

INOVASI MATERIAL KONSTRUKSI BERBASIS REKAYASA HAYATI UNTUK INFRASTRUKTUR BERKELANJUTAN

Galih Cahyo Kumolo¹, Yuanita FD Sidabutar², Akhbar Ilmiah³, Subkhan⁴

Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Batam
Email: 12124009@univbatam.ac.id

Abstract – Sustainable development in the construction sector requires the integration of environmental preservation, energy efficiency, and technological innovation. This study explores the application of bio-engineered construction materials particularly bio-concrete and bio-cementation as innovative approaches to address durability and sustainability challenges. These materials utilize microorganisms such as *Bacillus subtilis* and *Sporosarcina pasteurii* to precipitate calcium carbonate, enabling self-healing and improving mechanical properties. The findings from Sidabutar et al. provide a contextual basis, particularly in the Indonesian setting, where tropical climate conditions demand construction strategies that are both energy-efficient and environmentally sound. The integration of Internet of Things (IoT)-based automation systems in green building design has shown significant promise, achieving up to 30% energy savings and contributing to a measurable reduction in carbon emissions. The study emphasizes the synergistic potential of combining smart building technologies with biologically engineered materials to produce infrastructure that is resilient, low-carbon, and suitable for dense urban environments. The implications extend to policy, design practice, and material innovation, highlighting the necessity of interdisciplinary collaboration in realizing sustainable infrastructure. This paper contributes to the growing body of knowledge in bio-based material engineering and supports the adoption of ecologically conscious construction methods aligned with global climate goals.

Keywords: Bio-concrete; Bio-engineered materials; Carbon reduction; Green infrastructure; Self-healing concrete; Smart building; Sustainable construction.

Abstrak – Pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi menuntut integrasi antara pelestarian lingkungan, efisiensi energi, dan inovasi teknologi. Studi ini mengeksplorasi penerapan material konstruksi hasil rekayasa hayati—khususnya bio-beton dan bio-sementasi—sebagai pendekatan inovatif dalam menjawab tantangan ketahanan dan keberlanjutan struktur bangunan. Material ini memanfaatkan mikroorganisme seperti *Bacillus subtilis* dan *Sporosarcina pasteurii* untuk mengendapkan kalsium karbonat secara biologis, memungkinkan proses penyembuhan sendiri (self-healing) serta meningkatkan sifat mekanik beton. Temuan dari Sidabutar dkk. menjadi dasar kontekstual penelitian ini, khususnya dalam kondisi iklim tropis Indonesia yang membutuhkan strategi konstruksi yang hemat energi dan ramah lingkungan. Integrasi sistem otomasi berbasis Internet of Things (IoT) dalam desain bangunan hijau menunjukkan potensi signifikan, dengan penghematan energi hingga 30% dan penurunan emisi karbon yang terukur. Studi ini menekankan potensi sinergis antara teknologi bangunan pintar dan material hasil rekayasa biologis dalam mewujudkan infrastruktur yang tangguh, rendah karbon, dan sesuai untuk lingkungan urban tropis. Implikasi penelitian ini menjangkau aspek kebijakan, praktik desain, hingga inovasi material, serta menyoroti pentingnya kolaborasi lintas disiplin untuk merealisasikan konstruksi berkelanjutan. Artikel ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu rekayasa material hayati dan mendukung adopsi metode konstruksi yang berwawasan ekologi sesuai dengan tujuan iklim global.

Kata Kunci: Bangunan pintar; Beton sembuh mandiri; Bio-beton; Infrastruktur hijau; Konstruksi berkelanjutan; Material rekayasa hayati; Reduksi karbon

1. Pendahuluan

Perkembangan sektor konstruksi yang pesat telah memberikan kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi global. Namun, di balik kemajuan tersebut, industri konstruksi juga menjadi salah satu penyumbang terbesar emisi karbon dioksida (CO₂), terutama akibat produksi

semen yang intensif energi. Menurut (Putra et al., 2020), penggunaan Portland cement dalam skala besar telah menyebabkan meningkatnya emisi karbon yang signifikan, dengan satu ton semen menghasilkan sekitar 0,86 ton CO₂. Untuk mengatasi tantangan ini, berbagai pendekatan inovatif mulai dikembangkan, termasuk penerapan material konstruksi hasil rekayasa hayati seperti

bio-concrete dan *self-healing concrete*, yang mampu memperbaiki keretakan mikro secara otomatis melalui aktivitas mikroorganisme seperti *Bacillus subtilis*.

Teknologi bio-concrete bekerja berdasarkan prinsip Microbiologically Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP), yaitu proses pengendapan kalsium karbonat yang dihasilkan oleh mikroorganisme untuk mengisi retakan dan pori-pori pada beton. Studi oleh Shahriar (Zawad et al., 2021) menunjukkan bahwa teknologi ini tidak hanya memperpanjang umur struktur tetapi juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan biaya pemeliharaan dan dampak lingkungan. Selain itu, pendekatan ini terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan tekan beton, menjadikannya alternatif yang menjanjikan bagi pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan.

Lebih lanjut, penelitian oleh (Iqbal et al., 2021) membuktikan bahwa aplikasi bio-cementation mampu meningkatkan kualitas berbagai material konstruksi, termasuk batu bata, agregat daur ulang, dan material berbasis tanah, melalui peningkatan daya ikat internal dan ketahanan terhadap pelapukan. Proses ini memungkinkan pembentukan bio-brick dan blok bangunan lainnya yang tidak hanya tahan lama, tetapi juga dapat diproduksi dengan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Penelitian ini menjadi dasar penting dalam mengembangkan strategi konstruksi hijau yang menyeluruh.

Selain beton berbasis mikroorganisme, pendekatan lain yang patut diperhatikan adalah pemanfaatan biomassa alga sebagai bahan pengganti kayu konstruksi. (Yi et al., 2020) mengembangkan artificial timber berbasis alga dengan kandungan binder epoksi yang sangat rendah, namun memiliki kekuatan lentur yang setara dengan kayu lunak alami. Material ini tidak hanya menjadi alternatif untuk mengurangi deforestasi, tetapi juga menawarkan manfaat ekologis dalam hal penyerapan karbon dan pengurangan limbah biomassa.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji secara komprehensif berbagai inovasi material konstruksi hasil rekayasa hayati, serta mengevaluasi efektivitasnya dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Dengan meninjau sejumlah studi, termasuk yang dilakukan oleh (Sidabutar et al., 2025) mengenai optimalisasi smart building berbasis teknologi IoT, penelitian ini berkontribusi terhadap pemahaman menyeluruh mengenai sinergi antara teknologi

cerdas dan material hayati dalam merancang bangunan yang ramah lingkungan dan efisien energi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan kebijakan dan praktik konstruksi yang berkelanjutan di masa depan.

2. Tinjauan Pustaka

Penggunaan material ramah lingkungan dalam konstruksi telah menjadi perhatian utama dalam upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang adalah penggunaan bio-concrete dan *self-healing concrete* yang memanfaatkan mikroorganisme untuk memperbaiki kerusakan struktural secara alami. Menurut (Putra et al., 2020), teknologi ini tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap pemeliharaan konvensional, tetapi juga membantu menurunkan emisi karbon dari penggunaan semen secara langsung. Proses penyembuhan yang terjadi melalui aktivitas biologis bakteri seperti *Bacillus subtilis* terbukti mampu menutup retakan mikro dengan efisien.

Teknologi bio-concrete bekerja berdasarkan prinsip microbiologically induced calcium carbonate precipitation (MICP), yakni proses biologis yang menghasilkan endapan kalsium karbonat untuk memperkuat struktur beton. Shahriar (Zawad et al., 2021) menyatakan bahwa aplikasi bio-engineered concrete mampu meningkatkan kekuatan mekanik beton secara signifikan, serta memberikan kemampuan penyembuhan mandiri hingga 200 tahun dalam kondisi lembap. Mereka menekankan bahwa pendekatan ini merupakan metode ramah lingkungan yang sangat potensial untuk masa depan pembangunan infrastruktur global.

Selanjutnya, (Iqbal et al., 2021) dalam tinjauannya mengenai bio-cementation menunjukkan bahwa proses MICP juga dapat diterapkan pada berbagai media seperti pasir, tanah, bahkan bahan limbah seperti abu sekam padi dan agregat beton daur ulang. Penerapan teknologi ini mampu meningkatkan kekuatan tekan, mengurangi porositas, serta memperpanjang umur pakai material konstruksi. Selain itu, teknologi ini juga dinilai lebih hemat energi dibandingkan proses pembakaran bata konvensional yang menghasilkan emisi karbon tinggi.

Sementara itu, pendekatan alternatif melalui pemanfaatan biomassa juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. (Yi et al., 2020)

mengembangkan artificial timber berbasis alga dengan kandungan binder epoksi hanya 2–4%. Produk ini memiliki kekuatan lentur yang mendekati kayu alami dan diproses melalui teknologi compaction self-assembly tanpa proses pembakaran atau energi tinggi. Inovasi ini menunjukkan bahwa biomassa laut seperti alga dapat dioptimalkan sebagai pengganti kayu dan beton ringan dalam konstruksi, sekaligus berkontribusi dalam program penyerapan karbon (carbon sequestration).

Konsep integrasi antara material hasil rekayasa hayati dengan teknologi bangunan pintar (smart building) turut memperkaya pendekatan pembangunan rendah karbon. (Sihite et al., 2025) dalam studi tentang green building dan sistem otomasi berbasis IoT menunjukkan bahwa efisiensi energi pada bangunan dapat ditingkatkan hingga 30% melalui penggunaan Building Automation System (BAS). Hal ini berdampak langsung pada pengurangan konsumsi energi dan emisi karbon dari bangunan di wilayah tropis, termasuk Indonesia.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan deskriptif kualitatif melalui metode studi literatur (literature review) guna mengevaluasi berbagai inovasi material konstruksi yang berasal dari proses rekayasa hayati. Fokus utama kajian ini adalah untuk memahami kontribusi material-material tersebut dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan rendah karbon. Analisis literatur dilakukan terhadap artikel-artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal nasional dan internasional terakreditasi, dengan seleksi berdasarkan relevansi topik, validitas ilmiah, serta keterkaitannya dengan teknologi bio-concrete, bio-cementation, dan material berbasis biomassa seperti artificial timber dari alga.

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai bagian dari tugas akhir semester 2 dalam program studi Teknik Sipil, dengan tujuan untuk mengkaji potensi dan inovasi material konstruksi hasil rekayasa hayati dalam mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Pendekatan yang digunakan adalah deskriptif kualitatif melalui metode studi literatur (library research), dengan mengumpulkan dan menganalisis berbagai referensi ilmiah dari jurnal nasional dan internasional.

3.2. Sasaran dan Target Penelitian

Sasaran utama dalam penelitian ini adalah literatur ilmiah yang membahas penerapan teknologi mikroorganisme dan biomassa dalam pengembangan material konstruksi. Target penelitian meliputi artikel dari jurnal internasional terindeks Scopus dan jurnal nasional terakreditasi, dengan topik yang relevan dengan inovasi material ramah lingkungan yang terbit antara tahun 2020 hingga 2025. Karena ini merupakan studi literatur, maka tidak digunakan populasi dan sampel secara statistik.

3.3. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui pencarian artikel ilmiah menggunakan mesin pencari seperti Google Scholar dan database jurnal seperti MDPI, ScienceDirect, dan Garuda. Artikel yang dipilih harus memenuhi kriteria relevansi dengan topik penelitian, memuat informasi teknis tentang kinerja material (misalnya kekuatan tekan atau proses penyembuhan), serta memiliki latar belakang pembangunan berkelanjutan.

3.4. Model Penelitian

Model penelitian yang digunakan adalah tematik analitik, yaitu dengan mengelompokkan data dan temuan berdasarkan jenis material yang ditinjau, teknologi yang digunakan, serta dampak lingkungan dan struktural yang dihasilkan. Kategori-kategori tersebut kemudian dianalisis untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai kontribusi dan tantangan implementasi material hasil rekayasa hayati dalam konstruksi.

3.5. Teknik Analisis Data

Analisis dilakukan secara kualitatif melalui pendekatan sintesis naratif. Data yang telah diklasifikasikan dianalisis untuk menemukan pola, tren, dan kontribusi ilmiah terhadap praktik konstruksi berkelanjutan. Hasil analisis digunakan untuk membentuk kesimpulan dan rekomendasi awal mengenai potensi pengembangan dan penerapan material rekayasa hayati di masa depan, khususnya di Indonesia.

4. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil sintesis dari berbagai literatur ilmiah yang membahas penerapan material konstruksi berbasis rekayasa hayati, baik yang melibatkan mikroorganisme maupun biomassa terbarukan. Analisis dilakukan dengan meninjau efektivitas teknologi dari segi performa teknis, efisiensi energi, dampak

lingkungan, serta potensi aplikasinya dalam konteks pembangunan berkelanjutan. Literatur yang dianalisis mencakup inovasi seperti bio-concrete, bio-cementation, dan artificial timber dari alga, yang masing-masing menawarkan solusi untuk mengurangi ketergantungan pada material konvensional beremisi tinggi.

Selain mengevaluasi manfaat teknis dan ekologis, pembahasan juga mencakup tantangan implementasi, peluang pengembangan, serta relevansi terhadap kondisi iklim tropis seperti di Indonesia. Temuan-temuan utama disusun secara sistematis dalam beberapa subbagian, berdasarkan jenis teknologi dan karakteristik aplikasinya dalam konstruksi hijau. Struktur ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai peran material hayati dalam mendukung infrastruktur rendah karbon dan adaptif terhadap perubahan iklim.

4.1. Teknologi Bio-Concrete dalam konstruksi

Penggunaan bio-concrete atau beton sembuh mandiri telah menjadi perhatian utama dalam pengembangan material berkelanjutan. Beton ini dirancang agar dapat memperbaiki retakan secara mandiri melalui aktivitas mikroorganisme yang ditambahkan ke dalam campuran beton saat pencetakan. Salah satu mikroorganisme yang paling umum digunakan adalah *Bacillus subtilis*, yang mampu mengendapkan kalsium karbonat (calcium carbonate) secara biologis ketika terjadi retakan dan terdapat kelembaban. Proses ini dikenal sebagai microbiologically induced calcium carbonate precipitation (MICP), yakni suatu mekanisme biologis yang mengubah urea menjadi karbonat dan ammonium, lalu mengikat ion kalsium di lingkungan beton untuk membentuk kristal CaCO_3 yang menutup celah.



Gambar 1. Proses MICP pad Bio-concrete dengan peran bakteri

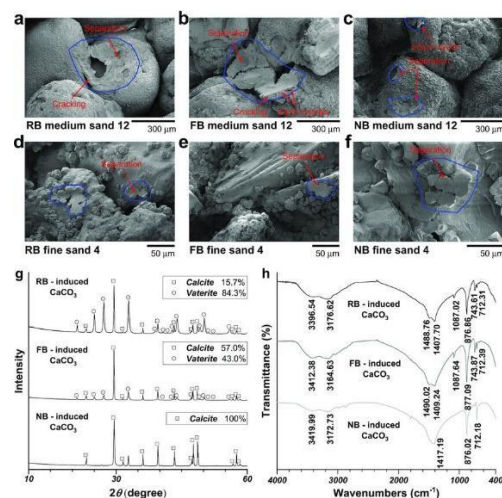
Menurut (Putra et al., 2020) , bio-concrete

mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap retakan mikro hingga dua kali lipat dibandingkan dengan beton konvensional. Penelitian mereka menunjukkan bahwa penambahan bakteri tidak menyebabkan penurunan kuat tekan awal, bahkan justru mempercepat proses penyembuhan retakan dalam periode 28 hari pengujian. Dengan kemampuan tersebut, bio-concrete tidak hanya memperpanjang umur bangunan, tetapi juga mengurangi kebutuhan perbaikan rutin dan pemeliharaan jangka panjang.

Inovasi ini sangat relevan diterapkan pada bangunan-bangunan di wilayah tropis dengan kelembaban tinggi, di mana risiko retakan mikro akibat penyusutan termal dan fluktuasi suhu cukup tinggi. Selain itu, teknologi ini berkontribusi terhadap pengurangan penggunaan bahan kimia tambahan untuk perbaikan dan memperkuat pendekatan konstruksi hijau yang ramah lingkungan.

4.2. Efektivitas Bio-Cementation

Teknologi bio-cementation memanfaatkan kemampuan mikroorganisme seperti *Sporosarcina pasteurii* untuk memperkuat ikatan antarpartikel dalam material konstruksi. (Iqbal et al., 2021) menjelaskan bahwa proses MICP tidak hanya efektif dalam perbaikan retakan, tetapi juga dalam produksi batu bata biologis (bio-bricks) dan stabilisasi tanah dasar jalan. Dalam penelitian tersebut, kekuatan tekan batu bata berbasis MICP meningkat hingga 4 MPa, mendekati standar minimum batu bata ringan struktural. Selain itu, teknik ini juga diterapkan dalam pembuatan blok dari agregat daur ulang dan limbah industri seperti abu sekam padi dan slag baja.



Gambar 2 Mikrostruktur Beton Konvensional dan Bio-Cemented

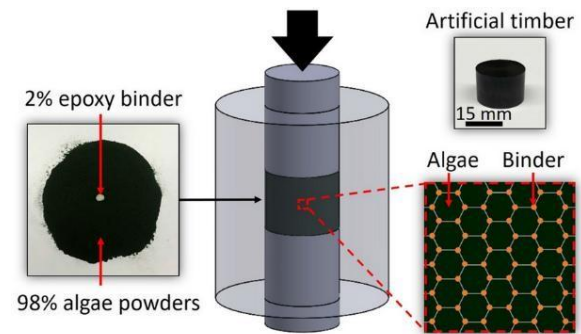
Teknologi ini juga menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan struktur mikro material konstruksi. Pengamatan menggunakan mikroskop elektron (SEM) menunjukkan bahwa setelah perlakuan MICP, presipitasi kalsium karbonat (CaCO_3) terbentuk di antara butiran agregat, menciptakan ikatan antarpartikel yang lebih rapat dan kuat dibandingkan beton konvensional. Perbedaan tersebut terlihat jelas pada Gambar 2, di mana mikrostruktur bio-cemented menunjukkan pori-pori yang lebih tertutup dan kontak antarpartikel yang lebih solid.

Efek mikrostruktur ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekuatan tekan dan daya tahan terhadap degradasi lingkungan. Aplikasi bio-cementation juga dinilai lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan proses pembakaran seperti pada pembuatan bata konvensional, sehingga mengurangi emisi CO_2 . Selain itu, metode ini dapat digunakan pada material daur ulang, memperluas peluang penerapan teknologi hijau dalam berbagai konteks konstruksi.

Dengan potensi tersebut, bio-cementation tidak hanya dipandang sebagai solusi perbaikan struktural, tetapi juga sebagai pendekatan yang strategis dalam mendukung prinsip circular economy di sektor konstruksi. Kombinasi antara efisiensi teknis dan manfaat lingkungan menjadikan teknologi ini relevan untuk diadopsi secara lebih luas, terutama pada proyek infrastruktur berkelanjutan di negara berkembang seperti Indonesia.

4.3. Alga sebagai Material Alternatif

Inovasi terbaru dalam pemanfaatan biomassa laut, seperti alga, telah menghasilkan artificial timber yang mampu menyaingi kayu lunak dari segi kekuatan lentur. (Yi et al., 2020) mengembangkan material komposit dengan hanya 2–4% binder epoksi menggunakan teknologi compaction self-assembly, sehingga mengurangi emisi karbon dari penggunaan kayu maupun semen. Proses ini melibatkan pencampuran bubuk alga yang telah dikeringkan dengan resin epoksi dan pelarut, kemudian dikompresi dengan tekanan tinggi sebelum dikeringkan di dalam oven. Urutan proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 3. karbon dari penggunaan kayu maupun semen.



Gambar 3 Proses Pembuatan Artificial Timber dari Biomassa Alga

Produk ini sangat cocok untuk aplikasi interior, panel dinding, dan elemen bangunan ringan karena ringan, kuat, dan berbasis sumber daya terbarukan. Penggunaan alga juga mendukung strategi penyerapan karbon (carbon sequestration) melalui budidaya massal, karena alga mampu menyerap karbon dioksida dalam jumlah besar dengan laju yang lebih tinggi dibandingkan tanaman darat.

Lebih lanjut, pemanfaatan alga sebagai material konstruksi berpotensi menggantikan sebagian konsumsi kayu dan beton ringan, sehingga mendukung konservasi hutan dan mengurangi emisi dari industri semen. Dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah alga pasca panen dalam bentuk bubuk kering untuk bahan bangunan juga membuka peluang pemanfaatan biomassa yang selama ini kurang optimal.

Namun demikian, tantangan utama dalam komersialisasi material ini adalah terbatasnya skala produksi dan biaya awal yang relatif tinggi akibat kebutuhan peralatan khusus dan bahan resin berkualitas tinggi. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dan dukungan dari sektor industri diperlukan agar material berbasis biomassa seperti artificial timber dari alga dapat digunakan secara luas dalam industri konstruksi hijau.

4.4. Sinergi Material Hayati & Smart Building

(Sidabutar et al., 2025) menekankan bahwa pemanfaatan material hijau akan lebih efektif jika diintegrasikan dengan sistem bangunan cerdas (smart building) berbasis Internet of Things (IoT). Dengan memanfaatkan Building Automation System (BAS), bangunan dapat mengatur konsumsi energi secara otomatis, mengontrol pencahayaan dan pendinginan, serta memantau kualitas udara dalam ruangan. Penelitian mereka menunjukkan efisiensi energi mencapai 30% dibandingkan sistem konvensional. Integrasi antara material hayati seperti bio-concrete dan

sistem IoT berpotensi menciptakan infrastruktur rendah karbon dan adaptif terhadap perubahan iklim, terutama di kawasan tropis seperti Indonesia.

Salah satu contoh implementasinya adalah Building Automation System (BAS), yaitu sistem yang memungkinkan bangunan untuk mengatur berbagai fungsi secara otomatis. Fungsi-fungsi tersebut mencakup pengaturan konsumsi energi, pengendalian suhu dan kelembaban ruangan, serta pengelolaan pencahayaan dan ventilasi. Dengan adanya sistem ini, bangunan dapat menyesuaikan operasionalnya dengan kebutuhan aktual secara real-time, sehingga mampu menghemat energi secara signifikan.

Berdasarkan temuan penelitian, sistem BAS yang terintegrasi dengan konsep bangunan hijau mampu meningkatkan efisiensi energi hingga 30 persen dibandingkan dengan bangunan konvensional. Peningkatan ini tidak hanya berdampak pada pengurangan biaya operasional, tetapi juga secara langsung berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon.

Integrasi antara material konstruksi hasil rekayasa hayati seperti bio-concrete dengan sistem otomasi berbasis IoT menghasilkan solusi yang adaptif dan tangguh dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Pendekatan ini sangat relevan diterapkan di wilayah tropis seperti Indonesia, di mana kebutuhan akan efisiensi energi dan pengendalian iklim dalam bangunan semakin meningkat seiring perubahan cuaca ekstrem dan urbanisasi yang pesat.

4.5. Analisis dan Tantangan Implementasi

Berdasarkan hasil studi literatur, dapat disimpulkan bahwa setiap jenis material hasil rekayasa hayati memiliki karakteristik dan manfaat spesifik yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan teknis dan lingkungan. Self-healing concrete dengan bakteri *Bacillus subtilis* unggul dalam perbaikan otomatis retakan mikro tanpa campur tangan manusia, sedangkan bio-cementation berfokus pada peningkatan daya ikat dan kekuatan tekan pada media tanah, bata, atau beton daur ulang. Di sisi lain, artificial timber dari alga menawarkan alternatif material non-semen yang berkelanjutan dan rendah emisi karbon, sangat cocok untuk substitusi kayu di sektor konstruksi ringan.

Namun, dari sisi implementasi, terdapat beberapa tantangan nyata. Pertama, biaya awal teknologi ini masih tergolong tinggi, terutama pada tahap pengembangan dan pengujian skala besar. Kedua, minimnya regulasi teknis dan

standar nasional yang mengatur penggunaan material biologis dalam konstruksi menyebabkan keterbatasan dalam adopsi oleh pelaku industri. Ketiga, kurangnya literasi teknis di kalangan kontraktor dan perencana bangunan menghambat integrasi material ini secara luas dalam proyek infrastruktur publik.

Oleh karena itu, dibutuhkan kolaborasi lintas sektor antara akademisi, pemerintah, dan industri untuk memperluas riset terapan dan menyusun kebijakan yang mendorong pengembangan material konstruksi hayati. Selain itu, edukasi dan pelatihan teknis kepada pelaku industri juga menjadi kunci penting dalam mendukung penerapan teknologi ini secara efektif dan masif di masa depan.

5. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini menunjukkan bahwa material konstruksi hasil rekayasa hayati memiliki potensi besar dalam mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan. Inovasi seperti self-healing concrete, bio-cementation, dan artificial timber berbasis biomassa alga terbukti mampu meningkatkan kinerja struktural, memperpanjang umur bangunan, serta mengurangi ketergantungan terhadap material konvensional yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan mikroorganisme seperti *Bacillus subtilis* dan *Sporosarcina pasteurii* mampu menghasilkan presipitasi kalsium karbonat secara alami, sehingga memperbaiki retakan dan memperkuat struktur. Selain itu, pemanfaatan biomassa alga melalui proses compaction self-assembly membuka peluang besar bagi produksi material rendah karbon sebagai pengganti kayu dan beton ringan.

Meskipun hasil studi literatur menunjukkan banyak manfaat, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, karena pendekatan yang digunakan bersifat kualitatif dan berbasis studi pustaka, maka tidak terdapat data uji eksperimental primer. Kedua, sebagian besar referensi bersumber dari studi luar negeri, sehingga konteks aplikatifnya di Indonesia memerlukan validasi lebih lanjut. Ketiga, belum adanya standar teknis nasional terkait penggunaan material rekayasa hayati dalam konstruksi menjadi tantangan tersendiri dalam implementasi di lapangan.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan pengujian laboratorium terhadap sampel bio-concrete atau bio-brick dengan bakteri lokal untuk mengetahui performanya dalam iklim tropis.

Penelitian kuantitatif eksperimental juga penting untuk memperoleh data kekuatan tekan, daya tahan, dan umur layanan material. Selain itu, perlu dilakukan studi kelayakan ekonomi dan analisis siklus hidup (LCA) agar pemanfaatan material ini dapat diadopsi secara luas oleh industri konstruksi di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Iqbal, D. M., Wong, L. S., & Kong, S. Y. (2021). Bio-cementation in construction materials: A review. *Materials*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092175>
- Putra, A. Y., Rochman, T., & Arystianto Deni Putra. (2020). Beton Ringan Sembuh Mandiri, Sebuah Material Baru Ramah Lingkungan. *Advanced Functional Materials*, 4(3), 1–3.
- Sihite, B. A., Fd Sidabutar, Y., Suciati, H., Priyandes, A., Tanjung, R., & Sipil, T. (2025). *Optimalisasi Smart Building Dalam Bangunan Hijau Mengurangi Jejak Karbon Dengan Sistem Otomasi*. 15, 1–5. <https://cedsgreeb.org/kompetisi-esai/smart-building/>
- Yi, H., Oh, K., Kou, R., & Qiao, Y. (2020). *Algae-Filler Artificial Timber with an Ultralow Binder Content*. 1–11.
- Zawad, M. F. S., Rahman, M. A., & Priyom, S. N. (2021). Bio-Engineered Concrete: A Critical Review on The Next Generation of Durable Concrete. *Journal of the Civil Engineering Forum*, 7(3), 335. <https://doi.org/10.22146/jcef.65317>