

Praktik terbaik material, desain, dan teknologi untuk *net-zero homes*

Sarju^{1,3*}, Ary Setyawan¹, Mochamad Agung Wibowo², Fajar Sri Handayani¹

¹Program Studi Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

²Program Studi Doktor Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

Net-zero housing

Whole life carbon (WLC)

Life cycle assessment (LCA)

Embodied carbon

Emission carbon

Corresponding Author:

Sarju

Sarju@janabadra.ac.id

Abstract

This systematic literature review synthesizes best practices in materials, design, and technologies to advance net-zero homes. Using PRISMA on Scopus-indexed studies (2021–2025), we screened 314 records and included 27 journal articles that report quantifiable LCA/WLC metrics. Results show integrated interventions—low-carbon/biogenic materials (cross-laminated timber, engineered bamboo, LC3, geopolymers), structure–envelope optimization (floor count, slab typology, window-to-wall ratio), and operational electrification/digitalization (photovoltaics, batteries, heat pumps, BIM/digital twin, prefabrication)—can reduce whole life carbon by 25–40% with current practices, ~59–80% by 2030, and ~85–93% by 2045. In nearly zero-energy contexts, embodied carbon increasingly dominates, underscoring early-stage material and structural decisions. Policy enablers—subsidies, standards, and market instruments (RMD/NMC) alongside the displacement factor for wood—accelerate adoption across supply chains. In tropical/humid climates, bio-based roof insulation, moisture control, effective ventilation, and distributed renewables are high-yield strategies. The review delivers an actionable map linking material–design–technology choices, guiding stakeholders to prioritize high-impact, cost-reasonable interventions toward verifiable net-zero housing.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Percepatan krisis iklim menempatkan sektor bangunan sebagai salah satu penggerak utama emisi, sehingga transformasi menuju *net zero homes* (hunian dengan emisi gas rumah kaca nol bersih sepanjang daur hidupnya) menjadi agenda strategis global (Röck et al., 2023). Kajian terkini menunjukkan bahwa walau efisiensi operasional bangunan terus membaik, porsi *embodied carbon* emisi yang timbul dari produksi material, konstruksi, logistik, dan akhir masa pakai semakin dominan, khususnya pada perumahan bertingkat dan sistem konstruksi padat material (Röck et al., 2020) (Ma et al., 2024). Dalam konteks rantai pasok konstruksi, pendekatan terintegrasi lintas tahapan (dari produksi material primer, komposisi

material/komponen, hingga desain struktur) telah memetakan lintasan pengurangan emisi yang realistis: sekitar 25-40% dengan teknologi yang tersedia saat ini (Habert et al., 2020), meningkat menjadi ±80% (Watari et al., 2022) (Olsson et al., 2023), dan berpotensi 85-93% menuju 2045.

Mewujudkan *net-zero homes* menuntut perspektif *Whole Life Carbon (WLC)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* untuk menyeimbangkan *trade-off* antara emisi operasional dan karbon terperangkap dalam material (Röck et al., 2023) (De Wolf et al., 2017). Bukti lintas negara di Eropa menunjukkan bahwa substitusi material rendah karbon (misalnya kayu rekayasa seperti CLT/LVL, serta elemen biogenik lain) tidak hanya menambah penyimpanan karbon

dalam bangunan, tetapi juga menggantikan bahan intensif karbon (beton, baja) dengan *displacement factor* sekitar 1,0–1,6 tCO₂ per m³ produk kayu, bergantung pada konteks dan teknologi (Younis & Dodoo, 2022). Selain itu, standard/sertifikasi bangunan hijau (LEED/BREEAM/Passivhaus) cenderung berkorelasi dengan penurunan intensitas energi operasional, terutama bila *envelope*, ventilasi, dan strategi desain pasif-aktif dirancang tepat (Mitchell & Natarajan, 2020).

Di sisi material, berbagai jalur dekarbonisasi telah tervalidasi oleh LCA: pengurangan klinker semen (mis. LC3), adopsi bahan beraktivasi alkali/geopolimer, serta komposit berbasis bio/insulasi biofiber, dengan penghematan jejak karbon yang konsisten bila aspek kinerja jangka panjang dan durabilitas dikelola (Shao et al., 2025)(Renuka et al., 2025)(Nikravan et al., 2023)(Cascione et al., 2025). Untuk kayu rekayasa, kajian menunjukkan penurunan WLC signifikan misalnya CLT/GluBam seraya menjaga kekuatan struktural dan isolasi termal, asalkan proses manufaktur distandarisasi dan kelembapan terkelola (Al-Najjar & Dodoo, 2023)(K. Liu et al., 2024).

Dari sisi desain struktural, pilihan sistem, jumlah lantai, massa termal, serta tipe pelat dan slab berkontribusi nyata terhadap intensitas karbon hunian. Analisis LCA terhadap puluhan bangunan menunjukkan bahwa penggantian baja dengan beton dapat menurunkan *carbon footprint intensity* struktur hingga ±24%, penguraian satu menara 8 lantai menjadi dua bangunan 4 lantai menurunkan intensitas ±36%, dan pemilihan tapak dengan tanah lebih padat/berbatuan menurunkan intensitas ±14%. Selain itu, pemilihan tipe slab (mis. *steel deck/waffle/precast/composite/post-tensioned*) memengaruhi beban material dan emisi. Slab lebih ringan umumnya menekan kebutuhan elemen struktural dan emisi total (Hart et al., 2021)(Happold, 2020).

Di sisi teknologi, peta jalan dekarbonisasi menekankan efisiensi dan elektrifikasi lintas rantai pasok (produksi semen/konkrit, baja,

insulasi, logistik), termasuk *carbon capture* pada klinker semen, penggunaan hidrogen untuk baja primer, elektrifikasi alat berat/pengangkutan, serta optimasi logistik dan manajemen di lokasi konstruksi. Implementasi bertahap skenario “BAT-Now”, 2025, 2030, hingga 2045 menunjukkan bahwa kombinasi efisiensi material, substitusi rendah karbon, dan transformasi energi sistemik adalah kunci untuk mendekati nol emisi pada skala perumahan (Habert et al., 2020)(Watari et al., 2022)(Olsson et al., 2023).

Namun, meski bukti praktik terbaik tersedia, pengetahuan terfragmentasi antara domain material, desain, dan teknologi kerap menyulitkan perumus kebijakan, perancang, dan pelaksana proyek perumahan untuk mengidentifikasi keputusan paling berdampak (dan kontekstual) menuju *net-zero*. Banyak studi menyoroti perlunya kolaborasi hulu-hilir, indikator kinerja yang mendorong efisiensi material (mis. rasio klinker/binder dalam beton), serta instrumen kebijakan yang mengakselerasi adopsi bahan biogenik dan sirkularitas. Selain itu, perbedaan tradisi, budaya, regulasi, dan pasokan material antarwilayah (termasuk iklim tropis/lembap) memengaruhi strategi optimal pada level hunian (De Wolf et al., 2017)(Lützkendorf & Balouktsi, 2022).

Artikel ini menyintesis praktik terbaik material, desain, teknologi untuk *Net Zero Homes* melalui SLR publikasi Scopus (2021–2025). Cakupan: (1) strategi material rendah karbon/biogenik dan *displacement factor*; (2) desain arsitektural/struktural penurun WLC lintas tipologi; (3) teknologi dan kebijakan dekarbonisasi (elektrifikasi, CCS, optimasi logistik, sertifikasi hijau); (4) implikasi konteks lokal dan kebutuhan kolaborasi. Kontribusi: kerangka keputusan yang menghubungkan material, desain, teknologi untuk memprioritaskan intervensi berimpact tinggi dan berbiaya wajar, dari substitusi berbasis LCA/WLC, optimasi elemen, hingga elektrifikasi/energi bersih, serta peta praktik terbaik bagi perancang, kontraktor, pengembang, dan pembuat kebijakan.

Metodologi

Jenis Penelitian

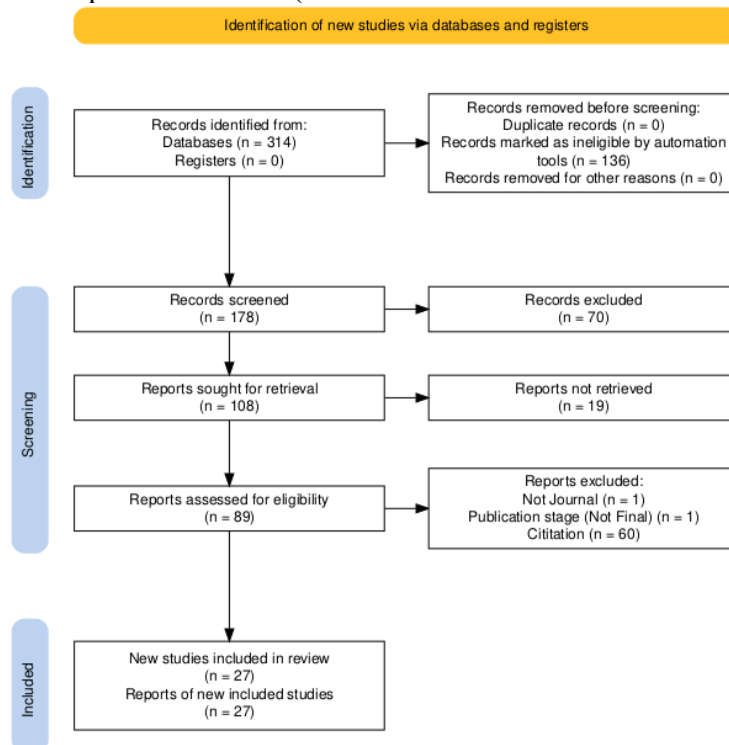
Metodologi tinjauan sistematis ini diselenggarakan dengan judul Praktik Terbaik Material, Desain, dan Teknologi untuk *Net Zero Homes* dan berfokus pada pengurangan *Whole Life Carbon (WLC)* melalui LCA, substitusi material biogenik, optimalisasi keputusan desain struktural, serta adopsi teknologi operasional (HEMS/IoT) dan transformasi energi hulu (CCS, hidrogen, elektrifikasi). Kerangka PRISMA digunakan untuk memastikan tahapan identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi berlangsung transparan dan tertelusur.

Pencarian literatur dilakukan pada Scopus (2021–2025) menggunakan kombinasi kata kunci/Boolean yang mencakup aspek material, desain, teknologi, dan WLC/LCA. Istilah diperluas ke tipologi (*single/multifamily*), tipe slab (*steel deck, waffle, composite, post-tensioned*), dan konteks iklim (*tropical/humid*). Rasional kata kunci merujuk lintasan penurunan emisi (25–

40% saat ini; $\pm 80\%$ 2030; $\pm 85\text{--}93\%$ menuju 2045) serta indikator kebijakan *displacement factor (DF)* dan *Non-biogenic Material Comparator (NMC)*.

Penyaringan bertahap menghasilkan: 314 artikel teridentifikasi → 89 relevan → 86 artikel jurnal final → 27 artikel diinklusi untuk sintesis. Kriteria kualitas mencakup kejelasan metode LCA/WLC, keberadaan indikator kuantitatif ($\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$, $\text{DF tCO}_2\text{/m}^3$), fokus intervensi (material/desain/teknologi), dan prioritas studi dengan ≥ 10 sitasi. Alasan eksklusi utama: (1) studi nonhunian, (2) sistem batas LCA tidak jelas, (3) tidak ada indikator WLC kuantitatif, dan (4) publikasi opini/kebijakan tanpa metode teruji. Seluruh keputusan penyaringan dan daftar eksklusi didokumentasikan dalam lampiran metodologi.

Sebagai rujukan visual proses, Gambar 1 berikut merepresentasikan diagram alur PRISMA yang menggambarkan jumlah studi pada setiap tahap serta keluaran akhirnya:



Gambar 1. Diagram Alur PRISMA Tinjauan Sistematis

Pada tahap ekstraksi data, dua penelaah independen menghimpun variabel inti: karakteristik studi (tahun, negara/iklim, tipologi), material (SCM/LC3, geopolimer, EWP/CLT/LVL, bambu rekayasa, insulasi biogenik) beserta metrik dampak (DF tCO_2/m^3 , perubahan $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$), desain/struktur (sistem penahan beban, jumlah lantai, tipe *slab steel deck*, *waffle composite*, *post-tensioned* serta *envelope*/massa termal) dengan pengaruh terhadap WLC, teknologi (HEMS/IoT, *smart thermostat*, elektrifikasi alat/transport, CCS klinker, hidrogen untuk baja primer) dan dampaknya (% pengurangan emisi, intensitas energi), serta kebijakan/pasar (LEED/BREEAM/Passivhaus; RMD/NMC; Matriks BCG) termasuk relevansi untuk iklim tropis/lembap. Ketidaksepakatan diselesaikan melalui konsensus, dengan penelaah ketiga bila diperlukan.

Penilaian kualitas menitikberatkan pada kejelasan sistem batas LCA (A1–A3, A4–A5, operasi, akhir masa pakai jika tersedia), keterukuran indikator (DF, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$, intensitas energi), kontekstualitas (iklim, pasokan, regulasi), dan transparansi pelaporan. Risiko bias (seleksi, publikasi, pelaporan) diatasi melalui triangulasi sumber dan *vote counting* atas konsistensi arah dampak lintas studi.

Sintesis dilakukan secara naratif berstruktur dalam tiga ranah Material–Desain–Teknologi dan klaster Kebijakan/Konteks, dipetakan terhadap lintasan waktu (BAT-Now, 2025, 2030, 2045) untuk menilai progres realistis ($\pm 25\text{--}40\%$; $\pm 60\text{--}80\%$; $\pm 85\text{--}93\%$) dan memilih intervensi sesuai fase. Terdapat analisis subkelompok (tipologi, tipe *slab*, jumlah lantai, iklim, sertifikasi hijau) serta pemetaan indikator kebijakan (DF, rasio klinker/binder per $\text{m}^3\text{-MPa}$, intensitas energi) guna mendorong pengadaan dan pembiayaan hijau.

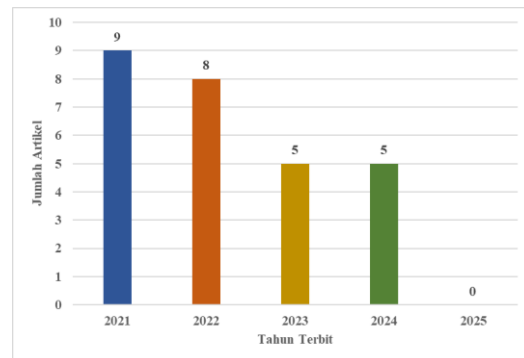
Heterogenitas antarkonteks ditangani melalui normalisasi kualitatif serta pelaporan kisaran dampak; keterbatasan dominasi bukti Eropa diimbangi dengan interpretasi untuk tropis/lembap (adaptasi selubung,

ventilasi/bukaan, standardisasi EWP/bambu, indikator berbasis WLC/DF).

Hasil dan Pembahasan

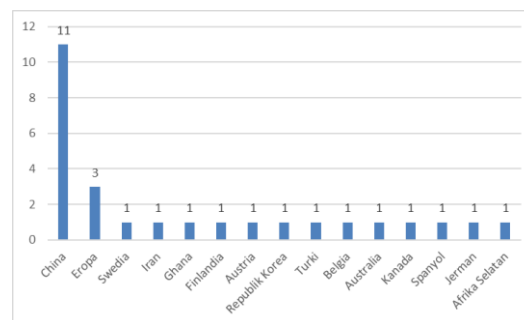
1. Karakter dan Sebaran Artikel yang Direview

Dari 27 artikel yang lolos seleksi akhir distribusi tahunnya adalah: 2021: 9 artikel, 2022: 8 artikel, 2023: 5 artikel, 2024: 5 artikel yang di visualisasikan pada gambar 2.



Gambar 2. Distribusi publikasi pertahun

Studi mencakup Eropa, Asia (Cina, Korea), Afrika (Ghana, Senegal, Afrika Selatan), Australia (Perth & Southwest WA), Amerika Utara (Toronto, Kanada), serta multi-iklim tropis/temperate (Belgia, Prancis, AS vs Kamerun, Senegal, Madagaskar). Sebaran ini memberi representasi lintas konteks iklim, kebijakan, tipologi hunian, dan standar konstruksi.



Gambar 3. Distribusi artikel berdasarkan wilayah

Beberapa artikel inti terbit di *Sustainable Cities and Society* (Elsevier), *Developments in the Built Environment* (Elsevier), dan *Journal of Building Engineering* (Elsevier) menjadi rujukan kuat untuk kebijakan kayu/EWP,

skenario nilai rantai dekarbonisasi, serta LCA struktural hunian.

Tabel 1. Jurnal-jurnal yang paling banyak dikutip dan publikasinya

Jurnal	Jumlah Publikasi
Sustainable Cities and Society	3
Journal of Building Engineering	4
Applied Energy	3
Journal of Cleaner Production	2
Building and Environment	3
Buildings	4
Energy & Buildings	3
Cleaner Materials	1
Energies	2
Sustainable Production and Consumption	1
Developments in the Built Environment	1

Sumber : Scopus

2. Sintesis Temuan Berdasarkan Klaster

1) Material rendah karbon dan biogenik

Inventori kayu konstruksi di Eropa menunjukkan variasi intensitas penggunaan dan kematangan pasar antarnegara. Pemetaan atas 30 negara dengan klasifikasi fase pasar berbasis Matriks BCG menempatkan *displacement factor (DF)* produk kayu umumnya berkisar 1,0–1,6 tCO₂/m³ sebagai dasar manfaat substitusi terhadap beton dan baja dalam menekan karbon terperangkap. Pada tingkat kebijakan, usulan *Renewable Material Directive (RMD)* dan *Non-biogenic Material Comparator (NMC)* di Uni Eropa memperkuat kerangka adopsi kayu dengan menyediakan tolok banding yang lebih adil bagi material *non-biogenik* (Sikkema et al., 2023).

Di sisi biogenik lain, bambu rekayasa (GluBam) pada konteks pedesaan Cina menunjukkan *Whole Life Carbon (WLC)* sekitar 30,4% lebih rendah daripada beton bertulang, dengan karbon biogenik negatif (−261 kgCO₂e/m³) pada fase produksi; kinerja operasionalnya turut diuntungkan oleh sifat isolasi termal (Y. Liu et al., 2023). Menurut survei profesional di Perth dan Southwest WA, tanah rammed (tanah tampak) sangat disukai karena massa termal dan kualitas

estetika. Namun, mereka menghadapi masalah karena biaya awal yang relatif tinggi, tidak ada standar nasional, dan kekurangan pengetahuan teknis (Strazzeri & Karrech, 2023). Di Afrika Barat (Ghana–Senegal), penggantian atap logam dengan *typha straw* dan komposit *clay typha* menurunkan energi operasional, terutama pada tipologi komunal, serta menegaskan pengaruh tipologi, massa termal, dan kepadatan hunian terhadap WLC (Lokko et al., 2024). Dari sisi manufaktur, skema “*future materials*” elektrifikasi proses, bioenergi, dan CCS di Tyrol (Austria) dapat menurunkan emisi terkandung hingga 19% dan terbukti lebih efektif dibanding sekadar peningkatan penggunaan kayu (maksimum 7,6%), khususnya setelah 2040 (Alaux et al., 2023).

Implikasi: Substitusi material biogenik dan pengurangan klinker menekan embodied carbon; keberlanjutan memerlukan elektrifikasi, bioenergi, CCS, dan standar mutu-durabilitas terukur lintas tipologi.

2) Desain struktural dan selubung bangunan

Keputusan mengenai sistem struktur dan konfigurasi tapak terbukti berpengaruh signifikan terhadap *whole life carbon (WLC)*. Analisis *life cycle assessment (LCA)* pada 45 bangunan hunian di Iran menunjukkan bahwa substitusi struktur baja menjadi beton berasosiasi dengan penurunan intensitas karbon sebesar 24,46%. Selanjutnya, redistribusi massa bangunan melalui pemecahan satu menara delapan lantai menjadi dua bangunan masing-masing empat lantai menurunkan intensitas karbon sebesar 35,94%, sedangkan pemilihan lahan dengan kondisi tanah padat atau berbatuan berkontribusi pada penurunan sekitar 14%. Variasi sistem pelat lantai, misalnya *steel deck* atau *waffle slab* dibandingkan pelat *composite* atau *post-tensioned* juga memengaruhi kebutuhan material dan total emisi siklus hidup (Hosseini & Faghani, 2021).

Pada ranah selubung bangunan, analisis sensitivitas di Jinan (Tiongkok) menunjukkan bahwa *window-to-wall ratio (WWR)* yang optimal untuk pencapaian target rendah

karbon cenderung lebih kecil dibandingkan WWR optimal untuk tujuan konservasi energi. Di samping itu, geometri bukaan berpengaruh terhadap performa karbon: jendela berformat persegi panjang dengan rasio aspek 3:4 lebih efektif dalam menurunkan emisi CO₂ dibandingkan jendela berbentuk lingkaran, sementara tinggi jendela menunjukkan pengaruh yang kuat di sekitar titik WWR optimum (S. Li et al., 2021). Dari perspektif operasi, apartemen bertingkat di Spanyol (luas rata-rata 73,1 m² bersih) memiliki WLC dasar sebesar 1.944 kgCO₂e/m², dengan kontribusi *operational carbon* (OC) 69,2% dan *embodied carbon* (EC) 30,8%. Pada skenario *nearly zero-energy building* (NZEB), WLC turun 63,4%; namun, proporsi EC dapat meningkat hingga 71% dari total *global warming potential* (GWP), menegaskan urgensi strategi reduksi EC ketika beban operasional ditekan (Izaola et al., 2023)

Pada bangunan dengan beban operasional rendah (misalnya NZEB/Passivhaus), kontribusi *embodied carbon* (EC) cenderung mendominasi profil emisi siklus hidup. Implikasi langsungnya adalah perlunya prioritas strategi reduksi EC sejak tahap konseptual, melalui optimasi pemilihan material, sistem struktur/pelat (*slab*), serta geometri fasad khususnya konfigurasi jendela dan *window-to-wall ratio* (WWR). Di luar fasad, keputusan mengenai karakteristik tapak (kondisi tanah), jumlah lantai, dan pengaturan massa bangunan berfungsi sebagai tuas desain yang berpengaruh langsung terhadap *whole life carbon* (WLC) total.

3) Teknologi operasional, digitalisasi, dan energi terdistribusi

Analisis rantai nilai dekarbonisasi pada lima sistem hunian di Swedia memetakan benchmark intensitas emisi sebesar 195 - 299 kgCO₂e/m² (*gross*), dengan kontribusi material mencapai sekitar 82% dari total. Skenario terintegrasi menunjukkan potensi penurunan emisi sebesar 25 - 40% (BAT Now), ±59 - 80% (2030), hingga ±85 - 93% (2045) melalui kombinasi efisiensi material, elektrifikasi, *carbon capture and storage*

(CCS), serta optimasi desain. Pada skala kawasan, kerangka *digital twin* yang mengintegrasikan BIM dan *Remote Sensing* (RS) mengindikasikan bahwa >60% emisi operasi dapat diimbangi oleh sink karbon dan energi terbarukan, sementara sisa emisi dapat di *offset* melalui kuota karbon/energi bersih (sekitar 404,3 ton, ±33%) (Karlsson et al., 2021).

Di tingkat rumah tangga, optimisasi sistem energi berbasis *mixed-integer linear programming* (MILP) menghasilkan konfigurasi berbeda sesuai fungsi objektif: strategi minimisasi biaya cenderung memilih boiler gas, PV berkapasitas kecil, sedangkan strategi minimisasi GHG cenderung mengarah pada PV, baterai berkapasitas besar, pompa panas, khususnya pada jaringan listrik dengan intensitas GHG tinggi. Hasilnya sensitif terhadap harga energi, pajak CO₂, dan beban panas (Terlouw et al., 2023).

Pada bangunan publik/komersial, PV-ES *Charging Station* (integrasi PV, penyimpanan energi, dan EV) memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan tertinggi pada rumah sakit, pusat perbelanjaan, dan gedung pengajaran karena kurva beban selaras dengan profil produksi PV di siang hari; insentif diferensial berbasis skala meningkatkan kelayakan finansial (Sun et al., 2022).

Di sektor manufaktur maupun hunian, penerapan BIM & LCA pada prefabrikasi beton (PCB) menurunkan emisi tahunan rata-rata menjadi 105,88 kgCO₂/(m²·a) dibanding 130,79 kgCO₂/(m²·a) pada metode konvensional; fase operasi dan pemeliharaan (O&M) menyumbang ±91% emisi siklus hidup, sehingga peningkatan derajat prefabrikasi berkorelasi terbalik dengan intensitas karbon (X. Juan Li et al., 2022). Pada fase konseptual, BIM parametrik dan *machine learning* (XGB/ensemble) memprediksi *embodied carbon* dengan akurasi R² 0,821–0,917, serta mengidentifikasi biaya material dan konsumsi baja/beton sebagai prediktor paling berpengaruh (X. Zhang et al., 2024).

Implikasi. Digitalisasi, energi terdistribusi, dan prefabrikasi menurunkan emisi operasional serta memudahkan WLC; pendekatan data *driven* menyelaraskan strategi material, energi, operasi dengan target dekarbonisasi 2030–2045.

4) Teknologi operasional, digitalisasi, dan energi terdistribusi

Pada retrofit sosial *multi-unit residential buildings (MURBs)* di Toronto, renovasi mekanik terbukti menghasilkan penghematan karbon yang sangat besar, rasio penghematan operasional terhadap investasi berada pada kisaran 23:1–97:1. Namun, kenyamanan termal warga tidak selalu meningkat secara konsisten; hasil pemodelan dan survei penghuni menunjukkan perubahan kecil dan beragam, bahkan pada pasangan gedung dengan umur dan konstruksi serupa (Vakalis et al., 2021).

Untuk hunian kayu bertingkat di Tampere (Finlandia), survei terhadap 151 responden menunjukkan tingkat kepuasan tinggi (>70–90%) terhadap kualitas udara, suhu, dan fungsionalitas apartemen. Responden juga menampilkan dukungan kuat terhadap hunian ramah lingkungan berbahan alami dan preferensi terhadap ekspos kayu pada fasad, lantai, dan langit-langit (Savolainen et al., 2022). Di Korea Selatan, bukti kasus memperlihatkan bahwa renovasi hibrid kayu khususnya CLT dapat memenuhi standar efisiensi tinggi dan menurunkan kebutuhan ketebalan insulasi selubung dibanding beton, sehingga memfasilitasi pencapaian kinerja mendekati *Passive House* bila detail selubung dan pengendalian kelembapan/udara dirancang memadai (Amoruso & Schuetze, 2022).

5) Kebijakan dan adopsi pasar

Di kawasan Eropa, rancangan kebijakan *Renewable Material Directive (RMD)* dan alat pembanding *Non-biogenic Material Comparator (NMC)* diajukan sebagai kerangka untuk menilai manfaat substitusi kayu terhadap material *non-biogenic*. Instrumen ini dikaitkan dengan pemetaan kematangan pasar melalui klasifikasi Matriks

BCG berdasarkan intensitas penggunaan kayu di 30 negara, sehingga dukungan kebijakan dapat diarahkan sesuai fase pengembangan (introduksi–tumbuh–mapan–menurun) (Sikkema et al., 2023).

Di Tiongkok, model permainan evolusi tripartit yang melibatkan pemerintah, perusahaan, dan publik menunjukkan bahwa koefisien subsidi merupakan parameter paling sensitif dalam mendorong adopsi *carbon-emission reduction (CER)* oleh pelaku konstruksi; pada saat yang sama, kombinasi *command-and-control (reward & punishment/ regulasi)* dan *market facilitation* (insentif finansial, instrumen keuangan karbon, dan mekanisme pembayaran/PPP) menyelaraskan kepentingan antarpihak sehingga adopsi inovasi rendah karbon terjadi lebih cepat dan stabil (Wang et al., 2024).

Implikasi: Desain kebijakan perlu disesuaikan dengan fase pasar (awal, tumbuh, mapan), didukung oleh insentif terarah dan mekanisme pembiayaan untuk menutup kesenjangan risiko adopsi. Standar teknis serta ketertelusuran data menjadi fondasi agar material dan teknologi rendah karbon dapat diterapkan luas dan terukur.

3. Integrasi Praktik Terbaik untuk Net-Zero Homes

Telaah ini menegaskan rantai keputusan Material–Desain–Teknologi sebagai sinergi konsisten penurun emisi bangunan: (i) substitusi material rendah karbon kayu/bambu, LC3/SCM, geopolimer sebagai pengungkit awal untuk menekan *embodied carbon*; (ii) optimasi desain keseimbangan massa termal, pengaturan *window-to-wall ratio (WWR)*, jumlah lantai, pelat/*slab* ringan, dan konfigurasi sistem struktur untuk menurunkan beban energi operasi; (iii) penerapan teknologi operasional dan digitalisasi (BIM/DT), integrasi PV, baterai, pompa panas, serta prefabrikasi guna menjaga performa rendah emisi sepanjang siklus hidup. Jika ketiga tahapan diterapkan lintas rantai pasok, potensi penurunan WLC mencapai 25–

40% saat ini, meningkat menjadi $\pm 59-80\%$ pada 2030, dan $\pm 85-93\%$ pada 2045.

Konteks tropis/lembap Indonesia: bukti perbandingan menunjukkan ZEB relatif lebih layak di iklim tropis dengan investasi awal lebih rendah sementara OC di iklim temperate bisa $\sim 78\%$ dari total emisi. Prioritas operasional untuk Indonesia: insulasi atap biogenik, kontrol kelembapan, ventilasi efektif, serta PV terdistribusi, baterai, pompa panas. Di sisi EC, fokus pada substitusi material (LC3/SCM, geopolimer, kayu/bambu) dan peningkatan mutu manufaktur (elektrifikasi proses, efisiensi termal, QA/QC).

Kebijakan & adopsi pasar: percepatan memerlukan subsidi, pajak CO₂, tarif listrik

puncak-lembah, green mortgage, serta standarisasi teknis (EWP/bambu) dan kerangka LCA/WLC dengan indikator DF serta metrik kg klinker/binder per m³ pada MPa. Bukti model permainan evolusi menempatkan subsidi sebagai tuas paling sensitif; kerangka RMD/NMC dan klasifikasi BCG memandu dukungan sesuai fase pasar.

4. Matriks Ringkas Artikel yang Direview

Tabel 2. Bibliografis SLR ini merangkum 27 publikasi dalam 8 klaster (material/manufaktur, desain/selubung, teknologi/digitalisasi, prefabrikasi, kebijakan/adopsi, perilaku penghuni, baseline, iklim/ZEB), menyediakan landasan terstruktur untuk pemetaan bukti, identifikasi celah riset, dan penautan lintas rantai pasok..

Tabel 2. Bibliografis artikel Systematic Literatur Review

No	Judul	Author	Klasifikasi Topik
1	A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions	(Sikkema et al., 2023)	Material (EWP/kebijakan)
2	Carbon emission-based life cycle assessment of rural residential buildings constructed with engineering bamboo: A case study in China	(Y. Liu et al., 2023)	Material (bambu rekayasa)
3	Comparing the whole life cycle carbon impact of conventional and biogenic building materials across major residential typologies in Ghana and Senegal	(Lokko et al., 2024)	Material (biogenik), Desain (massa termal)
4	Comparison and sensitivity analysis of embodied carbon emissions and costs associated with rural house construction in China to identify sustainable structural forms	(X. Zhang & Zhang, 2021)	Material/Prefabrikasi
5	Finnish Multi-Story Timber-Framed Apartment Buildings: Tampere Residents' Perspectives	(Savolainen et al., 2022)	Material/Persepsi (kayu bertingkat)
6	Future trends in materials manufacturing for low carbon building stocks: A prospective macro-scale analysis at the provincial level	(Alaux et al., 2023)	Material/Manufaktur (CCS/bioenergi)
7	Investigation of the residential building having novel environment-friendly construction materials with enhanced energy performance in diverse climate regions	(Ustaoglu et al., 2021)	Material (beton ringan/bata)
8	Qualitative and quantitative study to assess the use of rammed earth construction technology in Perth and the south-west of Western Australia	(Strazzeri & Karrech, 2023)	Material (rammed earth)
9	Assessing the effect of structural parameters and building site in achieving low carbon building materialization using a life-cycle assessment approach	(Hosseini & Faghani, 2021)	Desain (struktur/slab/tapak)
10	Sensitivity Analysis for Carbon Emissions of Prefabricated Residential Buildings with Window Design Elements	(S. Li et al., 2021)	Desain (fasad/WWR)
11	Low-tech passive solar design concepts and bio-based material solutions for reducing life cycle GHG emissions of buildings – LCA of regenerative strategies (2/2)	(Mouton et al., 2023)	Desain pasif/Material bio
12	Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems	(Karlsson et al., 2021)	Teknologi/Desain (nilai-rantai)

No	Judul	Author	Klasifikasi Topik
13	Carbon emissions accounting and estimation of carbon reduction potential in the operation phase of residential areas based on digital twin	(A. Zhang et al., 2024)	Teknologi (operasional)
14	Designing residential energy systems considering prospective costs and life cycle GHG emissions	(Terlouw et al., 2023)	Teknologi (PV/baterai/HP)
15	Economic and environmental analysis of coupled PV-energy storage-charging station considering location and scale	(Sun et al., 2022)	Teknologi (PV-ES-EV)
16	Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM	(X. Juan Li et al., 2022)	Teknologi/Prefabrikasi
17	Use and performance of conventional and sustainable building technologies in low-income housing	(Windapo et al., 2021)	Teknologi berkelanjutan/ekonomi
18	Parametric BIM-Based Lifecycle Performance Prediction and Optimisation for Residential Buildings Using Alternative Materials and Designs	(Gan et al., 2023)	Digitalisasi/Desain rendah karbon
19	Predictive models of embodied carbon emissions in building design phases: Machine learning approaches based on residential buildings in China	(X. Zhang et al., 2024)	Digitalisasi/Prediksi EC
20	Drivers and spatial patterns of carbon emissions from residential buildings: An empirical analysis of Fuzhou city (China)	(X. Li et al., 2024)	Kebijakan/Analitik (spasial)
21	How to promote carbon emission reduction in buildings? Evolutionary analysis of government regulation and financial investment	(Wang et al., 2024)	Kebijakan/Investasi
22	Hybrid timber-based systems for low-carbon, deep renovation of aged buildings: Three exemplary buildings in the Republic of Korea	(Amoruso & Schuetze, 2022)	Renovasi (kayu hibrid)
23	Quantifying thermal comfort and carbon savings from energy-retrofits in social housing	(Vakalis et al., 2021)	Renovasi/Operasional
24	Setting baselines of the embodied, operational and whole life carbon emissions of the average Spanish residential building	(Izaola et al., 2023)	WLC baseline/NZEB
25	The Effect of Building Electricity Consumption on Residents' Subjective Well-Being: Evidence from China	(Wu et al., 2022)	Operasional/sosial (di luar scope teknis)
26	The Function and Potential of Innovative Reinforced Concrete Prefabrication Technologies in Achieving Residential Construction Goals in Germany and Poland	(Kirschke & Sietko, 2021)	Prefabrikasi/kebijakan pasar
27	Transition to Zero Energy and Low Carbon Emission in Residential Buildings Located in Tropical and Temperate Climates	(Nematchoua et al., 2021)	ZEB/desain iklim

Kesimpulan

Kajian ini menegaskan bahwa jalur terintegrasi Material–Desain–Teknologi mampu menurunkan WLC hunian: 25–40% saat ini, ± 59 –80% pada 2030, dan ± 85 –93% menuju 2045 bila diterapkan konsisten (substitusi material rendah karbon; optimasi struktur–selubung; elektrifikasi–digitalisasi operasi).

Pengungkit utama: (i) substitusi kayu/bambu, LC3/SCM, geopolimer untuk menekan EC; (ii) optimasi jumlah lantai, slab ringan, massa termal, WWR, dan pemilihan tapak untuk

menurunkan beban operasi; (iii) teknologi operasional & digitalisasi (BIM/DT, PV, baterai, pompa panas, prefabrikasi) untuk menjaga emisi rendah sepanjang siklus hidup.

Untuk iklim tropis/lembap Indonesia, prioritas: insulasi atap biogenik, kontrol kelembapan, ventilasi efektif, serta PV terdistribusi + baterai + pompa panas; sekaligus memperkuat reduksi EC melalui substitusi material dan peningkatan mutu manufaktur.

Dari sisi kebijakan, percepatan adopsi memerlukan insentif terarah dan pembiayaan

selaras fase kematangan pasar, disertai standar teknis dan ketertelusuran data; subsidi merupakan tuas paling sensitif, sedangkan kerangka RMD/NMC dan klasifikasi BCG memandu dukungan.

Artikel ini menyediakan peta praktik terbaik yang operasional dan menekankan kebutuhan basis data LCA/WLC serta evaluasi pasca huni agar hasil relevan, akurat, dan terukur di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Al-Najjar, A., & Doodoo, A. (2023). Modular multi-storey construction with cross-laminated timber: Life cycle environmental implications. *Wood Material Science and Engineering*, 18(2), 525–539. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2053204>
- Alaux, N., Ruschi Mendes Saade, M., Hoxha, E., Truger, B., & Passer, A. (2023). Future trends in materials manufacturing for low carbon building stocks: A prospective macro-scale analysis at the provincial level. *Journal of Cleaner Production*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135278>
- Amoruso, F. M., & Schuetze, T. (2022). Hybrid timber-based systems for low-carbon, deep renovation of aged buildings: Three exemplary buildings in the Republic of Korea. *Building and Environment*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108889>
- Cascione, V., Roberts, M., Allen, S., Charbel, C., Maskell, D., Dams, B., Shea, A., Walker, P., & Emmitt, S. (2025). Evaluating environmental impacts of bio-based insulation materials through scenario-based and dynamic life cycle assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(4), 601–620. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02425-4>
- De Wolf, C., Pomponi, F., & Moncaster, A. (2017). Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*, 140, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>
- Gan, J., Li, K., Li, X., Mok, E., Ho, P., Law, J., Lau, J., Kwok, R., & Yau, R. (2023). Parametric BIM-Based Lifecycle Performance Prediction and Optimisation for Residential Buildings Using Alternative Materials and Designs. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040904>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Happold, B. (2020). *Embodied Carbon – Routes to Reduction (Structural Sensitivity Study)*.
- Hart, J., D’Amico, B., & Pomponi, F. (2021). Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 403–418. <https://doi.org/10.1111/jiec.13139>
- Hosseinian, S. M., & Faghani, M. (2021). Assessing the effect of structural parameters and building site in achieving low carbon building materialization using a life-cycle assessment approach. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103318>
- Izaola, B., Akizu-Gardoki, O., & Oregi, X. (2023). Setting baselines of the embodied, operational and whole life carbon emissions of the average Spanish residential building. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 252–264. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.001>
- Karlsson, I., Rootzén, J., Johnsson, F., & Erlandsson, M. (2021). Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains – A multidimensional analysis of residential building systems. *Developments in the Built Environment*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100059>
- Kirschke, P., & Sietko, D. (2021). The function and potential of innovative reinforced concrete prefabrication technologies in achieving residential construction goals in germany and poland. *Buildings*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/buildings11110533>
- Li, S., Cui, Y., Banaitiené, N., Liu, C., & Luther, M. B. (2021). Sensitivity analysis for carbon emissions of prefabricated residential buildings with window design elements. *Energies*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/en14196436>
- Li, X. Juan, Xie, W. jun, Xu, L., Li, L. lu, Jim, C. Y., & Wei, T. bing. (2022). Holistic life-cycle accounting of carbon emissions of prefabricated buildings using LCA and BIM. *Energy and Buildings*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112136>
- Li, X., Lin, C., Lin, M., & Jim, C. Y. (2024). Drivers and spatial patterns of carbon emissions from residential buildings: An empirical analysis of Fuzhou city (China). *Building and Environment*, 257. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111534>
- Liu, K., Jayaraman, D., Shi, Y., Xiong, Z., Yang, J., Symeonidis, A., & Escamilla, E. Z. (2024). Life cycle assessment (LCA) of the industrial production of structural glued laminated bamboo. *Journal of Cleaner Production*, 485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144367>
- Liu, Y., Zhang, J., Xu, J., Wang, Y., Li, B., & Zhang, S. (2023). Carbon emission-based life cycle assessment of rural residential buildings constructed with engineering bamboo: A case study in China. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107182>
- Lokko, M. ling, Manu, F. W., Mboup, N., Etman, M. A., Raugei, M., Niang, I., Ametepe, K., & Sarfo-Mensah, R. (2024). Comparing the whole life

- cycle carbon impact of conventional and biogenic building materials across major residential typologies in Ghana and Senegal. *Sustainable Cities and Society*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105332>
- Lützkendorf, T., & Balouktsi, M. (2022). Embodied carbon emissions in buildings: explanations, interpretations, recommendations. *Buildings and Cities*, 3(1), 964–973. <https://doi.org/10.5334/bc.257>
- Ma, L., Azari, R., & Elnimeiri, M. (2024). A Building Information Modeling-Based Life Cycle Assessment of the Embodied Carbon and Environmental Impacts of High-Rise Building Structures: A Case Study. *Sustainability (Switzerland)*, 16(2), 569. <https://doi.org/10.3390/su16020569>
- Mitchell, R., & Natarajan, S. (2020). UK Passivhaus and the energy performance gap. *Energy and Buildings*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110240>
- Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Röck, M. (2023). Low-tech passive solar design concepts and bio-based material solutions for reducing life cycle GHG emissions of buildings – Life cycle assessment of regenerative design strategies (2/2). *Energy and Buildings*, 282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112678>
- Nematchoua, M. K., Orosa, J. A., Ricciardi, P., Obonyo, E., Sambatra, E. J. R., & Reiter, S. (2021). Transition to zero energy and low carbon emission in residential buildings located in tropical and temperate climates. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144253>
- Nikravan, M., Firdous, R., & Stephan, D. (2023). Life cycle assessment of alkali-activated materials: a systematic literature review. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, 1(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s44242-023-00014-6>
- Olsson, J. A., Miller, S. A., & Alexander, M. G. (2023). Near-term pathways for decarbonizing global concrete production. *Nature Communications*, 14(1), 4839. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40302-0>
- Renuka, V., Rao, S. V., & Tadepalli, T. (2025). State-of-the-art Review on Limestone Calcined Clay Cement (LC3) and its Recent Advances. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01857-8>
- Röck, M., Balouktsi, M., & Ruschi Mendes Saade, M. (2023). Embodied carbon emissions of buildings and how to tame them. *One Earth*, 6(11), 1458–1464. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.10.018>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Savolainen, J. M., Ilgin, H. E., Oinas, E., & Karjalainen, M. (2022). Finnish Multi-Story Timber-Framed Apartment Buildings: Tampere Residents' Perspectives. *Buildings*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/buildings12111998>
- Shao, J., Guo, S., & Wang, H. (2025). A Review of the Performance, Sustainable Applications, and Research Challenges of Limestone-Calcined Clay-Cement (LC3) Systems. *Coatings*, 15(5), 611. <https://doi.org/10.3390/coatings15050611>
- Sikkema, R., Styles, D., Jonsson, R., Tobin, B., & Byrne, K. A. (2023). A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions. *Sustainable Cities and Society*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104370>
- Strazzeri, V., & Karrech, A. (2023). Qualitative and quantitative study to assess the use of rammed earth construction technology in Perth and the south-west of Western Australia. *Cleaner Materials*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100169>
- Sun, C., Zhao, X., Qi, B., Xiao, W., & Zhang, H. (2022). Economic and environmental analysis of coupled PV-energy storage-charging station considering location and scale. *Applied Energy*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119680>
- Terlouw, T., AlSkaif, T., Bauer, C., Mazzotti, M., & McKenna, R. (2023). Designing residential energy systems considering prospective costs and life cycle GHG emissions. *Applied Energy*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120362>
- Ustaoglu, A., Yaras, A., Sutcu, M., & Gencel, O. (2021). Investigation of the residential building having novel environment-friendly construction materials with enhanced energy performance in diverse climate regions: Cost-efficient, low-energy and low-carbon emission. *Journal of Building Engineering*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102617>
- Vakalis, D., Diaz Lozano Patino, E., Opher, T., Touchie, M. F., Burrows, K., MacLean, H. L., & Siegel, J. A. (2021). Quantifying thermal comfort and carbon savings from energy-retrofits in social housing. *Energy and Buildings*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110950>
- Wang, W., Hao, S., Zhong, H., & Sun, Z. (2024). How to promote carbon emission reduction in buildings? Evolutionary analysis of government regulation and financial investment. *Journal of Building Engineering*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109279>
- Watari, T., Cao, Z., Hata, S., & Nansai, K. (2022). Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions. *Nature Communications*, 13(1), 4038. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31806-2>
- Windapo, A., Omopariola, E. D., Olugboyega, O., & Moghayed, A. (2021). Use and performance of conventional and sustainable building

- technologies in low-income housing. *Sustainable Cities and Society*, 65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102606>
- Wu, Y., Wu, Y., Zhang, Y., Wang, X., & Song, Z. (2022). The Effect of Building Electricity Consumption on Residents' Subjective Well-Being: Evidence from China. *Buildings*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/buildings12060710>
- Younis, A., & Dodoo, A. (2022). Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. *Journal of Building Engineering*, 52, 104482. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104482>
- Zhang, A., Wang, F., Li, H., Pang, B., & Yang, J. (2024). Carbon emissions accounting and estimation of carbon reduction potential in the operation phase of residential areas based on digital twin. *Applied Energy*, 376. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123155>
- Zhang, X., Chen, H., Sun, J., & Zhang, X. (2024). Predictive models of embodied carbon emissions in building design phases: Machine learning approaches based on residential buildings in China. *Building and Environment*, 258. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111595>
- Zhang, X., & Zhang, X. (2021). Comparison and sensitivity analysis of embodied carbon emissions and costs associated with rural house construction in China to identify sustainable structural forms. *Journal of Cleaner Production*, 293. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126190>