

INOVASI PERKERASAN KAKU BERKELANJUTAN: TINJAUAN SISTEMATIS BETON HIJAU DARI PERSPEKTIF MATERIAL DAN LINGKUNGAN

Muhammad Rizan Adam^{1*}, Muhammad Chairi Munanjar¹, Intan Safitri¹,
dan Panca Rizki Hartanto¹

¹*Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Tanah Laut*

*E-mail: muhammadrizan@politala.ac.id

Received: 09 June 2026

Accepted: 03 July 2026

Published: 31 July 2026

Abstrak

Industri semen global menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ antropogenik, menjadikan sektor konstruksi jalan salah satu penyumbang terbesar emisi karbon di dunia. Dalam konteks ini, beton hijau yang memanfaatkan Material Sementasi Suplementer (Supplementary Cementitious Materials/SCMs) sebagai substitusi parsial semen portland biasa hadir sebagai solusi yang menjanjikan. Kajian ini bertujuan untuk mensintesis secara sistematis temuan empiris dari penelitian terdahulu mengenai penggunaan beton hijau pada perkerasan kaku, dengan fokus ganda pada kinerja material dan dampak lingkungannya. Melalui protokol tinjauan literatur sistematis, sebanyak 62 artikel yang dipilih dari basis data Scopus, Web of Science, dan ScienceDirect, diterbitkan antara tahun 2014 hingga 2024, dikaji secara komprehensif; dari seluruh korpus tersebut, 21 referensi dengan temuan paling representatif dan signifikan dicantumkan dalam daftar pustaka sebagai dasar sitasi utama dalam artikel ini. Hasil sintesis menunjukkan bahwa SCMs utama, yaitu fly ash, GGBS, dan abu sekam padi (RHA), mampu mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur pada proporsi substitusi optimal: 20–40% untuk fly ash, 30–50% untuk GGBS, dan 10–15% untuk RHA, dengan nilai RCPT 40–60% lebih rendah dari beton konvensional. Pendekatan kombinasi hibrida SCMs menunjukkan sinergi yang lebih unggul. Dari sisi lingkungan, substitusi SCMs mereduksi emisi CO₂ sebesar 10–45% dan energi tertanam 8–35%. Kajian ini juga menghasilkan matriks panduan seleksi SCMs berbasis konteks implementasi serta mengidentifikasi empat kesenjangan penelitian kritis.

Kata Kunci: Beton Hijau, Material sementasi suplementer (SCMs); Abu Sekam Padi (RHA); Emisi Karbon; Infrastruktur berkelanjutan

Abstract

With its contribution reaching approximately 8% of total anthropogenic CO₂ emissions globally, the cement manufacturing sector stands as one of the most carbon-intensive industries in existence — and road construction, as its primary consumer, shares a substantial portion of that environmental burden. This study aims to systematically synthesize empirical findings from previous research on green concrete in rigid pavement applications, focusing on material performance and environmental impact. Following a systematic literature review protocol, 62 articles selected from Scopus, Web of Science, and ScienceDirect databases (2014–2024) were comprehensively analyzed; of this full corpus, 21 references with the most representative and significant findings are cited in the bibliography as the primary citation base for this article. Synthesis results confirm that the

three primary SCMs — fly ash (optimal ratio: 20–40%), GGBS (30–50%), and rice husk ash/RHA (10–15%) — maintain or enhance compressive and flexural strength at optimal substitution levels, with RCPT values 40–60% lower than conventional concrete. Hybrid SCM combinations demonstrate superior synergistic performance. From an environmental perspective, SCM substitution consistently reduces CO₂ emissions by 10–45% and embodied energy by 8–35%. The study also produces an evidence-based SCM selection matrix by design priority and implementation context, and identifies four critical research gaps.

Keywords: *Green Concrete; Supplementary Cementitious Materials (SCMs); Rice husk ash; Carbon emissions; Infrastructure sustainability.*

To cite this article:

Muhammad Rizan Adam, et al. (2026). Inovasi Perkerasan Kaku Berkelanjutan: Tinjauan Sistematis Beton Hijau dari Perspektif Material dan Lingkungan. *Jurnal of Infrastructural in Civil Engineering*, Vol. (07), No. 02, pp: 39-50

PENDAHULUAN

Jalan raya bukan sekadar infrastruktur fisik; ia adalah urat nadi peradaban yang menghubungkan orang, barang, dan gagasan. Namun di balik setiap kilometer perkerasan beton yang terbentang, tersimpan warisan lingkungan yang tidak bisa diabaikan. Perkerasan kaku (rigid pavement) berbasis beton portland telah menjadi pilihan dominan untuk jalan dengan beban lalu lintas tinggi di seluruh dunia, terutama karena keunggulannya dalam kekakuan struktur, umur layanan, dan biaya perawatan jangka panjang yang relatif rendah. Ironisnya, material utama pembentuknya, yaitu semen portland biasa (Ordinary Portland Cement/OPC), adalah salah satu produk industri yang paling intensif karbon di planet ini [1].

Angka-angka yang ada berbicara sendiri: industri semen global bertanggung jawab atas sekitar 8% dari total emisi CO₂ antropogenik setiap tahunnya, sebuah kontribusi yang melampaui banyak negara besar sekalipun [2-3]. Proses sintesis klinker semen mengharuskan batu kapur (CaCO₃) dipanaskan hingga suhu kalsinasi yang melampaui 1.400°C, menghasilkan CO₂ melalui dua mekanisme yang secara fundamental berbeda: yang pertama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil sebagai sumber energi termal, dan yang kedua (lebih sulit dieliminasi) berasal dari reaksi dekomposisi kimia CaCO₃ itu sendiri menjadi CaO dan CO₂. Konsekuensinya, sekitar 60% dari total emisi CO₂ produksi semen bersifat inheren terhadap reaksi kimia dasarnya, sehingga tidak dapat dieliminasi meski seluruh energi proses beralih ke sumber terbarukan sekalipun [4]. Dalam kerangka perkerasan jalan, dampak ini terkuantifikasi dengan nyata: setiap kilometer jalan beton konvensional yang dibangun menghasilkan emisi CO₂ ekuivalen yang sangat signifikan dari fase produksi bahan baku saja.

Salah satu pendekatan paling menjanjikan untuk mengatasi paradoks ini adalah pengembangan beton hijau (green concrete), sebuah paradigma desain material yang menempatkan keberlanjutan lingkungan sebagai parameter perancangan yang setara pentingnya dengan kekuatan dan durabilitas. Beton hijau terutama memanfaatkan Material Sementasi Suplementer (SCMs), seperti abu terbang (fly ash), terak tanur tinggi butiran halus (GGBS), dan abu sekam padi (RHA), sebagai substitusi parsial OPC. Material-material ini umumnya merupakan produk sampingan dari proses industri lain, sehingga penggunaannya secara bersamaan mengurangi emisi karbon dari sektor semen sekaligus menyelesaikan persoalan pengelolaan limbah industri. Tidak hanya itu, agregat daur ulang dari demoli bangunan dan bahan-bahan alami lokal juga terus dieksplorasi sebagai komponen pendukung yang memperluas definisi ‘hijau’ melampaui sekadar substitusi semen [2], [5-6].

Meskipun penelitian tentang beton hijau sudah berkembang cukup luas, sebagian besar kajian yang tersedia berfokus pada aplikasi elemen struktural konvensional seperti kolom, balok, dan pelat lantai. Aplikasi beton hijau yang spesifik untuk perkerasan kaku memiliki tuntutan kinerja yang berbeda dan lebih ketat: nilai kuat tekan minimum yang lebih tinggi, resistensi lentur yang memadai untuk menahan beban dinamis berulang dari lalu lintas kendaraan berat, serta durabilitas terhadap penetrasi air, siklus beku-cair, dan paparan senyawa kimia di permukaan jalan. Oleh karena itu, tidak semua temuan dari kajian beton struktural dapat diadopsi secara langsung ke dalam konteks desain perkerasan kaku. Di sinilah celah pengetahuan yang signifikan masih terbuka lebar [5,7].

Berdasarkan tujuan tersebut, kajian ini dilandasi tiga pertanyaan penelitian: (RQ1) Bagaimana kinerja mekanik dan durabilitas beton hijau berbasis SCMs dibandingkan beton OPC dalam perkerasan kaku? (RQ2) Seberapa besar manfaat lingkungan dari substitusi OPC dengan SCMs, diukur dari reduksi emisi CO₂ dan energi tertanam? (RQ3) Apa kesenjangan penelitian yang masih ada untuk mendorong adopsi beton hijau di negara berkembang beriklim tropis?

Kebaruan (novelty) kajian ini terletak pada tiga aspek yang membedakannya dari tinjauan sistematis sebelumnya. Pertama, kajian ini secara spesifik membatasi fokus pada aplikasi perkerasan kaku (rigid pavement), berbeda dari review terdahulu seperti Raghav et al. [5] yang mencakup beton hidrolik struktural secara umum dan Chandrappa & Biligiri [6] yang mengkaji perkerasan pervious tanpa membedakan tuntutan kinerja strukturalnya. Kedua, kajian ini mengintegrasikan secara simultan dimensi kinerja mekanik, durabilitas, dan dampak lingkungan (LCA) dalam satu sintesis yang koheren, sehingga insinyur perencana dapat membuat keputusan berbasis bukti secara holistik. Ketiga, kajian ini secara eksplisit mengembangkan matriks panduan seleksi SCMs berbasis konteks implementasi, termasuk pertimbangan ketersediaan material lokal di Indonesia dan negara berkembang beriklim tropis — sebuah dimensi yang belum tersedia dalam tinjauan terdahulu secara sistematis [2], [5-6].

Kajian ini memberikan kontribusi yang berlapis: di tingkat akademik, ia menyediakan sintesis literatur yang komprehensif dan terkini untuk segmen perkerasan kaku berbasis beton hijau; di tingkat praktis, ia menghadirkan panduan berbasis bukti untuk insinyur perencana; dan di tingkat kebijakan, ia menawarkan argumentasi ilmiah untuk mendukung revisi standar teknis nasional. Dalam konteks Indonesia, di mana limbah pertanian berupa sekam padi dan produk sampingan industri baja tersedia dalam jumlah besar, temuan kajian ini dapat menjadi katalis penting bagi transformasi industri konstruksi jalan [1, 5].

METODE PENELITIAN

Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis (systematic literature review/SLR) sebagai kerangka metodologis utama. Pilihan ini bukan tanpa alasan: berbeda dari tinjauan narasi konvensional yang pemilihan sumbernya cenderung bersifat subjektif, SLR menerapkan protokol pencarian dan seleksi yang eksplisit, transparan, dan dapat direproduksi oleh peneliti lain. Dengan demikian, setiap kesimpulan yang dihasilkan dapat ditelusuri kembali ke bukti ilmiah yang mendasarinya, bukan sekadar interpretasi personal. Untuk menjawab ketiga pertanyaan penelitian (RQ1–RQ3), pencarian literatur dilakukan secara sistematis pada tiga basis data ilmiah bereputasi internasional yang saling melengkapi, yaitu Scopus, Web of Science (WoS), dan ScienceDirect. Ketiga platform ini dipilih karena jangkauannya yang komprehensif terhadap publikasi teknik sipil, rekayasa material, dan ilmu lingkungan, serta statusnya sebagai basis data yang paling diakui dalam komunitas akademik internasional untuk keperluan pemeringkatan dan sitasi.

Pencarian dibatasi pada rentang tahun 2014 hingga 2025, sebuah dekade yang dipilih secara deliberatif karena merepresentasikan periode paling dinamis dan produktif dalam perkembangan penelitian beton hijau untuk infrastruktur perkerasan, seiring meningkatnya tekanan regulasi global terhadap dekarbonisasi sektor konstruksi. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean yang telah dirancang cermat, mencakup: ("green concrete" OR "sustainable concrete") AND ("rigid pavement" OR "concrete pavement" OR "road pavement"); ("fly ash" OR "GGBS" OR "rice husk ash") AND ("pavement" OR "road") AND ("mechanical properties" OR "durability"); serta ("life cycle assessment" OR "carbon footprint" OR "embodied energy") AND ("concrete pavement" OR "rigid pavement"). Seluruh pencarian dilakukan dalam bahasa Inggris dan mencakup bidang judul (TI), abstrak (AB), serta kata kunci (KW), dengan batasan tipe dokumen pada artikel penelitian primer dan artikel tinjauan yang telah melalui proses peer-review. Sebuah artikel dinyatakan memenuhi syarat inklusif apabila: membahas secara eksplisit penggunaan SCMs dalam campuran beton untuk aplikasi perkerasan jalan, menyajikan data kuantitatif yang dapat diverifikasi terkait kinerja mekanik atau dampak lingkungan, diterbitkan dalam jurnal terindeks Scopus atau WoS pada rentang 2014–2024, dan tersedia dalam teks lengkap. Sebaliknya, artikel dikeluarkan apabila berupa opini atau prosiding yang belum melalui peer-review ketat, hanya membahas beton struktural tanpa relevansi eksplisit terhadap perkerasan, atau merupakan duplikasi dari studi yang sudah terpilih.

Proses seleksi artikel dilakukan secara bertahap dan terdokumentasi mengikuti panduan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) sehingga setiap keputusan inklusi maupun eksklusi dapat diaudit secara transparan. Pada tahap awal, pencarian menggunakan strategi kata kunci yang telah dirancang menghasilkan total 1.247 rekaman dari seluruh basis data. Setelah penghapusan duplikasi lintas basis data, tersisa 983 artikel yang unik. Penyaringan berdasarkan judul dan abstrak mengeliminasi 789 artikel yang secara jelas tidak relevan dengan fokus kajian, sehingga menyisakan 194 artikel untuk dikaji lebih mendalam. Pembacaan teks lengkap terhadap 194 artikel tersebut, disertai penerapan kriteria inklusi dan eksklusi secara ketat, menghasilkan 62 artikel final yang memenuhi seluruh syarat untuk dianalisis dalam kajian ini. Angka ini mencerminkan ketelitian proses seleksi: dari lebih dari seribu rekaman awal, hanya artikel-artikel dengan bukti empiris yang kuat, relevansi topik yang jelas, dan kualitas metodologi yang memadai yang akhirnya lolos untuk disintesis.

Penilaian kualitas artikel (quality assessment) dilakukan terhadap seluruh 62 artikel yang lolos seleksi menggunakan adaptasi instrumen CASP (Critical Appraisal Skills Programme) yang disesuaikan untuk studi eksperimental rekayasa material. Setiap artikel dinilai berdasarkan tiga dimensi utama: (1) kejelasan tujuan dan desain penelitian, (2) kecukupan jumlah spesimen dan pengulangan pengujian, serta (3) validitas dan reliabilitas metode pengujian yang digunakan. Skor kualitas diklasifikasikan menjadi tiga kategori: tinggi (memenuhi seluruh kriteria), sedang (memenuhi sebagian besar kriteria), dan rendah (memenuhi kurang dari separuh kriteria). Hanya artikel berkategori sedang hingga tinggi yang diikutsertakan dalam sintesis akhir, sementara artikel berkualitas rendah dieksklusi pada tahap ini. Penilaian risiko bias (risk of bias assessment) juga dilaksanakan dengan memperhatikan potensi bias seleksi (pemilihan material SCM yang tidak representatif), bias pengukuran (inkonsistensi metode pengujian antar laboratorium), serta bias pelaporan (kecenderungan hanya mempublikasikan hasil positif). Temuan ini dilaporkan secara transparan sebagai bagian dari keterbatasan kajian.

Guna meminimalkan subjektivitas dalam proses seleksi dan ekstraksi data, seluruh tahapan penyaringan dilaksanakan secara independen oleh dua peneliti (MRA dan MCM),

kemudian hasilnya dibandingkan dan didiskusikan untuk mencapai konsensus. Setiap perbedaan penilaian diselesaikan melalui diskusi bersama peneliti ketiga (IS) sebagai arbitrator. Tingkat kesepakatan antar-peneliti (inter-rater reliability) dihitung menggunakan koefisien Cohen's Kappa, yang menghasilkan nilai $\kappa = 0,82$ untuk tahap penyaringan judul-abstrak dan $\kappa = 0,79$ untuk tahap pembacaan teks lengkap, keduanya termasuk dalam kategori 'kesepakatan sangat baik' (substantial to almost perfect agreement). Prosedur ini memastikan bahwa kesimpulan kajian tidak bergantung pada penilaian tunggal seorang peneliti, melainkan mencerminkan konsensus yang dapat dipertanggungjawabkan secara metodologis.

Dari setiap artikel yang berhasil melewati proses seleksi, data diekstraksi secara terstruktur menggunakan formulir ekstraksi yang telah dirancang khusus untuk kajian ini. Variabel yang diekstraksi mencakup: karakteristik publikasi (penulis, tahun, jurnal, negara penelitian), jenis dan kadar SCMs yang digunakan, parameter kinerja mekanik (kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas), hasil pengujian durabilitas (RCPT, permeabilitas, resistensi sulfat), data emisi CO₂ atau indikator penilaian siklus hidup (LCA), serta kondisi eksperimental yang relevan seperti rasio air-binder, metode perawatan, dan umur pengujian. Sintesis dilakukan secara kualitatif-naratif yang diperkuat dengan tabel komparasi semi-kuantitatif. Pendekatan ini dipilih secara sadar mengingat heterogenitas metodologi eksperimental yang tinggi antar studi, yang membuat meta-analisis statistik penuh tidak dapat dilakukan secara bertanggung jawab; narasi yang diperkuat data justru memungkinkan nuansa dan konteks dari setiap temuan dapat disampaikan dengan lebih jujur dan menyeluruh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil sintesis komprehensif dari 62 artikel yang telah dikaji, diorganisasikan dalam tujuh subbab yang mengalir secara logis dan saling memperkuat: (3.1) karakteristik umum korpus literatur; (3.2) kinerja mekanik SCMs utama; (3.3) analisis mendalam mekanisme dan faktor pengendali; (3.4) dampak lingkungan dan LCA; (3.5) pendekatan hibrida; (3.6) analisis komparatif dan matriks seleksi; serta (3.7) kesenjangan penelitian.

Karakteristik Umum Literatur

Dari 62 artikel yang dianalisis, distribusi geografis menunjukkan dominasi dari negara-negara Asia Selatan dan Asia Tenggara (41%), diikuti Eropa (27%), Amerika (18%), dan kawasan lainnya (14%). Tren temporal menunjukkan peningkatan volume publikasi lebih dari dua kali lipat antara 2014 dan 2023, mencerminkan arus utama riset yang menguat seiring meningkatnya urgensi target dekarbonisasi global [2]. Fly ash mendominasi dengan kemunculan dalam 78% dari total artikel, diikuti GGBS (61%), dan RHA (47%). Penggunaan kombinasi dua atau lebih SCMs ditemukan dalam 38% artikel [8].

Kinerja Mekanik Beton Hijau pada Perkerasan Kaku

Kinerja mekanik merupakan gerbang pertama yang harus dilalui oleh setiap material baru yang dipertimbangkan untuk aplikasi perkerasan jalan. Subbab ini mengkaji kuat tekan, kuat lentur, dan durabilitas untuk tiga jenis SCMs utama [5, 9-10].

Abu terbang (fly ash) SCM paling luas diteliti secara global. Komponen utama fly ash yakni silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) dalam fase amorf yang sangat reaktif mengaktifkan

jalur reaksi sekunder dengan produk hidrasi semen, menghasilkan fase kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang mengisi ruang-ruang pori dan memperkuat matriks beton. Karena jalur reaksi ini bersifat laten, penguatan berlangsung lebih lambat namun berkelanjutan, menghasilkan densifikasi mikrostruktur yang lebih sempurna dalam jangka panjang [5, 7]. Substitusi fly ash pada kadar 20–30% menghasilkan kuat tekan 28 hari yang setara atau sedikit lebih rendah dibanding beton kontrol OPC, namun pada usia 90 hari menyamai bahkan melampaui nilai kontrol sebesar 10–15% [5]. Untuk kuat lentur, campuran dengan fly ash 20–30% secara konsisten mempertahankan nilai $\geq 4,0$ –5,0 MPa yang memenuhi standar perkerasan [7, 9].

GGBS terbentuk ketika terak cair dari peleburan besi kasar dalam tanur tinggi dikuenching secara cepat menggunakan air atau uap, kemudian digiling hingga tingkat kehalusan yang dipersyaratkan. Sifat amorf inilah yang menganugerahkan GGBS karakteristik hidraulik laten: kemampuan bereaksi langsung dengan air dan mengembangkan kekuatan secara mandiri [5]. Kisaran substitusi optimal berada pada 30–50%, menghasilkan kuat tekan yang setara dengan beton kontrol OPC dan permeabilitas yang secara signifikan lebih rendah. Durabilitas jangka panjang GGBS paling menonjol: resistensi terhadap serangan sulfat, penetrasi ion klorida, dan ekspansi alkali-silika secara konsisten mengungguli beton OPC [6, 11].

Abu sekam padi (RHA) memiliki resonansi strategis tinggi untuk Indonesia sebagai salah satu produsen padi terbesar dunia. Kadar SiO_2 amorf yang dihasilkan melalui pembakaran terkontrol (suhu 500–700°C) dapat melampaui 85% bahkan 95% pada kondisi optimal, menjadikan RHA sebagai salah satu material pozzolanic alami paling reaktif dari sumber limbah pertanian [10, 12]. Kadar substitusi optimal berada pada 10–15%, dengan penurunan kuat tekan 28 hari 8–18% yang secara konsisten mengecil pada usia 60–90 hari. RHA yang digiling halus hingga ukuran partikel rata-rata di bawah 10 μm (nilai Blaine > 15.000 cm^2/g) menampilkan reaktivitas pozzolanic yang jauh lebih unggul dibandingkan RHA kasar [10, 12, 13].

Tabel 1. Komparasi kinerja mekanik dan durabilitas SCMs pada perkerasan beton

Jenis SCM	Kadar Optimal	Kuat Tekan (28 hr)	Kuat Lentur (MPa)	Keunggulan Durabilitas	Sumber
Fly Ash (C/F)	20–40%	Setara (28 hr); +10–15% (90 hr)	$\geq 4,5$ MPa	Resistensi ASR tinggi	[5]
GGBS	30–50%	Setara atau lebih tinggi	$> 5,0$ MPa	Klorida & sulfat	[11]
RHA	10–15%	–18% (28 hr); setara (90 hr)	Di atas standar	Klorida & asam	[10]
FA+GGBS	15–25%+25–35%	Meningkat sinergis	Optimal sinergis	Multi-mekanisme	[8]

Analisis Mendalam: Mekanisme dan Faktor Pengendali

Faktor paling determinan adalah rasio air-binder (w/b). Hampir tanpa pengecualian, studi-studi yang melaporkan kinerja mekanik baik menggunakan w/b di bawah 0,45. Pada w/b yang rendah, SCMs reaktif bekerja optimal karena konsentrasi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang lebih tinggi per satuan volume pasta meningkatkan laju dan efisiensi reaksi pozzolanic [5]. Implikasinya:

penggunaan superplasticizer (SP) menjadi hampir wajib dalam desain campuran beton hijau untuk mempertahankan w/b rendah tanpa mengorbankan workability [5, 9].

Faktor kedua adalah metode dan durasi perawatan (curing). Beton hijau jauh lebih sensitif terhadap kondisi perawatan dibanding beton OPC karena reaksi pozzolanic memerlukan ketersediaan air yang cukup. Kondisi iklim tropis dengan suhu tinggi dan penguapan cepat memperburuk tantangan ini, menunjukkan bahwa protokol perawatan yang lebih ketat diperlukan untuk perkerasan beton hijau di wilayah tropis seperti Indonesia [5], [9]. Beton berbasis SCMs secara konsisten menunjukkan nilai RCPT 40–60% lebih rendah dibandingkan beton OPC, yang berimplikasi pada ketahanan jangka panjang yang lebih tinggi terhadap serangan klorida, sulfat, dan karbonasi [6, 11].

Dampak Lingkungan: Reduksi Emisi Karbon dan Life Cycle Assessment

Ma et al. [4], dalam kajian komprehensif mereka terhadap emisi GRK dari pembangunan jalan beton di China, menemukan bahwa fase produksi bahan baku menyumbang 92,7% dari total emisi GRK seumur hidup perkerasan. Produksi setiap ton klinker semen menghasilkan sekitar 0,83–0,93 ton CO₂, sementara emisi dari produksi fly ash dan GGBS sebagai produk sampingan industri lain hampir mendekati nol [2].

Substitusi fly ash pada kadar 30% mereduksi emisi CO₂ berkisar 15–25%; GGBS pada kadar 40–50% mencapai 35–45%; sementara RHA pada 10–15% memberikan reduksi 10–18% [1, 14–15]. Singh et al. [16] menemukan bahwa penggunaan campuran SCMs dapat mengurangi energi tertanam perkerasan hingga 25–35% dibandingkan baseline OPC. Studi LCA secara konsisten menunjukkan penurunan Global Warming Potential (GWP) perkerasan beton hijau dibandingkan konvensional [16–18].

Tabel 2. Estimasi reduksi emisi CO₂ dan energi tertanam berdasarkan jenis dan kadar SCMs

Jenis SCM	Kadar Substitusi	Reduksi CO ₂ (%)	Reduksi Energi (%)	Sumber Referensi
Fly Ash	20–40%	15–25%	12–20%	[4, 18]
GGBS	30–50%	30–45%	20–30%	[11, 14]
RHA	10–15%	10–18%	8–15%	[12, 15]
Kombinasi SCMs	30–60%	25–45%	25–35%	[3], [6–17]

Pendekatan Hibrida: Kombinasi Dua atau Lebih SCMs

Dari 62 artikel yang dikaji, sebanyak 38% mengeksplorasi penggunaan kombinasi dua atau lebih SCMs [8, 11]. Dasar pemikirannya adalah konsep ‘efek pengisian berjenjang’ (multi-scale filling effect) di tiga skala berbeda [5, 8]: GGBS mengisi ruang antar agregat (skala makro); fly ash mengisi ruang-ruang lebih kecil sekaligus meningkatkan workability sebagai bantalan bola (ball bearing) (skala meso); dan RHA mengisi pori kapiler terkecil dan menghaluskan zona transisi antarmuka/ITZ (skala mikro-nano).

Kombinasi FA+GGBS pada rasio 30:30 hingga 25:40 secara konsisten menghasilkan kuat tekan yang melampaui beton OPC kontrol dan nilai RCPT pada kategori ‘very low’ (<1000 Coulombs) berdasarkan ASTM C1202 [11, 19–20]. Kombinasi GGBS+RHA pada total substitusi 40–50% menghasilkan beton dengan permeabilitas ultra-rendah dan potensi reduksi emisi CO₂ hingga 40–50%. Implikasi bagi Indonesia sangat signifikan: fly ash dari

PLTU batubara dan RHA dari industri pengolahan padi tersedia melimpah dan dapat dikombinasikan untuk menghasilkan beton perkerasan yang superior secara teknis sekaligus berkelanjutan secara lingkungan [13].

Analisis Komparatif: Matriks Panduan Seleksi SCMs

Tidak ada satu SCM pun yang secara universal unggul di semua dimensi. Pilihan yang tepat bergantung pada konteks aplikasi, kondisi lingkungan, ketersediaan material lokal, dan prioritas desain [5, 6]. Tabel 4 menyajikan matriks panduan seleksi berdasarkan prioritas desain dan konteks implementasi.

Tabel 3. Matriks panduan seleksi SCMs berdasarkan prioritas desain

Prioritas/ Konteks	SCM Direkomendasikan	Kadar (%)	Keuntungan Utama	Pertimbangan
Maks. reduksi karbon	GGBS tunggal	40–50%	Reduksi CO ₂ hingga 45%	Bergantung industri baja
Kinerja mekanik premium	FA + GGBS	20%+35%	Sinergi kekuatan & durabilitas	Perlu SP workability
Material lokal (tropis/padi)	RHA + FA	10%+25%	Limbah lokal, hemat biaya	Kontrol kualitas RHA ketat
Durabilitas pesisir/agresif	GGBS + RHA	35%+12%	Permeabilitas ultra-rendah	Curing lembab lebih lama
Keseimbangan optimal	FA+GGBS+RHA	15%+30%+10%	Sinergi material	Desain campuran kompleks

Tantangan dan Kesenjangan Penelitian

Identifikasi dan pengakuan eksplisit atas kesenjangan penelitian merupakan kekuatan ilmiah sebuah tinjauan sistematis. Subbab ini mendedikasikan pembahasan mendalam terhadap empat kesenjangan utama yang teridentifikasi.

Kesenjangan pertama: kurangnya data durabilitas jangka panjang dari kondisi lapangan nyata. Dari 62 artikel yang dikaji, tidak ada satu pun yang menyajikan data kinerja lebih dari 5 tahun dari perkerasan beton hijau yang beroperasi di lapangan. Kondisi lapangan nyata jauh lebih kompleks: perkerasan terpapar siklus basah-kering berulang, beban lalu lintas kumulatif, paparan polutan kimia, serta variasi suhu harian hingga 20–30°C di kawasan tropis. Membangun jaringan proyek percontohan yang dipantau secara jangka panjang adalah investasi penelitian yang tidak bisa ditunda [2, 6].

Kesenjangan kedua: kelangkaan data LCA kontekstual untuk negara berkembang. Database inventori LCA yang dominan (ecoinvent-Swiss, ELCD-Eropa) memiliki karakteristik intensitas karbon jaringan listrik yang sangat berbeda dari Indonesia. Mengaplikasikan asumsi LCA Eropa ke konteks Indonesia dapat menghasilkan estimasi manfaat lingkungan yang terlalu optimistis [2]. Kesenjangan ketiga: minimnya integrasi Life Cycle Cost Analysis (LCCA) komprehensif dengan horizon waktu 20–40 tahun. Kesenjangan keempat: kurangnya pemahaman perilaku beton hijau pada kondisi cuaca ekstrem (gelombang panas berkepanjangan, banjir intensif, siklus kering-basah dipercepat) akibat perubahan iklim [2, 6].

Posisi Kajian dalam Literatur

Mengintegrasikan seluruh temuan yang telah dipaparkan dalam bagian hasil, diskusi ini berupaya melampaui deskripsi data menuju interpretasi yang lebih dalam dan rekomendasi yang dapat ditindaklanjuti. Bukti ilmiah yang terkumpul memberikan dukungan kuat terhadap kelayakan teknis beton hijau berbasis SCMs sebagai alternatif viable untuk perkerasan kaku konvensional [2-3].

Variasi hasil kinerja mekanik antar penelitian yang disintesis perlu dianalisis secara kritis, karena perbedaan yang cukup besar tidak selalu mengindikasikan inkonsistensi ilmiah, melainkan mencerminkan pengaruh variabel kontekstual yang kompleks. Pertama, dari sisi geografis dan iklim: penelitian yang dilakukan di iklim sub-tropis dengan suhu curing yang lebih stabil (15–25°C) cenderung melaporkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan studi di iklim tropis lembab seperti Indonesia, di mana suhu tinggi mempercepat penguapan dan mengganggu hidrasi optimum [5, 9]. Fly ash dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara bituminus (kelas F) menunjukkan reaktivitas pozzolanic yang lebih konsisten dibandingkan fly ash kelas C dari batubara sub-bituminus yang lebih umum tersedia di Indonesia, sehingga hasil penelitian dari India, China, atau Eropa tidak dapat langsung diaplikasikan tanpa karakterisasi ulang material lokal. Kedua, dari sisi regulasi dan standar teknis: sebagian besar studi menggunakan standar ASTM atau EN, sementara Indonesia masih dalam proses mengadaptasi SNI untuk mengakomodasi SCMs secara komprehensif. Perbedaan metode pengujian kuat tekan (silinder vs. kubus) dan umur pengujian standar turut berkontribusi pada variasi data yang dilaporkan. Ketiga, tantangan implementasi di Indonesia mencakup belum meratanya infrastruktur pengujian dan sertifikasi SCMs di daerah, keterbatasan akses terhadap superplasticizer berkualitas tinggi di luar kota besar, serta perlunya pelatihan tenaga teknis lapangan yang memahami karakteristik beton hijau yang berbeda dari beton OPC konvensional [6, 13].

Desainer campuran perlu memahami bahwa beton hijau berbasis SCMs berperilaku sebagai sistem yang berkembang lebih lambat namun lebih konsisten: kekuatan awal (7 dan 28 hari) mungkin lebih rendah, namun kekuatan jangka panjang (90 hari ke atas) umumnya setara atau lebih tinggi. Beton hijau memerlukan pengendalian kualitas yang lebih ketat, terutama dalam hal variabilitas bahan baku SCMs. Implementasi dalam skala industri mensyaratkan pengembangan sistem pengujian dan sertifikasi bahan baku yang robust [9], [7]. Standar desain perkerasan yang ada, termasuk SNI yang relevan, umumnya dikalibrasi berdasarkan karakteristik beton OPC dan mungkin memerlukan penyesuaian atau faktor koreksi khusus ketika diterapkan pada beton hijau berbasis SCMs [5-6].

Keberhasilan transisi menuju perkerasan beton hijau secara luas bergantung tidak kurang pentingnya pada dimensi kebijakan. Ekosistem ini mencakup empat komponen yang saling menguatkan [2], [3]: (1) standarisasi dan regulasi yang akomodatif pembaruan SNI yang mengakomodasi SCMs secara eksplisit merupakan sinyal regulatif kuat kepada industri; (2) insentif ekonomi yang menciptakan kesetaraan persaingan antara material konvensional dan material hijau melalui skema pajak karbon atau kredit karbon konstruksi hijau; (3) pengembangan kapasitas SDM melalui pembaruan kurikulum teknik sipil dan program pelatihan profesional; dan (4) pengembangan rantai pasok SCMs yang andal, terutama untuk fly ash dan RHA yang tersedia melimpah namun belum dimanfaatkan optimal di Indonesia [12-13].

Dibandingkan dengan tinjauan sistematis sebelumnya, seperti [5] yang berfokus pada beton hidrolik struktural dan [6] yang mengkaji perkerasan beton pervious secara umum, kajian ini memiliki beberapa keunggulan: (1) cakupan material yang lebih komprehensif; (2) fokus spesifik pada perkerasan kaku; dan (3) integrasi dimensi teknis dan lingkungan dalam

satu sintesis yang koheren. Keterbatasan kajian mencakup dominasi studi dari kawasan Asia yang mungkin memperkenalkan bias terhadap konteks iklim tertentu, dan ketidakmampuan melakukan meta-analisis statistik akibat heterogenitas metodologi antar studi [5, 16].

SIMPULAN

Kajian sistematis ini telah mensintesis temuan dari 62 artikel ilmiah bereputasi internasional dalam bidang beton hijau untuk perkerasan kaku, diterbitkan antara tahun 2014 hingga 2024. Berdasarkan analisis komprehensif, empat simpulan utama dirumuskan.

Pertama, beton hijau berbasis SCMs (fly ash 20–40%, GGBS 30–50%, RHA 10–15%) terbukti layak secara teknis untuk perkerasan kaku, dengan nilai RCPT 40–60% lebih rendah dan kuat lentur yang memenuhi standar minimum perkerasan, terutama pada usia 90 hari [11], [10]. Kedua, substitusi SCMs secara konsisten mereduksi emisi CO₂ sebesar 10–45% dan energi tertanam 8–35%, dengan hasil LCA yang konsisten menunjukkan penurunan GWP [3, 16–17]. Ketiga, kombinasi hibrida SCMs (FA+GGBS, GGBS+RHA, atau FA+GGBS+RHA) menghasilkan kinerja yang lebih superior dibandingkan SCM tunggal, dengan matriks panduan seleksi yang dikembangkan memberikan kerangka keputusan berbasis bukti bagi insinyur perencana [8, 21]. Keempat, empat kesenjangan penelitian mendesak teridentifikasi: (1) data durabilitas lapangan jangka panjang di iklim tropis; (2) data LCA kontekstual untuk negara berkembang; (3) analisis biaya siklus hidup (LCCA) terintegrasi; dan (4) pemahaman perilaku beton hijau pada kondisi cuaca ekstrem.

Lima rekomendasi penelitian spesifik dan terukur: (1) proyek percontohan beton hijau pada ruas jalan nyata yang dipantau secara longitudinal minimal 5 tahun; (2) pengembangan database inventori LCA spesifik untuk Indonesia dan ASEAN; (3) studi LCCA komprehensif dengan horizon waktu 20–40 tahun; (4) penelitian performa beton hijau di bawah skenario iklim ekstrem; dan (5) optimasi formulasi campuran FA+RHA spesifik untuk konteks Indonesia yang menjadi agenda penelitian nasional terprogram.

Implikasi praktis kajian ini dapat dirinci untuk tiga kelompok pemangku kepentingan yang berbeda. Bagi perencana jalan dan insinyur desain, matriks panduan seleksi SCMs (Tabel 3) menyediakan kerangka keputusan operasional: untuk jalan nasional dengan lalu lintas berat di kawasan industri, kombinasi FA+GGBS pada rasio 20%+35% direkomendasikan karena memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan jangka panjang dan durabilitas terhadap serangan kimia; sementara untuk jalan perdesaan dan jalan kabupaten, kombinasi RHA+FA berbasis limbah lokal menawarkan solusi yang lebih ekonomis dan berkelanjutan. Bagi kontraktor pelaksana, perlu dipahami bahwa beton hijau memerlukan penyesuaian prosedur quality control, terutama dalam hal perpanjangan durasi curing basah (minimal 14 hari untuk campuran dengan GGBS > 40%), penggunaan superplasticizer untuk menjaga workability pada w/b rendah, serta uji kekuatan pada umur 90 hari sebagai tolok ukur penerimaan yang lebih representatif. Bagi pembuat kebijakan, kajian ini menyediakan argumentasi ilmiah yang kuat untuk mendorong: (a) revisi SNI desain campuran beton perkerasan yang secara eksplisit mengakomodasi substitusi SCMs; (b) penetapan standar kualitas minimum RHA dan fly ash lokal untuk keperluan konstruksi; dan (c) pengembangan skema insentif fiskal bagi proyek infrastruktur jalan yang menggunakan beton hijau bersertifikat dengan bukti reduksi emisi karbon yang terverifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Kos, S. Kroviakov, A. Mishutin, and A. Poltorapavlov, "An experimental study on the properties of concrete and fiber-reinforced concrete in rigid pavements," *Materials*, vol. 16, no. 17, p. 5886, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/ma16175886>
- [2] G. Habert, S. A. Miller, V. M. John, J. L. Provis, A. Favier, A. Horvath, and K. L. Scrivener, "Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries," *Nat. Rev. Earth Environ.*, vol. 1, pp. 559–573, 2020. doi: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- [3] Y. Zhang, K. Akimoto, M. Siriwardana, and T. Mishima, "The role of concrete in life cycle greenhouse gas emissions of US buildings and pavements," *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 118, no. 37, p. e2021936118, 2021. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2021936118>
- [4] F. Ma, A. Sha, P. Yang, and Y. Huang, "The greenhouse gas emission from Portland cement concrete pavement construction in China," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 13, no. 7, p. 632, 2016. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph13070632>
- [5] M. Raghav, T. Park, H.-M. Yang, S.-Y. Lee, S. Karthick, and H.-S. Lee, "Review of the effects of supplementary cementitious materials and chemical additives on the physical, mechanical and durability properties of hydraulic concrete," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7270, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14237270>
- [6] A. K. Chandrappa and K. P. Biligiri, "Pervious concrete as a sustainable pavement material—Research findings and future prospects: A state-of-the-art review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 111, pp. 262–274, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.054>
- [7] A. G. Alex, P. A. Jose, M. Saberian, and J. Li, "Green pervious concrete containing diatomaceous earth as supplementary cementitious materials for pavement applications," *Materials*, vol. 16, no. 1, p. 48, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/ma16010048>
- [8] S. K. Das, A. Adediran, C. R. Kaze, S. M. Mustakim, and N. Leklou, "Production, characteristics, and utilization of rice husk ash in alkali activated materials: An overview of fresh and hardened state properties," *Constr. Build. Mater.*, vol. 345, p. 128341, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128341>
- [9] M. F. Mohd Tahir et al., "Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications," *Materials*, vol. 15, no. 10, p. 3458, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15103458>
- [10] B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, and A. Alaskar, "Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: A critical review," *J. Cleaner Prod.*, vol. 312, p. 127734, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127734>
- [11] H. El-Hassan and P. Kianmehr, "Pervious concrete pavement incorporating GGBS to alleviate pavement runoff and improve urban sustainability," *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 19, no. 1, pp. 167–181, 2018. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1251957>
- [12] V. Jittin, A. Bahurudeen, and S. D. Ajinkya, "Utilisation of rice husk ash for cleaner production of different construction products," *J. Cleaner Prod.*, vol. 263, p. 121578, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121578>
- [13] A. T. Mossie, D. Khatiwada, B. Palm, and G. Bekele, "Innovative approaches to sustainable construction: A detailed study of rice husk ash as an eco-friendly substitute in cement production," *Discov. Appl. Sci.*, vol. 6, p. 587, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06314-1>
- [14] M. Ulucan and K. E. Alyamac, "A comprehensive assessment of mechanical and environmental properties of green concretes produced using recycled concrete aggregates and supplementary cementitious material," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, pp. 97765–97785, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29197-y>
- [15] A. P. Gursel, H. Maryman, and C. Ostertag, "A life-cycle approach to environmental, mechanical, and durability properties of 'green' concrete mixes with rice husk ash," *J. Cleaner Prod.*, vol. 112, pp. 823–836, 2016. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.029>

- [16] A. Singh, P. Vaddy, and K. P. Biligiri, "Quantification of embodied energy and carbon footprint of pervious concrete pavements through a methodical lifecycle assessment framework," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104953, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104953>
- [17] X. Shi et al., "Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymer concrete," *Materials*, vol. 14, no. 23, p. 7375, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14237375>
- [18] K. C. Onyelowe et al., "Global warming potential-based life cycle assessment and optimization of the compressive strength of fly ash-silica fume concrete: Environmental impact consideration," *Front. Built Environ.*, vol. 8, p. 992552, 2022. doi: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.992552>
- [19] N. Saboo, S. Shivhare, K. K. Kori, and A. K. Chandrappa, "Effect of fly ash and GGBS on mechanical and durability properties of pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 64–75, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.166>
- [20] Y. Wang, S. Hu, and Z. He, "Mechanical and fracture properties of fly ash geopolymer concrete addicted with calcium aluminate cement," *Front. Mater.*, vol. 9, p. 852271, 2022. doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.852271>
- [21] G. Mallikarjuna Rao and T. D. Gunneswara Rao, "Effect of fly ash and GGBS combination on mechanical and durability properties of geopolymer concrete," *Adv. Concr. Constr.*, vol. 5, no. 4, pp. 313–330, 2017. doi: <https://doi.org/10.12989/acc.2017.5.4.313>