



Kinerja Bata Ekologis Berbasis Tanah Lokal pada Sistem Modular: Studi Kasus Sekolah Hikari

Local Soil-Based Ecological Bricks Performance in a Modular System: A Case Study of Hikari School

Asy Syaima Adam ¹, Hilmi Dewani Fauziah ^{1*}, Safanisa Aurellia ¹, Irfan Sabarilah Hasim ¹,
Utami ¹, Eggi Septianto ¹, Fadilah Hasim ²

Prodi Arsitektur, Fakultas Arsitektur dan Desain, Institut Teknologi Nasional, Bandung, Indonesia¹

Yayasan Semarak Pendidikan Indonesia, Indonesia²

*Corresponding author: hilmi.dewani@mhs.itenas.ac.id

Article history

Received: 23 Mar 2026

Accepted: 14 Apr 2026

Published: 30 Apr 2026

Abstract

The construction industry contributes significantly to carbon emissions and material waste, thus necessitating more eco-friendly and efficient alternatives. This study aims to evaluate the performance of eco-bricks made from local soil in a modular system at Hikari School. The methodology employed is a descriptive qualitative approach using a case study design, involving literature review, field observations, documentation, and interviews. The results show that eco-bricks utilize local soil, are produced without firing, reduce cement requirements, and support an efficient and flexible interlocking system. Vertical voids serve as installation pathways, thermo-acoustic elements, and column spaces. Damage is generally influenced by user activity, humidity, and finishes, rather than structural failure of the material.

Keywords: durability; ecological bricks; interlocking bricks; material; modular performance

Abstrak

Industri konstruksi berkontribusi besar terhadap emisi karbon dan limbah material, sehingga membutuhkan alternatif yang lebih ekologis dan efisien. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja bata ekologis berbasis tanah lokal pada sistem modular di Sekolah Hikari. Metode yang digunakan adalah kualitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus melalui studi literatur, observasi lapangan, dokumentasi, dan wawancara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bata ekologis memanfaatkan tanah setempat, diproduksi tanpa pembakaran, mengurangi kebutuhan semen, serta mendukung sistem interlocking yang efisien dan fleksibel. Rongga vertikal berfungsi sebagai jalur instalasi, elemen termo-akustik, dan ruang kolom. Kerusakan umumnya dipengaruhi oleh aktivitas pengguna, kelembapan, dan finishing, bukan kegagalan struktural material.

Kata kunci: durabilitas; bata ekologis; bata saling mengunci; material; kinerja modular

Cite this as: Adam, A. S., Fauziah, H. D., Aurellia, S., Hasim, I. S., Utami, Septianto, E., Hasim, F. (2026). Kinerja Bata Ekologis Berbasis Tanah Lokal pada Sistem Modular: Studi Kasus Sekolah Hikari. *Article. Arsitektura: Jurnal Ilmiah Arsitektur dan Lingkungan Binaan*, 24(1), 61-77. doi: <https://doi.org/10.20961/arst.v24i1.116082>

1. PENDAHULUAN

Metode konvensional masih mendominasi industri konstruksi hingga saat ini. Di tengah meningkatnya kebutuhan pembangunan, metode membangun secara konvensional justru menimbulkan berbagai tantangan ekologis. Sektor pembangunan menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap tekanan lingkungan global. Laporan Status Global Bangunan dan Konstruksi (UCL, BPIE, UNEP CCC, 2024) mencatat bahwa sektor ini menjadi pendorong utama krisis iklim dengan mengonsumsi 32% energi global dan menyumbang 34% dari emisi CO₂ global. Emisi karbon terjadi sepanjang siklus hidup suatu bangunan karena memberikan pengaruh terhadap seluruh tahap mulai dari ekstraksi material hingga pembongkaran. Produksi material semen dan baja menjadi salah satu sumber terbesar penghasil karbon (Wang dkk., 2024).

Maka, timbul limbah konstruksi oleh praktik pembangunan. Limbah konstruksi merupakan sebagian bahan material sisa bangunan yang dihasilkan dari proses konstruksi, perbaikan, perubahan, atau ketidaksengajaan yang tidak dapat digunakan langsung pada tempat tersebut tanpa adanya perlakuan lanjutan. Dalam studi terbaru ditunjukkan bahwa sekitar 10-30% limbah konstruksi dibuang di tempat pembuangan akhir (TPA) seluruh dunia (Polat dkk., 2017; Tafesse dkk., 2022). Limbah yang dihasilkan sebagai produk sampingan dari proses konstruksi berpotensi menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan, terutama jika tidak ada pengelolaan yang baik di sepanjang tahapan pembangunan (Tafesse dkk., 2022; Wu dkk., 2016). Dampak tersebut mencakup pencemaran tanah dan air, peningkatan konsumsi energi dan sumber daya alam, percepatan degradasi lingkungan, serta penurunan kualitas lanskap, yang secara keseluruhan dapat memperburuk kondisi ekosistem sekitarnya (Edwards, 2014; Milad & Sungjin, 2020; Mydin dkk., 2014; Oladipo & Oni, 2012; Tafesse dkk., 2022).

Oleh karena berkembangnya pencemaran lingkungan, industri konstruksi dituntut untuk melakukan pendekatan desain yang lebih efisien, adaptif, dan ramah lingkungan. Disebabkan, limbah dan pemanfaatan bahan

mentah oleh industri konstruksi merusak ekosistem, terutama di sekitar lokasi konstruksi, menyebabkan perubahan signifikan pada lingkungan (Amalia & Aqli, 2024). Peningkatan kebutuhan ruang dan perubahan iklim yang semakin nyata membuat arsitektur perlu merespons melalui strategi yang tidak hanya fungsional, tetapi juga berkelanjutan. Dua pendekatan yang semakin relevan dalam menghadapi tantangan tersebut adalah pendekatan ekologis dan sistem modular. Pendekatan ekologis menjadi penting karena pembangunan konvensional masih menyumbang penggunaan energi dan emisi karbon dalam jumlah yang tinggi disebabkan oleh penggunaan material yang tidak ramah lingkungan. Konsep ekologis melibatkan ide pemanfaatan potensi sumber daya alam serta pengelolaan lingkungan hidup dengan menggunakan teknologi yang didasarkan pada etika yang mendukung keberlanjutan. Oleh karena itu, konsep arsitektur ekologi menawarkan solusi dengan menekankan efisiensi material (Amalia & Aqli, 2024).

Selain pendekatan ekologis, sistem modular juga semakin dibutuhkan, karena sistem modularitas memungkinkan pembangunan yang lebih cepat, presisi yang tinggi, serta minim limbah konstruksi karena komponen dibuat dengan ukuran dan format yang terstandar. Studi yang dilakukan oleh ilmuwan dari Universitas Cambridge dan Universitas Edinburgh Napier menunjukkan bahwa metode konvensional untuk membangun rumah menghasilkan CO₂ 41-45% lebih tinggi daripada metode modular. Oleh karena itu, ada hubungan antara teknologi arsitektur modular dan perubahan iklim atau pemanasan global. Dengan menggunakan bahan yang lebih ramah lingkungan, arsitektur modular dapat membantu mengurangi dampak lingkungan dan masalah perubahan iklim (Novita & Afgani, 2024).

Dalam konteks ini, penelitian kami mencoba melihat bagaimana kedua pendekatan antara ekologis dan sistem modular diterapkan melalui penggunaan material bata ekologis dianggap menarik karena tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki potensi untuk mendukung sistem modular melalui bentuk dan dimensinya yang relatif sama.

Namun, sebelum membahas penerapan bata ekologis, dibutuhkan pemahaman mengenai akar materialitasnya, yaitu tanah, yang telah lama digunakan sebagai material konstruksi pada berbagai peradaban.

Sejak peradaban kuno, manusia sudah mulai mengenal bagaimana membangun sebuah bangunan. Pembangunan ini kebanyakan menggunakan material alami yang ada di bumi, salah satunya adalah tanah. Penggunaan material tanah sebagai konstruksi utama biasanya tidak melalui proses pembakaran (Aminuddin dkk., 2024). Menurut Aminuddin, dkk. (2024) beberapa bukti bangunan yang termasuk ke dalam situs arkeologi kuno dengan menggunakan tanah, yaitu pre-Colombian city of Caral di Peru, dan Gourna Village yang berlokasi di Mesir. Sementara menurut peneliti lain, beberapa contoh lainnya adalah tembok besar yang berada di China, serta Gudang Gandum di Ramasseum (Akbulut & Alibeyoglu, 2025).

Salah satu teknik penggunaan konstruksi utama tanah adalah bata ekologis atau *compressed earth blocks* (CEBs). Bata ekologis merupakan bentuk revisi dari bata tanah cetak, yang biasanya dikenal sebagai bata *adobe* (Subramanian dkk., 2022; Teixeira dkk., 2020) dan lazimnya digunakan sebagai bahan material dinding dalam konstruksi bangunan. Berhubung bahan material utama produksi bata ekologis menggunakan tanah, bata ekologis lebih unggul dalam hal resistensi terhadap momen lentur rendah serta memiliki kekuatan tekan dan tarik yang lebih rendah.

Bata ekologis juga dapat digolongkan kepada material ramah lingkungan, sebab pembuatannya tidak melalui proses pembakaran, serta menggunakan tanah setempat (Aggarwal & Singh, 1990; Subramanian dkk., 2022). Terdapat tiga tahap pembuatan bata ekologis, yaitu tahap pencetakan, tahap pematatan, dan yang terakhir tahap pengeringan (Bikram, 2020). Dengan menggunakan material bata ekologis sebagai bahan konstruksi bangunan, dapat mengurangi dampak lingkungan potensial sebesar 50% (Fernandes, dkk., 2019; Teixeira dkk., 2020). Selain keunggulan dari sisi ekologisnya, berbagai penelitian mendapat hasil bahwa dinding yang menggunakan bata

ekologis memiliki massa termal tinggi yang dapat menstabilkan suhu ruangan (Fernandes dkk., 2019; Teixeira dkk., 2020).

Sistem pemasangan bata ekologis juga tergolong sangat mudah dan tidak memerlukan tukang yang ahli. Bata ekologis menerapkan prinsip yang sama dengan bata *interlock* dalam hal pemasangan pada bangunan, yaitu menyusun bata dengan cara mengunci pergerakannya dengan pengait yang sudah tercetak pada bata tersebut. Bata *interlock* ini mirip dengan mainan lego yang dapat dibongkar pasang dengan mudah (Kristiawan dkk., 2023). Selain itu, pada tengah bata, terdapat dua lubang yang dapat dimanfaatkan sebagai pemasangan tulangan besi dan semen untuk menghemat material dan penguat dinding (Kristiawan dkk., 2023).

Meskipun bata ekologis dikategorikan sebagai material konstruksi berbasis utama tanah, teknik pemasangannya menunjukkan adanya kesesuaian dengan konsep konstruksi modular. Sistem modular merupakan metode pembangunan yang mengandalkan proses perakitan komponen yang sudah diproduksi sebelumnya, baik melalui *pre-fabrication*, *pre-assembly*, maupun *off-site manufacturing* (Nabi & El-adaway, 2020; Arif & Egbu, 2010). Modul-modul tersebut dirancang agar dapat dipasang dengan cepat di lapangan dengan kebutuhan tenaga kerja yang lebih sedikit serta proses konstruksi yang lebih ringkas (Nabi & El-adaway, 2020; Smith & Timbelake, 2010).

Kemiripan yang terdapat pada bata ekologis dengan konsep konstruksi modular, yaitu elemen dinding dibuat dalam bentuk unit terstandar, kemudian dirakit di lokasi dengan teknik pemasangan yang tidak memerlukan keahlian kompleks. Sistem *interlock* pada bata ekologis yang memudahkan pemasangan ini selaras dengan tujuan utama konstruksi modular yang menekankan efisiensi tenaga kerja, percepatan waktu pemasangan, serta pengurangan kebutuhan proses konstruksi *in-situ* (Nabi & El-adaway, 2020; Smith & Timbelake, 2010). Kemudian, sifat bata ekologis yang dapat dibongkar pasang tanpa merusak unit juga sejalan dengan konstruksi modular yang mengedepankan fleksibilitas perakitan, transportasi dan pembongkaran

ketika dibutuhkan (Nabi & El-adaway, 2020; Smith & Timbelake, 2010).

Oleh sebab itu, meskipun bata ekologis berasal dari konstruksi berbasis tanah, tata cara pemasangan dan perilaku konstruksinya menunjukkan bahwa material ini berpotensi berfungsi sebagai sistem modular. Hal ini menjadikan bata ekologis seharusnya relevan untuk diterapkan pada proyek-proyek yang membutuhkan pengerjaan cepat, ramah lingkungan dan efisien.

Dari beberapa kajian artikel yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian sebelumnya umumnya masih berfokus pada aspek termal, akustik, kekuatan material, stabilisasi campuran, efisiensi energi, atau sistem *interlocking* secara umum. Belum banyak penelitian yang secara khusus membahas bata ekologis berbahan tanah lokal sebagai sistem modular yang dikaji melalui studi kasus bangunan sekolah yang telah digunakan dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah tersebut dengan meninjau bata ekologis di Sekolah Hikari dari aspek pemanfaatan tanah lokal, produksi *in-situ*, efisiensi semen, sistem *interlocking*, potensi bongkar pasang, fungsi rongga vertikal, serta performa material setelah digunakan lebih dari satu dekade.

Penelitian ini bermanfaat untuk memperkuat pemahaman mengenai potensi bata ekologis berbahan tanah lokal sebagai material konstruksi berkelanjutan yang tidak hanya rendah karbon, tetapi juga mendukung sistem modular. Secara teoritis, penelitian ini menambah kajian tentang hubungan antara material tanah, sistem *interlocking*, efisiensi semen, dan prinsip modularitas dalam arsitektur ekologis. Secara praktis, penelitian ini dapat menjadi acuan bagi perancang, pelaksana konstruksi, dan institusi pendidikan dalam memanfaatkan tanah lokal sebagai material bangunan yang lebih hemat sumber daya, mudah dipasang, berpotensi dibongkar-pasang, serta dapat mengurangi limbah konstruksi. Pada kasus Sekolah Hikari, penelitian ini juga menunjukkan bahwa bata ekologis memiliki manfaat sebagai material yang adaptif terhadap konteks lokal karena diproduksi secara *in-situ*, menggunakan tanah

setempat, dan telah digunakan dalam jangka waktu panjang pada bangunan sekolah.

Relevansi bata ekologis dalam mendukung pendekatan ekologis dan modular dapat diamati melalui studi kasus Sekolah Hikari yang berlokasi di Tangerang. Latar belakang utama pembuatan bata ekologis di Sekolah Hikari pada awalnya tidak ditunjukkan untuk mencapai efisiensi limbah konstruksi maupun penerapan sistem modular, melainkan sebagai upaya pemanfaatan tanah sisa pembangunan di sekitar lokasi sekolah. Penggunaan bata ekologis dari tanah lokal telah diterapkan sejak pembangunan tahap kedua di tahun 2011.

Hasil wawancara dan observasi menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi yang lebih luas. Bentuk bata yang terstandarisasi serta metode pemasangannya yang lebih praktis memungkinkan pengurangan limbah konstruksi secara signifikan dan membuka peluang penerapan konstruksi tanpa struktur konvensional (kolom beton dan tulangan), yang umumnya membutuhkan penggunaan semen dalam jumlah besar. Bata ekologis ini pun dinilai mengurangi emisi karbon karena proses produksinya tanpa pembakaran.

Observasi terhadap Sekolah Hikari memberikan wawasan luas mengenai komposisi material, tahapan produksi *in-situ*, sistem modular, serta performa struktural material ini setelah digunakan selama lebih dari satu dekade. Temuan tersebut menjadi dasar bagi penelitian ini untuk meninjau bata ekologis tidak hanya sebagai solusi pemanfaatan tanah sisa, tetapi juga sebagai material yang mendukung pendekatan ekologis dan sistem modular dalam praktik konstruksi.

Oleh karena itu, tujuan dari artikel ini adalah untuk mengevaluasi keunggulan ekologis bata melalui analisis perhitungan sederhana kebutuhan semen dan penggunaan bahan baku lokal, serta menganalisis sistem modular dan efisiensi konstruksi dari bata ekologis tanah lokal.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode kualitatif deskriptif dengan pendekatan studi kasus pada bangunan Sekolah Hikari. Metode ini digunakan untuk memahami penerapan bata

ekologi berbahan tanah lokal berdasarkan kondisi nyata di lapangan, terutama terkait proses produksi, sistem modular, efisiensi material, serta performa fisik material setelah digunakan dalam jangka panjang.

Tahapan penelitian dilakukan melalui empat tahap. Tahap pertama adalah studi literatur mengenai bata ekologi, *compressed earth block*, sistem *interlocking*, konstruksi modular, dan prinsip material berkelanjutan. Tahap kedua adalah pengumpulan data lapangan melalui observasi, dokumentasi, dan wawancara. Observasi dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi fisik bata ekologi, sistem pemasangan, dimensi modul, serta jenis kerusakan yang muncul. Dokumentasi digunakan untuk merekam bentuk bata, detail teknis, proses produksi, pola susunan, dan kondisi eksisting bangunan. Wawancara dilakukan dengan ketua tim pelaksana produksi bata ekologi untuk memperoleh informasi mengenai latar belakang penggunaan material, komposisi campuran, proses produksi, teknik pemasangan, pemeliharaan, dan kinerja material.

Tahap ketiga adalah analisis data secara deskriptif kualitatif melalui reduksi data, pengelompokan temuan, dan penarikan kesimpulan. Data wawancara dikelompokkan berdasarkan tema utama, yaitu latar belakang penggunaan bata ekologi, karakteristik material, proses produksi, sistem pemasangan, kinerja material, dan pemeliharaan. Data observasi dan dokumentasi dianalisis secara visual untuk melihat pola penggunaan bata, sistem modular, serta jenis dan tingkat kerusakan. Selanjutnya, temuan lapangan dibandingkan dengan literatur untuk menilai keunggulan ekologis, efisiensi konstruksi, dan performa modular bata ekologis. Tahap keempat adalah penyusunan kesimpulan dan rekomendasi berdasarkan hasil analisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penerapan bata ekologis pada Sekolah Hikari memperlihatkan keterkaitan antara komposisi material, metode produksi, sistem modular, dan performa jangka panjang sebagai pendukung konstruksi berkelanjutan. Penggunaan bata ekologis sejak tahap pembangunan kedua pada tahun 2011

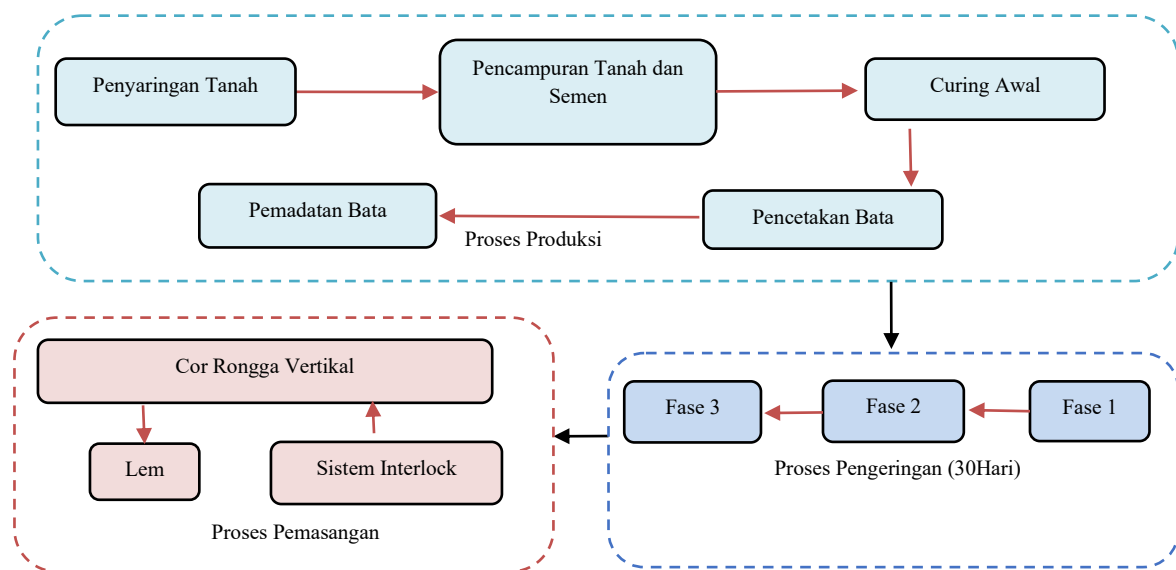
didasarkan pada prinsip efisiensi sumber daya dengan memanfaatkan tanah lokal sebagai agregat utama. Penggunaan tanah lempung atau tanah merah hasil galian perataan tapak mendukung konsep *zero waste* dengan menghilangkan kebutuhan transportasi dan pembuangan material. Strategi ini selaras dengan prinsip arsitektur tanah yang menekankan pemanfaatan material lokal, pengurangan jejak karbon, serta pengurangan limbah konstruksi.

3.1 Komposisi Material dan Produksi In-Situ Bata Ekologis

Bahan baku utama dari pembuatan bata ekologis terdiri dari tanah, semen, dan air, dengan proporsi yang disesuaikan dengan iklim dan kelembapan tanah setempat pada kondisi tropis lembap. Sekolah Hikari menggunakan tanah sebagai material utama yang diperoleh langsung dari lokasi tapak. Narasumber mengidentifikasi bahwa jenis tanah tidak menjadi hambatan kritis selama komposisi campuran disesuaikan dengan karakteristik fisik tanah yang tersedia. Dalam proses produksinya, semen ditambahkan sebagai material penstabilisasi campuran, dengan rasio ideal antara tanah dan semen berkisar pada perbandingan volume 9-11 : 1.

Penambahan air menjadi faktor krusial dalam adaptasi terhadap kondisi kelembapan tropis dan dilakukan secara bertahap melalui teknik penyemprotan untuk mengontrol kandungan air adukan, mencegah kejenuhan, serta memungkinkan penyesuaian proporsi air terhadap kondisi cuaca. Jumlah air dapat dikurangi pada musim hujan atau pada lingkungan dengan tingkat kelembapan tinggi.

Seluruh proses produksi bata dilakukan secara *in-situ* tanpa fasilitas pabrikasi. Proses ini memanfaatkan tanah hasil galian dan tidak melibatkan pembakaran, sehingga menjadikannya material rendah karbon yang hanya bergantung pada energi angin dan matahari untuk pengeringan, selaras dengan prinsip bangunan hijau. Proses produksi meliputi tiga tahap utama, yaitu persiapan material, pencetakan bata, dan *curing* (Gambar 1.).



Gambar 1. Proses Produksi Bata Ekologis

Pada tahap persiapan, dilakukan penyaringan tanah dengan jaring berukuran tertentu dan digiling hingga mencapai tingkat kehalusan yang diperlukan. Tanah kemudian dicampur secara homogen dengan semen sesuai rasio campuran dengan menambahkan air melalui penyemprotan. Campuran tersebut dimasukkan ke dalam mesin cetak bertekanan tinggi untuk menghasilkan bata *interlocking* dengan dua rongga vertikal. Adukan basah dimasukkan pada tinggi awal 15 cm kemudian dipres hingga ketebalan akhir 7,5 cm. Kendala teknis sering muncul pada tahap ini berupa retakan awal yang umumnya disebabkan oleh kadar air terlalu rendah.

Proses *curing* dilakukan secara alami selama ± 30 hari dalam tiga fase untuk mencegah penguapan air yang terlalu cepat. Bata yang baru dicetak ditempatkan pada area teduh selama tujuh hari dan ditutup dengan terpal, kemudian dipaparkan pada udara bebas selama tujuh hari berikutnya, sebelum akhirnya dijemur langsung di bawah sinar matahari hingga mencapai kekerasan akhir. Bata yang mengalami kerusakan selama proses *curing* diproduksi ulang, sedangkan bata yang

memenuhi standar struktural dipasang secara bertumpuk dengan menyelaraskan rongga sehingga membentuk sistem *interlocking* dan sambungan diberi perekat tipis (semen atau lem) sebagai penguatan tambahan. Dokumentasi proses produksi dapat dilihat pada Gambar 2.

Implementasi metode produksi ini menunjukkan penerapan prinsip keseimbangan ekologis dan keberlanjutan pada Sekolah Hikari. Pemanfaatan tanah lokal secara langsung mendukung konsep *zero waste* dengan mengeliminasi limbah material hasil perataan tapak. Secara logistik, pendekatan ini menghilangkan kebutuhan transportasi material eksternal, meniadakan biaya pengiriman dan pembuangan, serta mengurangi emisi karbon dari kendaraan operasional. Praktik tersebut sejalan dengan teori *Earthen Architecture* yang menekankan ketersediaan material lokal, jejak karbon rendah, dan minim limbah konstruksi (Mileto & Vegas, 2018; Rethinking The Future, 2023).



Gambar 2. Proses Produksi Bata Ekologis (a) Proses Penyaringan Tanah, (b) Proses Pencampuran Bahan Baku, (c) Mesin Pencetakan, (d) Cetakan untuk Memadatkan Bata Ekologis, (e) Proses Pemasangan Tahap Sloof, dan (f) Proses Pemasangan dengan Tulangan.

Sumber: Sekolah Hikari, 2011

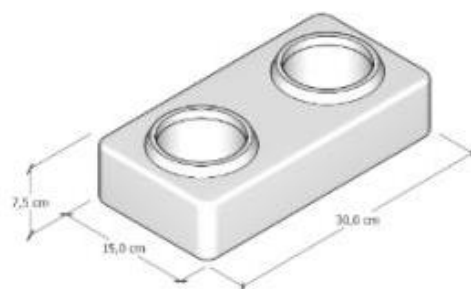
Penggunaan semen sebagai stabilisator memungkinkan proses *curing* pada suhu ruang, bukan melalui pembakaran, sehingga mendukung pengurangan emisi karbon. Penyesuaian rasio tanah:semen sebesar 9-11:1, bersama teknik penyemprotan air yang terkontrol, menunjukkan fleksibilitas adaptasi material terhadap kondisi kelembapan tropis sekaligus menjaga kualitas struktural tanpa mengorbankan prinsip ekologis. Fleksibilitas ini memungkinkan material untuk merespons variasi karakteristik tanah lokal dan memperluas potensi penerapannya di berbagai lokasi proyek.

Penggunaan semen sebagai stabilisator pada bata ekologis juga berperan dalam meningkatkan kekuatan, kohesi, dan ketahanan material terhadap kelembapan. Valenzuela dkk. (2024) menjelaskan bahwa stabilisator dapat meningkatkan kohesi campuran, menurunkan permeabilitas, serta memperbaiki kuat tekan pada *compressed earth block*. Dengan demikian, rasio tanah dan semen yang digunakan di Sekolah Hikari menunjukkan keseimbangan antara kebutuhan teknis material dan prinsip ekologis, karena semen digunakan secara terbatas untuk menjaga kinerja bata tanpa menghilangkan karakter tanah sebagai bahan utama.

3.2 Geometri Modular, Kinerja Struktural, serta Efisiensi Pemasangan Bata Ekologis

Bata ekologis yang digunakan pada Sekolah Hikari telah mengadopsi sistem modular dan sambungan *interlocking*. Dimensi bata adalah 30 cm x 15 cm x 10 cm dengan rasio 2:1, yang memungkinkan fleksibilitas konfigurasi tanpa memerlukan pemotongan unit.

Bentuk geometris bata merupakan persegi panjang dengan dua rongga vertikal berbentuk tabung berdiameter 3,5 cm dengan jarak 1,5 cm dari sisi luar bata dan jarak antar-lubang 6 cm (Gambar 3).



Gambar 3. Bentuk Bata Ekologis

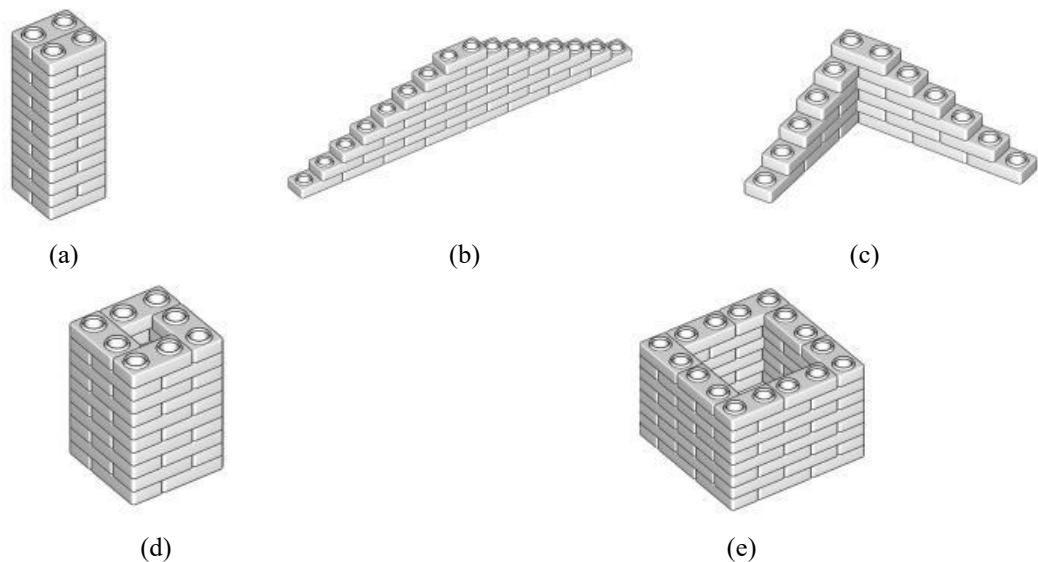
Rongga tersebut memiliki beberapa fungsi, yang pertama adalah sebagai ruang termoakustik yang mengendalikan perpindahan panas serta meningkatkan peredaman suara (Bakam dkk., 2023; Han dkk., 2020); dan yang kedua adalah instalasi pipa air kabel listrik

tanpa perlu pembobokan tambahan setelah dinding berdiri.

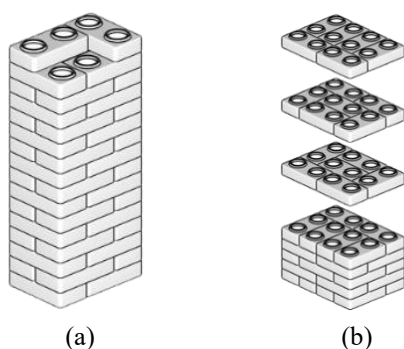
Keberadaan rongga vertikal pada bata juga memperkuat fungsi teknis material. Bakam dkk. (2023) menunjukkan bahwa *interlocking compressed stabilized earth blocks* memiliki performa akustik yang baik, sedangkan Mohamed dkk. (2024) menjelaskan bahwa *hollow interlocking compressed stabilized earth brick masonry* dapat mendukung kinerja struktural, akustik, dan termal pada bangunan eksperimental. Jika dikaitkan dengan Sekolah Hikari, rongga vertikal pada bata tidak hanya berfungsi sebagai jalur instalasi, tetapi juga

berpotensi mendukung kenyamanan ruang melalui karakter termo-akustik material.

Selain dua fungsi tersebut, fungsi lainnya adalah sebagai saluran kontinu ketika bata disusun secara bertumpuk, sehingga dapat difungsikan sebagai kolom penopang dengan penambahan tulangan dan pengecoran di dalamnya. Maka, dinding tidak lagi hanya berfungsi sebagai elemen pembatas ruang, melainkan sekaligus sebagai elemen struktural. Sistem *interlocking* (Gambar 4) ini dapat meminimalkan kebutuhan bekisting kayu konvensional dan mempercepat proses konstruksi karena dinding bertindak sebagai bekisting permanen.



Gambar 4. Elemen Dinding dan Komponen Struktural Bata Ekologis (a) Kolom Solid, (b) Dinding Lurus, (c) Sudut Dinding, (d) Kolom Isi 45x45 cm, dan (e) Kolom Isi 75x75 cm



Gambar 5. Rekomendasi Tumpukan Bata Ekologis untuk Elemen Kolom dengan Ukuran (a) 30 cm x 45 cm dan (b) 60 cm x 45 cm

Lalu, hasil pengamatan menunjukkan bahwa sistem modular ini dapat membentuk variasi

kolom. Selain berbentuk kolom persegi, memungkinkan untuk kolom berbentuk persegi panjang dengan dimensi 30 cm x 45 cm (Gambar 5a) serta 60 cm x 45 cm (Gambar 5b). Modul 30 cm x 45 cm dapat dibentuk dengan penyusunan bata secara selang-seling antara posisi membujur dan melintang pada setiap lapisan (*course*), mengikuti rasio modular 1:1,5.

Sementara itu, modul 60 cm x 45 cm menggunakan susunan bersilangan bertumpuk dengan rasio 1,5:2 dan pengulangan sistem *interlocking* setiap empat tingkat. Penyusunan ini dapat mendistribusi beban secara lebih merata tanpa menghilangkan prinsip modularitas. Namun, meskipun secara

konseptual sistem ini dapat mengefisiensi struktural, masih perlu dilakukan analisis struktural lanjutan untuk menjamin keamanan dan stabilitas bangunan.

Hal ini sejalan dengan Mohamed dkk. (2024) yang menunjukkan bahwa sistem ICSEB dapat menjadi alternatif dinding yang kuat dan cepat dibangun, tetapi performa strukturalnya tetap dipengaruhi oleh detail sambungan, distribusi beban, stabilisator, serta metode penguatan. Oleh karena itu, variasi modul kolom pada Sekolah Hikari dapat dipahami sebagai potensi desain dan konstruksi, tetapi masih memerlukan pengujian struktural lanjutan, terutama terkait kuat tekan, kuat geser, perilaku lateral, dan pengaruh *grouting* pada rongga vertikal.

Selain itu, seluruh proses produksi, pengeringan, hingga pemasangan dilakukan oleh tenaga kerja lokal di sekitar Sekolah Hikari. Hal ini menunjukkan, bahwa sistem modular ini tidak hanya efisien secara teknis tetapi juga adaptif terhadap konteks sosial dan sumber daya setempat.

Keunggulan lain dari sistem ini dapat terlihat pada kasus pemindahan bangunan toilet (Gambar 6 dan 7). Peralihan fungsi ini tidak membongkar dinding secara destruktif, melainkan dilepas dan dipasang kembali di lokasi baru dengan sistem bongkar-pasang bata. Dokumentasi sebelum dan sesudah pemindahan menunjukkan bahwa material bata dapat digunakan kembali tanpa adanya kerusakan yang fatal. Hal ini membuktikan bahwa bata ekologis dapat meminimalkan limbah konstruksi serta menekan waktu pembangunan ulang.



Gambar 6. Toilet Sebelum Dipindahkan
Sumber: Sekolah Hikari, 2011.



Gambar 7. Toilet Setelah Dipindahkan

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa sistem modular *interlocking* pada bata ekologis menghasilkan dua hal, yaitu: efisiensi struktural melalui fungsi dinding dan kolom dalam satu sistem, serta efisiensi pelaksanaan melalui kemudahan pemasangan dan potensi bongkar pasang bata.

3.3 Perhitungan Sederhana Kebutuhan Semen

Untuk membandingkan kebutuhan semen antara penggunaan bata ekologis dan bata konvensional, dilakukan dengan beberapa tahap perhitungan. Tahap pertama adalah menghitung volume kolom serta kebutuhan semen untuk pengecoran apabila menggunakan bata konvensional. Tahap kedua, menghitung volume satuan bata ekologis beserta kebutuhan semen yang diperlukan.

Untuk menghitung volume kolom, diambil asumsi dimensi kolom ($p \times \ell \times t$) adalah 30 cm x 30 cm x 286 cm. Kemudian, kebutuhan semen untuk pengecoran kolom dihitung berdasarkan komposisi adukan beton yang umum digunakan, yaitu 1: 2: 3 (semen: pasir: kerikil). Perbandingan adukan tersebut kemudian dikalikan dengan hasil volume kolom sehingga diperoleh total volume adukan. Hasil perhitungan dikonversi menjadi massa semen dengan menggunakan asumsi densitas semen sebesar 1440 kg/m³.

Untuk menghitung kebutuhan semen pada penggunaan kolom bata ekologis, terlebih dahulu perlu perhitungan volume satuan bata ekologis sebelum proses pengepresan, termasuk juga perhitungan volume dua lubang yang terdapat pada bata tersebut. Dari hasil perhitungan ini, volume satuan bata dapat

diperoleh, sehingga perhitungan volume semen per bata dapat ditentukan.

Kemudian, estimasi kebutuhan semen untuk kolom berdimensi 30 cm x 30 cm x 286 cm dilakukan dengan mempertimbangkan tinggi bata setelah proses pengepresan. Asumsi tinggi bangunan yang diperlukan, serta jumlah bata

dalam satu tumpukan pula perlu diketahui. Tahapan ini memungkinkan penentuan total kebutuhan semen berdasarkan jumlah bata ekologis yang terpasang dalam struktur kolom.

Kebutuhan semen dengan menggunakan bata ekologis lebih efisien dibandingkan dengan metode konvensional (Tabel 1).

Tabel 1. Perhitungan Sederhana Kebutuhan Semen Metodebata Ekologis dan Bata Konvensional

Metode Konvensional	Bata Ekologis
Volume Kolom Cor = 30 x 30 x 286 = 0,3 x 0,3 x 2,86 = 0,25674 m ³	Volume Satuan Bata = Bata pra press – 2 lubang = 6750 – 1701,4875 = 5.048,5125 = 0,0050485125 m ³
Volume Semen = $\frac{1}{6}$ x 0,25674 = 0,0429 m ³	Volume Semen per Bata = v.satuan bata x $\frac{1}{12}$ = 0,000420708375 m ³
Kebutuhan Semen Kolom Cor Tinggi 286 cm: = v.semen x dentitas semen = 0,0429 x 1440 = 61,776 kg	Total Kebutuhan Semen 88 Bata: = 88 bata x berat semen per bata = 88 x 0,605845 = 53,312292 kg

Analisis perhitungan bermula dari pengukuran dimensi bata yang belum melalui proses pengepresan, yang menghasilkan volume awal 6.750 cm, tetapi kemudian volume ini dikoreksi dengan mengurangi volume dua rongga vertikal yang terdapat pada bata, yang menghasilkan volume bata sebesar 5.048,5125 cm atau setara dengan 0,0050485125 m³.

Kemudian, berdasarkan volume bata ini kebutuhan semen dapat dihitung. Menggunakan perbandingan adukan bata 12: 1 (tanah: semen), volume semen yang diperlukan per-unit bata adalah 0,000420708375 m³. Kemudian, volume semen ini dikalikan dengan asumsi identitas semen, yang menghasilkan bahwa dalam satu unit bata ekologis hanya dibutuhkan 0,6058215 kg semen.

Selepas itu, dengan asumsi tinggi bangunan 286 cm, maka dibutuhkan 44 tumpukan bata, yang berarti 88 bata dibutuhkan guna membuat kolom modular. Setelah mengalikan jumlah total 88 bata dengan berat semen per-unit, total kebutuhan semen untuk bata ekologis adalah 53,312292 kg. Hasil angka ini kemudian dikomparasikan dengan asumsi kebutuhan semen pada kolom cor beton standar, yaitu 61,776 kg. Dari perbandingan ini, lalu

diperoleh selisih penghematan sebesar 8,464 kg semen.

Maka, penggunaan kolom yang berbahan material bata ekologis dapat mengurangi kebutuhan penggunaan volume semen sebesar 8,464 kg dibandingkan dengan menggunakan metode konstruksi kolom cor beton konvensional untuk tinggi vertikal yang sama. Temuan ini sejalan dengan gagasan *compressed ecological brick* sebagai material rendah dampak pencemaran lingkungan karena komposisi utamanya tetap berupa tanah, sementara semen digunakan sebagai stabilisator dalam jumlah terbatas. Junior dkk. (2024) menyebutkan bahwa *compressed ecological brick* berpotensi mendukung praktik konstruksi berkelanjutan karena memiliki efisiensi energi dan dampak lingkungan yang lebih rendah. Dengan demikian, penghematan semen pada kasus Sekolah Hikari tidak hanya bernilai teknis, tetapi juga memperkuat argumen ekologis karena semen merupakan salah satu material konstruksi dengan kontribusi emisi karbon yang signifikan.

Namun demikian, ada beberapa aspek yang masih perlu didiskusikan dan perlu dikritisi, yaitu analisis ini belum mempertimbangkan

kekuatan struktural dan kebutuhan tulangan untuk membuat kolom menggunakan bata ekologis. Kolom bata ekologis perlu semen *grouting* yang diisi ke dalam lubang vertikal untuk meningkatkan kekuatan tekan dan lateralnya, bila *step* ini tidak dilakukan, artikel ini belum menghitung kekuatan strukturalnya dan penghematan waktu dalam pembangunan.

Maka dari itu, meskipun temuan awal telah mengidentifikasi efisiensi dalam hal material, penelitian dan pengujian lebih lanjut, khususnya mengenai kekuatan uji struktural (seperti, pengujian tekan dan geser) dari kolom bata ekologis yang tidak di *grouting*, atau yang sudah di *grouting* sangat diperlukan.

3.4. Observasi Kerusakan Bata ekologis

Hasil observasi terhadap kondisi fisik bangunan dengan material bata ekologis menunjukkan adanya beberapa jenis kerusakan yang dapat diklasifikasikan ke dalam kategori retak, erosi, dan lumut. Kerusakan retak umumnya ditemukan pada bagian dinding yang memiliki intensitas aktivitas tinggi. Sementara itu, jenis kerusakan yang paling dominan pada material bata ekologis adalah erosi permukaan, yang terutama disebabkan oleh aktivitas pengguna. Mengingat pengguna bangunan di Sekolah Hikari didominasi oleh anak-anak, erosi ini banyak dipengaruhi oleh aktivitas mereka. Erosi terjadi akibat kontak fisik berulang, seperti dinding yang tidak sengaja tertendang, tergores, atau terbentur saat aktivitas bermain, sehingga menyebabkan pengikisan pada lapisan permukaan bata.

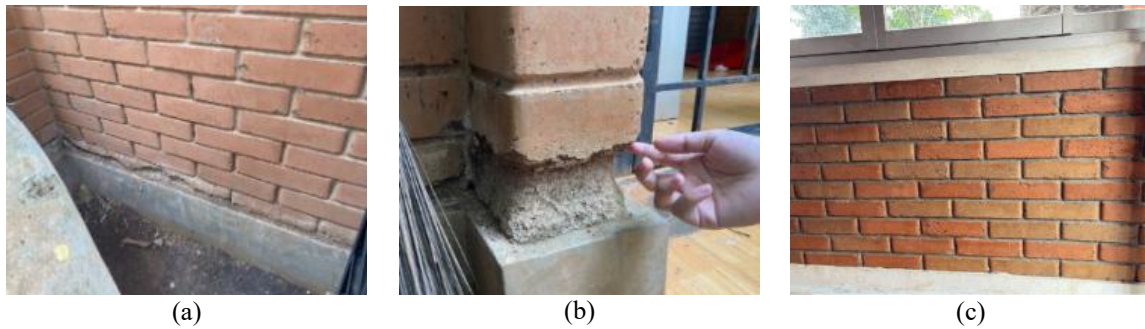
Di luar faktor aktivitas pengguna, pengaruh kondisi alam seperti paparan hujan dan panas matahari terhadap tingkat kerusakan relatif tidak signifikan. Dampak lingkungan yang teramati lebih berupa kelembapan, yang umumnya jarang ditemukan pada fasad utama bangunan dan lebih sering muncul pada area yang minim paparan sinar matahari, seperti bagian belakang bangunan. Hal ini

mengindikasikan bahwa bata ekologis memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap pengaruh cuaca, namun tetap rentan terhadap beban mekanis akibat aktivitas manusia secara langsung.

Berdasarkan observasi langsung pada bangunan Sekolah Hikari, ditemukan beberapa jenis kerusakan pada material bata ekologis dengan karakteristik berbeda di tiap lokasi. Kerusakan tersebut diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu erosi, retak, dan lumut.

Kerusakan berupa erosi permukaan merupakan jenis kerusakan yang paling banyak ditemukan, terutama pada bagian bawah dinding dan kolom yang berada di area dengan aktivitas tinggi. Pada bagian sisi kanan bawah bangunan kelas 5A, permukaan bata mengalami pengeroposan dengan tingkat kerusakan sedang (Gambar 7a). Kerusakan ini diduga terjadi akibat aktivitas anak-anak, seperti benturan, tendangan, atau gesekan berulang pada permukaan dinding. Kondisi serupa juga ditemukan pada struktur utama atau kolom di dekat pintu masuk kelas 5A (Gambar 7b), tetapi dengan tingkat kerusakan yang lebih tinggi. Pada titik ini, erosi telah mencapai bagian cor-an sehingga bentuk visual bata mulai tidak terlihat jelas. Hal ini menunjukkan bahwa area sirkulasi dan titik yang sering dilalui pengguna memiliki risiko kerusakan mekanis yang lebih besar.

Erosi juga ditemukan pada dinding bagian dalam ruang musik (Gambar 7c), namun tingkat kerusakannya relatif rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa bata ekologis yang berada di ruang dalam cenderung lebih terlindungi karena tidak terkena paparan langsung hujan dan panas matahari. Selain itu, intensitas benturan pada ruang dalam relatif lebih rendah dibandingkan dengan area luar atau area sirkulasi utama.



Gambar 7. Erosi pada (a) Dinding Bagian Luar Kelas 5A, (b) Kolom Bagian Luar Kelas 5A, dan (c) Dinding Bagian Dalam Ruang Musik

Jenis kerusakan kedua adalah retak, yang ditemukan pada elemen kolom dan dinding di area kelas 5A. Retak pada kolom bagian luar kelas 5A (Gambar 8a) tergolong rendah dan terutama muncul pada bagian perekat berupa material semen. Sementara itu, retak pada dinding kelas 5A (Gambar 8b) memiliki tingkat kerusakan sedang dan terlihat telah mengalami perbaikan atau *maintenance*.



(a)



(b)

Gambar 8. Keretakan pada (a) Kolom Bagian Luar Kelas 5A dan (b) Dinding Bagian Luar Kelas 5A

Munculnya retak pada area tersebut berkaitan dengan intensitas aktivitas pengguna yang tinggi. Dengan demikian, retak yang terjadi tidak serta-merta menunjukkan kegagalan struktural bata, tetapi lebih berkaitan dengan beban mekanis, aktivitas harian, serta perlakuan terhadap elemen bangunan.

Jenis kerusakan ketiga adalah pertumbuhan lumut, yang umumnya ditemukan pada area eksterior dengan tingkat kelembapan tinggi. Pada sudut dinding luar ruang IEPF (Gambar 9a), lumut muncul cukup parah dengan warna kecokelatan, sehingga dikategorikan sebagai kerusakan tingkat tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa area yang lembap dan minim paparan sinar matahari berpotensi mempercepat pertumbuhan lumut pada permukaan bata ekologi.

Kerusakan lumut tingkat tinggi juga ditemukan pada bata di area taman bermain (Gambar 9b). Area ini terkena paparan langsung sinar matahari dan air hujan, sehingga terjadi perubahan warna permukaan bata yang mengarah pada indikasi lumut hitam. Sementara itu, pada *sculpture* selamat datang (Gambar 9c) di area bekas pintu masuk belakang, lumut ditemukan hampir pada seluruh permukaan dinding dengan tingkat kerusakan tinggi. Kondisi ini dipengaruhi oleh paparan hujan, panas matahari, serta keberadaan pohon di atasnya yang menyebabkan area tersebut menjadi lebih lembap dan kurang mendapatkan pengeringan alami secara optimal.



Gambar 9. Pertumbuhan Lumut pada (a) Dinding Bagian Luar Ruang IEPF, (b) Bata pada Dinding Taman Bermain, dan (c) Dinding *Sculpture* Selamat Datang

Hasil observasi lapangan membuktikan bahwa kerusakan bata ekologis di Sekolah Hikari memiliki keterkaitan antara aktivitas pengguna, kondisi lingkungan mikro, serta perlakuan *finishing* material terhadap tingkat degradasi permukaan. Erosi mekanis akibat benturan berulang mendominasi kerusakan pada bagian bawah kolom dan dinding di area sirkulasi utama, yang pada beberapa titik telah mencapai lapisan cor. Retak juga ditemukan pada elemen struktural dan non-struktural di area dengan intensitas penggunaan tinggi. Sementara itu, pertumbuhan lumut teridentifikasi pada dinding luar dengan kelembapan tinggi akibat paparan air hujan langsung atau vegetasi di sekitarnya, sedangkan bata pada ruang dalam tanpa *coating* menunjukkan tingkat kerusakan yang relatif rendah.

Temuan kerusakan tersebut sejalan dengan kajian Valenzuela dkk. (2024) yang menjelaskan bahwa durabilitas *compressed earth block* dipengaruhi oleh komposisi material, stabilisasi, porositas, dan kemampuan material menghadapi kelembapan. Junior dkk. (2024) juga menegaskan bahwa aspek durabilitas dan performa termal menjadi bagian penting dalam pengembangan *compressed earth block* sebagai material berkelanjutan. Dengan demikian, kerusakan pada bata ekologis di Sekolah Hikari tidak cukup dibaca sebagai kelemahan material semata, tetapi sebagai hasil interaksi antara material, pengguna, iklim tropis lembap, dan perlakuan *finishing*.

Oleh karena itu, diperlukan pertimbangan desain tambahan pada bangunan pendidikan dengan aktivitas tinggi, seperti proteksi pada zona rawan dampak di area sirkulasi. Kerusakan

akibat aktivitas mekanis pengguna tersebut dapat dicegah melalui implikasi desain, seperti penambahan *plint protection* atau *buffer* material pada bagian bawah kolom & dinding area sirkulasi. Sedangkan, pengendalian kelembapan pada area eksterior untuk meminimalkan potensi degradasi jangka panjang telah diupayakan oleh pihak sekolah, dengan cara menambahkan *coating* pada lapisan luar dinding bata ekologis. Dinding yang sebelumnya pernah mengalami keretakan juga telah diberi solusi desain, dengan melakukan penambalan pada area retak menggunakan campuran bata ekologis dalam kondisi basah.

4. KESIMPULAN

Bata ekologis memiliki keunggulan dalam hal efisiensi ekologis dan konstruksi melalui pemanfaatan bahan baku lokal, pengurangan penggunaan semen, serta penerapan sistem modular yang fleksibel. Proses produksi tanpa pembakaran dan penggunaan tanah setempat menjadikan bata ini material rendah karbon. Hasil perhitungan sederhana menunjukkan bahwa penggunaan bata ekologis mampu mengurangi kebutuhan semen dibanding menggunakan kolom beton cor konvensional pada dimensi dan tinggi yang sama, sehingga dapat menghemat sumber daya.

Bata ekologis terhadap efisiensi konstruksi dalam aspek (modular, material, bongkar pasang). Ditinjau dari hasil analisis bangunan Sekolah Hikari, bata ekologis berbahan dasar tanah lokal menunjukkan efisiensi konstruksi yang baik mulai dari aspek modularitas, material, sistem bongkar-pasang dan *finishing*. Dimensi bata yang terstandarisasi meningkatkan kecepatan pemasangan, serta mengurangi limbah material. Sistem

pemasangan *interlocking* memungkinkan proses bongkar-pasang tanpa kerusakan signifikan, sedangkan karakteristik bata sebagai *exposed* material mengurangi kebutuhan *finishing* tambahan.

Keberadaan rongga vertikal pada bata ekologis tidak hanya berfungsi sebagai elemen term-akustik dan jalur instalasi, tetapi juga memungkinkan pembentukan kolom penopang melalui sistem pengecoran di dalam bata, sehingga dapat mengurangi kebutuhan terhadap bekisting. Temuan ini menunjukkan bahwa bata ekologis tidak terbatas pada modul kolom persegi standar, melainkan memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi berbagai bentuk modul struktur lainnya, seperti kolom persegi panjang atau konfigurasi modular baru melalui variasi pola susunan bata. Dengan demikian, sistem modular bata ekologis menunjukkan kapasitas adaptif yang luas untuk dikembangkan sebagai sistem konstruksi fleksibel, selama penerapannya tetap didukung oleh analisis struktural yang memadai.

Sebagai solusi konstruksi yang adaptif dan efisien, sistem modular bata ekologis dengan mekanisme *interlocking* tidak hanya terbatas pada aplikasi dinding pengisi, tetapi juga berpotensi diterapkan pada elemen struktural utama melalui standarisasi modul kolom dan dinding penahan beban. Dengan memanfaatkan dimensi unit $30 \times 15 \times 10$ cm, sistem ini mampu menghasilkan berbagai variasi modul tumpukan, mulai dari dinding tunggal hingga kolom dengan beragam rasio dimensi. Di luar konfigurasi standar, unit ini memungkinkan pengembangan modul kolom persegi panjang, seperti $30 \text{ cm} \times 45 \text{ cm}$ dan $45 \times 60 \text{ cm}$, maupun dimensi lain melalui manipulasi pola tumpukan tanpa memerlukan pemotongan material. Sinkronisasi antara pemanfaatan material lokal dan logika modularitas ini menjadi strategi penting dalam mewujudkan sistem infrastruktur yang berkelanjutan.

Berdasarkan hasil observasi lapangan pada bangunan Sekolah Hikari, dapat disimpulkan bahwa tingkat degradasi bata ekologis dipengaruhi secara simultan oleh intensitas aktivitas pengguna, eksposur terhadap kondisi lingkungan mikro, serta perlakuan *finishing* material pada permukaan. Kerusakan yang

dominan berupa erosi mekanis pada zona sirkulasi dan pertumbuhan lumut pada area eksterior menunjukkan bahwa performa material tidak hanya ditentukan oleh komposisi teknisnya, tetapi juga oleh relasi antara pola penggunaan ruang dan paparan lingkungan. Oleh karena itu, optimalisasi kinerja bata ekologis pada bangunan pendidikan dengan aktivitas tinggi memerlukan integrasi strategi desain preventif, seperti proteksi pada zona rawan impak serta pengendalian kelembapan melalui lapisan pelindung, guna meminimalkan potensi degradasi jangka panjang dan menjaga keberlanjutan performa material.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama (ASA) bertanggung jawab atas perancangan studi, pengumpulan, analisis, dan interpretasi data, koordinasi proses revisi hingga persetujuan akhir seluruh penulis, serta memastikan integritas dan keaslian isi artikel. Penulis koresponden/*corresponding author* (HDF) bertanggung jawab atas komunikasi dengan jurnal selama proses pengiriman, *peer-review*, dan publikasi, termasuk pemenuhan persyaratan administratif, korespondensi editorial, penyampaian tanggapan reviewer, serta distribusi informasi kepada seluruh penulis. Penulis pendamping/*co-author* (SA, ISH, U, ES, FH) berkontribusi dalam pengumpulan data, analisis, dan peninjauan literatur, serta memberikan masukan kritis terhadap draf naskah dan menyetujui versi final manuskrip untuk dipublikasikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang sebesar-besarnya atas dukungan dan pendanaan dari Yayasan Semarak Pendidikan Indonesia, Sekolah Hikari, dan Itenas Bandung. Dukungan yang murah hati ini memainkan peran penting dalam keberhasilan penyelesaian penelitian ini.

REFERENSI

- Nabi, M. A., & El-Adaway, I. H. (2020). Modular Construction: Determining Decision-Making factors and future research needs. *Journal of Management in Engineering*, 36(6).

- [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000859](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000859)
- Aggarwal, L. K., & Singh, J. (1990). Effect of Plant Fibre Extractives on Properties of Cement. *Cement and Concrete Composites*, 12(2), 103–108. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(90\)90047-2](https://doi.org/10.1016/0958-9465(90)90047-2)
- Amalia, G. N., & Aqli, W. (2024). Kajian Konsep Arsitektur Ekologi Pada Sekolah Alam Depok. *PURWARUPA Jurnal Arsitektur*, 8(2), 125. <https://doi.org/10.24853/purwarupa.8.2.125-130>
- Aminuddin, M., Suprahman, F. H. P., & Puspitasari, D. (2024). Evaluasi Ketahanan Arsitektur Dinding Polpolan yang diimplementasikan pada Hunian dengan Iklim Tropis di Indonesia. 7(1), 19–29.
- Arif, M., & Egbu, C. (2010). Making a case for offsite construction in China. *Engineering Construction & Architectural Management*, 17(6), 536–548. <https://doi.org/10.1108/09699981011090170>
- Asman, N. S. A., Bolong, N., & Mirasa, A. K. (2023). Environmental Impact Evaluation on Interlocking Compressed Earth Brick Using Life Cycle Assessment. *International Journal of GEOMATE*, 25(111), 9–15. <https://doi.org/10.21660/2023.111.3525>
- Edwards, B. (2014). *Rough Guide to Sustainability: A Design Primer*. RIBA Publishing.
- Bakam, V. A., Mbishida, M. A., & Danjuma, T. (2023). Acoustic property of interlocking compressed stabilized earth blocks: A sustainable alternative for building materials. *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, 8(2), 89–95. <https://doi.org/10.47481/jscmt.1294558>
- Bikram, A. (2020). Pemanfaatan Tanah Sekitar Sebagai Material Interlock Block. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 3(2), 50–59. <https://doi.org/10.14710/potensi.2020.9229>
- Dulal, P., & Giri, R. R. (2023). Carbon Emissions Due to Construction of Building Using Cement-Stabilized Compressed Earth Bricks and Comparison with Conventional Fired Earth Bricks. *Kathford Journal of Engineering and Management*, 3(1), 172–184. <https://doi.org/10.3126/kjem.v3i1.62890>
- Akbulut, D. E., & Alibeyoglu, R. N. (2025). Rammed earth construction: From tradition to a Sustainable future. In *Civil engineering*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1010217>
- Fernandes, J., Mateus, R., Gervásio, H., Silva, S. M., & Bragança, L. (2019). Passive Strategies Used in Southern Portugal Vernacular Rammed Earth Buildings and Their Influence in Thermal Performance. *Renewable Energy*, 142, 345–363. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.098>
- Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., & Gervásio, H. (2019). Life Cycle Analysis of Environmental Impacts of Earthen Materials in The Portuguese Context: Rammed Earth and Compressed Earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>
- Han, L. C., Mirasa, A. K. Bin, Saad, I., Bolong, N. B., Asman, N. S. A. B., Asrah, H. B., & Abdullah, E. S. R. Bin. (2020). Use of Compressed Earth Bricks/Blocks in load-bearing masonry Structural Systems: A Review. *Materials Science Forum*, 997 MSF, 9–19. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.997.9>
- Junior, A. C. P., Teixeira, E., & Mateus, R. (2024). Improving The Mechanical, Thermal and Durability Properties of Compressed Earth Blocks by Incorporating Industrial Waste and by-products: A Systematic Literature Review. *Construction and Building Materials*, 438(March), 137063. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137063>
- Kristiawan, A., Subagjo, I., Widjadja, P., & Parahyangan, U. K. (2023). Perbandingan Penggunaan Batu Bata Interlock Dengan Batu Bata Merah Terkait Efisiensi Material Dalam Suatu Bangunan. *Jurnal Arsitektur Zonasi*, 6(1), 57–70.

- <https://doi.org/10.17509/jaz.v6i3.50524>
Milad, Z., & Sungjin, K. (2020). Dynamic Modeling for Life Cycle Cost Analysis of BIM-based Construction Waste Management. *Sustainability*, 12(6), 2483. <https://doi.org/10.3390/su12062483>
- Mileto, C., & Vegas, F. (2018). Earthen Architecture: Sustainability and Heritage. *Compases. The Architecture and Interior Design International Magazine / Middle East*, 29, 36–42.
- Mohamed, N. A. G., Moustafa, A., & Darwish, E. A. (2024). Structural, Acoustical, and Thermal Evaluation of An Experimental House Built with Reinforced/Hollow Interlocking Compressed Stabilized Earth Brick-Masonry. *Journal of Building Engineering*, 86. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108790>
- Mydin, M. O., Khor, J. C., & Sani, N. M. (2014). Approaches to Construction Waste Management in Malaysia. *Advanced Green Material and Technology Symposium (AGMTS 2014), MATEC Web of Conferences*, 1014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141701014>
- Novita, C., & Afgani, J. J. (2024). Kajian Konsep Arsitektur Modular pada Rumah Sakit Pusat Pertamina Simprug, Jakarta Selatan. *PURWARUPA Jurnal Arsitektur*, 8(2), 153–160. <https://doi.org/10.24853/purwarupa.8.2.153-160>
- Oladipo, F. O., & Oni, O. J. (2012). A Review of Selected Macroeconomic Factors Impacting Building Material Prices in Developing Countries: A Case of Nigeria. *Ethiopian Journal of Environmental Studies and Management (EJESM)*, 5(2), 131–137. <https://doi.org/10.4314/ejesm.v5i2.9>
- Olsson, J. A., Hafez, H., Miller, S. A., & Scrivener, K. L. (2025). Greenhouse Gas Emissions and Decarbonization Potential of Global Fired Clay Brick Production. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08994>
- Polat, G., Damci, A., Turkoglu, H., & Gurgun, A. P. (2017). Identification of Root Causes of Construction and Demolition (C&D) Waste: The Case of Turkey. *Procedia Engineering*, 196, 948–955. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.020>
- Rethinking The Future. (2023). *Earthen Architecture: A Sustainable and Resilient Building Material. Rethinking The Future (RTF)*.
- Smith, R. E., & Timbelake, J. (2010). *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*.
- Subramanian, G. K. M., Balasubramanian, M., & Jeya Kumar, A. A. (2022). A Review on The Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Compressed Earth Blocks. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 7687–7701. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1958405>
- Tafesse, S., Girma, Y. E., & Dessalegn, E. (2022). Analysis of The Socio-economic and Environmental Impacts of Construction Waste and Management Practices. *Heliyon*, 8(February), e09169. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09169>
- Teixeira, E. R., Machado, G., De Adilson, P., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S. M., & Mateus, R. (2020). Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks. *Energies*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/en13112978>
- UCL, BPIE, UNEP CCC, I. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025: Not Just Another Brick in the Wall*.
- Valenzuela, M., Ciudad, G., C'ardenas, J. P., Medina, C., Salas, A., Onate, A., Pincheira, G., Attia, S., & Victor, T. (2024). Towards the Development of Performance-efficient Compressed Earth Blocks from Industrial and Agro-industrial by-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 194(February). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114323>
- Vision, B., Mbishida, M. A., & Danjuma, T. (2023). Acoustic Property of Interlocking Compressed Stabilized Earth Blocks : A Sustainable Alternative for Building Materials. *Journal of Sustainable Construction Material and Technologies*, 8(June), 89–95.

<https://doi.org/10.47481/jscmt.1294558>

Wang, G., Luo, T., Luo, H., Liu, R., Liu, Y., & Liu, Z. (2024). A Comprehensive Review of Building Lifecycle Carbon Emissions and Reduction Approaches. *City and Built Environment*, 1–28.

<https://doi.org/10.1007/s44213-024-00036-1>

Wu, Z., Yu, A. T., & Shen, L. (2016). Investigating The Determinants of Contractor's Construction and Demolition Waste Management Behavior in Mainland China. *Waste Management*, 60, 290–300.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.030>