



Inovasi Material Konstruksi Berwawasan Lingkungan

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

Gamaliel K. Jarek¹, Mudjiono²
Dosen dan Mahasiswa Prodi Fakultas Teknik
Universitas Doktor Nugroho Magetan
Email : gamalielkjarek@udn.ac.id

Abstract

This article is a concise adaptation of the academic book *Inovasi Material Konstruksi Berwawasan Lingkungan*. It is motivated by the construction sector's high greenhouse gas emissions, driven largely by ordinary Portland cement (OPC), which makes low-carbon material innovation an urgent priority.

The study applies a structured literature synthesis covering LC3 and other low-clinker cements, alkali-activated materials (AAM)/geopolymers, CO₂ mineralisation in cementitious systems, circular materials based on recycled aggregates and industrial residues, and engineered timber (e.g., CLT). The analysis evaluates environmental impacts, performance and durability, and adoption barriers related to standards, material quality, and transparent LCA/EPD verification.

The findings indicate that LC3 and modern blended cements are the most deployment-ready options, with an estimated potential to reduce emissions by approximately 30–40% compared with OPC. AAMs and CO₂ mineralisation may deliver greater reductions, but require stronger long-term durability evidence, clearer standardisation pathways, and robust verification; circular materials and CLT are effective when strict quality control and moisture–fire performance requirements are met.

In conclusion, near-term decarbonisation should prioritise scaling LC3/low-clinker solutions and optimised mix design under performance-based specifications. Recommendations include strengthening QA/QC, green procurement, and performance-based regulation; the implications are the need for standardisation, field validation, consistent LCA/EPD reporting, and resilient low-carbon supply chains.

Keywords: LC3; low-clinker cement; alkali-activated materials; CO₂ mineralisation; life-cycle assessment (LCA/EPD).



1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan infrastruktur dan bangunan mendorong kenaikan konsumsi material dalam skala besar, sehingga dampak lingkungan dari konstruksi menjadi isu strategis. Secara konseptual, dampak lingkungan bangunan terbagi menjadi **dampak terwujud (embodied impacts)**—yang mencakup ekstraksi bahan, produksi, transportasi, serta proses konstruksi—dan **dampak operasional** selama masa guna. Dalam beberapa konteks, seiring perbaikan efisiensi energi bangunan, proporsi dampak terwujud meningkat sehingga inovasi material menjadi tumpuan utama dekarbonisasi.

Salah satu fokus paling penting adalah semen dan beton. Produksi OPC menghasilkan emisi besar karena energi proses tinggi dan emisi proses dari kalsinasi batu kapur. Oleh sebab itu, inovasi material berwawasan lingkungan berkembang melalui beberapa jalur dominan:

1. **Pengurangan klinker** melalui semen campuran modern, termasuk LC3;
2. **Binder alternatif** seperti AAM/geopolimer;
3. **Pengikatan CO₂** melalui mineralisasi/karbonasi terakselerasi;
4. **Ekonomi sirkular** melalui agregat daur ulang dan pemanfaatan residu industri; dan
5. **Substitusi sistem struktural** dengan engineered timber seperti CLT pada tipologi bangunan yang sesuai.

Namun, adopsi inovasi tidak semata ditentukan oleh potensi pengurangan emisi. Faktor kunci lain adalah **performa struktural**, **durabilitas** dalam paparan lingkungan setempat (kelembapan tinggi, klorida pesisir, sulfat, dan temperatur), **kesiapan standar**, serta **verifikasi lingkungan** melalui LCA/EPD untuk mencegah klaim yang tidak terukur.

2. Metode



Naskah ini menggunakan metode **studi literatur dan sintesis kualitatif** terhadap publikasi ilmiah dan tinjauan (review) berkualitas dalam rentang sekitar satu dekade terakhir, dengan prosedur:

1. **Penentuan ruang lingkup inovasi:** LC3 dan semen campuran rendah klinker; AAM/geopolimer; teknologi karbonasi/mineralisasi CO₂; material sirkular (agregat daur ulang, residu industri); serta engineered timber (CLT).
2. **Klasifikasi mekanisme reduksi dampak:** substitusi klinker; substitusi bahan primer; pemanfaatan limbah; pengikatan CO₂ menjadi karbonat stabil; serta substitusi sistem struktural (mis. CLT menggantikan sebagian beton/steel pada tipologi tertentu).
3. **Ekstraksi isu kinerja dan durabilitas:** kekuatan awal dan akhir; transport ion klorida; karbonasi; ketahanan sulfat/asam; kebutuhan curing; dan sensitivitas terhadap variabilitas bahan baku.
4. **Analisis hambatan implementasi:** ketersediaan feedstock, kesiapan rantai pasok, standardisasi, serta kebutuhan pelaporan LCA/EPD untuk verifikasi klaim lingkungan.

3. Temuan dan Bahasan

3.1 Inovasi Binder Rendah Karbon: LC3 dan Semen Campuran Modern

LC3 (limestone-calcined clay cement) muncul sebagai kandidat utama semen rendah karbon yang relatif siap diskalakan. Review mutakhir menegaskan bahwa LC3 memadukan klinker, batu kapur, dan tanah liat terkalsinasi, sehingga menurunkan porsi klinker dan dapat mengurangi emisi CO₂ sekitar **30–40%** dibanding OPC, dengan tetap mempertahankan performa teknis yang kompetitif.

Dari perspektif performa dan durabilitas, LC3 dilaporkan memiliki prospek baik, termasuk ketahanan terhadap klorida pada kondisi tertentu, meskipun terdapat tantangan **variabilitas bahan baku** (terutama mineralogi tanah liat) dan kontrol proses (kualitas kalsinasi).

Bahasan implementatif. Dibandingkan teknologi yang “mengubah ekosistem” (misalnya binder non-OPC sepenuhnya), LC3 dan semen campuran rendah klinker cenderung lebih mudah masuk ke rantai nilai yang sudah ada (pabrik semen, batching



plant, prosedur konstruksi). Karena itu, strategi ini sering direkomendasikan sebagai langkah dekarbonisasi jangka dekat yang realistis—dengan catatan adanya penguatan standar mutu dan pengujian kinerja pada kondisi lokal.

3.2 Alkali-Activated Materials (AAM): Alternatif OPC dengan Sensitivitas Sistem

AAM/geopolimer menawarkan jalur reduksi emisi melalui penggantian OPC dengan prekursor aluminosilikat dan aktivator alkali. Kajian review menekankan bahwa durabilitas AAM tidak dapat digeneralisasi karena sangat ditentukan oleh komposisi prekursor, jenis/konsentrasi aktivator, rasio air, serta curing. Review yang menyoroti mekanisme dan mitigasi serangan **karbonasi** dan **penetrasi klorida** pada AAM menegaskan perlunya strategi desain material dan proses untuk menjaga ketahanan jangka panjang.

Di sisi lain, penelitian eksperimental terbaru terkait analisis transport klorida pada alkali-activated concrete (AAC) menunjukkan pentingnya metode uji yang andal serta hubungan mikrostruktur–transport yang kuat untuk memprediksi kinerja durabilitas.

Bahasan implementatif. AAM berpotensi besar pada aplikasi tertentu (misalnya lingkungan agresif tertentu), tetapi skala adopsi memerlukan: (i) standarisasi spesifikasi berbasis kinerja, (ii) data jangka panjang di lingkungan setempat, dan (iii) jaminan mutu feedstock/aktivator yang konsisten. Tanpa itu, risiko variabilitas kinerja akan menghambat penerimaan pasar.

3.3 Mineralisasi CO₂ dan Karbonasi Terakselerasi pada Sistem Semen-Beton

Teknologi pengikatan CO₂ dalam material semen-beton berkembang melalui beberapa pendekatan yang dipetakan oleh review: **mineral carbonation**, **accelerated CO₂ curing (ACC)**, **pre-carbonation**, dan **carbonation mixing**. Literatur menekankan bahwa mineralisasi CO₂ berpotensi mengubah CO₂ menjadi fase karbonat stabil, serta dapat dikombinasikan dengan limbah industri untuk memperkuat aspek sirkularitas.

Secara teknis, sejumlah studi melaporkan dampak positif pada kekuatan awal tertentu, namun manfaat bersihnya sangat bergantung pada sumber CO₂, energi proses, dan logistik. Karena itu, klaim “rendah karbon” pada beton ber-mineralisasi



CO₂ harus ditopang oleh kerangka verifikasi yang jelas melalui LCA/EPD serta pengujian performa dan durabilitas yang memadai.

Bahasan implementatif. Di wilayah yang memiliki akses CO₂ terpusat (misalnya industri tertentu) dan rantai pasok beton yang terorganisir, mineralisasi CO₂ dapat menjadi strategi unggulan. Namun, untuk konteks yang infrastrukturnya belum siap, jalur pengurangan klinker (LC3/semen campuran) kerap menjadi opsi yang lebih langsung.

3.4 Material Sirkular: Agregat Daur Ulang dan Residu Industri

Material sirkular berfokus pada pengurangan ekstraksi bahan primer dan pengurangan timbulan limbah, misalnya melalui agregat daur ulang dari limbah konstruksi dan pembongkaran. Tantangan utama adalah variabilitas mutu yang dapat memengaruhi performa dan durabilitas. Karena itu, penerapan yang bertanggung jawab memerlukan sistem pemilahan, pengolahan, dan pengujian mutu yang kuat, serta spesifikasi berbasis parameter kinerja (bukan sekadar “asal pakai limbah”).

Bahasan implementatif. Keberhasilan material sirkular sangat terkait dengan tata kelola: standar mutu agregat daur ulang, kebijakan pengadaan hijau, dan insentif pasar untuk konten daur ulang yang terverifikasi.

3.5 Substitusi Sistem Struktural: Engineered Timber dan CLT

Engineered timber seperti **cross-laminated timber (CLT)** semakin banyak dievaluasi dari perspektif LCA dan kinerja bangunan. Namun, literatur state-of-the-art menekankan bahwa keberhasilan CLT tidak hanya bergantung pada perhitungan jejak karbon, melainkan juga pada aspek teknis kritis: **kelembapan, kebakaran, akustik,** dan **kinerja energi** selubung bangunan.

Review teknis tentang CLT menegaskan pentingnya desain detail untuk mengendalikan kelembapan dan memastikan keamanan kebakaran, karena dua aspek ini sangat menentukan durabilitas dan penerimaan kode bangunan.

Bahasan implementatif. CLT cocok untuk tipologi tertentu (misalnya bangunan bertingkat rendah–menengah) dengan prasyarat: rantai pasok kayu bersertifikat, rekayasa kebakaran yang sesuai standar, desain kelembapan yang aman, serta transparansi LCA.



3.6 Tabel Komparatif Inovasi Material (Ringkas)

Inovasi	Mekanisme “Hijau”	Kekuatan/Performa	Isu Durabilitas Kunci	Kesiapan Implementasi
LC3 & semen campuran rendah klinker	Substitusi klinker; emisi turun $\pm 30-40\%$	Umumnya kompetitif	Variabilitas lempung & kontrol kalsinasi; uji lokal	Tinggi (near-term) (ScienceDirect)
AAM/geopolimer	Binder non-OPC; bergantung prekursor/aktivator	Bisa tinggi; sensitif komposisi	Karbonasi & klorida sangat bergantung sistem; perlu metode uji tepat	Sedang (butuh standar & data lapangan) (MDPI)
Mineralisasi/karbonasi CO ₂	Mengikat CO ₂ jadi karbonat stabil	Bisa menaikkan kekuatan awal tertentu	Verifikasi net benefit; pengaruh pada durabilitas harus diuji	Sedang (butuh infrastruktur CO₂) (ScienceDirect)
Agregat daur ulang	Kurangi bahan primer & limbah	Variatif; perlu kontrol mutu	Variabilitas kualitas, serapan, ITZ; QA/QC	Sedang-tinggi (bergantung sistem mutu)
CLT/engineered timber	Substitusi sistem; potensi reduksi emisi	Baik untuk tipologi tertentu	Kelembapan & kebakaran; kinerja selubung	Sedang (bergantung kode & rantai pasok) (Tandfonline)

4. Kesimpulan

Kesimpulan

Inovasi material konstruksi berwawasan lingkungan dalam satu dekade terakhir menunjukkan dua jalur transisi yang saling melengkapi, yaitu dekarbonisasi material dan sirkularitas/substitusi sistem. Jalur dekarbonisasi material terutama dilakukan melalui pengurangan klinker (misalnya LC3 dan semen campuran modern), pengembangan binder alternatif (AAM/geopolimer), serta penerapan pengikatan CO₂ melalui mineralisasi/karbonasi terakselerasi pada sistem semen-beton. Jalur sirkularitas dan substitusi sistem didorong oleh pemanfaatan agregat daur ulang/residu industri dan penggunaan engineered timber (misalnya CLT) pada tipologi



bangunan tertentu. Secara umum, keberhasilan inovasi tidak hanya ditentukan oleh penurunan emisi awal, tetapi juga oleh kemampuan material mempertahankan kinerja dan durabilitas sepanjang umur layan, sehingga pengurangan dampak benar-benar terjadi pada tingkat siklus hidup.

Bukti literatur menempatkan LC3 dan semen campuran modern sebagai strategi paling siap diterapkan dalam waktu dekat karena relatif kompatibel dengan praktik batching, pengecoran, dan sistem mutu yang sudah berjalan. Estimasi penurunan emisi sekitar 30–40% dibanding OPC menjadikan jalur ini realistis untuk skala luas, terutama bila didukung ketersediaan bahan baku (tanah liat yang sesuai, fasilitas kalsinasi, dan kontrol mutu). Namun demikian, variabilitas mineralogi tanah liat, konsistensi proses produksi, dan kesesuaian dengan standar nasional menjadi isu kunci yang harus dikelola agar performa antar batch stabil.

Di sisi lain, AAM dan mineralisasi CO₂ menawarkan potensi dampak yang lebih besar, tetapi menghadapi hambatan implementasi yang lebih kompleks. AAM memerlukan kendali yang ketat atas prekursor dan aktivator serta pembuktian durabilitas pada paparan lokal (terutama karbonasi dan klorida), sedangkan mineralisasi CO₂ menuntut kesiapan infrastruktur pasokan CO₂, energi proses yang efisien, dan metodologi verifikasi yang kuat. Karena itu, kedua teknologi ini lebih tepat diposisikan sebagai jalur percepatan bertahap: dimulai dari proyek percontohan terukur, penguatan standar, serta pemantauan kinerja lapangan yang sistematis.

Saran dan Implikasi

1. Saran untuk Praktik Proyek dan Industri

Prioritaskan solusi “siap pakai”: perluasan LC3/semen campuran rendah klinker dan optimasi desain campuran beton harus menjadi langkah awal dekarbonisasi karena manfaatnya dapat dicapai tanpa perubahan radikal di lapangan.

Terapkan spesifikasi berbasis kinerja: gunakan parameter kinerja yang terukur (kekuatan, permeabilitas, indikator durabilitas, dan persyaratan curing) agar inovasi material tidak terhambat aturan preskriptif yang terlalu sempit.



Bangun sistem QA/QC untuk material sirkular: agregat daur ulang dan residu industri harus masuk melalui skema pemilahan, pengolahan, dan pengujian mutu yang jelas untuk menekan risiko variabilitas.

Dorong desain berbasis durabilitas: material rendah karbon harus dipadukan dengan desain yang menargetkan umur layan panjang (misalnya pengendalian retak, cover yang memadai, proteksi lingkungan agresif), karena perpanjangan umur layan sering memberi dampak lingkungan yang besar secara siklus hidup.

2. Saran untuk Penelitian dan Pengujian

Perkuat bukti durabilitas jangka panjang: riset perlu diarahkan pada korelasi uji percepatan dengan kinerja lapangan, khususnya untuk paparan klorida pesisir dan karbonasi.

Standarisasi protokol uji AAM dan CO₂-mineralised systems: diperlukan keseragaman metode uji dan pelaporan agar data antar studi dapat dibandingkan dan digunakan sebagai dasar kode/standar.

Kembangkan basis data regional bahan baku: pemetaan kualitas tanah liat untuk LC3, ketersediaan prekursor AAM, serta karakteristik limbah konstruksi/residu industri akan meningkatkan kepastian pasokan dan konsistensi kinerja.

3. Implikasi Kebijakan dan Tata Kelola

Pengadaan hijau berbasis bukti: kebijakan pengadaan perlu mensyaratkan pelaporan LCA/EPD dan menetapkan ambang batas emisi material secara bertahap untuk menciptakan permintaan yang stabil.

Skema insentif dan de-risking: insentif fiskal/nonfiskal untuk material rendah karbon, serta mekanisme penjaminan risiko (misalnya melalui standar dan sertifikasi) dapat mempercepat adopsi.

Pembaruan regulasi menuju performance-based codes: pergeseran dari spesifikasi preskriptif ke berbasis kinerja akan membuka ruang inovasi sekaligus menjaga keselamatan struktural.

4. Implikasi Implementasi di Lapangan



Peta jalan adopsi bertahap: (a) skala luas untuk LC3/semén campuran modern, (b) proyek pilot terukur untuk AAM dan mineralisasi CO₂, (c) integrasi material sirkular dengan kontrol mutu, dan (d) penerapan CLT pada tipologi yang sesuai dengan desain kelembapan dan kebakaran yang ketat.

Transparansi verifikasi: seluruh klaim “rendah karbon” harus ditopang oleh LCA/EPD yang konsisten agar keputusan proyek berbasis data, bukan klaim pemasaran.

Jika Anda ingin, saya bisa buat subbagian “Saran Operasional” dalam format butir-butir yang langsung bisa ditempel ke naskah (misalnya: parameter uji minimum, indikator durabilitas yang disarankan, dan kerangka pelaporan LCA/EPD untuk proyek).

Daftar Pustaka

- A review of the performance, sustainable applications, and progress of LC3 research.* (2025). *Coatings*, 15(5), 611.
- Carbon dioxide sequestration in cementitious materials: A review of carbonation techniques and performance effects.* (2024). *Construction and Building Materials*.
- Carbon sequestration in cementitious systems through CO₂ mineral carbonation and in-situ mixing.* (2024). *Construction and Building Materials*.
- Chloride transport, binding, and microstructure in alkali-activated concrete: Improved testing and analysis.* (2025). *Cement and Concrete Research*.
- Fire performance of cross-laminated timber: A review of recent advances.* (2025). *Fire*, 8(10), 406.
- Limestone calcined clay cement (LC3): A review of materials, properties, production, and eco-impact.* (2025). *Cleaner Materials*.
- Ljunggren, F., Fredriksson, M., Johansson, N., & Sasic Kalagasidis, A. (2025). Cross-laminated timber: A state-of-the-art review of moisture, fire, acoustics, and energy-related aspects. *Wood Material Science & Engineering*.
- Potential for carbon sequestration in modern cementitious materials.* (2025). SpringerLink.



EICSTEM Journal
Journal of Engineering, Informatics,
Communication, Science & Technology,
Education, Christian)Theology and
Multidisciplinary Knowledge



Volume 1, Number 3, Januari 2026 Hal 144-153

P-ISSN: 2549-XXXX E-ISSN : 2549-XXXX

Open Access: <https://>

State-of-the-art review on limestone calcined clay cement (LC3) and its performance attributes. (2025). SpringerLink.

Zhang, X., Long, K., Liu, W., Li, L., & Long, W.-J. (2020). Carbonation and chloride ions' penetration of alkali-activated materials: A review. *Molecules*, 25(21), 5074.