Jurnal TEKNIK SIPIL

Jurnal Teknik Sipil, 19(1), Oktober 2026: 24 – 35
DOI: 10.24002/jts.v19i1.14907
Available Online at: https://ojs.uajy.ac.id/index.php/jts/issue/archive

PERKEMBANGAN PENELITIAN INTEGRASI LCC DAN LCA PADA BANGUNAN RENDAH KARBON: ANALISIS BIBLIOMETRIK

Bella Nirwana[1*], Siti Nurasiyah[1], Dewi Yustiarini[1]
[1]Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia
Jln Setiabudi 229 Kota Bandung
[*]Corresponding authors: bellanirwana29@upi.edu

Abstract: The integration of Life Cycle Cost (LCC) and Life Cycle Assessment (LCA) has emerged as an approach capable of simultaneously evaluating economic and environmental aspects in supporting low-carbon building development. However, research developments related to the integration of these two methods have not been comprehensively mapped. This study aims to analyze publication trends, collaboration patterns, and research theme trends related to LCC and LCA integration. This study employs a quantitative approach through bibliometric analysis supplemented by a literature review. Data were retrieved from the Scopus database for the period 2016-2026, yielding 138 publications that met the screening criteria, which were then analyzed using VOSviewer software. The results indicate that the number of publications increased significantly after 2023, peaking in 2025 with 40 articles (28.99% of total publications). The research distribution spans 51 countries, with China, the United States, and the United Kingdom as the dominant contributors. Keyword mapping identifies life cycle as the central theme, associated with life cycle assessment, sustainable development, life cycle cost, carbon, cost, energy efficiency, sustainable building, building information modelling, and cost-benefit analysis. The findings indicate that research on the integration of LCC and LCA has evolved from evaluating environmental and economic aspects toward supporting decision-making in the development of low-carbon buildings. This study provides insights into the evolution of research themes, the knowledge structure, and future research opportunities, serving as a reference for advancing studies on the integration of LCC and LCA in sustainable buildings.

Keywords: bibliometric analysis, life cycle assessment, life cycle cost, LCC-LCA integration, low-carbon building

Abstrak: Integrasi *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Life Cycle Assessment* (LCA) berkembang sebagai pendekatan yang mampu mengevaluasi aspek ekonomi dan lingkungan secara simultan dalam mendukung pembangunan bangunan rendah karbon. Namun, perkembangan penelitian terkait integrasi kedua metode tersebut belum banyak dipetakan secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perkembangan publikasi, pola kolaborasi, serta tren tema penelitian terkait integrasi LCC dan LCA. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis bibliometrik yang dilengkapi dengan studi literatur. Data diperoleh dari basis data Scopus periode 2016-2026, dengan total 138 publikasi yang memenuhi kriteria penyaringan, kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak *VOSviewer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah publikasi mengalami peningkatan signifikan setelah tahun 2023 dengan puncak publikasi pada tahun 2025 sebanyak 40 artikel (28,99% dari total publikasi). Sebaran penelitian mencakup 51 negara dengan dominasi China, United States, dan United Kingdom sebagai kontributor utama. Pemetaan kata kunci menunjukkan *life cycle* sebagai tema utama yang terkait dengan *life cycle assessment, sustainable development, life cycle cost, carbon, cost, energy efficiency, sustainable building, building information modelling,* dan *cost-benefit analysis*. Temuan ini menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCC dan LCA telah berkembang dari evaluasi aspek lingkungan dan biaya menuju pendekatan yang mendukung pengambilan keputusan dalam pengembangan bangunan rendah karbon. Hasil penelitian ini memberikan gambaran mengenai perkembangan tema, struktur pengetahuan, dan peluang penelitian yang dapat menjadi acuan bagi pengembangan kajian integrasi LCC dan LCA pada bangunan berkelanjutan.

Kata kunci: analisis bibliometrik, penilaian siklus hidup, biaya siklus hidup, integrasi LCC-LCA, bangunan rendah karbon

1. PENDAHULUAN

Sektor bangunan dan konstruksi merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon global akibat tingginya penggunaan energi, material, dan sumber daya alam sepanjang siklus hidup bangunan. Emisi karbon dihasilkan tidak hanya selama tahap operasional, tetapi juga pada proses ekstraksi bahan baku, produksi material, konstruksi, pemeliharaan, hingga pembongkaran bangunan. Penelitian menunjukkan bahwa *embodied carbon* memberikan kontribusi yang signifikan terhadap total emisi bangunan, khususnya pada bangunan baru (Pomponi & Moncaster, 2016; Röck et al., 2020). Kondisi tersebut mendorong berkembangnya konsep bangunan rendah karbon sebagai salah satu strategi untuk mengurangi dampak lingkungan sektor konstruksi.

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menekan emisi karbon bangunan melalui peningkatan efisiensi energi dan penggunaan material yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan material rendah karbon, optimalisasi desain bangunan, serta penerapan strategi efisiensi energi terbukti dapat mengurangi emisi karbon sepanjang siklus hidup bangunan (Cabeza et al., 2013; Cho & Chae, 2016; Hemmati et al., 2024). Namun, penerapannya sering menghadapi kendala ekonomi karena memerlukan investasi awal yang lebih tinggi dibandingkan metode konstruksi konvensional. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengevaluasi aspek lingkungan dan ekonomi secara terpadu.

Life Cycle Assessment (LCA) merupakan metode yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan bangunan sepanjang siklus hidupnya. Metode ini mengidentifikasi sumber utama emisi dan konsumsi sumber daya, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan. *Life Cycle Cost (LCC)* digunakan untuk menghitung seluruh biaya selama umur layanan bangunan, meliputi biaya investasi, operasional, pemeliharaan, penggantian komponen, dan biaya akhir masa pakai (*ISO 15686-5:2017 - Buildings and Constructed Assets — Service Life Planning — Part 5: Life-Cycle Costing*, n.d.; Lu et al., 2023). Meskipun memiliki tujuan yang berbeda, LCA dan LCC saling melengkapi dalam mendukung perencanaan dan pengelolaan bangunan yang lebih efisien.

Beberapa tahun terakhir, integrasi LCA dan LCC banyak diterapkan untuk mengevaluasi kinerja lingkungan dan ekonomi secara simultan. Pendekatan ini memungkinkan analisis *trade-off* antara biaya dan dampak lingkungan sehingga alternatif desain atau konstruksi dapat dipilih secara objektif. França et al. (2021) menunjukkan bahwa integrasi LCA dan LCC banyak digunakan untuk membandingkan alternatif bangunan berdasarkan biaya siklus hidup dan dampak lingkungannya. Penelitian lain mengintegrasikan biaya karbon ke dalam analisis biaya siklus hidup guna mendukung pengambilan keputusan yang berorientasi pada pengurangan emisi karbon (Liu et al., 2025; Pajgade et al., 2025; Trovato et al., 2020). Selain itu, pemanfaatan *Building Information Modeling (BIM)* turut mendorong integrasi LCA dan LCC melalui pengelolaan data yang lebih efisien dan akurat (Lu et al., 2021).

Meningkatnya perhatian terhadap pembangunan berkelanjutan menyebabkan jumlah publikasi mengenai integrasi LCA dan LCC terus meningkat. Penelitian sebelumnya membahas berbagai topik, seperti evaluasi material bangunan, sistem konstruksi, dan renovasi bangunan (Alshamrani, 2013; Hasik et al., 2019; Larsen et al., 2022). Namun, penelitian tersebut umumnya berfokus pada penerapan integrasi LCA dan LCC pada studi kasus, sedangkan kajian yang memetakan perkembangan publikasi, pola kolaborasi, struktur intelektual, dan topik penelitian mengenai integrasi LCA dan LCC pada bangunan rendah karbon masih terbatas. Akibatnya, arah perkembangan bidang penelitian, hubungan antarpeneliti, dan peluang penelitian belum terpetakan secara sistematis.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan publikasi, pola kolaborasi peneliti, struktur intelektual, dan perkembangan topik penelitian mengenai integrasi LCA dan LCC pada bangunan rendah karbon menggunakan pendekatan bibliometrik. Bibliometrik membantu mengidentifikasi topik yang berkembang, kesenjangan penelitian, tren publikasi, jaringan kolaborasi, hubungan sitasi, klaster kata kunci, serta penulis dan sumber publikasi yang berpengaruh (Elshabshiri et al., 2025; Obaideen et al., 2022; Tushar et al., 2023; Zhang et al., 2025). Hasil penelitian ini diharapkan memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan bidang penelitian sekaligus mengidentifikasi peluang penelitian untuk mendukung pengembangan bangunan rendah karbon yang berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui analisis bibliometrik yang dilengkapi dengan studi literatur. Analisis bibliometrik digunakan untuk memetakan tren publikasi, pola kolaborasi, dan struktur penelitian terkait integrasi *Life Cycle Cost (LCC)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* pada bangunan dalam upaya mengurangi emisi karbon (Donthu et al., 2021; Elshabshiri et al., 2025). Studi literatur digunakan untuk mendukung interpretasi hasil analisis sehingga diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

Data penelitian berupa data sekunder yang diperoleh dari basis data Scopus, yang dipilih karena memiliki cakupan publikasi ilmiah bereputasi internasional yang luas serta menyediakan metadata yang lengkap untuk analisis bibliometrik (Elshabshiri et al., 2025; Hakimi et al., 2023). Pencarian data dilakukan pada Juni 2026 menggunakan kolom *Article Title, Abstract, and Keywords (TITLE-ABS-KEY)* dengan *string* pencarian sebagai berikut:

TITLE-ABS-KEY "life cycle cost" AND "life cycle assessment" AND "building" AND "carbon emission" OR "sustainable"

Pencarian dibatasi pada publikasi yang terbit pada rentang tahun 2016-2026. Proses seleksi data dilakukan dengan menerapkan kriteria inklusi sebagai berikut:

1. Artikel yang secara eksplisit membahas integrasi LCC dan LCA.
2. Tahun publikasi 2016-2026.
3. Subjek area bidang *Engineering.*
4. Jenis dokumen berupa artikel jurnal, makalah konferensi, dan artikel ulasan (*review*).
5. Artikel ditulis dalam bahasa Inggris.
6. Artikel memiliki metadata lengkap, meliputi judul, abstrak, dan kata kunci.

Publikasi yang diperoleh kemudian disaring secara manual berdasarkan judul dan abstraknya untuk memastikan relevansinya dengan integrasi LCC dan LCA pada studi bangunan dan emisi karbon. Publikasi yang membahas sektor yang tidak terkait atau hanya fokus pada LCC atau LCA tanpa membahas integrasinya dalam bangunan dikecualikan. Selanjutnya, validasi data dilakukan dengan memeriksa kelengkapan metadata, seperti judul, abstrak, kata kunci, nama penulis, dan tahun publikasi, serta menghapus artikel yang terduplikasi. Setelah proses seleksi dan validasi selesai, diperoleh 138 publikasi sebagai dataset akhir penelitian.

Metadata yang diekspor dari Scopus meliputi judul dokumen, nama penulis, afiliasi, tahun publikasi, sumber publikasi, jenis dokumen, abstrak, kata kunci penulis, kata kunci terindeks, jumlah sitasi, dan daftar referensi. Kemudian diekspor dalam format CSV sebagai data masukan untuk analisis bibliometrik menggunakan perangkat lunak VOSviewer versi 1.6.20.

Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer versi 1.6.20 dengan metode *full counting*, sehingga setiap hubungan bibliometrik yang memenuhi kriteria dihitung dengan bobot yang sama. Ambang batas *(threshold)* pada setiap jenis analisis ditetapkan untuk memperoleh jaringan bibliometrik yang representatif dan memudahkan interpretasi hasil. Tahapan analisis meliputi:

1. Mengimpor metadata berformat CSV ke dalam VOSviewer melalui menu *Create a Map Based on Bibliographic Data*, kemudian memilih *Read Data from Bibliographic Database Files*.
2. Melakukan analisis distribusi negara *(co authorship of country)* untuk mengidentifikasi distribusi geografis publikasi dan pola kolaborasi antarnegara dengan parameter minimum 5 dokumen dan 5 sitasi untuk setiap negara.
3. Melakukan analisis kepenulisan bersama *(co authorship of author)* untuk memetakan jaringan kolaborasi antarpenulis dan mengidentifikasi kelompok riset aktif di bidang tersebut, dengan parameter minimum 2 dokumen untuk setiap penulis. Jaringan *co-author* menggambarkan tingkat kolaborasi di antara penulis dan mengungkap klaster peneliti yang sering menerbitkan karya bersama (van Eck & Waltman, 2009).
4. Melakukan analisis *co-citation* pada *cited sources* untuk mengidentifikasi sumber publikasi yang berpengaruh dan mengungkap struktur intelektual dari bidang penelitian dengan parameter minimum 30 sitasi.
5. Melakukan analisis *co-occurrence all keywords* untuk mengidentifikasi tema penelitian, keterkaitan antar konsep, serta perkembangan topik penelitian (Elshabshiri et al., 2025; Gutiérrez & Espinosa, 2024; Tushar et al., 2023). Analisis dilakukan dengan menetapkan

ambang batas *(threshold)* minimum kemunculan kata kunci sebanyak 5 kali. Dari total 1.649 kata kunci yang diperoleh, sebanyak 93 kata kunci memenuhi ambang batas dan membentuk 4 klaster utama penelitian.

Analisis bibliometrik menggunakan perangkat lunak VOSviewer dilakukan untuk memvisualisasikan jaringan bibliometrik berdasarkan ukuran simpul *(node), Total Link Strength (TLS),* warna klaster, dan jarak antarsimpul (Elshabshiri et al., 2025; Tushar et al., 2023; van Eck & Waltman, 2009). Ukuran simpul menunjukkan frekuensi kemunculan suatu item, sedangkan nilai TLS menunjukkan kekuatan hubungan antaritem bibliometrik. Warna klaster menunjukkan kelompok penelitian, sedangkan jarak antarsimpul menunjukkan tingkat keterkaitan antar item.

Selanjutnya, hasil analisis diinterpretasikan secara deskriptif berdasarkan tren publikasi, jaringan kolaborasi, hubungan sitasi, dan klaster kata kunci. Hasil tersebut kemudian didukung oleh tinjauan literatur untuk menjelaskan perkembangan tema penelitian, mengidentifikasi arah penelitian yang dominan, serta menyoroti peluang penelitian terkait integrasi *Life Cycle Cost (LCC)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* pada bangunan berkelanjutan dalam upaya pengurangan emisi karbon.

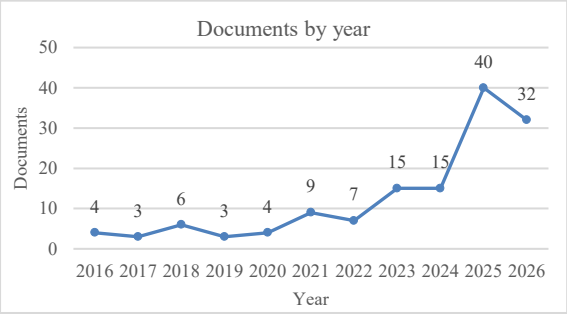
Tabel 1. Pengaturan VosViewer

Jenis analisis	Unit analisis	Ambang batas *(Threshold)*
Co-authorship	*Countries*	Minimum 5 dokumen dan 5 sitasi
Co-authorship	*Authors*	Minimum 2 dokumen per penulis
Co-citation	*Cited Sources*	Minimum 30 sitasi per sumber
Co-occurrence	*All keyword*	Minimum 5 kemunculan kata kunci bersama

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tren penelitian integrasi lcc dan lca berdasarkan tahun publikasi

Analisis sebaran publikasi berdasarkan tahun dilakukan untuk menggambarkan perkembangan penelitian terkait pendekatan integrasi *Life Cycle Cost (LCC)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* pada bangunan gedung dalam konteks emisi karbon dan pembangunan berkelanjutan selama periode 2016-2026.



Gambar 1. Perkembangan publikasi berdasarkan tahun terbit

Gambar 1 menunjukkan bahwa jumlah publikasi pada periode 2016-2022 masih relatif rendah dan berfluktuasi. Publikasi meningkat dari 4 dokumen pada tahun 2016 menjadi 6 dokumen pada tahun 2018, kemudian menurun pada tahun 2019 sebelum kembali meningkat hingga mencapai 9 dokumen pada tahun 2021. Pada tahun 2022 jumlah publikasi kembali menurun menjadi 7 dokumen. Pola tersebut menunjukkan bahwa penelitian mengenai integrasi LCC dan LCA masih berada pada tahap perkembangan awal dengan pertumbuhan yang belum stabil.

Peningkatan yang lebih signifikan mulai terlihat sejak tahun 2023 dengan 15 publikasi dan bertahan pada jumlah yang sama pada tahun 2024. Jumlah publikasi kemudian meningkat tajam menjadi 40 dokumen pada tahun 2025 atau sekitar 28,99% dari total publikasi, menjadikannya tahun dengan jumlah publikasi tertinggi. Pada tahun 2026 tercatat 32 publikasi atau sekitar 23,19% dari total publikasi. Meskipun lebih rendah dibandingkan tahun 2025, jumlah tersebut masih berpotensi bertambah seiring proses publikasi dan pengindeksan yang masih berlangsung. Secara keseluruhan, 52,17% publikasi terbit pada periode 2025-2026 dan 73,91% pada periode 2023-2026, yang menunjukkan peningkatan perhatian terhadap integrasi LCC dan LCA dalam mendukung bangunan rendah karbon dan pembangunan berkelanjutan.

Meningkatnya jumlah publikasi mengindikasikan bahwa integrasi LCC dan LCA semakin dipandang sebagai pendekatan yang mampu mengevaluasi aspek lingkungan dan ekonomi secara simultan dalam pengambilan keputusan pada sektor bangunan. Temuan ini sejalan dengan Lu et al. (2021) yang menjelaskan bahwa integrasi kedua metode berkembang karena mampu menggabungkan evaluasi dampak lingkungan dan biaya sepanjang siklus hidup bangunan. Hasil ini juga

konsisten dengan tinjauan sistematis França et al. (2021) yang menunjukkan bahwa integrasi LCA-LCC semakin banyak diterapkan untuk membandingkan alternatif material, sistem bangunan, dan strategi desain sehingga keputusan yang diambil tidak hanya mempertimbangkan biaya awal, tetapi juga biaya operasional serta dampak lingkungan selama umur layanan bangunan.

Meskipun demikian, peningkatan jumlah publikasi belum menunjukkan bahwa integrasi LCA dan LCC telah mencapai tingkat kematangan metodologis yang seragam. França et al. (2021) melaporkan bahwa masih terdapat perbedaan dalam batas sistem *(system boundary),* kategori biaya, indikator lingkungan, serta ruang lingkup analisis yang digunakan antarpenelitian. Variasi tersebut menyebabkan hasil studi masih sulit dibandingkan secara langsung. Dengan demikian, lonjakan publikasi setelah tahun 2023 lebih mencerminkan meningkatnya perhatian terhadap integrasi LCA-LCC daripada tercapainya standardisasi metode. Temuan ini menunjukkan bahwa pengembangan kerangka evaluasi yang lebih konsisten dan terstandarisasi masih menjadi salah satu agenda penting dalam penelitian bangunan rendah karbon.

Distribusi publikasi berdasarkan negara

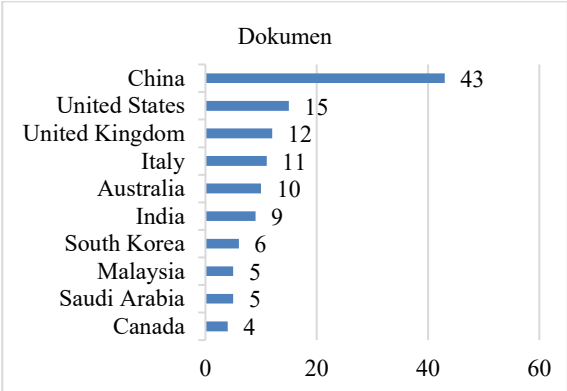
Pemetaan jaringan negara *(co-authorship of country)* digunakan untuk menunjukkan hubungan antarnegara yang berkontribusi dalam publikasi penelitian terkait integrasi *life cycle assessment (LCA)* dan *life cycle cost (LCC)* pada bangunan gedung untuk mengurangi emsi karbon. Analisis ini bertujuan mengidentifikasi pola kolaborasi serta tingkat keterhubungan antarnegara dalam menghasilkan publikasi ilmiah, sehingga dapat diketahui negara yang berperan dominan sekaligus sejauh mana kolaborasi internasional terbentuk (Bunker Whittington et al., 2023; Fu et al., 2022; Isfandyari-Moghaddam et al., 2023; Jang et al., 2020; Mitrović et al., 2023).

Dalam analisis ini digunakan ambang batas minimum lima dokumen dan lima sitasi untuk memastikan kontribusi akademik yang memadai. Berdasarkan kriteria tersebut, teridentifikasi sekitar 51 negara atau wilayah yang memiliki publikasi, namun hanya 9 negara yang memenuhi ambang batas dan membentuk jaringan keterkaitan.



Gambar 2. Visualisasi distribusi publikasi tiap negara

Gambar 2 menunjukkan jaringan kolaborasi antarnegara berdasarkan publikasi yang dihasilkan. Ukuran node merepresentasikan jumlah publikasi, sedangkan garis penghubung menunjukkan hubungan kolaborasi antarnegara. *China* tampak sebagai kontributor utama dalam jaringan tersebut, diikuti oleh *United States* dan *United Kingdom*, yang menunjukkan bahwa ketiga negara memiliki peran penting dalam perkembangan penelitian integrasi LCC dan LCA.



Gambar 3. Jumlah publikasi tiap negara

Gambar 3 memperlihatkan sepuluh negara dengan jumlah publikasi terbanyak. *China* menempati peringkat pertama dengan 43 dokumen, diikuti *United States* (15 dokumen) dan *United Kingdom* (12 dokumen). Dominasi tersebut menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCC dan LCA masih terkonsentrasi pada negara-negara

dengan kapasitas riset dan pengembangan teknologi konstruksi yang relatif tinggi.

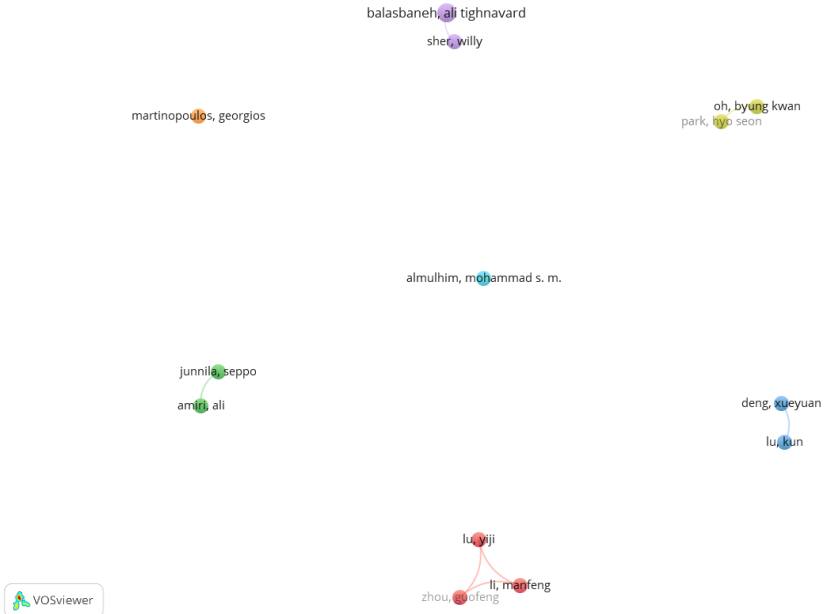
Dominasi China dapat dikaitkan dengan pesatnya perkembangan penelitian bangunan berkelanjutan, meningkatnya penerapan teknologi digital pada industri konstruksi, serta besarnya perhatian terhadap pengurangan emisi karbon pada sektor bangunan. Kondisi ini sejalan dengan Lu et al. (2023) yang menjelaskan bahwa pengembangan metode *life cycle cost* berbasis *Building Information Modeling* (BIM) banyak dilakukan di negara dengan tingkat digitalisasi konstruksi yang lebih maju. Ketersediaan data bangunan dan infrastruktur penelitian yang lebih baik turut mendukung pengembangan integrasi LCA dan LCC dalam berbagai studi.

Di sisi lain, kontribusi negara berkembang masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan bahwa perkembangan metode integrasi LCA-LCC masih didominasi oleh konteks negara dengan sumber daya penelitian yang lebih kuat, sehingga penerapannya belum sepenuhnya merepresentasikan karakteristik wilayah lain yang memiliki kondisi iklim, material, teknologi konstruksi, maupun kebijakan pembangunan yang berbeda. Temuan ini sejalan dengan Fu et al. (2022) dan Isfandyari-Moghaddam et al. (2023), yang menunjukkan bahwa negara dengan jejaring kolaborasi internasional yang lebih luas umumnya memiliki produktivitas penelitian dan pengaruh ilmiah yang lebih tinggi. Oleh karena itu, perluasan kolaborasi lintas negara menjadi penting untuk menghasilkan pengembangan metode integrasi LCA dan LCC yang lebih adaptif dan dapat diterapkan pada berbagai konteks regional.

Produktivitas dan kolaborasi peneliti

Kinerja penulis dalam penelitian integrasi LCC dan LCA pada bangunan gedung dianalisis melalui jumlah publikasi yang dihasilkan, sedangkan pola kolaborasi dikaji menggunakan analisis *co-authorship of author*. Analisis ini bertujuan untuk menggambarkan struktur jaringan kepengarangan serta tingkat kolaborasi antarpeneliti dalam pengembangan kajian *life cycle*. Berdasarkan hasil analisis bibliometrik, teridentifikasi 570 penulis yang terlibat dalam publikasi. Dengan ambang batas minimum dua dokumen per penulis, sebanyak 13 penulis memenuhi kriteria dan dianalisis lebih lanjut.

Gambar 4 menunjukkan bahwa jaringan kolaborasi penulis masih relatif terbatas. Hal ini terlihat dari dominasi kelompok-kelompok kecil yang belum terhubung secara luas. Jaringan yang terbentuk terdiri atas tujuh klaster dengan 13 hubungan (*links*), yang menunjukkan bahwa kolaborasi dalam bidang ini masih berkembang dan belum membentuk komunitas penelitian yang terintegrasi. Interpretasi tersebut sejalan dengan Bunker Whittington et al. (2023) yang menyatakan bahwa analisis *co-authorship* dapat menggambarkan struktur kolaborasi ilmiah sekaligus tingkat keterhubungan antarpeneliti dalam suatu bidang penelitian.



Gambar 4. Visualisasi jaringan ke-penulisan bersama

Tabel 2 memperlihatkan penulis dengan kontribusi tertinggi berdasarkan jumlah publikasi, jumlah sitasi, dan tingkat keterhubungan dalam jaringan kolaborasi. Balasbaneh, Ali Tighnavard menjadi penulis dengan jumlah publikasi terbanyak, yaitu tiga dokumen, serta memperoleh jumlah sitasi tertinggi sebesar 152 sitasi. Sementara itu, beberapa penulis lainnya, seperti Amiri, Ali; Junnila, Seppo; Li, Manfeng; Lu, Yiji; Zhou, Goufeng; Almulhim, Mohammad S.M.; Deng, Xueyuan; Lu, Kun; dan Oh, Byung Kwan masing-masing memiliki dua publikasi.

Dari sisi keterhubungan jaringan, nilai Total Link Strength (TLS) tertinggi sebesar 4 dimiliki oleh Li, Manfeng; Lu, Yiji; dan Zhou, Goufeng, yang menunjukkan tingkat kolaborasi relatif lebih kuat dibandingkan penulis lainnya. Meskipun demikian, sebagian besar penulis memiliki nilai TLS yang rendah, bahkan terdapat penulis dengan TLS sebesar 0. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa produktivitas publikasi belum selalu diikuti oleh kolaborasi ilmiah yang kuat sehingga peluang pengembangan penelitian melalui kerja sama antarkelompok peneliti masih terbuka.

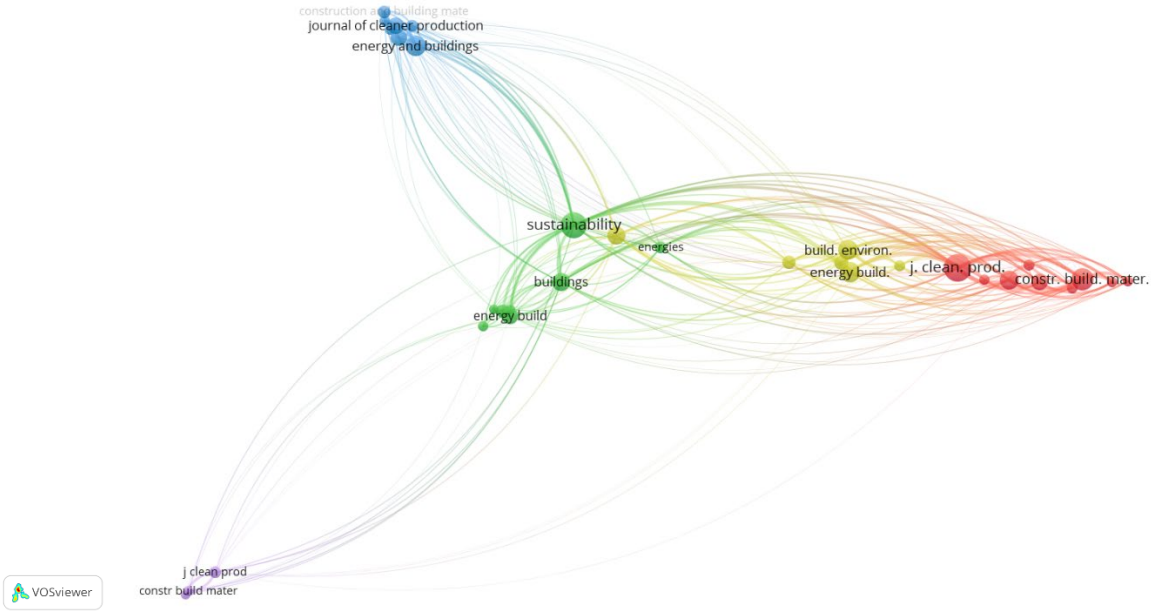
Temuan ini mengindikasikan bahwa pengembangan metode integrasi LCA dan LCC masih dilakukan oleh kelompok-kelompok penelitian yang relatif independen sehingga pertukaran pengetahuan dan harmonisasi metodologi belum berlangsung secara optimal. Hasil ini konsisten dengan Isfandyari-Moghaddam et al. (2023) yang menunjukkan bahwa jaringan kolaborasi internasional berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas, kualitas publikasi, serta penyebaran pengetahuan ilmiah. Dengan demikian, penguatan kolaborasi lintas institusi dan lintas negara berpotensi mempercepat pengembangan metode integrasi LCA dan LCC yang lebih komprehensif dan mudah diadaptasi pada berbagai konteks bangunan.

Tabel 2. Penulis dengan kontribusi tertinggi

No	Nama penulis	Jumlah dokumen	Jumlah kutipan	Total Link Strength
1	balasbaneh, ali tighnavard	3	152	1
2	amiri, ali	2	4	2
3	junnila, seppo	2	4	2
4	li, manfeng	2	4	4
5	lu, yiji	2	2	4
6	zhou, goufeng	2	28	4
7	almulhim, mohammad s.m.	2	2	0
8	deng, xueyuan	2	88	2
9	lu, kun	2	88	2
10	oh, byung kwan	2	108	2

Jaringan ko-sitasi sumber publikasi

Analisis jaringan sitasi atas sumber publikasi atau *co-citation of source* dilakukan untuk mengidentifikasi sumber publikasi atau jurnal yang berperan utama dalam pengembangan penelitian integrasi LCA dan LCC pada bangunan gedung, khususnya dalam konteks emisi karbon dan pembangunan berkelanjutan. Analisis ini menggunakan ambang batas minimum 30 sitasi pada setiap sumber. Berdasarkan kriteria tersebut, dari total 2.797 sumber yang teridentifikasi, sebanyak 33 sumber memenuhi syarat dan membentuk jaringan keterkaitan.



Gambar 5. Visualisasi jaringan kutipan bersama sumber

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5, jaringan *co-citation of source* memperlihatkan hubungan antarjurnal berdasarkan frekuensi sitasi bersama, yang mencerminkan kedekatan topik serta peran masing-masing sumber dalam kajian LCC dan LCA terkait emisi karbon pada bangunan gedung. Semakin sering dua jurnal disitasi secara bersamaan, semakin kuat keterkaitan intelektual di antara keduanya dalam mendukung perkembangan bidang penelitian tersebut. Interpretasi ini sejalan dengan Donthu et al. (2021) yang menyatakan bahwa analisis *co-citation* digunakan untuk mengidentifikasi sumber-sumber yang menjadi landasan intelektual suatu bidang penelitian.

Tabel 3 menyajikan sepuluh jurnal dengan kontribusi tertinggi sebagai media publikasi utama. Dominasi jurnal-jurnal tersebut menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCC dan LCA masih terkonsentrasi pada sumber-sumber utama yang menjadi rujukan dalam kajian evaluasi siklus hidup, emisi karbon, dan pembangunan berkelanjutan pada bangunan gedung.

Tabel 3. Sumber publikasi teratas

No	Publisher	Jumlah kutipan
1	J. Clean. Prod.	229
2	Sustainability	214
3	Constr. Build. Mater.	152
4	Energy Build.	136
5	Energy and Buildings.	132
6	Build. Environ.	127
7	J. Build. Eng.	117
8	Buildings.	107
9	Energy.	104
10	Journal of cleaner production.	91

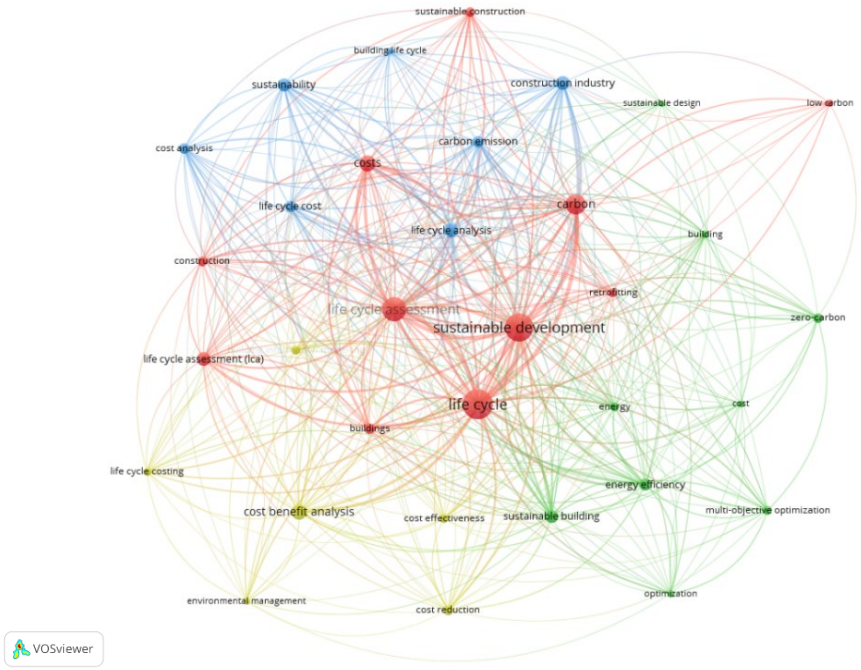
Dominasi Journal of Cleaner Production, Sustainability, Construction and Building Materials, Energy and Buildings, serta Building and Environment menunjukkan bahwa perkembangan penelitian integrasi LCA dan LCC masih berfokus pada keberlanjutan bangunan, efisiensi energi, material konstruksi, dan evaluasi kinerja lingkungan. Temuan ini konsisten dengan França et al. (2021), yang melaporkan bahwa sebagian besar penelitian integrasi LCA-LCC memanfaatkan kedua metode untuk membandingkan alternatif desain, pemilihan material, dan strategi pengurangan dampak lingkungan dengan tetap mempertimbangkan biaya sepanjang siklus hidup. Pola ko-sitasi tersebut juga mengindikasikan bahwa jurnal-jurnal tersebut telah menjadi landasan ilmiah utama dalam pengembangan metode dan penerapan integrasi LCA dan LCC pada bangunan

gedung, sehingga berperan dalam membentuk arah perkembangan penelitian di bidang ini.

Analisis keterkaitan kata kunci

Visualisasi data dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer dengan tiga opsi pemilihan kata kunci, yaitu *author keywords, index keywords,* dan *all keywords*. Dalam penelitian ini digunakan seluruh kata kunci *(all keywords)* untuk membentuk jaringan keterkaitan *(keyword co-occurrence network)*. Semakin dekat jarak antarkata kunci menunjukkan hubungan yang semakin kuat, sedangkan warna pada setiap node merepresentasikan kelompok klaster yang saling berkaitan (van Eck & Waltman, 2009). Ukuran node menunjukkan frekuensi kemunculan kata kunci sehingga node yang lebih besar merepresentasikan topik yang lebih dominan (Kurniawan & Pramesti, 2024).

Setelah dilakukan penyaringan kata kunci yang tidak relevan, diperoleh 93 kata kunci dengan ambang batas minimum kemunculan sebanyak lima kali. Jaringan yang terbentuk terdiri atas empat klaster utama. Secara umum, kata kunci *life cycle, sustainable development, life cycle assessment, carbon, cost, life cycle cost, energy efficiency, sustainable building,* dan *cost benefit analysis* berada di pusat jaringan, yang menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCA dan LCC semakin menekankan evaluasi aspek lingkungan dan ekonomi secara terpadu dalam pengembangan bangunan rendah karbon.



Gambar 6. Visualisasi jaringan kemunculan bersama semua kata kunci

Berdasarkan hasil visualisasi jaringan kata kunci pada Gambar 6, terbentuk empat klaster utama yang menggambarkan tema dan arah perkembangan penelitian integrasi *LCC* dan *LCA* pada bangunan rendah karbon. Masing-masing klaster menunjukkan fokus kajian yang berbeda, meliputi aspek keberlanjutan dan emisi karbon, efisiensi energi dan bangunan rendah karbon, evaluasi siklus hidup dalam industri konstruksi, serta analisis biaya sebagai dasar pengambilan keputusan. Adapun karakteristik setiap klaster dijelaskan sebagai berikut.

A. Klaster Siklus Hidup, Emisi Karbon, dan Keberlanjutan (Merah): Klaster berwarna merah berpusat pada kata kunci *life cycle, sustainable development, life cycle assessment, carbon, cost, buildings, retrofitting, construction, sustainable construction,* dan *low carbon.* Klaster ini menunjukkan fokus penelitian pada penerapan pendekatan siklus hidup untuk mengevaluasi aspek lingkungan dan biaya bangunan, khususnya yang berkaitan dengan emisi karbon dan pembangunan berkelanjutan. Posisi *life cycle* dan *sustainable development* yang berada di pusat jaringan menunjukkan

bahwa kedua konsep tersebut menjadi penghubung utama antartopik penelitian.

B. Klaster Bangunan Rendah Karbon dan Efisiensi Energi (Hijau): Klaster hijau terdiri atas kata *kunci energy, energy efficiency, sustainable building, zero-carbon, multi-objective optimization, optimization,* dan *sustainable design.* Klaster ini merepresentasikan penelitian yang berfokus pada pengembangan bangunan rendah karbon melalui peningkatan efisiensi energi, optimasi kinerja bangunan, dan penerapan desain berkelanjutan. Kehadiran kata kunci *zero-carbon* dan *energy efficiency* menunjukkan meningkatnya perhatian terhadap strategi pengurangan emisi karbon pada sektor bangunan.

C. Klaster Keberlanjutan Konstruksi dan Evaluasi Siklus Hidup Bangunan (Biru): Klaster biru mencakup kata kunci *sustainability, building life cycle, construction industry, life cycle analysis, carbon emission,* dan *cost analysis.* Klaster ini menggambarkan penelitian yang mengintegrasikan aspek keberlanjutan dalam industri konstruksi melalui pendekatan siklus hidup. Fokus utamanya adalah analisis siklus hidup, emisi karbon, dan biaya sebagai dasar evaluasi kinerja bangunan selama siklus hidup.

D. Klaster Analisis Biaya dan Pengambilan Keputusan (Kuning): Klaster kuning terdiri atas kata kunci *building information modelling, cost benefit analysis, cost effectiveness, cost reduction, environmental management,* dan *life cycle costing.* Klaster ini menunjukkan fokus penelitian pada evaluasi ekonomi dan pengambilan keputusan dalam pembangunan berkelanjutan. Keterkaitan dengan *life cycle costing* dan *building information modelling* menunjukkan bahwa analisis biaya semakin didukung oleh pemanfaatan teknologi digital untuk meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan.

Analisis keterkaitan kata kunci menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCC dan LCA pada bangunan rendah karbon didominasi oleh tema siklus hidup, keberlanjutan, emisi karbon, efisiensi energi, dan analisis biaya. Posisi sentral kata kunci *life cycle, sustainable development,* dan *life cycle assessment* menunjukkan bahwa pendekatan siklus hidup menjadi landasan utama dalam mengevaluasi kinerja lingkungan dan ekonomi bangunan. Di sisi lain, kemunculan kata kunci *building information modelling, multi-objective optimization, cost benefit analysis, sustainable design,* dan *zero-carbon* mengindikasikan bahwa penelitian tidak lagi berfokus pada evaluasi dampak semata, tetapi mulai berkembang ke arah pengembangan strategi perancangan dan pengambilan keputusan yang mengintegrasikan aspek lingkungan dan biaya secara simultan.

Temuan tersebut konsisten dengan Lu et al. (2021) yang menjelaskan bahwa integrasi BIM dengan LCA dan LCC memungkinkan evaluasi berbagai alternatif desain dilakukan sejak tahap awal perencanaan sehingga keputusan yang dihasilkan lebih efisien dari sisi biaya maupun dampak lingkungan. Hasil ini juga sejalan dengan Larsen et al. (2022), yang melaporkan bahwa perkembangan penelitian LCA-LCC semakin mengarah pada integrasi berbagai metode evaluasi keberlanjutan untuk mendukung pengambilan keputusan sepanjang siklus hidup bangunan. Dengan demikian, peta kata kunci menunjukkan adanya pergeseran fokus penelitian dari sekadar pengukuran kinerja menuju pengembangan pendekatan yang mendukung perancangan bangunan rendah karbon secara lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis bibliometrik, penelitian mengenai integrasi *Life Cycle Cost (LCC)* dan *Life Cycle Assessment (LCA)* dalam mendukung bangunan rendah karbon menunjukkan perkembangan yang pesat selama periode 2016-2026, dengan puncak publikasi terjadi pada tahun 2025 sebanyak 40 artikel atau 28,99% dari total 138 publikasi. Sebaran penelitian telah mencakup 51 negara atau wilayah dengan kontribusi terbesar berasal dari *China, United States,* dan *United Kingdom.* Meskipun demikian, jaringan kolaborasi antarnegara dan antarpeneliti masih relatif terbatas, yang ditunjukkan oleh terbentuknya tujuh klaster kolaborasi dari 13 penulis paling produktif. Dari sisi sumber ilmiah, J. Clean. Prod. menjadi jurnal dengan jumlah sitasi tertinggi yang menunjukkan perannya sebagai salah satu rujukan utama dalam perkembangan kajian integrasi LCC dan LCA.

Analisis kata kunci menunjukkan bahwa *life cycle* menjadi tema sentral yang terhubung erat dengan *sustainable development, life cycle assessment, life cycle cost, carbon, energy efficiency, sustainable building,* dan *building information modelling*. Keterkaitan antartopik tersebut menunjukkan bahwa penelitian integrasi LCC dan LCA tidak lagi berfokus pada evaluasi

dampak semata, tetapi berkembang menuju pendekatan yang mendukung perancangan, pengelolaan, dan pengambilan keputusan melalui integrasi aspek lingkungan, ekonomi, dan teknologi digital. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi LCC dan LCA semakin berperan sebagai pendekatan penting dalam mendukung pembangunan bangunan rendah karbon melalui evaluasi aspek ekonomi dan lingkungan secara simultan sepanjang siklus hidup bangunan. Namun demikian, standardisasi metode integrasi LCA-LCC, penguatan kolaborasi internasional, serta perluasan penerapannya pada berbagai konteks regional masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan gambaran mengenai struktur pengetahuan, pola kolaborasi, dan perkembangan tema penelitian yang dapat menjadi dasar dalam mengidentifikasi arah penelitian selanjutnya. Dari sisi praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi LCC dan LCA semakin relevan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam memilih strategi bangunan yang tidak hanya menurunkan emisi karbon, tetapi juga meningkatkan efisiensi biaya sepanjang siklus hidup bangunan.

5. DAFTAR PUSTAKA

Alshamrani, O. S. (2013). Integrated LCA-LCC assessment model of offsite, onsite, and conventional construction systems. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *21*(5), 2058-2080. https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1942001

Bunker Whittington, K., King, M. M., & Cingolani, I. (2023). Structure, status, and span: gender differences in co-authorship networks across 16 region-subject pairs (2009-2013). *Scientometrics 2023 129:1*, *129*(1), 147-179. https://doi.org/10.1007/S11192-023-04885-1

Cabeza, L. F., Barreneche, C., Miró, L., Morera, J. M., Bartolí, E., & Inés Fernández, A. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *23*, 536-542. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2013.03.017

Cho, S. H., & Chae, C. U. (2016). A study on life cycle CO2 emissions of low-carbon building in South Korea. *Sustainability (Switzerland)*, *8*(6). https://doi.org/10.3390/su8060579

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285-296. https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2021.04.070

Elshabshiri, A., Ghanim, A., Hussien, A., Maksoud, A., & Mushtaha, E. (2025). Integration of Building Information Modeling and Digital Twins in the Operation and Maintenance of a building lifecycle: A bibliometric analysis review. *Journal of Building Engineering*, *99*, 111541. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.111541

França, W. T., Barros, M. V., Salvador, R., de Francisco, A. C., Moreira, M. T., & Piekarski, C. M. (2021). Integrating life cycle assessment and life cycle cost: a review of environmental-economic studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment 2021 26:2*, *26*(2), 244-274. https://doi.org/10.1007/S11367-020-01857-Y

Fu, Y. C., Marques, M., Tseng, Y. H., Powell, J. J. W., & Baker, D. P. (2022). An evolving international research collaboration network: spatial and thematic developments in co-authored higher education research, 1998-2018. *Scientometrics*, *127*(3), 1403-1429. https://doi.org/10.1007/S11192-021-04200-W

Gutiérrez, A. R. I., & Espinosa, J. C. M. (2024). Building and sustainability information modeling: An analysis of its thematic structure. *Iberoamerican Journal of Science Measurement and Communication*, *4*(1), 1-15. https://doi.org/10.47909/ijsmc.98

Hakimi, O., Liu, H., & Abudayyeh, O. (2023). Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. *Frontiers of Engineering Management 2023 11:1*, *11*(1), 32-49. https://doi.org/10.1007/S42524-023-0254-4

Hasik, V., Escott, E., Bates, R., Carlisle, S., Faircloth, B., & Bilec, M. M. (2019). Comparative whole-building life cycle assessment of renovation and new construction. *Building and Environment*, *161*, 106218. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106218

Hemmati, M., Messadi, T., Gu, H., & Hemmati, M. (2024). *LCA Operational Carbon Reduction Based on Energy Strategies Analysis in a Mass Timber Building*. https://doi.org/10.3390/su16156579

Isfandyari-Moghaddam, A., Saberi, M. K., Tahmasebi-Limoni, S., Mohammadian, S., & Naderbeigi, F. (2023). Global scientific collaboration: A social network analysis and data mining of the co-authorship networks. *Journal of Information Science*, *49*(4), 1126-1141. https://doi.org/10.1177/01655515211040655;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;ISSUE:ISSUE:DOI

ISO 15686-5:2017 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing. (n.d.). Retrieved June 8, 2026, from https://www.iso.org/standard/61148.html

Jang, D., Doh, S., & Choi, Y. (2020). Networks of international co-authorship in journal articles about Antarctic research, 1998-2015. *Polar Research*, *39*, 3647. https://doi.org/10.33265/POLAR.V39.3647

Larsen, V. G., Tollin, N., Sattrup, P. A., Birkved, M., & Holmboe, T. (2022). What are the challenges in assessing circular economy for the built environment? A literature review on integrating LCA, LCC and S-LCA in life cycle sustainability assessment, LCSA. *Journal of Building Engineering*, *50*, 104203. https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104203

Liu, J., Liu, H., & Liu, Y. (2025). A Sustainability-Oriented Framework for Life Cycle Environmental Cost Accounting and Carbon Financial Optimization in Prefabricated Steel Structures. *Sustainability 2025, Vol. 17, Page 4296*, *17*(10), 4296. https://doi.org/10.3390/SU17104296

Lu, K., Deng, X., Jiang, X., Cheng, B., & Tam, V. W. Y. (2023). A REVIEW ON LIFE CYCLE COST ANALYSIS OF BUILDINGS BASED ON BUILDING INFORMATION MODELING. *Journal of Civil Engineering and Management*, *29*(3), 268-288. https://doi.org/10.3846/jcem.2023.18473

Lu, K., Jiang, X., Yu, J., Tam, V. W. Y., & Skitmore, M. (2021). Integration of life cycle assessment and life cycle cost using building information modeling: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, *285*, 125438. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125438

Mitrović, I., Mišić, M., & Protić, J. (2023). Exploring high scientific productivity in international co-authorship of a small developing country based on collaboration patterns. *Journal of Big Data*, *10*(1), 64. https://doi.org/10.1186/S40537-023-00744-1

Obaideen, K., Abu Shihab, K. H., Madkour, M. I., & Faris, M. A. I. E. (2022). Seven decades of Ramadan intermittent fasting research: Bibliometrics analysis, global trends, and future directions. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, *16*(8), 102566. https://doi.org/10.1016/J.DSX.2022.102566

Pajgade, R. P., Raghunandan, M., & Ghosh, S. (2025). An integrated life cycle cost assessment framework incorporating cost of carbon dioxide equivalent for buildings subjected to natural hazards. *Sustainable Cities and Society*, *126*, 106394. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2025.106394

Pomponi, F., & Moncaster, A. (2016). Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment - What does the evidence say? *Journal of Environmental Management*, *181*, 687-700. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2016.08.036

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*, 114107. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114107

Trovato, M. R., Nocera, F., & Giuffrida, S. (2020). Life-Cycle Assessment and Monetary Measurements for the Carbon Footprint Reduction of Public Buildings. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 3460*, *12*(8), 3460. https://doi.org/10.3390/SU12083460

Tushar, Q., Zhang, G., Navaratnam, S., Bhuiyan, M. A., Hou, L., & Giustozzi, F. (2023). A Review of Evaluative Measures of Carbon-Neutral Buildings: The Bibliometric and Science Mapping Analysis towards Sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(20). https://doi.org/10.3390/SU152014861

van Eck, N. J., & Waltman, L. (2009). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics 2009 84:2*, *84*(2), 523-538. https://doi.org/10.1007/S11192-009-0146-3

Yulius Chaesario Kurniawan, & Nectaria Putri Pramesti. (2024). MANAJEMEN BISNIS KONSTRUKSI DENGAN BUILDING INFORMATION MODELLING PADA LIFE CYCLE COST: KAJIAN BIBLIOMETRIK. *Jurnal Teknik Sipil*, *18*(1), 51-62. https://doi.org/10.24002/jts.v18i1.10217

Zhang, Y., Lu, Y., Huang, Z., Chen, D., Cheng, B., Wang, D., & Lu, C. (2025). Insight from Review Articles of Life Cycle Assessment for Buildings. *Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 7751*, *15*(14), 7751. https://doi.org/10.3390/APP15147751