

# Pengabdian Masyarakat Berbasis Sains Material untuk Konservasi Struktur Benteng Leiden di Kabupaten Gorontalo Utara

**Indriati Martha Patuti<sup>\*1</sup>, Moh. Kasim<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Universitas Negeri Gorontalo; Jalan B.J. Habibie, Kec. Tilongkabila - Kabupaten Bone Bolango

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Mipa, Universitas Negeri Gorontalo

e-mail: \*<sup>1</sup>indri.m.patuti@ung.ac.id, <sup>2</sup>muhkasim@ung.ac.id

## Abstrak

Benteng Leiden adalah salah satu cagar budaya yang berada di Provinsi Gorontalo yang sangat penting untuk dilestarikan. Namun kondisi saat ini, benteng tersebut mengalami kerusakan berupa adanya retakan-retakan pada dinding. Berdasarkan hal ini maka perlu dilakukan perbaikan. Kegiatan pengabdian ini bertujuan menerapkan sains material dalam konservasi struktur Benteng Leiden (Benteng Orange), Kabupaten Gorontalo Utara. Struktur ini mengalami kerusakan berupa retakan dan degradasi mortar yang mengancam nilai historisnya. Metode konservasi meliputi survei, pengujian laboratorium terhadap mortar asli, dan pembuatan mortar tiruan menggunakan bahan lokal. Formula terbaik menggunakan semen putih dan pasir lokal rasio 1:3, menghasilkan mortar dengan warna mendekati asli dan kedap air. Pelatihan tenaga kerja lokal dilakukan untuk aplikasi konservasi, memperbaiki lima titik retakan pada benteng. Hasilnya meningkatkan kemampuan masyarakat dalam konservasi dan melestarikan warisan budaya.

**Kata kunci**—Konservasi cagar budaya, mortar tiruan, Benteng Leiden

## 1. PENDAHULUAN

Benteng Leiden, yang lebih dikenal oleh masyarakat setempat sebagai Benteng Orange, merupakan salah satu peninggalan sejarah penting dari masa kolonial Belanda yang terletak di Desa Dambalo, Kecamatan Kwandang, Kabupaten Gorontalo Utara, Provinsi Gorontalo (berjarak 70 km dari Kota Gorontalo). Benteng ini dibangun oleh pemerintah kolonial sebagai bagian dari sistem pertahanan pantai di kawasan Teluk Kwandang, yang pada masanya memiliki peran strategis dalam perdagangan dan pertahanan maritim.

Secara geografis, Benteng Orange berada di atas sebuah bukit dengan ketinggian 36 meter di atas permukaan laut, pada koordinat astronomi  $0^{\circ} 51' 2,06''$  LU –  $122^{\circ} 54' 51,49''$  BT. Lokasi ini memberikan pandangan luas ke arah laut dan pelabuhan, memungkinkan kontrol militer terhadap aktivitas yang masuk melalui jalur perairan. Struktur benteng menggunakan material lokal seperti batu karang dan mortar kapur yang direkatkan secara tradisional, menunjukkan adaptasi teknologi konstruksi Eropa terhadap kondisi lokal nusantara [1].

Dalam konteks sejarah, Benteng Orange berfungsi sebagai pos militer untuk mengawasi dan mempertahankan wilayah utara Gorontalo dari serangan pihak luar, sekaligus sebagai pusat kendali pemerintahan kolonial di kawasan pesisir utara Sulawesi. Nama "Leiden" sendiri mengacu pada kota

di Belanda yang menjadi pusat pendidikan dan ilmu pengetahuan, dan kerap digunakan dalam penamaan tempat oleh pemerintah kolonial.

Sebagai pengakuan atas nilai sejarah, arsitektur, dan peran budaya yang dimiliki, Benteng Orange telah ditetapkan sebagai Cagar Budaya Nasional oleh Menteri Kebudayaan dan Pariwisata, Ir. Jero Wacik, SE melalui Keputusan Menteri Nomor: PM.30/PW.007/MKP/ 2008 tertanggal 23 Mei 2008 [2]. Penetapan ini sekaligus menandai pentingnya pelestarian situs sebagai bagian dari identitas budaya lokal dan sejarah nasional Indonesia.

Sayangnya, kondisi fisik benteng saat ini mengalami kerusakan struktural di sejumlah bagian, seperti retakan, pelapukan mortar, dan lepasnya batu penyusun, yang memerlukan intervensi konservasi segera. Upaya pelestarian Benteng Orange tidak hanya bertujuan menjaga warisan sejarah, tetapi juga membuka ruang partisipatif masyarakat lokal dalam pendidikan budaya dan pengembangan ekowisata berbasis warisan sejarah. Untuk itu dilakukan kegiatan konservasi oleh Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah XVII, dengan bantuan tim teknis/tenaga ahli di bidang teknik sipil dan teknik geologi dari Universitas Negeri Gorontalo. Kegiatan pengabdian ini juga melibatkan mahasiswa, dimana diharapkan terjadi transfer ilmu dan pengalaman yang berdampak langsung terhadap penguatan kapasitas masyarakat.

Kegiatan konservasi ini diawali dengan survei lokasi, yaitu survei geologi berupa

pengamatan kondisi dan karakteristik batuan, kemudian dilakukan percobaan di laboratorium, untuk membuat komposisi mortar yang warna dan kualitasnya sama dengan kondisi asli batuan, seperti yang telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya, seperti [3], [4], dan [5]. Penelitian dan praktik konservasi berbasis sains material juga telah terbukti efektif di berbagai situs bersejarah [6], [7], [8]. Selain itu, partisipasi masyarakat lokal menjadi aspek penting dalam keberlanjutan pelestarian situs budaya [9], [10].

Swastikawati, dkk (2022) menyarankan untuk menggunakan mortar kapur dalam konservasi Benteng Keraton Buton dan Benteng Indraputra, karena mortar kapur menyerupai mortar asli yang mengandung kalsium karbonat [3]. Permana (2021) menyatakan bahwa penambahan air tebu dapat mengurangi kadar air jenuh pada mortar. Mortar yang ditambahkan air tebu bisa mengurangi porositas. Mortar dengan rasio 2 pasir: 1 bubukan bata: 1 kapur dan penambahan air tebu menghasilkan mortar optimal dengan kekuatan tekan tertinggi tetapi dengan porositas terendah. Komposisi mortar klasik ini yang sesuai untuk mencegah kebocoran dengan menutupi sambungan pada atap Candi Pawon [4]. Sedangkan Setyawan (2012) menyatakan bahwa perlu melakukan penutupan nat pada selasar Candi Borobudur agar tidak mengakibatkan terjadinya pelapukan batuan penyusun lantai selasar [5].

Berdasarkan hal tersebut maka tujuan utama kegiatan ini adalah menerapkan hasil riset sains material untuk mendukung pelestarian warisan budaya melalui konservasi struktur Benteng Leiden, yang dirancang untuk memadukan pendekatan ilmiah dan partisipatif dalam konservasi struktur Benteng Leiden.

## 2. METODE

### 2.1 Lokasi, Fokus, dan Sasaran

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan di Benteng Leiden (Benteng Orange), Desa Dambalo, Kecamatan Kwandang – Kabupaten Gorontalo Utara (Gambar 1 dan Gambar 2), sedangkan tim pelaksana kegiatan pengabdian (dosen dan mahasiswa) bersama mitra dan para pekerja ditunjukkan dalam Gambar 3 dan Gambar 4. Situs cagar budaya nasional ini mengalami retakan serta degradasi mortar pada dinding batu. Fokus program adalah konservasi berbasis sains material melalui formulasi dan aplikasi mortar tiruan yang menyerupai mortar asli, dilaksanakan bersama masyarakat dan instansi terkait. Sasaran kegiatan adalah: (i) tersusunnya formula adukan yang *match* secara

visual-fungsional, (ii) peningkatan kapasitas tenaga lokal, (iii) perbaikan fisik pada titik prioritas, dan (iv) skema monitoring geoteknik berkelanjutan.



Gambar 1. Lokasi kegiatan



Gambar 2. Benteng Leiden/Benteng Orange



Gambar 3. Tim Pengabdian (dosen dan mahasiswa) bersama Mitra dan Para Pekerja



Gambar 4. Tim Pengabdian bersama Mitra dan Para Pekerja

## 2.2 Analisis Kebutuhan

Analisis kebutuhan terdiri dari:

1. Teknis-material: diperlukan karakterisasi mortar asli dan uji laboratorium untuk menentukan komposisi tiruan berbahan lokal; hasil uji sebelumnya menunjukkan semen putih: pasir 1:3 (SP1:3) paling mendekati warna asli sekaligus lebih kedap air daripada SP1:4.
2. Sosial-kelembagaan: dibutuhkan pelatihan tenaga lokal dan kolaborasi lintas pihak (universitas-BPK Wilayah XVII) agar praktik konservasi bisa direplikasi dan berkelanjutan.
3. Risiko kawasan: topografi perbukitan memerlukan monitoring geoteknik (retakan/kemiringan) serta opsi grouting pada indikasi retakan dalam.

## 2.3 Model/Pendekatan

Model/pendekatan:

1. Siklus sains material: survei → pengambilan sampel → uji lab → formulasi → validasi lapangan.
2. Kolaboratif-partisipatif: akademisi, BPK Wilayah XVII, tenaga kerja lokal, dan mahasiswa.
3. Berbasis risiko geoteknik: intervensi ringan-sedang diikuti rekomendasi penguatan (grouting) serta monitoring berkala.

Siklus kerja berbasis sains material diterapkan mulai dari analisis hingga validasi lapangan [4], [5], [9]. Selain itu, dilakukan pendekatan berbasis risiko geoteknik untuk mendeteksi potensi retakan dalam dan gerakan tanah di sekitar benteng [9], [11].

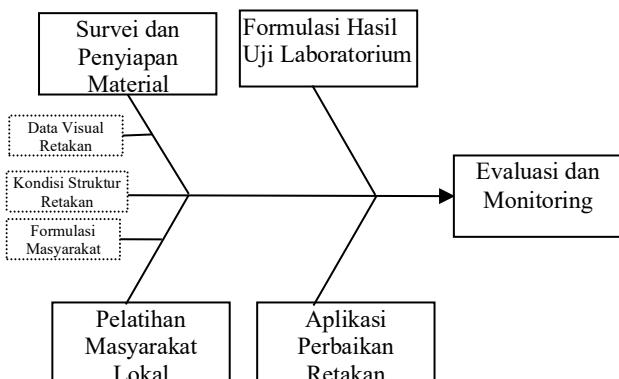
## 2.4 Tahapan Kegiatan

Pelaksanaan kegiatan meliputi tahapan seperti dijelaskan dalam Gambar 2:

1. Survei kondisi struktur benteng dan penyiapan material:  
Pembersihan dinding benteng dari lumut dan kerak menggunakan minyak atsiri sereh wangi.
2. Formulasi hasil uji laboratorium:  
Penetapan adukan mortar: semen putih: pasir 1:3 sebagai komposisi acuan lapangan, yang mendekati warna asli batuan.
3. Pelatihan tenaga kerja lokal mengenai cara pembuatan dan aplikasi mortar tiruan:  
Praktik pembuatan dan aplikasi adukan SP1:3; K3, penyiapan permukaan, dan curing.
4. Aplikasi konservasi mortar tiruan pada titik-titik retakan di Benteng Leiden:

Pembersihan dan pembasahan terkontrol bagian retak → pengisian mortar berlapis → perapihan tekstur/warna → curing → dokumentasi. Target perbaikan 5 titik prioritas.

5. Evaluasi dan diseminasi:  
Pemeriksaan hasil; dokumentasi; pembuatan artikel ilmiah dan *implementation agreement*.
6. Keberlanjutan  
Monitoring geoteknik rutin (*crack meter*/kemiringan lereng) dan usulan multi-year untuk area belum tertangani; integrasi *project-based learning* dalam kurikulum.



Gambar 5. Diagram alir kegiatan

## 2.5 Peserta dan Peran

Pelaksana dan tanggungjawab kegiatan ini adalah:

1. Tim teknis (Teknik Geologi dan Teknik Sipil/Geoteknik): perumusan metode, QA/QC, supervisi lapangan.
2. Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah XVII: fasilitasi lokasi, perizinan, pemeliharaan, promosi.
3. Tenaga kerja dan masyarakat lokal: pelaksanaan konservasi harian dan perawatan pasca intervensi.
4. Mahasiswa: dukungan teknis dan dokumentasi; transfer pengetahuan.

## 2.6 Mekanisme Penyelesaian Masalah Lapangan

Mekanisme penyelesaian masalah di lingkungan kegiatan pengabdian adalah sebagai berikut:

1. Diagnosa dini: klasifikasikan retakan permukaan vs dugaan retakan dalam untuk menentukan level intervensi (adukan permukaan vs grouting).
2. SOP kerja: pembersihan-pembasahan-pengisian adukan SP1:3 bertahap-perapihan-curing-inspeksi.
3. Mitigasi risiko: atur waktu kerja untuk cuaca terbuka; K3 akses lereng; uji patch kecil untuk keseragaman warna; dokumentasi ketat untuk evaluasi.

4. Eskalasi teknis: bila indikasi retakan dalam/gerakan tanah, perlu dilakukan grouting dan tingkatkan monitoring geoteknik secara berkala sesuai dengan aturan dan ketentuan yang berlaku [6].

### 2.7 Indikator Kinerja

Indikator kinerja meliputi *output* dan *outcome*:

1. Formula mortar tiruan terdokumentasi (SP1:3) beserta hasil uji visual-fungsi.
2. Konservasi fisik 5 titik retakan sesuai prioritas dan berita acara/rekam foto “before–after”.
3. Pelatihan tenaga kerja lokal terlaksana
4. Implementation Agreement (kerja sama) & artikel ilmiah.
5. Outcome Jangka Menengah : penurunan keluhan rembesan/kerusakan berulang pada titik intervensi; sistem monitoring geoteknik rutin berjalan; materi diintegrasikan ke pembelajaran berbasis proyek.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Hasil

Kegiatan pengabdian diawali dengan identifikasi dinding benteng yang telah mengalami retak (Gambar 3). Sebelum dilakukan perbaikan, dilakukan briefing dan pelatihan/uji coba campuran mortar kepada tenaga kerja lokal (masyarakat setempat). Berdasarkan hasil uji coba, digunakan formulasi mortar dengan rasio semen putih dan pasir lokal 1:3 (SP1:3) (Gambar 4), karena menghasilkan warna paling mendekati mortar asli serta memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap kelembapan dibandingkan formulasi SP1:4. Kegiatan pembersihan dilakukan untuk menghilangkan lumut dan kerak yang lengket pada dinding. Untuk memudahkan pembersihan digunakan minyak atsiri sereh wangi. Penyemprotan dilakukan sehari (24 jam) sebelum dilakukan penyikatan kerak dan lumut yang menempel pada batuan/struktur dinding. Konservasi ini dilakukan pada lima titik retakan seperti ditunjukkan dalam Gambar 5 s/d Gambar 8. Hasil konservasi menunjukkan perbaikan visual yang harmonis dengan struktur asli serta mampu mengurangi rembesan air secara signifikan.



Gambar 6. Retakan dinding



Gambar 7. Mortar SP 1:3



Gambar 8. Pengecekan titik retakan



Gambar 9. Tim pengabdian mengawasi perbaikan retakan dinding



Gambar 12. Retakan di depan benteng



Gambar 10. Partisipasi mahasiswa dalam kegiatan perbaikan retakan dinding



Gambar 11. Hasil perbaikan dinding yang retak

Observasi lapangan menunjukkan bahwa pergerakan tanah masih berpotensi mengancam stabilitas benteng, sehingga diperlukan pemantauan geoteknik berkelanjutan. Indikasi terjadinya pergerakan tanah terdeteksi dengan adanya retakan di sekitar benteng (Gambar 9). Untuk itu perlu dikaji lebih mendalam tentang kestabilan lereng (Gambar 10).

Hasil akhir dari kegiatan ini juga berhasil meningkatkan kapasitas tenaga kerja lokal melalui pelatihan konservasi, dimana masyarakat sekitar dijadikan tenaga kerja dan diberikan pengetahuan tentang pembuatan mortar tiruan (Gambar 11). Selain itu, kegiatan ini tidak hanya memberikan dampak teknis, tetapi juga sosial-ekonomi dengan meningkatkan kapasitas masyarakat dan kesadaran akan pentingnya pelestarian warisan budaya.



Gambar 13. Lereng di sekitar benteng



Gambar 14. Pembuatan mortar tiruan

### 3.2 Pembahasan

Pemilihan SP1:3 didorong oleh kemiripan warna dengan mortar asli (menjaga estetika) dan ketahanan terhadap cuaca/air pada lokasi terbuka. Keduanya relevan untuk dinding batu benteng. Kondisi topografi perbukitan meningkatkan potensi ketidakstabilan lereng dan siklus basah-kering, karena itu konservasi permukaan perlu dilengkapi penguatan internal (*grouting*) bila ditemukan retakan dalam serta pemantauan lebar retak/kemiringan.

Cuaca terbuka, akses di lereng, dan konsistensi warna campuran menjadi tantangan. Sebagai bahan evaluasi, perlu dilakukan mitigasi berupa penjadwalan kerja, keamanan dan kestabilan lereng, uji patch untuk warna, serta dokumentasi teknis tiap titik.

Lebih lanjut, hasil kegiatan konservasi ini juga sejalan dengan berbagai kajian terbaru mengenai pentingnya keterlibatan masyarakat dalam pelestarian cagar budaya. Studi oleh Rahmawati dan Kusuma (2023) [6] menunjukkan bahwa model pendidikan berbasis komunitas mampu meningkatkan rasa memiliki masyarakat terhadap situs bersejarah dan mendorong perilaku konservatif dalam keseharian. Temuan serupa disampaikan oleh Getty Conservation Institute (2020) [12] yang menekankan bahwa keberhasilan konservasi tidak hanya bergantung pada aspek teknis material, tetapi juga pada strategi komunikasi dan partisipasi masyarakat dalam proses perencanaan dan pengawasan.

Selain itu, Usmaedi, dkk (2024) menjelaskan bahwa keterlibatan aktif masyarakat meningkatkan efektivitas upaya pelestarian, menumbuhkan rasa kepemilikan, dan mendorong keberlanjutan budaya [13]. Pelestarian berbasis partisipasi memiliki nilai sosial yang tinggi karena membangun jaringan kolaboratif antara akademisi, pemerintah, dan komunitas lokal. Dengan demikian, pendekatan yang diterapkan pada konservasi Benteng Leiden tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga mendukung paradigma baru konservasi berkelanjutan yang menempatkan masyarakat sebagai agen utama pelindung warisan budaya.

Selain aspek teknis dalam formulasi mortar SP1:3, keberhasilan konservasi Benteng Leiden juga menunjukkan pentingnya sinergi antara pendekatan ilmiah dan sosial dalam pelestarian warisan budaya. Penggunaan bahan lokal tidak hanya meningkatkan kesesuaian visual dan karakteristik fisik mortar, tetapi juga memperkuat prinsip keberlanjutan dengan meminimalkan ketergantungan terhadap bahan impor. Dalam konteks konservasi berbasis masyarakat, partisipasi aktif tenaga kerja lokal menjadi kunci utama. Pelatihan yang diberikan tidak hanya meningkatkan kapasitas teknis, tetapi juga menumbuhkan rasa kepemilikan terhadap warisan budaya di lingkungan mereka sendiri. Hal ini sejalan dengan konsep *community-based heritage management*, di mana masyarakat berperan sebagai penjaga utama keberlanjutan situs bersejarah [6][7].

Berdasarkan sudut pandang geoteknik, analisis lereng dan potensi pergerakan tanah di sekitar benteng menjadi aspek penting yang belum sepenuhnya terselesaikan. Pengembangan sistem

pemantauan berbasis sensor sederhana seperti *crack meter* atau inclinometer portabel dapat menjadi langkah awal menuju konservasi adaptif berbasis data. Pendekatan lintas disiplin, menggabungkan teknik sipil, geoteknik, dan konservasi arsitektur, diperlukan agar hasil konservasi tidak hanya memperbaiki kerusakan permukaan, tetapi juga menjamin stabilitas struktural jangka panjang [8][9].

Selain itu, kegiatan pengabdian ini dapat dikembangkan menjadi model edukatif melalui integrasi dengan kurikulum *project-based learning* di universitas. Mahasiswa dapat berperan dalam pengumpulan data, dokumentasi, dan inovasi konservasi ramah lingkungan, seperti pemanfaatan bahan organik (misalnya getah tanaman lokal atau abu vulkanik) sebagai aditif alami mortar. Pendekatan ini memperkuat nilai riset aplikatif sekaligus menumbuhkan kesadaran ekologis dan sosial terhadap pelestarian cagar budaya [10][14]. Dalam konteks keberlanjutan, konservasi seperti ini juga berpotensi mendukung pengembangan *eco-heritage tourism* yang memberikan manfaat ekonomi sekaligus menjaga integritas situs bersejarah [15][16].

#### 4. KESIMPULAN

Kegiatan konservasi struktur Benteng Leiden berhasil memperbaiki lima titik retakan dengan mortar tiruan yang dirumuskan secara ilmiah. Mortar dengan rasio semen putih dan pasir lokal 1:3 terbukti efektif secara visual dan fungsional. Namun, perlu perhatian khusus terhadap kondisi geoteknik lokasi benteng yang rawan pergerakan tanah. Keberhasilan kegiatan ini menunjukkan pentingnya pendekatan sains material dalam konservasi cagar budaya. Simpulan harus mengindikasi secara jelas hasil-hasil yang diperoleh, kelebihan dan kekurangannya, serta kemungkinan pengembangan program pengabdian selanjutnya.

#### 5. SARAN

Disarankan untuk melanjutkan konservasi menggunakan metode grouting untuk retakan dalam, serta melakukan monitoring geoteknik rutin dan analisis kestabilan lereng secara komprehensif. Selain itu perlu juga mengembangkan strategi pendanaan jangka panjang melalui kolaborasi antara pemerintah, universitas, dan sektor swasta, membentuk kelompok masyarakat sadar budaya untuk pemeliharaan rutin dan promosi wisata sejarah, mengintegrasikan konservasi dengan pendekatan lingkungan seperti penghijauan dan manajemen air hujan, serta

mendorong penelitian lintas disiplin dan digitalisasi situs dalam bentuk model 3D untuk edukasi dan dokumentasi dan melakukan evaluasi sosial-ekonomi dan pariwisata terhadap dampak konservasi secara berkelanjutan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Balai Pelestarian Kebudayaan Wilayah XVII yang telah memberi dukungan moral dan dana terhadap program pengabdian masyarakat ini berdasarkan implementasi kerjasama No. 191/F7.19/KB.15.00/2024 dan No. 2493/UN47.B5.5/HK.07/2024.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Provinsi Gorontalo, 2019, Laporan Inventarisasi Cagar Budaya: Benteng Orange., Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Provinsi Gorontalo, Gorontalo.
- [2] Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI, 2008, Keputusan Menteri tentang Penetapan Benteng Leiden sebagai Cagar Budaya Nasional No. PM.30/PW.007/MKP/2008, Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI, Jakarta.
- [3] Swastikawati, A., Haldoko, L. A., Hanggoro, P. D., dan Gunawan, A., 2022, Rekonstruksi Material Pembangunan Benteng-Benteng Nusantara: Studi Kasus Benteng Keraton Buton dan Indraputra, *Borobudur*, vol. XVI, no. 2, pp. 179-192, 2022. <https://doi.org/10.33374/jurnalkonservasicagarbudaya.v16i2.297>, diakses tanggal 6 Agustus 2025
- [4] Y. Permana, 2021, Kajian Mortar Tradisional untuk Konservasi Bangunan Bersejarah, *Jurnal Teknik Sipil Indonesia*, vol. 8, no. 2, pp. 145-152.
- [5] H. Setyawan, 2012, Kajian Penanganan Nat Terbuka pada Selasar Candi Borobudur, *Jurnal Konservasi Cagar Budaya Borobudur*, vol. 6, no. 1, pp. 59-75. [https://repositori.kemendikdasmen.go.id/4189/1/6\\_KAJIAN%20PENANGANAN%20NAT%20SEL\\_AS..pdf](https://repositori.kemendikdasmen.go.id/4189/1/6_KAJIAN%20PENANGANAN%20NAT%20SEL_AS..pdf), diakses tanggal 6 Agustus 2025
- [6] Rahmawati, N., & Kusuma, H., 2020, Community-Based Heritage Conservation,” *J. Cultural Heritage Management*, 9(3), 215–229.
- [7] Setyowati, D., et al., 2021, Empowering Local Communities in Historic Site Conservation. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(2), 76–88.
- [8] Jebreen, H., & Al-Jayyousi, O., 2019, Sustainable Materials in Heritage Conservation: Lime Mortar Optimization, *Construction and Building Materials*, 225, 1123–1135.
- [9] Chen, Z., et al., 2020, Geotechnical Risk Monitoring in Heritage Fortifications: Lessons from Asia-Pacific. *Engineering Structures*, 225, 111209.
- [10] Handayani, M., & Arifin, Z, 2022. Integrating Heritage Conservation into Project-Based Learning. *Journal of Technical Education and Training*, 14(1), 12–25.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, 2017, SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [12] The Getty Conservation Institute, 2002, *Conserving Heritage In East Asian Cities: Planning for Continuity and Change*, [https://www.getty.edu/conservation/publications/resources/teaching/cs\\_tn\\_community.pdf](https://www.getty.edu/conservation/publications/resources/teaching/cs_tn_community.pdf), diakses tanggal 6 Agustus 2025
- [13] Usmaedi, Lansiwi, M.A., Studyanto, A.B, Gymnastiara, I.A, Amin, F. 2024, Cultural Heritage Preservation Through Community Engagement a New Paradigm for Social Sustainability, *Indonesian Journal of Studies on Humanities, Social Sciences, and Education (IJHSED)*, 1(2) 50-59, <https://doi.org/10.54783/cv5q0011>, diakses tanggal 6 Agustus 2025
- [14] Wahyuni, R., et al, 2023, Green Mortar Technology for Sustainable Restoration, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1255–1268.
- [15] Ginting, M., & Sitorus, H, 2018, Eco-Heritage Tourism as a Strategy for Cultural Site Sustainability, *Tourism and Environment Journal*, 12(4), 189–202.
- [16] López-Mencher, V., & García, E, 2021, Digital Heritage for Fortification Preservation, *Heritage Science*, 9(1), 90–105.