sifat asamnya. Kondisi ini dapat mempercepat proses pelapukan dan erosi pada lukisan cadas, mengancam kelestariannya dalam jangka panjang (Suhartono 2012).

4 Diskusi

Hasil pengukuran geolistrik di Kawasan Karst Maros-Pangkep menunjukkan bahwa distribusi air bawah tanah memiliki rentang resistivitas antara 2.00 hingga 100 Ωm , yang diidentifikasi dengan kedalaman 1.25 hingga 12.4 meter. Hal ini mengindikasikan potensi keretakan pada struktur gua yang dapat mempercepat degradasi seni cadas. Selain itu, data curah hujan selama sepuluh tahun terakhir mencatat intensitas yang cukup tinggi, mencapai 232 mm pada periode dua tahun, yang menunjukkan bahwa daerah ini mengalami curah hujan monsunial. Keasaman air hujan, dengan pH sekitar 5.6, berkontribusi terhadap pelapukan dan erosi lukisan, semakin memperburuk kondisi warisan budaya ini. Lukisan cadas di kawasan Karst Maros-Pangkep menghadapi ancaman konservasi yang signifikan akibat faktor lingkungan dan geologi. Curah hujan yang tinggi di wilayah ini mempercepat infiltrasi air ke dalam sistem gua, sementara keasaman air hujan memperburuk proses pelapukan kimia pada batu kapur (Bourges et al. 2014).

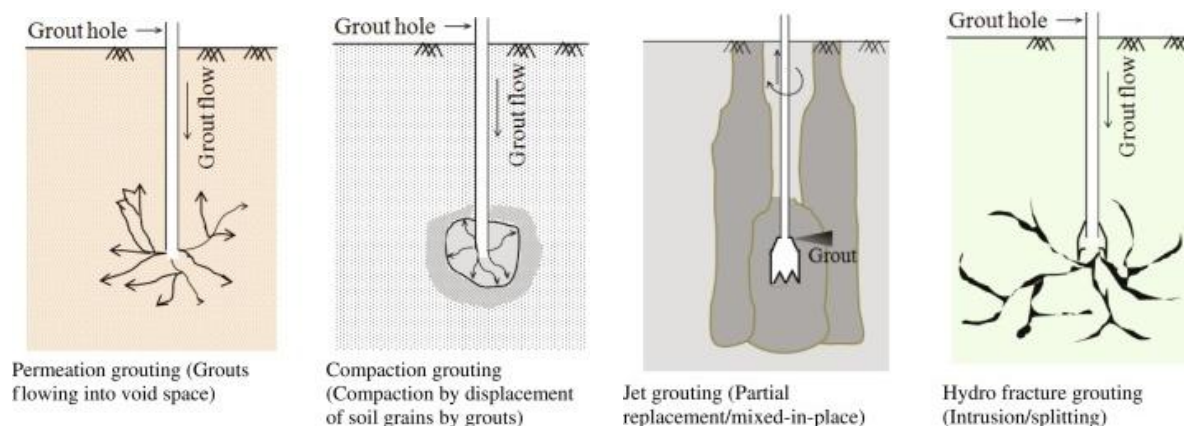
Seiring waktu, air hujan yang meresap membawa ion terlarut yang dapat melarutkan mineral penyusun dinding gua, menyebabkan degradasi struktural serta hilangnya detail lukisan prasejarah (Liñán et al. 2021). Berdasarkan interpretasi data geolistrik, tingkat resistivitas batu kapur yang bervariasi antara 50 hingga 4000 Ωm menunjukkan adanya perbedaan dalam kepadatan dan kadar air dalam batuan (Bakar et al. 2024). Nilai resistivitas yang sangat rendah ($<50 \Omega\text{m}$) mengindikasikan area yang jenuh air dan berpori, berpotensi menjadi jalur utama infiltrasi air yang mempercepat pelapukan. Sementara itu, resistivitas yang sangat tinggi ($>4000 \Omega\text{m}$) dapat menandakan

rongga atau rekahan yang berkembang akibat tekanan hidrostatik atau erosi internal. Resistansi dengan retakan tunggal meningkat saat retakan berkembang sepanjang arah kedalaman akibat udara yang terperangkap dalam retakan (Gu et al. 2023). Dengan demikian, tingginya curah hujan serta keberadaan rekahan dalam sistem karst ini menimbulkan ancaman nyata bagi keberlanjutan lukisan dinding gua.

Dalam konteks ini, *grouting* diusulkan sebagai solusi untuk mengurangi dampak infiltrasi air dengan menutup rekahan dan rongga yang dapat mempercepat degradasi dinding gua. Teknik ini telah banyak diterapkan dalam konservasi struktur bersejarah dan dapat disesuaikan dengan kondisi batuan kapur di Karst Maros-Pangkep (Ha-reendranathan et al. 2020). Penggunaan metode geolistrik, khususnya konfigurasi *Wenner-Schlumberger*, memungkinkan deteksi rekahan dengan akurasi tinggi meskipun kedalaman retakan kurang dari 32% dari kedalaman sesungguhnya (Neyamadpour 2018). Interpretasi data geolistrik dapat digunakan untuk mendeteksi rongga pada fondasi abutmen (Nur 2017), sehingga hal yang sama sangat mungkin dilakukan pada Karst Maros-Pangkep karena struktur penyusunnya adalah batu kapur (Sunkar 2014). Dengan pendekatan ini, *grouting* dapat diterapkan secara lebih presisi pada area yang rentan, meminimalkan kerusakan pada struktur alami gua sekaligus melindungi lukisan cadas dari degradasi lebih lanjut.

Penerapan *grouting* memiliki berbagai efek positif dalam konservasi lukisan cadas. Dengan menutup rekahan dan rongga, teknik ini dapat menghambat peresapan air hujan yang berkontribusi terhadap pelapukan kimia dan fisik dinding gua (Bai et al. 2018). *Grouting* membantu menstabilkan struktur batu kapur yang rapuh atau mengalami erosi internal, mencegah runtuhnya bagian gua yang dapat merusak lukisan (da Rocha Gomes et al. 2023). Teknik ini juga dapat memperlambat proses pelapukan dengan mengurangi paparan air dan perubahan kelembapan yang menyebabkan pengelupasan lapisan batuan tempat lukisan berada. Selain itu, dengan menutup celah yang tidak diinginkan, *grouting* turut berperan dalam menjaga keseimbangan iklim mikro dalam gua, yang penting untuk konservasi lukisan.

Namun, di samping manfaatnya, *grouting* juga memiliki potensi dampak negatif yang perlu dipertimbangkan. Penutupan rongga dengan *grouting* dapat mengurangi pertukaran udara alami, menyebabkan perubahan kelembapan dan suhu yang berpotensi berdampak pada ekosistem gua (Bonacci, Gottstein, and Roje-Bonacci 2009). Selain itu, jika material *grouting* yang digunakan tidak kompatibel dengan batu kapur, dapat terjadi reaksi kimia yang justru mempercepat degradasi batuan (Hu et al. 2023). Risiko lainnya adalah kemungkinan timbulnya tekanan berlebih akibat injeksi material *grouting* yang tidak terkontrol dengan baik, yang dapat menyebabkan retakan baru atau pergeseran struktur gua. Selain itu, penerapan *grouting* juga dapat mengganggu habitat mikroorganisme dan spesies unik yang bergantung pada kondisi alami gua (Said, Djamaluddin, and Irmawaty 2023).



Gambar 4. Proses Grouting pada Tanah (Sumber: Patel 2019)

Dengan mempertimbangkan manfaat dan risiko tersebut, penerapan *grouting* dalam konservasi lukisan cadas di Karst Maros-Pangkep harus dilakukan secara selektif dan berbasis data geologi yang komprehensif. Pendekatan berbasis geolistrik serta evaluasi iklim mikro sebelum dan sesudah *grouting* dapat menjadi langkah mitigasi untuk meminimalkan dampak negatif serta memastikan efektivitas konservasi. Hal ini penting agar upaya perlindungan lukisan cadas tidak hanya mengatasi masalah infiltrasi air tetapi juga tetap menjaga keseimbangan ekosistem alami gua dan keberlanjutan warisan budaya bagi generasi mendatang.

5 Kesimpulan

Grouting yang didahului oleh pemetaan geolistrik memungkinkan untuk diimplementasikan di situs Karst Maros-Pangkep sebagai upaya konservasi lukisan cadas. Hal ini didukung oleh beberapa faktor utama. Pertama, hasil interpretasi data geolistrik menunjukkan adanya retakan dan rongga dalam batuan kapur yang berperan sebagai jalur utama infiltrasi air, yang mempercepat proses pelapukan dan erosi lukisan. Kedua, data curah hujan menunjukkan bahwa kawasan ini mengalami intensitas hujan yang cukup tinggi dengan pola musonal, sehingga memperbesar risiko infiltrasi air ke dalam sistem gua. Ketiga, air hujan yang bersifat asam dengan pH sekitar 5.6 berkontribusi terhadap degradasi batu kapur melalui pelapukan kimia, yang dapat mengakibatkan hilangnya detail lukisan prasejarah. *Grouting* dapat diterapkan secara presisi berdasarkan hasil pemetaan geolistrik, yang memungkinkan identifikasi titik-titik kritis yang membutuhkan perbaikan. Dengan menutup rongga dan retakan, *grouting* dapat mengurangi peresapan air hujan dan menstabilkan struktur gua, sehingga memperlambat laju pelapukan lukisan cadas. Selain itu, teknik ini juga berkontribusi dalam menjaga keseimbangan mikroklimat di dalam gua dengan mengurangi fluktuasi kelembapan yang dapat menyebabkan pengelupasan batuan tempat lukisan berada.

Namun, penerapan *grouting* juga memerlukan perencanaan yang matang untuk memitigasi potensi dampak negatif. Penutupan rongga secara tidak tepat dapat mengganggu sirkulasi udara alami dalam gua, mempengaruhi ekosistem mikroorganisme, serta berisiko memicu tekanan berlebih yang dapat menciptakan retakan baru. Oleh karena itu, evaluasi mikroklimat dan pemantauan geolistrik sebelum serta sesudah penerapan *grouting* menjadi langkah penting dalam memastikan efektivitas konservasi. Dengan pendekatan yang selektif dan berbasis data geologi yang komprehensif, *grouting* dapat menjadi solusi konservasi yang efektif dalam menjaga keberlanjutan lukisan cadas di Karst Maros-Pangkep, sekaligus mempertahankan keseimbangan ekosistem alami gua.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini. Semua data dan informasi yang disajikan dalam studi ini diperoleh secara independen, dan tidak ada dukungan finansial atau keterlibatan pihak ketiga yang dapat mempengaruhi hasil dan interpretasi penelitian. Penelitian ini dilakukan semata-mata untuk tujuan akademis dan pelestarian warisan budaya.

Daftar Pustaka

- Ahmad, Amran, and A Siady Hamzah. 2016. "DATABASE KARST SULAWESI SELATAN." Makassar.
- Astarini, Asih, Muliadi, and Riza Adriat. 2022. "Studi Perbandingan Metode Penentuan Intensitas Curah Hujan Karakteristik Curah Hujan Kalimantan Barat." *PRISMA FISIKA* 10 (1): 1–7.
- Bai, Mingzhou, Yun Chen, Chengliang Wang, Xin Li, and Gang Tian. 2018. "Radar Spectral Analysis and Evaluation of the Effect of Grouting Treatment in Karst Caves and Soil Caves." *Environmental Earth Sciences* 77 (24): 795. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7980-7>.
- Bakar, Nur Ain Abu, Mohd Khaidir Abu Talib, Siti Nor Hidayah Arifin, Aziman Madun, Saiful Azhar Ahmad Tajudin, Mohd Firdaus Md, Faizal Pakir, and Ahmad Khairul Abd Malik. 2024. "Relationship of Resistivity Value with the Ground Material Information Obtained from Borehole Data: Case Study." *Research Square*, March. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3713794/v1>.
- Bonacci, Ognjen, Sanja Gottstein, and Tanja Roje-Bonacci. 2009. "Negative Impacts of Grouting on the Underground Karst Environment." *Ecohydrology* 2 (4): 492–502. <https://doi.org/10.1002/eco.90>.
- Bourges, F., P. Genthon, D. Genty, M. Lorblanchet, E. Mauduit, and D. D'Hulst. 2014. "Conservation of Prehistoric Caves and Stability of Their Inner Climate: Lessons from Chauvet and Other French Caves." *Science of The Total Environment* 493 (September):79–91. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.137>.
- Brumm, Adam, Adhi Agus Oktaviana, Basran Burhan, Budianto Hakim, Rustan Lebe, Jian-Xin Zhao, Priyatno Hadi Sulistyarto, et al. 2021. "Oldest Cave Art Found in Sulawesi." *Sci. Adv* 7 (January):4648–61. <http://gebco.net>.
- Chen, Yue, Cai Cheng, Kangning Xiong, Li Rong, and Shihao Zhang. 2024. "Quantifying the Biodiversity and Ecosystem Service Outcomes of Karst Ecological Restoration: A Meta-Analysis of South China Karst." *Catena* 245 (October). <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108278>.
- Conde Silva, João. 2019. "Use of Cement Based Grouts in the Rehabilitation of Concrete Dams: A Review." In *Fifth Confrence on Smart Monitoring*, 1–8. Lisbon: SMAR.
- Ezersky, Michael, Lev V Eppelbaum, and Anatoly Legchenko. 2023. "General Introduction to the Karst Problem." In *Applied Geophysics for Karst and Sinkhole Investigation*, 1-1-1–42. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-3635-2ch1>.
- Febriani, Riski, Nur Islami, and Juandi Muhammad. 2020. "Preliminary Investigation of Geothermal Potential in Pawam Site, Rokan Hulu, Indonesia." In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1655. IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1655/1/012126>.
- Funk, Barbara, Adrian Flores-Orozco, and Matthias Steiner. 2024. "Possibilities and Limitations of Cave Detection with ERT." *Geomorphology* 462 (October):109332. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109332>.
- Gu, Jiahui, Liang Chen, Yu Wan, Yaozong Teng, Shufa Yan, Liang Hu, Jiahao Wang, and Hanxuan Luo. 2023. "Study on the Electric Resistance Method in Crack Depth Measurements." *Frontiers in Earth Science* 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1082854>.
- Halik, Gusfan, and Jojok Widodo. 2008. "PENDUGAAN POTENSI AIR TANAH DENGAN METODE GEOLISTRIK KONFIGURASI SCHLUMBERGER DI KAMPUS TEGAL BOTO UNIVERSITAS JEMBER." *MEDIA TEKNIK SIPIL* 1 (1).
- Hareendranathan, Goutham, Jeny Jairaj Stella, Thirumalini Selvaraj, and Nambirajan Murugan. 2020. "GROUTING AND INJECTION TECHNIQUES TO REPAIR CRACKS AND WATER LEAKAGE AT THE RENUKA DEVI TEMPLE, CHANDRAGUTTI, INDIA." *Materiali in Tehnologije* 54 (5): 633–42. <https://doi.org/10.17222/mit.2019.250>.
- Hermawan, Oktanius Richard, and Doni Prakasa Eka Putra. 2016. "The Effectiveness of Wenner-Schlumberger and Dipole-Dipole Array of 2D Geoelectrical Survey to Detect The Occurring of Groundwater in the Gunung Kidul Karst Aquifer System, Yogyakarta, Indonesia." *Journal of Applied Geology* 1 (2): 71. <https://doi.org/10.22146/jag.26963>.
- Hu, Wenjing, Shiqiang Fang, Lina Xie, Xueqiang Chen, and Bingjian Zhang. 2023. "Macrokinetics of the Deterioration of Cement-Based Grouting Material for Predicting Its Service Life under Acid Rain Attack." *Heritage Science* 11 (1): 239. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01087-z>.
- Islami, Muhammad Fuad, Nur Fadilla T, Nurul Falah, Fatima Khairunnisa, and Nurul Aulya Jamal. 2024. "Analisis Karakteristik Perbandingan Curah Hujan Wilayah Pesisir Dan Wilayah Perbukitan Kota Makassar." *LaGeografia* 22 (2): 196. <https://doi.org/10.35580/lageografia.v22i2.59403>.
- Liñán, Cristina, José Benavente, Yolanda del Rosal, Iñaki Vadillo, Lucía Ojeda, and Francisco Carrasco. 2021. "Condensation Water in Heritage Touristic Caves: Isotopic and Hydrochemical Data and a New Approach for Its Quantification through Image Analysis." *Hydrological Processes* 35 (5). <https://doi.org/10.1002/hyp.14083>.
- Mansyur, Syahrudin. 2007. "Kajian Awal Fungsi Gua Dan Wilayah Sebaran Situs Gua." *Kapata Arkelogi* 3 (3): 49–61.

- Neyamadpour, Ahmad. 2018. "Detection of Subsurface Cracking Depth Using Electrical Resistivity Tomography: A Case Study in Masjed-Soleiman, Iran." *Construction and Building Materials* 191 (December):1103–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.027>.
- Nur Fitrah, Chaerunnisa, Sri Devi, Jusri, Israwati A Putri, Natalia P D Lembang, and Andi Anisya Anindya. 2021. "KARAKTERISTIK FISIK DAN KUALITAS AIR DI GUA SULAIMAN, DESA SAMANGKI, KABUPATEN MAROS (Physical Characteristic And Quality of Water in Sulaiman Cave, Samangki Village, Maros Regency)." *Jurnal ABDI: Sosial Budaya Dan Sains* 3 (1).
- Nur, Sitti Hijraini. 2017. "Interpretasi Data Geolistrik Dalam Penentuan Keberadaan Rongga Pada Pondasi Abutmen Dan Pier." *Jurnal Penelitian Enjiniring* 21 (1): 35–40. <https://doi.org/10.25042/jpe.052017.05>.
- Patel, Anjan. 2019. "Grouting." In *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*, 37–48. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817048-9.00005-6>.
- Pavlovskaya, Marianna E. 2002. "Mapping Urban Change and Changing GIS: Other Views of Economic Restructuring." *Gender, Place & Culture* 9 (3): 281–89. <https://doi.org/10.1080/0966369022000003897>.
- Prabowo, Adi, Hartono Hartono, and Oscar Kaeni. 2022. "ANALISIS POTENSI AIR TANAH MENGGUNAKAN METODE VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING (VES) DI KELURAHAN HARGOMULYO." *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)* 8 (2): 81–92. <https://doi.org/10.23960/jge.v8i2.189>.
- Purba, Nadya A. H., Anisah, Lukman, and Jupriah Sarifah. 2021. "PERBANDINGAN METODE MONONOBE DAN METODE VAN BREEN UNTUK PENGUKURAN INTENSITAS CURAH HUJAN TERHADAP PENAMPANG SALURAN DRAINASE." *Buletin Utama Teknik* 16 (2).
- Rahmani, T. R., D. P. Sari, A. Akmam, H. Amir, and A. Putra. 2020. "Using the Schlumberger Configuration Resistivity Geoelectric Method to Analyze the Characteristics of Slip Surface at Solok." In *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1481. Institute of Physics Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1481/1/012030>.
- Rocha Gomes, Suelen da, Liberato Ferrara, Luis Sánchez, and Mercedes Sánchez Moreno. 2023. "A Comprehensive Review of Cementitious Grouts: Composition, Properties, Requirements and Advanced Performance." *Construction and Building Materials* 375 (April):130991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130991>.
- Said, Sugira, Rudy Djamaluddin, and Rita Irmawaty. 2023. "Pengaruh Penambahan Sika Grout Pada Balok Beton Bertulang Dengan Kondisi Spalling." *Konstruksia* 14 (2): 9. <https://doi.org/10.24853/jk.14.2.9-18>.
- Suhartono, Yudi. 2012. "Faktor-Faktor Penyebab Kerusakan Lukisan Gua Prasejarah Di Maros Pangkep Dan Upaya Penanganannya." *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur* 6 (1). <http://www.scribd.com/doc/54176846/Proses->.
- Sunkar, Arzyana. 2014. "PEDOMAN SISTEM KLASIFIKASI GUA KARST : KUNCI PEMANFAATAN GUA KARST BERKELANJUTAN." *Jurnal Risalah Kebijakan Pertanian Dan Lingkungan: Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian Dan Lingkungan* 1 (1): 1–6.
- Wang, Wei, Ningning Wang, Yijun Bao, Quanfeng Wang, Xiaodi Chang, Fei Sha, and Xudong Chen. 2024. "Research and Implementation of Eco-Grouting Material Derived from Shield Tunneling Muck." *Case Studies in Construction Materials* 21 (December). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03852>.
- Winter, Thomas C., Judson W. Harvey, O. Lehn Franke, and William M. Alley. 1999. *Ground Water and Surface Water : A Single Resource*. Denver: US Geological Survey.
- Wu, Qinglin, and Lan Wang. 2024. "Farmland Hydrological Cycle under Agroforestry Systems and Efficient Use of Water Resources in the Karst Desertification Environment." *Heliyon* 10 (15). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35506>.

Biografi Penulis

Preza Setiawan lahir dan besar di Musi Banyuasin, Sumatera Selatan. Saat ini, ia sedang menempuh pendidikan magister di National Ilan University, Taiwan, setelah menyelesaikan studi sarjana di bidang Teknik Sipil dari Institut Teknologi Sumatera (ITERA). Sejak masa S1, Preza telah terlibat dalam beberapa kolaborasi penelitian dengan profesor di bidang material konstruksi di Taiwan, yang menunjukkan dedikasinya terhadap pengembangan inovasi dalam teknik sipil. Selain itu, Preza tertarik riset yang berkaitan dengan konservasi situs prasejarah dan penerapan ilmu teknik sipil untuk melindungi warisan budaya.