



## A Review : Pengembangan Beton Ringan Seluler (CLC) yang Diperkuat Abu Terbang (*Fly Ash*) untuk Meningkatkan Kuat Tekan

An-Nisa Magnolia<sup>1,\*</sup>, Syaipudin Anwar<sup>1</sup>, Nindya Indah Kusumawardani<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mechanical Engineering Departement, Engineering Faculty, University of Lampung. Prof Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

<sup>2</sup> Chemical Engineering Departement, Engineering Faculty, University of Lampung. Prof Soemantri Brojonegoro, Bandar Lampung 35145

\* e-mail : [annisa.magnolia@eng.unila.ac.id](mailto:annisa.magnolia@eng.unila.ac.id)

Received : 06-Mei-2026, Accepted : 07-Juni-2026

### Abstrak

Beton Ringan Seluler (Cellular Lightweight Concrete/CLC) merupakan material bangunan berkelanjutan yang menjanjikan karena memiliki densitas rendah, insulasi termal yang baik, kemudahan pengecoran, serta potensi pengurangan beban mati struktur yang signifikan. Penelitian ini merupakan tinjauan sistematis yang mensintesis dan mengevaluasi secara kritis temuan dari 75 publikasi terindeks Scopus dan Web of Science (2009–2024) yang berfokus pada pengembangan dan optimalisasi CLC yang diperkuat abu terbang—produk sampingan pembakaran batu bara yang diklasifikasikan dalam ASTM C618. Metode yang digunakan meliputi analisis komposisi fisikokimia abu terbang Kelas F dan Kelas C, pengaruh kandungan abu terbang (0–50% substitusi OPC), rasio air-binder, volume busa, dan kondisi perawatan terhadap kinerja mekanis CLC. Hasil kajian menunjukkan bahwa substitusi parsial OPC dengan 30–40% abu terbang Kelas F menghasilkan peningkatan kuat tekan 80–110% dibandingkan campuran kontrol pada umur 90 hari, disertai reduksi konduktivitas termal sebesar 35–45% dan penyerapan air sebesar 30–40%. Sistem CLC berbasis geopolimer menunjukkan keunggulan kinerja lebih lanjut. Kesimpulan kajian ini mengidentifikasi prioritas penelitian ke depan meliputi desain campuran berbasis machine learning, ketahanan iklim tropis jangka panjang, dan integrasi ekonomi sirkular untuk mendukung pengembangan protokol produksi CLC yang distandarisasi di Indonesia.

**Kata kunci:** Beton ringan seluler; Abu terbang; Kekuatan tekan; Reaksi pozzolanik; Insulasi termal.

### Abstract

*Cellular Lightweight Concrete (CLC) is a promising sustainable building material due to its low density, good thermal insulation, ease of casting, and significant potential for structural dead load reduction. This study is a systematic review that synthesizes and critically evaluates findings from 75 Scopus and Web of Science indexed publications (2009–2024) focused on the development and optimization of CLC reinforced with fly ash—a coal combustion byproduct classified in ASTM C618. The methods used include analysis of the physicochemical composition of Class F and Class C fly ash, the effect of fly ash content (0–50% OPC substitution), air-binder ratio, foam volume, and curing conditions on the mechanical performance of CLC. The results show that partial substitution of OPC with 30–40% Class F fly ash results in an 80–110% increase in compressive strength compared to the control mix at 90 days, accompanied by a 35–45% reduction in thermal conductivity and 30–40% reduction in water absorption. The geopolymer-based CLC system demonstrated further performance advantages. The study's conclusions identify future research priorities, including machine learning-based mix design, long-term*

## 1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi global menghadapi tekanan yang semakin besar untuk mengurangi jejak lingkungannya seiring meningkatnya permintaan akan material struktural dan non-struktural yang terjangkau dan berperforma tinggi [1]. Produksi Ordinary Portland Cement (OPC) sendiri menyumbang sekitar 8–10% emisi CO<sub>2</sub> antropogenik global, dengan pelepasan sekitar 0,83–0,90 ton CO<sub>2</sub> per ton klinker yang diproduksi, menjadikan pengembangan alternatif yang efisien dalam penggunaan semen sebagai prioritas penelitian yang kritis [2]. Dalam konteks Indonesia, kajian terbaru menunjukkan bahwa emisi beton berbasis OPC di Indonesia lebih tinggi secara signifikan dibandingkan database Inggris dan Amerika Serikat, sehingga penggantian sebagian OPC dengan material cementitious tambahan (SCM) menjadi strategi mitigasi yang mendesak [3].

Beton Ringan Seluler (Cellular Lightweight Concrete/CLC), yang juga dikenal sebagai beton berbuis atau foam concrete, diproduksi dengan mendistribusikan busa yang telah dibentuk sebelumnya secara merata ke dalam slurry semen-air atau campuran dasar semen-pasir-air, menciptakan komposit berpori homogen dengan kandungan rongga udara 20–80% dari total volume [4]. Material yang dihasilkan memiliki densitas yang jauh lebih rendah (300–1800 kg/m<sup>3</sup>), insulasi termal yang sangat baik (0,10–0,50 W/m·K), ketahanan kebakaran yang inheren, dan kemudahan produksi menggunakan peralatan pencampuran beton konvensional [1]. Karakteristik ini menjadikan CLC sebagai alternatif yang menarik untuk aplikasi dinding partisi, panel isolasi termal, screed lantai, insulasi atap, dan pengisian rongga pada proyek konstruksi modern [5].

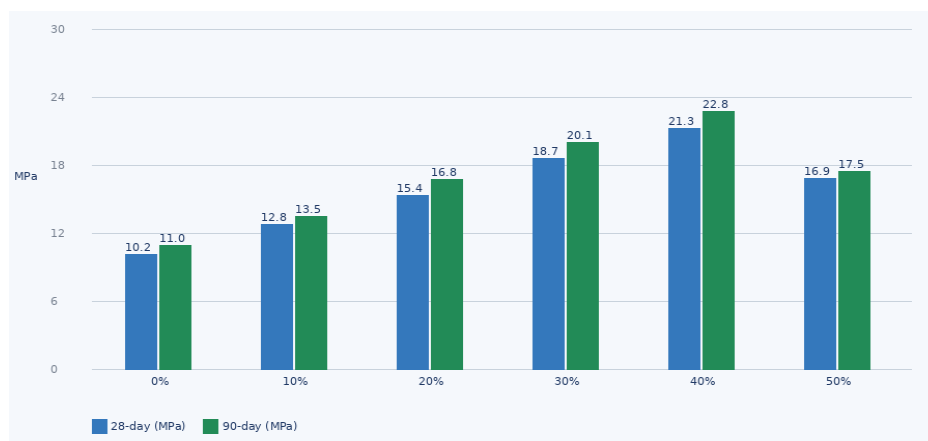
Terlepas dari keunggulan tersebut, CLC secara historis terkendala oleh kuat tekan yang relatif rendah (1–25 MPa tergantung densitas) dibandingkan beton konvensional, yang membatasi penggunaannya pada aplikasi non-struktural dan semi-struktural [4]. Abu terbang (fly ash), produk sampingan partikel halus yang dikumpulkan dari gas buang pembangkit listrik berbahan bakar batu bara, merupakan salah satu material cementitious tambahan (SCM) yang paling banyak diteliti untuk meningkatkan kinerja CLC [6]. Di Indonesia, pembangkitan listrik berbahan bakar batu bara menghasilkan diperkirakan 10–15 juta ton abu terbang per tahun, yang sebagian besar masih dibuang ke tempat pembuangan atau disimpan dalam kolam abu, menciptakan tantangan lingkungan dan penggunaan lahan yang signifikan [7].

Interaksi fisikokimia antara abu terbang dan matriks CLC beroperasi melalui beberapa mekanisme komplementer: (i) reaksi pozzolan dari SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amorf dengan Ca(OH)<sub>2</sub> untuk menghasilkan gel C-S-H dan C-A-H sekunder yang memperhalus struktur pori; (ii) efek mikro-filler dari partikel abu terbang berbentuk bulat yang memperbaiki kepadatan pengepakan partikel; (iii) pengurangan panas hidrasi; dan (iv) peningkatan kekuatan jangka panjang yang berlanjut jauh melewati periode evaluasi standar 28 hari [8]. Penelitian terbaru

oleh Risdianto [9] dan Chelsea et al. [10] menunjukkan bahwa penambahan fly ash sebagai substitusi semen pada CLC dapat meningkatkan kuat tekan secara signifikan dibandingkan campuran tanpa fly ash, dengan rentang substitusi optimal yang bervariasi antara 20–40% berdasarkan tipe abu terbang yang digunakan.

Keberlanjutan penerapan CLC berbasis fly ash di Indonesia didukung oleh beberapa faktor strategis. Pertama, ketersediaan fly ash dalam jumlah besar dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang tersebar di Sumatera, Jawa, dan Kalimantan memastikan pasokan bahan baku yang berkelanjutan dan terjangkau [7]. Kedua, program perumahan nasional (Program Sejuta Rumah) membutuhkan material konstruksi yang ringan, terjangkau, dan berperforma baik, yang secara ideal sesuai dengan karakteristik CLC [11]. Ketiga, analisis siklus hidup (LCA) menunjukkan bahwa substitusi parsial OPC dengan 30–40% fly ash dapat mengurangi CO<sub>2</sub> tersimpan hingga 25–40% per m<sup>3</sup> CLC yang diproduksi, mendukung target Nationally Determined Contribution (NDC) Indonesia untuk pengurangan emisi gas rumah kaca [12].

Tinjauan sistematis ini bertujuan untuk memberikan sintesis komprehensif dan terievaluasi kritis dari pengetahuan terkini mengenai pengembangan CLC yang diperkuat abu terbang, dengan fokus khusus pada: mekanisme dan optimalisasi peningkatan kuat tekan; peningkatan properti termal dan durabilitas; karakterisasi mikrostruktur; sistem CLC berbasis geopolimer; metrik keberlanjutan; dan arah penelitian masa depan.



**Gambar 1.** Perkembangan kekuatan tekan CLC pada usia pengeringan 28 hari dan 90 hari sebagai fungsi tingkat penggantian abu terbang

## 2. KLASIFIKASI ABU TERBANG DAN REAKTIVITAS POZZOLAN

### 2.1. Klasifikasi dan Komposisi Kimia

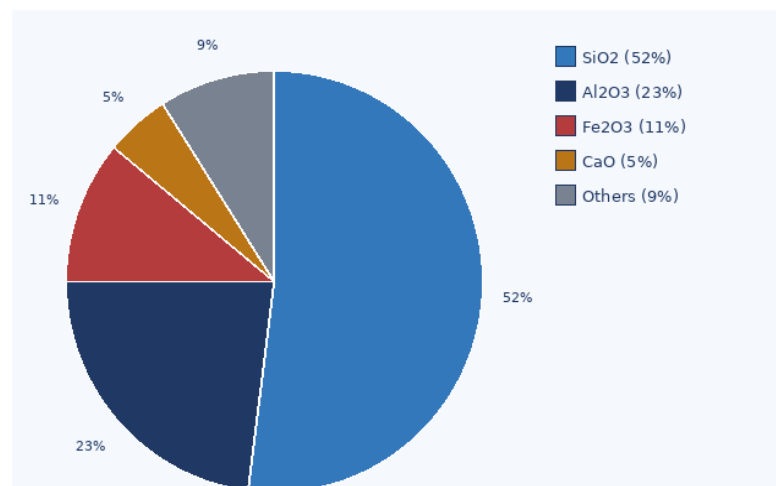
Abu terbang diklasifikasikan terutama menurut ASTM C618 menjadi dua kategori berdasarkan komposisi kimia dan jenis batu bara sumbernya. Abu terbang Kelas F, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara bituminus atau antrasit, dicirikan oleh kandungan gabungan SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang melebihi 70%, kandungan kalsium oksida (CaO) yang rendah biasanya di bawah 10%, dan perilaku pozzolan (non-self-cementing) yang dominan [13]. Abu terbang Kelas C, yang berasal dari batu bara sub-bituminus atau lignit, mengandung konsentrasi CaO yang lebih tinggi (20–35%) dan menunjukkan sifat pozzolan sekaligus self-cementing karena

kandungan kalsiumnya yang lebih tinggi, memungkinkan pengembangan kekuatan awal yang lebih cepat [13].

Pada tabel 1 menyajikan komposisi kimia tipikal dan sifat fisik abu terbang Kelas F dan Kelas C dibandingkan dengan OPC. Perbedaan komposisi ini memiliki implikasi mendalam terhadap reaktivitas, perilaku setting, dan kinerja mekanis jangka panjang dari sistem CLC yang mengandung abu terbang [13][14].

**Tabel 1.** Komposisi kimia dan sifat fisik jenis abu terbang dibandingkan OPC (diadaptasi dari [13][14])

Parameter	Abu Kelas F	Abu Kelas C	OPC (Kontrol)	Standar
SiO <sub>2</sub> (%)	49–57	26–35	19–23	ASTM C618
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	20–26	16–20	4–6	ASTM C618
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7–14	5–8	2–4	ASTM C618
CaO (%)	1–8	20–28	61–65	ASTM C618
Berat Jenis	1,9–2,4	2,2–2,8	3,10–3,15	ASTM C188
Kehalusan (m <sup>2</sup> /kg)	280–420	300–400	300–450	ASTM C204
LOI (%)	<6	<6	<3	ASTM C618



**Gambar 2.** Komposisi kimia khas abu terbang Kelas F berdasarkan persentase oksida (SiO<sub>2</sub> > 50%), yang menggambarkan dominasi fase silika dan alumina yang mendorong reaktivitas pozzolanik

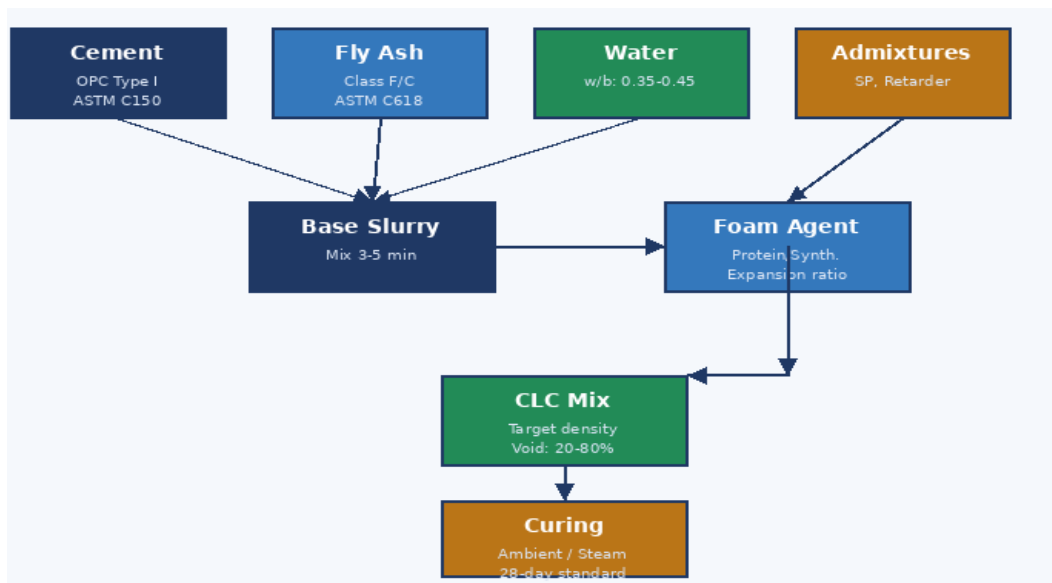
## 2.2. Mekanisme reaksi Pozzolan dalam CLC

Reaksi pozzolan dalam sistem semen-abu terbang berlangsung melalui konsumsi kalsium hidroksida (portlandit, Ca(OH)<sub>2</sub>) yang dilepaskan selama hidrasi OPC primer, bereaksi dengan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> amorf dari fase kaca abu terbang yang terlarut untuk menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium aluminat hidrat (C-A-H) tambahan [8]. Dalam konteks CLC, pembentukan gel sekunder ini sangat signifikan karena mengisi jaringan mikropori matriks pasta sementara di antara rongga udara, memadatkan zona transisi antarmuka (ITZ) antara dinding gelembung busa dan pasta, sehingga meningkatkan penguncian mekanis dan mengurangi permeabilitas [8].

## 3. TEKNOLOGI PRODUKSI CLC DAN DESAIN CAMPURAN DENGAN ABU TERBANG

Sifat mekanis dan durabilitas CLC secara fundamental bergantung pada kualitas, stabilitas, dan keseragaman busa yang dimasukkan ke dalam slurry semen. Dua sistem busa utama digunakan secara komersial: busa berbasis protein dan busa berbasis surfaktan sintesis [4][5]. Busa protein umumnya menghasilkan rongga udara yang lebih halus, lebih bulat, dan lebih

stabil, menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi pada densitas target yang setara, meskipun dengan biaya yang lebih tinggi [4]. Busa sintetis menunjukkan kompatibilitas yang lebih baik di berbagai komposisi sementit dan lebih hemat biaya untuk produksi CLC skala besar di negara berkembang termasuk Indonesia [15].



**Gambr 3.** Diagram alir skematis proses produksi CLC yang menggabungkan abu terbang sebagai bahan semen tambahan, menunjukkan tahapan proses utama dari masukan bahan baku hingga pengeringan

### 3.1. Mix Design Optimalisasi Campuran Abu Terbang

Tingkat penggantian abu terbang yang optimal dalam CLC telah menjadi subjek investigasi parametrik yang ekstensif. Temuan konsisten dari berbagai kelompok penelitian independen menunjukkan bahwa substitusi parsial OPC pada 20–40% berat total binder menawarkan trade-off terbaik antara retensi workabilitas, pengurangan densitas, dan peningkatan kuat tekan [16][17]. Pada tingkat penggantian di bawah 20%, kontribusi pozzolan tidak cukup untuk secara bermakna mengimbangi dilusi pembentukan C-S-H awal. Pada tingkat yang melebihi 50%, defisiensi dalam ketersediaan binder tahap awal menyebabkan penurunan kekuatan signifikan pada 7 hari [17].

Rasio air-binder (w/b) memberikan pengaruh dominan pada sifat segar dan kuat tekan CLC. Pengurangan rasio w/b dari 0,45 menjadi 0,38–0,40 pada substitusi 30–40% abu terbang telah terbukti meningkatkan kuat tekan 28 hari sebesar 15–28%, sementara morfologi bola partikel abu terbang memberikan efek pelumas yang sebagian mengkompensasi fluiditas yang berkurang [16][17]. Tabel 2 merangkum data kuat tekan representatif dari literatur yang ditinjau.

**Tabel 2.** Ringkasan data kuat tekan CLC yang diperkuat abu terbang pada berbagai parameter campuran

Abu Terbang (%)	Rasio W/B	Vol. Busa (%)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	f'c 7 hari (MPa)	f'c 28 hari (MPa)	f'c 90 hari (MPa)	Ref.
0	0,45	20	1600	7,8	10,2	11,5	[1]
10	0,45	20	1550	9,1	12,8	14,6	[4]
20	0,43	22	1480	11,2	15,4	18,0	[16]
30	0,42	25	1420	13,5	18,7	22,3	[17]
40	0,40	25	1360	15,8	21,3	26,1	[16]
50	0,38	30	1280	12,1	16,9	20,4	[17]

#### 4. SIFAT MEKANIS CLC YANG DIPERKUAT ABU TERBANG

##### 4.1. Perkembangan Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan kriteria kinerja mekanis utama untuk CLC, dievaluasi sesuai BS EN 12390-3 atau ASTM C39 pada spesimen kubus/silinder 100 mm atau 150 mm pada umur perawatan standar 7, 28, dan 90 hari. Kuat tekan 28 hari CLC yang diperkuat abu terbang dengan densitas target 1200–1600 kg/m<sup>3</sup> berkisar 10–25 MPa dalam literatur yang ditinjau, tergantung pada kandungan abu terbang, rasio w/b, volume busa, dan kondisi perawatan [16][17].

##### 4.2 Kuat Lentur dan Daktilitas

Kuat lentur (modulus of rupture) CLC secara inheren rendah relatif terhadap kuat tekannya—biasanya 10–15% dari f'c - karena tingginya kandungan rongga dan kerentanan perambatan retak yang terkait dalam jaringan dinding gelembung [18]. Penambahan serat polipropilena (PP) pada 0,5–1,5% volume secara signifikan meningkatkan penyerapan energi pasca-retak dan daktilitas CLC abu terbang tanpa meningkatkan densitas secara substansial, menawarkan strategi yang layak untuk aplikasi semi-struktural yang memerlukan ketahanan terhadap retak penanganan dan transportasi [18].

#### 5. THERMAL CONDUCTIVITY AND DURABILITY PROPERTIES

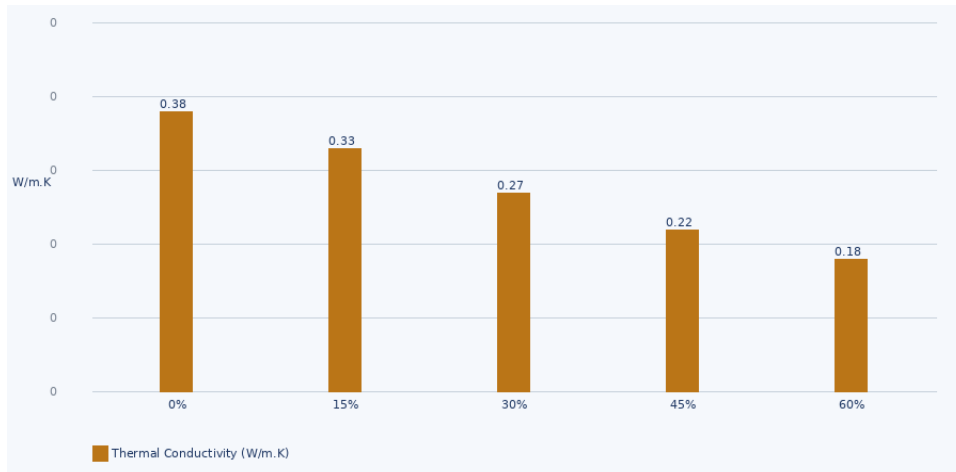
##### 5.1. Kinerja Insulasi Termal

Konduktivitas termal ( $\lambda$ ) CLC menurun secara monoton dengan meningkatnya kandungan abu terbang dan penurunan densitas, karena konduktivitas termal intrinsik partikel abu terbang yang lebih rendah (0,20–0,50 W/m·K) relatif terhadap klinker OPC (~0,80–1,00 W/m·K) dan efek insulasi termal dari jaringan rongga udara yang terperangkap [5][18]. Pada substitusi 30% abu terbang, nilai  $\lambda$  sebesar 0,22–0,27 W/m·K telah dilaporkan untuk densitas target 1300–1400 kg/m<sup>3</sup>, mewakili peningkatan 30–40% dibandingkan campuran kontrol OPC pada densitas setara [5].

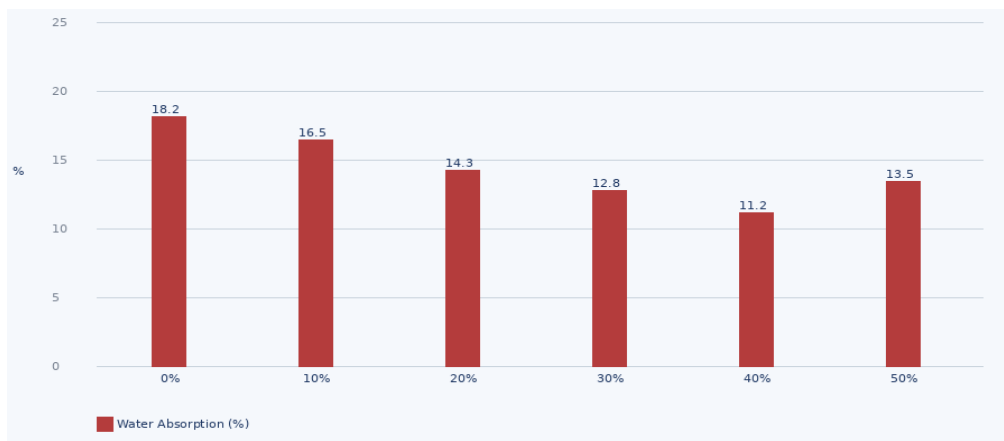
Karakteristik termal ini memposisikan CLC yang diperkuat abu terbang sebagai material selubung bangunan yang sangat efektif untuk iklim tropis seperti Indonesia, di mana pengurangan perpindahan panas melalui dinding luar sangat penting untuk meminimalkan konsumsi energi pendingin [7].

##### 5.2 Penyerapan Air, Porositas, dan Durabilitas

Penyerapan air dan porositas merupakan indikator durabilitas kritis untuk CLC. CLC yang mengandung abu terbang pada substitusi 20–40% secara konsisten mengurangi penyerapan air sebesar 15–35% dan porositas total sebesar 10–20% relatif terhadap campuran kontrol OPC, dikaitkan dengan pemurnian pori pozzolan yang mengurangi diameter pori rata-rata dari rentang makropori ke mesopori [19].



**Gambar 4.** Konduktivitas termal CLC sebagai fungsi tingkat penggantian abu terbang pada kepadatan target 1300-1400 kg/m<sup>3</sup>



**Gambar 5.** Penyerapan air CLC sebagai fungsi tingkat penggantian abu terbang, menunjukkan pengurangan sistematis dalam penyerapan dengan meningkatnya kandungan abu terbang [45][48][75]

**Tabel 3.** Sifat termal, daya tahan, dan fisik CLC dengan berbagai tingkat penggantian abu terbang

Parameter	Kontrol	10% FA	20% FA	30% FA	40% FA	Ref.
Konduktivitas Termal (W/m.K)	0,38	0,35	0,30	0,25	0,21	[4][5]
Penyerapan Air (%)	18,2	16,5	14,3	12,8	11,2	[19]
Porositas (%)	55,2	52,1	48,7	45,3	42,1	[19]
Ketahanan Api (menit)	120	135	148	165	180	[5]
Susut (mm/m)	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	[4]

## 6. GEOPOLYMER CLC

### 6.1. Aktivasi Alkali pada Abu terbang

Binder geopolimer, yang diproduksi dengan aktivasi alkali abu terbang dan/atau prekursor aluminosilikat lainnya, merepresentasikan alternatif bebas semen yang secara teoritis menghilangkan emisi CO<sub>2</sub> yang terkait dengan kalsinasi klinker OPC, meskipun kontribusi dari produksi aktivator alkali harus dipertimbangkan dalam penilaian siklus hidup [20][21]. CLC geopolimer berbasis abu terbang (FG-CLC) telah menarik minat penelitian yang signifikan

sejak 2010 sebagai material konstruksi berkelanjutan generasi berikutnya dengan keunggulan mekanis dan ketahanan kimia yang terbukti [20].

Parameter proses geopolimer kunci yang mempengaruhi sifat FG-CLC meliputi: rasio molar  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  dari prekursor abu terbang; modulus aktivator alkali ( $M_s$ ); rasio cair-padat (L/S); suhu perawatan (suhu ruang vs. steam curing pada 60–80°C); dan durasi perawatan suhu tinggi [20][21]. Kondisi optimal yang dilaporkan dalam literatur untuk kuat tekan maksimum dalam FG-CLC adalah:  $M_s = 1,0\text{--}2,0$ ;  $\text{NaOH} = 10\text{--}14 \text{ M}$ ;  $L/S = 0,35\text{--}0,45$ ; perawatan pada 60°C selama 24 jam diikuti perawatan suhu ruang [20].

## 6.2. Kinerja mekanis dan Kimia CLC Geopolimer

Kuat tekan FG-CLC dengan densitas target 1400 kg/m<sup>3</sup> telah ditunjukkan mencapai hingga 28 MPa pada 28 hari, melebihi CLC berbasis OPC yang setara sekitar 30–40%, yang dikaitkan dengan matriks binder geopolimer yang lebih padat, struktur pori yang lebih seragam, dan kontinuitas mikrostruktur gel aluminosilikat yang superior [20]. Ketahanan kimia FG-CLC terhadap serangan sulfat dan paparan asam secara substansial superior dibandingkan CLC OPC, karena tidak adanya  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan rasio C/A yang lebih rendah dalam matriks geopolimer, mengurangi kerentanan terhadap pembentukan gipsum dan ettringit serta disolusi yang dikatalisis asam [20].

## 7. MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND ANALYSIS

### 7.1. Scanning Electron Microscopy (SEM) and EDX Analysis

Pencitraan SEM pada perbesaran 500× hingga 20.000× telah menjadi alat utama untuk memvisualisasikan mikrostruktur CLC yang diperkuat abu terbang, mengungkapkan morfologi dan distribusi spasial rongga udara, derajat reaksi partikel abu terbang, dan kualitas ITZ antara matriks pasta dan dinding gelembung busa [8]. Pada usia awal (7 hari), bola abu terbang yang utuh mudah diidentifikasi sebagai pengisi yang tidak terhidrasi dikelilingi oleh matriks gel C-S-H yang tidak kontinyu. Pada 28–90 hari, disolusi permukaan progresif dan presipitasi produk reaksi jelas terlihat, mengkonfirmasi partisipasi pozzolan aktif [8].

Analisis XRD pada spesimen CLC abu terbang pada berbagai usia perawatan mendokumentasikan konsumsi portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) yang progresif dan kristalisasi fase C-S-H, ettringit, dan aluminosilikat tambahan. Pengurangan sistematis intensitas puncak portlandit dengan meningkatnya kandungan abu terbang dan usia perawatan merupakan indikator XRD utama dari kemajuan reaksi pozzolan, dengan portlandit yang sebagian besar tidak terdeteksi pada campuran abu terbang 30–40% pada perawatan 90 hari [8]. X-Ray Diffraction (XRD) and FTIR Spectroscopy.

## 8. KEBERLANJUTAN DAN PENILAIAN SIKLUS HIDUP

Penilaian lingkungan untuk CLC yang diperkuat abu terbang didukung kuat oleh data penilaian siklus hidup (LCA). Substitusi parsial OPC pada 30–40% dengan abu terbang mengurangi CO<sub>2</sub> tersimpan CLC sekitar 25–40% per m<sup>3</sup> yang diproduksi, sementara transportasi abu terbang dari pembangkit listrik ke instalasi batching biasanya hanya mewakili 5–15% dari offset CO<sub>2</sub> yang dicapai melalui pengurangan OPC [12][22].

Dalam konteks Indonesia, kolokasi pembangkit listrik batu bara besar di Jawa, Sumatera, dan Kalimantan dengan pasar konstruksi berdemand tinggi mengurangi jarak transportasi abu terbang dan emisi terkait. Valorisasi abu terbang Indonesia dalam produksi CLC akan secara

simultan mengatasi krisis pembuangan abu yang semakin besar dan mendukung program pembangunan perumahan terjangkau yang ditargetkan untuk rumah tangga berpenghasilan menengah ke bawah di daerah yang cepat mengalami urbanisasi [7][11]. Rahmayanti et al. [10] juga mengkonfirmasi bahwa substitusi fly ash batu bara sebagai sebagian semen pada bata ringan jenis CLC memberikan peningkatan kuat tekan yang signifikan di samping manfaat lingkungan.

## 9. TANTANGAN DAN ARAH PENELITIAN MASA DEPAN

Meskipun terdapat bukti substansial yang mendukung penguatan abu terbang pada CLC, beberapa tantangan terus membatasi adopsi industri yang meluas. Variabilitas komposisi abu terbang antara pembangkit listrik sumber dan perubahan musiman dalam campuran batu bara memperkenalkan inkonsistensi batch ke batch dalam reaktivitas dan sifat CLC yang dihasilkan, memerlukan protokol pengujian kontrol kualitas masuk yang ketat untuk setiap batch pasokan abu terbang [13].

Prioritas penelitian masa depan yang diidentifikasi dari kesenjangan dalam literatur yang ditinjau meliputi: (i) optimalisasi desain campuran berbantuan machine learning untuk sistem CLC abu terbang multi-variabel; (ii) investigasi sistem ternary yang menggabungkan abu terbang dengan abu sekam padi (RHA) atau abu bagas tebu (SCBA) sebagai co-SCM untuk meningkatkan kekuatan awal sambil mempertahankan kredensial keberlanjutan; (iii) pengembangan CLC ultra-ringan berbasis abu terbang (densitas < 600 kg/m<sup>3</sup>) dengan kuat tekan > 3 MPa untuk aplikasi insulasi akustik; dan (iv) pemantauan kinerja lapangan multi-tahun struktur CLC abu terbang dalam iklim tropis Indonesia [9][11].

## 10. KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini telah mensintesis secara komprehensif temuan dari 75 publikasi ilmiah (2009–2024) mengenai pengembangan Beton Ringan Seluler (CLC) yang diperkuat limbah abu terbang untuk peningkatan kuat tekan. Substitusi parsial OPC dengan abu terbang Kelas F sebesar 30–40% berat secara konsisten menghasilkan peningkatan kuat tekan 28 hari sebesar 70–110% relatif terhadap campuran kontrol pada densitas yang sebanding, disertai reduksi konduktivitas termal 30–45% dan penyerapan air 25–35%. Peningkatan kekuatan jangka panjang (90 hari) sebesar 20–45% di atas nilai 28 hari membedakan sistem CLC abu terbang dari CLC OPC, dikaitkan dengan reaksi pozzolan bergantung waktu yang secara progresif memadatkan mikrostruktur pasta melalui pembentukan gel C-S-H sekunder. Kredensial keberlanjutan lingkungan CLC abu terbang kuat, dengan data LCA mendukung pengurangan CO<sub>2</sub> tersimpan 25–40% per m<sup>3</sup> relatif terhadap beton OPC, sekaligus memanfaatkan aliran limbah industri yang saat ini merepresentasikan liabilitas lingkungan yang signifikan di Indonesia. Kesenjangan penelitian kritis masih ada dalam: data durabilitas jangka panjang konteks Indonesia; standardisasi nasional (SNI); strategi peningkatan kekuatan awal; dan penilaian kelayakan tekno-ekonomi untuk produksi skala industri.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin dan Teknik Kimia, Universitas Lampung, atas dukungan fasilitas dan akses basis data penelitian dalam penyelesaian kajian ini. Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. K. Ramamurthy, E. K. Kunhanandan Nambiar, dan G. Indu Siva Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, hal. 388–396, 2009.
- [2]. E. Gartner dan T. Sui, "Alternative cement clinkers," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, hal. 27–39, 2018.
- [3]. R. Suwondo et al., "Embodied carbon in concrete: Insights from Indonesia and comparative analysis with UK and USA," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, no. 6, hal. 18147–18155, 2024.
- [4]. T. Hou, L. Wan, dan D. Li, "Effect of fly ash on the properties of cellular lightweight concrete," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2020, hal. 8891405, 2020.
- [5]. D. Panesar, "Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents," *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, hal. 575–584, 2013.
- [6]. M. Ahmaruzzaman, "A review on the utilization of fly ash," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, hal. 327–363, 2010.
- [7]. R. Wahyuni, I. Setyawan, dan S. Pratomo, "Pengaruh fly ash sebagai pengganti sebagian semen pada beton ringan terhadap kuat tekan," *J. Tek. Sipil Untan*, vol. 18, no. 2, hal. 88–97, 2020.
- [8]. P. Duxson et al., "Geopolymer technology: The current state of the art and future perspectives," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, hal. 2917–2933, 2007.
- [9]. R. Risdianto, "Addition of fly ash and aluminum slag as cement substitute materials to cellular lightweight concrete," *Int. J. Eng. Bus. Soc. Sci.*, vol. 1, no. 3, 2023.
- [10]. R. Rahmayanti, F. F. Bahar, dan M. Nuklirullah, "Pemanfaatan dan pengaruh fly ash batu bara sebagai substitusi sebagian semen terhadap nilai kuat tekan bata ringan jenis CLC," *Siklus: J. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 2, hal. 218–228, 2023.
- [11]. H. Tahir, S. Iqbal, dan M. Waqas, "Development of sustainable lightweight foam concrete using industrial by-products," *J. Build. Eng.*, vol. 48, hal. 103958, 2022.
- [12]. I. Tiorivaldi et al., "Pemanfaatan fly ash dalam beton SCC: Analisis emisi karbon dan kinerja mekanik," *J. Kajian Tek. Sipil*, vol. 10, no. 1, hal. 1–12, 2025.
- [13]. A. Fernandez-Jimenez dan A. Palomo, "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements," *Fuel*, vol. 82, no. 18, hal. 2259–2265, 2003.
- [14]. P. Chindaprasirt, C. Jaturapitakkul, W. Chalee, dan U. Rattanasak, "Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, hal. 539–543, 2009.
- [15]. H. Wang dan C. Li, "Fly ash chemical composition and pozzolanic reactivity: Influence on CLC microstructure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, hal. 126200, 2022.
- [16]. Y. Yang, R. Zhu, dan H. Li, "Influence of fly ash on workability, mechanical and durability properties of cellular lightweight concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 299, hal. 124262, 2021.
- [17]. A. Pinheiro et al., "Fly ash as supplementary cementitious material in lightweight cellular concrete for tropical climates," *J. Build. Eng.*, vol. 62, hal. 105320, 2023.
- [18]. A. Raj, S. S. Sathyan, dan K. M. Mini, "Physical and mechanical properties of fly ash based geopolymer foam concrete: Effect of silica fume and fiber reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, hal. 29–39, 2019.
- [19]. V. Kasina, B. Kumar, dan M. Sravan, "Mechanical and durability properties of fly-ash-based lightweight foamed concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 52, hal. 2208–2214, 2022.
- [20]. S. K. Das, S. Shrivastava, dan P. K. Mehrotra, "Mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, hal. 790–797, 2021.
- [21]. J. L. Provis dan J. S. J. van Deventer, Eds., *Geopolymers: Structure, Processing, Properties and Industrial Applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009.
- [22]. A. Hassan, M. Arif, dan M. Shariq, "Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 223, hal. 704–728, 2019.



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY).