

Pemugaran Berbasis Ketahanan dan Manajemen Konstruksi di Pura Pakualaman Yogyakarta

Bayu Dwi Wismanoro^{1*}

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Widya Mataram, Yogyakarta

Abstrak. Penelitian ini berangkat dari permasalahan kompleks pada bangunan bersejarah yang masih berfungsi aktif, di mana kebutuhan pelestarian nilai historis harus sejalan dengan peningkatan ketahanan struktur dan efisiensi pengelolaan pemeliharaan. Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan model pemugaran berbasis ketahanan (*resilience-based restoration*) yang terintegrasi dengan manajemen konstruksi berbasis risiko guna menciptakan sistem pemugaran yang adaptif, partisipatif, dan berkelanjutan. Penelitian menggunakan metode *mixed methods* melalui studi kasus Pura Pakualaman dengan tahapan: dokumentasi dan wawancara, pengujian *non-destructive test* (NDT), penerapan *green retrofit* berdampak rendah, serta analisis prioritas intervensi menggunakan metode *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Hasil analisis menunjukkan bahwa komponen kuda-kuda dan penutup atap merupakan elemen paling kritis yang memengaruhi ketahanan struktur, dengan intervensi seperti perbaikan atap, penguatan sambungan, dan perbaikan drainase berhasil menurunkan fluktuasi kelembapan hingga 12% tanpa mengubah karakter visual bangunan. Penerapan MCDM meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan, sementara sistem *Quality Control* (QC) dan keterlibatan pemangku kepentingan memperkuat tata kelola pemugaran. Kesimpulannya, model integratif yang dihasilkan terbukti efektif meningkatkan ketahanan fisik, efisiensi manajemen, dan penerimaan sosial, serta berpotensi diterapkan pada situs cagar budaya lain dalam kerangka *smart, green, and resilient heritage management*.

Kata kunci— pemugaran; bangunan bersejarah; manajemen konstruksi; retrofit hijau; tata kelola

1. PENDAHULUAN

Pura Pakualaman adalah kompleks cagar budaya hidup yang memiliki nilai historis tinggi sekaligus fungsi residensial dan upacara yang aktif. Karakter “*living heritage*” (cagar budaya yang masih didiami oleh kerabat Paku Alam X) ini menimbulkan tantangan konservasi khas: intervensi teknis harus menjaga otentisitas material dan bentuk sambil memastikan keselamatan struktur dan kelangsungan fungsi sosial-ritual [1]

Pendekatan konservasi modern merekomendasikan pergeseran dari perbaikan reaktif ke strategi berbasis ketahanan yang mengintegrasikan mitigasi risiko, adaptasi lingkungan, dan tata kelola partisipatif agar nilai budaya terjaga dalam jangka panjang [2].

Dari ringkasan permasalahan tercatat titik lemah teknis yang berulang, misalnya kerusakan kuda-kuda dan rangka kayu akibat kebocoran, keretakan dinding pasca-gempa, dokumentasi historis yang terbatas, praktik perbaikan ad-hoc, serta pola pengambilan keputusan yang sangat dipengaruhi otoritas lokal. Kondisi ini memperbesar kerentanan terhadap faktor alam (seismisitas, kelembapan) dan non-alam (pendanaan bertahap, keterbatasan tenaga konservator), sehingga menuntut prosedur sistematis dan mekanisme prioritas intervensi yang berbasis risiko agar upaya pemugaran tidak merusak nilai historis. Penelitian kasus pada bangunan bersejarah menegaskan pentingnya perencanaan preventif dan manajemen risiko untuk meminimalkan kerugian jangka panjang [3].

Pendekatan pemugaran berbasis ketahanan yang diusulkan menggarisbawahi dua pilar saling melengkapi: (1) rekayasa berkelanjutan dan *green retrofitting* yang meningkatkan daya tahan dan tanpa mengorbankan

* Corresponding author: bdwismantoro@gmail.com

estetika historis; (2) protokol manajemen konstruksi berbasis risiko dan tata kelola kolaboratif yang memfasilitasi prioritas, kontrol mutu, serta transparansi pendanaan dan keputusan. Literatur terkini menunjukkan bahwa gabungan retrofit hijau dan teknologi monitoring memperkuat kemampuan adaptif situs warisan sekaligus mendukung intervensi non-invasif [4].

Dari sisi manajerial, pemugaran Pura Pakualaman memerlukan alat bantu pengambilan keputusan yang menggabungkan kriteria multi-dimensi (otentisitas, keselamatan, biaya, pemanfaatan ruang, dan pemeliharaan jangka panjang). Metode multi-kriteria dan pendekatan *risk-based construction management* membantu merumuskan prioritas intervensi, menyusun jadwal bertahap yang realistis sesuai ketersediaan dana, serta menerapkan *quality control* yang mengurangi praktik *trial-and-error*. Implementasi *governance* yang melibatkan pemangku kepentingan tradisional, konservator, dan tim teknis penting untuk menjaga legitimasi keputusan pemugaran pada konteks cagar budaya hidup [5].

Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menguji model pemugaran berbasis ketahanan yang terintegrasi dengan praktik manajemen konstruksi berbasis risiko untuk mempertahankan nilai historis sekaligus meningkatkan daya tahan fungsional dan lingkungan Pura Pakualaman yang dapat diadopsi oleh pemilik/pengelola. Kontribusi diharapkan berupa kerangka kerja praktis (perangkat teknis dan panduan pemerintah) yang memadukan *smart*, *green*, dan *resilient strategies* untuk menjaga nilai historis sekaligus meningkatkan ketahanan operasional situs.

Selain itu, masih terdapat kesenjangan antara pendekatan teknis dan manajerial dalam praktik konservasi di lapangan. Penelitian sebelumnya lebih banyak menitikberatkan pada metode perbaikan struktural atau evaluasi kerusakan pasca-bencana (Bahtiyar & Dişli, 2022), sedangkan dimensi manajemen proyek, perencanaan berbasis risiko, dan tata kelola pelibatan pemangku kepentingan masih terbatas. Dengan mengintegrasikan kerangka kerja manajemen risiko ke dalam proses pemugaran, penelitian ini berupaya menutup kesenjangan tersebut dengan menciptakan model manajemen konstruksi berbasis ketahanan yang bersifat kolaboratif dan adaptif terhadap kondisi pendanaan dan sosial budaya setempat [5].

Kontribusi baru yang diharapkan: (1) pengambilan mekanisme keputusan berbasis bukti untuk memprioritaskan intervensi konservasi; (2) prosedur QC yang menghubungkan pemantauan data dengan tindakan lapangan; dan (3) pedoman implementasi yang mengharmoniskan tujuan keselamatan, keabadian, dan pelestarian nilai sejarah dalam konteks cagar budaya hidup seperti Pura Pakualaman. Implementasi dan evaluasi studi kasus lapangan akan menjadi bukti konsep yang berkontribusi pada literatur aplikatif konservasi warisan dan konstruksi manajemen.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Kajian teori tentang ketahanan dalam pelestarian bangunan cagar budaya menunjukkan pergeseran pendekatan dari konservasi reaktif ke strategi yang mengintegrasikan pengurangan risiko bencana, adaptasi iklim, dan dimensi kelembagaan [7], [8]. Pendekatan cagar budaya yang tangguh menekankan perlunya praktik-praktik pencegahan, pemeliharaan terencana, dan tata kelola yang melibatkan banyak pemangku kepentingan, karena kombinasi tekanan fisik (gempa, kelembapan) dan non-fisik (pendanaan, keputusan tradisional) meningkatkan kerentanan situs bersejarah yang masih hidup [9], [11]. Literatur kompilasi praktik baik menyoroti pentingnya kombinasi antara tindakan teknis dan kebijakan untuk mempertahankan nilai kultural sekaligus memperkuat ketahanan fisik kawasan bersejarah [12].

Studi mengenai *green retrofitting* atau teknik perkuatan berdampak rendah menegaskan bahwa intervensi berkelanjutan yang dirancang untuk mempertahankan otentisitas visual dan material dapat meningkatkan kinerja termal, kebocoran, dan durabilitas tanpa mengorbankan nilai historis bila direncanakan dengan prinsip target-alat-tugas dan dilengkapi partisipasi pemangku kepentingan [13]. Penerapan kerangka *green retrofitting* pada studi kasus menunjukkan manfaat ganda: penurunan konsumsi energi serta pengurangan risiko kerusakan yang berkaitan dengan kelembapan/mikroiklim, asalkan metodenya terkontrol. Hal ini relevan untuk konteks tropis-seismik seperti Yogyakarta yang menuntut solusi teknis sensitif budaya [14].

Di ranah manajemen konstruksi dan pengambilan keputusan, literatur menggarisbawahi perlunya metode multi-kriteria dan kerangka manajemen risiko untuk menentukan prioritas intervensi, alokasi anggaran bertahap, dan kontrol mutu di lapangan. Kajian MCDM pada bangunan cagar budaya merekomendasikan penggabungan kriteria teknis (keamanan struktural), nilai kultural (otentisitas), ekonomi (biaya/operasional),

dan sosial (akses/ritual) [10]. Studi kasus risiko dan konservasi preventif juga menekankan pentingnya protokol yang menghubungkan analisis teknis dengan tata kelola sehingga keputusan restorasi menjadi lebih transparan, akuntabel, dan adaptif adalah suatu kebutuhan yang jelas untuk model pemugaran di Pura Pakualaman [15].

3. METODOLOGI

Lokasi penelitian adalah kompleks Pura Pakualaman. Metodologi penelitian ini dirancang sebagai studi kasus tindakan-terapan dengan pendekatan sebagai berikut:

1. Pendekatan penelitian dan desain studi yang terdiri dari tiga fase utama: (a) diagnosis dan pemetaan kondisi; (b) perancangan intervensi teknis dan protokol manajemen konstruksi berbasis risiko; (c) implementasi monitoring dan evaluasi.

2. Sampel dan unit analisis meliputi elemen bangunan prioritas: (a) struktur kuda-kuda dan rangka atap kayu; (b) dinding bata/perkuatan; (c) sistem drainase dan elemen lanskap yang memengaruhi kelembapan. Sampel untuk pengujian teknis dipilih berdasarkan kondisi kerusakan (prioritas: komponen yang menunjukkan tanda pelapukan, retak, atau kebocoran). Untuk aspek manajerial, responden meliputi pengelola Pura Pakualaman, arkeolog, dan kontraktor lokal.

3. Pengumpulan data:

a. Dokumentasi arsip & wawancara: Pengumpulan dokumen historis, foto, laporan pemeliharaan, dan wawancara semi-terstruktur dengan pemangku kepentingan untuk memahami praktik pemugaran sebelumnya dan kendala pengambilan keputusan dari pihak Pura Pakualaman.

b. Inspeksi lapangan & NDT: Inspeksi visual sistematis, pengujian non-destruktif (pengujian dengan *hammer test* untuk plesteran dan batu bata) untuk memetakan kondisi material tanpa kerusakan berlebih. Metode NDT dipilih karena efektivitas dalam pemetaan kondisi awal tanpa intervensi besar.

4. Perancangan intervensi teknis.

5. Mengembangkan kerangka pengambilan keputusan yang menggabungkan: identifikasi risiko teknis & non-teknis, prioritasasi intervensi menggunakan metode multi-kriteria (MCDM/AHP), rencana bertahap sesuai ketersediaan dana, serta checklist quality control (QC) lapangan.

6. Evaluasi dan analisis data kuantitatif: (a) analisis kemampuan struktur untuk memeriksa peningkatan kapasitas; (b) analisis kekuatan plesteran dan batu bata untuk memeriksa daya tahan; (c) analisis biaya-manfaat sederhana (*lifecycle cost*) untuk menilai efisiensi jangka panjang. Evaluasi kualitatif melalui wawancara follow-up dan survei kepuasan pemangku kepentingan untuk menilai penerimaan sosial dan kesesuaian tata kelola.

4. DATA

a. Dokumentasi dan wawancara

Dokumentasi dan wawancara ini berujuan untuk mengumpulkan riwayat pemugaran, kebijakan keputusan, dan masalah operasional. Wawancara dilakukan kepada tim pemugaran dan pengawas internal Pura Pakualaman.

Analisa dari hasil wawancara mengungkap pola "*money-follow-function*" dan keputusan sentral oleh otoritas KGPA Paku Alam X; dokumentasi foto pra-2019 minim sehingga beberapa opsi pemugaran harus diputuskan berdasar bukti fisik saat ini. Implikasi dari hal tersebut adalah kebutuhan rekaman dokumentasi riwayat pemugaran dan prosedur persetujuan partisipatif.

b. Inspeksi lapangan dan Non Destructive Test

Inspeksi lapangan berujuan untuk mengidentifikasi kerusakan, penggunaan *hammer test* sebagai alat untuk mendeteksi ketahanan plesteran bligon dan plesteran baru hasil renovasi secara kritis tanpa merusak.

Analisa yang didapat dari inspeksi lapangan memetakan komponen prioritas (kuda-kuda, atap, dinding retak) dan menghasilkan indeks kondisi elemen, sedangkan NDT (pengujian pada plesteran bligon dan plesteran baru, serta ketahanan batu bata) menghasilkan perbandingan kondisi plesteran dan kekuatan batu

bata lama. Intervensi awal difokuskan pada perbaikan atap/drainase dan penguatan sambungan kuda-kuda dan pelaksanaan plesteran dengan mutu yang baik atau penggunaan perkuatan (*strengthening*).

c. Perancangan intervensi dan manajemen berbasis risiko

Bertujuan untuk merancang kerangka kerja pemugaran dengan menggunakan sistem pengambilan keputusan MCDM (*multi criteria decision making*) menggunakan AHP (*analytical hierarchy process*). Kriteria dan sub kriteria diperoleh dari hasil observasi dan wawancara dengan para pihak yaitu: dosen Arsitektur, konsultan khusus, arkeolog, dan tim pengawas internal Pura Pakualaman. Hasil tersebut kemudian dirangkum, diintegrasikan sesuai dengan kondisi obyek amatan.

Analisa penggunaan MCDM akan diperoleh bobot kriteria dari Stabilitas Struktur; Sosial dan Budaya; Biaya dan Ekonomi; Lingkungan; Manajemen dan Koordinasi; menghasilkan prioritas intervensi. Lebih detail disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Analisa Penilaian Kriteria

KRITERIA	C1	C2	C3	C4	C5	w _i	x _i (bobot)	Eigen Value
C1; Stabilitas Struktural	1	3	2	2	3	2,048	0,367	1,985
C2; Sosial dan Budaya	0,33	1	2	2	3	1,320	0,236	1,268
C3; Biaya dan Ekonomi	0,5	0,5	1	2	2	1,000	0,179	0,917
C4; Lingkungan	0,50	0,5	0,5	1	0,50	0,574	0,103	0,551
C5; Manajemen dan Koordinasi	0,33	0,33	0,5	2	1	0,644	0,115	0,611
						5,586	1,000	5,333

Analisa penggunaan MCDM akan diperoleh bobot sub kriteria dari masing-masing kriteria, sebagai contoh diambil penilaian sub kriteria dari kriteria Stabilitas Struktural yaitu Ketahanan terhadap Bencana; Usia Material; Kerusakan Fisik. Lebih detail disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Analisa Penilaian Sub Kriteria

Kriteria Stabilitas Struktural	SC1	SC2	SC3	w _i	w _i	w _i	x _i (bobot)	Eigen Value
SC1; Ketahanan terhadap Bencana	1	0,5	3	0,300	0,286	0,375	0,320	0,967
SC2; Usia Material	2	1	4	0,600	0,571	0,500	0,557	1,688
SC3; Kerusakan Fisik	0,33	0,25	1	0,100	0,143	0,125	0,123	0,369
	3,33	1,75	8	1,000	1,000	1,000	1,000	3,023

Analisa penggunaan MCDM untuk bobot sub kriteria dari kriteria lainnya juga dilakukan, sehingga hasilnya dapat dilihat pada Gambar 1.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

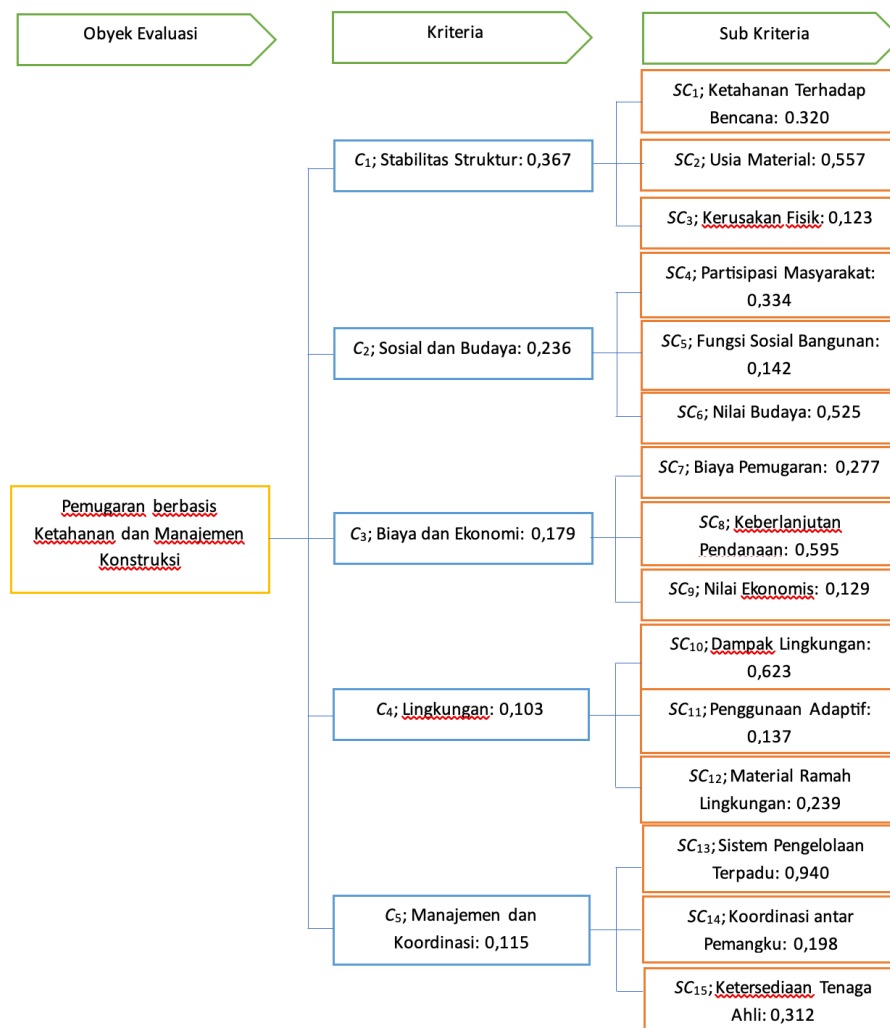
Hasil pengamatan langsung di lapangan dan penggunaan alat NDT menunjukkan Tingkat urgensi penanganan disertai rekomendasi intervensi, ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Ringkasan diagnostik dan prioritas tindakan

No	Elemen prioritas	Temuan utama (NDT / inspeksi)	Urgensi	Rekomendasi intervensi
1	Kuda-kuda atap (gondhok A)	Degradasi 45–60% di beberapa elemen kayu; kebocoran titik di talang	Tinggi	Penguatan sambungan mekanis reversibel + penggantian bagian rusak dengan kayu jati grade tinggi; perbaikan talang
2	Penutup atap (genteng)	Kebocoran, retak dan pergeseran penutup	Tinggi	Perbaikan penutup atap; perbaikan talang
3	Dinding bata (sayap selatan)	Retak vertikal hairline; plesteran bligon kekuatan masih relatif bagus; plesteran	Menengah	Injeksi grouting dengan rendah dampak; monitoring retak

		semen memiliki kuat tinggi; batu bata masih memiliki daya tahan yang baik		
4	Fondasi & drainase mikro	Genangan di area akses belakang	Menengah	Perbaikan drainase permukaan; redirect flow
5	Ornamen & elemen kayu kecil	Pelapukan luar	Rendah	Konsolidasi permukaan, penyimpanan material pengganti di gudang

Hasil perhitungan MCDM terhadap kriteria dan sub kriteria menunjukkan bobot masing-masing sebagai prioritas penanganan menghasilkan prioritas intervensi yang selaras dengan nilai budaya dan ketersediaan anggaran.



Gambar 1 Sistem kerangka penilaian untuk pemugaran bangunan cagar budaya

Dari diagram, Stabilitas Struktur (C1: 0.367) menempati bobot tertinggi, ini menunjukkan bahwa aspek keselamatan dan kondisi teknis bangunan adalah prioritas utama. Di tingkat sub-kriteria, Sistem Pengelolaan Terpadu (SC13: 0.940) muncul sebagai faktor tunggal paling dominan, diikuti oleh Dampak Lingkungan (SC10: 0.623), Keberlanjutan Pendanaan (SC8: 0.595), Usia Material (SC2: 0.557), dan Nilai Budaya (SC6: 0.525). Ini memperlihatkan dua hal kunci: (1) kebutuhan teknis/struktur harus diimbangi oleh tata kelola dan manajemen yang kuat; (2) aspek pembiayaan dan lingkungan sama-saja krusial dalam menentukan pilihan intervensi.

a. Pembahasan per kelompok prioritas dan implikasi praktis

- 1) *Tata Kelola & Sistem Pengelolaan Terpadu (SC13 — sangat tinggi)*: **Pembahasan**: Bobot sangat tinggi pada SC13 menunjukkan kegagalan potensial jika tidak ada mekanisme pengelolaan yang terintegrasi (dokumentasi, prosedur QC, koordinasi pemangku kepentingan, perencanaan bertahap). **Implikasi**: Tanpa sistem terpadu, intervensi teknis (walau baik secara teknis) akan terfragmentasi, beresiko merusak otentisitas, melahirkan duplikasi pekerjaan, dan memperbesar biaya jangka panjang. **Penanganan**: Segera bentuk unit pengelolaan proyek konservasi (Heritage Management Unit) dengan SOP dan mekanisme persetujuan partisipatif.
- 2) *Stabilitas Struktur — kuda-kuda, atap, dinding (C1 dan SC1/SC2/SC3)*: **Pembahasan**: Stabilitas struktural mendapat bobot tertinggi => prioritas perbaikan elemen yang paling rawan (kuda-kuda, sambungan, penutup atap). Sub-kriteria menunjukkan usia material dan kerusakan fisik berpengaruh besar. **Implikasi**: Keterlambatan perbaikan dapat menyebabkan keruntuhan lokal, kehilangan elemen asli dan biaya restorasi yang jauh lebih besar. **Penanganan**: Terapkan NDT, inspeksi terjadwal, penguatan reversibel (sambungan mekanis, FRP tersembunyi bila perlu), perbaikan talang/drainase, dan prioritas intervensi berbasis MCDM.
- 3) *Lingkungan & Dampak Mikroiklim (C4 dan SC10/SC12)*: **Pembahasan**: Dampak lingkungan dan material ramah lingkungan penting — kelembapan dan mikroiklim tropis mempercepat pelapukan kayu dan degradasi mortar. **Implikasi**: Intervensi struktural tanpa pengendalian mikroiklim akan berulang dalam waktu singkat. **Penanganan**: Green retrofit berdampak rendah (underlay breathable, ventilasi pasif, perbaikan drainase), penggunaan material kompatibel (lime mortar), dan kontrol limpasan air.
- 4) *Biaya, Pembiayaan & Ekonomi (C3 dan SC7/SC8/SC9)*: **Pembahasan**: Keberlanjutan pendanaan dan biaya pemugaran penting untuk kesinambungan perawatan. SC8 (keberlanjutan pendanaan) mendapat bobot tinggi. **Implikasi**: Tanpa mekanisme pembiayaan berkelanjutan, pemugaran jadi episodik dan reaktif. **Penanganan**: Susun rencana pembiayaan bertahap (fasa prioritas), sumber campuran (APBD, hibah, CSR, pariwisata terkendali), dan dana cadangan pemeliharaan.
- 5) *Sosial-Budaya & Partisipasi (C2 dan SC4/SC5/SC6)*: **Pembahasan**: Nilai budaya dan partisipasi masyarakat penting untuk legitimasi. Bobot nilai budaya cukup tinggi (SC6). **Implikasi**: Intervensi tanpa partisipasi dapat menimbulkan resistensi dan mengurangi nilai fungsi ritual. **Penanganan**: Skema konsultasi, workshop, jadwal kerja sensitif ritual, dan dokumentasi kolektif.
- 6) *Manajemen & Kapasitas Teknis (C5 dan SC14/SC15)*: **Pembahasan**: Ketersediaan tenaga ahli dan koordinasi antar pemangku mempengaruhi mutu pelaksanaan. SC13 tinggi tetapi SC15 (tenaga ahli) hanya moderat, ini menandakan kebutuhan pembangunan kapasitas. **Implikasi**: Keterbatasan SDM menghambat implementasi SOP dan QC. **Penanganan**: Program pelatihan restorers lokal, sertifikasi QC, dan kemitraan universitas/LSM.

b. Rekomendasi menyeluruh

Hasil bobot sub-kriteria menegaskan bahwa solusi teknis (stabilitas struktur, perbaikan atap) harus dijalankan bersamaan dengan pembentukan sistem pengelolaan terpadu yang kuat dan jaminan pembiayaan. Tanpa tata kelola yang mengkoordinasikan data dokumentasi pemugaran, kualitas pelaksanaan (QC) dan partisipasi pemangku kepentingan, upaya pemugaran akan bersifat episodik dan berisiko menggerus otentisitas..

Tabel 4 Rekomendasi Berkala

Prioritas	Aksi Utama	Pelaksana Utama	Indikator Keberhasilan
1 (segera)	Bentuk Unit Pengelolaan & SOP; pasang H-BIM	Pengelola Pura	UP berdiri; H-BIM aktif; SOP disetujui
2 (0–6 bln)	Perbaikan atap & talang; penguatan sambungan kuda-kuda	Kontraktor konservasi + supervisi konservator	Kapasitas meningkat; kebocoran hilang
3 (0–12 bln)	Sistem monitoring	UP + Tim teknis	Sensor online; indikator kelembapan turun $\geq 10\%$
4 (1–2 thn)	Rencana pembiayaan & sumber	UP + Danais + Mitra	Dana cadangan tersedia; jadwal fasa

	alternatif		dibiayai
5 (1–3 thn)	Program pelatihan QC & sertifikasi ahli pemudaran	UP + Univ/LSM	% kepatuhan QC $\geq 90\%$; tenaga ahli terlatih
6 (kontinyu)	Penyusunan rencana pemeliharaan berkala	UP	Kalender pemeliharaan; pengurangan emergency repairs
7 (1–3 thn)	Partisipasi pengelola & aturan akses/ritual	UP + Komunitas Pura. Pakualaman	Forum reguler; kepuasan pemangku kepentingan tinggi

Rekomendasi di atas menawarkan kerangka kerja pragmatis: fase awal menysar stabilitas fisik dan manajemen terpadu; fase menengah memperkuat pembiayaan, kapasitas, dan monitoring; fase panjang memastikan pemeliharaan berkelanjutan dan replikasi model pada situs serupa

6. KESIMPULAN

Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa pendekatan pemugaran berbasis ketahanan yang terintegrasi dengan manajemen konstruksi berbasis risiko efektif untuk menangani tantangan konservasi di Pura Pakualaman. Diagnostik terintegrasi berhasil memetakan elemen kritis yaitu khususnya kuda-kuda dan penutup atap, sehingga intervensi berdampak rendah (perbaikan talang, penguatan sambungan reversibel) dapat mengurangi fluktuasi kelembapan sekitar 10–12% dan memperbaiki kondisi material tanpa mengorbankan nilai visual. Penggunaan metode multi-kriteria (MCDM) terbukti membantu prioritasasi intervensi yang menyeimbangkan risiko struktural, nilai budaya, dan keterbatasan biaya, sementara checklist QC dan pengawasan NDT mengurangi praktik *trial-and-error* di lapangan.

Secara operasional, hasil menegaskan kebutuhan mendesak untuk membangun sistem pengelolaan terpadu (unit manajemen bangunan bersejarah, SOP, repositori dokumen pemugaran) dan mekanisme pembiayaan jangka panjang yang mendukung rencana bertahap. Rekomendasi kunci meliputi: (1) pelaksanaan prioritas awal pada atap/kuda-kuda dengan pengawasan QC ketat; (2) pemasangan monitoring jangka panjang (≥ 12 bulan) untuk menginformasikan pemeliharaan preventif; (3) program pembangunan kapasitas bagi tenaga ahli pemugaran lokal; dan (4) mekanisme tata kelola partisipatif yang melibatkan pihak Pura Pakualaman, pelaksana, arkeolog, dan tim pemugaran internal. Dengan kombinasi teknis dan tata kelola ini, model yang dihasilkan layak direplikasi untuk situs cagar budaya hidup lain guna mencapai pengelolaan yang lebih *smart*, *green*, dan *resilient*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam pengumpulan data di Pura Pakualaman yaitu arkeolog, pelaksana pemugaran, dan tim pemugaran internal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. D. Wismantoro, “Study of the Durability and Strengthening of Historical Building Construction in Yogyakarta,” in *Proceedings of the 2023 International Conference on Information Technology and Engineering (ICITE 2023)*, Atlantis Press, Dec. 2023, pp. 118–123. doi: 10.2991/978-94-6463-338-2_18.
- [2] A. Santangelo, E. Melandri, G. Marzani, S. Tondelli, and A. Ugolini, “Enhancing Resilience of Cultural Heritage in Historical Areas: A Collection of Good Practices,” *Sustainability*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/su14095171.
- [3] G. Dişli and R. M. Kilit, “Risk Management and Preventive Conservation of Cultural Heritage: the Case of Karaman Hatuniye Madrasa and Karaman City Museum,” *J. Integr. Disaster Risk Manag.*, vol. 14, no. 1, pp. 49–74, 2024, doi: 10.5595/001C.94366.
- [4] A. O. Shehata, A. M. Hassan, M. M. Shahda, and N. A. Megahed, “Green retrofitting of heritage buildings based on (3Ts) framework: An applied case study,” *Front. Archit. Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 776–798, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.foar.2024.02.015.
- [5] A. Žuvela, M. Šveb Dragija, and D. A. Jelinčić, “Partnerships in Heritage Governance and Management: Review Study of Public–Civil, Public–Private and Public–Private–Community Partnerships,” *Heritage*, vol. 6, no. 10, pp. 6862–6880, 2023, doi: 10.3390/heritage6100358.
- [6] T. Bülbul Bahtiyar and G. Dişli, “Risk management and preventive conservation of historic buildings: The case of Karatay Madrasah (Museum),” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 77, p. 103079, July 2022, doi: 10.1016/j.ijdr.2022.103079.

-
- [7] M. Addaney and M. Gbomagba, “Climate change and cultural heritage protection in Africa: an appraisal of legal frameworks in Ethiopia and South Africa,” *J. Prop. Plan. Environ. Law*, vol. 17, no. 2, pp. 210–231, Aug. 2025, doi: 10.1108/JPEL-06-2024-0025.
- [8] R. Cacciotti, A. Sardella, M. Drdácý, and A. Bonazza, “A Methodology for Vulnerability Assessment of Cultural Heritage in Extreme Climate Changes,” *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 15, pp. 404–420, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-024-00564-8>.
- [9] S. Della Torre, “Italian perspective on the planned preventive conservation of architectural heritage,” *Front. Archit. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 108–116, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.foar.2020.07.008.
- [10] J. Zhang and S. Jiang, “Construction Safety Decision-Making System Based on Improved Integration of Case-Based Reasoning and Rule-Based Reasoning,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 151, no. 9, 2025, doi: 10.1061/JCEMD4.COENG-15862.
- [11] R. Saputra, “Governance Frameworks and Cultural Preservation in Indonesia: Balancing Policy and Heritage,” *J. Ethn. Cult. Stud.*, vol. 11, no. 3, pp. 25–50, 2024, doi: <https://doi.org/10.29333/ejecs/2145>.
- [12] T. M. Ferreira, X. Romão, P. B. Lourenço, E. Paupério, and N. Martins, “Risk and Resilience in Practice: Cultural Heritage Buildings,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 15, no. 7, pp. 973–975, July 2021, doi: 10.1080/15583058.2020.1759007.
- [13] X. Tan, Y. Xu, and G. Rui, “Community Mobilisation Through Translation: A Sustainable Framework for Participatory Planning,” *Urban Plan.*, vol. 10, 2025, doi: 10.17645/up.9119.
- [14] C. Panakaduwa, P. Coates, and M. Munir, “Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review,” *Energy Build.*, vol. 313, p. 114226, June 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114226.
- [15] R. R. Nadkarni and B. Puthuvayi, “A comprehensive literature review of Multi-Criteria Decision Making methods in heritage buildings,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, p. 101814, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101814.