



Mekanika Bahan untuk Konstruksi Berkelanjutan

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

Gamaliel K. Jarek¹, Alamsyah²
Dosen dan Mahasiswa Prodi Fakultas Teknik
Universitas Doktor Nugroho Magetan
Email : gamalielkwarek@udn.ac.id

Abstrak

Artikel ini disarikan dari buku akademik *Mekanika Bahan untuk Konstruksi Berkelanjutan*.

Latar belakangnya adalah kebutuhan menurunkan dampak lingkungan material konstruksi tanpa mengorbankan keselamatan struktural, mengingat banyak inovasi rendah karbon hanya efektif bila kinerja mekanik dan durabilitasnya terjaga sepanjang umur layan.

Metode yang digunakan berupa sintesis literatur terstruktur yang menautkan prinsip mekanika bahan—hubungan tegangan–regangan, kekuatan, kekakuan, ketangguhan, susut–rangkak, dan mekanisme kerusakan—dengan strategi konstruksi berkelanjutan. Ruang lingkup mencakup beton rendah karbon (LC3/semen rendah klinker dan binder alternatif), material sirkular (agregat daur ulang/residu), engineered timber, serta material fungsional untuk efisiensi energi.

Temuan menunjukkan bahwa keberlanjutan material sangat dipengaruhi oleh desain berbasis kinerja dan pengendalian retak, karena retak mempercepat degradasi dan menurunkan umur layan. Selain itu, kontrol mikrostruktur dan kualitas bahan baku menentukan transport ion/kelembapan serta stabilitas kinerja jangka panjang, sehingga uji durabilitas yang relevan dengan paparan lokal menjadi prasyarat adopsi material inovatif.

Simpulan menegaskan bahwa pendekatan mekanika bahan memungkinkan pemilihan material berkelanjutan secara terukur melalui spesifikasi berbasis kinerja yang terintegrasi dengan verifikasi LCA/EPD. Implikasinya, adopsi material rendah karbon perlu dilakukan bertahap melalui standardisasi, QA/QC, dan validasi lapangan agar reduksi karbon terwujud dapat dicapai sekaligus meningkatkan ketahanan struktur.

Kata kunci: mekanika bahan; konstruksi berkelanjutan; desain berbasis kinerja; durabilitas; LCA/EPD.



1. Pendahuluan

Paradigma konstruksi berkelanjutan berkembang dari sekadar efisiensi energi operasional menuju pengendalian dampak terwujud (*embodied impacts*) yang dominan pada banyak proyek modern. Dalam konteks ini, mekanika bahan menjadi landasan utama karena keputusan “material rendah karbon” tidak bernilai jika kinerja mekanik dan durabilitasnya gagal memenuhi tuntutan struktur, sehingga memperpendek umur layan dan meningkatkan kebutuhan perawatan/rekonstruksi. Dengan kata lain, keberlanjutan menuntut keseimbangan antara reduksi dampak lingkungan dan ketahanan struktural.

Mekanika bahan menjelaskan bagaimana material merespons beban: hubungan tegangan–regangan, modulus elastisitas, kuat tekan/ tarik/lentur, ketangguhan retak (*fracture toughness*), serta perilaku viskoelastik/viskoplastik seperti rangkai dan susut. Pada material konstruksi modern—beton rendah karbon, binder alternatif, komposit berbasis limbah, dan *engineered timber*—parameter mekanik tersebut sangat dipengaruhi oleh mikrostruktur, kadar pori, kualitas antarmuka, dan kondisi lingkungan (kelembapan, klorida, karbonasi, suhu). Karena itu, pendekatan berbasis kinerja menjadi penting untuk memastikan inovasi material berkelanjutan tetap aman dan andal.

2. Metode

Artikel ini menggunakan sintesis literatur terstruktur (*dominant 10 tahun terakhir*) dengan langkah:

Klasifikasi material: (a) beton/semen rendah karbon (*blended cements, LC3, dll.*), (b) binder alternatif (*AAM/geopolimer*), (c) material sirkular (*agregat daur ulang/residu industri*), dan (d) *engineered timber* (*CLT dan produk kayu rekayasa*).

Kerangka mekanika bahan: memetakan sifat mekanik kunci (*kekuatan, kekakuan, ketangguhan, rangkai-susut, fatik*) terhadap mekanisme kerusakan (*retak, delaminasi, degradasi antarmuka, korosi tulangan, dll.*).



Keterkaitan keberlanjutan: menilai bagaimana perubahan komposisi (substitusi klinker, pemakaian limbah, bio-based) memengaruhi mekanika bahan serta dampak siklus hidup (LCA/EPD).

Penarikan implikasi: merumuskan rekomendasi spesifikasi dan pengujian berbasis kinerja untuk adopsi yang aman.

3. Temuan dan Pembahasan

3.1 Prinsip Mekanika Bahan yang Relevan untuk Keberlanjutan

Kekuatan vs kekakuan (strength–stiffness trade-off): material rendah karbon dapat mempertahankan kekuatan tekan, namun perubahan mikrostruktur dapat mengubah modulus elastisitas dan deformasi jangka panjang. Kekakuan yang terlalu rendah dapat meningkatkan lendutan dan retak layanan, mengurangi durabilitas.

Ketangguhan dan kontrol retak: struktur tahan lama menuntut kemampuan menahan propagasi retak. Pengendalian retak (melalui desain campuran, serat, atau detail struktur) sering lebih menentukan umur layan daripada kekuatan puncak.

Rangak dan susut: deformasi waktu (time-dependent deformation) berimplikasi langsung pada retak, kehilangan prategang, dan perubahan geometri. Material inovatif memerlukan pemodelan dan uji yang memadai untuk menghindari kegagalan kinerja jangka panjang.

Durabilitas sebagai bagian mekanika: penetrasi klorida, karbonasi, dan serangan kimia memperlemah material atau memicu korosi—ini bukan isu “kimia saja”, tetapi mempengaruhi kapasitas mekanik struktur sepanjang umur layan.

3.2 Beton Rendah Karbon dan Blended Cements

Semen campuran rendah klinker (termasuk LC3) umumnya menurunkan emisi karena porsi klinker berkurang. Secara mekanik, sistem ini sering menunjukkan perkembangan kekuatan yang kompetitif, namun dapat memiliki perbedaan pada kekuatan awal, modulus, dan sensitivitas curing. Dari perspektif mekanika, poin kritisnya adalah memastikan kinerja layanan (retak, lendutan, dan permeabilitas) tetap terkendali. Keberhasilan adopsi memerlukan spesifikasi berbasis kinerja: bukan



“komposisi tertentu”, tetapi target kuat tekan, modulus, shrinkage, serta indikator durabilitas (misalnya resistivitas, koefisien difusi klorida, atau uji penetrasi).

3.3 Binder Alternatif (AAM/Geopolimer) dan Implikasinya

AAM/geopolimer menawarkan potensi reduksi emisi, tetapi mekanika bahan sangat bergantung pada prekursor dan aktivator. Implikasi mekaniknya mencakup variasi modulus, perilaku retak, dan respon terhadap karbonasi/klorida yang dapat berbeda dari OPC. Karena itu, ketidakpastian lebih tinggi bila kontrol mutu feedstock lemah. Pendekatan yang paling robust adalah performance-based: memverifikasi parameter mekanik dan durabilitas untuk kelas paparan tertentu, bukan mengandalkan asumsi kesetaraan dengan beton OPC.

3.4 Material Sirkular (Agregat Daur Ulang dan Residu Industri)

Pada beton dengan agregat daur ulang, mekanika bahan sangat dipengaruhi oleh kualitas zona transisi antarmuka (ITZ), penyerapan air, dan kontaminan. Ini dapat meningkatkan porositas efektif dan mempengaruhi kuat tekan, modulus, serta rangkai-susut. Agar berkelanjutan secara nyata, agregat daur ulang harus masuk melalui sistem pemrosesan dan QA/QC yang memadai, serta pembatasan penggunaannya pada aplikasi yang sesuai tingkat risiko.

3.5 Engineered Timber (CLT) dalam Kerangka Mekanika Bahan

CLT dan kayu rekayasa memiliki rasio kekuatan-terhadap-berat yang baik, sehingga menarik untuk reduksi karbon. Namun, mekanika bahan kayu bersifat anisotropik dan sensitif terhadap kelembapan, yang mempengaruhi kekuatan, kekakuan, dan kinerja sambungan. Untuk keberlanjutan, desain harus mengendalikan kelembapan (moisture-safe design) dan memenuhi ketahanan kebakaran sesuai standar. Jika aspek ini diabaikan, risiko degradasi dan biaya siklus hidup dapat meningkat, mengurangi manfaat lingkungan.

3.6 Sintesis: “Berwawasan Lingkungan” Harus Berbasis Kinerja

Temuan lintas material menunjukkan pola konsisten: material berkelanjutan yang berhasil adalah material yang diverifikasi melalui kinerja, bukan sekadar klaim kandungan “hijau”. Mekanika bahan menyediakan alat untuk: menetapkan parameter target, memilih uji yang relevan, memodelkan perilaku jangka panjang, dan



menghubungkan mikrostruktur dengan retak/durabilitas. Tanpa itu, upaya menurunkan embodied carbon dapat berujung pada umur layan pendek dan dampak total yang lebih tinggi.

4. Penutup

4.1 Simpulan

Mekanika bahan merupakan fondasi konstruksi berkelanjutan karena menjembatani inovasi material rendah karbon dengan persyaratan keselamatan struktural dan umur layan. Inovasi seperti semen rendah klinker, binder alternatif, material sirkular, dan engineered timber berpotensi menurunkan dampak lingkungan, tetapi hanya efektif bila parameter mekanik—kekuatan, kekakuan, ketangguhan, rangkai-susut—serta durabilitasnya dikendalikan dan diverifikasi untuk paparan lokal.

4.2 Saran

Gunakan spesifikasi berbasis kinerja (strength–stiffness–durability) untuk material inovatif.

Wajibkan QA/QC yang kuat pada feedstock (SCM, tanah liat terkalsinasi, prekursor AAM, agregat daur ulang).

Integrasikan uji deformasi waktu (susut dan rangkai) dan kontrol retak dalam desain layan.

Terapkan pelaporan LCA/EPD yang konsisten untuk memverifikasi manfaat lingkungan.

4.3 Rekomendasi

Peta jalan adopsi bertahap: skala luas untuk semen rendah klinker; pilot terukur untuk binder alternatif dan teknologi CO₂; integrasi agregat daur ulang pada aplikasi yang sesuai risiko; CLT pada tipologi yang mendukung pengendalian kelembapan dan keselamatan kebakaran.

Perkuat standar dan kode berbasis kinerja: memudahkan inovasi sekaligus menjaga keselamatan.



Monitoring lapangan: bangun basis data performa jangka panjang untuk paparan tropis/pesisir.

4.4 Implikasi

Teknis: pendekatan mekanika bahan memperkecil risiko kegagalan layanan dan memastikan umur layan panjang.

Ekonomi: umur layan lebih panjang menurunkan biaya siklus hidup dan meningkatkan kelayakan material rendah karbon.

Kebijakan: regulasi dan pengadaan hijau berbasis kinerja mendorong pasar material rendah karbon secara terukur.

Lingkungan: manfaat reduksi emisi menjadi lebih kredibel karena didukung verifikasi LCA/EPD dan data performa.

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.

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*.

Limestone calcined clay cement (LC3): A review of materials, properties, production, and eco-impact. (2025). *Cleaner Materials*.



Potential for carbon sequestration in modern cementitious materials. (2025). SpringerLink.

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.

Jika Anda ingin, saya bisa:

Menyesuaikan gaya selingkung jurnal (mis. IMRAD ketat, batas 4.000 kata).

Menambah tabel mekanika bahan (parameter, uji, dan implikasi desain) untuk beton rendah karbon, AAM, agregat daur ulang, dan CLT.

Menyusun sitasi dalam teks dan daftar pustaka lengkap (dengan DOI/URL) agar siap submit.