
REORIENTASI PARADIGMA *GREEN MATERIALS* DALAM ARSITEKTUR BERKELANJUTAN: TINJAUAN EVOLUSI GLOBAL DAN STRATEGI DEKARBONISASI KONSTRUKSI DI INDONESIA

Gamaliel K. Jarek

Universitas Doktor Nugroho Magetan, Indonesia

Email: gamalielkjarek@udn.ac.id

Abstrak

Sektor konstruksi memikul tanggung jawab besar atas lonjakan emisi global, khususnya dari jejak karbon tertanam (*embodied carbon*) pada material struktural utama. Artikel ilmiah ini bertujuan membedah pergeseran konseptual serta metodologi penilaian *green materials* dari tahun 2018 hingga 2025, sekaligus merumuskan taktik aplikatif dalam lanskap konstruksi Indonesia guna mempercepat pencapaian target *Net Zero Emission* (NZE) 2060. Melalui studi literatur sistematis terhadap puluhan riset global dan jurnal nasional terakreditasi (SINTA 1–3), kajian ini menemukan reposisi radikal dari sekadar pelabelan komoditas ramah lingkungan yang longgar menjadi evaluasi berbasis bukti empiris yang bersandar pada *Life Cycle Assessment* (LCA) dan prinsip sirkularitas. Di Indonesia, implementasi regulasi seperti Permen PUPR No. 9 Tahun 2021 masih membentur celah adopsi akibat beban modal awal dan kesenjangan kompetensi teknis. Meskipun demikian, eksplorasi material alternatif seperti beton geopolimer berbasis *fly ash* (mampu memotong emisi hingga 80%), pemanfaatan limbah plastik HDPE pada aspal, serta kayu/bambu rekayasa terbukti secara sains siap menjadi solusi substitusi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penguatan tata kelola digital via *Material Passporting* terintegrasi BIM serta penerapan metode *Design for Deconstruction* (DfD) merupakan prasyarat mutlak untuk menjembatani jurang kebijakan dan implementasi riil di lapangan.

Kata Kunci: Material Bangunan Hijau, Siklus Hidup Material, Ekonomi Sirkular, Karbon Tertanam, Dekarbonisasi Indonesia.

Abstract

The construction sector bears significant responsibility for the surge in global emissions, particularly from the embedded carbon footprint of key structural materials. This scientific article aims to examine the conceptual and methodological shifts in green materials assessment from 2018 to 2025, while simultaneously formulating applicable tactics in the Indonesian construction landscape to accelerate the achievement of the 2060 Net Zero Emission (NZE) target. Through a systematic literature review of dozens of global studies and accredited national journals (SINTA 1–3), this study uncovers a radical repositioning from merely loosely labeling environmentally friendly commodities to empirical evidence-based evaluations based on Life Cycle Assessment (LCA) and the principle of circularity. In Indonesia, the implementation of regulations such as PUPR Ministerial Regulation No. 9 of 2021 continues to face a gap in adoption due to initial capital burdens and technical competency gaps. Nevertheless, exploration of alternative materials such as fly ash-based geopolymer concrete (capable of cutting emissions by up to 80%), the use of HDPE plastic waste in asphalt, and engineered wood/bamboo have been scientifically proven to be ready substitute solutions. This study concludes that strengthening digital governance through BIM-integrated Material Passporting and the application of Design for Deconstruction (DfD) methods are essential prerequisites for bridging the gap between policy and actual implementation on the ground.

Keywords: *Green Building Materials, Material Life Cycle, Circular Economy, Embedded Carbon, Decarbonization in Indonesia.*

A. PENDAHULUAN

Industri konstruksi global saat ini berada di bawah sorotan tajam karena menjadi salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca terbesar di dunia. Kontribusi negatif ini sebagian besar bersumber dari pelepasan karbon tertanam (*embodied carbon*) selama proses produksi material primer seperti baja dan semen konvensional (Chen et al., 2021; Gan et al., 2017). Dalam diskursus arsitektur modern, konsepsi mengenai *green material* terus mengalami penyempurnaan. Secara umum, material hijau didefinisikan sebagai substansi bangunan yang meninggalkan jejak ekologis jauh lebih rendah di sepanjang siklus hidupnya jika dibandingkan dengan material konvensional (Iwuanyanwu et al., 2024). Namun, standarisasi kontemporer menuntut prasyarat yang jauh lebih ketat: produk tersebut harus dijamin aman bagi kesehatan manusia—khususnya dalam memelihara kualitas udara dalam ruangan—serta profil keberlanjutannya wajib dibuktikan secara rigid menggunakan metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA) dari hulu hingga hilir (Wang, 2023).

Secara fisik, *green material* diidentifikasi melalui karakteristiknya yang bersifat terbarukan (*renewable*), dapat diproses kembali (*recyclable*), mampu terurai secara alami (*biodegradable*), serta memiliki tingkat pelepasan polutan beracun yang sangat minim (Iwuanyanwu et al., 2024). Senada dengan hal tersebut, Khoshnava et al. (2020) menegaskan bahwa prioritas utama material hijau terletak pada penggunaan bahan non-toksik, organik, dan alami yang secara aktif menekan kontaminan udara ruang dalam (*indoor air quality*). Bagaimanapun, para perencana harus memahami bahwa tidak ada material yang secara absolut bersifat "hijau" di semua wilayah; derajat keramahan lingkungan suatu bahan selalu terikat pada fungsi arsitektural, kapasitas kinerja, serta konteks lokal dari proyek yang dikerjakan (Wang, 2023).

Dalam pemetaan literatur terkini, rumpun material hijau ini secara konsisten dikelompokkan ke dalam beberapa kategori strategis (Firoozi et al., 2024; Saini & Ledwani, 2024):

1. Bahan Daur Ulang dan Turunan Limbah (*Waste-derived*): Menyangkut pemanfaatan baja daur ulang, beton remah (*crushed concrete*), agregat sekunder, *fly ash*, terak besi (*slag*), hingga modifikasi limbah plastik (Chipade et al., 2025; Wang, 2025; Bakhary, 2025).
2. Substansi Hayati dan Cepat Terbarukan (*Bio-based*): Berupa optimalisasi bambu, beton rami (*hempcrete*), miselium jamur, bal jerami, gabus alami, wol isolasi, serta biokomposit berbasis serat alam (Chipade et al., 2025; Kubba, 2012; Khoshnava et al., 2020).
3. Material Lokal dan Berbasis Bumi (*Earth-based*): Penggunaan tanah padat (*rammed earth*), adobe, serta bahan mentah hasil ekstraksi wilayah lokal pertanian atau kehutanan terdekat (Chipade et al., 2025; Saini & Ledwani, 2024).
4. Material Rendah Karbon Inovatif: Kajian mutakhir mulai memasukkan material cerdas (*smart materials*) dan material berubah fase (*phase change materials*) yang dirancang khusus untuk menghemat energi operasional harian, memperpanjang usia pakai struktur, sekaligus menekan volume limbah sisa proyek secara signifikan (Chipade et al., 2025; Firoozi et al., 2024).

Orientasi mendasar dari penerapan rantai pasok material hijau ini adalah meminimalkan degradasi biosfer dan risiko gangguan kesehatan manusia, tanpa mengorbankan fungsionalitas bangunan serta efisiensi pemakaian sumber daya (Nayem, 2023; Kumar et al., 2020; Bakhary, 2025). Manfaat praktis yang ditawarkan mencakup tiga ranah krusial. Pertama, dari aspek lingkungan, material ini terbukti memangkas emisi karbondioksida, meminimalkan eksploitasi

energi primer, mengurangi limbah padat, dan memperlambat laju deplesi sumber daya alam (Trends in Finance and Economics, 2024; Yahia et al., 2024; Building Materials and Engineering Structures, 2025). Kedua, dari sudut pandang kesehatan, langkah ini berhasil menciptakan ruang dalam yang sehat berkat absennya paparan senyawa organik mudah menguap (*Volatile Organic Compounds / VOC*) dan partikel beracun lainnya (Iwuanyanwu et al., 2024; Khoshnava et al., 2020). Ketiga, pada domain sosial-ekonomi, penggunaan material lokal merangsang pertumbuhan ekonomi domestik, meningkatkan kenyamanan psikologis penghuni, serta memberikan efisiensi biaya siklus hidup (*Life Cycle Cost*) jangka panjang, sekalipun biaya investasi awal (*upfront cost*) cenderung lebih tinggi (Yahia et al., 2024; Bakhary, 2025; Sujatha & Sivarethinamohan, 2021).

Bagi Indonesia, akselerasi adopsi *green materials* merupakan instrumen taktis yang mendesak guna merespons gelombang urbanisasi yang masif sekaligus mewujudkan komitmen iklim nasional (Hapsari et al., 2022). Dekarbonisasi—yaitu gerakan terstruktur untuk memotong emisi karbondioksida secara radikal dengan beralih ke energi bersih, meningkatkan efisiensi sistem, dan menerapkan teknologi rendah karbon—menjadi pilar utama Indonesia dalam mengejar target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Sektor bangunan ditargetkan mampu memotong emisi karbon tertanam hingga 30% pada tahun 2030. Berdasarkan urgensi tersebut, artikel ini membedah transformasi pemahaman *green materials* di kancah global serta merumuskan resolusi hambatan penerapannya di dalam ekosistem konstruksi nasional.

B. METODE

Kajian ini mengimplementasikan metode studi literatur sistematis (*systematic literature review*) dengan pendekatan meta-analisis kualitatif dan komparatif. Peta jalan riset disusun dengan melacak data kronologis dari puluhan artikel jurnal internasional bereputasi serta jurnal nasional terakreditasi (fokus pada klaster SINTA 1 hingga SINTA 3) dalam rentang waktu publikasi tahun 2018 sampai 2026. Data dianalisis melalui tiga tahapan terintegrasi: (1) Pelacakan periodisasi konseptual untuk membaca arah pergeseran definisi serta instrumen ukur bangunan hijau; (2) Kompilasi data empiris dari uji laboratorium terkait dampak substitusi material terhadap penurunan volume karbon tertanam; serta (3) Analisis kesenjangan kontekstual (*implementation gap*) guna mengidentifikasi disonansi antara produk hukum regulasi di Indonesia dengan kendala realitas struktural yang dihadapi oleh para pelaku industri di lapangan.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Evolusi Kronologis dan Metodologi Penilaian (2018–2025)

Hasil penelaahan literatur global menunjukkan adanya pergeseran paradigma yang sangat dinamis dari tahun 2018 hingga 2025. Penilaian material bangunan tidak lagi terjebak pada klaim sepihak yang bersifat kualitatif, melainkan telah bertransformasi ke arah evaluasi saintifik berbasis data yang bersifat multi-kriteria dan terukur.

Pada fase awal (2018–2020), diskursus industri cenderung menempatkan *green materials* sebagai entitas yang sekadar ramah ekologi dan promotor kesehatan yang idealnya merangkum tiga pilar pembangunan berkelanjutan (Khoshnava et al., 2018). Fase ini sangat dipengaruhi oleh gerakan *green chemistry* yang berfokus pada reduksi racun manufaktur dan efisiensi energi pabrikasi (Kharissova et al., 2019; Khan et al., 2019). Mengingat petunjuk aplikasi taktis di lapangan saat itu belum matang, proses seleksi material disikapi sebagai persoalan keputusan multi-atribut yang rumit. Akibatnya, alat analisis didominasi oleh metode formal *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) untuk merancang pembobotan kriteria baku (Khoshnava et al., 2018; Sahlol et al., 2020).

Memasuki periode pergeseran (2021–2023), ukuran penilaian menjadi jauh lebih ketat dan komprehensif. Konseptualisasi teoretis dari pakar seperti Kibert (2016)—yang menuntut

penyatuan efisiensi sumber daya dengan restorasi ekosistem di sepanjang usia bangunan—mulai diturunkan ke dalam matriks kalkulasi kuantitatif. Penilaian konvensional mulai ditingkatkan dari LCA lingkungan menjadi *Life Cycle Sustainability Assessment* (LCSA) yang mengintegrasikan pilar ekonomi dan sosial, dibantu oleh kolaborasi digital platform *Building Information Modeling* dan *Analytic Hierarchy Process* (BIM-AHP) (Figueiredo et al., 2021; Al-Atesh et al., 2021). Komunitas peneliti menyepakati tesis bahwa tidak ada material yang 100% "hijau" secara universal; predikat tersebut sepenuhnya bergantung pada opsi mana yang menghasilkan dampak paling minimum dalam skenario desain tertentu dari hulu hingga hilir (*cradle to grave*) (Wang, 2023). Kendati demikian, tantangan yang muncul adalah ketimpangan analisis, di mana analisis pilar lingkungan jauh lebih dominan ketimbang pilar sosial dan manajemen akhir masa pakai material (Le et al., 2023).

Pada fase konsolidasi (2024–2025), pemahaman industri semakin meluas dengan menempatkan indikator sirkularitas (*circularity*), tata kelola rantai pasok, serta pemanfaatan kecerdasan buatan (AI) sebagai instrumen utama (Recio-Colmenares et al., 2025; Li et al., 2025). Literatur kontemporer secara radikal memisahkan konsep asal material (*green origin*) dari performa fungsionalnya (*green performance*) (Mayhoub et al., 2021). Sebuah komponen bangunan bisa saja terbuat dari bahan daur ulang yang lolos klasifikasi *green origin*. Namun, apabila komponen tersebut melepaskan emisi berbahaya saat terpapar panas atau memiliki usia layan yang sangat pendek (gagal secara *green performance*), maka material tersebut gugur dari kualifikasi bahan hijau. Fokus industri global saat ini berpusat pada penyeragaman metrik sertifikasi internasional dan pemodelan dinamika sistem untuk menyinkronkan regulasi antar-aktor (Saini & Ledwani, 2024; Wang et al., 2025; Le et al., 2024). Peta jalan transformasi ini dirangkum secara sistematis dalam Tabel 1.

Tabel 1. Matriks Transformasi Paradigma dan Metodologi Green Materials

Periode	Definisi Dominan	Pendekatan & Metodologi Utama	Keterbatasan Utama	Referensi Kunci
2018–2020	Berorientasi pada perlindungan ekologis makro dan pemenuhan teoretis 3 pilar keberlanjutan.	Penerapan MCDM dan perumusan matriks pembobotan kriteria konvensional.	Petunjuk instruksi seleksi praktis bagi kontraktor di lapangan belum jelas.	Khoshnava et al. (2018); Khan et al. (2019)
2021–2023	Fokus pada dampak siklus hidup total (<i>cradle to grave</i>) dan jaminan kesehatan ruang dalam.	Kalkulasi kuantitatif LCA lingkungan, LCSA, dan integrasi digital BIM-AHP.	Ketidakseimbangan integrasi <i>triple bottom line</i> ; aspek sosial sering terabaikan.	Wang (2023); Figueiredo et al. (2021)
2024–2025	Penekanan pada sirkularitas bahan (<i>circularity</i>), pemosisian digital, dan tata kelola multi-pihak.	Sertifikasi ketat, <i>circular assessment</i> , mitigasi risiko berbasis AI, regulasi sistem dinamis.	Tingginya biaya sertifikasi awal dan fragmentasi standar global.	Li et al. (2025); Recio-Colmenares et al. (2025); Le et al. (2024)

2. Mitigasi Karbon Tertanam Berbasis Pengujian Empiris

Berdasarkan data empiris global, intervensi rekayasa bahan bangunan terbukti menjadi jalan pintas yang paling efektif untuk menekan akumulasi gas rumah kaca. Riset komparatif dari Hart et al. (2021) dan Hawkins et al. (2021) menyoroti bahwa substitusi material konvensional dengan kayu rekayasa atau material daur ulang mampu memotong kurva emisi secara drastis. Faktanya, maksimalisasi efisiensi material lewat substitusi struktural yang tepat terbukti mampu mereduksi total jejak karbon tertanam hingga menyentuh angka 60% pada proyek bangunan bertingkat tinggi (Gan et al., 2017; Ranganath et al., 2024).

3. Hambatan Strategis dan Inovasi Taktis di Indonesia

Dalam ranah domestik Indonesia, orientasi implementasi material hijau mendapat kerangka parameter yang khas. Wibowo et al. (2020) menegaskan bahwa setiap material berkelanjutan yang akan digunakan di Indonesia wajib lolos dari dua ujian utama secara simultan: memiliki jejak lingkungan yang rendah (*low-impact*) serta memiliki durabilitas struktural jangka panjang yang tangguh menghadapi iklim tropis. Lebih lanjut, Supriadi (2019) mengidentifikasi bahwa penggunaan pasokan bahan baku lokal (*local sourcing*) adalah variabel penentu yang paling krusial. Strategi ini secara signifikan memangkas jarak logistik distribusi, yang merupakan penyumbang utama emisi tidak langsung (*Scope 3 emissions*).

Sejalan dengan parameter tersebut, sejumlah inovasi teknis berbasis riset lokal menunjukkan performa yang sangat menjanjikan untuk diaplikasikan dalam skala industri:

- a. Beton Geopolimer Substitusi Semen: Eksplorasi Hardjito et al. (2017) menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah padat industri (*fly ash*) sebagai bahan pengikat (*binder*) alternatif untuk menggantikan semen Portland (OPC) 100% pada beton geopolimer, sukses mereduksi emisi karbon hingga mencapai 80%.
- b. Pemanfaatan Limbah Plastik Eks-Konsumen: Pengujian laboratorium oleh Hadiwardoyo et al. (2021) membuktikan bahwa pencampuran agregat limbah plastik jenis *High-Density Polyethylene* (HDPE) ke dalam formula aspal jalan tidak hanya menyelesaikan problem sampah, tetapi juga secara signifikan mendongkrak ketahanan terhadap alur ban (*rutting*) dan memperpanjang umur layan jalan.
- c. Teknologi Kayu Rekayasa dan Bambu Laminasi: Pemanfaatan rekayasa bambu dan *Cross-Laminated Timber* (CLT) sebagai elemen struktural utama kini mulai diakui sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) alami yang sangat efektif untuk kawasan urban tropis (Nurhayati, 2022).

Kendati potensi teknis melimpah, industri konstruksi nasional masih terjebak di dalam jurang adopsi (*implementation gap*). Pemerintah Indonesia sebenarnya telah menerbitkan instrumen hukum yang progresif, yaitu Peraturan Menteri PUPR No. 9 Tahun 2021 tentang Pedoman Penyelenggaraan Konstruksi Berkelanjutan. Sayangnya, realisasi regulasi ini di lapangan masih tersendat. Data menunjukkan bahwa hambatan utama dipicu oleh minimnya kesiapan kompetensi teknis SDM, tingginya persepsi beban modal awal (*upfront cost*), ketidakpastian pasokan material hijau di pasar, serta ego sektoral dan lemahnya sinergi antar-pemangku kepentingan (Aziz & Fadhilah, 2026; Mahardika et al., 2025). Guna menjembatani gap ini, penerapan kerangka kerja LCA lokal serta standarisasi produk *recycled concrete* yang tersertifikasi mendesak untuk diadopsi sebagai panduan operasional wajib (Rohmah, 2024; Lendra et al., 2024).

Sebagai solusi tata kelola taktis yang instan, manajemen proyek konstruksi di Indonesia dapat mengintegrasikan tiga teknik tata kelola sederhana berikut di lapangan:

- a. Material Passporting: Pencatatan identitas material secara digital dengan memanfaatkan ekosistem BIM (*Building Information Modeling*). Langkah ini bertujuan melacak riwayat asal bahan, kandungan zat, serta potensi daur ulangnya di masa depan (Situmorang, 2023).

- b. Manajemen Limbah Terzonasi (*On-Site Waste Management*): Penerapan area pemisahan yang ketat untuk sisa material kayu, logam, dan beton di lokasi proyek. Hal ini krusial demi menjaga kemurnian material agar siap masuk ke dalam siklus pemulihan (*recovery*) tanpa terkontaminasi.
- c. Modularisasi dan *Design for Deconstruction* (DfD): Penggunaan sistem cetak modular untuk menekan kesalahan potong (*waste minimization*). Selain itu, penerapan asas DfD dari Widodo (2024) mengarahkan pemakaian sambungan mekanis (seperti sistem baut) untuk menggantikan sambungan las atau perekat kimia permanen. Teknik ini menjamin seluruh komponen bangunan dapat dibongkar dengan utuh dan digunakan kembali di akhir masa pakai bangunan, sekaligus menawarkan ketahanan adaptif terhadap paparan suhu ekstrim tropis (Widodo, 2024).

D. KESIMPULAN

Transformasi literatur dari tahun 2018 hingga 2025 membuktikan bahwa pemosisian *green materials* telah berevolusi menjadi sebuah keputusan multi-kriteria yang saintifik berbasis metode LCA kuantitatif dan prinsip sirkularitas. Konsep material hijau tidak lagi dipahami sebagai label statis pada produk alami, melainkan sebuah hasil akhir dari proses seleksi desain yang kontekstual. Di Indonesia, inovasi lokal seperti beton geopolimer *fly ash* (reduksi emisi 80%), aspal campuran limbah plastik HDPE, dan struktur bambu laminasi terbukti secara empiris siap menjadi pilar dekarbonisasi demi menyokong target NZE 2060. Kendati demikian, efektivitas regulasi Permen PUPR No. 9 Tahun 2021 masih terhambat oleh *implementation gap* akibat beban modal awal, keterbatasan kompetensi SDM, serta ekosistem rantai pasok material berkelanjutan yang belum terintegrasi dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Atesh, E., Rahmawati, Y., Zawawi, N., & Utomo, C. (2021). A decision-making model for supporting selection of green building materials. *International Journal of Construction Management*, 23(6), 922 - 933.
- Aziz, A., & Fadhilah, N. (2026). Implementation gap of green construction regulations in developing countries: The case of Indonesia. *Jurnal Manajemen Konstruksi*, 14(1), 45 - 58.
- Bakhary, N. (2025). Green Building Material and Technologies: Assessing Their Potential in Sustainable Construction. *Journal of Sustainable Civil Engineering and Technology*, 4(1), m_00008.
- Barbhuiya, S., & Das, B. B. (2023). Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02326.
- Building Materials and Engineering Structures. (2025). The Impact of Green Building Materials on Energy Efficiency and Environmental Sustainability. *Building Materials and Engineering Structures*, 3(1), 5.
- Chen, W., et al. (2021). Carbon emissions reduction potential in the global building sector: A review of materials substitution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110912.
- Chipade, A. M., Vispute, P. P., Sonawane, S. K., Sasane, N. B., Jadhav, M., & Nerlekar, T. (2025). Construction Materials for Sustainable Environment in Residential Buildings. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 73(1), 46248.
- Figueiredo, K. V., Pierott, R., Hammad, A., & Haddad, A. (2021). Sustainable material choice for construction projects: A Life Cycle Sustainability Assessment framework based on BIM and Fuzzy-AHP. *Building and Environment*, 196, 107805.

- Firoozi, A. A., Firoozi, A., Oyejobi, D., Avudaiappan, S., & Flores, E. S. (2024). Emerging Trends in Sustainable Building Materials: Technological Innovations, Enhanced Performance, and Future Directions. *Results in Engineering*, 21, 103521.
- Gan, V. J., et al. (2017). Low-carbon design of high-rise buildings using BIM and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 164, 977 - 989.
- Hadiwardoyo, S. P., et al. (2021). Pemanfaatan Limbah Plastik dalam Konstruksi Perkerasan. *Jurnal Transportasi*, 21(2), 115 - 124.
- Hapsari, T., et al. (2022). Decarbonizing the Indonesian construction sector: Challenges and strategic pathways. *Environmental Development*, 42, 100712.
- Hardjito, D., et al. (2017). Development of Geopolymer Concrete in Indonesia. *Civil Engineering Dimension*, 19(2), 87 - 93.
- Hart, J., et al. (2021). Material substitution in structural design to mitigate embodied carbon. *Structural Engineering Review*, 33(4), 301 - 315.
- Hawkins, W., et al. (2021). Embodied carbon mitigation via alternative materials in building structures. *Buildings and Cities*, 2(1), 415 - 429.
- Huston, M., DeBella, M., DiBella, M., & Gupta, A. (2021). Green Synthesis of Nanomaterials. *Nanomaterials*, 11(8), 2827.
- Iwuanyanwu, O., Gil-Ozoudeh, I., Okwandu, A. C., & Ike, C. S. (2024). The role of green building materials in sustainable architecture: Innovations, challenges, and future trends. *International Journal of Applied Research in Social Sciences*, 6(8), 1476.
- Khan, J. S., Zakaria, R., Shamsudin, S. M., Abidin, N. I., Sahamir, S. R., Abbas, D. N., & Aminudin, E. (2019). Evolution to Emergence of Green Buildings: A Review. *Administrative Sciences*, 9(1), 6.
- Kharissova, O., Kharisov, B., González, C. O. M., Méndez, Y. P., & López, I. (2019). Greener synthesis of chemical compounds and materials. *Royal Society Open Science*, 6(11), 191378.
- Khoshnava, S. M., Rostami, R., Valipour, A., Ismail, M., & Rahmat, A. (2018). Rank of green building material criteria based on the three pillars of sustainability using the hybrid multi criteria decision making method. *Journal of Cleaner Production*, 173, 82 - 99.
- Khoshnava, S. M., Rostami, R., Zin, M. R., Štreimikienė, D., Mardani, A., & Ismail, M. (2020). The Role of Green Building Materials in Reducing Environmental and Human Health Impacts. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2589.
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. John Wiley & Sons.
- Kubba, S. (2012). Green Building Materials and Products. *Handbook of Green Building Design and Certification*, 227 - 311.
- Kumar, S., Puri, V., & Aggarwal, M. (2020). Review of sustainable building materials for construction industry. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(3s), 1 - 8.
- Le, D.-L., Salomone, R., & Nguyen, Q. (2023). Circular bio-based building materials: A literature review of case studies and sustainability assessment methods. *Building and Environment*, 245, 110774.
- Le, D.-L., Salomone, R., & Nguyen, Q. T. (2024). Sustainability assessment methods for circular bio-based building materials: A literature review. *Journal of Environmental Management*, 352, 120137.
- Lendra, L., et al. (2024). Aplikasi recycled concrete aggregate pada struktur beton bertulang di Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil*, 22(1), 56 - 68.
- Li, X., Xu, J., & Su, Y. (2025). Research Status and Emerging Trends in Green Building Materials Based on Bibliometric Network Analysis. *Buildings*, 15(6), 0884.

- Liang, L., Wen, B., Xu, F., Yan, J., Yan, X., & Ramesh, S. (2021). Linking the Development of Building Sustainability Assessment Tools with the Concept Evolution of Sustainable Buildings. *Sustainability*, 13(22), 12909.
- Mahardika, M., et al. (2025). Hambatan strategis adopsi material hijau oleh kontraktor skala besar di Indonesia. *Jurnal Riset Konstruksi*, 11(3), 204 - 219.
- Mayhoub, M. G. M., Sayad, Z. E. E., Ali, A. M., & Ibrahim, M. G. (2021). Assessment of Green Building Materials' Attributes to Achieve Sustainable Building Façades Using AHP. *Buildings*, 11(10), 0474.
- Nayem, N. H. (2023). The Potential of Sustainable Materials for Green Building Practices. *American Journal of Civil Engineering*, 11(3), 11.
- Nurhayati, E. (2022). Eksplorasi bambu laminasi sebagai carbon sink konstruksi gedung perkotaan. *Jurnal Arsitektur Keberlanjutan*, 8(2), 112 - 126.
- Pujawan, I. N. (2021). Circular Supply Chain Management in Construction. *Jurnal Manajemen dan Kewirausahaan*, 23(1), 12 - 24.
- Rahman, A. M., Haque, S., Athikesavan, M., & Kamaludeen, M. B. (2023). A review of environmental friendly green composites: production methods, current progresses, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(7), 16905 - 16929.
- Ranganath, S., et al. (2024). Carbon reduction tracking through structured material efficiency: A high-rise case study. *Journal of Building Engineering*, 84, 108422.
- Recio-Colmenares, C. L., Flores-Gómez, J., Rivera, J. P. M., Hinestroza, H. P., & Sulbarán-Rangel, B. (2025). Green Materials for Water and Wastewater Treatment: Mechanisms and Artificial Intelligence. *Processes*, 13(2), 0566.
- Rohmah, M. (2024). Urgensi kerangka kerja Life Cycle Assessment (LCA) pada material perumahan formal di Indonesia. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 16(1), 78 - 92.
- Sahlol, D. G., Elbeltagi, E., El-Zoughiby, M. E., & Elrahman, M. (2020). Sustainable building materials assessment and selection using system dynamics. *Journal of Building Engineering*, 32, 101978.
- Saini, H., & Ledwani, L. (2024). A review on application of green materials in different construction systems, their processing, surface modification, testing and certification. *MRS Energy & Sustainability*, 11(2), 267 - 303.
- Situmorang, R. (2023). Implementasi BIM dalam Manajemen Material Hijau. *Jurnal Infrastruktur*, 9(1), 34 - 45.
- Sujatha, S., & Sivarethinamohan, R. (2021). Broad-Spectrum of Sustainable Living Management Using Green Building Materials - An Insights. *Recent Advancements in Geotechnical Engineering*, 1644901618.
- Supriadi, A. (2019). Analisis emisi angkutan material lokal pada proyek infrastruktur. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1), 45 - 54.
- Trends in Finance and Economics. (2024). Role of Green Building Materials in Reducing Environmental and Human Health Impacts Using VIKOR Method. *Trends in Finance and Economics*, 2(3), 1.
- Wibowo, A., et al. (2020). Analisis Keberlanjutan Material Konstruksi Lokal. *Jurnal Teknik Sipil*, 27(3), 231 - 242.
- Wang, Z. H. (2023). A Survey of Factors and Life Cycle Assessment in Selection of Green Construction Materials. *Journal of Computational Intelligence in Materials Science*, 3(1), 003.
- Wang, X. (2025). Application of Environmentally Friendly Building Materials in Urban Construction. *Applied and Computational Engineering*, 20030.
- Wang, Y., Li, D., Wang, W., Feng, H., & Liu, X. (2025). Synergistic evolution of multi-stakeholder strategies in the promotion of green building materials, quadrilateral

- evolutionary game and system dynamics. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 12-2024-1701.
- Widodo, S. (2024). Design for Deconstruction: Tantangan Konstruksi di Masa Depan. *Jurnal Arsitektur dan Perencanaan*, 12(1), 15 - 29.
- Yahia, A. K. M., Rahman, M. M., Shahjalal, M., & Morshed, A. (2024). Sustainable Materials Selection in Building Design and Construction. *International Journal of Science and Engineering*, 1(4), 199.