

Pemanfaatan Abu Terbang Circulating Fluidized Bed (CFBFA) sebagai Pengikat Rendah Karbon: Sintesis, Mekanisme Hidrasi–Geopolimerisasi, Stabilitas Volume, Durabilitas, dan Aplikasi Konstruksi (Literature Review)

Romi Djafar^{*1)}, Yunita Djamalu^{*2)}

^{1,2,*)}Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan_UNG- Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: romidjafarmesin@gmail.com

Nomor Telp : +62 813-5634-2126

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Abu terbang dari boiler circulating fluidized bed (CFBFA) semakin menonjol sebagai sumber bahan baku pengikat rendah karbon, seiring meningkatnya kebutuhan dekarbonisasi industri semen dan penanganan limbah padat pembangkit. Namun, pemanfaatan CFBFA berskala besar masih dibatasi oleh komposisi tidak stabil (mis. f-CaO dan SO₃), heterogenitas fase mineral, serta risiko ekspansi dan degradasi durabilitas bila desain sistem tidak mengendalikan pembentukan gypsum/ettringite dan evolusi pori. Review ini membangun sintesis komprehensif atas literatur terkini 2022–2026 dari korpus yang diekstrak (file DATA dan REF RS), memetakan: (i) karakteristik CFBFA (fasa, reaktivitas, morfologi, dan implikasinya pada kebutuhan air serta kompatibilitas admixture); (ii) rute pemanfaatan utama—semen campuran/low-clinker, binder multi-limbah (red mud–carbide slag–slag–gypsum), geopolimer (low-Ca vs high-Ca), aerated/autoclaved aerated concrete (AAC), serta produk bernilai tambah seperti ceramsite sinter/non-fired, filler berbusa, dan grout; (iii) mekanisme kinerja—transisi produk hidrasi (AFt, C-(A)-S-H, N-A-S-H), pemadatan mikrostruktur, serta kontrol porositas; (iv) durabilitas (sulfat, freeze–thaw, karbonasi) dan isu lingkungan (pelindian logam berat dan jejak lingkungan/LCA). Temuan kunci menunjukkan bahwa keberhasilan sistem CFBFA bergantung pada rekayasa kimia-kalsium-sulfat dan rekayasa pori (mis. foam/void management), serta sinergi ko-binder yang menyeimbangkan reaktivitas awal dan stabilitas jangka panjang. Review ini menutup dengan agenda riset untuk standardisasi, desain berbasis rasio unsur/gel, dan validasi jangka panjang di kondisi lapangan.

Kata kunci: CFB fly ash; binder rendah karbon; geopolimer; stabilitas volume; ettringite/AFt; autoclaved aerated concrete; durabilitas sulfat

ABSTRACT

Fly ash from circulating fluidized bed boilers (CFBFA) is increasingly emerging as a promising source of low-carbon binder raw materials, in line with the growing need for decarbonization in the cement industry and the management of solid waste from power plants. However, large-scale utilization of CFBFA remains constrained by unstable composition (e.g., f-CaO and SO₃), mineral phase heterogeneity, and the risk of expansion and durability degradation when system design fails to control gypsum/ettringite formation and pore evolution. This review develops a comprehensive synthesis of recent literature from 2022–2026 derived from the extracted corpus (DATA and REF RS files), mapping: (i) the characteristics of CFBFA (phases, reactivity, morphology, and their implications for water demand and admixture compatibility); (ii) major utilization pathways—blended/low-clinker cement, multi-waste binders (red mud–carbide slag–slag–gypsum), geopolymers (low-Ca vs. high-Ca), aerated/autoclaved aerated concrete (AAC), and value-added products such as sintered/non-fired ceramsite, foamed fillers, and grouts; (iii) performance mechanisms—hydration product transitions (AFt, C-(A)-S-H, N-A-S-H), microstructural densification, and porosity control; and (iv) durability (sulfate resistance, freeze–thaw, carbonation) and environmental issues (heavy-metal leaching and environmental footprint/LCA). Key findings indicate that the success of CFBFA-based systems depends on calcium–sulfate chemical engineering and pore engineering (e.g., foam/void management), as well as co-binder synergy that balances early reactivity with long-term stability. The review concludes with a research agenda for standardization, element/gel-ratio-based design, and long-term validation under field conditions.

Keywords: CFB fly ash; binder rendah karbon; geopolimer; stabilitas volume; ettringite/AFt; autoclaved aerated concrete; durabilitas sulfat

1 PENDAHULUAN

Dekarbonisasi sektor konstruksi mendorong pencarian pengikat alternatif yang dapat menekan konsumsi klinker sekaligus menyerap limbah padat industri. Dalam konteks ini, CFBFA menempati posisi unik: berbeda dari fly ash pulverized coal, CFBFA umumnya kaya kalsium dan sulfat sehingga memiliki reaktivitas awal tinggi, tetapi juga membawa risiko ekspansi dan ketidakstabilan fasa hidrasi. Literatur terbaru menempatkan CFBFA sebagai kandidat kuat untuk (a) semen campuran dan pengikat low/zero-clinker, (b) geopolimer dan grout jalan, (c) material ringan (foamed filler/foamed concrete), (d) AAC, serta (e) produk bernilai tambah seperti ceramsite sinter/non-fired (Zhang et al., 2022; Pei et al., 2023; Liu et al., 2024; Wang et al., 2025; He et al., 2026). Namun, konsensus juga menegaskan satu hal: CFBFA tidak dapat diperlakukan sebagai substituen fly ash konvensional tanpa rekayasa sistem (He et al., 2021; Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2023). Performa ditentukan oleh: (1) kontrol laju pelarutan Si–Al, (2) ketersediaan Ca^{2+} dan SO_4^{2-} serta kinetika pembentukan Aft/gypsum, (3) pembentukan dan stabilitas gel C-(A)-S-H / N-A-S-H, (4) evolusi pori (ukuran, konektivitas, distribusi), dan (5) kompatibilitas dengan superplasticizer (Wu et al., 2025; Liu et al., 2024; Wang et al., 2026).

Review ini memperbarui substansi review awal dengan mengintegrasikan temuan paling baru dalam korpus (2024–2026 dominan), terutama terkait: sinergi multi-limbah untuk stabilitas jangka panjang (Ke et al., 2024; Li et al., 2024; Liu et al., 2026), desain sistem geopolimer berbasis peran Ca dan rasio alkali/Al/Si (Li et al., 2024; Li et al., 2024), strategi rekayasa pori dengan foam untuk ketahanan sulfat (Wang et al., 2026), dan optimasi aplikasi AAC serta foamed concrete (Wei et al., 2024; Zhang et al., 2025).

2. METODELOGI REVIEW

Review ini disusun sebagai evidence synthesis berbasis scopus yang telah diekstraksi dari berbagai studi primer (artikel) dan review, dengan rentang tahun dominan 2022–2026 (mis. Zhang et al., 2022; Pei et al., 2023; Liu et al., 2024; Wu et al., 2025; He et al., 2026).

Secara konseptual, literatur dikelompokkan menjadi enam klaster aplikasi:

1. Semen campuran/low-clinker dan binder eco-cementitious
2. Binder multi-limbah (red mud, carbide slag, slag, gypsum)

3. Geopolimer dan grout
4. Material ringan (foamed filler/foamed concrete)
5. AAC dan sistem autoklaf
6. Ceramsite dan produk bernilai tambah (sinter/non-fired)

Kerangka diskusi mengikuti rantai sebab–akibat dari karakteristik bahan → mekanisme reaksi → mikrostruktur/pori → sifat segar & mekanik → durabilitas & lingkungan → kesiapan penerapan (Liu et al., 2024; Pei et al., 2023; Guo et al., 2024).

2.1 Komposisi dan fase: “keunggulan reaktivitas” sekaligus “sumber risiko”

CFBFA cenderung mengandung SO_3 dan f-CaO lebih tinggi, serta fase kalsium sulfat dan kapur bebas, yang dapat mempercepat reaksi awal tetapi memicu ekspansi bila produk kristal menumpuk tanpa ruang pori yang memadai (Zhang et al., 2022; Liu et al., 2024; Pushpalal & Kashima, 2024). Studi mengenai sistem semen/komposit menunjukkan bahwa dinamika Ca^{2+} – SO_4^{2-} mengontrol waktu ikat, pembentukan Aft, serta kompetisi dengan C-S-H/C-(A)-S-H (Wu et al., 2025; Wu et al., 2025; Wang et al., 2023).

2.2 Morfologi dan kebutuhan air: implikasi pada workability

Berbeda dari fly ash PCC yang lebih sferis, CFBFA lebih berpori dan tidak beraturan, meningkatkan serapan air dan menurunkan fluiditas. Dampak ini terlihat kuat pada pasta self-leveling dan sistem semen segar, terutama ketika kompatibilitas PCE rendah (Wu et al., 2025; Zhao et al., 2023). Karena itu, strategi seperti penghalusan (grinding), optimasi rasio campuran, dan pemilihan admixture menjadi determinan performa segar (Zhao et al., 2023; Jiang et al., 2025).

2.3 Reaktivitas Si–Al dan peran Ca: dua “rezim gel”

Dalam sistem alkali-activated/geopolimer, CFBFA low-Ca cenderung membentuk jaringan N-A-S-H yang stabil, sedangkan high-Ca mendorong terbentuknya C-(A)-S-H dan Aft, yang dapat mempercepat setting namun menimbulkan transformasi kristalin yang mengganggu densifikasi jangka panjang (Li et al., 2024; Li et al., 2024). Ini menjelaskan mengapa kontrol rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ serta manajemen Ca menjadi inti desain geopolimer CFBFA (Li et al., 2024; He et al., 2026).

3. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

3.1 Rekayasa sistem binder berbasis CFBFA: rute pemanfaatan dan mekanisme

Literatur menegaskan bahwa blending CFBFA dengan slag/kapur dapat menghasilkan binder tanpa semen Portland atau dengan klinker

rendah, dengan produk utama Aft + C-(A)-S-H yang mengisi pori dan meningkatkan kuat tekan hingga kisaran puluhan MPa pada umur 28 hari bila desain tepat (Wang et al., 2023; Wang et al., 2025; Lv et al., 2024). Secara mekanistik, slag mempercepat konsumsi sulfat awal dan mendorong pelarutan fase aktif CFBFA, tetapi dosis slag yang terlalu tinggi dapat membentuk “barrier” hidrasi dini yang menghambat reaksi lanjutan (Wang et al., 2025; Guo et al., 2024).

Aspek rheologi juga penting: sistem berbasis CFBFA dan gypsum menunjukkan perilaku Herschel–Bulkley, dan morfologi Aft dapat dipengaruhi oleh jenis superplasticizer, yang pada gilirannya mempengaruhi kekuatan (Liu et al., 2026). Temuan ini menegaskan bahwa desain binder CFBFA bukan sekadar substitusi, tetapi optimasi multi-parameter (rasio binder, w/b, admixture, curing) (Liu et al., 2024; Liu et al., 2026; Zhao et al., 2023).

3.2 Binder multi-limbah: red mud–carbide slag–fly ash–gypsum/slag

Arah riset dominan 2024–2026 menunjukkan peningkatan minat pada sistem all-solid-waste untuk menghilangkan aktivator eksternal dan menekan biaya/risiko. Sistem CFBFA–red mud–carbide slag (RM–CS) memanfaatkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sebagai pemicu reaksi pozzolan dan stabilisasi, dengan Aft dan gel C/N-A-S-H sebagai produk utama (Li et al., 2024; Ke et al., 2024). Studi jangka panjang menunjukkan tantangan utama berupa karbonasi hemi/mono-carboaluminate yang dapat menurunkan kekuatan, tetapi dapat ditekan melalui desain kadar CS yang cukup dan peran fly ash untuk kekuatan lanjut (Ke et al., 2024).

Pengayaan gypsum desulfurisasi dan slag dalam sistem multi-limbah juga membantu mengontrol rheologi dan menghasilkan Aft yang lebih “memanjang”, dengan konsekuensi pada struktur pori dan kekuatan (Liu et al., 2026). Secara keseluruhan, klaster ini memperlihatkan pola: (alkalinitas dari CS) + (Si–Al reaktif dari slag/fly ash) + (sulfat terukur dari gypsum/CFBFA) → ko-formasi gel dan Aft yang lebih stabil (Li et al., 2024; Ke et al., 2024; Liu et al., 2026; He et al., 2026).

3.3 Geopolimer CFBFA: kontrol rasio unsur dan “trade-off” setting–kekuatan

Geopolimer CFBFA berkembang cepat, termasuk rute dry-pressing untuk densifikasi dan penurunan jejak karbon dibanding wet-casting (He et al., 2026). Temuan penting yang konsisten:

- Rasio $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menentukan pelarutan Si–Al serta pembentukan gel (Li et al., 2024).
- Low-Ca cenderung unggul dalam stabilitas jangka panjang, sementara high-Ca mempercepat reaksi tetapi berisiko transformasi fase yang mengganggu mikrostruktur (Li et al., 2024).

- Sinergi dengan by-product (slag, CS, gypsum) meningkatkan kekuatan dan densitas gel (He et al., 2026; Wang et al., 2025). Pengaturan waktu ikat juga menjadi isu krusial. Sistem geopolimer fly ash–slag dapat mengalami setting terlalu cepat; pendekatan retarder sinergis (borax + silane) menunjukkan bahwa desain kimia aditif dapat memperpanjang setting tanpa mengorbankan kinerja, sekaligus meningkatkan keseragaman mikrostruktur (Yu et al., 2025). Literatur ini mengindikasikan arah “geopolymer engineering” yang semakin matang: bukan hanya memilih precursor, tetapi merancang kinetika reaksi dan struktur gel secara terarah (Li et al., 2024; Yu et al., 2025; He et al., 2026).

3.4 Material ringan: foamed filler/foamed concrete dan rekayasa pori

Pendekatan berbasis foam menawarkan jalan keluar langsung untuk problem ekspansi: pori buatan menyediakan ruang pertumbuhan produk ekspansif (Aft) sehingga tekanan kristalisasi lebih terkendali (Cheng et al., 2023; Yang et al., 2025). Bukti terkini bahkan menunjukkan bahwa dalam lingkungan sulfat, keberadaan foam dapat menaikkan ambang serapan sulfat dan memperbaiki ketahanan korosi sulfat pada filler berbasis CFBFA, dengan dosis foam optimum tertentu (Wang et al., 2026).

Pada foamed concrete, optimasi desain (termasuk penghalusan CFBFA) menargetkan keseimbangan densitas–kekuatan dan pengurangan emisi, sekaligus mengontrol workability dan stabilitas gelembung (Zhang et al., 2025; Yang et al., 2025). Di level karakterisasi, X-CT dan pendekatan parameter pori (homogenitas, distribusi ukuran pori, sphericity) memperkuat basis kuantitatif hubungan pori–kekuatan (Yang et al., 2025). Pendekatan EIS untuk memperoleh parameter pori sekaligus memprediksi kuat tekan memberi arah baru pada non-destructive evaluation untuk quality control material berbusa (Wang et al., 2024).

3.5 Autoclaved aerated concrete (AAC): pemanfaatan volume besar dan kendali kristal tobermorite

AAC memungkinkan pemakaian CFBFA volume tinggi, tetapi menuntut kontrol komposisi silika aktif dan kebutuhan air. Studi optimasi menunjukkan bahwa penambahan pasir kuarsa/slag dapat menutup kekurangan Si aktif dan memperbaiki pembentukan tobermorite yang lebih terkristalisasi, sehingga memenuhi kelas kekuatan/densitas tertentu (Wei et al., 2024). Penggantian sebagian semen dengan kapur juga dieksplorasi untuk menekan klinker, namun memiliki optimum karena efek pada gas-forming volume, densitas, dan mikrostruktur autoklaf (Xusheng et al., 2024). Dengan kata lain, AAC berbasis CFBFA adalah contoh nyata bahwa keberhasilan bukan hanya pada “reaktivitas”, tetapi

pada rekayasa kristalisasi hidrotermal (Wei et al., 2024; Xusheng et al., 2024).

4.6. Ceramsite dan produk bernilai tambah: sinter, non-fired, dan kontrol transformasi fase

CFBFA kaya Ca dapat dimanfaatkan untuk ceramsite berkekuatan tinggi melalui sintering, dengan peran CaO/CaSO₄ dalam membentuk fase bermassa leleh rendah (mis. anorthite) yang memfasilitasi liquid-phase sintering serta pengendalian pori tertutup (Wang et al., 2024; Peng et al., 2025). Optimasi suhu dan aditif CaSO₄ memperlihatkan jendela proses yang menghasilkan kuat tekan maksimal, sementara overdosis memicu pelepasan gas berlebih dan pori terhubung yang menurunkan kekuatan (Peng et al., 2025).

Pendekatan non-fired juga dikembangkan untuk menekan energi proses, mengombinasikan semen/kapur/gypsum dan foaming agent dengan

steam curing, menghasilkan ceramsite ringan berkekuatan memadai dengan utilisasi limbah tinggi (Hu et al., 2023). Kajian pengaruh loss on ignition (LOI) menegaskan bahwa keseimbangan “gas–liquid equilibrium” selama sinter menentukan kualitas pori dan kekuatan (Wang et al., 2023). Secara umum, rute ceramsite menempatkan CFBFA sebagai “sumber Ca–Si–Al” yang dapat direkayasa melalui termodinamika dan kinetika fase (Wang et al., 2024; Peng et al., 2025).

Tabel 1. Pemetaan rute pemanfaatan CFBFA, mekanisme kunci, dan implikasi desain

Rute/Aplikasi	Sistem/Komponen Umum	Mekanisme dominan	Indikator kinerja yang sering dilaporkan	Risiko/isu utama	Ref.
Eco-cementitious low/zero-clinker	CFBFA + GGBFS + kapur	AFt + C-(A)-S-H; sinergi konsumsi sulfat dan densifikasi gel	Kuat tekan 7–28 hari; porositas turun; hidrasi termonitor K–D model	Overdosis slag → “hydration barrier”; potensi ekspansi	(Wang et al., 2023; Wang et al., 2025; Guo et al., 2024; Lv et al., 2024)
All-solid-waste binder	CFBFA + red mud + carbide slag ± FA/gypsum	Ca(OH) ₂ memicu pozzolan; AFt + C/N-A-S-H; kontrol carboaluminate	Kuat tekan umur lanjut; stabilitas jangka panjang	Karbonasi carboaluminate → strength drop; perlu desain CS	(Li et al., 2024; Ke et al., 2024; Liu et al., 2026)
Geopolimer CFBFA	CFBFA (low/high Ca) + NaOH/Na ₂ SiO ₃ ± slag/gypsum/CS	N-A-S-H vs C-(A)-S-H; peran rasio Na ₂ O/Al ₂ O ₃ dan SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Kuat tekan; waktu ikat; evolusi struktur Si–Al	High-Ca: setting cepat & transformasi fase jangka panjang	(Li et al., 2024; Li et al., 2024; He et al., 2026; Yu et al., 2025)
Foamed filler/foamed concrete	CFBFA + foam (pre-foaming) ± binder pendukung	Rekayasa pori: ruang tumbuh AFt; pori–kekuatan eksponensial	Densitas–kekuatan; parameter pori (X-CT/EIS)	Inhomogenitas pori pada foam tinggi; kompatibilitas	(Yang et al., 2025; Wang et al., 2024; Zhang et al., 2025; Cheng et al., 2023; Wang et al., 2026)
AAC berbasis CFBFA	CFBFA tinggi + pasir kuarsa/slag + kapur/semen	Kristalisasi tobermorite; perbaikan Si aktif	Kuat tekan, densitas, serapan air, “green & harmless” leaching	Kebutuhan air tinggi; desain autoklaf sensitif	(Wei et al., 2024; Xusheng et al., 2024)

3.6 Tabel ringkasan literatur (basis diskusi)

Ceramsite sinter/non-fired	CFBFA + aditif CaSO ₄ /CaO binder + steam curing	Liquid-phase sintering (anorthite); kontrol pori tertutup	Kuat tekan ceramsite; porositas; densitas	Gas berlebih (Wang et al., 2024; Peng et al., 2025; Hu et al., 2023; Wang et al., 2023)
----------------------------	---	---	---	---

Tabel 2. Strategi mitigasi ekspansi dan peningkatan durabilitas pada sistem CFBFA

Sumber masalah	Manifestasi	Strategi rekayasa	Rasional mekanistik	Catatan implementasi	Ref.
SO ₃ /f-CaO tinggi → AFt/gypsum berlebih	Ekspansi, retak, penurunan durabilitas	Rekayasa pori (foam/void management)	Pori buatan menyediakan ruang pertumbuhan AFt, menurunkan tekanan kristalisasi	Dosis foam optimum; pori terlalu besar menurunkan kekuatan	(Cheng et al., 2023; Wang et al., 2026; Yang et al., 2025)
Ketidakcocokan rheologi & admixture	Workability turun, bleeding naik	Grinding/optimasi ukuran partikel; pemilihan SP	Mengurangi serapan air & adsorpsi PCE yang “mengunci” air	Efek berbeda antar tipe fly ash	(Zhao et al., 2023; Wu et al., 2025; Jiang et al., 2025)
Ketidakseimbangan Ca–Si–Al	Gel tidak stabil; transformasi fase	Blending slag/CS/gypsum terukur	Memfasilitasi ko-formasi C-(A)-S-H dan AFt yang lebih terkontrol; densifikasi	Overdosis slag dapat membentuk barrier	(Wang et al., 2025; Ke et al., 2024; Liu et al., 2026; He et al., 2026)
Karbonasi carboaluminat e	Strength drop umur lanjut	Desain CS cukup + FA untuk strength lanjut	Menekan karbonasi tertentu; memodulasi fase hidrasi	Perlu validasi lapangan jangka panjang	(Ke et al., 2024)
Serangan sulfat	Kehilangan kekuatan/kerusakan	Foam + desain mikrostruktur; model difusi sulfat	Pori memperbesar “growth space” ettringite dan meningkatkan ambang serapan sulfat	Perlu uji multi-lingkungan	(Wang et al., 2026; Du et al., 2025)

3.7 Serangan sulfat dan pembentukan produk ekspansif Dur

Durabilitas sulfat menjadi isu sentral karena interaksi sulfat eksternal dengan sistem yang sudah kaya sulfat internal. Studi terbaru pada filler berbusa berbasis

CFBFA menunjukkan bahwa foam dapat meningkatkan ketahanan sulfat melalui penyediaan ruang pori untuk pertumbuhan AFt, dan bahkan memungkinkan pemodelan difusi sulfat dengan

memasukkan variabel dosis foam (Wang et al., 2026).

Pada beton RAC, pemodelan prediksi kerusakan dengan ARIMA menunjukkan pentingnya desain w/b dan kadar fly ash untuk ketahanan siklus basah–kering sulfat, yang relevan sebagai analog penguatan pendekatan data-driven untuk durabilitas sistem binder (Du et al., 2025).

3.8 Diskusi sintesis: prinsip desain “top-tier” untuk sistem CFBFA

Berangkat dari keseluruhan korpus, artikel ini merumuskan lima prinsip desain lintas-aplikasi:

Berangkat dari keseluruhan korpus, artikel ini merumuskan lima prinsip desain lintas-aplikasi:

1. Prinsip keseimbangan Ca–Si–Al–SO₄
Sistem yang berhasil selalu mengatur pasokan Ca²⁺ dan SO₄²⁻ agar Aft terbentuk cukup untuk kekuatan awal namun tidak berlebihan sehingga menimbulkan ekspansi, sambil memastikan gel C-(A)-S-H / N-A-S-H mendominasi densifikasi umur lanjut (Zhang et al., 2022; Wang et al., 2023; Li et al., 2024; Ke et al., 2024).
2. Prinsip rekayasa pori sebagai “katup pengaman” ekspansi
Foam/void management tidak hanya menurunkan densitas, tetapi juga berfungsi sebagai ruang kompensasi ekspansi dan bahkan meningkatkan ketahanan sulfat pada kondisi tertentu (Cheng et al., 2023; Yang et al., 2025; Wang et al., 2026).
3. Prinsip kompatibilitas sistem segar (air–admixture–permukaan partikel)
CFBFA yang berpori/rough mengikat air dan dapat mengadsorpsi admixture sehingga merusak efisiensi PCE; grinding, optimasi PSD, dan pemilihan SP menjadi langkah “wajib” untuk aplikasi praktis (Zhao et al., 2023; Wu et al., 2025; Jiang et al., 2025).
4. Prinsip stabilitas fase jangka panjang (karbonasi/transformasi kristalin)
Binder multi-limbah dan geopolimer high-Ca rentan pada perubahan fase yang menurunkan kekuatan (mis. karbonasi carboaluminate; transformasi gel → fase kristalin tidak menguntungkan), sehingga desain harus memasukkan skenario penuaan dan lingkungan (Ke et al., 2024; Li et al., 2024).
5. Prinsip verifikasi lintas-skala (lab → pilot → industri) dan metrik keberlanjutan
Beberapa studi menunjukkan pergeseran dari proof-of-concept ke pilot/industrial-scale dan mulai memasukkan LCA/kinerja lingkungan dan analisis biaya (Guo et al., 2024; Zhang et

al., 2023; Liu et al., 2024). Ini adalah arah yang harus diperluas agar CFBFA benar-benar “siap industri”.

4. KESIMPULAN DAN SARAN.

Korpus literatur 2022–2026 menegaskan bahwa CFBFA adalah precursor strategis untuk pengikat rendah karbon, tetapi keberhasilannya bergantung pada desain sistemik: keseimbangan kimia Ca–Si–Al–SO₄, rekayasa pori sebagai kontrol ekspansi, kompatibilitas rheologi–admixture, dan stabilitas fase jangka panjang. Rute pemanfaatan yang paling menjanjikan mencakup binder low/zero-clinker berbasis slag–kapur, binder multi-limbah (RM–CS–FA–gypsum/slag), geopolimer (termasuk dry-pressing densification), AAC volume tinggi, serta material ringan berbasis foam yang dapat sekaligus mengatasi ekspansi dan meningkatkan ketahanan sulfat pada desain tertentu. Bukti terbaru terkait peran foam dalam ketahanan sulfat memperkuat tesis bahwa “pori yang dirancang” dapat menjadi alat rekayasa durabilitas, bukan sekadar konsekuensi proses.

Ke depan, standardisasi CFBFA, uji durabilitas jangka panjang multi-lingkungan, serta integrasi metrik lingkungan (pelindian dan LCA) akan menentukan kesiapan penerapan top-tier.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abreu, A., da Silva, S. H. L., Schneider, R., & Bail, A. (2022). Effects for partial replacement of Portland cement by low water absorption porcelain insulator. *Materialia*, 24, 101488. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101488>
2. Cheng, Y., Wang, X., Chen, J., Yu, H., Shen, J., Luo, X., & Li, J. (2023). The performance of bubble-mixed lightweight soil to relieve expansion of circulating fluidized-bed fly ash. *Journal of Building Engineering*, 77, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107470>
3. Du, T., Qu, P., Chen, Q., Cheng, Y., Chen, J., Gan, Y., & Xie, B. (2025). Damage prediction of recycled aggregate concrete under a sulfate attack using the seasonal ARIMA model. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04583. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04583>
4. Guo, A., Zhang, S., Liu, X., Lyu, M., & Lu, S. (2025). Comprehensive review of current research on circulating fluidized

- bed ash. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 44(4), 1227–1242. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2024.1547>
5. Guo, W., Yao, W., Liang, G., Shi, C., She, A., & Wei, Y. (2024). Mechanical properties, microstructure and life-cycle assessment of eco-friendly cementitious materials containing circulating fluidized bed fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 95, 110293. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110293>
 6. Guo, Y. (2025). *Cofiring bamboo in coal-fired circulating fluidized bed boiler for ash based cementitious material production* (Doctoral dissertation). University of Nottingham. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85196685565&partnerID=40&md5=0b507764d2e196c34dc47c0c3e9c57f0>
 7. He, J., Wang, J., Xu, X., Liu, Y., Wang, W., Wang, Y., Hou, Z., & Tan, J. (2026). Long-term mechanical properties and microstructural mechanisms of dry-pressed circulating fluidized bed fly ash geopolymers. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14(2), 121238. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2026.121238>
 8. Hu, X., Song, J., Ma, X., Zheng, S., & Huang, Y. (2023). High-strength non-fired ceramsite made of industrial solid wastes. *Construction and Building Materials*, 394, 132005. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132005>
 9. Jiang, K., Li, Y., Pan, R., Bao, J., Tao, J., Chen, K., & Wei, J. (2025). Optimization of cement and circulating fluidized bed fly ash to make slurry for reinforced roadbed based on response surface methodology. *Materials*, 18(1), 3. <https://doi.org/10.3390/ma18010003>
 10. Kalpokaitė-Dičkuvienė, R., Bumanis, G., & Bajare, D. (2023). The effect of wood biomass co-firing fly ash on the phase composition and functional properties of cement composites after freeze–thaw attack. *Construction and Building Materials*, 406, 133228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133228>
 11. Ke, G., Zhou, D., Li, Z., Deng, M., Shen, T., & Liu, K. (2024). Long-term strength of all-solid waste cementitious materials based on circulating fluidized bed fly ash, red mud, and carbide slag. *Construction and Building Materials*, 419, 135386. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135386>
 12. Li, F., Ge, W., Chen, Q., & Zhang, Y. (2024). Effect of component content on the structural evolution of a high-calcium solid waste geopolymer. *Construction and Building Materials*, 448, 138355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138355>
 13. Li, Q., Huang, J., & Liu, X. (2024). Synthesizing multi-activated materials using circulating fluidized bed fly ash and carbide slag in Ca(OH)₂–Na₂SO₄ system. *Construction and Building Materials*, 441, 137413. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137413>
 14. Liu, J., Chen, Z., Liu, D., Wang, H., & Zhang, X. (2023). Analysis of mechanical properties and hydration of red mud-based cementitious materials containing circulating fluidized bed fly ash. *Materials*, 16(10), 3793. <https://doi.org/10.3390/ma16103793>
 15. Liu, J., Wang, W., Yuan, Q., Chen, Y., & Zhang, Y. (2024). Utilization of circulating fluidized bed fly ash in construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 437, 136217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136217>
 16. Liu, K., Li, Z., Deng, M., Shen, T., Zhou, D., & Ke, G. (2026). Effects of circulating fluidized bed fly ash and desulfurization gypsum on the rheology and solidification of all-solid waste cementitious materials. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 15(2), 341–356. <https://doi.org/10.1080/21650373.2025.2563742>
 17. Lv, W., Li, Y., Zhang, Z., Xu, Y., Li, F., Han, H., & Chen, W. (2024). The relationship between properties of CFB

- ash and its application in cement-based materials. *Materials*, 17(23), 5927. <https://doi.org/10.3390/ma17235927>
18. Pei, Y., Zhu, J., Yang, J., Wang, X., Han, P., & Bai, X. (2023). Progress in the application of circulating fluidized bed combustion fly ash in cement-based materials. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02387. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02387>
 19. Peng, Y., Wang, H., Qi, X., Liao, B., Chen, D., & Hu, S. (2025). Effect of CaSO₄ additive on sintering behavior and performance of high-strength ceramsite prepared by high-calcium circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*, 461, 141624. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141624>
 20. Pushpalal, D., & Kashima, S. (2024). Utilization of high-calcium fly ash as supplementary cementitious material: A review. *Cement and Concrete Composites*, 153, 105713. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105713>
 21. Shi, T., Zhao, L., Zhou, X., & Wei, Y. (2024). A comprehensive review on the high value-added utilization of fly ash: From the perspective of resources, technologies and economy. *Journal of Cleaner Production*, 438, 140558. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140558>
 22. Wang, B., Chen, C., Chen, Y., Jia, H., Zhang, B., & Zhang, W. (2024). The relationship between microstructure and compressive strength of porous materials obtained from foamed concrete based on circulating fluidized bed combustion fly ash by electrochemical impedance spectroscopy method. *Construction and Building Materials*, 438, 137898. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137898>
 23. Wang, J., Zhou, D., Ke, G., Li, Z., Deng, M., Liu, K., Shen, T., & Li, J. (2024). High-strength sintered ceramsite from circulating fluidized bed fly ash: Formation mechanism and optimized sintering conditions. *Ceramics International*, 50(17), 31342–31353. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.038>
 24. Wang, J., Zhou, D., Ke, G., Li, Z., Deng, M., Liu, K., Shen, T., & Li, J. (2024). High-strength sintered ceramsite from circulating fluidized bed fly ash: Formation mechanism and optimized sintering conditions. *Ceramics International*, 50(17), 31342–31353. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.038>
 25. Wang, W., Du, M., Guo, X., Yang, Y., Wang, S., Yu, Q., & Zhang, B. (2023). Effects of loss on ignition of circulating fluidized bed fly ash on sintering and swelling behavior of ceramic pellets. *Ceramics International*, 49(20), 33147–33157. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.07.225>
 26. Wang, W., Li, W., Wang, S., Yu, Q., Yu, Q., & Zhang, B. (2023). Eco-cementitious materials based on circulating fluidized bed fly ash and granulated blast furnace slag: Model for hydration and microstructure. *Cement and Concrete Research*, 171, 107270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107270>
 27. Wang, W., Li, W., Wang, S., Yu, Q., Yu, Q., & Zhang, B. (2025). Mechanism and strength prediction of eco-friendly cementitious materials containing circulating fluidized bed fly ash and slag. *Construction and Building Materials*, 451, 138495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138495>
 28. Wang, X., Zhu, J., Yang, J., Pei, Y., He, B., Wang, X., Han, P., & Bai, X. (2026). Role of foam during sulfate erosion on circulating fluidized bed fly ash-based foam lightweight filler. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 38(4), 04026024. <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTE-NG-21376>
 29. Wei, H., Zhang, Q., Ma, H., Zhou, S., Chen, S., & Lu, Z. (2024). Study on the properties and green and harmless performance of autoclaved aerated concrete blocks with high content of circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*, 435, 136009. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.038>

- <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136009>
30. Wu, Y., Guo, L., Chen, X., & Zhang, Z. (2025). Comparative study on the early hydration properties of various types of fly ash cement paste. *Construction and Building Materials*, 462, 141942. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141942>
 31. Wu, Y., Guo, L., Chen, X., Zhang, Z., & Zhang, H. (2025). Study on the rheological properties of different types of fly ash cement paste. *Construction and Building Materials*, 454, 139267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139267>
 32. Xusheng, F., Jun, W., Meng, W., Bo, X., Haiyun, S., & Jiawei, H. (2024). Effects of cement and lime substitution ratio on the properties of fly ash-based autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 448, 138198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138198>
 33. Yang, M., Lv, W., Xu, Y., Zhang, L., Han, H., Chen, W., & Li, F. (2025). Effect of foaming agent content on pore structure and uniaxial compressive strength of foamed concrete based on circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*, 457, 140854. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140854>
 34. Yu, S., Xu, X., Gao, X., & Wang, L. (2025). Enhanced retardation of setting time and microstructure in fly ash-slag geopolymer system via synergistic borax and silane. *Construction and Building Materials*, 454, 139231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139231>
 35. Zhang, L., Chen, W., Xu, Y., Han, H., Zhang, H., Lv, W., & Li, F. (2025). Optimization of low-emission foamed concrete based on circulating fluidized bed fly ash. *Construction and Building Materials*, 460, 141516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141516>
 36. Zhang, S., Guo, A., Liu, X., Lyu, M., & Lu, S. (2022). Recycling circulating fluidized bed ash for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 327, 126955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126955>
 37. Zhang, S., Guo, A., Liu, X., Lyu, M., & Lu, S. (2023). Application status and life cycle environmental impact of circulating fluidized bed ash based construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107245>
 38. Zhao, L., Yu, Z., Liu, J., Zhao, Y., & Liu, K. (2023). A review of the utilization of circulating fluidized bed combustion ash in concrete and other building materials. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135608>