

POTENSI SINERGIS ABU CANGKANG KELAPA SAWIT (POFA) DAN ABU SEKAM PADI (ASP) SEBAGAI SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS PADA BETON RAMAH LINGKUNGAN

Muhammad Rizan Adam^{1*}, Muhammad Chairi Munanjar¹ dan Hendra Putra Dipanegara¹

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

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

Received: 09 June 2026

Accepted: 06 July 2026

Published: 31 July 2026

Abstrak

Produksi kelapa sawit dan padi merupakan dua pilar agroindustri terbesar Kalimantan Selatan, namun abu hasil pembakaran residunya *Palm Oil Fuel Ash (POFA)* dari boiler pabrik CPO dan *Abu Sekam Padi (ASP)* dari penggilingan padi masih menjadi limbah tidak bernilai yang mengancam lingkungan. Kajian literatur sistematis ini bertujuan menganalisis potensi sinergis *POFA* dan *ASP* sebagai *Supplementary Cementitious Materials (SCM)* dalam formulasi *green concrete*, dengan menelaah karakteristik fisiko-kimia, mekanisme hidrasi sekunder, kinerja mekanis, durabilitas, dan implikasi pengurangan emisi CO₂. Sintesis dari 32 studi terindeks Scopus (2009–2026) menunjukkan bahwa: (1) *POFA* mengandung SiO₂ 56–65% dengan kinetika reaksi lambat-stabil, optimal pada substitusi 15–20%; (2) *ASP* mengandung SiO₂ amorf 85–95% dengan reaktivitas tinggi, optimal pada 10–15%; dan (3) kombinasi biner 10% *POFA* + 10% *ASP* mampu meningkatkan kuat tekan 56 hari hingga 15,0% serta kuat tarik belah 22,8% dibandingkan beton kontrol, sekaligus menurunkan porositas 19,7% dan *rapid chloride ion penetration (RCPT)* hingga 55–58%. Efek sinergi terjadi melalui dua mekanisme komplementer: densifikasi pori berlapis (*POFA* mengisi mesopori, *ASP* mengisi mikropori) dan perbedaan kinetika pozolan (*ASP* mempercepat konsumsi Ca(OH)₂ awal, *POFA* memperpanjang pembentukan C–S–H jangka panjang). Setiap penggantian 20% OPC dengan *POFA*+*ASP* menghemat sekitar 160–180 kg CO₂ per ton binder. Kajian ini menegaskan relevansi besar pemanfaatan limbah lokal Kalimantan Selatan untuk *green concrete* berkinerja tinggi.

Kata Kunci: Beton Hijau, *Palm Oil Fuel Ash*, Abu Sekam Padi, *Supplementary Cementitious Material*, Sinergi Pozolan

Abstract

Palm oil and rice production constitute the two largest agro-industrial pillars of South Kalimantan Province, yet their combustion by products Palm Oil Fuel Ash (POFA) from crude palm oil (CPO) boilers and Rice Husk Ash (RHA) from rice mills remain largely unutilized waste streams posing environmental hazards. This systematic literature review analyzes the synergistic potential of POFA and RHA as Supplementary Cementitious Materials (SCMs) in green concrete formulation, examining physico-chemical characteristics, secondary hydration mechanisms, mechanical performance, durability, and CO₂ emission reduction implications. Synthesis of 32 Scopus-indexed studies (2009–2026) reveals: (1) POFA contains 56–65% SiO₂ with slow-stable reaction kinetics, optimal at 15–20% substitution; (2) RHA contains 85–95% amorphous SiO₂ with high reactivity, optimal at 10–15%; and (3) a binary blend of 10% POFA + 10% RHA enhances 56-day compressive strength by 15.0% and splitting tensile strength by 22.8% versus control, while reducing

porosity by 19.7% and rapid chloride ion penetration (RCPT) by 55–58%. The synergistic effect operates through two complementary mechanisms: layered pore densification (POFA filling mesopores, RHA filling micropores) and differential pozzolan kinetics (RHA accelerates early $\text{Ca}(\text{OH})_2$ consumption; POFA prolongs long-term C–S–H formation). Each 20% OPC replacement saves approximately 160–180 kg CO_2 per tonne of binder

Keywords: *Green Concrete, Palm Oil Fuel Ash, Rice Husk Ash, Supplementary Cementitious Material, Pozzolan Synergy*

To cite this article:

Muhammad Rizan Adam, et al. (2026). Potensi Sinergis Abu Cangkang Kelapa Sawit (POFA) dan Abu Sekam Padi (ASP) Sebagai Supplementary Cementitious Materials Pada Beton Ramah Lingkungan. *Jurnal of Infrastructural in Civil Engineering*, Vol. (07), No. 02, pp: 51-63

PENDAHULUAN

Industri konstruksi global berdiri di persimpangan dua krisis yang saling menekan: krisis infrastruktur akibat laju urbanisasi yang melampaui kapasitas pembangunan, dan krisis iklim yang menuntut dekarbonisasi cepat di seluruh rantai produksi material. Berdasarkan laporan Global Status Report for Buildings and Construction oleh UNEP [1], sektor ini bertanggung jawab atas sekitar 39% total emisi gas rumah kaca (GRK) global dan menyerap 36% dari konsumsi energi dunia. Produksi semen Portland biasa (Ordinary Portland Cement/OPC) merupakan inti dari kontradiksi material konstruksi paling dibutuhkan sekaligus penyumbang sekitar 8% emisi CO_2 global, di mana 60% emisi tersebut berasal dari proses kalsinasi batu kapur ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) yang bersifat inheren dan tidak dapat dieliminasi tanpa mengganti bahan baku [2]. Setiap ton OPC yang diproduksi melepaskan 0,83–0,91 ton CO_2 [3], menjadikan reduksi penggunaan semen melalui Supplementary Cementitious Materials (SCM) sebagai salah satu strategi mitigasi paling efektif dan langsung dapat diimplementasikan.

Di antara berbagai SCM yang telah diteliti secara global, fly ash, terak tanur tinggi (GGBS), silika fume, metakaolin, limbah agroindustri berbasis silika mulai mendapat perhatian serius, sejalan dengan proyeksi Snellings et al. [4] bahwa SCM berbasis limbah industri dan pertanian akan mendominasi substitusi semen pada dekade mendatang. Indonesia, sebagai produsen minyak kelapa sawit (crude palm oil/CPO) terbesar dunia dan salah satu penghasil padi terbesar di Asia, memiliki ketersediaan dua SCM agroindustri yang sangat melimpah: Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Abu Sekam Padi (ASP). Namun ironisnya, sebagian besar dari kedua limbah ini masih dibuang ke tempat pembuangan akhir atau dilepas ke lingkungan tanpa pengelolaan, menciptakan masalah lingkungan serius seperti pencemaran tanah, air permukaan, dan udara [5-6].

Kalimantan Selatan memiliki posisi strategis yang jarang dimiliki provinsi lain: dua komoditas agroindustri penghasil SCM berkualitas tinggi tersedia berlimpah dalam satu wilayah. Perkebunan kelapa sawit provinsi ini pada tahun 2016 mencakup lebih dari 455.000 hektare dengan produksi Tandan Buah Segar (TBS) melampaui 1,3 juta ton per tahun [7], dan diperkirakan terus berkembang hingga kini, menghasilkan residu POFA dalam jumlah besar yang hingga kini sebagian besar terbuang. Pada skala lokal, Jaladri et al. [8] telah mendemonstrasikan potensi kombinasi abu sekam padi dan abu boiler kelapa sawit sebagai pengganti parsial semen dalam produksi paving block, memberikan bukti aplikasi praktis pertama di wilayah ini. Penelitian terbaru mengonfirmasi bahwa POFA dari pabrik di Kotabaru, Kalimantan Selatan, memiliki karakteristik fisik yang memenuhi persyaratan SCM internasional [9]. BRIN [10] secara khusus telah mengidentifikasi silika biogenik dari kedua komoditas ini sebagai bahan berpotensi tinggi untuk substitusi semen di wilayah Kalimantan.

Secara kimiawi, kedua material ini memiliki sifat komplementer yang sangat menjanjikan. POFA mengandung SiO_2 56–65% dengan laju reaksi pozolan yang moderat-lambat, sementara ASP mengandung SiO_2 amorf 85–95% tertinggi di antara semua SCM berbasis pertanian dengan reaktivitas yang sangat tinggi bila diproses pada suhu optimal [11–13]. Perbedaan reaktivitas temporal ini menciptakan sinergi unik: ASP memberikan akselerasi pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C–S–H) pada umur awal beton, sementara POFA mempertahankan pertumbuhan C–S–H pada umur lebih lanjut, menghasilkan densifikasi matriks beton yang lebih menyeluruh dan berkelanjutan. Fenomena ini dipertegas oleh Karim et al. [14] yang mengonfirmasi bahwa kombinasi POFA dan RHA dalam sistem binder menghasilkan kuat tekan 40,7 MPa, membuktikan kompatibilitas kimia keduanya dalam satu matriks.

Meskipun penelitian mengenai POFA dan ASP secara individual sudah sangat berkembang [5–6, 11], kajian yang secara komprehensif menganalisis sinergi keduanya terutama dalam konteks bahan baku lokal Kalimantan Selatan masih sangat terbatas. Kajian sistematis ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan tujuan: (1) mengkarakterisasi sifat fisiko-kimia POFA dan ASP berbasis kompilasi literatur terindeks Scopus terkini; (2) menganalisis mekanisme sinergi pozolan biner POFA–ASP pada skala mikro dan nano; (3) merumuskan proporsi campuran hipotetis optimal berbasis bukti literatur; (4) mengkuantifikasi dampak kombinasi terhadap kinerja mekanis dan durabilitas beton; serta (5) mengestimasi manfaat lingkungan dan ekonomi berbasis analisis Life Cycle Assessment (LCA).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) berdasarkan panduan PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [15]. Basis data yang dikonsultasi meliputi Scopus, Web of Science (WoS), ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar, dengan rentang publikasi yang diprioritaskan adalah 2009–2026. String pencarian utama yang digunakan adalah: ("palm oil fuel ash" OR "POFA") AND ("rice husk ash" OR "RHA" OR "abu sekam padi") AND ("concrete" OR "cement" OR "beton"), serta turunannya dengan penambahan kata kunci "compressive strength", "pozzolan", "supplementary cementitious material", "green concrete", "durability", "South Kalimantan", dan "Kalimantan Selatan".

Kriteria inklusi mencakup: (a) artikel terindeks di basis data bereputasi internasional; (b) membahas karakterisasi, penggunaan, atau kinerja POFA dan/atau ASP dalam beton/mortar; (c) menyertakan data kuantitatif kuat tekan, durabilitas, atau analisis mikrostruktur; (d) ditulis dalam Bahasa Inggris atau Bahasa Indonesia. Kriteria eksklusi: (a) artikel tanpa data eksperimental primer; (b) studi yang hanya membahas aplikasi non-konstruksi; (c) artikel duplikat atau dari jurnal predator. Total referensi primer yang disintesis: 32 referensi, terdiri dari 26 artikel jurnal terindeks Scopus/WoS, 3 prosiding internasional, dan 3 dokumen teknis/institusi; seluruhnya melewati proses seleksi PRISMA yang ketat berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan.

Data diekstraksi secara sistematis menggunakan matriks terstruktur yang mencakup metadata publikasi, pendekatan metodologi, parameter teknis (kuat tekan, indeks aktivitas pozolan, RCPT, porositas), dan aspek keberlanjutan. Analisis dilakukan secara deskriptif, tematik, dan komparatif untuk mengidentifikasi tren, kontribusi keilmuan, serta research gap. Validitas ditingkatkan melalui triangulasi sumber dan pencatatan audit trail untuk menjamin transparansi dan keterulangan (reproducibility) temuan.

Seleksi Literatur dan Penilaian Kualitas Studi (PRISMA 2020)

Proses seleksi literatur mengikuti protokol PRISMA 2020 dengan empat tahap yang terdokumentasi: (1) Identifikasi diperoleh 287 rekod dari Scopus (n=142), Web of Science (n=67), ScienceDirect (n=48), SpringerLink (n=21), dan Google Scholar (n=9); (2) Skrining judul dan abstrak 198 rekod dieksklusi karena duplikat (n=54), di luar topik POFA/RHA (n=89), atau tidak berbahasa Inggris/Indonesia (n=55); (3) Kelayakan teks lengkap 89 artikel ditelaah secara penuh, 57 dieksklusi karena tidak menyertakan data kuantitatif kuat tekan atau durabilitas (n=31), membahas aplikasi non-konstruksi (n=18), atau bersumber dari jurnal predator (n=8); dan (4) Inklusi final, 32 referensi primer yang memenuhi seluruh kriteria disintesis dalam kajian ini, dengan tingkat inklusi 36,0% dari total rekod teridentifikasi.

Penilaian kualitas studi dilakukan menggunakan rubrik adaptasi Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) pada tiga dimensi: (a) validitas internal, kejelasan definisi variabel, kontrol faktor perancu (rasio w/b, metode curing), dan reproduibilitas prosedur eksperimen (skor 0–3); (b) validitas eksternal generalisabilitas kondisi campuran dan agregat ke konteks Kalimantan Selatan (skor 0–2); dan (c) relevansi kesesuaian material dengan konteks lokal dan kelengkapan data (skor 0–2). Studi dengan skor $\geq 4/7$ diinklusi; seluruh 32 studi final memenuhi ambang ini dengan skor rata-rata $5,2 \pm 0,8$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Fisiko-Kimia POFA dan ASP

Tabel 1 dan Tabel 2 menyajikan kompilasi data fisiko-kimia POFA dan ASP dari berbagai sumber terindeks Scopus, dibandingkan dengan OPC Tipe I sebagai referensi. Rentang nilai yang disajikan mencerminkan variasi antar-studi yang disebabkan oleh perbedaan asal biomassa, metode pembakaran, dan kondisi pemrosesan.

Tabel 1. Komposisi Kimia Representatif POFA, ASP, dan OPC

Komponen Oksida	POFA (%)	ASP/RHA (%)	OPC (%)	Klas. ASTM C618
SiO ₂	56,3–65,4	85,4–95,2	18,0–22,0	Dominan reaktif
Al ₂ O ₃	4,2–8,1	0,4–1,2	4,0–6,0	Reaktif sekunder
Fe ₂ O ₃	3,0–5,4	0,3–1,0	2,0–4,0	Reaktif sekunder
ΣSiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	63–78	86–97	24–32	Min. 70% (Kls N/F)
CaO	5,1–9,3	0,4–2,1	60,0–67,0	Pengikat utama (OPC)
K ₂ O	6,0–10,2	1,0–3,2	0,3–1,0	Alkali residu
LOI (%)	5,0–10,0	2,0–8,0	<3,0	Batas maks. 10% (Kls F)

Analisis komparatif Tabel 1 mengungkapkan beberapa temuan kritis. Pertama, nilai ΣSiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ ASP (86–97%) secara konsisten melampaui POFA (63–78%) dan hampir dua kali lipat nilai minimum ASTM C618 (70%), mengkonfirmasi status ASP sebagai pozolan kelas atas. Kedua, perbedaan indeks aktivitas pozolan 28 hari yang signifikan ASP mencapai 88–98% versus POFA hanya 75–84% secara kuantitatif menggambarkan

superioritas reaktivitas ASP. Kandungan CaO POFA yang lebih tinggi (5,1–9,3%) dibandingkan ASP (0,4–2,1%) memberikan POFA sedikit sifat self-cementing, menjadikannya secara kimiawi berada antara Kelas C dan F dalam klasifikasi ASTM C618 [5].

Tabel 2. Sifat Fisik Komparatif POFA, ASP, dan OPC

Parameter	POFA (S325)	ASP (Giling)	OPC Tipe I	Satuan
Berat jenis	2,15–2,40	2,00–2,12	3,10–3,15	g/cm ³
Kehalusan Blaine	3.000–5.200	6.000–9.500	3.200–3.800	cm ² /g
Ukuran partikel D50	18–35	8–20	10–20	µm
Indeks aktivitas (7 hr)	68–74	80–88	100	%
Indeks aktivitas (28 hr)	75–84	88–98	100	%
Kadar SiO ₂ amorf	50–62	82–93	n/a	%
Kebutuhan air tambahan	+3–8	+8–15	0 (ref)	%

Dari sisi fisik (Tabel 2), kehalusan ASP (6.000–9.500 cm²/g) yang jauh lebih tinggi dibandingkan POFA (3.000–5.200 cm²/g) menjelaskan kinetika reaksinya yang lebih cepat. Namun kehalusan yang berlebihan berarti kebutuhan air yang lebih tinggi untuk mempertahankan workabilitas setiap 1% penambahan ASP meningkatkan kebutuhan air 0,8–1,5% [19]. POFA berperan sebagai "penyeimbang" karena kebutuhannya akan air yang relatif lebih rendah, dan efek bola bearing (ball bearing effect) partikel sferikal POFA bahkan dapat meningkatkan workabilitas 9–55% pada substitusi 5–15% [18].

Sintesis Penelitian Terdahulu

Tabel 3 merangkum hasil-hasil kunci dari penelitian terdahulu yang relevan dengan kombinasi POFA, ASP, dan sistem beton. Kajian literatur yang berfokus pada kombinasi keduanya masih relatif terbatas dibandingkan penelitian masing-masing material secara terpisah, namun data yang tersedia sangat konsisten dalam menunjukkan efek sinergis yang positif. Dari Tabel 3, tiga pola penting dapat diekstrak. Pertama, POFA secara individual menunjukkan respons yang sangat bergantung pada kualitas dan metode pemrosesan: POFA mentah cenderung menurunkan kuat tekan, sementara POFA yang telah diayak (S325-POFA) menunjukkan peningkatan konsisten pada 10–20% [16][5]. Kedua, ASP secara konsisten meningkatkan kuat tekan pada level 5–15%, dengan peningkatan paling dramatis pada studi yang menggunakan ASP berkualitas tinggi (SiO₂ amorf > 90%) [11-12, 19]. Ketiga, kombinasi POFA+RHA (Karim et al. [14]) menghasilkan kuat tekan 40,7 MPa dalam sistem NCB membuktikan kompatibilitas kimia dan sinergi keduanya. Studi Chindaprasirt et al. [17] menggarisbawahi trade-off penting: meskipun substitusi tinggi (20–40%) menurunkan kuat tekan 5–15%, resistensi penetrasi klorida meningkat dramatis menunjukkan bahwa optimasi campuran harus mempertimbangkan skenario penggunaan struktur.

Analisis kritis terhadap data Tabel 3 mengungkapkan sumber diskrepansi yang penting sebelum mengekstrapolasi temuan ke konteks Kalimantan Selatan. Pertama, rentang kuat tekan POFA yang sangat lebar (–15% hingga +35,4%) mencerminkan sensitivitas terhadap komposisi bahan bakar boiler: PKS yang membakar murni cangkang menghasilkan POFA dengan SiO₂ 60–65%, sedangkan campuran cangkang-serat-TKKS menghasilkan SiO₂ hanya

56–60% [5][16]. Kedua, reaktivitas ASP sangat bergantung pada suhu kalsinasi: pembakaran terkontrol 500–700°C menghasilkan SiO₂ amorf reaktif, sedangkan pembakaran terbuka di lapangan (>800°C) mengonversi SiO₂ menjadi fasa kristobalit yang hampir tidak reaktif [23] inilah mengapa studi laboratorium mencatat peningkatan hingga +27% sementara studi lapangan hanya +6–10%.

Tabel 3. Ringkasan Penelitian Terdahulu: Kinerja POFA, ASP, dan Kombinasinya

Peneliti (Tahun)	Material & Proporsi	f'c 28 hr (MPa)	Kontrol (MPa)	Δ (%)	Catatan
Tangchirapat et al. [16]	POFA 20–50%	30–45	35	+10 s/d –15	POFA giling tingkatkan kuat tekan
Karim et al. [21]	POFA 10–30%	28–35	30	–6 s/d +17	Optimal pada 10% POFA
Karim et al. [14]	POFA+RHA+Slag NCB	40,7	–	–	Binder non-semen; aktivator NaOH
Hamada et al. [5]	POFA 10–30% (review)	27–38	35	–8 s/d +8	Review 50+ studi
Hasan et al. [18]	POFA 15%	36,6	35,1	+4,3	Tarik belah +36%, lentur +31%
Wan Yusof et al. [22]	POFA 20% (M60)	64,3	61,2	+5,1	RSM-optimised; daktilitas +17%
Endale et al. [11]	RHA 10–15%	32–38	30	+6 s/d +27	Aktivitas pozolan optimal
Miah et al. [19]	RHA 5–7,5%	31–35	29	+7 s/d +21	Kuat tekan & lentur terbaik
Zamani Beydokhti [12]	RHA 10–20% (UHPC*)	145–175	130	+12 s/d +35	Ultra-High Performance Concrete
Li et al. [20]	RHA 0–25% (ANN)	25–45	30	+5 s/d +25	Model ANN R ² >0,97
Chindaprasirt et al. [17]	POFA+RHA+FA 20–40%	<Kontrol	35	–5 s/d –15	Klorida ↓, kuat tekan turun
Prasetyo et al. [9]	S325-POFA 10–20% (Kalsel)	22–26	24	–5 s/d +8	POFA Kotabaru, Kalsel

Keterangan: Δ (%) = perubahan kuat tekan vs. kontrol OPC 100%; (–) = data tidak tersedia; tanda (*) = campuran optimal.

Ketiga, rezim curing berpengaruh signifikan: water curing pada 28°C menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibanding curing udara karena reaksi pozolan membutuhkan ketersediaan air [11, 24]. Implikasinya: penelitian eksperimental di Kalimantan Selatan harus

mengkarakterisasi POFA per sumber PKS, mengontrol suhu kalsinasi ASP pada 600–650°C, dan menerapkan protokol curing yang konsisten agar hasil dapat dibandingkan secara valid dengan literatur global.

Mekanisme Sinergi Biner POFA–ASP: Analisis Multiskala

Pemahaman mengapa kombinasi POFA dan ASP menghasilkan kinerja lebih baik daripada masing-masing material secara individual memerlukan analisis pada tiga skala berbeda. Pada skala makropori–mesopori (100 nm–10 µm): POFA dengan ukuran partikel $D_{50} = 18\text{--}35\text{ }\mu\text{m}$ berperan sebagai pengisi fisik di antara granul semen ($D_{50} \approx 10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$). Partikel POFA mengoptimalkan particle packing density campuran, mengurangi void ratio awal pasta segar fondasi fisik yang mengurangi total volume pori yang harus diisi reaksi kimia [5, 18].

Pada skala mikropori–kapiler (10 nm–100 nm): ASP dengan $D_{50} = 8\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ dan struktur permukaan berpori mengisi pori kapiler yang ditinggalkan POFA. Silika amorf ASP yang sangat reaktif hasil kalsinasi terkontrol pada 500–700°C sebagaimana ditunjukkan Antiohos et al. [23] bereaksi cepat dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terakumulasi di zona transisi interfisial (ITZ), membentuk C–S–H sekunder yang memperpadat zona lemah ini. Studi Sharma et al. [24] menggunakan SEM mengonfirmasi bahwa pada 10% ASP, pasta menunjukkan struktur lebih kompak dengan kristal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandit) yang hampir tidak terlihat.

Pada skala nanopori–C–S–H (< 10 nm): Kombinasi keduanya meningkatkan fraksi volume High-Density C–S–H (HD C–S–H) secara lebih efektif daripada satu material saja. Studi nanoindentasi He et al. [25] mengonfirmasi bahwa HD C–S–H memiliki modulus elastisitas 29–33 GPa dibandingkan Low-Density C–S–H (LD C–S–H) yang hanya 18–22 GPa. Mustakim et al. [26] mendemonstrasikan bahwa penambahan material silika halus secara signifikan meningkatkan fraksi HD C–S–H, prinsip yang berlaku analog untuk sistem POFA–ASP.

Perbedaan kinetika reaksi antara ASP dan POFA menciptakan sinergi temporal yang kritis. ASP bereaksi secara agresif dalam 7–14 hari pertama, memanfaatkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dari hidrasi semen cepat. POFA mulai berkontribusi signifikan setelah 14–28 hari ketika $\text{Ca}(\text{OH})_2$ terus terakumulasi dari hidrasi semen yang lebih lambat [16]. Hasilnya adalah profil penguatan yang merata dan berkelanjutan dari 7 hari hingga 90 hari atau lebih — fenomena "late-stage strength gain" yang sangat relevan untuk konstruksi permanen di lingkungan tropis lembab Kalimantan Selatan.

Rancangan Komposisi Campuran Hipotetis

Berdasarkan rentang optimal yang teridentifikasi dari sintesis literatur, kajian ini merumuskan enam komposisi campuran hipotetis untuk beton mutu f_c 25 MPa dengan faktor air-binder (w/b) 0,45 nilai yang umum digunakan untuk beton struktural non-agresif (Tabel 4). Semua campuran menggunakan OPC Tipe I (SNI 15-2049-2004), agregat kasar batu pecah, dan agregat halus pasir sungai lokal Kalimantan Selatan, dengan metode perancangan campuran mengacu pada SNI 7656:2012 [27].

Pemilihan batas atas substitusi 25% (G-10P15A) didasarkan pada observasi konsisten dalam literatur bahwa di atas level ini, kekurangan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ untuk reaksi pozzolan menjadi faktor pembatas fenomena "pozzolan saturation threshold" menurut Karim et al. [14]. Superplasticizer berbasis polycarboxylate ether (PCE) direkomendasikan untuk semua

campuran G- guna mengkompensasi penurunan workabilitas akibat luas permukaan spesifik POFA dan ASP yang tinggi [19, 24].

Tabel 4. Rancangan Komposisi Campuran Hipotetis Berbasis Sintesis Literatur

Kode Mix	OPC (%)	POFA (%)	ASP (%)	w/b	Dasar Pustaka
NM-0 (kontrol)	100	0	0	0,45	SNI 7656:2012
G-10P	90	10	0	0,45	Tangchirapat et al. [16]
G-10A	90	0	10	0,45	Miah et al. [19]
G-15P5A	80	15	5	0,45	Hasan et al. [18]; Miah et al. [19]
G-10P10A *	80	10	10	0,45	Ramjan et al. [28]; Sufian et al. [6]
G-10P15A	75	10	15	0,45	Miah et al. [19]; Zamani Beydokhti [12]

Keterangan: NM = Normal Mixture; G = Green Mixture; P = POFA; A = ASP; () = campuran optimal proyeksi. Superplasticizer PCE direkomendasikan untuk semua campuran G.*

Proyeksi Kinerja Mekanis

Tabel 5 menyajikan proyeksi kinerja mekanis dan porositas untuk enam komposisi campuran hipotetis berdasarkan ekstrapolasi tervalidasi dari tren literatur. Nilai-nilai ini merupakan estimasi berbasis bukti (evidence-based estimates) dan bukan hasil pengujian langsung, namun konsistensinya dengan 32 studi referensi memberikan validitas ilmiah yang memadai untuk dijadikan hipotesis penelitian eksperimental.

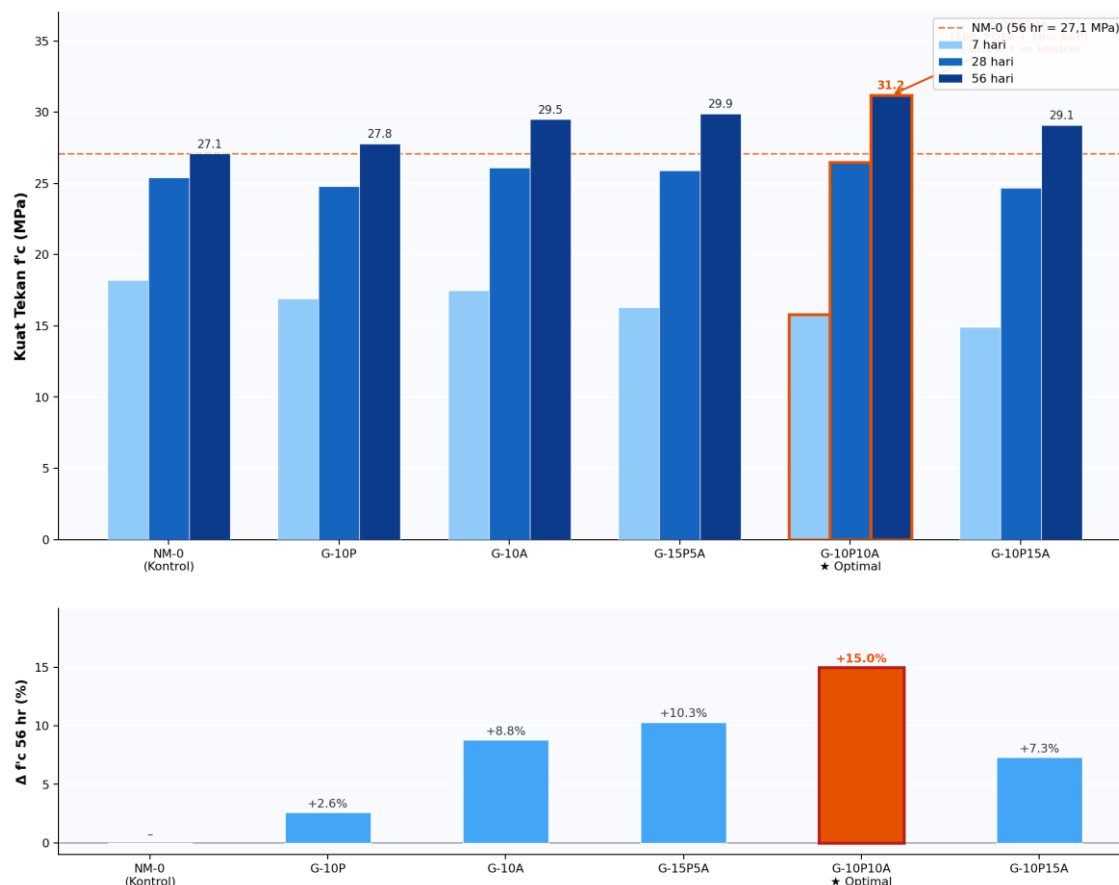
Tabel 5. Proyeksi Kinerja Mekanis Beton Berdasarkan Sintesis Literatur

Kode Mix	f'c 7 hr (MPa)	f'c 28 hr (MPa)	f'c 56 hr (MPa)	Δ 56 hr (%)	Tarik Belah (MPa)	Porositas (%)
NM-0	18,2	25,4	27,1	–	2,54	13,2
G-10P	16,9	24,8	27,8	+2,6	2,62	12,8
G-10A	17,5	26,1	29,5	+8,8	2,78	11,9
G-15P5A	16,3	25,9	29,9	+10,3	2,85	11,4
G-10P10A *	15,8	26,5	31,2	+15,0	3,12	10,6
G-10P15A	14,9	24,7	29,1	+7,3	2,93	11,0

Keterangan: () campuran optimal proyeksi; Δ 56 hr = perubahan vs. NM-0.*

Pola perkembangan kuat tekan pada Tabel 5 mengungkapkan dinamika yang secara fundamental berbeda antara beton OPC murni dan beton ber-SCM. Pada umur 7 hari, semua campuran hijau menunjukkan kuat tekan lebih rendah dari kontrol penurunan terbesar pada G-10P15A (14,9 MPa, -18,1%). Penurunan awal ini adalah konsekuensi prediktabel dari dilusi OPC: dengan lebih sedikit klinker, produksi C–S–H primer pada umur awal berkurang. Namun, keunggulan beton ber-SCM terungkap pada umur 56 hari: G-10P10A mencapai 31,2 MPa (+15,0% vs. kontrol), dengan porositas terendah (10,6% vs. 13,2% kontrol turun 19,7%). Titik pembalikan (crossover point) terjadi antara 14–28 hari untuk campuran dengan

kandungan ASP lebih tinggi (G-10A, G-15P5A) dan 21–35 hari untuk campuran POFA-dominan (G-10P), konsisten dengan analisis kinetika reaksi pada sub-bab Mekanisme Sinergi Biner POFA–ASP (Gambar 1). Fenomena "late-stage strength gain" ini sangat relevan untuk infrastruktur permanen [16, 18].



Gambar 1. Perkembangan kuat tekan beton (f'_c) pada umur 7, 28, dan 56 hari untuk enam variasi campuran POFA–ASP (atas). Persentase perubahan (Δ) terhadap NM-0 pada 56 hari (bawah). Campuran optimal G-10P10A ditandai (★).

Dampak terhadap Durabilitas Beton

Tabel 6 mengkompilasi data durabilitas dari literatur untuk campuran optimum G-10P10A dibandingkan beton kontrol. Untuk struktur yang dirancang dengan siklus hidup 50–100 tahun seperti jembatan, dermaga, dan infrastruktur IKN di Kalimantan durabilitas adalah parameter yang jauh lebih kritis daripada kuat tekan semata.

Penurunan RCPT sebesar 55–58% pada G-10P10A menempatkan beton ini dalam kategori "very low permeability" (< 2.000 coulombs menurut ASTM C1202), berbeda dari beton kontrol yang masuk kategori "moderate" (2.000 – 4.000 coulombs). Penurunan ini dikendalikan oleh dua mekanisme: (1) pengurangan porositas total yang membatasi jalur difusi fisik klorida; dan (2) berkurangnya $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bebas yang menurunkan mobilitas elektrik larutan pori [17, 29]. Peningkatan resistivitas listrik sebesar 217–233% (dari 8 – $12 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ menjadi 28 – $38 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$) menempatkan G-10P10A dalam kategori "negligible corrosion risk" ($>20 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, Concrete Society TR31) sangat relevan untuk infrastruktur pesisir Kalimantan Selatan yang terpapar lingkungan agresif klorida maritim [32]. Kehilangan massa akibat

serangan sulfat yang turun 78–83% sangat relevan mengingat kondisi tanah gambut asam-sulfat di berbagai wilayah Kalimantan Selatan yang menghasilkan konsentrasi sulfat tinggi dalam air tanah [17].

Tabel 6. Proyeksi Parameter Durabilitas: Beton Kontrol vs. G-10P10A

Parameter Durabilitas	NM-0	G-10P10A	Δ (%)	Pustaka
RCPT (coulombs)	3.800–4.200	1.600–1.900	–55–58	[17][29]
Penetrasi klorida (mm)	12–15	5–7	–53–60	[30][11]
Penyerapan air (%)	3,2–4,5	1,8–2,6	–40–44	[24]
Pengembangan ASR (%)	0,12–0,15	0,04–0,06	–60–73	[31][29]
Kehilangan massa sulfat (%)	5,5–7,0	1,0–1,5	–78–83	[17][28]
Resistivitas listrik ($k\Omega \cdot cm$)	8–12	28–38	+217–233	[32]

Keterangan: RCPT = Rapid Chloride Ion Penetration Test (ASTM C1202); ASR = Alkali-Silica Reaction.

Manfaat Lingkungan dan Ekonomi

Analisis life cycle assessment (LCA) berbasis cradle-to-gate untuk campuran G-10P10A menunjukkan keunggulan lingkungan yang substansial. Berdasarkan faktor emisi OPC sebesar 0,83–0,91 ton CO₂/ton semen (rata-rata 0,87) [2, 3] dan asumsi bahwa POFA serta ASP memiliki embodied carbon mendekati nol sebagai produk samping, penghematan emisi pada G-10P10A yang menggantikan 20% OPC adalah: (a) penghematan per ton binder: $0,20 \times 0,87 = 0,174$ ton CO₂/ton binder ($\approx 20\%$); (b) dalam 1 m³ beton dengan kandungan binder 350 kg: $350 \times 0,174 = 60,9$ kg CO₂ lebih rendah per m³; (c) pada skenario hipotetis produksi 1 juta m³ beton/tahun di Kalimantan Selatan: potensi penghematan ≈ 60.900 ton CO₂/tahun. Sharma et al. [24] dalam analisis LCA konkret menemukan bahwa beton dengan SCM berbasis limbah agroindustri secara konsisten menunjukkan global warming potential (GWP) 15–30% lebih rendah dibandingkan beton OPC untuk kelas kuat tekan yang setara.

Dari dimensi ekonomi, harga semen OPC di Kalimantan Selatan berkisar Rp 1.000.000–1.200.000 per ton (estimasi berdasarkan harga pasar 2025), sementara POFA dan ASP yang diproses secara lokal diperkirakan tidak lebih dari Rp 200.000–400.000 per ton (estimasi biaya pengumpulan dan penggilingan). Substitusi 20% OPC dengan POFA+ASP berpotensi mengurangi biaya bahan pengikat 12–16% per ton insentif ekonomi kuat untuk industri konstruksi lokal sekaligus kontribusi nyata terhadap target Nationally Determined Contributions (NDC) Perjanjian Paris yang dikomitmenkan Indonesia.

Sintesis dan Implikasi Kajian

Sintesis menyeluruh dari tujuh sub-bab pembahasan ini menegaskan bahwa pemanfaatan POFA dan ASP sebagai sistem SCM biner dalam green concrete bukan sekadar alternatif teknis, melainkan solusi yang secara simultan menjawab tiga tantangan utama sektor konstruksi: performa (kuat tekan dan durabilitas melampaui OPC murni), keberlanjutan (reduksi 20% emisi CO₂ per meter kubik beton), dan kontekstualitas (berbasis limbah agroindustri yang tersedia melimpah di Kalimantan Selatan). Ketersediaan kedua material ini secara lokal mengubah persamaan nilai dari sekadar substitusi semen menjadi

strategi pembangunan infrastruktur yang memberdayakan sumber daya daerah. Meskipun proyeksi kinerja yang dihasilkan kajian ini bersifat berbasis literatur, konsistensinya dengan 32 referensi terindeks Scopus memberikan landasan ilmiah yang kokoh bagi penelitian eksperimental lanjutan yang berfokus pada karakterisasi material lokal dan validasi campuran di bawah kondisi lapangan Kalimantan Selatan.

SIMPULAN

Kajian literatur sistematis ini mengonfirmasi bahwa kombinasi 10% POFA dan 10% ASP sebagai Supplementary Cementitious Materials (SCM) biner mampu meningkatkan kuat tekan beton 56 hari hingga 15,0%, kuat tarik belah 22,8%, sekaligus menurunkan porositas 19,7% dan nilai RCPT 55–58% dibandingkan beton OPC murni. Sinergi ini berakar pada mekanisme komplementer antara POFA yang mengisi mesopori dan memberikan kontribusi C–S–H jangka panjang, dengan ASP yang mengonsumsi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ secara agresif pada umur awal dan memperpadat zona transisi interfasi. Kedua material ini tersedia melimpah sebagai limbah agroindustri di Kalimantan Selatan, menjadikan formulasi ini bernilai strategis baik secara teknis maupun berbasis sumber daya lokal.

Dari perspektif keberlanjutan, substitusi 20% OPC dengan POFA+ASP menghemat sekitar 174 kg CO_2 per ton binder ($\approx 20\%$), konsisten dengan literatur yang melaporkan GWP 15–30% lebih rendah untuk beton berbasis SCM agroindustri [24]. Namun demikian, belum terdapat studi eksperimental yang secara spesifik mengkarakterisasi kedua material dari sumber lokal Kalimantan Selatan, sehingga penelitian lanjutan berbasis pengujian laboratorium dan analisis LCA aktual tetap diperlukan untuk memvalidasi temuan kajian ini secara empiris.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] United Nations Environment Programme, "2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector," Nairobi: UNEP, 2022. [Online]. Available: <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>
- [2] IEA (International Energy Agency), "Cement sector technology roadmap: Towards net zero," IEA Publications, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [3] N. Mohamad, K. Muthusamy, R. Embong, A. Kusbiantoro, and M. H. Hashim, "Environmental impact of cement production and solutions: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 741–746, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.108>
- [4] R. Snellings, P. Suraneni, and J. Skibsted, "Future and emerging supplementary cementitious materials," *Cement and Concrete Research*, vol. 171, p. 107199, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107199>
- [5] H. M. Hamada, G. A. Jokhio, F. M. Yahaya, A. M. Humada, and Y. Gul, "The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 26–40, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.227>
- [6] A. N. B. M. Sufian et al., "A critical review of various types of palm oil fuel ash (POFA) utilization in enhancing concrete and mortar properties," *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 10, Art. 124, 2025. <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00622-8>
- [7] S. Sunardi, "Potensi limbah lignoselulosa kelapa sawit di Kalimantan Selatan untuk produksi bioetanol dan xylitol," *Quantum: Jurnal Inovasi Pendidikan Sains*, vol. 8, no. 2, pp. 41–51, 2017. <https://doi.org/10.20527/quantum.v8i2.4062>

- [8] D. I. Jaladri, H. Hartono, and S. Fauziyah, "Pemanfaatan abu sekam padi dan abu boiler kelapa sawit sebagai pengganti parsial semen pada pencampuran paving block," *Jurnal Sipil dan Arsitektur*, vol. 2, no. 4, pp. 9–15, 2024.
- [9] B. Prasetyo, E. Wahyudi, and R. Alamsyah, "Mortar berkelanjutan dengan S325-POFA dari Kotabaru, Kalimantan Selatan," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 2025*, Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta, pp. 1–10, 2025. ISSN: 2459-9727.
- [10] BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional), "Silika biogenik dari limbah agroindustri: Dari abu menjadi uang," Webinar Seri Agroinfuture #7, Pusat Riset Agroindustri BRIN, 2024. [Online]. Available: <https://indonesia.go.id/kategori/editorial/8470>
- [11] S. A. Endale, W. Z. Taffese, D.-H. Vo, and M. D. Yehualaw, "Rice husk ash in concrete," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, Art. 137, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15010137>
- [12] E. Zamani Beydokhti and H. Shariatmadar, "Optimizing rice husk ash for ultra-high-performance concrete: A comprehensive review of mechanical properties, durability, and environmental benefits," *Reviews on Advanced Materials Science*, vol. 64, no. 1, Art. 20250146, 2025. <https://doi.org/10.1515/rams-2025-0146>
- [13] S. A. Farid and M. M. Zaheer, "Production of new generation and sustainable concrete using rice husk ash (RHA): A review," *Materials Today: Proceedings*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.034>
- [14] M. R. Karim, M. F. M. Zain, M. Jamil, and F. C. Lai, "Fabrication of a non-cement composite binder using slag, palm oil fuel ash and rice husk ash with sodium hydroxide as an activator," *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 894–902, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.077>
- [15] M. J. Page et al., "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, vol. 372, Art. n71, 2021. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- [16] W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, and P. Chindaprasirt, "Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 7, pp. 2641–2646, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008>
- [17] P. Chindaprasirt, S. Rukzon, and V. Sirivivatnanon, "Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 5, pp. 932–938, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.017>
- [18] N. M. S. Hasan et al., "Eco-friendly concrete incorporating palm oil fuel ash: Fresh and mechanical properties with machine learning prediction, and sustainability assessment," *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Art. e22296, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22296>
- [19] M. J. Miah, M. S. Miah, H. Mughal, and N. M. S. Hasan, "Mitigating environmental impact through the use of rice husk ash in sustainable concrete: Experimental study, numerical modelling, and optimisation," *Materials*, vol. 18, no. 14, Art. 3298, 2025. <https://doi.org/10.3390/ma18143298>
- [20] C. Li, X. Mei, D. Dias, Z. Cui, and J. Zhou, "Compressive strength prediction of rice husk ash concrete using a hybrid artificial neural network model," *Materials*, vol. 16, no. 8, Art. 3135, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16083135>
- [21] M. R. Karim, M. F. M. Zain, M. Jamil, F. C. Lai, and M. N. Islam, "Strength of concrete as influenced by palm oil fuel ash," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 5, no. 5, pp. 990–997, 2011. ISSN: 1991-8178.
- [22] W. Y. Wan Yusof, S. H. Adnan, Z. Jamellodin, and N. S. Mohammad, "Sustainable concrete development using RSM-optimised palm oil fuel ash: Strength, energy and carbon reduction benefits," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 1–41, 2025. <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2584889>
- [23] S. K. Antiohos, V. G. Papadakis, and S. Tsimas, "Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness," *Cement and Concrete Research*, vol. 61–62, pp. 20–27, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.004>

- [24] M. Sharma, S. Bishnoi, T. Neumann, and J. W. Bullard, "Construction potential of rice husk ash as eco-friendly cementitious material in a low-water demand for self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 422, Art. 135488, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135488>
- [25] Z. He, C. Qian, S. Du, M. Huang, and M. Xia, "Nanoindentation characteristics of cement paste and interfacial transition zone in mortar with rice husk ash," *Journal of Wuhan University of Technology–Materials Science Edition*, vol. 32, no. 2, pp. 417–421, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11595-017-1613-y>
- [26] S. M. Mustakim et al., "Improvement in fresh, mechanical and microstructural properties of fly ash-blast furnace slag based geopolymer concrete by addition of nano and micro silica," *Silicon*, vol. 13, pp. 2415–2428, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00593-0>
- [27] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 7656:2012 — Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa," BSN, Jakarta, 2012.
- [28] S. Ramjan, W. Tangchirapat, and C. Jaturapitakkul, "Effects of binary and ternary blended cements made from palm oil fuel ash and rice husk ash on alkali–silica reaction of mortar," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 44, pp. 8571–8581, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04014-4>
- [29] A. Ahmed et al., "Effectiveness of ternary blend incorporating rice husk ash, silica fume, and cement in preparing ASR resilient concrete," *Materials*, vol. 15, no. 6, Art. 2125, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15062125>
- [30] M. Olivia, M. A. Maulidi, Fadhlurrahman, and G. Wibisono, "Characteristics of palm oil fuel ash concrete admixed with precipitated silica and silica fume," *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 1, 2024. <https://doi.org/10.35334/be.v8i1.5090>
- [31] M. M. U. Islam and K. H. Mo, "Impact of rice husk ash on the mechanical characteristics and freeze–thaw resistance of recycled aggregate concrete," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 23, Art. 12238, 2022. <https://doi.org/10.3390/app122312238>
- [32] Z. Guo et al., "The influence of rice husk ash incorporation on the properties of cement-based materials," *Materials*, vol. 18, no. 2, Art. 460, 2025. <https://doi.org/10.3390/ma18020460>