

PEMANFAATAN LIMBAH TAILING SEBAGAI MATERIAL MODUL ATAP PADA MUSEUM FREEPORT TAHAP 2

Jihan Nabila

Program Studi Arsitektur Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta
d300220143@student.ums.ac.id

Wisnu Setiawan

Program Studi Arsitektur Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Surakarta
ws238@ums.ac.id

ABSTRAK

PT Freeport Indonesia menghasilkan limbah tailing dalam jumlah sangat besar yang dihasilkan dari kegiatan pertambangan, sehingga diperlukan upaya pemanfaatan inovatif yang berkelanjutan untuk mengurangi dampak terhadap lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi pemanfaatan limbah tailing sebagai material arsitektur pada desain modul atap Museum Freeport Tahap 2 di kawasan MP-21, Mimika, Papua Tengah. Metode penelitian yang digunakan bersifat kualitatif melalui observasi, wawancara, serta testing desain material dan desain modular atap. Pengujian material dilakukan pada tiga jenis panel berbasis tailing untuk mengevaluasi karakteristik fisik, performa struktural, dan kemudahan konstruksi. Sementara itu, pengujian desain dilakukan pada susunan modul atap yang menerjemahkan indikator kontekstual lokal rumah adat Honai, desain pasif, dan modular. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel aluminium dengan concrete tailing coating memiliki performa paling optimal karena ringan, stabil, dan mudah diaplikasikan. Selain itu, susunan modul atap tidak rapat dengan pola acak terkontrol dinilai paling sesuai karena mampu menyeimbangkan nilai kontekstual rumah adat Honai, desain pasif, dan efisiensi sistem modular. Penelitian ini menegaskan bahwa limbah tailing dapat diolah menjadi material arsitektur yang bernilai guna serta berperan sebagai representasi simbolis komitmen keberlanjutan PT Freeport Indonesia.

KEYWORDS:

Limbah *tailing*; material arsitektur; Museum Freeport; rumah adat Honai; modular

PENDAHULUAN

PT Freeport Indonesia (PTFI) merupakan perusahaan pertambangan bijih mineral terbesar yang beroperasi di Kabupaten Mimika, Timika, Papua, Indonesia, berdasarkan Kontrak Karya 1967 (Astuti, 2018). Pada proses operasional pengolahan bijih mineral tersebut menghasilkan limbah residu yang dikenal sebagai limbah *tailing*, dengan permasalahan utama terletak pada sistem pembuangannya yang dialirkan melalui Sungai Aghawagon dan Sungai Ajkwa menuju *Modified Ajkwa Deposition Area* (ModADA) dengan cakupan area sekitar 230 km² serta volume endapan *tailing* yang mencapai lebih dari 55 juta ton per tahun dari satu lokasi pengolahan saja (Hutagalung dkk., 2025; Luhukay, 2016). Limbah *tailing* Freeport sendiri tergolong limbah B3 karena jumlahnya yang sangat

banyak meskipun materialnya tidak beracun dan berbahaya (PT Freeport Indonesia, 2025a).

Menyikapi hal tersebut, PTFI telah menunjukkan langkah proaktif dengan memanfaatkan kembali limbah *tailing* dalam reklamasi lahan dan revegetasi, di mana lebih dari 500 spesies tanaman dapat tumbuh secara alami, sehingga lahan tersebut menjadi kembali produktif untuk kegiatan pertanian, perkebunan, hingga konservasi. Selain itu, *tailing* dari MP-21 juga dimanfaatkan secara luas untuk pembangunan infrastruktur di Timika. Roberth Sarwom menegaskan bahwa 98% material pembangunan jalan, jembatan, dan gedung di wilayah tersebut menggunakan *tailing*, bahkan *tailing* juga digunakan sebagai bahan baku semen (PT Freeport Indonesia, 2025b).

Merujuk pada hasil wawancara dengan salah satu staf PT Hema Cipta Kreastika,

Museum Freeport dirancang dan dibangun di kawasan MP-21 (21 *Environmental*), Ayuka, Kabupaten Mimika, di mana kawasan tersebut secara khusus diperuntukkan bagi kegiatan penelitian, pemanfaatan ulang limbah *tailing*, serta reklamasi lahan. Lokasi ini strategis secara operasional juga memiliki makna penting sebagai area yang mencerminkan tanggung jawab perusahaan terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Museum Freeport menjadi wadah dokumentasi sejarah sekaligus ruang edukasi untuk menjelaskan upaya perusahaan dalam pengelolaan lingkungan dan inovasi keberlanjutan terhadap limbah *tailing*.

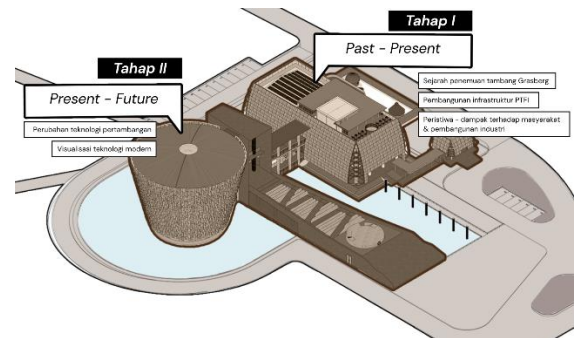
Perancangan dan pembangunan Museum Freeport dibagi menjadi 2 tahap. Museum Freeport tahap 1 berfokus pada narasi historis perusahaan, mulai dari penemuan Grasberg hingga pembangunan infrastruktur PT Freeport Indonesia. Tahap ini menekankan peristiwa-peristiwa penting dalam sejarah perusahaan dan dampaknya terhadap masyarakat lokal serta pengembangan industri pertambangan. Dari sisi arsitektural, Museum Freeport dirancang dengan inspirasi dari rumah adat Honai. Pendekatan ini menonjolkan identitas lokal Papua sekaligus menghadirkan interpretasi visual yang kuat terhadap warisan budaya setempat.



Gambar 1. Gubahan analogi bentuk rumah adat Honai.

(Sumber: Dokumen Penulis, 2025)

Museum Freeport tahap 2 menampilkan kisah perusahaan dari masa kini hingga masa depan, menyoroti perubahan teknologi pertambangan dari manual menuju modern melalui visualisasi miniatur dan modul pameran interaktif. Desainnya menekankan bentuk atap Honai yang terbalik dengan susunan modul berpola, juga memiliki bentuk bangunan yang menyerupai tambang Grasberg.



Gambar 2. Pembagian tahap perancangan dan pembangunan Museum Freeport.

(Sumber: Nabila, J & PT Hema Cipta Kreastika, 2025).
Dokumentasi gambar perancangan.

Dari isu penumpukan limbah *tailing* yang ada di Papua menunjukkan bahwa persoalan *tailing* bukan lagi isu teknis semata, melainkan masalah lingkungan yang memerlukan pendekatan lintas disiplin, termasuk arsitektur. Selama ini, pemanfaatan *tailing* lebih banyak diarahkan pada reklamasi lahan dan infrastruktur, sementara kajian mengenai potensinya sebagai material arsitektur masih relatif terbatas. Museum Freeport sebagai ruang narasi sejarah dan keberlanjutan perusahaan memiliki posisi strategis untuk menjembatani isu tersebut, di mana material berbasis *tailing* dapat menjadi medium cerita tentang dampak, tanggung jawab, dan upaya perbaikan lingkungan secara simbolis. Dengan demikian, penggunaan material berbasis *tailing* pada museum menjadi sebuah urgensi sekaligus celah penelitian yang penting untuk dikaji, guna menunjukkan bahwa limbah pertambangan dapat dimanfaatkan menjadi elemen arsitektural yang bernilai guna, bermakna, dan berkontribusi nyata dalam pengurangan beban limbah serta penguatan narasi keberlanjutan.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, maka dirumuskan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengembangan solusi pemanfaatan inovatif dapat diterapkan untuk mendaur ulang limbah *tailing*?
2. Bagaimana implementasi material arsitektur berbasis *tailing* secara simbolis dalam desain Museum Freeport dapat memperkuat konteks lokal rumah adat

Honai serta merepresentasikan tanggung jawab lingkungan perusahaan?

Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitiannya sebagai berikut:

1. Untuk mengusulkan solusi pemanfaatan inovatif terhadap limbah *tailing* agar dapat diterapkan sebagai material arsitektur yang bernilai guna dan berkelanjutan.
2. Untuk menganalisis implementasi material arsitektur berbasis *tailing* secara simbolis dalam desain Museum Freeport dalam memperkuat konteks lokal rumah adat Honai sekaligus merepresentasikan tanggung jawab lingkungan perusahaan.

TINJAUAN PUSTAKA

Limbah *Tailing* PTFI

Tailing merupakan limbah dari produksi pengolahan bijih besi dan tembaga dari PT Freeport yang berupa pasir sisa tambang (PT Freeport Indonesia, 2025a). Pengolahan batuan bijih berawal dari penghancuran yang kemudian dicampur dengan *reagen* (mengandung alkohol) di dalam bak penampungan. Pencampuran tersebut bertujuan untuk memisahkan mineral emas dan tembaga dari batuan. Dari 97% bijih yang diproses, hanya 3% tembaga dan emas dapat masuk ke pabrik untuk kemudian diekstraksi, dan sisanya akan dialirkan menuju ke *Modified Ajkwa Deposition Area* (ModADA) (Febriani, 2019).

Tailing umumnya dianggap tidak lagi memiliki potensi untuk dimanfaatkan. Namun, seiring dengan perkembangan penelitian dan kemajuan teknologi, *tailing* masih memiliki peluang untuk diolah kembali, khususnya sebagai bahan material bangunan. Secara fisik, *tailing* tersusun dari sekitar 50% fraksi pasir halus dengan ukuran butir antara 0,075–0,4 mm, sedangkan 50% lainnya berupa fraksi lempung dengan diameter kurang dari 0,075 mm. Kandungan mineral dalam *tailing* umumnya bergantung pada jenis dan komposisi bijih yang diolah pada lokasi penambangan tersebut (Riogilang & Masloman, 2009).

Pemanfaatan Limbah *Tailing* sebagai Material dengan Variasi Komposisi

Menurut analisis Marshall, campuran yang menggunakan *tailing*, baik dalam campuran beraspal maupun lapis pondasi, menunjukkan performa memuaskan dan memenuhi standar teknis. Pemanfaatan *tailing* sangat relevan mengingat volume limbahnya yang besar, mencapai sekitar 300.000 ton per hari. *Tailing* berpotensi dimanfaatkan untuk lapisan permukaan, lapisan pondasi atas, lapisan pondasi bawah jalan, serta sebagai pengganti sebagian agregat sedang dan pasir pada konstruksi jembatan (Irianto dkk., 2023).

Pemanfaatan limbah *tailing* sebagai material bangunan didukung oleh penelitian Fakhruddin dan Riogilang, yang menjelaskan bahwa *tailing* padat hasil pengolahan emas dapat diolah kembali menjadi material bangunan melalui tahapan teknis yang sistematis, mulai dari proses pengeringan, penghalusan, hingga penetralan pH menggunakan kapur agar memenuhi baku mutu lingkungan (Fakhruddin & Probowati, 2023; Riogilang & Masloman, 2009). Pada penelitian oleh Fakhruddin dan Probowati tentang pemanfaatan *tailing* hasil pengolahan emas untuk pembuatan batako, *tailing* yang telah distabilisasi dimanfaatkan sebagai bahan substitusi dengan variasi komposisi 10, 20, dan 30%, yang selanjutnya diuji berdasarkan standar SNI 03-0349-1989. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran *tailing* sebesar 10% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 91,10 kgF/cm² dengan daya serap air sebesar 5,09%, sehingga memenuhi persyaratan mutu batako. Pada variasi 20%, kuat tekan mengalami penurunan namun masih berada dalam kategori layak untuk penggunaan non-struktural, sementara pada komposisi 30% terjadi penurunan signifikan terhadap kuat tekan dan peningkatan daya serap air, yang menunjukkan keterbatasan *tailing* apabila digunakan dalam jumlah berlebih. Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran *tailing* sebesar 10% mampu menghasilkan kuat tekan yang memenuhi persyaratan mutu batako serta tingkat penyerapan air yang masih berada dalam batas aman (Fakhruddin & Probowati, 2023).

Fan Xu dkk. juga menunjukkan bahwa IOTs (*Iron Ore Tailings*) dapat dimanfaatkan sebagai *fine aggregate* atau pengganti sebagian pasir silika dalam pembuatan beton daur ulang (*tailing recycled aggregate concrete*), yang diuji melalui komposisi campuran beton dengan variasi persentase IOTs yang berbeda. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penambahan IOTs hingga 30% sebagai pengganti pasir silika meningkatkan densitas mikrostruktur beton dan memperbaiki *Interfacial Transition Zone* (ITZ) antara agregat dan matriks, sehingga memberikan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton daur ulang tanpa *tailing*. Namun, ketika persentase IOTs melebihi 30%, kekuatan beton mulai menurun karena ketidakseimbangan gradasi agregat dan pembentukan rongga mikro yang lebih banyak (Xu dkk., 2024).

Selanjutnya, penelitian oleh Paiva dkk. mengevaluasi kelayakan penggunaan *tailing* sebagai bahan baku dalam produksi genteng keramik melalui variasi penambahan *tailing* sebesar 5, 10, dan 20% ke dalam formulasi badan keramik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kadar 5%, keberadaan *tailing* mulai memberikan kontribusi positif terhadap sifat material, meskipun peningkatan kuat lentur dan densitas masih relatif terbatas. Pada kadar 10%, peningkatan sifat mekanik dan fisik material menjadi lebih signifikan, ditandai dengan perbaikan kuat lentur, kepadatan badan keramik, serta penurunan daya serap air dibandingkan formulasi tanpa *tailing*. Peningkatan ini menunjukkan bahwa partikel *tailing* berperan sebagai pengisi dan turut memperbaiki struktur mikro material. Komposisi dengan penambahan *tailing* sebesar 20% menunjukkan performa paling optimal, dengan nilai kuat lentur tertinggi, densitas yang lebih baik, serta kebutuhan suhu pembakaran yang lebih rendah dibandingkan variasi lainnya. Penurunan suhu pembakaran hingga sekitar 10% pada komposisi ini memberikan keuntungan dari sisi efisiensi energi dan biaya produksi. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penambahan *tailing* dalam rentang persentase tertentu, khususnya hingga 20%, dapat meningkatkan kualitas material genteng keramik sekaligus mengurangi ketergantungan

terhadap bahan baku alam, sehingga *tailing* berpotensi dikembangkan sebagai material bangunan (Paiva dkk., 2021). Pernyataan tersebut juga didukung oleh penelitian Pandelege tentang kajian manfaat *tailing* untuk bahan bangunan konstruksi, yakni maksimum penggunaan *tailing* dalam campuran sebesar 20% terhadap berat material (Pandelege, 2010).

Kontekstual Lokal Rumah Adat Honai

Rumah adat Honai merupakan arsitektur tradisional masyarakat suku Dani yang berkembang di wilayah Pegunungan Papua dengan kondisi iklim dingin, lembap, dan berkabut (Saranga dkk., 2023). Dalam kondisi lingkungan tersebut, Honai berfungsi sebagai tempat tinggal sekaligus menjadi sistem perlindungan termal yang dirancang secara pasif. Bangunan ini umumnya berukuran kecil, berbentuk bundar, dengan langit-langit rendah serta minim bukaan, sehingga mampu mengurangi paparan udara dingin dari luar dan menjaga kestabilan suhu di dalam ruang (Alfikri dkk., 2025).

Material bangunan Honai sepenuhnya memanfaatkan sumber daya lokal yang tersedia di lingkungan sekitar. Dinding dan rangka bangunan menggunakan kayu lokal, sementara penutup atap dibuat dari jerami atau ilalang kering yang disusun tebal. Pemilihan material ini didasarkan pada pengalaman empiris masyarakat setempat, di mana kayu memiliki konduktivitas termal rendah dan mampu menahan panas lebih lama, sedangkan jerami dengan struktur berongga berperan sebagai lapisan insulasi alami yang memperlambat perpindahan panas. Selain material, bentuk atap Honai turut berperan dalam mendukung kinerja termal bangunan. Atap dibuat dengan kemiringan curam dan menutup hampir seluruh badan bangunan, sehingga melindungi ruang dalam dari kondisi iklim sekitar. Struktur atap yang rapat tanpa ventilasi besar membantu membatasi pergerakan udara dingin masuk ke dalam ruang. Dengan demikian, keterpaduan antara bentuk bangunan dan penggunaan material lokal pada rumah adat Honai menunjukkan adanya hubungan yang kuat antara adaptasi lingkungan, strategi desain

pasif, dan ketahanan termal dalam arsitektur vernakular masyarakat suku Dani (Alfikri dkk., 2025).

Desain Pasif

Desain pasif merupakan pendekatan perancangan bangunan yang menekankan pemanfaatan potensi alam untuk memenuhi kebutuhan penghangatan, pendinginan, dan ventilasi ruang, sehingga tercipta kondisi bangunan yang nyaman bagi penggunanya. Kenyamanan yang dimaksud mencakup kualitas pencahayaan alami serta kenyamanan termal yang berkaitan dengan suhu udara di dalam ruang (Anggoman, 2017).

Dalam penerapannya, desain pasif berfokus pada strategi perancangan yang bersifat tetap dan melekat pada bangunan, tanpa bergantung pada sistem mekanikal dan elektrik. Pendekatan ini diwujudkan melalui berbagai elemen desain, seperti pengaturan bukaan, orientasi massa bangunan, ketebalan elemen bangunan, serta perancangan perangkat peneduh (*shading device*), yang seluruhnya berperan dalam mengendalikan kondisi iklim mikro bangunan secara alami (Anggoman, 2017).

Arsitektur Modular

Arsitektur modular merupakan pendekatan desain yang memanfaatkan komponen prefabrikasi untuk menghasilkan bangunan yang efisien serta mudah disesuaikan terhadap kebutuhan ruang dan perubahan fungsi (Taupani, 2024). Fleksibilitas menjadi salah satu prinsip penting dalam perancangan arsitektur, karena kebutuhan ruang cenderung berubah seiring waktu (Redyantanu & Sunaryo, 2024).

Salah satu keunggulan utama arsitektur modular terletak pada kemampuannya mempercepat proses konstruksi karena komponen bangunan diproduksi terlebih dahulu di pabrik, sehingga pelaksanaan di lapangan menjadi lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Di kawasan perkotaan yang memiliki keterbatasan ruang dan waktu, penyelesaian proyek yang lebih cepat dapat mengurangi gangguan terhadap aktivitas sekitar serta menekan dampak lingkungan selama proses pembangunan (Taupani, 2024).

Selain itu, arsitektur modular menawarkan fleksibilitas desain yang tinggi karena struktur bangunan dapat disesuaikan dengan berbagai kebutuhan fungsi dan skala penggunaan. Kemudahan dalam penyesuaian, penambahan, maupun pengurangan modul menjadikan sistem ini adaptif terhadap perubahan kebutuhan dan dinamika penggunaan ruang di lingkungan perkotaan (Taupani, 2024).

Tabel 1. Kerangka Konseptual Material, Kontekstual Lokal, Desain Pasif, dan Arsitektur Modular

Aspek	Landasan Teoritis	Prinsip Utama
Material	Pemanfaatan limbah <i>tailing</i> sebagai material bangunan	Karakteristik <i>tailing</i> memungkinkan digunakan sebagai material arsitektur
Kontekstual Lokal	Rumah adat Honai sebagai arsitektur vernakular Papua	Adaptasi iklim melalui bentuk atap, material lokal, dan minim bukaan
Desain Pasif	Prinsip pencahayaan dan penghawaan alami	Pengendalian panas dan udara melalui bentuk dan material
Modular	Arsitektur modular dan sistem prefabrikasi	Modul sebagai unit berulang yang efisien dan adaptif

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Objek pada penelitian ini adalah Museum Freeport yang terletak di kawasan MP-21, Ayuka, Kabupaten Mimika, Timika, Papua Tengah. Lokasi ini dipilih secara strategis karena berada di area yang difokuskan untuk kegiatan penelitian, konservasi, dan reklamasi lahan dari limbah *tailing* PT Freeport Indonesia (PTFI).



Gambar 3. Lokasi objek penelitian Museum Freeport. (Sumber: Google Earth imagery, 2025)

Posisi museum yang berdekatan dengan fasilitas penelitian dan lahan reklamasi memungkinkan integrasi antara kegiatan

edukasi, penelitian, dan konservasi lingkungan, sehingga pengunjung dapat memahami secara langsung upaya perusahaan dalam mengelola lingkungan.



Gambar 4. Ground plan Museum Freeport.
(Sumber: Nabila, J & PT Hema Cipta Kreastika, 2025).
Dokumentasi gambar perancangan.

Pendekatan Kualitatif

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif untuk menganalisis hasil *reuse* limbah *tailing* PT Freeport Indonesia sebagai bahan material arsitektur yang fungsional dan naratif bagi Museum Freeport.

Observasi

Observasi dilakukan melalui analisis terhadap dokumentasi visual (berupa render bangunan dan foto-foto terkait material serta lokasi museum), guna mengidentifikasi skema warna, tekstur, dan kriteria estetika yang sudah direncanakan.

Wawancara

Wawancara kepada staf proyek Museum Freeport dari PT Hema Cipta Kreastika yang bertujuan untuk mengetahui proses pengolahan material yang telah dilakukan, menggali secara detail visi arsitektural, serta mengidentifikasi hambatan teknis dan logistik dalam implementasi material inovatif berbasis *tailing*.

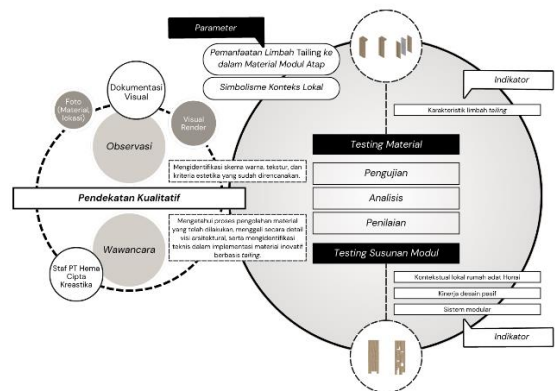
Tabel 2. Parameter dan Indikator Penelitian

Parameter	Indikator
Pemanfaatan Limbah <i>Tailing</i> ke dalam Material Modul Atap	a. Karakteristik Limbah <i>Tailing</i> b. Modular - Fleksibilitas - Kemudahan pengaturan dan variasi susunan modul. - Struktur dan Pemasangan

Kemudahan dan efisiensi proses pemasangan modul

- Kekuatan dan Keringanan
- Keseimbangan antara bobot ringan dan kestabilan struktur

- Simbolisme
Konteks Lokal
- a. Rumah Adat Honai**
- Material Lokal
 - Keterkaitan material dan ekspresi visual dengan konteks lokal Papua
 - Bentuk Atap
 - Kesesuaian bentuk dan susunan elemen dengan prinsip atap Rumah Honai.
- b. Desain Pasif**
- Pencahayaan Alami
 - Tingkat pencahayaan ruang yang memadai dan terkendali.
 - Penghawaan Alami
 - Kualitas udara dalam ruang yang memadai.



Gambar 5. Metode & mekanisme pengujian desain modul atap.
(Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Diagram metode penelitian)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Testing Material Panel

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan tiga jenis material panel fasad berbasis limbah *tailing* yang direncanakan untuk digunakan pada fasad Museum Freeport di kawasan MP-21. Karakteristik fisik, performa struktural, serta respons material terhadap kondisi lapangan menjadi fokus utama analisis. Seluruh rangkaian pengujian penelitian ini dilakukan oleh PT LAPI ITB bekerja sama dengan PT Hema Cipta Kreastika sebagai pihak yang terlibat dalam proses pengujian, guna

memastikan bahwa pemanfaatan *tailing* pada material panel atap memenuhi aspek teknis, keamanan, dan keberlanjutan penggunaan material dalam jangka panjang.



Gambar 6. Ilustrasi bentuk material panel 1, 2, dan 3. (Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Visualisasi material)

Tabel 3. Komposisi Material Panel Berbasis *Tailing*

Jenis	Komposisi Material	Keterangan
Panel 1	Semen : <i>Tailing</i> = 60 : 40	<i>Tailing</i> menggantikan 100% agregat pasir
Panel 2	Semen : Pasir : <i>Tailing</i> = 60 : 35 : 5	Penambahan <i>tailing</i> ke dalam komposisi material sebesar 5%, sebagai pengganti sebagian agregat pasir
Panel 3	Aluminium plate + concrete coating berbasis <i>tailing</i>	<i>Tailing</i> dimanfaatkan pada lapisan finishing (<i>coating</i>)

Material panel 1 dan 2 dibuat melalui proses pencampuran bahan yang terdiri atas semen, pasir, *tailing*, dan air sesuai dengan komposisi yang telah ditetapkan, kemudian dicetak menggunakan metode pencetakan sederhana. Sementara itu, material panel 3 menggunakan pelat aluminium sebagai elemen dasar, yang kemudian dilapisi dengan *concrete coating* berbasis *tailing* melalui teknik kamprot untuk membentuk lapisan permukaan yang menyatu dengan material dasar.

A. Panel dengan Kadar *Tailing* 100%

Material pertama merupakan panel yang dibuat dari campuran *tailing* dengan kadar 100% sebagai pengganti pasir, dengan ketebalan 8 cm dan berat 14 kg. Hasil pengujian menunjukkan bahwa material ini tidak memenuhi standar kelayakan untuk digunakan sebagai panel fasad.

Beberapa temuan utama adalah sebagai berikut:

- Kohesi material sangat rendah, menyebabkan panel mudah rontok

dan tidak mampu mempertahankan bentuk ketika diuji di lapangan.

- Berat material terlalu tinggi (14 kg), sehingga menyulitkan proses pemasangan serta meningkatkan beban pada sistem struktur fasad.
- B. Panel dengan Kadar *Tailing* 5% dan Campuran Pasir

Material kedua memiliki komposisi 5% *tailing* yang dicampur pasir, dengan ketebalan 5 cm dan berat 8 kg. Hasil pengujian menunjukkan kinerja yang lebih baik dibanding material 1, meskipun masih terdapat beberapa kendala yang perlu diperhatikan.

Hasil analisisnya meliputi:

- Panel relatif stabil dan tidak mengalami kerusakan signifikan selama pengujian lapangan.
 - Berat yang masih tergolong besar (8 kg) menyebabkan sistem penopang fasad perlu dirancang lebih kuat untuk menghindari risiko kegagalan struktural.
 - Secara visual dan tekstur, penambahan *tailing* 5% memberikan efek permukaan yang cukup baik tanpa menurunkan kualitas material.
- C. Panel Aluminium dengan *Concrete Tailing Coating*

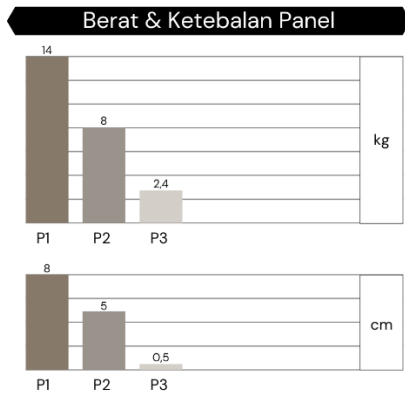
Material ketiga menggunakan aluminium plate sebagai substrat dengan *concrete tailing coating* setebal 2 mm yang dicampur dengan *tailing*. Panel ini memiliki ketebalan total 5 mm dan berat hanya 2.4 kg.

Temuan utamanya meliputi:

- Berat yang sangat ringan, sehingga mempermudah proses pemasangan dan mengurangi beban struktur secara signifikan.
- Daya rekat *coating* sangat baik, *concrete coating* mampu mengikat *tailing* dan memberikan hasil *finishing* yang kuat serta tidak mudah mengelupas.
- Karakteristik aluminium sebagai substrat memberikan kestabilan bentuk, ketahanan cuaca, dan kemampuan menahan beban angin

tanpa memerlukan struktur penopang berlebih.

- *Tailing* yang hanya digunakan pada lapisan permukaan (*coating*) tetap mendukung konsep keberlanjutan tanpa mengganggu performa struktural panel.



Gambar 7. Diagram perbandingan berat & tebal material panel.

(Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Analisis pengujian panel)

Hasil pengujian material panel 1 dengan komposisi *tailing* 40% sebagai pengganti agregat pasir dari 100% campuran menunjukkan bahwa penggunaan *tailing* sebagai pengganti pasir secara penuh belum mampu menghasilkan material panel fasad yang layak. Panel memiliki kohesi yang rendah dan mudah rontok, serta bobot yang relatif berat sehingga tidak efisien untuk diaplikasikan pada sistem fasad. Kondisi tersebut sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar *tailing* hingga 30% saja telah menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan, sehingga penggunaan *tailing* sebesar 100% sebagai pengganti agregat halus dapat dikatakan sebagai kondisi yang melampaui batas optimal pemanfaatan material (Fakhrudin & Probowati, 2023; Xu dkk., 2024).

Material panel 2 dengan penambahan *tailing* sebesar 5% dan campuran pasir memperlihatkan kinerja yang lebih stabil. Panel tidak mengalami kerusakan selama pengujian dan secara visual menunjukkan kualitas permukaan yang lebih baik. Hasil ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa penambahan *tailing* dalam kadar maksimal 20% dapat berfungsi sebagai pengisi dalam membantu memperbaiki struktur material

(Paiva dkk., 2021). Meskipun demikian, bobot panel yang masih cukup besar menunjukkan bahwa komposisi ini tetap memiliki keterbatasan apabila diterapkan sebagai panel fasad bangunan dalam skala luas.

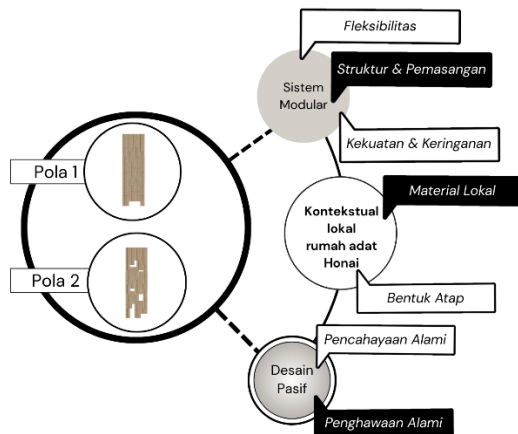
Material panel 3, yang menggunakan pelat aluminium sebagai elemen dasar dengan lapisan *concrete tailing coating*, menunjukkan hasil paling baik dibandingkan dua material sebelumnya, yakni dengan berat panel yang ringan, daya rekat lapisan yang baik, serta bentuk yang lebih stabil.

Berdasarkan hasil pengujian material panel fasad, material 3, yaitu panel aluminium dengan *concrete coating* yang dicampur *tailing* ditetapkan sebagai pilihan utama untuk digunakan pada desain fasad Museum Freeport. Material ini menunjukkan performa paling stabil, ringan, dan aman dibandingkan dua material lainnya. Dengan berat hanya 2,4 kg per panel, sistem ini memberikan efisiensi yang signifikan terhadap kebutuhan struktur penopang, sekaligus mempermudah proses pemasangan di lapangan.

Analisis Testing Desain Susunan Modul

Pengujian desain dilakukan pada susunan fasad dan atap yang terdiri dari 48 modul, disusun secara melingkar dan berlawanan arah jarum jam. Susunan modul ini dirancang sebagai upaya penerjemahan prinsip arsitektur rumah adat Honai ke dalam sistem selubung bangunan yang bersifat modular. Variasi panjang-pendek panel serta perbedaan tingkat kerapatan antar modul menghasilkan ritme visual yang dinamis dan memungkinkan evaluasi terhadap kinerja desain dari berbagai aspek. Pengujian ini bertujuan untuk menilai kesesuaian desain berdasarkan konteks lokal, performa desain pasif, serta efisiensi sistem modular yang diterapkan.

Dalam pengujian ini, dilakukan perbandingan terhadap dua alternatif susunan modul atap. Opsi pertama merupakan susunan modul rapat dengan jarak antar panel yang minim dan pola yang relatif seragam. Opsi kedua adalah susunan modul tidak rapat dengan pola acak terkontrol setiap delapan modul.



Gambar 8. Alternatif 1 dan 2 susunan modul atap beserta indikator penilaian.
(Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Penilaian desain susunan modul)

Testing desain susunan modul atap dilakukan dengan menilai kesesuaian desain terhadap indikator kontekstual lokal, kinerja desain pasif, serta efisiensi sistem modular, yang dijabarkan sebagai berikut:

A. Kontekstual Rumah Adat Honai

- Material Lokal

Indikator material lokal dinilai berdasarkan kesesuaian pendekatan material yang digunakan terhadap prinsip pemanfaatan sumber daya setempat.

- Bentuk Atap

Indikator bentuk atap dinilai berdasarkan kerapatan susunan, ritme modul, serta ekspresi massa atap yang mencerminkan sifat tertutup dan kompak sebagaimana terdapat pada tipologi atap Honai.

B. Desain Pasif

- Pencahayaan dan Penghawaan Alami

Indikator pencahayaan dan penghawaan alami dinilai berdasarkan potensi celah antar panel, orientasi modul, dan hubungan susunan atap dengan ruang di bawahnya dalam menciptakan kondisi pencahayaan dan penghawaan yang terkendali.

C. Sistem Modular

- Fleksibilitas

Indikator fleksibilitas dinilai berdasarkan kemudahan pengulangan modul dan kemampuan sistem

modular untuk disesuaikan pada berbagai konfigurasi susunan.

- Struktur dan Pemasangan

Indikator struktur dan pemasangan dinilai berdasarkan efisiensi sistem penopang serta kemudahan proses instalasi di lapangan, yang mencakup keteraturan urutan pemasangan serta potensi kemudahan kontrol dalam proses konstruksi.

- Kekuatan dan Keringanan

Indikator kekuatan dan keringanan dinilai berdasarkan hubungan antara berat panel dan kemampuan sistem struktur modul, yang difokuskan pada potensi beban mati oleh susunan modul serta implikasinya terhadap sistem struktur atap secara keseluruhan.

Berdasarkan indikator dan kriteria penilaian tersebut, hasil testing desain susunan modul atap selanjutnya dibahas dengan mengaitkannya pada landasan teoretis yang mencakup konteks lokal rumah adat Honai, prinsip desain pasif, dan sistem modular.

1. Kontekstual Rumah Adat Honai

Pada indikator material lokal, hasil testing desain menunjukkan bahwa kedua opsi susunan modul memiliki nilai yang relatif setara. Temuan ini sejalan dengan teori Rumah Adat Honai yang menekankan pemanfaatan sumber daya lokal sebagai bagian dari adaptasi terhadap lingkungan dan budaya setempat (Saranga dkk., 2023).

Pada indikator bentuk atap, hasil testing menunjukkan bahwa susunan modul opsi pertama lebih unggul dibandingkan opsi kedua. Pola susunan yang rapat menghasilkan ekspresi visual yang paling mendekati karakter atap Rumah Adat Honai yang tertutup, kompak, dan minim bukaan. Hal ini sesuai dengan teori yang menyebutkan bahwa atap Honai berperan penting dalam melindungi ruang dalam dari kondisi iklim dingin dan lembap melalui struktur atap yang rapat dan menutup hampir seluruh badan bangunan (Alfikri dkk., 2025).

2. Desain Pasif

Pada parameter desain pasif, hasil testing menunjukkan bahwa susunan modul opsi kedua memiliki performa yang lebih baik pada indikator pencahayaan dan penghawaan alami. Temuan ini dapat dijelaskan melalui teori desain pasif yang menekankan pengaturan bukaan, elemen bangunan, dan susunan massa untuk mengendalikan kondisi iklim mikro secara alami (Anggoman, 2017). Celah antar panel pada opsi kedua memungkinkan cahaya alami masuk secara lebih terkendali sekaligus membuka potensi aliran udara pasif, sehingga mendukung kenyamanan ruang tanpa ketergantungan pada sistem mekanikal.

3. Sistem Modular

Pada indikator sistem modular, aspek fleksibilitas menunjukkan bahwa kedua opsi memiliki keunggulan yang relatif sama. Hal ini sejalan dengan teori arsitektur modular yang menyatakan bahwa keteraturan modul memungkinkan pengulangan elemen serta kemudahan penyesuaian desain pada berbagai tahap perancangan dan konstruksi (Redyantanu & Sunaryo, 2024; Taupani, 2024). Pola modul yang teratur pada kedua opsi mendukung prinsip efisiensi dan adaptabilitas yang menjadi karakter utama sistem modular.

Namun, pada aspek struktur dan pemasangan, susunan modul opsi kedua menunjukkan keunggulan dibanding susunan modul opsi pertama. Pola tidak rapat dengan susunan acak terkontrol memungkinkan sistem struktur yang lebih efisien serta proses pemasangan yang lebih terencana. Temuan ini sejalan dengan teori yang menyebutkan bahwa sistem modular yang efektif mampu mengurangi kompleksitas konstruksi di lapangan dan meningkatkan efisiensi waktu pelaksanaan (Taupani, 2024).

Pada aspek kekuatan dan keringanan, hasil testing menunjukkan bahwa susunan modul opsi kedua memiliki kinerja paling baik karena jumlah panel yang lebih sedikit menghasilkan beban struktur yang lebih ringan. Hal ini mendukung prinsip arsitektur modular yang menekankan efisiensi struktur dan pengurangan beban konstruksi tanpa mengorbankan fungsi utama bangunan (Redyantanu & Sunaryo, 2024).

Tabel 4. Uji Susunan Modul dengan Skala Likert

	Indikator	Ops	
		1	2
Kontekstual	Material Lokal	5	5
	Rumah Adat	5	4
Honai			
Desain Pasif	Pencahayaan Alami	2	4
	Penghawaan Alami	2	4
Modular	Fleksibilitas	4	4
	Struktur & Pemasangan	4	4
	Kekuatan & keringanan	3	5
	Total	25	30

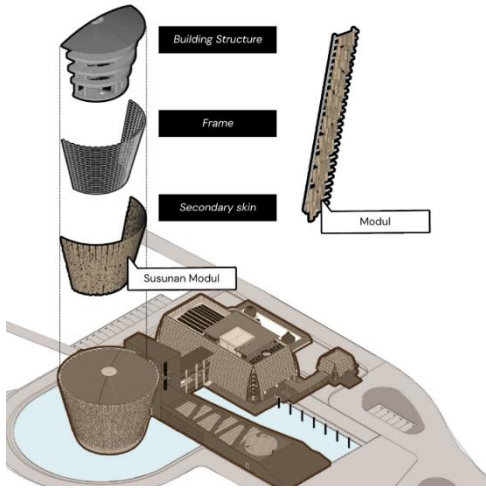
Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian dan evaluasi indikator tersebut, susunan modul atap yang tidak rapat dengan pola acak terkontrol setiap delapan modul (opsi kedua) ditetapkan sebagai solusi desain akhir. Pilihan ini dinilai paling mampu menjembatani nilai kontekstual rumah adat Honai, performa desain pasif, serta efisiensi sistem arsitektur modular, sehingga sesuai untuk diimplementasikan pada perancangan susunan modul atap Museum Freeport tahap 2.



Gambar 9. Perspektif render Museum Freeport tahap 2. (Sumber: PT Hema Cipta Kreastika, 2025)

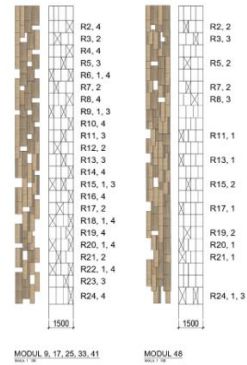
Detail Susunan Modul Atap Opsi 2

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, susunan modul dengan pola tidak rapat dan variasi acak setiap delapan modul (opsi kedua) ditetapkan sebagai pendekatan desain yang digunakan. Pemilihan ini kemudian dikembangkan lebih lanjut ke dalam perancangan detail *secondary skin*, khususnya pada hubungan antara struktur bangunan, rangka pendukung, dan modul fasad berbasis *tailing*.



Gambar 10. Aksonometri struktur pemasangan modul fasad.
(Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Ilustrasi sistem pemasangan modul)

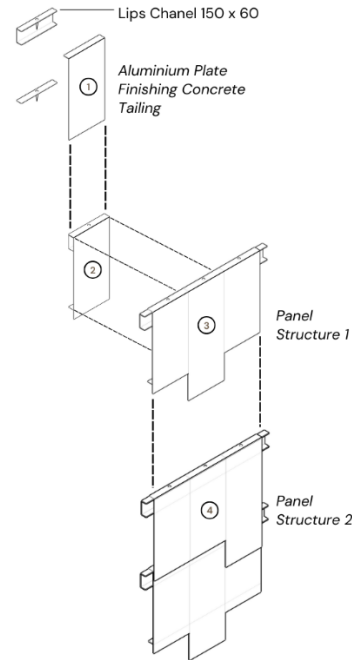
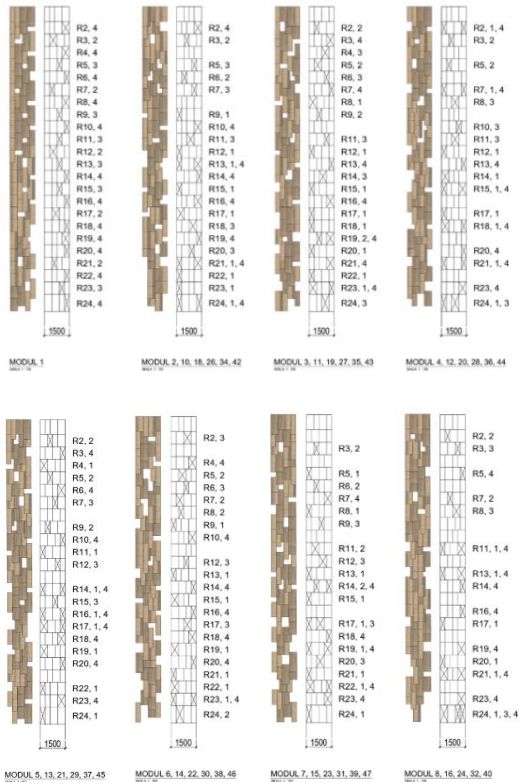
Berdasarkan gambar di atas, *secondary skin* dirancang sebagai lapisan terpisah yang dipasang pada rangka sekunder dan mengikuti geometri bangunan. Modul *tailing* disusun secara vertikal dengan lebar modul yang seragam, namun dengan variasi panjang dan jarak antar panel yang tidak rapat. Susunan ini membentuk ritme fasad yang dinamis sekaligus menghasilkan bukaan-bukaan untuk aliran udara dan cahaya.



Gambar 11. Susunan modul 1–48 pada sistem fasad.
(Sumber: Dokumen Penulis, 2025; Pengaturan modul fasad)

Sistem Struktur Pemasangan Modul Atap

Pada pengembangan sistem fasad lanjutan, struktur dirancang khusus untuk mendukung penggunaan panel aluminium sebagai elemen penutup fasad. Panel aluminium memiliki karakter material yang ringan dan stabil, sehingga memungkinkan penyederhanaan sistem struktur pendukung. Sistem struktur fasad menggunakan penopang berupa *lips channel* berukuran 150x60 yang berfungsi sebagai rangka utama tempat panel dipasang. Susunan ini dirancang agar mampu mengikuti bidang fasad yang miring sekaligus menjaga kestabilan panel terhadap beban sendiri dan pengaruh lingkungan.



Gambar 12. Detail sambungan panel.
(Sumber: PT Hema Cipta Kreastika, 2025)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian material dan testing desain yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah *tailing* dan penerapannya dalam sistem modul atap perlu dipahami dari sisi komposisi material, performa struktur, kemudahan pemasangan, serta keterkaitannya dengan konteks dan konsep desain yang diusung.

Dari sisi material, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemanfaatan *tailing* dalam kadar tinggi sebagai pengganti agregat tidak efektif untuk diaplikasikan sebagai panel atap karena menghasilkan material yang tidak stabil dan memiliki beban mati yang terlalu besar. Sebaliknya, penggunaan *tailing* dalam kadar terbatas, khususnya melalui penerapan *microcement coating* berbasis *tailing* pada panel aluminium menjadi pendekatan yang paling efektif. Pendekatan tersebut mampu menjaga keringanan dan kestabilan material, memiliki daya rekat yang baik, memenuhi kebutuhan teknis pemasangan panel, sekaligus tetap mendukung prinsip keberlanjutan melalui pemanfaatan limbah *tailing*.

Sementara itu, hasil testing desain susunan modul atap menunjukkan bahwa konfigurasi modul tidak rapat dengan pola acak terkontrol memiliki keunggulan paling konsisten ketika ditinjau dari aspek kontekstual rumah adat Honai, performa desain pasif, dan sistem arsitektur modular. Susunan ini dinilai mampu merepresentasikan karakter atap Honai secara lebih adaptif, meningkatkan potensi pencahayaan dan penghawaan alami, serta mengurangi beban struktur akibat jumlah panel yang lebih sedikit. Dengan demikian, pendekatan modular terbukti efektif sebagai media penerjemahan nilai arsitektur vernakular ke dalam desain bangunan kontemporer yang efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Alfikri, M. R., Afriansyah, A., Ryandika, M. R., & Anisa. (2025). *Peran Material Lokal dalam Ketahanan Termal Rumah Adat Honai*. https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semn_astek/article/view/27656

Anggoman, F. R. (2017). *Desain Museum Sejarah di Kawasan Banten Lama, dengan Pendekatan pada Kenyamanan Termal melalui Pemanfaatan Pencahayaan dan Penghawaan Alami*. [Universitas Islam Indonesia].

<https://dspace.uui.ac.id/123456789/27521>

Astuti, A. D. (2018). Implikasi Kebijakan Indonesia dalam Menangani Kasus Pencemaran Lingkungan oleh PT Freeport terhadap Keamanan Manusia di Mimika, Papua. Dalam *Journal of International Relations* (Vol. 4, Nomor 3). <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jihi/article/download/21080/19728>

Fakhrudin, M. M., & Probowati, D. (2023). Kajian Pemanfaatan Tailing Pengolahan Emas untuk Pembuatan Batako sebagai Aplikasi Zero Waste Material di PT Global Minerallium Corporindo, Kecamatan Batu Sopang, Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik (JUPRIT)*, 3(1), 149–166. <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i1.3219>

Febriani, E. P. (2019). *Upaya Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan dalam Mengatasi Permasalahan Limbah Tailings PT Freeport Indonesia* [Universitas Sebelas Maret]. <https://digilib.uns.ac.id/dokumen/detail/72948/>

Hutagalung, D. P., Darbec Anew, D., & Harlingan, D. (2025). Pengelolaan Limbah Tailing PT Freeport Indonesia: Dampak Lingkungan dan Tinjauan Hukum. *Jurnal Kajian Hukum dan Pendidikan Kewarganegaraan*, 01(3), 167–168. <https://jurnal.globalscients.com/index.php/jkhp>

Irianto, I., Sitorus, P. H., Mabui, D. S. S., Rochmawati, R., & Lopian, F. E. P. (2023). Analisis Pengaruh Penambahan Limbah Tailing PT Freeport sebagai Bahan Stabilisasi Tanah pada Lapis Pondasi Jalan. *Jurnal Teknik Sipil*, 30(3), 450–451. <https://doi.org/10.5614/jts.2023.30.3.13>

Luhukay, R. S. (2016). *Tanggung Jawab PT Freeport Indonesia terhadap Penanganan Kerusakan Lingkungan akibat*

- Pertambangan di Kabupaten Mimika, Papua* [Universitas Sam Ratulangi]. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/exetsocietatis/article/view/11533>
- Paiva, H., Simões, F., Maljaee, H., Yliniemi, J., Illikainen, M., & Ferreira, V. M. (2021). Production of ceramic construction materials as an environmental management solution for sulfidic mine tailings. *SN Applied Sciences*, 3(8). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04735-w>
- Pandeleke, R. E. (2010). Kajian Manfaat Tailing untuk Bahan Bangunan Konstruksi. *TEKNO*, 07, 75–80. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/tekno/article/download/4134/3648>
- PT Freeport Indonesia. (2025a). *Fakta Freeport Indonesia: Manajemen Lingkungan*. <https://ptfi.co.id/id/facts-about-freeport-indonesia>
- PT Freeport Indonesia. (2025b). *PTFI di Lingkungan*. <https://ptfi.co.id/>
- Redyantanu, B. P., & Sunaryo, R. G. (2024). Rethinking Modularity as Contextual Design Thinking. *ARSNET*, 4(1), 36–53. <https://repository.petra.ac.id/20940/>
- Riogilang, H., & Masloman, H. (2009). Pemanfaatan Limbah Tambang untuk Bahan Konstruksi Bangunan. *EKOTON*, 9(1), 70. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/EKOTON/article/view/287>
- Saranga, N., Kho, R., & Hadiyanti, Y. R. (2023). Eksplorasi Etnomatematika pada Rumah Adat Masyarakat Skouw Sae. *Jurnal Ilmiah Mandala Education (JIME)*, 9(2), 2442–9511. <https://doi.org/10.58258/JIME.V9I2.4727>
- Taupani, R. (2024). Eksplorasi Arsitektur Modular sebagai Solusi Perumahan di Area Perkotaan Padat. *Circle Archive*, 1, 2–3. <https://circle-archive.com/index.php/carc/article/view/314>
- Xu, F., Li, Z., Li, T., & Wang, S. (2024). The Mechanical Properties and Microstructure of Tailing Recycled Aggregate Concrete. *Materials*, 17(5), 1. <https://doi.org/10.3390/ma17051058>