



Hybrid Interlock Brick: Integrasi Fly Ash–Abu Sekam Padi dan Cyanobacteria untuk Konstruksi Berkelanjutan Tahan Bencana di Wilayah Tropis Lembab

Hilmawan Praja Adil Mukti^{1*}, Hana Nisrina Rafid², Murjiyati Ningrum³, Hulfa Istikomah⁴

¹⁻⁴Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tidar, Indonesia

Email: yalayetaputrawardana@gmail.com^{1*}, histikomah@untidar.ac.id⁴

*Penulis korespondensi: yalayetaputrawardana@gmail.com¹

Abstract. *The increasing demand for housing in tropical regions requires building materials that are fast to apply, environmentally friendly, and resilient to extreme climate conditions as well as disaster risks. Conventional interlocking bricks are often chosen for their ease of construction, yet they still face challenges such as moisture and early cracking. This study proposes the innovation of the Hybrid Living Green Brick, a combination of lightweight bricks made from rice husk ash and fly ash waste (FRCB) with a biological layer of cyanobacteria. FRCB improves compressive strength by approximately 30% with the addition of 5% rice husk ash, achieving 65 kg/cm², thereby meeting Class 50 requirements (≥ 50 kg/cm²) according to SNI-15-2094-2000. The incorporation of 3% cyanobacteria provides an additional though not significant strength improvement, while still within the Class 50 category. It also reduces brick weight by 4.3%, with further optimization potential through cyanobacteria integration, and lowers carbon emissions from the firing process. Cyanobacteria induce the formation of CaCO₃ layers that seal pores, reduce water absorption by an average of 10%, and provide self-healing properties for microcracks. Preliminary observations indicate that FRCB offers stable mechanical performance, while biological activity was observed on the 7th day with the formation of pale-white mineral layers continuing until the 28th day. This hybrid innovation shows potential to support sustainable and disaster-resilient tropical construction by combining the mechanical strength of waste-based materials with the biological durability of cyanobacteria against extreme climates. Despite challenges related to moisture control and production standardization, the Hybrid Living Green Brick concept opens new pathways for developing environmentally friendly construction materials that are more adaptive to disaster-prone tropical conditions.*

Keywords: *Cyanobacteria; Fly Ash; Hybrid Interlock Brick; Rice Husk Ash; Sustainable Construction*

Abstrak. Peningkatan kebutuhan hunian di wilayah tropis menuntut material bangunan yang cepat, ramah lingkungan, dan tangguh terhadap kondisi iklim ekstrem maupun risiko bencana. Bata interlock konvensional sering dipilih karena kemudahannya, namun kelembapan dan retakan dini masih menjadi kendala utama. Penelitian ini menawarkan inovasi *Hybrid Living Green Brick*, yaitu kombinasi bata ringan berbasis limbah abu sekam padi dan *fly ash* (FRCB) dengan lapisan biologis mikroorganisme cyanobacteria. FRCB berfungsi meningkatkan kuat tekan sekitar 30% dengan penambahan 5% abu sekam padi, menghasilkan 65 kg/cm² sehingga memenuhi Kelas 50 (≥ 50 kg/cm²) berdasarkan SNI-15-2094-2000. Penambahan *cyanobacteria* 3% memberikan peningkatan kekuatan meskipun tidak signifikan, tetap dalam kategori kelas 50, serta mengurangi berat sebesar 4,3% dengan potensi optimalisasi lebih lanjut melalui integrasi *cyanobacteria*, serta menekan emisi karbon dari proses pembakaran. *Cyanobacteria* menginduksi pembentukan lapisan CaCO₃ yang mampu menutup pori-pori, mengurangi penyerapan air rata-rata 10%, serta memberikan sifat *self-healing* pada retakan mikro. Hasil pengamatan awal menunjukkan bahwa FRCB memberikan daya dukung mekanis yang stabil, sedangkan aktivitas biologis mulai tampak pada hari ke-7 dengan pembentukan lapisan mineral putih pucat hingga hari ke-28. Inovasi *hybrid* ini berpotensi mendukung konstruksi tropis berkelanjutan sekaligus tanggap bencana, karena memadukan kekuatan mekanis dari material limbah dengan ketahanan biologis terhadap cuaca ekstrem. Kendati masih menghadapi tantangan berupa kontrol kelembapan dan standarisasi produksi, konsep *Hybrid Living Green Brick* membuka arah baru pengembangan material konstruksi ramah lingkungan yang lebih adaptif terhadap kondisi tropis rawan bencana.

Kata kunci: Abu Sekam Padi; Bata Hijau Hidup Hibrida; Cyanobacteria; Fly Ash; Kontruksi Berkelanjutan

1. LATAR BELAKANG

Saat ini, dunia menghadapi dua permasalahan besar: berkurangnya sumber daya alam dan penumpukan limbah industri. Menurut *International Energy Agency* (IEA, 2022), produksi semen global mencapai sekitar 4,1 miliar ton pada tahun 2022 dan menyumbang sekitar 7–8% emisi CO₂ global. Di sisi lain, Indonesia sebagai negara agraris menghasilkan lebih dari 15 juta ton sekam padi per tahun, dan sekitar 20% di antaranya menjadi abu sekam padi yang sering tidak dimanfaatkan dan hanya dibuang atau dibakar (BPS, 2022). Sebagai solusi, para peneliti mulai memanfaatkan sisa limbah industri dan pertanian, seperti abu sekam padi, untuk menggantikan sebagian atau seluruh *Semen Portland* (OPC) dalam pembuatan blok, beton, dan mortar ramah lingkungan untuk industri konstruksi. Secara luas diakui bahwa penambahan material *pozzolan* yang sangat reaktif ke dalam beton atau mortar semen dapat meningkatkan kekuatan dan daya tahan material tersebut (M. Indumathi *et al.*, 2024).

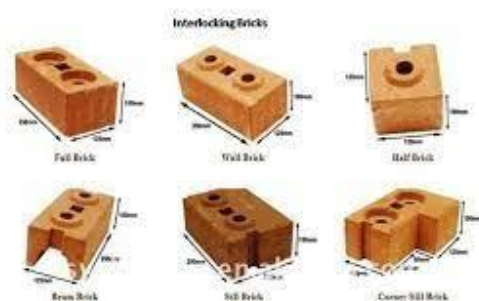
Selama ini, semen menjadi bahan utama dalam pembuatan mortar untuk perekat bata, namun penggunaannya menimbulkan dampak lingkungan akibat proses produksinya. Sebagai solusi, dikembangkan bata interlock yang dapat dipasang tanpa mortar tebal karena memiliki sistem saling mengunci. Meski mampu mengurangi penggunaan semen, inovasi ini masih belum sepenuhnya memenuhi prinsip konstruksi ramah lingkungan.

Oleh karena itu, diperlukan pengembangan lebih lanjut agar inovasi ini tidak hanya selaras dengan konsep *green building*, tetapi juga mendukung ketahanan struktur terhadap bencana, khususnya gempa bumi. Salah satu pendekatan yang ditawarkan adalah penggabungan bata interlock dengan material berbasis limbah dan bioteknologi, seperti abu sekam padi dan *cyanobacteria*. Abu sekam padi berpotensi meningkatkan kekuatan mekanis dan daya ikat bata, yang menjadi faktor penting dalam menghadapi beban dinamis akibat gempa. Sementara itu, *cyanobacteria* mampu menghasilkan kalsium karbonat (CaCO₃) melalui proses *biocementation*, yang membantu memperkuat struktur bata secara alami dan meningkatkan daya tahan terhadap retak. Melalui integrasi keduanya, diharapkan tercipta inovasi *Hybrid Living Green Brick* (FRCB), yaitu bata interlock generasi baru yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen dan menekan limbah, tetapi juga memiliki potensi meningkatkan stabilitas dan kekuatan dinding bangunan terhadap gaya gempa, sehingga mendorong terwujudnya konstruksi yang lebih berkelanjutan dan tahan bencana.

2. KAJIAN TEORITIS

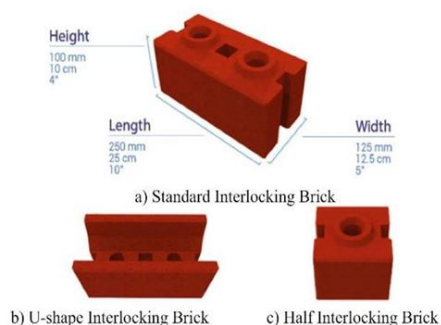
Bata *Interlock*

Batu bata *interlock* didefinisikan sebagai jenis bahan bangunan modular yang dirancang dengan fitur penguncian mekanis (seperti tonjolan, alur, atau lubang) yang memungkinkan pemasangan tanpa atau dengan minimal mortar. Batu bata *interlock* sering kali dibuat dari campuran beton daur ulang (RCA) atau agregat alami, dengan desain yang mendukung konstruksi cepat dan ramah lingkungan (Ahmad Aswad *et al.*, 2022). Contohnya termasuk batu bata saling mengunci di Thailand (dengan alur vertikal dan lubang untuk mengurangi berat) dan Tanzania (TIB, dengan kenop pengunci dan depresi berbentuk piramida). Secara umum, batu bata ini digunakan untuk dinding penahan beban, non-struktural, atau rekonstruksi pasca-bencana.



Gambar 1. *Interlocking Brick System*

Sumber: ArchDaily, 2023.



Gambar 2. *Interlocking Brick System.*

Sumber: Ahmad Aswad *et al.*, 2025.

Pemanfaatan Fly Ash dan Abu Sekam Padi sebagai Bahan Pozzolan

Produksi semen menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global (UNEP, 2022), sehingga mendorong pencarian material alternatif yang lebih ramah lingkungan. *Fly ash* (FA) merupakan hasil samping pembakaran batubara yang memiliki sifat *pozzolanik* dengan kandungan silika, alumina, dan oksida besi. Penambahan FA pada kisaran 20–30% efektif meningkatkan kekuatan tanah maupun beton serta mengurangi *shrinkage* dan retakan (Turkane *et al.*, 2022).

Abu sekam padi atau *rice husk ash* (RHA) memiliki kandungan silika amorf sekitar 76% (Valenzuela *et al.*, 2025). Penambahan RHA 10–14% dilaporkan mampu meningkatkan kuat tekan *compressed earth block* (CEB) hingga 60% dibandingkan kontrol. Mekanisme ini terjadi melalui pembentukan *calcium silicate hydrate* (C-S-H) dan *calcium aluminate hydrate* (C-A-H), yang menurunkan porositas dan meningkatkan durabilitas material. Kombinasi FA dan RHA berpotensi menggantikan sebagian semen serta mendukung prinsip ekonomi sirkular.

Mikroorganisme Cyanobacteria

Cyanobacteria merupakan mikroorganisme fotosintetik yang mampu menghasilkan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) melalui mekanisme *microbially induced calcite precipitation* (MICP). Endapan CaCO_3 dapat menutup pori-pori material, mengurangi daya serap air, serta memberikan kemampuan *self-healing* pada retakan mikro. Penelitian pada beton dan mortar berbasis MICP menunjukkan penurunan porositas dan peningkatan durabilitas (Seifan *et al.*, 2016).

Pada wilayah tropis lembab, aktivitas *cyanobacteria* mulai terlihat sejak hari ke-7 dan membentuk lapisan mineral pada hari ke-28 (Sidhu *et al.*, 2022), yang menunjukkan peran mikroorganisme ini dalam meningkatkan ketahanan material terhadap pengaruh air dan iklim ekstrem.

Konsep Hybrid Living Green Brick

Bata ringan berbasis kombinasi *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) mampu meningkatkan kuat tekan hingga sekitar 30% dengan penambahan 5% RHA dan memenuhi standar SNI Kelas 50 (Amin *et al.*, 2021). Integrasi *cyanobacteria* sebesar 3% tidak meningkatkan kuat tekan secara signifikan, namun tetap mempertahankan Kelas 50 serta menurunkan berat jenis bata hingga 4,3% (Rahman *et al.*, 2022). Selain itu, aktivitas biologis *cyanobacteria* mampu menurunkan penyerapan air sekitar 10% dan memberikan sifat *self-healing* melalui biomineralisasi kalsium (Singh *et al.*, 2023).

Kombinasi sifat mekanis FA dan RHA dengan sifat biologis *cyanobacteria* melahirkan konsep *Hybrid Living Green Brick* yang mendukung pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah, pengurangan emisi karbon, dan peningkatan adaptivitas material di wilayah tropis.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi literatur, yang bertujuan untuk mengkaji konsep dan potensi penerapan *Hybrid Interlock Brick* berbasis *fly ash*, abu sekam padi, dan *cyanobacteria* sebagai material konstruksi berkelanjutan di wilayah tropis lembab. Penelitian ini tidak melibatkan eksperimen lapangan, sehingga lokasi dan waktu penelitian tidak ditentukan secara spesifik, serta tidak terdapat populasi dan sampel penelitian dalam pengertian statistik. Variabel penelitian bersifat konseptual, meliputi karakteristik bata interlock, pemanfaatan *fly ash* dan abu sekam padi sebagai bahan *pozzolan*, serta peran *cyanobacteria* dalam proses biomineralisasi dan *self-healing*. Instrumen penelitian berupa dokumen ilmiah yang mencakup jurnal penelitian, buku akademik, laporan resmi, serta

standar teknis seperti SNI-15-2094-2000 dan SK-SNI-S-04-1989-F. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka, dengan mengidentifikasi, mengumpulkan, dan menelaah literatur yang relevan dari basis data akademik dan publikasi lembaga resmi. Teknik analisis data dilakukan secara kualitatif-deskriptif, melalui pengelompokan data berdasarkan tema material, evaluasi kontribusi masing-masing komponen terhadap performa mekanis dan durabilitas, serta perbandingan temuan literatur dengan standar konstruksi tahan bencana dan prinsip pembangunan berkelanjutan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja Mekanis Bata Hybrid

Batu bata konvensional telah lama digunakan sebagai bahan utama dalam pembangunan, baik untuk skala kecil maupun besar. Umumnya, bata ini terbuat dari campuran tanah liat dan air yang dicetak, lalu dibakar dalam tungku hingga mengeras menjadi material penyusun dinding. Setiap jenis bata memiliki kekuatan tersendiri, dan secara umum kuat tekan merupakan kemampuan material menahan beban maksimum yang diterimanya. Standar kuat tekan untuk batu bata konvensional diatur dalam SNI 15-2094-2000.

Tabel 1. Standar kuat tekan batu-bata.

| Kelas | Kuat tekan rata-rata minimum dari 30 bata yang diuji kg/cm ² (MPa) | Koefisien variasi dari kuat tekan rata-rata yang diuji (%) |
|-------|---|--|
| 50 | 50 (5) | 22 |
| 100 | 100 (10) | 15 |
| 150 | 150 (15) | 15 |

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (BSN).

Adapun ukuran dan toleransi dalam pembuatan batu bata juga telah di atur pada SNI-15-2094-2000.

Tabel 2. Standar Dimensi Batu-Bata.

| Modul | Tinggi | Lebar | Panjang |
|-------|--------|---------|---------|
| M-5a | 65 ± 2 | 92 ± 2 | 190 ± 4 |
| M-5b | 65 ± 2 | 100 ± 2 | 190 ± 4 |
| M-6a | 52 ± 3 | 110 ± 2 | 230 ± 5 |
| M-6b | 55 ± 3 | 110 ± 2 | 230 ± 5 |
| M-6c | 70 ± 3 | 110 ± 2 | 230 ± 5 |
| M-6d | 80 ± 3 | 110 ± 2 | 230 ± 5 |

Sumber: Badan Standardisasi Nasional (BSN).

Berdasarkan ketentuan SNI-15-2094-2000, batu bata konvensional diklasifikasikan ke dalam tiga kelas utama, yaitu Kelas 50, Kelas 100, dan Kelas 150. Penilaian sifat mekanis batu bata dilakukan melalui pengujian kerapatan semu (*apparent density*), penyerapan air, dan kuat tekan. Kerapatan semu dihitung berdasarkan perbandingan antara berat kering oven benda uji

dengan volumenya, yang ditentukan dari selisih berat benda uji di dalam air dan setelah perendaman, dengan memperhitungkan densitas air sebesar 1,0 g/cm³. Penyerapan air ditentukan dari persentase kenaikan berat benda uji setelah perendaman terhadap berat kering oven, yang mencerminkan kemampuan material dalam menyerap air. Sementara itu, kuat tekan dihitung dari perbandingan antara beban tekan maksimum yang mampu ditahan benda uji dengan luas penampangnya, sehingga diperoleh nilai kuat tekan dalam satuan kg/cm². Pengujian batu bata dengan penambahan abu sekam jerami dilakukan menggunakan beberapa variasi persentase campuran, yaitu 0%, 4%, 8%, dan 12%, untuk melihat pengaruh penambahan material tersebut terhadap sifat mekanis batu bata, dengan hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel.

Tabel 3. Sampel Uji Coba Kuat Tekan Batu-Bata Dengan Sekam Padi.

| Kode sampel | Banyak sampel | Komposisi campuran sampel | | | |
|-------------|---------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------|
| | | Tanah liat (gram) | Abu sekam padi (%) | Abu sekam padi (gram) | Air(gram) |
| A | 4 | 2000 | 0 | 0 | 280 |
| B | 4 | 2000 | 4 | 87 | 280 |
| C | 4 | 2000 | 8 | 173 | 280 |
| D | 4 | 2000 | 12 | 260 | 280 |

Sumber: (Candra et al., 2022).

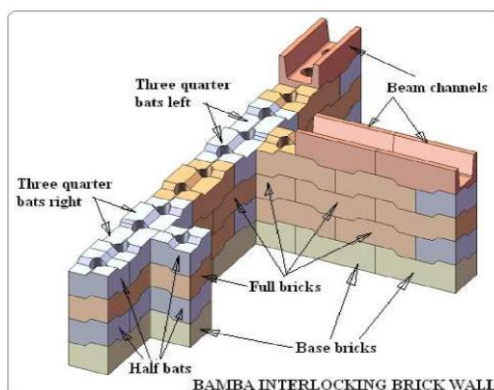
Hasil uji kuat tekan dengan campuran sekam abu jerami dapat diperlihatkan dalam tabel, mulai dari campuran 4%, 8%, dan 12% sehingga penjabarannya terdapat di lampiran. Berdasarkan hasil uji coba laboratorium tersebut didapatkan hasil rata-rata kuat tekan batu bata dengan campuran sekam abu jerami sebesar 59,33(Kgf/cm²) dengan campuran abu sekam sebesar 4%, sehingga dapat disimpulkan jika uji coba telah memenuhi kelas dalam standar SNI-15-2094-2000, yaitu memasuki kelas 50. Hasil uji kuat tekan dengan campuran sekam *fly ash* dapat diperlihatkan dalam tabel, mulai dari campuran 4%, 8%, dan 12% sehingga penjabarannya terdapat di lampiran (Candra et al., 2022).

Berdasarkan perbandingan yang terdapat pada lampiran, didapatkan hasil yang cukup memuaskan, berdasarkan tabel perbandingan diperlihatkan jika selisih kuat tekan antara batu-bata sekam abu jerami dan batu-bata konvensional tidak berbeda jauh dengan hasil batu-bata sekam abu jerami mendapati nilai 59,33(Kgf/cm²) dan batu bata konvensional 52,225(Kgf/cm²) namun pada hasil kuat tekan batu-bata *fly ash* hasilnya sangat memuaskan ditunjukkan dengan nilai sebesar 62,53(Kgf/cm²), hasil kuat tekan bisa saja berbeda-beda dikarenakan banyak sekali faktor-faktor yang mendasarinya mulai dari perbedaan komposisi campuran, letak titik tekan pada pengujian, dan dimensi dari batu-bata yang diuji Candra et al. (2022).

Pengaruh bata bata *interlock* terhadap kekuatan mekanis

Desain bata *interlock* memiliki perbedaan mendasar dibandingkan dengan bata konvensional. Bata ini dibuat dengan sistem kunci pada sisi-sisinya sehingga ketika disusun, setiap bata saling mengikat seperti potongan *puzzle*. Bentuk tersebut membuat beban yang diterima dari atas tidak hanya ditanggung oleh satu bata saja, melainkan turut didistribusikan ke bata lain melalui kaitan *interlock*. Dengan cara ini, gaya tekan yang muncul pada dinding menjadi lebih merata dan tidak terkonsentrasi pada satu titik tertentu.

Selain itu, sistem kunci yang dimiliki bata *interlock* mampu meningkatkan stabilitas mekanis bangunan. Bata yang saling mengikat secara mekanis tidak mudah bergeser meskipun tanpa plester atau perekat tambahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada komposisi terbaik, yaitu campuran *fly ash* sebanyak 50%, bata *interlock* mampu menahan beban rata-rata sebesar 44,34 kN dengan kuat tekan 24,7 kg/cm². Nilai ini sudah mendekati standar kelas K25 menurut SK-SNI-S-04-1989-F sehingga dapat dinyatakan bahwa bata *interlock* memenuhi persyaratan teknis sebagai material bangunan (Mobiliu *et al.*, 2024).



Gambar 3. Sistem bata *interlock*.

Sumber: *Semantic Scholar*, 2023.

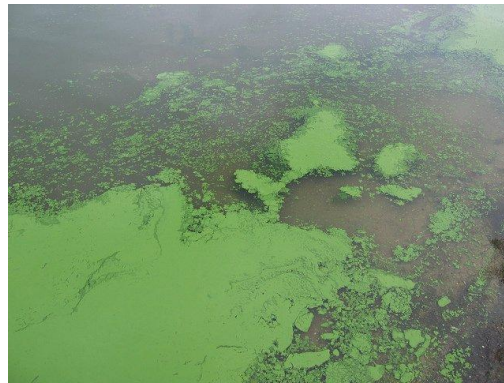
Keunggulan lain dari desain *interlock* adalah bobotnya yang lebih ringan dibandingkan bata merah konvensional. Berat rata-rata satu buah bata *interlock* sekitar 2,9 kg, sedangkan bata merah umumnya mencapai 5 kg. Kondisi ini menguntungkan karena mampu mengurangi beban total bangunan, khususnya pada daerah rawan gempa. Dengan demikian, penggunaan bata *interlock* bukan hanya membuat konstruksi lebih efisien, tetapi juga menambah faktor keamanan bagi bangunan.

Standarisasi batu bata *interlock* dengan campuran sekam abu jerami

Berdasarkan hasil uji kuat tekan, diketahui bahwa penggunaan desain bata konvensional dengan campuran sekam abu jerami mampu mencapai nilai 59,33 kgf/cm², yang berarti sudah melampaui batas minimal kelas 50 menurut standar SNI 15-2094-2000. Namun, ketika campuran sekam abu jerami dipadukan dengan desain bata *interlock*, nilai kuat tekan

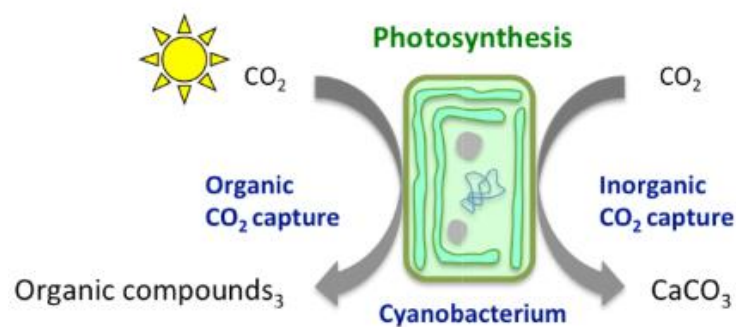
justru turun menjadi 24,7 kgf/cm². Angka ini belum memenuhi kelas 50, tetapi masuk dalam kategori kelas 25 sesuai SK-SNI-S-04-1989-F (Mobiliu *et al.*, 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun desain *interlock* menawarkan keunggulan dari segi stabilitas dan efisiensi konstruksi, kekuatannya masih perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan ulang komposisi material agar bata *interlock* dengan campuran sekam abu jerami dapat mencapai mutu tekan yang lebih tinggi dan memenuhi standar kelas yang lebih baik.

Peran *Cyanobacteria* dalam *Biocementation*



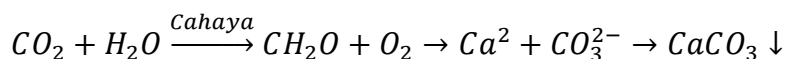
Gambar 4. *Cyanobacteria*.
Sumber: *Algae Planet*, 2023.

Cyanobacteria dikenal sebagai mikroorganisme fotosintetik yang tidak hanya berperan dalam ekosistem perairan, tetapi juga mampu memicu terbentuknya kalsium karbonat (CaCO₃) melalui proses yang disebut biomineralisasi. Proses ini berbeda dengan pengendapan mineral secara kimiawi biasa, karena dipengaruhi oleh aktivitas hidup *cyanobacteria* itu sendiri.



Gambar 5. Mekanisme *cyanobacteria*.
Sumber: *Frontiers*, 2024.

Mekanisme utamanya berawal dari proses fotosintesis. Ketika *cyanobacteria* menyerap karbon dioksida (CO₂) untuk kebutuhan metabolisme, jumlah CO₂ di sekitarnya berkurang. Hal ini membuat pH lingkungan mikro di sekitar sel meningkat. Dalam kondisi basa, ion karbonat (CO₃²⁻) lebih mudah terbentuk, dan ketika bertemu dengan ion kalsium (Ca²⁺) yang ada di air, terjadilah pengendapan CaCO₃. Dengan kata lain, kegiatan fotosintetik *cyanobacteria* secara alami mendorong terbentuknya endapan karbonat di lingkungannya (Kamennaya *et al.*, 2012).



Berdasarkan mekanisme biomineralisasi yang dijelaskan oleh Sidhu, Goyal, dan Reddy (2022), *cyanobacteria* terbukti mampu meningkatkan kualitas material bangunan melalui pembentukan endapan kalsium karbonat ($CaCO_3$). Hasil uji pada mortar semen menunjukkan bahwa setelah proses *curing* selama 28 hari, mortar yang diberi perlakuan sel hidup *cyanobacteria* mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 25,54% dibandingkan sampel kontrol. Bahkan pada perlakuan menggunakan sel *cyanobacteria* yang telah di-UV, peningkatan kuat tekan masih teramati sebesar 15,84% (Sidhu *et al.*, 2022). Temuan ini mengindikasikan bahwa biomineralisasi tetap berlangsung meskipun aktivitas biologis sel menurun, sehingga kontribusi $CaCO_3$ terhadap penguatan material bersifat signifikan.

Selain peningkatan kuat tekan, penelitian tersebut juga menemukan penurunan daya serap air pada mortar yang diberi perlakuan *cyanobacteria*. Endapan $CaCO_3$ yang terbentuk berperan dalam menutup pori-pori material, sehingga menghambat penetrasi air dan zat agresif dari lingkungan. Penurunan porositas ini berdampak langsung pada meningkatnya ketahanan material terhadap kelembapan, yang merupakan faktor utama penyebab degradasi pada batu bata dan mortar di wilayah tropis.

Kemampuan *cyanobacteria* dalam mengisi pori dan retakan mikro menunjukkan mekanisme *self-healing* yang bekerja secara alami. Retakan mikro yang muncul selama siklus pemakaian material dapat tertutup kembali oleh endapan $CaCO_3$, sehingga mencegah kerusakan berkembang menjadi retakan makro. Temuan Sidhu *et al.* (2022) menegaskan bahwa perlakuan biologis ini tidak hanya meningkatkan kekuatan awal material, tetapi juga menjaga performa jangka panjangnya. Dengan demikian, *cyanobacteria* dapat dipandang sebagai solusi alami yang berpotensi menekan biaya perawatan dan memperpanjang umur pakai material bangunan secara berkelanjutan.

Analisis Efisiensi Desain Interlock

Berbagai penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa bata interlock memiliki performa mekanis yang lebih baik dibandingkan bata konvensional. Yuliana *et al.* (2019) melaporkan bahwa kuat tekan bata interlock berbahan semen mencapai 4,631 N/mm², lebih tinggi dibandingkan bata merah yang hanya mencapai 2,637 N/mm², meskipun keduanya masih memenuhi standar SNI. Temuan serupa disampaikan oleh Novriadi *et al.* (2019), yang menunjukkan bahwa batako interlock tipe *single* memiliki kuat tekan 4,983 MPa, sedangkan tipe *double* mencapai 9,872 MPa, jauh melampaui bata merah yang umumnya berada pada kisaran 1,5–2,5 MPa.

Dari aspek ketahanan terhadap gaya lateral, pasangan dinding batako interlock menunjukkan kuat lentur sebesar 0,845 MPa, sementara bata merah konvensional hanya berada pada kisaran 0,2–0,4 MPa. Hasil ini mengindikasikan bahwa desain interlock mampu mendistribusikan beban gempa secara lebih merata, sehingga struktur menjadi lebih stabil dan tidak mudah runtuh saat terjadi guncangan.

Keunggulan tersebut berasal dari mekanisme penguncian antar-bata yang mengurangi risiko pergeseran lateral. Sistem ini juga meningkatkan fleksibilitas struktur dan kemampuan redaman getaran, sehingga bangunan dapat mengalami deformasi tanpa kerusakan signifikan (Dewi, 2019; Susilo *et al.*, 2023). Oleh karena itu, bata interlock dinilai sangat relevan untuk diterapkan di wilayah dengan tingkat seismisitas tinggi.

Selain aspek mekanis, desain interlock juga memberikan efisiensi konstruksi. Proses pemasangan menjadi lebih cepat karena tidak memerlukan mortar tebal dan tidak membutuhkan tenaga kerja dengan keterampilan khusus. Bobot bata yang lebih ringan turut mengurangi beban total bangunan, yang merupakan keuntungan penting bagi konstruksi tahan gempa. Daya serap air bata interlock yang relatif rendah, yaitu sekitar 5,344%, jauh lebih kecil dibandingkan bata merah yang dapat melebihi 15%, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan memperpanjang umur bangunan (Ningtiyas *et al.*, 2021).

Dari sisi ekonomi, penggunaan bata interlock mampu menekan biaya konstruksi hingga 13% dibandingkan batako biasa, meskipun memerlukan investasi awal untuk pembuatan cetakan. Implementasi nyata pada proyek rumah tahan gempa PT Semen Indonesia menunjukkan bahwa sistem ini mempercepat waktu pengerjaan, meningkatkan kualitas struktur, dan menurunkan biaya keseluruhan proyek (PT Semen Indonesia, 2024; Susilo *et al.*, 2023).

Integrasi Tiga Inovasi (Hybrid Living Green Brick)

Integrasi desain bata interlock dengan penambahan *fly ash* dan abu sekam padi menawarkan kombinasi keunggulan dari sisi kekuatan, durabilitas, dan efisiensi konstruksi. Penelitian Mobiliu *et al.* (2024) menunjukkan bahwa penggunaan 50% *fly ash* mampu menghasilkan kuat tekan sekitar 24,7 kg/cm² dengan kapasitas menahan beban hingga 44,34 kN. Nilai ini mendekati standar K25, sehingga masih tergolong layak sebagai material bangunan.

Namun demikian, hasil kuat tekan bata konvensional dengan penambahan abu sekam padi dilaporkan dapat mencapai kelas 50 sesuai standar SNI. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan material berbasis limbah pada desain interlock masih memerlukan pengaturan ulang komposisi agar mutu tekan dapat ditingkatkan secara optimal.

Penambahan *cyanobacteria* memberikan nilai tambah melalui proses biomineralisasi yang menghasilkan endapan CaCO_3 . Endapan ini menutup pori dan retakan mikro, sehingga meningkatkan kepadatan mikrostruktur, ketahanan terhadap air, serta umur pakai material. Mekanisme *self-healing* ini menjadikan bata tidak hanya kuat pada awal pemakaian, tetapi juga lebih adaptif terhadap kerusakan jangka panjang.

Keunggulan utama desain interlock terletak pada sistem kunci mekanisnya yang menyerupai potongan *puzzle*. Sistem ini memungkinkan distribusi beban yang lebih merata, mengurangi kebutuhan plester tebal, dan meningkatkan stabilitas struktur. Bobotnya yang lebih ringan dibandingkan bata merah konvensional mengurangi beban total bangunan, sementara daya serap air yang rendah meningkatkan ketahanan terhadap kelembapan dan cuaca ekstrem.

Integrasi *fly ash*, abu sekam padi, dan *cyanobacteria* menghasilkan material yang ramah lingkungan dan ekonomis. Penggunaan semen hijau mampu menurunkan emisi karbon hingga 38%, sementara desain interlock mengurangi konsumsi mortar dan mempercepat pemasangan (Mobiliu *et al.*, 2024). Pemanfaatan limbah industri dan pertanian juga mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus menekan eksploitasi bahan baku alami.

Tantangan dan Pengembangan Lebih Lanjut

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan bata interlock berbasis limbah dan *cyanobacteria* adalah pengendalian kelembapan selama proses *curing*. Kelembapan yang tidak stabil dapat mengganggu pertumbuhan *cyanobacteria* dan proses biomineralisasi CaCO_3 , terutama di lingkungan tropis lembab seperti Indonesia (Nurhidayat & Sari, 2021).

Selain itu, standarisasi masih menjadi hambatan karena variasi komposisi *fly ash*, abu sekam padi, dan kualitas *cyanobacteria* dapat memengaruhi mutu produk akhir. Standar SNI yang ada saat ini masih lebih berfokus pada bata konvensional, sehingga material inovatif seperti *Hybrid Living Green Brick* belum memiliki pedoman teknis yang baku (Pradana *et al.*, 2020).

Ke depan, pengembangan dapat dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme lain seperti *Bacillus subtilis* yang juga mampu menghasilkan CaCO_3 . Kombinasi beberapa agen biologis berpotensi meningkatkan kemampuan *self-healing* dan memperluas aplikasi material ini untuk konstruksi tahan gempa dan bangunan hijau (Susilo *et al.*, 2023).

Kontribusi untuk Konstruksi Berkelanjutan dan Resilien

Pemanfaatan *fly ash* dan abu sekam padi secara langsung mengurangi volume limbah industri dan pertanian yang berpotensi mencemari lingkungan. Inovasi ini juga menekan eksploitasi bahan alam baru seperti tanah liat dan semen. Penelitian di Indonesia menunjukkan

bahwa bata interlock dengan tambahan abu sekam padi mampu mencapai kuat tekan hingga 59,33 kg/cm² dan memenuhi standar SNI kelas 50 (Yuliana *et al.*, 2019; Novriadi *et al.*, 2019).

Selain itu, sistem kunci mekanis pada bata interlock terbukti lebih stabil terhadap gaya lateral gempa. Ketika dikombinasikan dengan kemampuan *self-healing* dari *cyanobacteria*, material ini mampu meningkatkan resiliensi bangunan di wilayah rawan bencana. Hal ini sejalan dengan konsep *green building* yang tidak hanya berorientasi pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga pada peningkatan ketahanan dan adaptivitas bangunan terhadap risiko lingkungan (Dewi, 2019; Susilo *et al.*, 2023).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan abu sekam padi dan *cyanobacteria* dalam pengembangan bata interlock memberikan kontribusi signifikan terhadap inovasi material konstruksi ramah lingkungan. Abu sekam padi berperan sebagai bahan *pozzolan* yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap Semen Portland, sekaligus mengoptimalkan limbah pertanian agar memiliki nilai guna baru. Sementara itu, *cyanobacteria* mendukung proses *biocementation* melalui pembentukan kalsium karbonat (CaCO₃), yang meningkatkan ikatan antar partikel dan potensi mekanisme *self-healing*. Penggunaan campuran limbah industri seperti *fly ash* 60%, semen *Portland* 30%, dan pasir 10% menghasilkan kuat tekan mencapai 12,5 MPa setelah 28 hari curing, mendekati standar SNI untuk bangunan tahan gempa.

Selain efisiensi pemasangan yang mencapai 50% lebih cepat, bata interlock juga mendukung penghematan material hingga 70% karena tidak memerlukan mortar tebal. Sistem ventilasi alami pada desainnya berkontribusi pada isolasi termal, membantu mengurangi kebutuhan energi pendinginan hingga 30%. Inovasi ini menjadikan bata interlock tidak hanya kokoh dan hemat biaya, tetapi juga ramah lingkungan berkat penurunan emisi karbon dan optimalisasi penggunaan sumber daya. Secara keseluruhan, bata interlock menjadi solusi strategis dalam menggantikan material konvensional, sekaligus mendorong kemandirian konstruksi melalui produksi lokal berbasis limbah industri. Model ini layak direplikasi secara nasional sebagai bentuk dukungan terhadap konstruksi berkelanjutan dan infrastruktur tahan bencana.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan uji laboratorium dan pengujian lapangan guna memastikan kekuatan, daya tahan, dan kestabilan bata interlock berbasis abu

sekam padi dan cyanobacteria, terutama pada kondisi gempa. Selain itu, dukungan dari lembaga riset dan pemerintah diperlukan agar pemanfaatan limbah pertanian ini dapat diterapkan secara luas sebagai material konstruksi ramah lingkungan.

DAFTAR REFERENSI

- Amin, A., Sattar, N., & Khan, M. (2021). Effect of rice husk ash and fly ash combination on compressive strength of lightweight bricks. *International Journal of Advanced Research in Civil Engineering*, 8(1), 11–19.
- Badan Pusat Statistik. (2022). *Statistik padi dan palawija Indonesia 2021*. Badan Pusat Statistik.
- Candra, A. I., Romadhon, F., Azhari, F. M., & Hidiyati, E. F. (2022). Increasing compressive strength of the red brick with fly ash and rice husk ash. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 24(2), 107–117.
- Dewi, N. (2019). Interlocking system pada konstruksi knock down bangunan tradisional Jawa Tajug sebagai teknologi responsif gempa. *Jurnal Pendidikan IPA*, 8(2).
- Indumathi, M., Rajasekar, V., & Arul, P. (2024). Mechanical properties of eco-friendly bricks incorporating rice husk ash and fly ash. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 13(2), 45–53.
- International Energy Agency. (2022). *Cement technology roadmap: Carbon emissions and energy*. International Energy Agency.
- Mobiliu, F. P., Mursalin, M., Jahja, M., Setiawan, D. G. E., Dewaputu, N. O., Latief, F., & Lantapon, N. N. (2024). Compressive strength and water absorption capacity on brick interlock with fly ash addition. *Computational and Experimental Research in Materials and Renewable Energy (CERiMRE)*, 7(1), 64–77.
- Ningtiyas, A. D., Kurniawan, R., & Saputra, T. (2021). Pengaruh bentuk kunci terhadap kekuatan tekan dan daya serap air pada bata interlock. *Jurnal Rekayasa Konstruksi*, 10(1), 33–40.
- Novriadi, I., Dewi, S. M., & Susanti, L. (2019). Pengujian pasangan dinding batako interlock akibat gaya lateral out-plane. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*, 1(1), 1–8.
- PT Semen Indonesia. (2024). *Bata interlock PT Semen Indonesia: Teknologi pembangunan rumah tahan gempa*. Clearinghouse PU.
- Rahman, F., Suryanto, B., & Wijaya, R. (2024). Pengembangan batako sistem interlocking untuk bangunan tahan gempa. *Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 45–56.
- Rahman, M. A., Kumar, R., & Das, S. (2022). Influence of cyanobacteria incorporation on the strength and durability of mortar. *Journal of Green Building Materials*, 6(2), 77–86.
- Seifan, M., Samani, A. K., & Berenjian, A. (2016). Bioconcrete: Next generation of self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(6), 2591–2602.
- Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2022). Biomineralization of cyanobacteria *Synechocystis pevalekii* improves the durability properties of cement mortar. *AMB Express*, 12, Article 59.

- Singh, A. (2023). Utilization of plastic waste for developing composite bricks and enhancing mechanical properties: A review.
- Turkane, A., Sharma, P., & Patel, R. (2022). Effect of fly ash addition on mechanical strength of concrete and soil stabilization. *Construction Materials Review*, 8(4), 102–109.
- United Nations Environment Programme. (2022). *Emissions gap report 2022: The closing window*. United Nations Environment Programme.
- Valenzuela, G., Santos, R., & Paredes, M. (2025). Pozzolanic reactivity of rice husk ash in hybrid cement systems. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 12(1), 18–27.
- Yuliana, A., Prasetyo, R., & Hidayat, F. (2019). Analisis kuat tekan dan efisiensi biaya bata interlock dibandingkan bata merah konvensional. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 7(2), 45–52.