

DOKUMENTASI DIGITAL BERBASIS ANATOMI BANGUNAN SEBAGAI STRATEGI MITIGASI KEHILANGAN DATA SPASIAL DAN ARSITEKTURAL RUMAH ADAT SUMBA TERHADAP RISIKO KEBAKARAN BERULANG

Moh. Syahru Romadhon Sholeh

Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITN Malang

e-mail: mohsyahruromadhonsholeh@lecturer.itn.ac.id

Sri Winarni

Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITN Malang

e-mail: sriwinarni@lecturer.itn.ac.id

Nurul Aini

Departemen Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Merdeka Malang

e-mail: nurul.aini@unmer.ac.id

ABSTRAK

Rumah adat Sumba merupakan warisan arsitektur vernakular yang menyimpan informasi tentang geometri, struktur, material, tata ruang, pola permukiman, serta kosmologi Marapu. Dominasi material mudah terbakar berupa kayu, bambu, dan alang-alang, konfigurasi bangunan yang berdekatan, musim kering, keterbatasan pasokan air, dan rendahnya kapasitas proteksi kebakaran menjadikan kampung adat Sumba sangat rentan terhadap kebakaran berulang. Kerusakan yang terjadi tidak hanya menghilangkan bangunan, tetapi juga menghapus data yang diperlukan untuk menilai kerusakan dan mempertahankan autentisitas rekonstruksi. Penelitian ini bertujuan merumuskan kerangka dokumentasi digital berbasis anatomi bangunan sebagai strategi mitigasi kehilangan data spasial dan arsitektural. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif melalui kajian konseptual, telaah literatur, sintesis kasus kebakaran, identifikasi anatomi rumah adat pada skala permukiman, bangunan, dan elemen, serta pemetaan fungsi teknologi dokumentasi digital. Hasil kajian menghasilkan lima kelompok data prioritas, yaitu data geometrik, struktural, material, keruangan, dan permukiman. Kerangka yang diusulkan mengintegrasikan UAV, fotogrametri terestrial, pengukuran lapangan, HBIM, GIS, dan repositori digital untuk membentuk baseline kondisi eksisting, mendukung perbandingan sebelum-sesudah bencana, serta menyediakan dasar rekonstruksi berbasis bukti. Dokumentasi digital dengan demikian perlu diposisikan sebagai instrumen konservasi preventif dan manajemen risiko, bukan hanya sebagai media visualisasi.

Kata Kunci: Rumah Adat Sumba, Dokumentasi Digital, Kebakaran, Konservasi Preventif, Fotogrametri

ABSTRACT

Sumbanese traditional houses are vernacular heritage assets containing information on geometry, structure, materials, spatial organisation,

settlement patterns, and Marapu cosmology. The dominance of combustible timber, bamboo, and thatch, combined with closely spaced buildings, prolonged dry seasons, limited water supply, and inadequate fire protection, makes Sumbanese traditional villages highly vulnerable to recurrent fires. Fire damage therefore causes not only physical loss but also the disappearance of evidence required for damage assessment and authentic reconstruction. This study formulates a building-anatomy-based digital documentation framework to mitigate the loss of spatial and architectural data. A qualitative-descriptive conceptual approach was applied through literature review, synthesis of fire cases, identification of architectural anatomy at settlement, building, and element scales, and mapping of digital documentation technologies. The study identifies five priority data groups: geometric, structural, material, spatial, and settlement data. The proposed framework integrates UAV survey, terrestrial photogrammetry, field measurement, HBIM, GIS, and digital repositories to establish a baseline record, enable pre- and post-disaster comparison, and support evidence-based reconstruction. Digital documentation should consequently be treated as an instrument of preventive conservation and risk management rather than merely as a visualisation medium.

Keywords: *Sumbanese Traditional House, Digital Documentation, Fire, Preventive Conservation, Photogrammetry*

1. PENDAHULUAN

Rumah adat Sumba atau uma mbatangu merupakan bagian penting dari lanskap budaya Pulau Sumba. Bentuknya ditandai oleh atap menara yang tinggi, struktur kayu dan bambu, penutup alang-alang, serta keterkaitan erat antara rumah, ruang komunal, kubur megalitik, dan sistem kepercayaan Marapu. Rumah tidak hanya menjadi wadah domestik, tetapi juga pusat relasi keluarga, ritus, identitas kelompok, dan hubungan antargenerasi, hal tersebut seperti tergambar pada Gambar 1. Kajian Rosimin dan Wijayaputri (2020) menunjukkan bahwa makna rumah adat Sumba dibentuk melalui relasi manusia, relasi keilahian, dan keseimbangan kosmologis, sehingga kehilangan bangunan sekaligus dapat berarti kehilangan struktur makna yang melekat pada ruang dan elemennya.



Gambar. 1

Kampung Adat Ratenggaro dan Rumah Menara Ratenggaro

Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Pada saat yang sama, rumah adat Sumba dibangun terutama dengan material organik yang memiliki beban api tinggi. Alang-alang kering pada atap, kayu dan bambu pada rangka, serta jarak antarbangunan yang relatif rapat memungkinkan api berpindah dengan cepat. Tantra dan Brimblecombe (2022) menegaskan bahwa kampung tradisional Sumba umumnya tidak memiliki sistem alarm baku, kemampuan pemadaman lokal terbatas, akses infrastruktur sulit, dan ketersediaan air sering tidak memadai. Kombinasi ini menyebabkan kebakaran dapat berkembang menjadi kerusakan kawasan dalam waktu singkat.

Risiko tersebut telah berulang dalam berbagai peristiwa. Kebakaran Kampung Wainyapu pada 20 September 2022 menghancurkan 30 rumah bersejarah menurut World Monuments Fund (2025). Peristiwa Waru Wora pada 5 Desember 2025 kembali memperlihatkan skala kehilangan yang besar: 28 rumah terdampak, terdiri atas 26 rumah hancur total dan dua rumah rusak sebagian, dengan 41 keluarga atau 139 penduduk kehilangan tempat tinggal (Fire Risk Heritage, 2025). Data tersebut menunjukkan bahwa kebakaran bukan ancaman hipotetis, melainkan risiko aktual yang dapat menghapus sebagian besar komponen permukiman adat dalam satu kejadian.

Dalam praktik konservasi, respons pascabencana sering berhadapan dengan keterbatasan dokumentasi kondisi sebelum bencana. Dokumentasi dalam bentuk foto umumnya tidak selalu merekam ukuran, sistem sambungan, susunan struktur, atribut material, hierarki ruang, atau hubungan bangunan dengan natara dan kubur megalitik. Ketika informasi tersebut tidak tersedia, rekonstruksi berpotensi bergantung pada ingatan terbatas, generalisasi tipologis, atau bentuk baru yang menyerupai rumah adat secara visual tetapi tidak sepenuhnya mempertahankan logika konstruksi dan makna spasialnya.

Perkembangan teknologi dokumentasi berbasis realitas menyediakan peluang untuk mengurangi masalah tersebut. Fotogrametri dan pemindaian tiga dimensi dapat menghasilkan *point cloud* serta model bertekstur beresolusi tinggi (Remondino dan Rizzi, 2010). HBIM memungkinkan geometri dikaitkan dengan informasi material, kondisi, sejarah perubahan, dan elemen konstruksi (Penjor et al., 2024). GIS dapat mengelola konteks kawasan, orientasi, jaringan akses, dan relasi spasial antarelemen, sedangkan integrasi HBIM-GIS mempertemukan skala bangunan dan skala permukiman (Dore dan Murphy, 2012).

Walaupun studi risiko kebakaran Sumba dan perkembangan dokumentasi digital heritage telah tersedia, keduanya belum banyak dipertemukan dalam kerangka yang menjadikan anatomi bangunan sebagai

struktur data mitigasi. Penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi kelompok data spasial dan arsitektural yang rentan hilang akibat kebakaran; (2) menyusun klasifikasi anatomi rumah adat Sumba pada skala kawasan, bangunan, dan elemen; serta (3) merumuskan kerangka integrasi UAV, fotogrametri, HBIM, GIS, dan repositori digital untuk konservasi preventif, penilaian kerusakan, dan rekonstruksi pascabencana.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Rumah Adat Sumba sebagai Warisan Arsitektur Vernakular

Arsitektur rumah adat Sumba terbentuk sebagai suatu sistem yang menghubungkan bentuk fisik, struktur sosial, teknologi lokal, dan kosmologi Marapu (Arisanti et al., 2022). Secara vertikal, rumah dipahami melalui pembagian bagian bawah, tengah, dan atas. Bagian bawah berkaitan dengan tanah dan aktivitas penunjang; bagian tengah menjadi ruang kehidupan manusia; sedangkan bagian atas berkaitan dengan leluhur, benda pusaka, dan Marapu, hal tersebut seperti tergambar pada Gambar 2. Pembagian tersebut tidak semata-mata zonasi fungsional, tetapi juga menyusun hirarki simbolik.



Gambar. 2
Rumah Menara Kampung Adat Ratenggaro
Sumber: Dokumentasi Penulis (2025)

Pada skala horizontal, pusat rumah berupa perapian dan empat tiang utama memiliki peran konstruktif sekaligus simbolik. Relasi ruang dalam dan ruang luar juga diatur melalui pembagian akses, aktivitas keluarga, dan interaksi komunal. Rosimin dan Wijayaputri (2020) menunjukkan bahwa orientasi rumah, posisi kubur batu, serta pelataran depan membentuk hubungan antara pusat aktivitas domestik dan pusat sakral kampung.

Karena itu, objek konservasi tidak dapat dibatasi pada bentuk atap atau fasad. Informasi tentang modul struktur, metode ikatan, jenis material, pembagian ruang, pusat perapian, orientasi pintu, relasi dengan natara, dan susunan permukiman merupakan satu kesatuan anatomi budaya. Pendekatan anatomi bangunan dalam penelitian ini digunakan untuk

mengorganisasi informasi tersebut agar dapat direkam dan dikelola secara sistematis.

2.2. Risiko Kebakaran pada Permukiman Tradisional

Risiko kebakaran pada permukiman tradisional merupakan hasil interaksi antara bahaya, kerentanan, dan respon saat terjadi musibah kebakaran. Bahaya dapat berasal dari api domestik, pembakaran lahan, aktivitas ritual, gangguan kelistrikan, atau sumber lain. Kerentanan meningkat karena material mudah terbakar, jarak antarbangunan, dan kondisi kering. Kemampuan masyarakat dan efektivitas respons terhadap kebakaran dipengaruhi oleh keberadaan sistem alarm, sumber air, serta alat pemadam, dan ditentukan pula oleh aksesibilitas kendaraan serta jarak terhadap layanan pemadam kebakaran (Hirsan et al., 2018; Ismail et al., 2019; Maulana et al., 2026).

Tantra dan Brimblecombe (2022) mencatat bahwa kebakaran pada kampung tradisional Sumba cenderung menyebabkan keruntuhan total, dengan proporsi kehilangan bangunan yang sangat tinggi. Material alang-alang pada atap meningkatkan kerentanan terhadap penyalaan dan penjaralan api, sedangkan jarak antarrumah yang rapat memperbesar peluang perpindahan api melalui radiasi panas, bara terbang, dan kontak langsung dengan nyala api (Filkov et al., 2023; Suzuki dan Manzello, 2021). Oleh sebab itu, mitigasi memerlukan pendekatan ganda: mengurangi kemungkinan dan penyebaran kebakaran sekaligus menyiapkan perlindungan terhadap informasi heritage apabila bangunan tetap mengalami kehancuran.

2.3. Kehilangan Data Spasial dan Arsitektural Pascabencana

Dalam perspektif konservasi, kerusakan bangunan akibat kebakaran tidak hanya dipahami sebagai hilangnya massa bangunan, tetapi juga sebagai hilangnya berbagai informasi yang terkandung di dalamnya. Informasi tersebut meliputi bentuk bangunan, sistem struktur, teknik konstruksi, penggunaan material, organisasi ruang, orientasi bangunan, serta hubungan spasial antarbangunan di dalam suatu permukiman adat.

Pada rumah adat Sumba, kehilangan data tersebut menjadi lebih penting untuk direspon karena sebagian besar pengetahuan konstruksi masih diwariskan melalui tradisi lisan dan praktik membangun yang dilakukan secara turun-temurun. Apabila bangunan mengalami kerusakan total tanpa adanya dokumentasi sebelumnya, maka banyak informasi arsitektural yang berpotensi hilang secara permanen dan sulit direkonstruksi kembali.

Hilangnya data spasial dan arsitektural juga dapat memengaruhi tingkat autentisitas suatu proses rekonstruksi, terlihat pada Gambar 3. Pembangunan kembali rumah adat tanpa didukung data yang memadai

berisiko menghasilkan bentuk bangunan yang berbeda dari kondisi aslinya, baik dari aspek proporsi, detail konstruksi, maupun makna simbolik yang terkandung di dalamnya.



Gambar. 3
Kondisi Pasca Kebakaran Rumah Adat Suku Waihombo, Kec. Kodi Balaghar,
Kabupaten Sumba Barat Daya, Nusa Tenggara Timur (NTT)
Sumber: Kompas.com (2022)

Oleh karena itu, data arsitektural perlu dipahami sebagai bagian dari warisan budaya yang harus dipertahankan, sama pentingnya dengan upaya mempertahankan bangunan fisiknya.

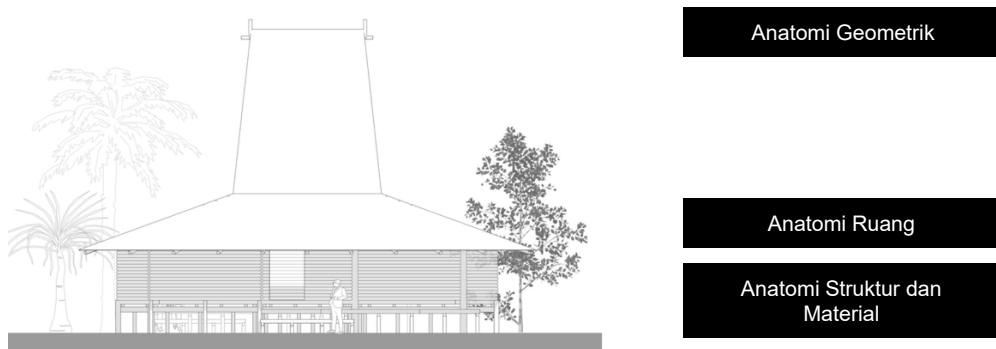
2.4. Teknologi Dokumentasi Digital Heritage

Fotogrametri berbasis *Structure from Motion* dan *Multi-View Stereo* memungkinkan rekonstruksi tiga dimensi dari rangkaian foto yang saling bertampalan. Metode ini efektif untuk bentuk kompleks, tekstur permukaan, serta dokumentasi yang memerlukan biaya relatif lebih rendah dibanding pemindaian laser pada kondisi tertentu (Remondino, 2011). Di sisi lain penggunaan UAV memperluas cakupan dokumentasi pada skala permukiman dan atap, sedangkan fotogrametri terestrial mendukung perekaman fasad, ruang dalam, dan detail elemen.

Murphy et al., (2013) dalam tulisanya yang berjudul *Historic Building Information Modeling* pada tahun 2009 menjelaskan HBIM berkembang dari konsep pemodelan parametrik ke pemodelan bangunan bersejarah. Dalam HBIM, model tiga dimensi menjadi wadah informasi yang dapat mencakup jenis material, kondisi kerusakan, fase pembangunan, sumber dokumentasi, dan tingkat kepastian. Penjor et al. (2024) menegaskan kapasitas HBIM diantaranya untuk dokumentasi, analisis, dan manajemen konservasi, sekaligus mencatat tantangan interoperabilitas, dan pemodelan bentuk tidak beraturan.

Pemanfaatan UAV dan metode HBIM untuk dokumentasi digital dapat juga diintegrasikan dengan GIS. GIS melengkapi HBIM dengan konteks geospasial. Integrasi keduanya memungkinkan data elemen bangunan dikaitkan dengan pola permukiman, topografi, akses, sumber air, zona kerentanan, dan informasi kebencanaan (Dore dan Murphy, 2012). Alshawabkeh et al., (2024) menunjukkan bahwa HBIM dapat berfungsi sebagai alat pengambilan keputusan konservasi ketika informasi kondisi permukaan dan atribut *heritage* diintegrasikan secara sistematis.

Perkembangan teknologi juga dapat mendorong pendokumentasian digital bangunan bersejarah dapat dilakukan dengan cara membuat 'kembaran' bangunan secara digital, atau yang sering disebut dengan *digital twin*. *Digital twin* memperluas model digital dari representasi statis menuju sistem yang dapat diperbarui melalui data kondisi dan sensor (Niccolucci dan Felicetti, 2024). Pada konservasi preventif, *digital twin* dapat membantu menghubungkan identifikasi risiko, pemantauan, simulasi, dan keputusan intervensi (Wang et al., 2023). Namun, untuk kampung adat Sumba, prioritas awal yang lebih realistis adalah membangun baseline digital terstruktur yang difokuskan pada model anatomi bangunan rumah adat Sumba (Gambar 4).



Gambar. 4
Klasifikasi Anatomi Rumah Adat Sumba Sebagai Struktur Data Dokumentasi
Sumber: Analisa Penulis (2026)

2.5. Dokumentasi Digital sebagai Strategi Mitigasi pada Rumah Adat Sumba

Penerapan dokumentasi digital pada rumah adat Sumba hingga saat ini masih didominasi untuk kebutuhan inventarisasi, penelitian, dan media pembelajaran arsitektur tradisional (Sholeh et al., 2026). Padahal, perkembangan teknologi dokumentasi digital seperti fotogrametri, UAV, laser scanning, dan *Heritage Building Information Modelling (HBIM)* menunjukkan bahwa teknologi tersebut memiliki peran yang lebih luas sebagai instrumen pelestarian dan mitigasi risiko terhadap warisan budaya yang rentan mengalami kerusakan akibat bencana (Penjor et al., 2024). Dokumentasi

digital mampu menghasilkan representasi bangunan yang akurat, terukur, dan berkelanjutan sehingga menjadi pendekatan penting dalam upaya konservasi warisan budaya pada era digital (Scandurra et al., 2024).

Melalui dokumentasi digital, berbagai informasi penting mengenai rumah adat Sumba dapat direkam secara sistematis, meliputi geometri bangunan, sistem struktur, material, detail konstruksi, organisasi ruang, hingga pola permukiman adat. Informasi tersebut selanjutnya dapat disimpan dalam bentuk basis data digital yang bersifat dapat diakses kembali dan diperbarui untuk keperluan penelitian, konservasi, maupun rekonstruksi pascabencana. Selain mendokumentasikan aspek fisik, teknologi digital juga memungkinkan pelestarian pengetahuan tradisional dan nilai budaya yang melekat pada elemen arsitektur, sehingga berfungsi sebagai media penyimpanan memori budaya (*digital memory*) yang berkelanjutan (Barzaghi et al., 2024).

Dalam konteks kejadian kebakaran berulang pada beberapa kampung adat di Sumba, dokumentasi digital dapat diposisikan sebagai bentuk konservasi preventif (*preventive conservation*) yang bertujuan mengurangi potensi kehilangan informasi arsitektural sebelum kerusakan terjadi. Hal ini menjadi sangat penting mengingat karakteristik rumah adat Sumba yang didominasi material kayu, bambu, dan atap alang-alang yang memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap kebakaran. Dengan tersedianya dokumentasi digital yang komprehensif, informasi spasial, arsitektural, dan budaya tetap dapat dipertahankan serta dimanfaatkan sebagai dasar rehabilitasi dan rekonstruksi apabila terjadi kehilangan fisik bangunan pada masa mendatang (Penjor et al., 2024). Oleh karena itu, dokumentasi digital tidak lagi dipandang sekadar sebagai alat visualisasi, melainkan sebagai strategi mitigasi dan pelestarian warisan budaya yang berkelanjutan.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif dengan desain kajian konseptual dalam bidang arsitektur. Pendekatan tersebut digunakan untuk menyusun kerangka dokumentasi digital melalui penelusuran, klasifikasi, interpretasi, dan sintesis literatur mengenai dokumentasi warisan arsitektur, kasus kebakaran bangunan tradisional, karakter arsitektur rumah adat Sumba, dan teknologi digital heritage. Analisis konseptual dalam penelitian arsitektur memungkinkan berbagai sumber pengetahuan dikategorikan dan dihubungkan untuk membentuk kerangka acuan baru (Franz, 1994).

Objek kajian adalah rumah dan permukiman adat Sumba, terutama tipe rumah berpuncak atau uma mbatangu. Bagian analisis dibagi dalam tiga skala: (1) skala permukiman, meliputi pola tata massa, orientasi, natara, kubur

megalitik, sirkulasi, akses, dan kedekatan antarbangunan; (2) skala bangunan, meliputi geometri, struktur utama, organisasi ruang, dan hubungan vertikal; serta (3) skala elemen, meliputi material, sambungan, komponen atap, lantai, dinding, kolom, bukaan, ornamen, dan elemen ritual.

Data penelitian bersumber dari artikel ilmiah mengenai rumah adat Sumba, risiko kebakaran, fotogrametri, HBIM, GIS, *digital twin*, dan konservasi preventif; laporan organisasi heritage; dokumentasi peristiwa kebakaran; serta sumber visual berlisensi terbuka. Literatur dipilih berdasarkan relevansi langsung terhadap objek, metode, dan tujuan kerangka.

3.2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian terdiri atas tujuh langkah (Gambar 5). Pertama, telaah literatur untuk memahami karakter rumah adat, risiko kebakaran, dan teknologi dokumentasi. Kedua, identifikasi faktor bahaya, kerentanan, dan kapasitas. Ketiga, klasifikasi anatomi bangunan. Keempat, analisis jenis data yang hilang apabila setiap komponen rusak. Kelima, penetapan kebutuhan akuisisi, resolusi, atribut, dan metadata. Keenam, penyusunan integrasi UAV-fotogrametri-HBIM-GIS. Ketujuh, perumusan pemanfaatan database untuk konservasi preventif, penilaian kerusakan, dan rekonstruksi.



Gambar. 5
Diagram Tahapan Penelitian
Sumber: Analisa Penulis (2026)

3.3. Variabel dan Indikator Penelitian

Di dalam penelitian ini terdapat variabel yang akan dikaji serta menentukan indikator penelitian sebagai pengarah selama proses penelitian berlangsung, hal tersebut diuraikan pada Tabel 1.

Tabel 1.
Variabel dan Indikator Penelitian

Variabel kajian	Indikator	Data yang diperlukan	Metode analisis	Luaran
Risiko kebakaran	Material mudah terbakar; jarak bangunan; musim kering; sumber api; akses; air; alarm	Karakter material, konfigurasi kampung, catatan kejadian	Analisis bahaya, kerentanan, kapasitas	Profil risiko dan prioritas dokumentasi
Anatomi geometrik	Dimensi, bentuk, proporsi, geometri atap, elevasi	Foto, ukuran, point cloud, model 3D	Klasifikasi dan pemetaan elemen	Baseline geometri
Anatomi struktural	Kolom, balok, rangka atap, lantai, sambungan	Detail konstruksi, ukuran elemen, urutan perakitan	Analisis sistem struktur tradisional	Data rekonstruksi struktur
Anatomi material	Jenis kayu/bambu, alang-alang, rotan, kondisi	Observasi, wawancara, foto detail, atribut material	Identifikasi dan kategorisasi material	Kamus material dan spesifikasi lokal
Anatomi ruang	Fungsi, hirarki, pusat perapian, akses gender, ruang ritual	Denah, potongan, narasi penggunaan	Analisis relasi ruang dan makna	Model organisasi ruang
Anatomi permukiman	Orientasi, natara, kubur megalitik, jarak, sirkulasi	Ortomosaik, koordinat, model permukaan, peta	Analisis spasial GIS	Database konteks kawasan
Dokumentasi digital	Cakupan, akurasi, format, metadata, interoperabilitas	Foto UAV/terrestrial, GCP, ukuran kontrol, atribut	Analisis kebutuhan teknologi	Workflow UAV-fotogrametri-HBIM-GIS
Konservasi preventif	Baseline, penyimpanan, pembaruan, akses, evaluasi pascabencana	Repositori, versi data, protokol perbandingan	Sintesis fungsi dokumentasi	Model pengelolaan data heritage

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Risiko Kebakaran pada Rumah Adat Sumba

Hasil sintesis menunjukkan bahwa risiko kebakaran rumah adat Sumba tidak terbentuk oleh satu faktor tunggal, melainkan oleh interaksi antara kerentanan material, kerentanan spasial, kondisi lingkungan, dan keterbatasan respons. Data yang mendasari pengelompokan tersebut bersifat kualitatif, berupa karakteristik bahan bangunan, tata letak

permukiman, kondisi lingkungan, serta kesiapan penanggulangan kebakaran. Rangkuman hasil sintesis disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2.
Matriks Hasil Sintesis Faktor Risiko Kebakaran Rumah Adat Sumba

Kelompok faktor	Penyebab kebakaran	Uraian kejadian kebakaran	Kesimpulan
Kerentanan material	Alang-alang memiliki luas permukaan besar dan mudah menyala; kayu dan bambu meneruskan pembakaran setelah atap terbakar	Atap mudah tersulut, kemudian pembakaran berlanjut ke unsur bangunan lainnya	Material bangunan mendukung penyalaan dan keberlanjutan api
Kerentanan spasial	Jarak antarbangunan sempit	Membentuk jalur penjalaran api dari satu bangunan ke bangunan lain	Kebakaran berpotensi menyebar antarrumah
Kerentanan lingkungan	Musim kering dan angin	Mempercepat pengeringan material serta penyebaran bara	Kondisi lingkungan mempercepat penyalaan dan perluasan kebakaran
Keterbatasan respons	Akses kampung, pasokan air, sistem peringatan, dan peralatan pemadam belum selalu memadai	Respons awal dan pemadaman berpotensi terhambat	Api menjadi lebih sulit dikendalikan setelah kebakaran terjadi

Sumber: Hasil sintesis berdasarkan Tantra dan Brimblecombe (2022)

Berdasarkan Tabel 2, kerentanan material berkaitan dengan karakteristik bahan utama rumah adat Sumba. Alang-alang sebagai bahan penutup atap mempunyai luas permukaan yang besar dan mudah menyala. Setelah atap terbakar, kayu dan bambu dapat meneruskan proses pembakaran ke bagian bangunan lainnya. Dengan demikian, bahan bangunan tradisional tidak hanya berpengaruh terhadap proses penyalaan awal, tetapi juga terhadap keberlanjutan api di dalam bangunan.

Kerentanan material tersebut diperkuat oleh kondisi spasial permukiman. Jarak antarbangunan yang sempit memperpendek ruang pemisah antara sumber api dan bangunan di sekitarnya. Kondisi ini menciptakan jalur penjalaran api sehingga kebakaran pada satu rumah berpotensi menyebar ke rumah lainnya. Oleh karena itu, risiko kebakaran pada kampung adat perlu dipahami dalam skala bangunan sekaligus skala kawasan permukiman.

Faktor lingkungan berperan sebagai kondisi yang mempercepat perkembangan kebakaran. Pada musim kering, material bangunan kehilangan kelembapan dan menjadi lebih mudah terbakar. Sementara itu, angin dapat membawa bara menuju bangunan lain dan memperluas wilayah yang terpapar api. Kombinasi material yang mudah terbakar, jarak bangunan yang sempit, musim kering, dan angin dapat meningkatkan kecepatan penjalaran kebakaran.

Selain faktor yang memengaruhi penyalaan dan penjaralan api, tingkat risiko juga ditentukan oleh kapasitas respons. Akses menuju kampung, ketersediaan air, sistem peringatan, dan peralatan pemadam yang belum selalu memadai berpotensi menghambat penanganan pada tahap awal. Keterlambatan deteksi atau pemadaman memberikan waktu bagi api untuk berkembang dan menyebar ke bangunan lain.

4.2. Jenis Kehilangan Data Spasial dan Arsitektural

Kehilangan data dikelompokkan menjadi lima kategori. Pertama, kehilangan geometrik, meliputi dimensi, proporsi, bentuk atap, posisi elemen, dan ketidakteraturan aktual. Kedua, kehilangan struktural, meliputi konfigurasi kolom-balok, rangka atap, sambungan, urutan perakitan, dan perilaku sistem. Ketiga, kehilangan material, meliputi jenis bahan, teknik pengolahan, lokasi penggunaan, umur, dan kondisi. Keempat, kehilangan keruangan, meliputi fungsi, hirarki, relasi gender, pusat perapian, ruang Marapu, dan pola aktivitas. Kelima, kehilangan permukiman, meliputi orientasi rumah, natara, kubur megalitik, jalur sirkulasi, jarak, dan hubungan visual.

Kelima kategori saling bergantung. Geometri tanpa informasi material tidak cukup untuk rekonstruksi. Data struktur tanpa narasi urutan pembangunan dapat menghasilkan sambungan yang berbeda. Model bangunan tanpa konteks permukiman dapat menghilangkan orientasi sakral. Oleh sebab itu, sistem dokumentasi harus menggunakan struktur data multiskala dan multimodal.

4.3. Prioritas Dokumentasi Berbasis Anatomi Bangunan

Penelitian ini memfokuskan pada dokumentasi prioritas yang didasarkan pada anatomi bangunan, adapun uraian ada pada Tabel 3. Anatomi bangunan digunakan sebagai perangkat untuk menentukan apa yang harus direkam, pada tingkat ketelitian apa, dengan teknologi apa, dan dalam format apa. Pada skala permukiman, UAV menghasilkan ortomosaik, model permukaan, posisi bangunan, dan hubungan spasial. Pada skala bangunan, kombinasi foto udara dan terestrial menghasilkan model tiga dimensi lengkap. Pada skala elemen, foto detail, pengukuran manual, dan wawancara diperlukan untuk merekam sambungan serta informasi yang tidak terlihat dalam point cloud.

Tabel 3.
Jenis Dokumentasi Prioritas

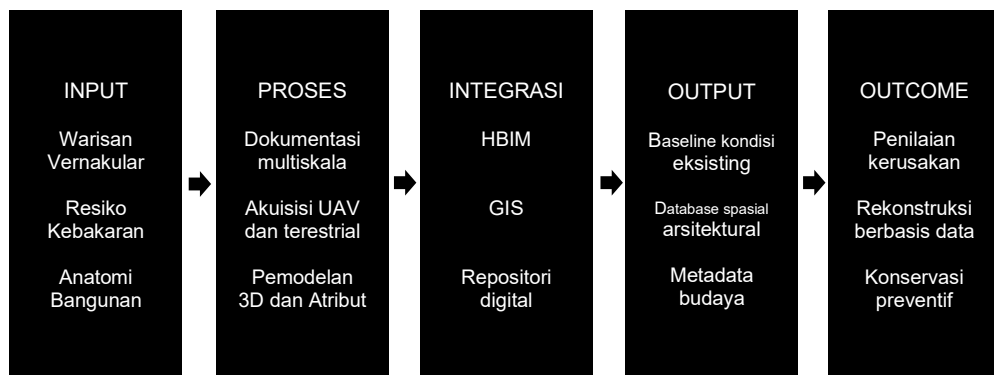
Skala	Objek prioritas	Metode akuisisi	Produk data	Fungsi konservasi
Permukiman	Tata massa, natara, kubur, akses, jarak	UAV, GNSS/GCP, observasi	Ortomosaik, DSM, peta GIS	Analisis pola dan jalur penjaralan
Bangunan	Bentuk, atap, elevasi, ruang, struktur utama	Fotogrametri UAV-terestrial, pengukuran	Point cloud, mesh, ortofoto, denah/potongan	Baseline kondisi dan rekonstruksi

Elemen	Sambungan, material, ornamen, komponen ritual	Foto makro, ukuran, wawancara	Detail 2D/3D, atribut, metadata	Replikasi elemen dan transfer pengetahuan
--------	---	-------------------------------	---------------------------------	---

dari tabel tersebut menunjukkan pada penelitian berikutnya, skala prioritas dalam pendokumentasian aset digital dapat difokuskan pada skala permukiman, skala bangunan, dan juga skala elemen.

4.4. Kerangka Dokumentasi Digital yang Diusulkan

Kerangka dokumentasi digital dibangun dalam lima bagian (Gambar 6): input, proses, integrasi, output, dan outcome. Bagian input memuat objek heritage, profil risiko, serta klasifikasi anatomi. Bagian proses meliputi dokumentasi multiskala, kontrol kualitas, pemodelan tiga dimensi, dan pengayaan atribut. Bagian integrasi menggunakan HBIM untuk mengelola informasi elemen bangunan dan GIS untuk mengelola konteks kawasan. Bagian output berupa baseline kondisi eksisting, database spasial-arsitektural, serta metadata budaya. Bagian outcome adalah evaluasi kerusakan, rekonstruksi berbasis data, dan konservasi preventif. Kerangka ini membedakan data observasi dan data interpretasi. Pemisahan ini penting untuk menjaga transparansi ilmiah dan mencegah model digital dianggap sepenuhnya objektif.



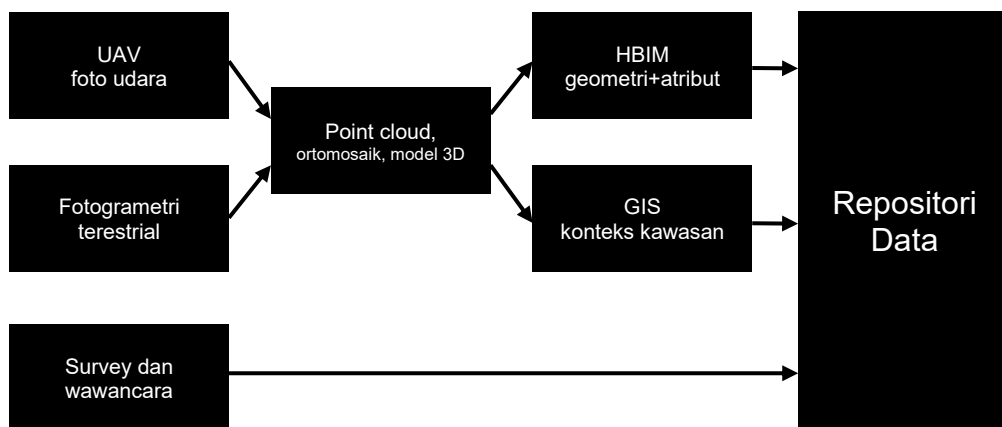
Gambar. 6
Gambaran Framework Pendokumentasian Anatomi Bangunan Secara Digital
Sumber: Analisa Penulis (2026)

4.5. Integrasi UAV, Fotogrametri, HBIM, dan GIS

Hasil penelitian ini juga menguraikan integrasi proses menuju repositori data (Gambar 7). UAV dan fotogrametri terestrial berfungsi sebagai lapisan akuisisi. Citra harus direncanakan dengan pertampalan memadai, variasi sudut, skala yang sesuai, serta titik kontrol untuk meningkatkan konsistensi geometrik. Produk awal berupa foto terkalibrasi, *point cloud*, mesh, tekstur, ortomosaik, dan model permukaan.

HBIM berfungsi sebagai lapisan informasi bangunan. Model tidak harus mengubah seluruh ketidakteraturan menjadi komponen parametrik ideal. Untuk elemen khas, strategi hibrida dapat digunakan: geometri hasil pemindaian dipertahankan sebagai referensi, sementara objek HBIM digunakan untuk klasifikasi, kuantifikasi, dan pengaitan atribut. Setiap objek dapat memuat ID, nama lokal, fungsi, material, dimensi, kondisi, sumber data, tanggal perekaman, tingkat ketelitian, dan tingkat kepastian.

GIS berfungsi sebagai bagian kontekstual secara eksisting. Setiap rumah dapat dikaitkan dengan koordinat, orientasi, jarak terhadap bangunan lain, posisi terhadap natara dan kubur, akses kendaraan, sumber air, serta zona risiko. Integrasi ini mendukung analisis pada dua arah: dari peta kawasan menuju detail elemen bangunan, dan dari elemen bangunan menuju konteks kerentanannya.



Gambar. 7
Integrasi Aliran Data UAV-Fotogrametri-HBIM-GIS
Sumber: Analisa Penulis (2026)

4.6. Pemanfaatan untuk Penilaian Kerusakan Pascabencana

Ketika kebakaran terjadi, dokumentasi pascabencana dilakukan dengan sistem koordinat dan struktur klasifikasi yang sama. Data sebelum dan sesudah bencana dapat dibandingkan untuk mengidentifikasi elemen hilang, deformasi, tingkat kerusakan, volume material yang perlu diganti, serta perubahan tata massa. Informasi ini mendukung penetapan prioritas: elemen yang masih dapat dipertahankan, elemen yang perlu diperkuat, elemen yang harus direkonstruksi, dan bagian yang memerlukan konsultasi adat. Adanya model digital tidak menggantikan keputusan masyarakat adat. Rekonstruksi harus menggabungkan bukti geometrik dengan pengetahuan pemilik rumah, tetua adat, tukang tradisional, dan pelaku ritual. Peran *database* adalah

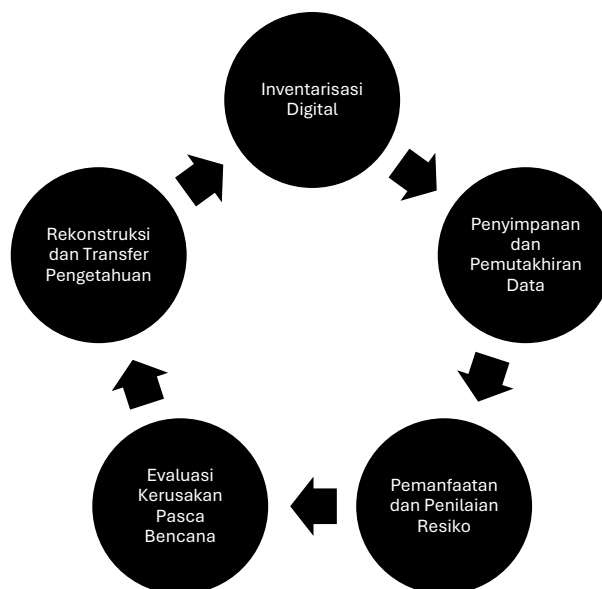
menyediakan bukti yang dapat diperiksa dan menjadi media dialog, bukan menentukan satu bentuk rekonstruksi secara otomatis.

4.7. Dokumentasi Digital sebagai Konservasi Preventif

Konservasi preventif berorientasi pada pengurangan kemungkinan kehilangan sebelum kerusakan terjadi. Siklus dokumentasi digital dalam konservasi preventif dapat dilihat pada Gambar 8. Dalam kerangka ini, dokumentasi digital merupakan tindakan preventif karena mempertahankan informasi yang tidak dapat dipulihkan setelah bangunan musnah. Prinsip tersebut sejalan dengan perkembangan pengelolaan heritage digital yang menghubungkan dokumentasi, diagnosis, pemantauan, dan keputusan intervensi (Wang et al., 2023).

Siklus pengelolaan terdiri atas inventarisasi, penyimpanan dan pembaruan, pemantauan risiko, evaluasi pascabencana, serta rekonstruksi dan transfer pengetahuan. Repositori harus menggunakan format terbuka atau terdokumentasi, memiliki salinan cadangan, kontrol versi, hak akses, dan prosedur pemutakhiran. Tanpa tata kelola tersebut, model digital berisiko menjadi file sekali pakai yang sulit dibuka atau diverifikasi pada masa mendatang.

Dalam jangka panjang, baseline dapat dikembangkan menuju heritage digital twin dengan sensor asap, suhu, kelembapan, atau kondisi material. Namun, penerapan sensor harus mempertimbangkan keterawatan, listrik, jaringan, biaya, dan penerimaan komunitas. Tahap pertama yang paling mendesak adalah dokumentasi menyeluruh dan penguatan kapasitas lokal untuk mengelola data.



Gambar. 8
Siklus dokumentasi digital dalam konservasi preventif
Sumber: Analisa Penulis (2026)

4.8. Implikasi terhadap Konservasi Warisan Budaya

Penerapan dokumentasi digital pada rumah adat Sumba memiliki beberapa implikasi penting. Pertama, dokumentasi digital mampu mempertahankan informasi spasial dan arsitektural yang berpotensi hilang akibat bencana. Kedua, data digital dapat menjadi media transfer pengetahuan kepada generasi berikutnya, terutama terkait teknologi konstruksi tradisional dan nilai budaya yang terkandung di dalam rumah adat. Ketiga, basis data digital dapat dimanfaatkan sebagai instrumen pengambilan keputusan dalam kegiatan konservasi, rehabilitasi, dan pengelolaan risiko bencana. Keempat, pendekatan ini mendukung pengembangan sistem konservasi warisan budaya yang lebih adaptif terhadap berbagai ancaman pada masa mendatang, termasuk perubahan iklim dan peningkatan frekuensi bencana. Dengan demikian, dokumentasi digital berbasis anatomi bangunan tidak hanya berfungsi sebagai alat visualisasi, tetapi juga sebagai instrumen konservasi preventif yang mampu menjaga keberlanjutan informasi spasial, arsitektural, dan budaya rumah adat Sumba terhadap risiko kebakaran berulang.

5. KESIMPULAN

Kebakaran berulang pada kampung adat Sumba menimbulkan kehilangan yang melampaui kerusakan fisik. Geometri, sistem struktur, teknik sambungan, pengetahuan material, organisasi ruang, pola permukiman, dan makna budaya dapat hilang bersamaan dengan bangunan. Ketika

dokumentasi sebelum bencana tidak tersedia, proses penilaian dan rekonstruksi berisiko kehilangan ketelitian dan autentisitas.

Penelitian ini mengidentifikasi lima kelompok data prioritas: geometrik, struktural, material, keruangan, dan permukiman. Kelompok tersebut disusun melalui pendekatan anatomi bangunan pada tiga skala, yaitu permukiman, bangunan, dan elemen.

Kerangka dokumentasi digital yang diusulkan mengintegrasikan UAV, fotogrametri terestrial, pengukuran lapangan, HBIM, GIS, dan repositori digital. Kerangka tersebut menghasilkan baseline kondisi eksisting, menghubungkan geometri dengan atribut budaya dan konstruktif, memungkinkan perbandingan sebelum-sesudah bencana, serta mendukung rekonstruksi berbasis bukti.

Kontribusi utama penelitian adalah menempatkan dokumentasi digital sebagai instrumen konservasi preventif dan mitigasi kehilangan data. Nilai model digital tidak hanya terletak pada kualitas visual, tetapi pada struktur informasi, transparansi sumber, interoperabilitas, tata kelola, dan keterlibatan masyarakat adat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshawabkeh, Y., Baik, A., & Miky, Y. (2024). HBIM for Conservation of Built Heritage. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/ijgi13070231>
- Arisanti, N., Rema, N., Ngurah Jayanti, I. G., & Jeraman, P. (2022). Dinamika Arsitektur Rumah Adat di Kabupaten Sumba Tengah. *Purbawidya*, 11(2), 215–227.
<https://doi.org/10.55981/purbawidya.2022.63>
- Barzaghi, S., Bordignon, A., Gualandi, B., Heibi, I., Massari, A., Moretti, A., Peroni, S., & Renda, G. (2024). A Proposal for a FAIR Management of 3D Data in Cultural Heritage: The Aldrovandi Digital Twin Case. *Data Intelligence*, 6(4), 1190–1221. <https://doi.org/10.3724/2096-7004.di.2024.0061>
- Dore, C., & Murphy, M. (2012). Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites. *18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia: "Virtual Systems in the Information Society,"* 369–376.
<https://doi.org/doi:10.21427/e7sy-rt81>
- Filkov, A. I., Tihay-Felicelli, V., Masoudvaziri, N., Rush, D., Valencia, A., Wang, Y., Blunck, D. L., Valero, M. M., Kempna, K., Smolka, J., De Beer, J., Campbell-Lochrie, Z., Centeno, F. R., Ibrahim, M. A., Lemmert, C. K., & Tam, W. C. (2023). A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment. *Fire Safety Journal*, 140(June), 103871.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>
- Fire Risk Heritage. (2025). *Fire and destruction of a traditional village in Sumba, Indonesia*. <https://www.fireriskheritage.net/fire-and-cultural-heritage-losses/fire-and-destruction-of-a-traditional-village-in-sumba-indonesia/>
- Franz, J. M. (1994). A critical framework for methodological research in architecture. *Design Studies*, 15(4), 433–447.
[https://doi.org/10.1016/0142-694X\(94\)90006-X](https://doi.org/10.1016/0142-694X(94)90006-X)
- Hirsan, F. P., Widayanti, B. H., Kurniawan, A., Yuniarman, A., & Puji Lestari, S. A. (2018). Kajian Lokasi Pos Induk Pemadam Kebakaran Terhadap Bencana Kebakaran Di Kota Mataram. *Jurnal Planoeearth*, 3(2), 63.
<https://doi.org/10.31764/jpe.v3i2.617>
- Ismail, T. U., Lestari, P., & Paripurno, E. T. (2019). Kesiapsiagaan Pengunjung Pusat Perbelanjaan Modern Terhadap Bahaya Kebakaran di Lippo Plaza Yogyakarta. *Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan*, 3(2), 89. <https://doi.org/10.31315/jmel.v3i2.3036>
- Maulana, A. F., Awaluddin, I., & Fatimah, S. (2026). *Analisis Kerawanan Bencana Kebakaran Berdasarkan Kondisi Bangunan Dan Aksesibilitas Di Kawasan Perkotaan Sungguminasa Cambayya*. 2, 1–16.
<https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/jtr>

- Murphy, M., McGovern, E., & Pavia, S. (2013). Historic Building Information Modelling - Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76, 89–102.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006>
- Niccolucci, F., & Felicetti, A. (2024). Digital Twin Sensors in Cultural Heritage Ontology Applications. *Sensors*, 24(12), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/s24123978>
- Penjor, T., Banihashemi, S., Hajirasouli, A., & Golzad, H. (2024). Heritage building information modeling (HBIM) for heritage conservation: Framework of challenges, gaps, and existing limitations of HBIM. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 35(February).
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2024.e00366>
- Remondino, F. (2011). Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, 3(6), 1104–1138.
<https://doi.org/10.3390/rs3061104>
- Remondino, F., & Rizzi, A. (2010). Reality-based 3D documentation of natural and cultural heritage sites-techniques, problems, and examples. *Applied Geomatics*, 2(3), 85–100. <https://doi.org/10.1007/s12518-010-0025-x>
- Rosimin, A. A., & Wijayaputri, C. S. (2020). Meaning of the House Based on Cosmological Aspects in the Culture of Western Sumba Study Object: Tara Manu Traditional House in Wee Lewo Village. *Riset Arsitektur (RISA)*, 4(02), 155–172. www.journal.unpar.ac.id
- Scandurra, S., Lanzara, E., Improta, I., Lo Pilato, A., & Itri, F. (2024). BSDD for artworks in hbim open and standard-oriented documentation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 48(2), 397–404.
<https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLVIII-2-W4-2024-397-2024>
- Sholeh, Moh. S. R., Aini, N., & Winarni, S. (2026). Arsitektur Sebagai Media Inklusif: Pemanfaatan Model Digital Terintegrasi Sebagai Sarana Orientasi Awal Rumah Adat Untuk Penelitian dan Pengajaran. *PAWON: JURNAL ARSITEKTUR*, X(01), 145–158.
<https://doi.org/https://doi.org/10.36040/pawon.v10i01>
- Suzuki, S., & Manzello, S. L. (2021). Investigating the Effect of Structure to Structure Separation Distance on Firebrand Accumulation. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 6(January), 1–10.
<https://doi.org/10.3389/fmech.2020.628510>
- Tantra, S., & Brimblecombe, P. (2022). Fire Risk in Traditional Villages of Sumba, Indonesia. *Heritage*, 3605–3615.
- Wang, P., Ma, X., Fei, L., Zhang, H., Zhao, D., & Zhao, J. (2023). When the digital twin meets the preventive conservation of movable wooden artifacts. *Heritage Science*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00894-8>

World Monuments Fund. (2025). *Sumba Island*.
<https://www.wmf.org/projects/sumba-island>