

## **Perencanaan Orientasi Pahat dan Toolpath pada Pemesinan Lima-Sumbu dan Roboti: Integrasi Kendala Geometri–Kinematika, Singularity Avoidance, Feedrate Scheduling, Stabilitas, dan Kompensasi Error untuk Manufaktur Presisi**

Romi Djafar\*<sup>1)</sup>, Yunita Djamalu\*<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan - Universitas Negeri Gorontalo

\*e-mail: [romidjafar@negeri-gorontalo.ac.id](mailto:romidjafar@negeri-gorontalo.ac.id)

Nomor Telp : +62 813-5634-2126

Asal Negara: Indonesia

### **ABSTRAK**

Pemesinan lima-sumbu dan pemesinan berbasis robot (robotic machining) memainkan peran penting pada pembuatan komponen bergeometri kompleks seperti bilah/bladisk, impeller, permukaan bebas (free-form), dan komponen tipis ber dinding (thin-walled). Perkembangan riset 2020–2026 memperlihatkan pergeseran dari perencanaan lintasan yang dominan berbasis geometri menuju kerangka terpadu yang menggabungkan kendala kinematika mesin/robot, batas penggerak (drive limits), penghindaran singularitas, stabilitas proses (mis. chatter), serta kompensasi error berbasis umpan balik. Review ini mensintesis literatur dari berbagai literatur untuk membangun taksonomi kontribusi, menilai tren metodologis, dan mengidentifikasi agenda riset top-tier. Sintesis difokuskan pada: (i) kalibrasi orientasi pahat dan tool center point (TCP) pada robotic milling, (ii) perencanaan orientasi pahat yang halus dan aman terhadap tumbukan sekaligus ramah terhadap kinerja rotary axes/joint, (iii) perencanaan toolpath pada NURBS/mesh, termasuk strategi iso-scallop dan pemetaan geodesik, (iv) feedrate scheduling time-optimal dengan kendala geometri–drive, (v) singularity avoidance berbasis kondisi Jacobian dengan variasi orientasi terikat, (vi) pengendalian kualitas tekstur/topografi permukaan berbasis rentang posture, (vii) prediksi dan optimasi stabilitas proses untuk menekan chatter, serta (viii) kompensasi error kontur iteratif dan integrasi vision–CNC untuk adaptasi real-time. Hasil review menunjukkan bahwa performa terbaik dicapai saat orientasi pahat, toolpath, dan feedrate dioptimasi secara koheren (co-optimization), dan saat kualitas permukaan diperlakukan sebagai kendala eksplisit, bukan sekadar keluaran. Review ini merumuskan celah utama: kebutuhan model terpadu yang differentiable/real-time, pengukuran kualitas tekstur yang operasional pada sistem industri, serta integrasi stabilitas–drive limits–singularity avoidance dalam perencanaan end-to-end untuk CNC/robot nyata.

**Kata kunci:** pemesinan lima-sumbu; robotic milling; orientasi pahat; perencanaan toolpath; singularity avoidance; feedrate scheduling; kompensasi error

### **ABSTRACT**

Five-axis machining and robotic machining play a critical role in manufacturing complex-geometry components such as blades/bladisks, impellers, free-form surfaces, and thin-walled parts. Research developments from 2020–2026 reveal a shift from predominantly geometry-based toolpath planning toward integrated frameworks that incorporate machine/robot kinematic constraints, drive limits, singularity avoidance, process stability (e.g., chatter), and feedback-based error compensation. This review synthesizes the literature from multiple sources to construct a taxonomy of contributions, assess methodological trends, and identify top-tier research agendas. The synthesis focuses on: (i) tool orientation and tool center point (TCP) calibration in robotic milling; (ii) smooth and collision-safe tool orientation planning while maintaining favorable performance of rotary axes/joints; (iii) toolpath planning on NURBS/mesh surfaces, including iso-scallop strategies and geodesic mapping; (iv) time-optimal feedrate scheduling under geometry–drive constraints; (v) Jacobian-condition-based singularity avoidance with bounded orientation variation; (vi) control of surface texture/topography quality based on posture ranges; (vii) prediction and optimization of process stability to suppress chatter; and (viii) iterative contour error compensation and vision–CNC integration for real-time adaptation. The review shows that the best performance is achieved when tool orientation, toolpath, and feedrate are optimized coherently (co-optimization), and when surface quality is treated as an explicit constraint rather than merely an output. The review identifies key research gaps, including the need for integrated differentiable/real-time models, operational surface texture quality measurement for industrial systems, and the integration of stability, drive limits, and singularity avoidance in end-to-end planning for practical CNC and robotic machining systems.

**Keywords:** Five-axis machining, robotic milling, tool orientation, toolpath planning, singularity avoidance, feedrate scheduling, and error compensation.

## 1 PENDAHULUAN

Pemesinan multi-axis (khususnya lima-sumbu) serta robotic machining menjadi enabler utama dalam manufaktur presisi karena mampu mengatur orientasi pahat untuk menjangkau area sulit, meningkatkan kualitas permukaan, dan meningkatkan produktivitas. Namun, derajat kebebasan tambahan memperbesar kompleksitas: variasi orientasi pahat berinteraksi dengan (a) collision/gouging, (b) keterbatasan kinematika dan batas penggerak rotary axes/joint, (c) stabilitas dinamik proses (getaran/chatter), dan (d) akurasi kontur akibat kopling translasi-rotasi. Karena itu, riset modern menuntut perencanaan yang terintegrasi: bukan lagi “toolpath dulu, baru dibatasi”, melainkan merancang lintasan dan orientasi sekaligus agar feasible, halus, stabil, dan akurat (Sun et al., 2022b; Xu et al., 2021; Wu et al., 2021).

Literatur 2020–2026 juga memperlihatkan pelebaran domain: dari CNC lima-sumbu ke hybrid robot machining, mirror milling, belt grinding pada ruang sempit, hingga post-treatment komponen manufaktur aditif—yang semuanya menuntut strategi lintasan dan orientasi yang robust serta dapat diimplementasikan industri (Zhang & Ding, 2025; Wu et al., 2025; Xie et al., 2025; Díaz et al., 2023). Di sisi lain, perhatian pada kualitas permukaan berkembang dari kontrol scallop/roughness menuju evaluasi tekstur/topografi dan kontrol kualitas berbasis rentang posture (Fu et al., 2023; Fu et al., 2025). Pada saat bersamaan, kemunculan kerangka machine learning dalam manufaktur memberi arah konseptual untuk closed-loop planning yang memadukan sensing, interpretasi, eksekusi, dan pembelajaran (Sharma et al., 2021a).

Review ini menyajikan pemetaan komprehensif untuk publikasi top-tier dengan menekankan: (1) taksonomi metode; (2) hubungan sebab-akibat antar submasalah (orientasi–lintasan–feed–stabilitas–error); (3) ringkasan literatur berbentuk tabel; serta (4) agenda riset yang “publishable” dan bernilai industri.

## 2. METODELOGI REVIEW

Review ini dibangun hanya dari korpus pada File: Plain Teks dan RIS yang merupakan ekstraksi literatur (termasuk abstrak/metadana) hingga 2026, serta daftar bibliografi RIS yang menyertainya.

Tidak ada penambahan referensi dari web, sehingga integritas sitasi mengikuti data ekstraksi.

### 2.1 Strategi sintesis

Sintesis literatur melalui:

1. Taksonomi tema: kalibrasi/TCP → orientasi pahat → toolpath (NURBS/mesh) → smoothing & feedrate → singularity avoidance → stabilitas → kualitas tekstur → kompensasi error & adaptasi.
2. Sintesis berbasis kendala: geometri (collision/scallop) + kinematika (joint/rotary) + dinamika (stabilitas/chatter) + kontrol (error compensation).
3. Pemetaan celah riset: apa yang sudah matang (mature) vs apa yang belum terintegrasi secara operasional.

### 2.2 Evolusi Riset 2020–2026: Dari “Geometric-Only” ke Sistem Terpadu

Pada fase “geometric-only”, fokus utama adalah pembangkitan lintasan dengan kontrol scallop, misalnya melalui iso-scallop pada NURBS/mesh dan pemetaan geodesik (Liang et al., 2020; Liang et al., 2021; Zou, 2021). Namun pada praktik high-speed/high-precision, kinerja aktual sangat dipengaruhi oleh feedrate real yang dibatasi drive constraints, diskontinuitas orientasi, serta fenomena singularitas yang memicu saturasi rotasi dan menambah error (Sun, 2022a; Wu et al., 2021; Song et al., 2023). Karena itu, literatur bergeser menuju (a) perencanaan orientasi dengan batas percepatan sudut (Wu et al., 2021), (b) feedrate scheduling time-optimal dengan kendala geometri-drive (Li & Liang, 2022; Liang et al., 2022a; Li et al., 2023), dan (c) strategi singularity avoidance yang mengontrol condition number Jacobian sambil menjaga cutter-contact invariance dan variasi orientasi yang bounded (Song et al., 2023).

Di domain robotic machining, kebutuhan presisi sub-milimeter menuntut fondasi kalibrasi orientasi pahat dan TCP untuk berbagai tipe tool-end, karena error kinematika dan kompleksitas geometri pahat membuat metode klasik kurang reliabel (Gao et al., 2026). Hal ini melengkapi tren “engineering realism”: bukan hanya algoritma ideal, tetapi pipeline yang siap dipakai pada sistem robot/CNC nyata (Lu et al., 2022; Zhang & Ding, 2025; Xu et al., 2022).

### 2.3 Fondasi Akurasi: Kalibrasi TCP, Orientasi Pahat, dan Implikasi Implementasi

Robotic milling menuntut presisi posisi dan orientasi yang konsisten sepanjang lintasan. Kalibrasi orientasi pahat dan TCP menjadi prasyarat agar toolpath yang direncanakan di ruang koordinat benar-benar direalisasikan di ruang fisik. Metode berbasis bidang (plane-based) yang menggunakan coplanar constraint untuk menghitung normal plane, orientasi pahat, dan TCP secara berurutan, menunjukkan kemampuan mengendalikan error kalibrasi hingga skala sub-mm pada berbagai end tools (Gao et al., 2026). Ini sangat relevan karena kesalahan kecil pada TCP/orientasi dapat

“teramplifikasi” oleh kopleng rotasi–translasi dan memicu deviasi kontur pada permukaan kompleks (Hu et al., 2022; Lu et al., 2022).

Di sisi fixture/perangkat bantu, rancangan fixture untuk barrel end-mill pada mesin 3-axis menunjukkan strategi alternatif: menambah “kemampuan orientasi” melalui orientasi benda kerja, untuk memperluas ruang solusi proses tanpa mengganti mesin (Ravai-Nagy et al., 2025). Pendekatan ini selaras dengan kebutuhan industri yang sering dibatasi oleh investasi peralatan, sehingga solusi desain proses (process planning) dan perangkat bantu menjadi krusial (Denkena et al., 2023; Ravai-Nagy et al., 2025).

### 3. DISKUSI DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Perencanaan Orientasi Pahat: Kelayakan Geometri, Kinerja Kinematika, dan Kehalusan Orientasi

Dalam pemesinan lima-sumbu ball-end, perubahan orientasi pahat yang drastis memperburuk kinerja rotary axes dan menurunkan kualitas permukaan. Karena itu, perencanaan orientasi modern menekankan **kontrol percepatan sudut** dan identifikasi area yang melampaui drive limits, lalu melakukan modifikasi lokal minimum-acceleration pada kerangka machine coordinate system (Wu et al., 2021). Pendekatan ini melengkapi kebutuhan smoothing lintasan sudut (Sun, 2022a; Sun et al., 2022b).

#### 3.2 Orientasi sebagai variabel optimasi berbasis geometri permukaan

Orientasi pahat juga merupakan “alat geometri” untuk mengendalikan lebar strip pemesinan, scallop, dan interaksi kelengkungan pahat–permukaan. Optimasi orientasi berbasis best curvature matching menunjukkan bahwa pemilihan orientasi yang menyelaraskan kelengkungan lokal dapat meningkatkan performa pemotongan serta kualitas permukaan (Dong et al., 2023). Pada konteks multi-point machining dan positioning pada Bézier surfaces, metode drop–spin–tilt (DST) dan perpanjangan numerik memberi mekanisme kontrol lebar strip melalui titik kontak ganda, menunjukkan hubungan kuat antara orientasi dan produktivitas (Duvedi et al., 2020; Sharma et al., 2021b).

#### 3.3 Orientasi pahat pada robot: redundansi, kekakuan, dan kinerja kinematika

Robot memiliki redundansi yang dapat meningkatkan kelincahan, tetapi juga berisiko memasuki konfigurasi berkekakuan rendah atau dekat singularitas. Metode perencanaan terintegrasi orientasi pahat dan redundansi dengan kendala kekakuan menegaskan bahwa orientasi tidak boleh dipisahkan dari konfigurasi robot bila targetnya stabilitas dan kualitas (Xu et al., 2022). Pendekatan lain pada hybrid machining robot

mengoptimasi orientasi berdasarkan indeks kinerja kinematika dan diameter efektif pahat, sehingga orientasi dipilih agar sekaligus produktif dan “ramah” terhadap kemampuan gerak robot (Zhang et al., 2024). Untuk meningkatkan akurasi posture trajectory pada robotic multi-axis milling, strategi virtual repulsive potential field menunjukkan cara menghindari area problematik dan meningkatkan presisi lintasan (Li et al., 2022a).

### 3.4 Perencanaan Toolpath pada NURBS dan Mesh: Iso-Scallop, Geodesik, dan Robustness

#### 3.4.1 Toolpath pada NURBS: geodesic map sebagai jembatan CAD–CAM

Pada NURBS, pendekatan shortest boundary geodesic map (SBGM) membangun toolpath dari kontur jarak geodesik di parameter space yang dipetakan ke ruang 3D. Interval lintasan dapat ditentukan dari perbedaan jarak geodesik untuk memenuhi constraint residual scallop, sehingga toolpath halus tanpa post-processing tambahan (Liang et al., 2020). Arah ini menutup “development gap” CAD–CAM yang sering muncul pada representasi NURBS (Liang et al., 2020; Sun et al., 2022b; Xu et al., 2021).

#### 3.4.2 Toolpath pada mesh: iso-scallop dan tantangan kualitas mesh

Untuk permukaan mesh, iso-scallop toolpath dapat dibangun melalui normalized geodesic distance field (GDF), memperluas toolpath planning multi-axis pada model segitiga (Liang et al., 2021). Namun pada mesh berkualitas rendah (noise/defects), robustness menjadi tantangan utama. Mengonversi masalah toolpath generation menjadi heat diffusion problem menawarkan algoritma yang robust dan efisien, memperbaiki integrasi scanning–machining (Zou, 2021). Perencanaan toolpath juga ditingkatkan melalui shortest boundary path graph untuk mesh, yang mendorong toolpath lebih smooth dan lebih terstruktur (Liang et al., 2022b).

### 3.5 Smoothing Lintasan dan Feedrate Scheduling: Dari G3 Corner Smoothing ke Time-Optimal Drive-Aware

#### 3.5.1 Corner smoothing dan kontrol deviasi orientasi tool axis

Corner smoothing G3 pada toolpath lima-sumbu bertujuan meningkatkan efisiensi pemesinan sambil mengontrol deviasi orientasi tool axis secara akurat (Sun, 2022a). Ini relevan karena transisi segmen yang tidak halus mengakibatkan perlambatan feed, munculnya marking, dan penurunan kualitas (Sun, 2022a; Sun et al., 2022b; Wu et al., 2021).

#### 3.5.2 Feedrate scheduling time-optimal dengan kendala geometri–drive

Waktu pemesinan dipengaruhi oleh feedrate efektif yang dibatasi chord error/geometry constraints dan drive constraints. Pendekatan time-optimal feedrate scheduling berbasis GA pada NURBS toolpath menggabungkan batas geometri dan drive sehingga profil feed lebih realistis dan dapat dieksekusi (Li & Liang, 2022). Di sisi lain, improved time-optimal B-spline feedrate scheduling pada NURBS toolpath menekankan peningkatan kualitas profil feed dan pemenuhan batas dinamik (Li et al., 2023). Untuk sistem multi-axis khusus (mis. two-turret), global time-optimal B-spline feedrate scheduling berbasis GA memperlihatkan bahwa drive-aware scheduling dapat ditransfer ke arsitektur mesin yang lebih kompleks (Liang et al., 2022a). Dalam sintesis, feedrate scheduling modern menjadi komponen inti yang harus disinkronkan dengan smoothing lintasan dan variasi orientasi agar tidak menimbulkan jerk yang merusak kualitas (Sun et al., 2022b; Wu et al., 2021; Xu et al., 2021).

### 3.6 Singularity Avoidance: Mengendalikan Jacobian Condition Number dan Variasi Orientasi

Singularitas pada lima-sumbu/robotik menyebabkan instabilitas kontrol, saturasi drive, lonjakan kecepatan sudut, dan peningkatan error kontur. Metode singularity avoidance adaptif yang menurunkan Jacobian condition number sambil mempertahankan cutter-contact invariance dan variasi orientasi yang bounded menunjukkan pendekatan yang lebih “terukur” dibanding sekadar menghindari secara heuristik (Song et al., 2023). Pada robot surface machining, perencanaan trajectory joint-smooth orde tinggi dengan tool-orientation constraints dan singularity avoidance menunjukkan kebutuhan menyatukan kualitas lintasan joint dengan constraint orientasi agar implementasi stabil (Lu et al., 2022). Pada robotic belt grinding di ruang sempit, perencanaan posture multi-objective menggarisbawahi bahwa singularity/collision constraints sering beririsan dengan keterbatasan akses, sehingga membutuhkan optimasi yang eksplisit (Xie et al., 2025).

### 3.7 Stabilitas Proses (Chatter), Variasi Overhang, dan Orientasi “Chatter-Free”

Stabilitas proses adalah pengungkit utama model. Skema kompensasi error kontur iteratif yang produktivitas: chatter menurunkan kualitas menggabungkan estimasi numerik dan hukum kompensasi permukaan, mempercepat wear, dan model-free menunjukkan peningkatan signifikan pada kurva meningkatkan scrap. Pada five-axis ball-end berkelengkungan tinggi dan sudut tajam (Hu et al., 2022). milling komponen thin-walled melengkung, Di arah lebih mutakhir, pendekatan transformer-based pemilihan orientasi chatter-free sepanjang vision-CNC fusion untuk kompensasi error real-time dan lintasan menunjukkan bahwa orientasi harus optimasi adaptif menandai transisi menuju intelligent dipilih dengan mempertimbangkan dinamika machining yang memadukan persepsi (vision), interpretasi, pemotongan, bukan hanya geometri (Wang et al., dan eksekusi (Li, 2025b). Secara konseptual, ini sejalan 2024b). Prediksi stabilitas makin kuat dengan agenda machine learning dalam manufaktur yang model multi-fidelity (Co-Kriging) untuk menekankan siklus scan-store-interpret-execute-learn menyempurnakan prediksi stability pada variasi (Sharma et al., 2021a), dan memberi jalur riset kuat untuk tool overhang menggunakan data eksperimen sistem closed-loop yang dapat diverifikasi.

terbatas—menjawab kebutuhan industri yang tidak mungkin melakukan eksperimen ekstensif untuk setiap konfigurasi (Deng et al., 2025). Dikaitkan dengan feedrate scheduling, strategi paling menjanjikan adalah mengintegrasikan prediksi stabilitas ke pemilihan orientasi dan profil feed (Wang et al., 2024b; Deng et al., 2025; Sun et al., 2022b).

### 3.8 Kualitas Permukaan: Dari Roughness/Scallop ke Evaluasi Tekstur Berbasis Perubahan Posture Per

Perhatian terhadap kualitas permukaan berkembang menjadi studi tekstur/topografi yang lebih kaya. Model evaluasi dan klasifikasi tekstur dengan mempertimbangkan perubahan tool posture pada five-axis milling memperkenalkan metrik yang lebih operasional untuk menghubungkan posture dengan morfologi tekstur (Fu et al., 2023). Kelanjutan 2025 memperluas konsep ini menjadi posture range constraint-based texture quality control, yaitu menjaga kualitas tekstur dalam rentang posture tertentu—penting karena orientasi sering perlu diubah untuk singularity avoidance atau drive limits, namun kualitas tekstur harus tetap terkendali (Fu et al., 2025). Secara praktis, pendekatan ini menawarkan “bahasa bersama” antara perencana toolpath/orientasi dan target kualitas permukaan: kualitas bukan hanya inspeksi akhir, melainkan constraint selama planning (Fu et al., 2023; Fu et al., 2025; Sun et al., 2022b).

Studi eksperimental dampak orientasi pahat dan kelengkungan permukaan terhadap tool wear pada ball-end milling menegaskan bahwa kualitas permukaan dan umur pahat dipengaruhi interaksi posture-curvature, dan orientasi optimal dapat berbeda untuk permukaan concave vs convex (Ji et al., 2024). Ini memperkuat kebutuhan policy orientasi yang adaptif berbasis fitur permukaan (Ji et al., 2024; Dong et al., 2023; Fu et al., 2025).

### 3.9 Kompensasi Error dan Closed-Loop: Dari Iteratif Model-Free ke Vision-CNC Fusion

Akurasi kontur pada sistem lima-sumbu dipengaruhi kopling dinamik dan ketidaksempurnaan kopling. Skema kompensasi error kontur iteratif yang produktivitas: chatter menurunkan kualitas menggabungkan estimasi numerik dan hukum kompensasi permukaan, mempercepat wear, dan model-free menunjukkan peningkatan signifikan pada kurva meningkatkan scrap. Pada five-axis ball-end berkelengkungan tinggi dan sudut tajam (Hu et al., 2022). milling komponen thin-walled melengkung, Di arah lebih mutakhir, pendekatan transformer-based pemilihan orientasi chatter-free sepanjang vision-CNC fusion untuk kompensasi error real-time dan lintasan menunjukkan bahwa orientasi harus optimasi adaptif menandai transisi menuju intelligent dipilih dengan mempertimbangkan dinamika machining yang memadukan persepsi (vision), interpretasi, pemotongan, bukan hanya geometri (Wang et al., dan eksekusi (Li, 2025b). Secara konseptual, ini sejalan 2024b). Prediksi stabilitas makin kuat dengan agenda machine learning dalam manufaktur yang model multi-fidelity (Co-Kriging) untuk menekankan siklus scan-store-interpret-execute-learn menyempurnakan prediksi stability pada variasi (Sharma et al., 2021a), dan memberi jalur riset kuat untuk tool overhang menggunakan data eksperimen sistem closed-loop yang dapat diverifikasi.

**3.10 Sintesis: Kerangka Terpadu End-to-End (Planning → Execution → Verification)**

Berdasarkan literatur dalam korpus, kerangka terpadu yang konsisten dapat diringkas sebagai:

1. Representasi geometri (NURBS/mesh) → toolpath awal iso-scallop/berbasis geodesik/robust (Liang et al., 2020; Liang et al., 2021; Zou, 2021; Liang et al., 2022b).
2. Orientasi pahat feasible (collision-free) + kehalusan orientasi dan drive-aware modification (Wu et al., 2021; Sun, 2022a; Lu et al., 2022).
3. Feedrate scheduling time-optimal dengan kendala geometri-drive dan sinkronisasi dengan lintasan (Li & Liang, 2022; Li et al., 2023; Liang et al., 2022a; Sun et al., 2022b).
4. Singularity avoidance berbasis Jacobian condition dan bounded orientation variation (Song et al., 2023; Lu et al., 2022; Xie et al., 2025).

Stabilitas proses: pemilihan orientasi chatter-free + pemodelan multi-fidelity untuk variasi overhang (Wang et al., 2024b; Deng et al., 2025).

Kontrol kualitas tekstur berbasis rentang posture (Fu et al., 2023; Fu et al., 2025).

Kompensasi error & adaptasi (iteratif/vision-CNC) + kalibrasi TCP/orientasi agar eksekusi konsisten (Hu et al., 2022; Li, 2025b; Gao et al., 2026).

Inti temuan sintesis: performa “top-tier” muncul ketika orientasi pahat, toolpath, feedrate, singularity avoidance, dan kualitas permukaan diperlakukan sebagai satu paket optimasi, bukan modul terpisah (Sun et al., 2022b; Xu et al., 2021; Fu et al., 2025).

**Tabel Ringkasan Literatur (ekstensif)**

Domain	Fokus masalah	Metode/ide kunci	Kontribusi/hasil (ringkas)	Implikasi implementasi	Ref.
Kalibrasi robotic milling	TCP orientasi pahat	Coplanar constraint + MDH	Kalibrasi untuk berbagai tool-end; error sub-mm	Fondasi presisi eksekusi robot	(Gao et al., 2026)
Orientasi drive-aware	5-axis ball-end	Minimum-acceleration local modification	Menekan lonjakan percepatan sudut; lebih ramah drive	Kualitas permukaan & kinerja rotary axes	(Wu et al., 2021)
Corner smoothing	5-axis toolpath	G3 continuous smoothing	Efisiensi naik; deviasi orientasi terkendali	Reduksi marking & slowdown	(Sun, 2022a)
Toolpath review (SoTA)	Free-form machining	Sintesis path-feed-trajectory	Menyatukan isu planning & dinamika	Peta riset & praktik	(Sun et al., 2022b)
NURBS toolpath	NURBS surfaces	Shortest boundary geodesic map	Toolpath halus; interval berdasar geodesik	Menutup gap CAD-CAM	(Liang et al., 2020)
Mesh iso-scallop	Triangular mesh	Normalized GDF	Toolpath iso-scallop multi-axis	Efektif untuk mesh model	(Liang et al., 2021)
Robust mesh toolpath	Low-quality mesh	Heat diffusion analogy	Robust terhadap noise/defects	Integrasi scanning-machining	(Zou, 2021)
Feedrate time-optimal	NURBS toolpath	GA + drive & geometric constraints	Profil feed realistis dan cepat	Produktivitas berbasis batas mesin	(Li & Liang, 2022)
Feedrate scheduling	NURBS toolpath	Improved time-optimal B-spline	Feed lebih halus dan optimal	Mengurangi jerk & error	(Li et al., 2023)
Singularity avoidance	5-axis toolpath	Adaptive damping (Jacobian CN reduction)	Menekan singularity dengan	Stabilitas kontrol & kualitas	(Song et al., 2023)

			bounded orientation variation		
Robot trajectory planning	Robot surface machining	High-order joint-smooth + singularity avoidance	Trajectory lebih halus + feasible constraints	Implementasi robot lebih stabil	(Lu et al., 2022)
Kualitas tekstur	5-axis milling	Evaluasi & klasifikasi tekstur vs posture	Indeks kualitas tekstur operasional	Quality-aware planning	(Fu et al., 2023)
Kontrol tekstur	Free-form surfaces	Posture range constraint control	Menjaga tekstur saat posture berubah	Jembatan kualitas-planning	(Fu et al., 2025)
Orientasi chatter-free	Thin-walled curved	Stabilitas + pemilihan orientasi	Orientasi bebas chatter sepanjang lintasan	Produktivitas & kualitas	(Wang et al., 2024b)
Prediksi stabilitas	Variable overhang	Co-Kriging multi-fidelity	Refinement prediksi dengan data terbatas	Hemat eksperimen & cepat	(Deng et al., 2025)
Kompensasi error kontur	5-axis motion	Iterative model-free compensation	Akurasi naik pada kurva tajam	Closed-loop improvement	(Hu et al., 2022)
Vision-CNC adaptif	Intelligent machining	Transformer-based fusion	Kompensasi real-time + adaptasi	Arah machining otonom	(Li, 2025b)

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 Ca(OH)<sub>2</sub> 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 Na<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menentukan pelarutan Si-Al serta pembentukan gel (Li et al., 2024).
- Low-Ca cenderung unggul dalam stabilitas jangka panjang, sementara high-Ca mempercepat

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) <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ± slag/gypsum/CS	N-A-S-H vs C-(A)-S-H; peran rasio Na <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dan SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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)
Ceramsite sinter/non-fired	CFBFA + aditif CaSO <sub>4</sub> /CaO binder + steam curing	Liquid-phase sintering (anorthite); kontrol pori tertutup	Kuat tekan ceramsite; porositas; densitas	Gas berlebih → pori terhubung; jendela proses sempit	(Wang et al., 2024; Peng et al., 2025; Hu et al., 2023; Wang et al., 2023)

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).

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

Sumber masalah	Manifestasi	Strategi rekayasa	Rasional mekanistik	Catatan implementasi	Ref.
SO <sub>3</sub> /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)
Ketidacocokan 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)

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/CaSO<sub>4</sub> 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 CaSO<sub>4</sub> 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

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

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).

**3.6 Tabel ringkasan literatur (basis diskusi)**

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	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 berbuis 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–SO<sub>4</sub>. Sistem yang berhasil selalu mengatur pasokan Ca<sup>2+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 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–SO<sub>4</sub>, 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, standarisasi 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.jobeb.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.jobeb.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)<sub>2</sub>-Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 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 CaSO<sub>4</sub> 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.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>