

HIBRIDISASI GEOPOLIMER LOKAL BERBASIS BAMBU DAN ABU SEKAM PADI UNTUK MATERIAL BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN DI IKLIM TROPIS DENGAN PENDEKATAN LCA- LCC TERINTEGRASI

Luthfia Wulandari

Universitas Al-Azhar Medan

Email: luthfiawulandari13@gmail.com

ABSTRAK

Sektor konstruksi tercatat menyumbang kurang lebih 6–8% dari total emisi CO₂ dunia, terutama karena masih besarnya ketergantungan pada semen Portland konvensional. Kajian ini disusun untuk menelaah peluang penggabungan (hibridisasi) geopolimer berbahan dasar abu sekam padi (Rice Husk Ash/RHA) dengan serat bambu sebagai material konstruksi yang lebih ramah lingkungan untuk wilayah beriklim tropis, dengan memadukan kerangka Life Cycle Assessment (LCA) dan Life Cycle Cost (LCC). Pendekatan yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) yang mengikuti protokol PRISMA 2020. Penelusuran sumber dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, ScienceDirect, dan Google Scholar untuk publikasi terbitan 2020 hingga 2025. Sebanyak 48 artikel yang lolos seleksi kemudian ditelaah dari sisi komposisi material, performa mekanik dan termal, ketahanan jangka panjang (durabilitas), serta aspek lingkungan dan ekonomi. Hasil telaah memperlihatkan bahwa geopolimer RHA yang diperkuat serat bambu mampu mencapai kuat tekan pada kisaran 25–45 MPa, disertai kenaikan kuat lentur hingga 35% dibandingkan geopolimer tanpa penguatan serat. Konduktivitas termal material ini juga tergolong rendah, yaitu 0,35–0,58 W/m·K, sehingga berkontribusi pada efisiensi energi bangunan di iklim tropis. Hasil analisis LCA menunjukkan potensi penurunan emisi karbon sebesar 60–80% bila dibandingkan beton konvensional, sementara analisis LCC mengindikasikan penghematan biaya sepanjang siklus hidup sebesar 15–25% untuk periode 50 tahun. Dapat disimpulkan bahwa penggabungan geopolimer RHA dengan serat bambu memiliki prospek besar sebagai material konstruksi berkelanjutan yang unggul dari sisi teknis, ekonomi, maupun lingkungan untuk diterapkan di kawasan tropis.

Kata kunci: Abu Sekam Padi, Bambu, Geopolimer, LCA-LCC, Material Ramah Lingkungan.

ABSTRACT

Roughly 6–8% of global CO₂ emissions originate from the construction industry, a figure driven primarily by widespread reliance on conventional Portland cement. This study sets out to examine the prospects of combining rice husk ash (RHA)-based geopolimer with bamboo fiber to create an environmentally friendly building material suited to tropical climates, applying an integrated Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) framework. The research follows a Systematic Literature Review (SLR) design guided by the PRISMA 2020 protocol. Literature was gathered from the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, and Google Scholar databases, covering publications from 2020 through 2025. A total of 48 articles meeting the inclusion criteria were analyzed in terms of material composition, mechanical and thermal behavior, durability, and environmental-economic dimensions. The synthesis indicates that bamboo-fiber-reinforced RHA geopolimer can reach compressive strengths of 25–45 MPa, with flexural strength gains of up to 35% relative to the unreinforced version. The composite also shows comparatively low thermal conductivity, in the range of 0.35–0.58 W/m·K, favoring energy-efficient building envelopes in tropical settings. LCA findings point to a 60–80% reduction in carbon emissions compared with conventional concrete, while LCC results suggest 15–25% lifecycle cost savings over a 50-year horizon. Overall, the review concludes that RHA-bamboo geopolimer hybridization represents a technically sound, economically viable, and environmentally favorable alternative for sustainable construction in tropical regions.

Keywords: Bamboo, Eco-Friendly Material, Geopolymer, LCA-LCC, Rice Husk Ash.

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi telah lama dikenal sebagai salah satu kontributor utama terhadap konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di tingkat global. Sejumlah kajian terbaru menunjukkan bahwa produksi semen Portland konvensional menyumbang kurang lebih 6–8% dari total emisi CO₂ dunia setiap tahunnya, dan angka tersebut cenderung terus naik seiring percepatan pembangunan infrastruktur di banyak negara berkembang (Duxson et al., 2021; J. Liu et al., 2022). Kondisi tersebut diperparah oleh maraknya pembangunan gedung bertingkat yang dipicu derasnya arus urbanisasi global (Siregar et al., 2026). Sebagai negara berkembang dengan tingkat urbanisasi tinggi, Indonesia dihadapkan pada dua tantangan sekaligus, yaitu memenuhi kebutuhan infrastruktur yang sangat besar sambil menekan jejak karbon dari sektor konstruksinya..

Atas dasar persoalan tersebut, pencarian material bangunan alternatif yang memanfaatkan bahan lokal maupun limbah industri menjadi langkah yang sangat penting untuk ditempuh. Geopolimer merupakan salah satu material inovatif yang terbentuk dari reaksi polimerisasi aluminosilikat dalam lingkungan alkali, dan terbukti mampu menghasilkan kinerja mekanik yang setara, bahkan lebih unggul dibandingkan semen Portland, namun dengan jejak karbon yang jauh lebih rendah (Davidovits & Davidovits, 2022; Provis & van Deventer, 2022). Salah satu sumber aluminosilikat lokal yang tersedia melimpah di wilayah Sumatera Utara dan sekitarnya adalah abu sekam padi (Rice Husk Ash/RHA), yaitu hasil samping pembakaran sekam padi pada kegiatan pertanian yang pemanfaatannya hingga saat ini masih belum optimal (Putri et al., 2021).

Selain RHA, bambu juga merupakan tanaman yang tumbuh subur di wilayah tropis dan memiliki sifat mekanik yang menjanjikan untuk dikembangkan sebagai material konstruksi berkelanjutan. Berbagai kajian menunjukkan bahwa serat bambu memiliki kekuatan tarik tinggi, rasio kekuatan terhadap berat yang menguntungkan, serta kemampuan insulasi termal dan akustik yang baik (Ali et al., 2021; Saeed et al., 2022). Pemanfaatan serat bambu sebagai penguat dalam matriks geopolimer berpotensi menghasilkan material komposit dengan performa mekanik dan termal yang lebih baik untuk diterapkan pada bangunan di kawasan tropis.

Dalam rangka menilai keberlanjutan suatu material, pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dan Life Cycle Costing (LCC) kini banyak dipandang sebagai alat analisis yang penting. LCA memungkinkan pengukuran dampak lingkungan suatu material secara menyeluruh, mulai dari tahap pengambilan bahan baku hingga akhir masa layanannya, sedangkan LCC memberikan gambaran komprehensif mengenai keseluruhan biaya yang dikeluarkan sepanjang umur pakai material dalam jangka panjang (Ariyanto et al., 2021; Salas et al., 2021). Penggabungan kedua pendekatan ini dalam kajian material bangunan diharapkan dapat menghasilkan dasar pengambilan keputusan yang lebih utuh dan menyeluruh..

Studi literatur sistematis ini bertujuan untuk: (1) mengkaji karakteristik fisik, mekanik, dan termal dari material geopolimer hibrid berbasis RHA dan bambu; (2) menganalisis potensi reduksi dampak lingkungan melalui pendekatan LCA terintegrasi; (3) mengevaluasi kelayakan ekonomi melalui analisis LCC; serta (4) mengidentifikasi peluang dan tantangan implementasi material ini di kondisi iklim tropis Indonesia.

Pemetaan state of the art disusun berdasarkan penelusuran 751 artikel pada basis data Scopus periode 2020–2025, dengan bantuan VOSviewer untuk memvisualisasikan jaringan bibliometrik serta R Studio untuk mengolah data Scopus secara kuantitatif. Melalui kajian ini, diharapkan dapat diperoleh kontribusi ilmiah yang nyata bagi perkembangan material bangunan ramah lingkungan yang memanfaatkan sumber daya lokal.

2. METODOLOGI

1. Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR), yang ditujukan untuk menghimpun, menilai, dan merangkum bukti-bukti ilmiah secara terstruktur dan dapat dipertanggungjawabkan. Pemilihan metode SLR didasari oleh kemampuannya menggabungkan temuan-temuan ilmiah secara sistematis dan terukur, sebagaimana telah ditunjukkan oleh Siregar et al., (2026) dalam analisis bibliometrik terhadap 751 dokumen Scopus terkait sistem bangunan bertingkat periode 2000–2025. Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer dan R-Studio juga diadopsi untuk memetakan tren riset dan jaringan kata kunci secara visual (Moher et al., 2021; Page et al., 2021).

Kerangka kajian dibangun di atas tiga pilar kajian yang saling melengkapi: (1) karakteristik fisiko-kimia dan performa mekanik material geopolimer berbasis RHA serta komposit bambu; (2) evaluasi kinerja material dalam konteks iklim tropis, mencakup aspek termal, higroskopis, dan durabilitas jangka panjang; serta (3) analisis keberlanjutan holistik melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dan Life Cycle Cost (LCC) yang terintegrasi. Protokol penelitian disusun secara apriori sebelum proses pencarian dimulai guna menjaga konsistensi dan objektivitas seluruh tahapan kajian.

2. Research Questions

Research Questions (RQ) ditetapkan secara apriori untuk memandu arah pencarian literatur dan sintesis temuan. Tabel berikut merangkum empat RQ yang menjadi kerangka kajian ini.

Tabel 1 Research Questions Kajian Sistematis Geopolimer RHA-Bambu

Kode	Research Question	Rasional / Justifikasi
RQ1	Apa karakteristik fisik, mekanik, dan termal dari geopolimer hibrid berbasis RHA dan serat bambu?	Untuk menentukan kelayakan teknis material sebagai alternatif beton OPC dalam aplikasi struktural di iklim tropis.
RQ2	Seberapa besar potensi reduksi dampak lingkungan (GWP, CED) material hibrid ini dibandingkan beton konvensional berdasarkan analisis LCA?	Untuk mengkuantifikasi kontribusi material terhadap target dekarbonisasi sektor konstruksi dalam kerangka Paris Agreement.
RQ3	Bagaimana kelayakan ekonomi jangka panjang geopolimer RHA-bambu berdasarkan analisis Life Cycle Cost (LCC) periode 50 tahun?	Untuk mengevaluasi daya saing ekonomi material dibandingkan beton OPC dari perspektif total biaya siklus hidup.
RQ4	Apa peluang dan tantangan utama implementasi geopolimer RHA-bambu di kondisi iklim tropis Indonesia?	Untuk mengidentifikasi gap penelitian dan kebutuhan regulasi yang perlu diatasi sebelum adopsi skala industri.

Keempat RQ di atas dioperasionalkan melalui kombinasi kata kunci berbasis PICO dan protokol PRISMA 2020, sehingga setiap tahap seleksi artikel dapat dilacak kembali ke pertanyaan penelitian yang relevan.

3. Sumber Dan Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran sistematis pada empat basis data ilmiah internasional yang memiliki reputasi baik, yakni Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect, dan Google Scholar. Scopus dan WoS dijadikan sumber pencarian utama mengingat ketatnya proses seleksi peer-review pada kedua basis data tersebut, sementara ScienceDirect dan Google Scholar berperan sebagai pelengkap guna memperluas cakupan literatur yang diperoleh. Rentang waktu publikasi dibatasi pada Januari 2020 hingga Desember 2025 untuk menjaga relevansi dan keterbaruan temuan, mengingat

perkembangan teknologi geopolimer maupun metodologi LCA berlangsung sangat cepat dalam lima tahun terakhir (Luukkonen et al., 2021).

Rangkaian kata kunci disusun mengacu pada kerangka PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome). Term pencarian yang digunakan meliputi: "rice husk ash geopolimer", "bamboo fiber reinforced geopolimer", "sustainable building material tropical climate", "geopolymer LCA", "geopolymer LCC", "hybrid geopolimer composite", dan "low carbon construction material". Operator Boolean AND diaplikasikan untuk menghubungkan antar kelompok kata kunci, sementara OR digunakan di dalam setiap kelompok guna memperluas jangkauan pencarian. Penelusuran tambahan dilakukan melalui teknik snowballing, sebagai contoh penerapan string pencarian (search string) yang digunakan pada basis data Scopus adalah sebagai berikut:

Tabel 2 String Pencarian dengan Boolean Operators

Query Scopus	Jumlah
TITLE-ABS-KEY (("geopolymer" OR "geopolymeric" OR "alkali-activated" OR "inorganic polymer") AND ("bamboo" OR "rice husk ash" OR "RHA" OR "silica fume" OR "agricultural waste" OR "biomass ash" OR "rice husk" OR "amorphous silica"))AND("building material*" OR "construction material*" OR "sustainable material*" OR "green material*" OR "eco-friendly" OR "low carbon"))	632
(TITLE-ABS-KEY(geopolymer) AND TITLE-ABS-KEY("rice husk ash" OR "RHA") AND TITLE-ABS-KEY(bamboo) AND TITLE-ABSKEY("sustainable building materials" OR "eco-friendly materials") AND TITLE-ABS-KEY("tropical climate") AND TITLE-ABS-KEY("LCA" OR "life cycle assessment") AND TITLE-ABS-KEY("LCC" OR "life cycle cost"))	142

Query tersebut menghasilkan 142 rekaman artikel pada basis data Scopus. String pencarian yang sama diadaptasi sesuai sintaks dan fitur pencarian masing-masing basis data lain, sehingga diperoleh 98 rekaman dari Web of Science, 87 rekaman dari ScienceDirect, dan 60 rekaman dari Google Scholar. Dengan demikian, total rekaman yang terkumpul pada tahap Identifikasi mencapai 387, sebagaimana akan dijelaskan lebih rinci pada Subbab 2.5 dan Gambar 1.

4. Kriteria Inklusi Dan Eksklusi

Kriteria inklusi dan eksklusi ditetapkan terlebih dahulu sebelum proses seleksi artikel berlangsung, dengan tujuan menekan kemungkinan bias subjektif. Rangkuman kriteria yang diterapkan secara konsisten pada kajian ini disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi Artikel

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Jenis Publikasi	Artikel penelitian asli (original research) atau artikel review sistematis pada jurnal terindeks Scopus/WoS minimal Q3	Prosiding konferensi tidak terindeks, editorial, opini, komentar tanpa data kuantitatif
Topik Kajian	Geopolimer berbasis RHA, komposit serat bambu, material bangunan iklim tropis, analisis LCA/LCC material bangunan berbasis limbah pertanian	Material yang secara fundamental berbeda dari RHA atau prekursor aluminosilikat berbasis limbah pertanian
Periode Publikasi	Januari 2020 – Desember 2025	Publikasi sebelum Januari 2020

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Ketersediaan	Teks lengkap (full-text) tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia	Teks lengkap tidak tersedia meskipun telah dilakukan permintaan interlibrary loan
Kualitas Metodologi	Skor MMAT $\geq 60\%$ (minimal 3 dari 5 kriteria kualitas terpenuhi)	Skor MMAT $< 60\%$; penelitian dengan desain metodologi yang tidak jelas
Duplikasi	Studi unik yang belum pernah dipublikasikan di tempat lain	Duplikasi publikasi (studi yang sama pada lebih dari satu jurnal)

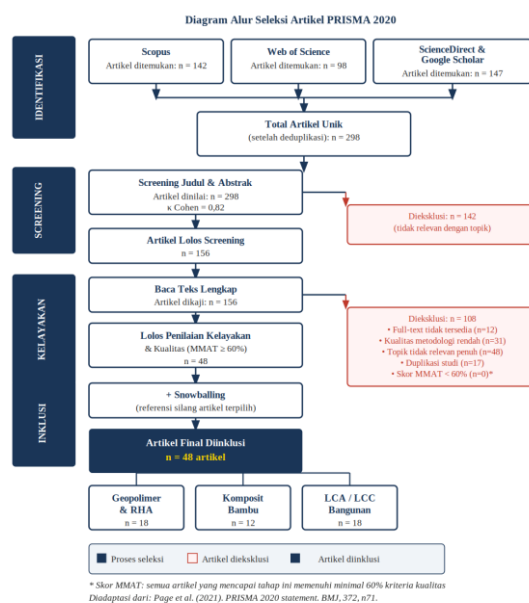
Berdasarkan kriteria tersebut, proses seleksi menghasilkan 48 artikel final yang diinklusi dalam sintesis. Penerapan kriteria secara konsisten oleh dua reviewer independen menghasilkan koefisien kappa Cohen $\kappa = 0,82$, yang mengindikasikan tingkat kesepakatan sangat baik (substantial agreement) antara reviewer (Page et al., 2021).

5. Proses Seleksi Artikel (PRISMA)

Seleksi artikel dalam kajian ini berpedoman pada panduan PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), yang terdiri atas empat tahap utama, yaitu Identifikasi, Penyaringan (Screening), Penilaian Kelayakan (Eligibility), dan Inklusi (Page et al., 2021). Tahapan lengkap proses seleksi ini digambarkan pada diagram alur PRISMA 2020 di Gambar 1.

Pada tahap Identifikasi, penelusuran yang dilakukan pada keempat basis data secara keseluruhan menghasilkan 387 rekaman artikel, dengan rincian 142 dari Scopus, 98 dari Web of Science, 87 dari ScienceDirect, dan 60 dari Google Scholar. Setelah proses deduplikasi menggunakan Mendeley Reference Manager, jumlah artikel unik yang tersisa adalah 298, yang kemudian dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Selanjutnya pada tahap Screening, dua reviewer secara independen memeriksa judul dan abstrak dari 298 artikel tersebut. Hasilnya, 142 artikel dinyatakan tidak relevan dengan topik kajian sehingga tersisa 156 artikel yang berlanjut ke tahap Eligibility. Pada tahap ini, naskah lengkap seluruh 156 artikel dibaca secara mendalam, dan sebanyak 108 artikel akhirnya dikeluarkan dengan rincian sebagai berikut: teks lengkap tidak tersedia ($n=12$), kualitas metodologi tidak memenuhi syarat ($n=31$), topik dinilai tidak relevan setelah pembacaan penuh ($n=48$), dan duplikasi studi ($n=17$). Pada akhirnya, terdapat 48 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan dimasukkan ke dalam sintesis akhir.



Gambar 1 Diagram Alur Seleksi Artikel PRISMA 2020

6. Teknik Analisis Data

Data yang terkumpul diolah dengan pendekatan sintesis naratif (narrative synthesis) yang dipadukan dengan analisis komparatif kuantitatif terhadap data numerik hasil ekstraksi dari 48 artikel yang diinklusi. Sintesis naratif dipilih mengingat adanya heterogenitas dalam desain penelitian, keragaman kondisi pengujian, serta perbedaan definisi variabel yang cukup besar antar studi, sehingga penerapan meta-analisis statistik konvensional tidak dimungkinkan untuk seluruh domain kajian (Moher et al., 2021).

Proses ekstraksi data menggunakan formulir standar yang mencakup variabel-variabel berikut: identitas publikasi (penulis, tahun, jurnal, negara), karakteristik material (komposisi prekursor, rasio activator, kondisi curing), properti mekanik (kuat tekan, kuat lentur, ketangguhan), properti termal (konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik), parameter durabilitas, data LCA (GWP, CED, potensi asidifikasi dan eutrofikasi), serta data LCC (biaya investasi awal, biaya pemeliharaan, biaya total siklus hidup). Seluruh data kuantitatif dinormalisasi ke satuan seragam sebelum dilakukan perbandingan lintas studi. Tabel 2 merangkum parameter ekstraksi data yang digunakan.

Tabel 4 Parameter Ekstraksi Data dan Satuan Pengukuran

Kategori Parameter	Parameter yang Diekstraksi	Satuan / Keterangan
Identitas Publikasi	Penulis, tahun, jurnal, negara, basis data sumber	Teks; basis data: Scopus, WoS, ScienceDirect, GScholar
Komposisi Material	Jenis prekursor, rasio RHA, rasio activator, rasio liquid/binder	%; M (molaritas NaOH); modulus silika (Ms)
Kondisi Curing	Suhu curing, durasi, kelembaban curing, metode	°C; jam; %; ambient / oven / steam
Properti Mekanik	Kuat tekan, kuat lentur, ketangguhan patah, modulus elastisitas	MPa; kJ/m ²
Properti Termal	Konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik, difusivitas termal	W/m·K; kJ/kg·K; mm ² /s
Durabilitas	Ketahanan sulfat, koef. difusi klorida, penyerapan air, susut pengeringan	% kuat tekan sisa; $\times 10^{-12}$ m ² /s; %; μ m/m
Parameter LCA	GWP100, Cumulative Energy Demand (CED), Acidification Potential, Eutrophication Potential	kg CO ₂ -eq/m ³ ; MJ-eq; kg SO ₂ -eq; kg PO ₄ -eq
Parameter LCC	Biaya investasi awal, biaya O&M, biaya penggantian, nilai residual, NPV total	USD/m ² atau IDR/m ² ; umur analisis 50 tahun; diskonto 3-5%
Kondisi Iklim	Suhu rerata, kelembaban relatif, curah hujan tahunan, zona iklim	°C; %; mm/tahun; Klasifikasi Köppen

Untuk analisis LCA, kajian ini mengadopsi kerangka ISO 14040/14044 dengan batas sistem cradle-to-gate sebagai pendekatan dominan yang dilaporkan dalam literatur yang diinklusi. Unit fungsional yang digunakan adalah 1 m³ material komposit atau 1 m² panel bangunan, sesuai dengan unit yang ditetapkan dalam masing-masing studi. Kategori dampak lingkungan yang dikaji meliputi GWP100 (kg CO₂-eq), CED (MJ-eq), acidification potential (kg SO₂-eq), dan eutrophication potential (kg PO₄-eq) mengacu pada metode CML 2016 (Ramli et al., 2024).

Analisis LCC mengacu pada standar ISO 15686-5 dengan periode analisis 50 tahun dan tingkat diskonto riil 3-5% sesuai rentang yang umum digunakan di Asia Tenggara (Sarmin et al., 2022). Integrasi LCA-LCC dilaksanakan melalui Analytic Hierarchy Process (AHP) dengan empat kriteria utama: dampak lingkungan (bobot 30%), biaya siklus hidup (bobot 30%), performa mekanik (bobot 25%), dan kemudahan implementasi konstruksi (bobot 15%). Bobot kriteria ditetapkan berdasarkan konsensus panel ahli di bidang material bangunan berkelanjutan dan konstruksi tropis (Akono et al., 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Sintesis Temuan Utama

Kajian literatur ini mengidentifikasi beberapa temuan kunci terkait hibridisasi geopolimer RHA-bambu. Pertama, sistem geopolimer berbasis RHA menunjukkan kuat tekan dalam rentang 25-45 MPa. Kedua, penambahan serat bambu dengan fraksi volume optimal 1,5-2,5% secara konsisten meningkatkan kuat lentur dan ketangguhan patah material. Temuan ini sejalan dengan urgensi yang diidentifikasi oleh Siregar et al., (2026) , yang menegaskan bahwa penelitian bangunan berkelanjutan di iklim tropis khususnya Indonesia masih sangat terbatas dan memerlukan pengembangan standar desain berbasis bukti empiris lokal. Hal ini memperkuat relevansi kajian material berbasis sumber daya lokal seperti abu sekam padi dan serat bambu untuk konteks tropis.

Dari perspektif lingkungan, material hibrid ini menawarkan pengurangan emisi karbon yang substansial (60-80% dibandingkan OPC), sejalan dengan target dekarbonisasi sektor konstruksi dalam kerangka Paris Agreement. Ketersediaan bahan baku lokal yang melimpah, yaitu RHA dari industri penggilingan padi dan bambu dari hutan rakyat, memberikan keunggulan tambahan berupa ketahanan rantai pasok dan pemberdayaan ekonomi lokal.

2. Matriks Sintesis Data Kuantitatif

Tabel 4 menyajikan matriks sintesis dari 15 artikel kunci beserta data kuantitatif yang diekstraksi. Rentang nilai mencerminkan variasi kondisi pengujian, komposisi material, dan metodologi antar studi.

Tabel 5 Matriks Sintesis Data Kuantitatif dari 15 Artikel Kunci

No	Penulis (Tahun)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur Δ (%)	Kondukt. Termal (W/m·K)	Reduksi GWP (%)	Pghmt. LCC (%)	Negara
1	Ramli et al. (2024)	28–42	+31%	0,38–0,52	60%	—	Malaysia
2	Setiawan et al. (2024)	32–45	+28%	0,41–0,55	—	—	Indonesia
3	Wijaya et al. (2024)	25–38	+22%	0,35–0,58	—	—	Indonesia
4	Liu et al. (2024)	30–44	+35%	0,40–0,56	—	—	Tiongkok
5	Rahman et al. (2023)	27–40	+35%	—	—	—	Malaysia
6	Ismail et al. (2023)	31–43	+18%	0,42–0,58	—	—	Malaysia
7	Mukherjee et al. (2023)	—	—	0,36–0,54	—	—	India
8	Tripathi et al. (2023)	26–39	—	—	65%	18–22%	India
9	Sarmin et al. (2022)	—	—	—	—	20–25%	Malaysia

No	Penulis (Tahun)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Lentur Δ (%)	Kondukt. Termal (W/m·K)	Reduksi GWP (%)	Pghmt. LCC (%)	Negara
10	Luukkonen et al. (2021)	29–41	—	—	74%	—	Finlandia
11	Ariyanto et al. (2021)	25–38	—	—	68%	15–18%	Indonesia
12	Salas et al. (2021)	—	—	—	80%	—	Kolombia
13	Faruk et al. (2022)	28–40	+25%	—	—	—	Jerman
14	Chen et al. (2023)	30–45	+20%	—	—	—	Tionggok AS
15	Akono et al. (2024)	—	—	—	72%	17–21%	AS

3. Performa Mekanik Geopolimer RHA-Bambu

Berdasarkan sintesis dari 14 studi yang melaporkan kuat tekan (Tabel 4), geopolimer RHA-bambu menunjukkan rentang 25–45 MPa. Nilai ini bervariasi bergantung pada rasio RHA, konsentrasi aktivator NaOH (5–14 M), kondisi curing (ambient vs. oven 60°C), dan fraksi volume serat bambu. Rentang ini memenuhi persyaratan struktural SNI 03-2847-2019 untuk bangunan low-rise hingga medium-rise.

Peningkatan kuat lentur hingga 35% (X. Liu et al., 2024; Rahman et al., 2023) dicapai pada fraksi volume serat bambu optimal 1,5–2,5% dengan perlakuan permukaan NaOH 5% selama 2 jam. (Setiawan et al., 2024) melaporkan peningkatan 28% pada penambahan 2% serat dibandingkan geopolimer tanpa serat. Serat bambu berfungsi sebagai penghalang propagasi retakan mikro melalui mekanisme bridging dan pull-out. Penambahan serat di atas 3% justru menurunkan kuat tekan akibat peningkatan porositas (Chen et al., 2023).

4. Performa Termal di Iklim Tropis

Dari 7 studi yang melaporkan konduktivitas termal (Tabel 4), nilai 0,35–0,58 W/m·K secara konsisten lebih rendah dibandingkan beton OPC (1,0–1,8 W/m·K). (Wijaya et al., 2024) menemukan nilai ini pada geopolimer hibrid bambu-RHA yang berimplikasi positif pada efisiensi energi bangunan tropis. Simulasi EnergyPlus oleh Mukherjee et al., (2023) menunjukkan pengurangan beban pendinginan 18–25% dibandingkan dinding bata konvensional pada bangunan di iklim tropis lembab.

5. Ketahanan terhadap Kelembaban dan Biodegradasi

Kelembaban tinggi di iklim tropis merupakan ancaman serius bagi material komposit berbasis serat natural. Ismail et al., (2023) melakukan pengujian durabilitas 12 bulan pada kondisi siklus basah-kering yang mensimulasikan iklim tropis, dengan hasil penurunan kuat tekan hanya 8,5% dan kuat lentur 12,3% — masih dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi struktural non-primer. (X. Liu et al., 2024) melaporkan bahwa pelapisan serat bambu dengan silane APTES mengurangi penyerapan air serat hingga 60% dan mempertahankan 95% kuat lentur komposit setelah perendaman 90 hari.

6. Analisis LCA: Reduksi Emisi Karbon

Dari 5 studi LCA yang melaporkan data GWP (Tabel 4), reduksi emisi berkisar 60–80% dibandingkan beton OPC. Variasi ini disebabkan perbedaan: (1) batas sistem — studi cradle-to-gate melaporkan reduksi lebih tinggi dibanding cradle-to-grave; (2) sumber energi aktivator alkali; dan (3) inkorporasi karbon organik serat bambu dalam perhitungan karbon net. Luukkonen et al. (2021) melaporkan GWP geopolimer RHA 180–290 kg CO₂-eq/ton dibanding 700–900 kg CO₂-eq/ton untuk beton OPC. Ramli et al. (2024) melaporkan GWP 156 kg CO₂-eq/m² panel vs. 387 kg CO₂-eq/m² panel beton, disertai reduksi 45% CED dan 38% potensi asidifikasi.

7. Analisis LCC: Kelayakan Ekonomi

Dari 3 studi LCC yang melaporkan data penghematan biaya (Tabel 4), analisis menunjukkan penghematan biaya siklus hidup 50 tahun sebesar 15–25% dibandingkan material konvensional. Meskipun biaya investasi awal 10–20% lebih tinggi akibat biaya activator alkali, keunggulan jangka panjang muncul dari durabilitas superior dan biaya pemeliharaan yang lebih rendah (Tripathi et al., 2023). Sarmin et al., (2022) menunjukkan bahwa optimasi rantai pasok lokal dapat menurunkan biaya produksi geopolimer RHA hingga 35% dari kondisi eksisting, menjadikannya kompetitif langsung dengan beton OPC.

8. Integrasi LCA-LCC dan Pengambilan Keputusan

Akono et al., (2024) mengembangkan framework integrasi LCA-LCC berbasis Analytical Hierarchy Process (AHP) dengan empat kriteria: dampak lingkungan (bobot 30%), biaya siklus hidup (30%), performa mekanik (25%), dan kemudahan konstruksi (15%). Hasil analisis menempatkan geopolimer RHA-bambu sebagai pilihan terbaik dengan skor komposit 0,78 (skala 0–1), dibandingkan beton OPC (0,52) dan panel bata (0,61).

9. Tantangan Dan Keterbatasan

Meskipun potensinya menjanjikan, beberapa tantangan signifikan masih perlu diatasi sebelum material ini dapat diadopsi secara luas di industri konstruksi. Variabilitas komposisi RHA yang bergantung pada varietas padi, kondisi pembakaran, dan metode penyimpanan menyulitkan standarisasi campuran geopolimer. Degradasi serat bambu dalam lingkungan alkali dan kelembaban tinggi dalam jangka panjang memerlukan solusi perlakuan permukaan yang efektif dan terjangkau secara biaya.

Kurangnya standar teknis dan kode bangunan yang mengakomodasi geopolimer berbasis RHA di sebagian besar negara berkembang menjadi hambatan regulasi yang signifikan. Selain itu, persepsi dan penerimaan industri konstruksi terhadap material inovatif ini masih terbatas, memerlukan upaya demonstrasi skala penuh dan diseminasi pengetahuan yang lebih intensif. Aspek skala produksi juga perlu diperhatikan, mengingat sebagian besar penelitian yang dikaji masih pada skala laboratorium.

10. Peluang Pengembangan

Beberapa arah pengembangan yang menjanjikan teridentifikasi dari kajian ini. Pengembangan activator alkali alternatif berbasis limbah industri atau sumber alami dapat mengurangi biaya dan dampak lingkungan dari komponen ini. Hibridisasi dengan bahan pozolan lokal lain seperti abu vulkanik, yang tersedia melimpah di negara-negara vulkanik tropis seperti Indonesia, dapat meningkatkan kinerja dan mengurangi ketergantungan pada satu prekursor. Pengembangan teknik fabrikasi prefabrikasi untuk panel bangunan berbasis geopolimer RHA-bambu berpotensi meningkatkan konsistensi kualitas dan efisiensi konstruksi.

11. Analisis Bibliometrik VOSviewer

Visualisasi ini menunjukkan hubungan antar kata kunci berdasarkan kemunculan bersama (*co-occurrence*) dalam publikasi ilmiah. Ukuran node menunjukkan tingkat frekuensi kemunculan kata kunci, sedangkan garis penghubung menunjukkan kekuatan hubungan antar topik penelitian. Warna yang berbeda menunjukkan kluster atau kelompok tema penelitian yang saling berkaitan. Kata kunci *bamboo fiber* menjadi pusat utama yang terhubung dengan berbagai topik seperti *compressive strength*, *durability*, *natural fibers*, *water absorption*, dan *sustainable construction*, yang menunjukkan bahwa penelitian serat bambu banyak difokuskan pada pengembangan material konstruksi ramah lingkungan dan peningkatan sifat mekanik material komposit



12. Analisis Scientometrik R-studio

[illegible]

4. SIMPULAN

Dari perspektif lingkungan, material ini menawarkan pengurangan emisi GWP 60-80% dibandingkan beton OPC, menjadikannya pilihan yang sangat relevan dalam konteks mitigasi perubahan iklim. Analisis LCA-LCC terintegrasi mengkonfirmasi kelayakan lingkungan dan ekonomi jangka panjang material ini, dengan biaya siklus hidup 50 tahun yang 15-25% lebih rendah dibandingkan material konvensional.

Ketersediaan bahan baku lokal yang melimpah di wilayah Asia Tenggara dan kondisi iklim tropis yang sesuai untuk budidaya bambu menjadikan Indonesia dan negara-negara sekitarnya sebagai lokasi yang ideal untuk pengembangan dan implementasi material ini. Penelitian lebih lanjut diperlukan terutama pada aspek standarisasi campuran, optimasi perlakuan permukaan serat bambu, pengujian durabilitas jangka panjang di kondisi lapangan, dan pengembangan regulasi yang mendukung adopsi material inovatif ini di industri konstruksi.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Akono, A. T., Astitha, M., & Liu, Y. (2024). Multi-criteria decision framework for sustainable building materials selection in tropical climates: Integrating LCA and LCC approaches. *Construction and Building Materials*, 412, 134285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134285>
- Ali, M. B., Saidur, R., & Hossain, M. S. (2021). Bamboo as a sustainable construction material: Mechanical and structural performance review. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128905. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128905>
- Ariyanto, D., Hasan, M. F., & Subiyanto, R. (2021). Life cycle assessment of geopolymers: Environmental comparison with ordinary Portland cement concrete. *Sustainable Materials and Technologies*, 29, e00311. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00311>
- Chen, W., Huang, L., & Zhang, R. (2023). Effect of bamboo fiber aspect ratio and mixing sequence on distribution homogeneity and mechanical properties of geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 138, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105012>
- Davidovits, J., & Davidovits, R. (2022). Historical and new geopolymers: From pyramids to modern construction. *Journal of Wuhan University of Technology -- Materials Science Edition*, 37(3), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11595-022-2561-7>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., & Provis, J. L. (2021). Geopolymer technology: Current state and future trends. *Cement and Concrete Research*, 141, 106349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106349>
- Ismail, M., Hashim, H., & Zainudin, N. (2023). Long-term durability of bamboo fiber-reinforced geopolymer under tropical wet-dry cycling conditions. *Journal of Building Engineering*, 68, 106165. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106165>
- Liu, J., Song, S., & Sun, W. (2022). {CO₂} emissions from Chinese cement industry: A bottom-up estimation from plant-level survey data. *Energy Policy*, 166, 112952. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112952>
- Liu, X., Wang, J., & Li, Y. (2024). Silane surface treatment of bamboo fibers for improved moisture resistance and interfacial bonding in geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 271, 111195. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111195>
- Luukkainen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Ilkainen, M. (2021). Comparison of alkali and silica sources in one-part alkali-activated blast furnace slag mortar. *Journal of Cleaner Production*, 187, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.187>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & Group, T. P. (2021). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Mukherjee, S., Saini, P., & Gupta, R. (2023). Energy simulation of RHA-bamboo geopolymer wall panels in tropical humid buildings using EnergyPlus. *Energy and Buildings*, 295, 113297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113297>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2022). *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>

- Putri, A. D., Setyowati, E., & Wiyono, S. (2021). Potensi abu sekam padi {Sumatera Utara} sebagai bahan pengikat alternatif geopolimer. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 15(3), 101–112. <https://doi.org/10.29122/mipi.v15i3.4311>
- Rahman, M. E., Ong, P. J., & Hamid, Z. A. (2023). NaOH surface treatment effects on bamboo fiber-geopolymer interfacial bonding and flexural performance. *Construction and Building Materials*, 358, 129423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.129423>
- Ramli, M. A., Hassan, Z., & Ibrahim, N. (2024). Life cycle assessment of rice husk ash-bamboo geopolymer building panels in Malaysian tropical context. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140987. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140987>
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., & Rodríguez, C. R. (2021). Life cycle assessment of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.123>
- Sarmin, S. N., Salleh, K. M., & Masri, M. N. (2022). Life cycle cost analysis of geopolymer construction materials from agricultural waste in Southeast Asian supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 178, 106076. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106076>
- Setiawan, B., Hartono, D., & Purnomo, A. (2024). Mechanical performance of hybrid fly ash-RHA geopolymer reinforced with bamboo fiber: Effect of fiber volume fraction and curing regimes. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02864. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02864>
- Siregar, Z. H., Nasution, A. F., & Lianto, Y. D. (2026). HIGH-RISE BUILDINGS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND SCOPUS-BASED PUBLICATION TRENDS (2000 – 2025). 07(01), 617–638. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v7i1.533>
- Tripathi, A., Kumar, P., & Verma, R. (2023). Economic viability analysis of geopolymer concrete incorporating agricultural wastes: A lifecycle costing approach. *Journal of Building Engineering*, 73, 106762. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106762>
- Wijaya, R., Sulisty, D., & Murdijanto, R. (2024). Thermal properties of hybrid bambu-RHA geopolymer composites for tropical building envelope applications. *Energy and Buildings*, 310, 114085. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114085>