



REKAYASA MATERIAL INFRASTRUKTUR BERKELANJUTAN: PENDEKATAN LIFE-CYCLE DAN INOVASI MATERIAL

Diterima:
05 Desember 2025
Direvisi:
20 Desember 2026
Diterbitkan:
05 Januari 2026

Gamaliel K. Jarek, Slamet Riyadi
Dosen dan Mahasiswa Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Doktor Nugroho Magetan
Email: gamalielkjarek@gmail.com

Abstrak

Gamaliel K. Jarek & Slamet Riyadi. 2026. Rakayasa Material Infrastruktur Berkelanjutan : Pendekatan Life-Cicle dan Inovasi Material.

Rekayasa material infrastruktur berkelanjutan menjadi pendekatan penting dalam menjawab tantangan pembangunan modern yang menuntut efisiensi, ketahanan, dan keberlanjutan lingkungan. Buku ajar ini mengkaji pengembangan serta pemilihan material untuk berbagai infrastruktur seperti jalan, jembatan, bangunan, dan sistem geoteknik dengan menekankan pengurangan dampak lingkungan tanpa mengorbankan mutu dan keselamatan.

Metode yang digunakan mengacu pada pendekatan *life-cycle thinking* dengan memanfaatkan alat analisis berbasis bukti seperti Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Product Declaration (EPD), dan Life Cycle Cost (LCC). Pendekatan ini memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap kinerja material dari aspek lingkungan, ekonomi, dan teknis.

Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan material rendah emisi, strategi sirkular, serta integrasi teknologi digital dalam pengendalian mutu mampu meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan infrastruktur. Dengan demikian, rekayasa material berkelanjutan menjadi kunci dalam mendukung pembangunan infrastruktur yang tangguh dan ramah lingkungan.

Kata kunci: material berkelanjutan, LCA, LCC, infrastruktur, rekayasa material

I. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur memiliki posisi yang sangat penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi sekaligus meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Infrastruktur seperti jalan, jembatan, dan fasilitas publik lainnya berperan sebagai tulang punggung



dalam memperlancar distribusi barang, mobilitas manusia, serta integrasi wilayah. Namun demikian, di balik kontribusi tersebut, pembangunan infrastruktur seringkali menimbulkan tekanan lingkungan yang tidak dapat diabaikan, terutama dalam bentuk emisi karbon dan eksploitasi sumber daya alam untuk memenuhi kebutuhan material konstruksi (Zhang et al., 2025; Shukla & Kumar, 2024; Tazmeen & Mir, 2024; Qasim, 2025).

Tekanan lingkungan yang dihasilkan dari aktivitas konstruksi mendorong perlunya perubahan cara pandang dalam pembangunan. Paradigma lama yang berfokus pada efisiensi biaya dan kecepatan pembangunan mulai bergeser menuju pendekatan yang lebih berorientasi pada keberlanjutan. Hal ini menegaskan bahwa pembangunan tidak lagi dapat dipisahkan dari tanggung jawab terhadap lingkungan dan generasi mendatang.

Dalam konteks tersebut, konsep pembangunan berkelanjutan menjadi kerangka utama dalam merancang dan melaksanakan proyek infrastruktur. Pendekatan ini mengedepankan keseimbangan antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dengan demikian, setiap keputusan pembangunan harus mempertimbangkan dampaknya secara menyeluruh, tidak hanya dalam jangka pendek, tetapi juga dalam jangka panjang.

Salah satu aspek penting dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan adalah inovasi dalam pemilihan dan pengelolaan material konstruksi. Rekayasa material berkelanjutan hadir sebagai pendekatan yang mengintegrasikan kekuatan teknis material dengan pertimbangan dampak ekologisnya. Material yang digunakan tidak hanya harus memenuhi standar kekuatan dan ketahanan, tetapi juga mampu meminimalkan jejak lingkungan (Ligarda-Samanez et al., 2025; Xu et al., 2025; Liu & Zhao, 2024; Siddiqui et al., 2025).

Perubahan ini juga ditandai dengan pergeseran fokus dari biaya awal menuju analisis biaya sepanjang siklus hidup material. Pendekatan ini menekankan bahwa material dengan biaya awal yang lebih tinggi tidak selalu kurang efisien, karena dalam jangka panjang dapat memberikan penghematan melalui daya tahan yang lebih baik dan kebutuhan perawatan yang lebih rendah.

Konsep *life-cycle thinking* menjadi dasar dalam pendekatan tersebut. Evaluasi material dilakukan secara menyeluruh, mulai dari tahap produksi, distribusi, penggunaan,



hingga tahap akhir berupa daur ulang atau pembuangan. Pendekatan ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dampak material terhadap lingkungan dan ekonomi (Zhang et al., 2025; Tazmeen & Mir, 2024; Qasim, 2025).

Penerapan *life-cycle thinking* juga berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Dengan memilih material yang memiliki umur pakai lebih panjang dan membutuhkan perawatan minimal, penggunaan sumber daya alam dapat ditekan secara signifikan. Hal ini tidak hanya berdampak pada efisiensi biaya, tetapi juga mendukung pelestarian lingkungan.

Selain pendekatan konseptual, perkembangan teknologi juga memainkan peran penting dalam mendukung rekayasa material berkelanjutan. Inovasi material seperti penggunaan bahan tambahan pengganti semen, material daur ulang, serta teknologi konstruksi modern memungkinkan terciptanya material yang lebih ramah lingkungan tanpa mengurangi kualitas strukturalnya (Ligarda-Samanez et al., 2025; Hoy et al., 2024; Liu & Zhao, 2024).

Digitalisasi dalam sektor konstruksi turut memperkuat implementasi keberlanjutan. Pemanfaatan teknologi seperti Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) memungkinkan pemantauan kondisi infrastruktur secara real-time. Data yang dihasilkan dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemeliharaan serta memperpanjang umur layanan infrastruktur.

Selain itu, pendekatan ekonomi sirkular menjadi strategi penting dalam mengurangi dampak lingkungan dari sektor konstruksi. Konsep ini menekankan penggunaan kembali material, pengurangan limbah, serta optimalisasi siklus hidup sumber daya. Dengan demikian, limbah konstruksi tidak lagi dipandang sebagai akhir dari siklus material, tetapi sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali.

Secara keseluruhan, integrasi antara inovasi material, pendekatan *life-cycle thinking*, dan pemanfaatan teknologi digital menjadi kunci dalam mewujudkan pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan. Transformasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan kualitas infrastruktur, tetapi juga memperkuat komitmen terhadap perlindungan lingkungan. Dengan pendekatan yang komprehensif dan adaptif,



pembangunan infrastruktur di masa depan diharapkan mampu menjawab tantangan perubahan iklim dan kebutuhan urbanisasi yang terus berkembang (Ligarda-Samanez et al., 2025; Kundu & Zhang, 2025; Shukla & Kumar, 2024; Siddiqui et al., 2025).

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis dengan berbasis studi literatur (*library research*). Data dikumpulkan dari berbagai sumber ilmiah yang relevan, termasuk buku ajar, jurnal internasional, serta standar teknis terkait rekayasa material dan infrastruktur berkelanjutan.

Pendekatan analisis yang digunakan adalah integratif, dengan menggabungkan konsep *life-cycle thinking* dan metode evaluasi berbasis bukti seperti Life Cycle Assessment (LCA), Environmental Product Declaration (EPD), serta Life Cycle Cost (LCC). Metode ini memungkinkan penilaian yang komprehensif terhadap dampak lingkungan dan biaya jangka panjang material.

Selain itu, kajian ini juga mengadopsi pendekatan aplikatif dengan mengaitkan konsep teoritis dengan praktik di lapangan, termasuk penggunaan teknologi digital seperti Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) dalam monitoring kualitas material dan kinerja infrastruktur.

III. TEMUAN DAN BAHASAN

1) Konsep dasar material berkelanjutan menempatkan pemilihan material sebagai proses yang tidak hanya mempertimbangkan kekuatan struktural, tetapi juga dampak lingkungan dan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Material yang dipilih harus mampu memenuhi standar teknis sekaligus meminimalkan emisi karbon sepanjang siklus hidupnya. Pendekatan ini mencerminkan pergeseran paradigma dari orientasi teknis semata menuju pendekatan yang lebih holistik dan berkelanjutan (Luthin et al., 2023; Colorado et al., 2020; Thakker & Bakshi, 2021; Giorgi, 2024).

2) Dalam konteks tersebut, pendekatan *life-cycle thinking* menjadi landasan utama



dalam pengambilan keputusan terkait material konstruksi. Evaluasi tidak lagi dilakukan secara parsial, tetapi mencakup seluruh tahapan, mulai dari produksi hingga akhir masa pakai material. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi dampak lingkungan secara komprehensif sekaligus memperkuat integrasi aspek teknis, ekonomi, dan sosial dalam perencanaan material (Luthin et al., 2023; Guerriero et al., 2024; Dervishaj & Gudmundsson, 2024; Giorgi, 2024).

3) Implementasi metode Life Cycle Assessment (LCA) dan Environmental Product Declaration (EPD) memberikan dasar kuantitatif dalam menilai dampak lingkungan material secara objektif. Melalui pendekatan ini, pemangku kepentingan dapat membandingkan berbagai alternatif material secara transparan dan berbasis data. Selain itu, digitalisasi semakin memperkuat akurasi serta efisiensi dalam proses pengumpulan dan analisis data lingkungan (Dervishaj & Gudmundsson, 2024; Giorgi, 2024; Hariyani et al., 2024; Mugion et al., 2025).

4) Dari sisi ekonomi, pendekatan Life Cycle Costing (LCC) menunjukkan bahwa keputusan pemilihan material tidak dapat hanya didasarkan pada biaya awal. Material dengan investasi awal yang lebih tinggi seringkali memberikan keuntungan jangka panjang melalui umur layanan yang lebih panjang dan kebutuhan pemeliharaan yang lebih rendah. Oleh karena itu, LCC menjadi instrumen penting dalam mendukung pengambilan keputusan yang lebih rasional dan berkelanjutan (Luthin et al., 2023; Thakker & Bakshi, 2021; Colorado et al., 2020).

5) Pengembangan material rendah emisi menjadi salah satu strategi utama dalam rekayasa material berkelanjutan. Penggunaan bahan seperti Supplementary Cementitious Materials (SCM), LC3, serta pengikat alternatif terbukti mampu mengurangi jejak karbon tanpa mengorbankan kualitas struktur. Inovasi ini mencerminkan upaya nyata dalam menurunkan dampak lingkungan sektor konstruksi sekaligus meningkatkan efisiensi sumber daya (Colorado et al., 2020; Morganti et al., 2023; Keles et al., 2025).

6) Selain itu, pendekatan ekonomi sirkular semakin mendapatkan perhatian dalam pengelolaan material konstruksi. Pemanfaatan material daur ulang seperti Reclaimed



Asphalt Pavement (RAP) dan agregat daur ulang menjadi solusi efektif dalam mengurangi limbah konstruksi. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam, tetapi juga menciptakan siklus material yang lebih efisien dan berkelanjutan (Hariyani et al., 2024; Guerriero et al., 2024; Morganti et al., 2023; Keles et al., 2025).

7) Penerapan spesifikasi berbasis kinerja juga memberikan fleksibilitas dalam pemilihan material. Pendekatan ini memungkinkan penggunaan material alternatif selama tetap memenuhi standar kinerja yang ditetapkan. Dengan demikian, inovasi dalam penggunaan material dapat terus berkembang tanpa mengurangi kualitas dan keamanan konstruksi (Dervishaj & Gudmundsson, 2024; Luthin et al., 2023).

8) Perkembangan teknologi digital turut memperkuat implementasi rekayasa material berkelanjutan. Pemanfaatan Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligence (AI) memungkinkan pemantauan kondisi infrastruktur secara real-time. Data yang diperoleh dapat digunakan untuk meningkatkan akurasi pengendalian mutu serta efisiensi pemeliharaan, sehingga mendukung pengelolaan siklus hidup material secara lebih adaptif (Hariyani et al., 2024; Keles et al., 2025; Giorgi, 2024).

9) Dalam praktiknya, pengadaan hijau serta sistem Quality Assurance dan Quality Control (QA/QC) menjadi komponen penting dalam memastikan keberlanjutan material yang digunakan. Pendekatan ini membantu menjaga konsistensi kualitas sekaligus memastikan bahwa setiap material yang digunakan telah memenuhi standar lingkungan yang ditetapkan (Morganti et al., 2023; Giorgi, 2024).

10) Secara keseluruhan, evaluasi *trade-off* antara kinerja teknis, biaya, dan dampak lingkungan menjadi dasar utama dalam pengambilan keputusan material. Pendekatan ini menuntut keseimbangan antara berbagai aspek sehingga menghasilkan solusi yang optimal dan berkelanjutan. Dengan integrasi yang tepat antara inovasi material, analisis siklus hidup, dan teknologi digital, pembangunan infrastruktur dapat diarahkan menuju sistem yang lebih efisien, adaptif, dan bertanggung jawab terhadap lingkungan (Luthin et al., 2023; Thakker & Bakshi, 2021; Mugion et al., 2025).



IV. PENUTUP

Simpulan

Rekayasa material infrastruktur berkelanjutan merupakan pendekatan strategis dalam mendukung pembangunan yang ramah lingkungan dan efisien. Pendekatan berbasis *life-cycle thinking* serta penggunaan metode analisis seperti LCA dan LCC terbukti mampu meningkatkan kualitas keputusan dalam pemilihan material.

Saran

Diperlukan peningkatan kapasitas sumber daya manusia dalam memahami konsep material berkelanjutan serta penggunaan alat analisis berbasis bukti. Selain itu, integrasi teknologi digital perlu terus dikembangkan dalam sistem pengelolaan infrastruktur.

Rekomendasi

Pengembangan kebijakan pengadaan hijau serta standar nasional terkait material berkelanjutan perlu diperkuat. Kolaborasi antara akademisi, praktisi, dan pemerintah juga menjadi kunci dalam mendorong implementasi infrastruktur berkelanjutan secara luas.

References

- Abed, A., et al. (2018). Design considerations of high RAP-content asphalt produced at reduced temperatures. *Materials and Structures*, 51(4), 1–16. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1220-1>
- Agency, C. (2016). Pavement inspection guideline.
- Akbar, A., et al. (2025). Life cycle assessment for sustainable civil infrastructure with standardized functional units and boundaries. *Materials Today Sustainability*, 32, 101232. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101232>
- Al-khateeb, G. G., et al. (2024). And mixtures.
- Alfantazi, A., & Yi, Y. (2022). Nuclear reactor containment building concrete.
- Almuaythir, S., et al. (2024). Sustainable soil stabilization using industrial waste ash. *Heliyon*, 10(20), e39124. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39124>
- Amran, M., et al. (2021). Palm oil fuel ash-based eco-efficient concrete.
- Amsalu, T., et al. (2023). Effects of supplementary cementitious materials. *Heliyon*, 9.



- Asia, E. (2022). Forecast of biomass demand potential in Indonesia.
- Barbhuiya, S., & Bhusan, B. (2023). Life cycle assessment of construction materials. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02326.
- Barbhuiya, S., et al. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859.
- Charlotte, L., et al. (2022). Building design strategies for circular economy.
- Chauhan, C., et al. (2022). Supply chain collaboration and SDGs. *Journal of Business Research*, 147, 290–307.
- Chen, Z., et al. (2025). Drainage consolidation technology for marine soft soil.
- Cheng, H., et al. (2022). Fatigue test setups for asphalt mixtures. *Journal of Road Engineering*, 2(4), 279–308.
- Cheng, W., et al. (2025). Green building decision-making model. *Applied Water Science*, 15(6).
- Chiara, M., et al. (2024). Bio-based rejuvenators in asphalt. *Journal of Road Engineering*, 4(3), 282–291.
- Dhandapani, Y., et al. (2024). Calcined clay cement systems review.
- Directorate, D. (2021). Working party on national accounts.
- Finamore, M., & Oltean-Dumbrava, C. (2024). Circular economy in construction. *Heliyon*, 10(15), e34647.
- Funda, Z., et al. (2025). Recycled aggregate concrete review.
- Guo, Z., et al. (2024). Cathodic protection in marine environments.
- Gusnadi, Z., et al. (2024). Soil improvement analysis.
- Hamedi, G. H., et al. (2025). Moisture effects on asphalt mixture.
- Hamel, P., & Hamel, P. (2022). Blue-green infrastructure in Southeast Asia.
- He, Z., et al. (2024). Bio-based rejuvenator performance.
- Hoy, M., et al. (2024). Recycled construction materials innovation. *Frontiers in Built Environment*.
- Hu, W., et al. (2024). Cement-stabilized soil properties.
- Hu, Y., et al. (2024). Bio-rejuvenator optimization. *Construction and Building Materials*, 433, 136761.
- Jin, C. (2025). Life cycle assessment of engineered wood.
- Jungclaus, M. A., et al. (2024). Carbon emissions of concrete mixtures. *Resources, Conservation & Recycling*, 206.
- Kanyilmaz, A., et al. (2023). Steel reuse in construction. *International Journal of Steel*



Structures, 23(5), 1399–1416.

- Kermani, B., et al. (2018). Geotextile in pavement systems.
- Kiersnowska, A., & Zi, Z. (2023). Sustainability of geosynthetics.
- Kneifel, J., & Webb, D. (2025). Federal energy management program.
- Kostani, K. (2020). Wood biomass fly ash composites.
- Kumar, P., et al. (2024). Urban heat mitigation. *The Innovation*, 5(2), 100588.
- Kundu, R., & Zhang, X. (2025). Multimaterial topology optimization.
- Kurnia, A., et al. (2025). Geotechnical solutions for soft soils.
- Leading, C., et al. (2021). Urban nature-based solutions.
- Li, P., et al. (2025). Bio-oil rejuvenation in asphalt.
- Ligarda-Samanez, C., et al. (2025). Technological innovations in sustainable civil engineering. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su17198741>
- Liu, X., & Zhao, A. (2024). Sustainability in construction and environmental management.
- Ma, J., et al. (2025). Durability deterioration of concrete structures.
- Mahdi, S. N., et al. (2024). Life cycle cost of pavements.
- Maj, I., et al. (2025). Biomass ash composition review.
- Manzoor, S. O., & Yousuf, A. (2020). Soil stabilization with lime.
- Mohammad, L. N., et al. (2025). Moisture sensitivity of asphalt mixtures.
- Nadirah, A., et al. (2025). Palm oil fuel ash in concrete.
- Olsson, J. A., et al. (2025). Sustainability comparison of concrete.
- Omenogor, K. O., et al. (2025a). Pavement design method.
- Omenogor, K. O., et al. (2025b). Pavement design method.
- Ostapska, K., et al. (2024). Design for disassembly.
- Papamichael, I., et al. (2023). Construction waste circular economy.
- Patah, D., & Dasar, A. (2022). Rice husk ash in concrete.
- Prata, R., et al. (2020). Sustainability indicators for infrastructure.
- Qasim, M. (2025). Sustainability in civil engineering.
- Report, F. (2018). High RAP asphalt mixes.
- Report, G. S. (2024). Construction sustainability report.
- Roads, M. (2020). Pavement rehabilitation.
- Sengoz, B., et al. (2017). Warm mix asphalt performance.



- Shukla, R., & Kumar, S. (2024). Sustainable construction materials.
- Siddiqui, A., et al. (2025). Sustainable concrete solutions.
- Souayfan, F., et al. (2024). Alkali-activated materials.
- Spross, J., et al. (2022). Geotechnical risk management.
- Subpa-asa, P., et al. (2022). Chloride penetration in cement.
- Supunsala, S., et al. (2023). Biochar in concrete.
- Takagi, H., et al. (2017). Coastal dyke effectiveness.
- Tazmeen, T., & Mir, F. (2024). Green construction materials review.
- Thomas, B. S., et al. (2021). Sugarcane bagasse ash in concrete.
- Touze, N. (2016). Geosynthetics in sustainability.
- Tukker, A., et al. (2023). Circular construction recommendations.
- Ur, A., et al. (2025). Material selection in construction.
- Verani, A., & Sihombing, R. (2023). Recycled asphalt performance.
- W, D. D., et al. (2025). Teknologi bahan beton abu sekam.
- Wang, J., et al. (2024). Bio-oil rejuvenation in asphalt.
- Wang, M., et al. (2025). Nature-based flood solutions.
- Wang, W., et al. (2022). Warm-mix asphalt performance.
- Wu, S., et al. (2024). CO₂ uptake by cement materials.
- Xu, L., et al. (2025). Green matrices for ECC.
- Yang, S. L., et al. (2021). Fatigue cracking in asphalt.
- Yuan, H., et al. (2024). Asphalt aging performance.
- Zarei, M., & Shahab, S. (2025). Nature-based solutions review.
- Zhang, R., et al. (2025). Low-carbon composite materials.
- Zhang, Y., et al. (2025). RAP variability evaluation.
- Zrt, E. (2018). Protection of steel structures.