

**INOVASI BETON RINGAN *CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE*
(CLC) BERBASIS LIMBAH KACA SEBAGAI MATERIAL BANGUNAN
RAMAH LINGKUNGAN**

(Skripsi)

Oleh

**ALYA RAHMA
2255014001**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**INOVASI BETON RINGAN *CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE*
(CLC) BERBASIS LIMBAH KACA SEBAGAI MATERIAL BANGUNAN
RAMAH LINGKUNGAN**

Oleh

ALYA RAHMA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Prodi Teknik Lingkungan

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

INOVASI BETON RINGAN *CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE* (CLC) BERBASIS LIMBAH KACA SEBAGAI MATERIAL BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN

Oleh

ALYA RAHMA

Pemanfaatan limbah kaca sebagai material konstruksi alternatif merupakan salah satu upaya untuk mengurangi timbunan limbah anorganik sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pemanfaatan limbah kaca sebagai substitusi pasir terhadap kuat tekan dan konduktivitas termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), serta menentukan komposisi optimum yang dihasilkan. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan variasi limbah kaca sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30%. Pengujian meliputi uji kuat tekan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) berdasarkan SNI 8640:2018 uji konduktivitas termal menggunakan metode *guarded hot plate* berdasarkan ASTM C177.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi limbah kaca 20% merupakan komposisi optimum dengan nilai kuat tekan sebesar 5,82 MPa. Nilai tersebut telah memenuhi persyaratan SNI 8640:2018 untuk kategori bata nonstruktural IIA. Peningkatan kuat tekan dipengaruhi oleh kandungan silika pada serbuk kaca yang bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sehingga menghasilkan senyawa Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) tambahan yang memperbaiki kepadatan mikrostruktur beton. Pada pengujian termal, variasi 20% juga menghasilkan nilai resistansi termal tertinggi sebesar 0,2501 m²K/W yang menunjukkan kemampuan isolasi panas lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Namun, nilai konduktivitas termal yang diperoleh masih belum memenuhi standar acuan yang digunakan. Berdasarkan hasil tersebut, pemanfaatan limbah kaca sebesar 20% berpotensi diterapkan pada beton ringan CLC sebagai material bangunan yang lebih ramah lingkungan.

Kata kunci: *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), limbah kaca, konduktivitas termal.

ABSTRACT

INNOVATION OF CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE (CLC) BASED ON WASTE GLASS AS AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY BUILDING MATERIAL

By

ALYA RAHMA

The utilization of waste glass as an alternative construction material is one of the efforts to reduce inorganic waste generation while supporting sustainable development. This study aims to analyze the effect of waste glass utilization as a partial replacement for sand on the compressive strength and thermal conductivity of Cellular Lightweight Concrete (CLC), as well as to determine the optimum composition. The research was conducted using an experimental laboratory method with waste glass substitution levels of 0%, 10%, 20%, and 30%. The tests included compressive strength testing using a Universal Testing Machine (UTM) based on SNI 8640:2018 and thermal conductivity testing using the guarded hot plate method in accordance with ASTM C177.

The results showed that the 20% waste glass variation was the optimum composition, achieving the highest compressive strength of 5.82 MPa. This value meets the requirements of SNI 8640:2018 for Category IIA non-structural masonry units. The improvement in compressive strength was attributed to the silica content in the glass powder, which reacted pozzolanically with calcium hydroxide produced during cement hydration, forming additional Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) compounds that enhanced the density of the concrete microstructure. In terms of thermal performance, the 20% variation also exhibited the highest thermal resistance value of 0.2501 m²K/W, indicating better thermal insulation capability compared to the other variations. However, the thermal conductivity value obtained still did not meet the referenced standard requirements. Based on these findings, the use of 20% waste glass in CLC has potential as a more environmentally friendly building material.

Keywords: Cellular Lightweight Concrete (CLC), waste glass, thermal conductivity.

Judul Skripsi : **INOVASI BETON RINGAN *CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE* (CLC) BERBASIS LIMBAH KACA SEBAGAI MATERIAL BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN**

Nama Mahasiswa : **Alya Rahma**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2255014001

Program Studi : Teknik Lingkungan

Fakultas : Teknik



Ir. Rosalia Dwi Werena, S.ST., M.Eng.
NIP 198910152019032015

M. Rizky Ismail, S.T., M.T.
NIP 199209302024061001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Koordinator Program Studi
S1 Teknik Lingkungan

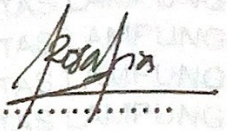
Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 196911112000031002

Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T. IPM
NIP 198502282012121001

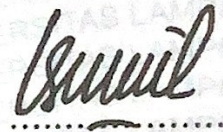
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

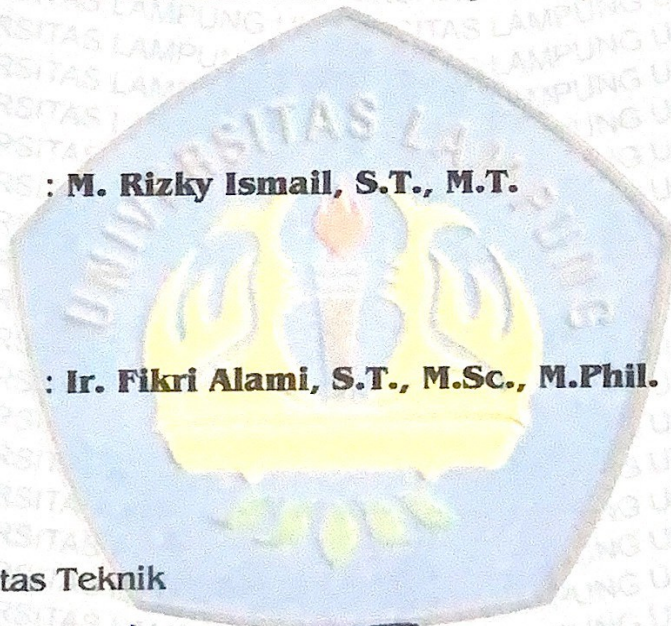
Ketua : **Ir. Rosalia Dwi Werena, S.ST., M.Eng.**



Sekretaris : **M. Rizky Ismail, S.T., M.T.**

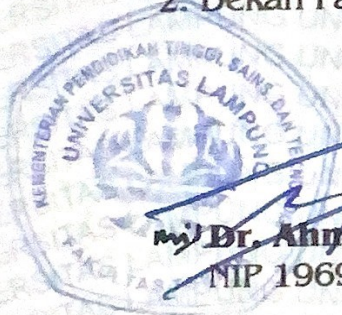


Anggota : **Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.**



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.
NIP 196910302000031001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **03 Juni 2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : **ALYA RAHMA**
Nomor Pokok Mahasiswa : **2255014001**
Judul : **INOVASI BETON RINGAN *CELLULAR LIGHTWEIGHT CONCRETE* (CLC) BERBASIS LIMBAH KACA SEBAGAI MATERIAL BANGUNAN RAMAH LINGKUNGAN**
Jurusan : **Teknik Sipil**
Prodi : **S1 Teknik Lingkungan**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah karya penulisan ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 03 Juni 2026

Penulis,



Alya Rahma

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Jakarta, pada tanggal 2 Februari 2004, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari Bapak Dedy Triyadi dan Ibu Nur hayati.

Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TKIT Baitussalam, Bogor pada tahun 2010, kemudian melanjutkan pendidikan dasar (SD) di SDIT Baitussalam, Bogor dan lulus pada tahun 2016. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) ditempuh di MTS Husnul Khotimah, Kuningan dan diselesaikan pada tahun 2019, sedangkan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) diselesaikan di MAS Husnul Khotimah, Kuningan pada tahun 2022.

Pada tahun 2022, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SMMPN). Selama menjalani masa perkuliahan, penulis aktif menjadi mahasiswa dan pernah menjadi anggota Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Universitas Lampung pada Departemen Kementerian Dalam

HALAMAN MOTTO

“Aku membahayakan nyawa ibu untuk lahir ke dunia, tangki cintaku terisi penuh oleh ayah sejak aku hadir di dunia, jadi tidak mungkin aku tidak ada artinya”

{ وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا ﴿١١٤﴾ }

Artinya: “Dan katakanlah: Ya Rabb, tambahkanlah aku ilmu.”

(QS. Taha:114)

“You’re the prettiest flower, prettier than anyone else in this world. Purple is the last color of the rainbow, that’s why I think I’m gonna love you for a long.”

(Kim Taehyung)

“when no one is around, you’ll find me on my tallest tiptoe, spinnin in my highest heels, shinin just for u”

(Taylor Swift)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan mengucapkan,

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{...وَلَمْ أَكُنْ بِدُعَائِكَ رَبِّ شَقِيًّا ۝}

Artinya: “Dan aku tidak pernah kecewa dalam berdoa kepada-Mu, wahai Tuhanku.” [QS. Maryam: 4]

Alhamdulillahil'lah rabbil'alamin, dengan penuh rasa Syukur yang tak terhingga atas nikmat dan pertolongan-Mu ya Allah.

Tiada lembar yang paling indah dalam laporan skripsi ini kecuali lembar pengesahan, skripsi ini saya persembahkan kepada,

Ayahanda **Dedy Triyadi** dan Ibunda **Nur Hayati**, kepada kakakku **Nauval Jaiz**, dan Adik kecilku **Tazkia Rahma** yang selalu menjadi keluarga yang indah dan nyaman untuk berkumpul bersama yang menjadi motivator terbesar untuk penulis.

Terima kasih kepada sahabat, pasangan, dan teman-teman yang selalu memberi support untuk menyelesaikan skripsi ini, serta tidak lupa untuk senantiasa berdoa dan bersyukur atas segala hal yang telah diberikan Allah SWT.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, kasih sayang, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Inovasi Beton Ringan *Cellular Lightweight Concrete (CLC)* Berbasis Limbah Kaca sebagai Material Bangunan Ramah Lingkungan” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Berbagai tantangan dan proses panjang telah penulis lalui selama masa penelitian dan penyusunan karya ilmiah ini. Namun, berkat doa, dukungan, dan bantuan dari banyak pihak, penulis mampu melewati setiap proses tersebut hingga akhirnya skripsi ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. H. Ahmad Herison, S.T.,M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
3. Bapak Ir. Amril Ma’ruf Siregar S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Lampung.
4. Ibu Ir. Rosalia Dwi Werena, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Utama skripsi penulis. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam proses penelitian maupun penyusunan skripsi, namun di tengah berbagai hambatan dan kendala, beliau senantiasa meluangkan waktu dan membimbing penulis hingga skripsi ini dapat terselesaikan. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas seluruh bantuan dan ketulusan yang telah diberikan selama proses penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak M. Rizky Ismail, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan bimbingan, masukan, serta dukungan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.

6. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc.,M.Phil., selaku Dosen Penguji skripsi yang telah memberikan kritik dan saran kepada penulis sehingga skripsi ini dapat menjadi lebih baik.
7. Ibu Puspa selaku penanggung jawab laboratorium yang telah membantu dan mendampingi penulis dalam proses pengujian menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM).
8. Kepada cinta pertama dan panutan penulis, Ayahanda Dedy Triyadi, yang selalu menunggu kepulangan penulis ke rumah dengan penuh rasa rindu, yang mempertaruhkan segalanya tanpa mengenal lelah sehingga penulis selalu tercukupi, serta tidak pernah berhenti mengisi penuh tangki cinta untuk anak perempuannya yang manja ini. Dan kepada pintu surga penulis, Ibunda Nur Hayati, yang telah Allah titipkan untuk menemani dan membimbing penulis mengarungi derasnya kehidupan, menjadi sosok pertama yang memanjakan, menyayangi, serta mencintai anak perempuannya dengan penuh kelembutan dan kasih yang tulus tanpa batas. Selalu ku rayu Tuhan agar diberikan umur yang panjang, kesehatan, dan kebahagiaan untuk kalian berdua. Dua puluh dua tahun penulis dididik dengan penuh cinta dan pengorbanan, dan hari ini penulis mempersembahkan gelar S.T. ini sebagai bentuk bakti, rasa syukur, dan terima kasih atas segala yang telah diberikan.
9. Kepada kakak penulis, Nauval Jaiz, panutan kedua penulis yang sangat menyebalkan, yang sangat protektif tetapi menjadi orang terdepan yang mengkhawatirkan penulis. Dari nya penulis termotivasi, kagum, dan selalu berpikir untuk menjadi pribadi yang lebih kuat, giat, mandiri, dan sabar. Terima kasih karena selalu menjadi tempat bergantung, meskipun sering kali disampaikan dengan cara yang menyebalkan.
10. Kepada adik kecil penulis, Tazkia Rahma, sosok perempuan kecil yang selalu cerah menyambut penulis datang kepadanya. Ia menjadi motivasi besar penulis untuk selalu menjadi pribadi yang menyenangkan dan lebih baik untuk bisa menjadi sosok kakak yang selalu ia tunggu kehadirannya.
11. Sahabat terbaik penulis, Infitah, Raisa, Nawa, Haura, Kuin, Adlina, dan Nafa yang telah hadir dan menemani penulis sejak sebelum memasuki dunia

perkuliahan hingga saat ini. Terima kasih karena selalu memberikan doa, dukungan, hiburan, dan semangat, serta menjadi tempat penulis berbagi cerita dan mendengarkan setiap keluh kesah dengan tulus tanpa prasangka.

12. Kepada sahabat seperjuangan penulis, Yosia, Nanda, Oris, Zora, dan Bagas, yang selalu hadir menemani, membantu, mengajarkan banyak hal, serta menghibur penulis selama menjalani masa perkuliahan dan proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, canda tawa, dan semangat yang diberikan di tengah berbagai kesulitan dan tekanan selama proses penyelesaian skripsi, sehingga perjalanan ini menjadi lebih berkesan dan lebih ringan untuk dilalui.
13. Kepada sahabat baik penulis sekaligus teman satu atap, Nabilla Palupi, terima kasih karena selalu hadir dan menjadi “nomor darurat” penulis selama menjalani kehidupan jauh dari rumah. Terima kasih atas setiap bantuan, dukungan, nasihat, serta kesediaanmu untuk mendengarkan segala keluh kesah penulis. Kehadiranmu telah memberikan rasa nyaman, tenang, menyenangkan dan kekuatan bagi penulis dalam menghadapi berbagai tantangan selama masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.
14. Teman suka cita penulis yang dikenal dengan inisial “Kurbel”, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama kurang lebih empat tahun perkuliahan. Terima kasih karena selalu hadir dalam berbagai momen, dan merayakan berbagai hal kecil selama masa perkuliahan. Kehadiran, kebersamaan, canda tawa, dukungan, serta pertengkaran yang menjadi pembelajaran berharga tentang arti memahami, menghargai, dan memori yang penuh makna.
15. Terima kasih secara langsung kepada Yosia, Ayu, Rama, dan Ican yang telah menjadi teman yang tulus dalam membantu penulis melewati jalan sulitnya skripsi ini. Terima kasih atas bantuan yang diberikan selama proses penelitian secara langsung, serta dukungan, semangat, dan kepedulian yang tidak pernah putus hingga skripsi ini dapat terselesaikan.
16. Kepada teman-teman seperjuangan Teknik Lingkungan Angkatan 2022, terima kasih atas kebersamaan, dukungan, cerita, serta pengalaman yang telah

dibagikan selama masa perkuliahan. Terima kasih telah menjadi bagian dari perjalanan yang penuh pembelajaran, tantangan, dan kenangan yang tidak akan terlupakan. Semoga segala perjuangan yang telah dilalui bersama menjadi langkah awal menuju masa depan yang baik dan kesuksesan bagi kita semua.

17. Kepada Kota Bandar Lampung dan seluruh kisah yang hidup di dalamnya, tempat penulis menempuh pendidikan di tanah perantauan dan kota yang bukan sekadar menjadi ruang singgah, melainkan rumah yang hangat, menyenangkan, dan penuh pelajaran tentang mimpi, perjuangan, kehilangan, pertemuan, serta arti pulang.
18. Kepada Bangtan Sonyeondan, yang tanpa disadari telah menjadi penyemangat penulis di kala jenuh dan lelah selama menjalani kehidupan perkuliahan. Melalui musik, hiburan, dan semangat yang kalian sampaikan, penulis menemukan banyak penghiburan dan mimpi.
19. Kepada seseorang yang tidak dapat penulis sebutkan namanya, yang telah memberikan semangat kepada penulis dan berhasil menjadi orang yang tetap hadir hingga tahap akhir. Terima kasih atas waktu, rasa, ketulusan, dan patah hati yang diberikan selama proses penyusunan skripsi serta perjalanan menuju pendewasaan diri. Melalui kehadirannya, penulis memperoleh guru terbaik, yaitu pengalaman yang mengajarkan arti ikhlas, sabar, dan menerima kehilangan. Karena hidup adalah pembelajaran yang berlangsung setiap hari, dan pada akhirnya setiap orang ada masanya, dan setiap masa ada orangnya. Tersimpan baik sebagaimana dalam lagu “Mangu” .
20. *Last but not least*, kepada sosok jiwa berkepala batu, wanita sederhana dengan mimpi selangit, ucapan terima kasih kupersembahkan untuk diriku, untuk setiap malam yang dihabiskan dalam kelelahan, setiap pagi yang disambut kekhawatiran, namun tetap dijalani dan berhasil dilalui. Terima kasih kepada hati yang tetap Ikhlas, meski banyak hal yang terjadi di luar prediksi. Terima kasih kepada raga yang terus melangkah, meski lelah menghadapi tekanan tetapi tetap diperjuangkan. Dan ribuan terima kasih diucapkan kepada diri sendiri karena sudah mempertanggung jawabkan semua kepercayaan yang sudah diberikan termasuk menyelesaikan skripsi ini sampai selesai dengan jerih payah sendiri.

DAFTAR ISI

SANWACANA	i
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan.....	4
1.4. Batasan Penelitian	4
1.6. Hipotesis Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Limbah Kaca	6
2.2.1 Karakteristik Fisik dan Kimia Limbah Kaca	6
2.2.2 Pemanfaatan Limbah Kaca dalam Beton dan Cellular Lightweight Concrete (CLC).....	7
2.2.3 Kelebihan dan Tantangan Penggunaan Limbah Kaca dalam Beton	8
2.3. Beton ringan Cellular Lightweight Concrete (CLC).....	9
2.4. Implikasi terhadap Pengembangan Material Beton ringan Jenis <i>Cellular Lightweight Concrete</i> (CLC) pada Insenerator Ramah Lingkungan	12
2.4.1. Pengembangan Material Beton ringan.....	12
2.4.2. Sifat Termal dan Mekanis <i>Cellular Lightweight Concrete</i> (CLC) Berbasis Limbah Kaca	12

2.4.3.	Aplikasi pada Insinerator Ramah Lingkungan.....	13
2.5.	Pengujian Beton ringan Jenis <i>Cellular Lightweight Concrete</i> (CLC)...	15
2.5.1.	Persyaratan Fisis Bata Beton.....	15
2.5.2.	Bahan Pembentuk Beton ringan.....	15
2.5.3.	Karakteristik Beton ringan <i>Cellular Lightweight Concrete</i> (CLC)16	
2.5.4.	Konduktifitas Termal Beton ringan.....	17
2.6.	Penelitian Terdahulu.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		22
3.1.	Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	22
3.2.	Lokasi dan Waktu Penelitian.....	22
3.3.	Bahan dan Alat Penelitian	24
3.3.1.	Bahan Penelitian.....	24
3.3.2.	Alat Penelitian.....	25
5.1.	Skema Penelitian.....	27
5.2.	Variabel Penelitian dan Parameter Uji	30
5.2.1.	Variabel Penelitian	30
5.3.	Prosedur Penelitian.....	32
5.3.1.	Analisis Data	34
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		35
4.1.	Analisis Deskriptif	35
4.1.1.	Waktu Pengerasan (<i>Curing time</i>)	35
4.1.	Nilai Uji Kuat Tekan	39
4.1.1.	Hasil Uji Kuat Tekan.....	39
4.1.2.	Analisis dan Pembahasan.....	40

4.1.3.	Evaluasi Pengujian UTM terhadap Dimensi Spesimen	42
4.2.	Nilai Konduktifitas Termal.....	43
4.2.1.	Hasil Uji Konduktifitas Termal	43
4.2.2.	Perhitungan	44
4.2.3.	Analisis dan Pembahasan.....	47
4.3.	Pembuktian Hipotesis	49
BAB V	PENUTUP.....	61
5.1.	Kesimpulan	61
5.2.	Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA.....		53
LAMPIRAN.....		56

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Syarat Fisis Beton ringan	15
Tabel 2. Nilai Konduktivitas Termal pada bata ringan.....	18
Tabel 3. Penelitian Terdahulu.....	20
Tabel 4. Kegiatan Penelitian	23
Tabel 5. Komposisi Beton Ringan CLC.....	31
Tabel 6. Kuat tekan berdasarkan waktu pengerasan	35
Tabel 7. Nilai uji kuat tekan	39
Tabel 8. Hasil perbandingan uji termal pada variasi 30% dan variasi 20%.....	43
Tabel 9. Perhitungan nilai konduktivitas termal	44
Tabel 10. Analisis perubahan sifat termal	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Diagram Karakteristik Sampah pada TPA Bakung	2
Gambar 2. Serbuk Kaca	8
Gambar 3. Beton Ringan CLC	13
Gambar 4. Aplikasi Beton ringan Jenis CLC	14
Gambar 5. Serbuk kaca	24
Gambar 6. Semen PCC	25
Gambar 7. <i>Foaming agent</i>	25
Gambar 8. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	26
Gambar 9. Cetakan 20 x 10 x 6,5	26
Gambar 10. Diagram Alir.....	27
Gambar 11. Nilai kuat tekan sampel variasi 0% berdasarkan waktu pengerasan .	36
Gambar 12. Nilai kuat tekan sampel variasi 10% berdasarkan waktu pengerasan	36
Gambar 13. Nilai kuat tekan sampel variasi 20% berdasarkan waktu pengerasan	37
Gambar 14. Nilai kuat tekan sampel variasi 30% berdasarkan waktu pengerasan	37
Gambar 15. Perbandingan nilai kuat tekan berdasarkan waktu pengerasan beton	38
Gambar 17. Rata-rata nilai kuat tekan.....	41
Gambar 16. <i>Stress-Strain Curve</i> spesimen beton ringan CLC 20x10x6,5.....	43

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. Proses pembuatan beton ringan CLC.....	57
Lampiran B. Pengujian kuat tekan beton ringan CLC mwnggunakan alat UTM.	58
Lampiran C. Data mentah uji kuat tekan	59
Lampiran D. Data mentah uji konduktivitas termal.....	65

BAB I

PENDAHULUAN

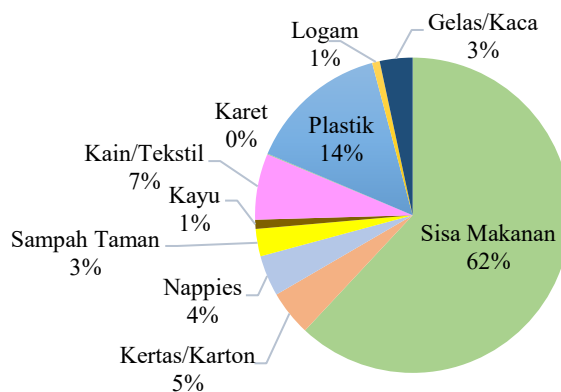
1.1. Latar Belakang

Peningkatan pembangunan infrastruktur di Indonesia setiap tahunnya memberikan dampak terhadap kebutuhan material bangunan yang semakin meningkat. Material konvensional seperti bata merah dan beton padat masih mendominasi konstruksi, namun memiliki beberapa kekurangan, termasuk kebutuhan beban struktur yang tinggi dan kontribusi yang signifikan terhadap emisi karbon. Hal ini menimbulkan masalah dalam upaya mencari material bangunan alternatif yang lebih ramah lingkungan, lebih efisien, dan lebih tahan lama.

Timbulan limbah kaca di Indonesia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Sebagai salah satu jenis material anorganik yang bersifat *non-biodegradable*, limbah kaca cenderung menumpuk di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) karena sulit terurai secara alami. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) dan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), jumlah timbulan limbah nasional pada tahun 2024 mencapai 33,79 juta ton per tahun. Komposisi limbah tersebut secara umum terbagi menjadi dua fraksi besar, yaitu organik dan anorganik. Limbah organik didominasi oleh sisa makanan yang mencapai sekitar 39,65% dari total timbulan, sementara limbah anorganik secara kumulatif menyumbang sekitar 41,18%, dan sisanya sebesar $\pm 7,08\%$ termasuk kategori “lainnya” yang mencakup bahan campuran sulit diklasifikasikan. (SIPSN, 2025).

Pada tingkat lokal, kondisi timbulan sampah nasional ini juga tercermin pada skala daerah, salah satunya di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Bakung, Kota Bandar Lampung, yang memiliki karakteristik komposisi limbah serupa dengan dominasi limbah organik dan proporsi signifikan limbah anorganik

Karakteristik Sampah pada TPA Bakung



Gambar 1. Diagram Karakteristik Sampah pada TPA Bakung

Berdasarkan karakterisasi sampah di TPA Bakung, Kota Bandar Lampung, sampah anorganik (termasuk plastik, logam, dan kaca) menyumbang sekitar 60 % dari total timbulan sampah harian, dengan volume sampah masuk mencapai sekitar 800 ton per hari (Ajrina, dkk., 2021). Jika diasumsikan bahwa limbah kaca menyumbang sekitar 3,36% dari fraksi anorganik tersebut, maka timbulan limbah kaca dapat mencapai sekitar $\pm 26,88$ ton per hari, atau sekitar 806 ton per bulan, dan lebih dari 9.800 ton per tahun (Iryani, 2019). Meskipun angka persentase kaca relatif kecil dibandingkan komponen lainnya, potensi volume absolutnya cukup signifikan untuk dimanfaatkan dalam penelitian beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca, sekaligus membantu mengurangi beban limbah yang sulit terurai di TPA.

Berdasarkan perspektif lingkungan, pemanfaatan limbah kaca mampu menekan emisi CO₂ hingga 60–65% apabila digunakan sebagai pengganti agregat, sekaligus mengurangi eksploitasi sumber daya alam. Menurut SNI 2847-2019, beton terbentuk dari campuran antara agregat kasar, agregat halus, semen portland maupun semen hidrolis dan air, baik itu dengan ataupun tanpa bahan tambah (*admixture*) lainnya. Serbuk kaca tersebut dapat digunakan sebagai substitusi parsial agregat kasar. Serbuk kaca memiliki potensi yang menguntungkan untuk digunakan karena kaca tidak mengandung lumpur seperti agregat dari alam dan

serbuk kaca memiliki sifat pozzolan yang dapat meningkatkan kuat tekan beton (Lopez & El-Fata, 2024).

Potensi aplikasi beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca tidak hanya terbatas pada bangunan-bangunan umum, tetapi juga dapat diarahkan sebagai tujuan khusus, seperti bahan pembuat insinerator. Insinerator sebagai alat pengolah limbah padat bekerja pada suhu tinggi, sehingga membutuhkan material konstruksi yang mampu menahan panas sekaligus memiliki sifat isolasi termal. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *cellular concrete* berbasis limbah kaca dapat bertahan pada suhu hingga 800 °C dengan konduktivitas termal yang rendah, menjadikannya kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi termal ekstrem (Kudyakov dkk., 2024).

Melalui penelitian ini, pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi dalam pembuatan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) diharapkan dapat memberikan alternatif solusi dalam mengurangi permasalahan limbah anorganik yang sulit terurai. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan menghasilkan material bangunan yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki sifat mekanis, dan ketahanan termal yang memadai. Hasil yang diperoleh diharapkan mampu menunjukkan potensi penerapan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca pada insinerator, sehingga penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata baik dalam pengembangan ilmu pengetahuan maupun dalam mendukung upaya pembangunan berkelanjutan dan penerapan *Sustainable Development Goals* (SDGs). Relevansi penelitian ini dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) tercermin pada tujuan 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur) yang menekankan pentingnya inovasi teknologi dalam industri konstruksi, tujuan 11 (Kota dan Permukiman Berkelanjutan) yang berfokus pada pembangunan infrastruktur ramah lingkungan, serta tujuan 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab) melalui optimalisasi pemanfaatan limbah dan pengurangan penggunaan sumber daya alam yang berlebihan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan inovasi material konstruksi berbasis limbah kaca sekaligus

menawarkan solusi aplikatif yang sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan dan pencapaian target *Sustainable Development Goals* (SDGs).

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana potensi pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi pasir terhadap kuat tekan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC)?
2. Bagaimana potensi pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi pasir terhadap konduktivitas termal pada beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC)?
3. Berapa persentase substitusi limbah kaca yang memberikan kinerja paling optimal terhadap sifat mekanis dan termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC)?

1.3. Tujuan

1. Menganalisis potensi pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi pasir terhadap kuat tekan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).
2. Menganalisis potensi substitusi limbah kaca terhadap nilai konduktivitas termal pada beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).
3. Menentukan persentase substitusi limbah kaca yang menghasilkan kinerja paling optimal berdasarkan parameter kuat tekan dan konduktivitas termal pada beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).

1.4. Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada pemanfaatan limbah kaca sebagai substitusi parsial pasir dalam pembuatan beton ringan CLC dengan variasi 0%, 10%, 20%, dan 30%. Parameter yang diuji hanya meliputi kuat tekan dan konduktivitas termal, sehingga karakteristik lain seperti porositas, daya serap air, dan analisis mikrostruktur tidak dibahas. Proses pencampuran, pencetakan, dan curing dilakukan sesuai prosedur laboratorium yang telah ditetapkan.

1.5. Manfaat Penelitian

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material konstruksi ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi pasir pada beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).
2. Menyediakan data empiris mengenai perubahan kuat tekan dan konduktivitas termal *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) akibat variasi persentase substitusi limbah kaca, sehingga dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya dalam bidang teknik lingkungan dan teknologi material bangunan.
3. Memberikan dasar pertimbangan teknis dalam menentukan persentase substitusi limbah kaca yang paling optimal untuk menghasilkan performa mekanis dan termal yang memenuhi kebutuhan aplikasi konstruksi.
4. Mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya tujuan 9 (Industri, Inovasi, dan Infrastruktur), tujuan 11 (Kota dan Permukiman Berkelanjutan), serta tujuan 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab).

1.6. Hipotesis Penelitian

Hipotesis penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Hipotesis 0 (H_0):

Pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kuat tekan dan konduktivitas termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC).

2. Hipotesis 1 (H_1):

Pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai kuat tekan dan konduktivitas termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), serta terdapat persentase tertentu yang menghasilkan kinerja optimal.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Limbah Kaca

Limbah kaca merupakan salah satu jenis limbah anorganik yang jumlahnya terus meningkat seiring dengan pertumbuhan konsumsi produk berbahan kaca, seperti botol minuman, kaca jendela, peralatan laboratorium, hingga limbah konstruksi. Kaca secara ilmiah didefinisikan sebagai material amorf non-kristalin yang terbentuk melalui proses pendinginan cepat dari lelehan campuran silika (SiO_2), natrium karbonat (Na_2CO_3), kalsium karbonat (CaCO_3), serta sejumlah kecil oksida logam seperti Al_2O_3 dan Fe_2O_3 . Struktur amorf ini menyebabkan kaca bersifat keras, rapuh, inert secara kimia, dan memiliki ketahanan tinggi terhadap suhu maupun korosi kimia (Jani & Hogland, 2014).

Namun, di sisi lain, karakteristik tersebut juga membuat kaca tidak dapat terurai secara alami (non-biodegradable), sehingga menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak didaur ulang. Proses daur ulang kaca secara konvensional membutuhkan energi tinggi karena harus melalui tahap penghancuran, peleburan, dan pembentukan ulang pada suhu di atas 1400°C . Menurut Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional, limbah kaca termasuk dalam kategori sampah anorganik dengan proporsi relatif kecil terhadap total sampah nasional, yakni sekitar 2–3% dari total timbulan, namun dalam volume absolut mencapai ribuan ton per tahun, terutama di wilayah perkotaan dengan aktivitas konsumsi tinggi (SIPSN, 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah kaca memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali melalui pendekatan rekayasa material berbasis semen, seperti pada pembuatan beton ringan atau *Cellular Lightweight Concrete (CLC)*.

2.2.1 Karakteristik Fisik dan Kimia Limbah Kaca

Densitas kaca secara fisik cukup tinggi, berkisar antara $2,4\text{--}2,6\text{ g/cm}^3$, dengan permukaan yang halus dan tidak berpori, sehingga efektif sebagai bahan

pengisi saat digunakan sebagai agregat halus dalam campuran beton. Warna kaca seperti bening, hijau, dan coklat tidak secara signifikan memengaruhi performa beton, tetapi ukuran partikel dan proses pengolahan sangat berpengaruh terhadap tingkat reaktivitasnya (Lopez dan El-Fata, 2024).

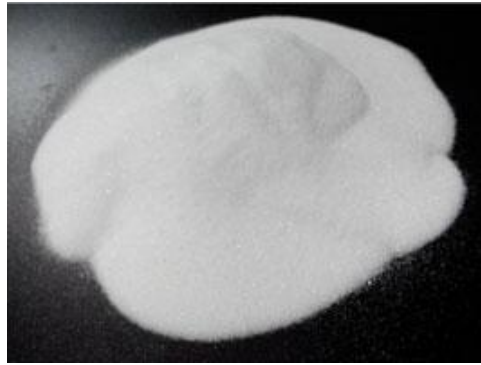
Secara kimia, komposisi kaca didominasi oleh silika (SiO_2) sebesar 70–75%, yang memberikan potensi *pozzolanic activity* apabila diolah menjadi serbuk kaca halus ($<75 \mu\text{m}$). Silika amorf tersebut dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen membentuk senyawa Calcium Silicate Hydrate (C–S–H) yang berperan dalam meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif.

2.2.2 Pemanfaatan Limbah Kaca dalam Beton dan Cellular Lightweight Concrete (CLC)

Secara umum, pemanfaatan limbah kaca dalam beton dapat dilakukan melalui tiga pendekatan utama, yaitu:

A. Sebagai Substitusi Agregat Halus dan Kasar

Pecahan kaca (*glass cullet*) dengan ukuran partikel 0,5–5 mm dapat digunakan sebagai pengganti sebagian agregat halus atau kasar. Substitusi kaca hingga 20% dari total agregat tidak menurunkan kuat tekan beton secara signifikan, bahkan memberikan peningkatan ketahanan terhadap abrasi dan pengurangan berat jenis hingga 10%. Permukaan kaca yang halus dan inert juga membantu menghasilkan *workability* yang baik pada campuran beton ringan (Harrison, dkk., 2020). Namun, efektivitas substitusi agregat kaca sangat bergantung pada ukuran partikel dan derajat kehalusan. Partikel besar ($>2 \text{ mm}$) cenderung bersifat non-reaktif dan berpotensi memicu *Alkali–Silica Reaction (ASR)* apabila kadar alkali pada semen tinggi (Jani & Hogland, 2014). Oleh karena itu, penelitian terkini lebih memfokuskan pada penggunaan partikel kaca halus untuk mengoptimalkan interaksi kimia dengan matriks semen.



Gambar 2. Serbuk Kaca

B. Sebagai Agregat Ringan atau Bahan Isolasi Termal

Penggunaan *foamed glass aggregate* (FGA), yakni kaca daur ulang yang dipanaskan hingga membentuk pori mikro, dapat menghasilkan beton ringan dengan densitas rendah ($400\text{--}800\text{ kg/m}^3$). Substitusi agregat halus dengan FGA hingga 30% pada beton ringan mampu menurunkan berat jenis material dan meningkatkan sifat isolasi panas hingga 40%. Hal ini sangat relevan untuk pengembangan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca yang menekankan efisiensi energi dan ketahanan termal (Lei, 2024).

2.2.3 Kelebihan dan Tantangan Penggunaan Limbah Kaca dalam Beton

Pemanfaatan limbah kaca dalam beton dan CLC memiliki nilai strategis baik dari sisi lingkungan, teknis, maupun ekonomi, meskipun masih terdapat beberapa kendala teknis yang perlu dikendalikan melalui pengaturan parameter campuran.

A. Kelebihan Penggunaan Limbah Kaca

1. Aspek Lingkungan

Pemanfaatan limbah kaca berkontribusi terhadap pengurangan timbulan limbah anorganik di TPA, serta mengurangi eksploitasi sumber daya alam seperti pasir dan batuan alam. Hal ini sejalan dengan konsep *circular economy* dan *low-carbon construction* (Lopez dan El-Fata, 2024).

2. Aspek Teknis

Partikel kaca halus berperan sebagai *micro-filler* dan bahan pozzolan, yang memperbaiki mikrostruktur beton, meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan terhadap suhu tinggi (Khan, dkk., 2023).

3. Aspek Termal dan Ketahanan:

Kandungan silika amorf yang tinggi serta titik lebur kaca ($\pm 1500^{\circ}\text{C}$) memberikan daya tahan termal yang unggul dibanding beton konvensional, menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi pada material insinerator.

4. Aspek Ekonomi

Penggunaan limbah kaca lokal sebagai bahan substitusi menurunkan biaya produksi beton hingga 10–15%, terutama pada skala industri kecil atau pembangunan berwawasan lingkungan (Jani dan Hogland, 2014).

B. Tantangan Penggunaan Limbah Kaca

Meskipun memiliki potensi besar, penggunaan kaca dalam beton juga menghadapi beberapa kendala teknis:

1. Penurunan Kekuatan Awal

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan kaca dapat menurunkan kuat tekan awal beton (umur 7 hari) akibat keterlambatan reaksi hidrasi. Namun pada umur >28 hari, kekuatannya meningkat signifikan akibat reaksi *pozzolan* lanjutan (Khan, dkk., 2023).

2. Distribusi Pori Tidak Merata

Pada aplikasi beton ringan (CLC), ketidakseimbangan distribusi busa dan partikel kaca dapat mempengaruhi homogenitas pori, sehingga diperlukan kontrol pada proses *foaming* dan pencampuran (Lei, 2024).

2.3. Beton ringan Cellular Lightweight Concrete (CLC)

Beton ringan adalah batu bata yang memiliki berat jenis lebih ringan daripada bata pada umumnya. Beton ringan dikenal ada 2 (dua) jenis: *Autoclaved*

Aerated Concrete (AAC) dan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Keduanya didasarkan pada konsep yang serupa, yaitu dengan menambahkan gelembung udara ke dalam campuran, berat beton yang dihasilkan dapat berkurang secara signifikan. *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) merupakan jenis beton seluler yang melalui proses pengeringan alami. Beton ini merupakan variasi dari beton konvensional yang menggantikan agregat kasar (kerikil) dengan adanya gelembung udara, menggunakan busa organik yang stabil tanpa mengalami reaksi kimia saat adonan dicampur; busa ini hanya bertindak sebagai media untuk menyimpan udara. Alat dan teknik yang digunakan dalam pembuatan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) pun standar, sehingga mudah untuk diaplikasikan dalam produksi beton biasa. Prosesnya hanya melibatkan pasir, semen, air, dan busa, sementara kepadatan yang dihasilkan bisa disesuaikan dalam rentang 350 kg/m^3 hingga 1.800 kg/m^3 , dengan kekuatan yang dapat dicapai dari 1,5 hingga lebih dari 30 N/mm^2 .

Cellular Lightweight Concrete (CLC) atau beton ringan berpori adalah jenis beton yang inovatif dan diciptakan untuk memenuhi kebutuhan konstruksi yang efisien, berkelanjutan, dan menawarkan kemampuan isolasi termal yang tinggi. *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) tergolong dalam kategori beton seluler ringan, yang merupakan beton dengan struktur internal berpori, yang terbentuk melalui pencampuran semen, air, dan agregat halus dengan agen pembentuk udara (*foaming agent*). Proses ini menghasilkan gelembung udara yang tersebar merata di dalam matriks beton. Ruang-ruang kosong ini menjadi elemen utama *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), yang secara signifikan mengurangi densitas dan meningkatkan sifat termal tanpa mengorbankan kestabilan struktural beton secara drastis.

Prinsip utama pembuatan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) mencakup dua tahapan penting, yaitu pembentukan busa stabil dan pencampuran busa ke dalam pasta semen. Busa stabil dihasilkan dengan tekanan udara tertentu yang disemprotkan melalui *foaming generator*, menghasilkan gelembung mikro dengan ukuran seragam ($0,1\text{--}1 \text{ mm}$). Kemudian busa tersebut dicampurkan ke dalam campuran semen, air, dan agregat halus untuk menciptakan sistem berpori tertutup

(*closed-cell structure*) (Bejan, 2020). Struktur ini memberikan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) sifat ringan, dengan densitas yang umumnya berkisar antara 400–1800 kg/m³, tergantung pada volume busa dan rasio air-semen yang digunakan. *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) memiliki sejumlah keunggulan dibanding beton konvensional. Dari sisi termal, *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) memiliki konduktivitas panas rendah (0,1–0,4 W/mK) yang menjadikannya isolator termal yang efisien, sesuai untuk aplikasi dinding, panel, dan beton ringan. Secara mekanis, kekuatan tekan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dapat mencapai 2–15 MPa, bergantung pada densitas dan komposisi campuran (Lei, 2024).

Penelitian Junaid (2022) menunjukkan bahwa peningkatan volume pori memang menurunkan kekuatan tekan, tetapi sekaligus meningkatkan efisiensi termal dan daya serap suara. Oleh karena itu, pemilihan rasio busa dan komposisi material harus disesuaikan dengan fungsi penggunaannya, apakah untuk tujuan struktural (kekuatan) atau non-struktural (insulasi). Dari aspek keberlanjutan, *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dipandang sebagai material berbasis rendah karbon (*low-carbon material*). Proses produksinya menggunakan energi lebih sedikit dibanding beton konvensional karena tidak memerlukan agregat kasar dan proses *autoclaving*. Selain itu, *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dapat memanfaatkan limbah industri seperti abu terbang (*fly ash*), silika, atau serbuk kaca sebagai bahan pengganti sebagian semen atau agregat halus, sehingga dapat mengurangi penggunaan sumber daya alam dan emisi CO₂ (Harrison, 2020). Kemampuan material berpori seperti *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dalam menjaga kestabilan termal menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi konstruksi berenergi efisien, termasuk fasilitas pengolahan limbah seperti insinerator. Dalam konteks ini, sifat isolasi panas dan ketahanan terhadap panas menjadi karakteristik utama, terutama jika *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dimodifikasi dengan bahan lain yang tahan suhu tinggi, seperti limbah kaca berisi silika (SiO₂) dalam jumlah besar (Wang, 2020).

2.4. Implikasi terhadap Pengembangan Material Beton ringan Jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) pada Insenerator Ramah Lingkungan

2.4.1. Pengembangan Material Beton ringan

Perkembangan teknologi material konstruksi saat ini difokuskan pada penciptaan bahan bangunan yang ringan, hemat energi, dan ramah lingkungan, dengan tujuan mengurangi penggunaan sumber daya alam serta menekan emisi karbon. Salah satu inovasi yang banyak mendapat perhatian adalah beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), yaitu jenis beton berpori dengan massa jenis rendah namun tetap memiliki kekuatan mekanik yang cukup tinggi.

Beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) memiliki kuat tekan 2–15 MPa, serta nilai konduktivitas termal antara 0,08–0,12 W/m·K. Struktur berpori yang dihasilkan dari penggunaan *foaming agent* menjadikan material ini lebih ringan serta memiliki kemampuan isolasi panas dan suara yang baik. Dalam perkembangannya, inovasi *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) tidak hanya menitikberatkan pada peningkatan kinerja struktural, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan melalui pemanfaatan limbah industri sebagai pengganti agregat atau bahan pengisi. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *green construction*, yang menekankan efisiensi energi serta penerapan konsep sirkularitas dalam penggunaan material bangunan (Zlateva, dkk., 2025).

2.4.2. Sifat Termal dan Mekanis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) Berbasis Limbah Kaca

Secara umum, beton mengalami degradasi termal ketika terpapar pada suhu tinggi akibat proses dehidrasi fase kalsium silikat hidrat (C–S–H) dan dekomposisi kalsium hidroksida [Ca(OH)₂] (Mehta dan Monteiro, 2014). Namun, penambahan serbuk kaca mampu memperlambat proses degradasi tersebut karena kandungan silika amorf dalam kaca bereaksi membentuk fase kalsium silikat baru yang lebih stabil terhadap suhu tinggi. Beton ringan dengan substitusi limbah kaca sebesar 10–20% hanya mengalami penurunan kuat tekan sekitar 12,6% pada suhu 600°C, sedangkan beton tanpa kandungan kaca mengalami penurunan hingga 25%. Selain itu, partikel kaca juga berperan dalam meningkatkan reflektivitas termal serta

mengurangi laju perpindahan panas (*thermal conductivity*), sehingga menjadikan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca berpotensi tinggi sebagai material konstruksi tahan panas.

Struktur berpori yang menjadi ciri khas *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) turut memperkuat kemampuan isolasi termalnya. Udara yang terperangkap di dalam pori-pori berfungsi sebagai penghambat konduksi panas dan dapat menciptakan efek ganda isolasi (*double insulation effect*), yaitu kombinasi antara porositas *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dan keberadaan silika kaca (Semmana, dkk., 2025).

2.4.3. Aplikasi pada Insinerator Ramah Lingkungan

Insinerator merupakan teknologi pengolahan limbah padat yang bekerja melalui proses pembakaran termal terkontrol untuk mengoksidasi senyawa organik serta mengurangi volume limbah hingga 70–90%. Suhu operasi insinerator umumnya berada pada kisaran 800–1200°C, tergantung pada karakteristik limbah dan desain sistem reactor. Pada umumnya, material refraktori berbasis aluminosilikat atau magnesia digunakan sebagai pelapis ruang bakar utama. Namun, material tersebut memiliki keterbatasan dari segi keberlanjutan karena proses produksinya membutuhkan suhu sintering tinggi ($\geq 1300^\circ\text{C}$) dan energi yang besar, sehingga meningkatkan emisi karbon serta biaya produksi. Kondisi ini mendorong pengembangan alternatif material pelapis atau komponen struktural insinerator yang lebih efisien dan ramah lingkungan, salah satunya melalui inovasi *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca (Kristyawan, 2021).



Gambar 3. Beton Ringan CLC



Gambar 4. Aplikasi Beton ringan Jenis CLC

Beton ringan CLC memiliki massa jenis rendah ($400\text{--}1200\text{ kg/m}^3$), konduktivitas termal rendah ($0,08\text{--}0,12\text{ W/m}\cdot\text{K}$), serta struktur berpori homogen yang menjadikannya tahan terhadap suhu tinggi tanpa kehilangan kekuatan mekanik secara signifikan. Kombinasi sifat tersebut membuat CLC potensial digunakan sebagai material isolasi termal sekunder maupun elemen struktural ringan pada sistem insinerator (Zlateva, dkk., 2025).

Keunggulan utama CLC berbasis limbah kaca terletak pada komposisi kimia kaca yang mengandung silika (SiO_2) sebesar $70\text{--}75\%$. Kandungan silika amorf tersebut bersifat pozzolanik dan mampu bereaksi dengan Ca(OH)_2 hasil hidrasi semen untuk membentuk *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H) sekunder yang stabil terhadap suhu tinggi. Reaksi ini tidak hanya memperkuat ketahanan termal dan menjaga integritas mikrostruktur, tetapi juga mengurangi porositas efektif, sehingga memperlambat perpindahan panas melalui mekanisme konduksi khususnya pada tingkat substitusi optimal $10\%\text{--}20\%$. Beton ringan dengan substitusi limbah kaca sebesar $15\text{--}20\%$ mampu mempertahankan $85\text{--}90\%$ kuat tekan awal setelah terpapar suhu 600°C selama dua jam, dengan kehilangan massa kurang dari 10% . Peningkatan kadar limbah kaca dalam campuran dapat mengurangi retak termal (*spalling*) dan meningkatkan reflektivitas panas karena permukaan kaca yang lebih halus dan padat. (Semmana, dkk., 2025). CLC berbasis

limbah kaca tersebut berpotensi sebagai material konstruksi berkelanjutan untuk aplikasi suhu tinggi seperti insinerator.

2.5. Pengujian Beton ringan Jenis *Cellular Lightweight Concrete (CLC)*

2.5.1. Persyaratan Fisis Bata Beton

Berdasarkan fungsi dan kondisi beton ringan maka beton ringan harus memenuhi syarat syarat fisis sesuai dengan Tabel 1.

Tabel 1. Syarat Fisis Beton ringan

Syarat Fisis	Satuan	Bata Struktural		Bata Nonstruktural	
		Terekspos lingkungan (outdoor)	Tidak terekspos lingkungan (indoor)	Terekspos lingkungan (outdoor)	Tidak terekspos lingkungan (indoor)
Kelas	-	IA	IB	IIA	IIB
Kuat tekan rata-rata, min. ¹	MPa	6	4	2	
Kuat tekan individu, min.	MPa	5,4	3,6	1,8	
Penyerapan air, maks. ²	%vol	25	-	25	-
Tebal, min.	mm	98		98	73
Susut pengeringan, maks. ³	%	0,2			

Sumber: SNI 8640:2018

Kuat tekan rata-rata diukur sesuai dengan cara yang dijelaskan pada Pasal 7.2. SNI 8640:2018. Terdapat hubungan antara bobot isi dan kuat tekan sesuai dengan metode pembuatan beton ringan yang digunakan.

2.5.2. Bahan Pembentuk Beton ringan

a. Semen

Semen merupakan bahan yang memiliki sifat adhesif dan kohesif sehingga berfungsi sebagai material pengikat. Secara kimiawi, semen bersifat aktif setelah

bereaksi dengan air. Berdasarkan kemampuannya dalam proses pengerasan, semen dibedakan menjadi dua jenis, yaitu semen non-hidrolis dan semen hidrolis. Semen non-hidrolis hanya dapat mengeras di udara dan tidak dapat mengeras di dalam air, sedangkan semen hidrolis mampu mengikat serta mengeras baik di udara maupun di dalam air (Mulyono, 2004).

b. Pasir

Pasir berperan sebagai agregat halus yang penting dalam pembuatan beton ringan. Material ini terbentuk melalui proses geologi.

c. Air

Air merupakan komponen esensial dalam campuran beton ringan karena berperan dalam memicu reaksi kimia antara semen, pasir, dan bahan tambahan lainnya. Tanpa keberadaan air, proses pengikatan dan pengerasan tidak akan terjadi. Oleh karena itu, air yang digunakan sebagai bahan bangunan harus memenuhi persyaratan kualitas tertentu agar tidak memengaruhi hasil akhir material.

d. *Foaming agent*

Ciri khas yang membedakan beton ringan dengan bata konvensional adalah penggunaan *foaming agent*. Bahan ini berfungsi menghasilkan gelembung udara dalam campuran, sehingga meningkatkan volume tanpa menambah berat total bata. Dengan demikian, *foaming agent* membantu menciptakan struktur berpori yang menjadikan beton ringan lebih ringan namun tetap memiliki kekuatan yang memadai (Eban, dkk., 2018)

2.5.3. Karakteristik Beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC)

Dalam konteks penelitian ini, karakteristik utama yang menjadi fokus kajian adalah sifat mekanis melalui uji kuat tekan, serta sifat termal melalui uji konduktivitas panas. Kedua karakteristik ini merupakan parameter penting untuk menilai kelayakan beton *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) apabila digunakan sebagai material konstruksi pada komponen insinerator, yang memerlukan kombinasi kekuatan struktural dan ketahanan terhadap perpindahan panas.

A. Sifat Mekanik

1. Kuat tekan adalah kemampuan suatu material dalam menahan beban atau gaya mekanis hingga material tersebut mengalami keruntuhan. Untuk menentukan kekuatan beton ringan, dilakukan pengujian kuat tekan menggunakan mesin uji tekan. Pada proses ini, benda uji diletakkan di mesin kemudian diberi beban secara bertahap hingga mencapai titik runtuh, yaitu saat beban maksimum bekerja (Mulyono, 2004). Uji kuat tekan dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan memberikan beban tekan secara bertahap hingga sampel mengalami kerusakan. Prosedurnya merujuk pada standar SNI 8640:2018, Nilai kuat tekan dapat dihitung menggunakan persamaan matematis berikut:

$$f_c = \frac{P}{A}$$

... (1)

Dimana:

f_c = kuat tekan (MPa)

m = beban maksimum (N)

v = luas penampang benda uji (mm^2)

2.5.4. Konduktifitas Termal Beton ringan

Konduktivitas termal (*thermal conductivity*) merupakan kemampuan suatu bahan padat untuk menghantarkan panas. Proses ini terjadi ketika energi panas berpindah dari partikel yang memiliki suhu lebih tinggi menuju partikel dengan suhu lebih rendah, tanpa disertai perpindahan partikel atau molekul bahan itu sendiri. Laju perpindahan panas pada suatu material padat ditentukan oleh besarnya nilai konduktivitas termalnya. Semakin tinggi nilai konduktivitas termal suatu bahan, semakin efisien bahan tersebut dalam menghantarkan panas, begitu pula sebaliknya. Pengujian konduktivitas termal dapat dilakukan menggunakan perangkat seperti *Thermal Conductivity Meter*, *hot plate apparatus*, atau metode *guarded hot plate* berdasarkan ASTM C177. Beton ringan dikenal memiliki kinerja

unggul dalam hal isolasi termal dan peredaman suara, yang disebabkan oleh struktur mikro selulernya. Nilai konduktivitas termal beton ringan umumnya hanya sekitar 5–30% dari beton normal, dengan kisaran antara 0,1 W/m⁰K hingga 0,7 W/m⁰K. Tabel 2. memperlihatkan nilai konduktivitas termal dari berbagai jenis beton ringan tersebut (Pratama, dkk., 2019).

Tabel 2. Nilai Konduktivitas Termal pada bata ringan

Density (Kg/m ³)	Thermal Conductivity (W/m ⁰ K)
600	0,19
1000	0,43
1400	0,59
Mortar	0,96

Sumber : Mydin, 2012

Pengujian dilakukan menggunakan alat uji konduktivitas termal berbasis metode *steady-state* untuk memastikan hasil yang akurat dan konsisten. Nilai konduktivitas termal (k) dihitung berdasarkan data suhu dan fluks panas yang diperoleh. Rumus yang digunakan adalah:

Konduktivitas termal:

$$k = \frac{(Q \times L)}{(A \times \Delta T)}$$

... (2)

Dimana:

k = konduktivitas termal (W/m·K)

Q = laju aliran panas/ *heat flow rate* (W)

L = panjang (m)

A = luas penampang (m²)

ΔT = perbedaan temperature (°C)

Proses pengukuran dilakukan selama kondisi *steady-state* tercapai, yaitu ketika fluks panas dan suhu pada setiap sisi spesimen tidak lagi berubah secara signifikan (chetan, dkk., 2024).

Dalam mengevaluasi kinerja termal beton ringan, nilai densitas perlu diketahui terlebih dahulu karena memiliki hubungan yang erat dengan konduktivitas termal material. Densitas menunjukkan massa material per satuan volume dan digunakan sebagai dasar untuk mengklasifikasikan jenis beton ringan serta menentukan nilai konduktivitas termal. Nilai densitas beton dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots(3)$$

Dimana:

ρ = densitas beton (kg/m^3)

m = massa beton (kg)

V = volume beton (m^3)

Nilai densitas yang diperoleh kemudian dapat digunakan untuk membandingkan hasil pengujian konduktivitas termal dengan nilai acuan pada berbagai jenis beton ringan. Berdasarkan tabel tersebut, dapat diketahui bahwa peningkatan densitas umumnya diikuti oleh peningkatan nilai konduktivitas termal karena berkurangnya jumlah rongga udara di dalam material.

2.6. Penelitian Terdahulu

Kajian terhadap penelitian terdahulu dilakukan untuk memperkuat landasan teoritis serta memetakan perkembangan keilmuan terkait pemanfaatan limbah kaca dan penerapannya dalam material beton ringan, khususnya *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Telaah ini bertujuan mengidentifikasi temuan-temuan penting, metode yang digunakan, serta performa material yang telah dilaporkan pada studi sebelumnya, sehingga mampu menunjukkan kesenjangan penelitian yang mendasari urgensi dan relevansi penelitian ini.

Tabel 3. Penelitian Terdahulu

No.	Judul, Peneliti, Tahun Terbit	Variabel	Metode Penelitian	Hasil
1.	“Tata Cara Rancangan Campur untuk Membuat Bata Ringan <i>Cellular Lightweight Concrete (CLC)</i> ”, Pah, J. J. S., Ratrigis, C. I., & Sina, D. A. T., (2023)	Faktor air–semen, air–foam, komposisi bahan, densitas, kuat tekan	Kuantitatif	Modul rancangan campur mampu menentukan komposisi material sesuai target densitas dan kuat tekan
2.	“Pengaruh Variasi Ukuran Butiran Agregat terhadap Kuat Tekan Bata Ringan Jenis CLC”, Pah, J. J. S., Sehundi, K., & Bella, R. A., (2019)	Variasi ukuran agregat, kuat tekan, densitas	Kuantitatif	Variasi D menghasilkan kuat tekan tertinggi, variasi B memiliki mutu terbaik berdasarkan rasio kuat tekan–densitas
3.	“Perbandingan Kuat Tekan Bata Ringan CLC Menggunakan Pasir Gunung Boleng dan Pasir Takari”, Eban, K. K., Utomo, S., & Simatupang, P. H., (2018)	Jenis pasir (Gunung Boleng vs Takari), kuat tekan, densitas, serapan air	Kuantitatif	Pasir Takari menghasilkan kuat tekan & densitas lebih tinggi, serta serapan air lebih rendah dibanding pasir Gunung Boleng

4.	“Simulasi Sifat Termal Bata Ringan CLC Menggunakan LUSAS V17”, Pratama, A.,R., dkk., (2019)	<i>Density</i> (600–1000 kg/m ³), temperatur, tahanan panas	Kuantitatif	Semakin rendah <i>density</i> , semakin tinggi tahanan panas. Tahanan panas CLC berada pada rentang 26,39%–45,59%, lebih baik dibanding bata merah 25,92%.
5.	“Perbandingan Persentase Penambahan <i>Fly Ash</i> terhadap Kuat Tekan Bata Ringan Jenis <i>CLC</i> ”, Bella, R. A., Pah, J. J. S., & Ratu, A. G., (2017)	Variasi <i>fly ash</i> 10–90% sebagai substitusi semen; kuat tekan; densitas; serapan air; umur perawatan 7, 21, 28 hari.	Kuantitatif	Kuat tekan maksimum pada 10% <i>fly ash</i> (0,819 MPa); densitas menurun seiring peningkatan <i>fly ash</i> ; serapan air meningkat; <i>fly ash</i> ≥50% menyebabkan benda uji gagal/pecah.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium. Pendekatan ini dipilih karena bertujuan untuk memperoleh data empiris dan terukur mengenai pengaruh variasi kadar limbah kaca terhadap sifat mekanis dan ketahanan termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Metode eksperimen dilakukan dengan membuat sampel beton *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca dalam beberapa variasi komposisi, kemudian dilakukan serangkaian pengujian meliputi kuat tekan dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara kuantitatif untuk menilai hubungan antara variasi persentase limbah kaca dengan performa material. Analisis ini bertujuan mengidentifikasi persentase substitusi yang paling optimum serta menilai kelayakan penggunaan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca sebagai material komponen pada insinerator ramah lingkungan.

3.2. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Tempat Pengolahan Sampah Terpadu (TPST) Universitas Lampung, yang berlokasi di Jl. Prof. Dr. Ir. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Kecamatan Rajabasa, Kota Bandar Lampung. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada fasilitas pendukung yang memungkinkan pelaksanaan dengan pengujian sifat mekanik dilakukan di TPST Universitas Lampung dan pengujian konduktivitas termal dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Lampung. Proses penelitian ini berlangsung selama kurang lebih tujuh bulan, mencakup tahap persiapan bahan hingga analisis data hasil pengujian laboratorium.

Tabel 4. menggambarkan tahapan kegiatan penelitian yang dilakukan selama tujuh bulan, dimulai dari November 2025 hingga April 2026. Tahapan penelitian mencakup seluruh proses mulai dari pengumpulan dan persiapan bahan, pengolahan limbah kaca, pembuatan sampel beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), pengujian karakteristik material, hingga analisis data dan penyusunan laporan hasil penelitian. Jadwal penelitian ini disusun secara sistematis dan efisien untuk memastikan seluruh tahapan berjalan sesuai dengan target waktu penyelesaian tugas akhir serta menghasilkan data empiris yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

3.3. Bahan dan Alat Penelitian

3.3.1. Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan sejumlah bahan utama yang berfungsi sebagai komponen penyusun beton ringan CLC serta bahan tambahan yang mendukung proses pembentukan dan karakteristik material. Adapun bahan yang digunakan meliputi:

1. Pasir halus
2. Air bersih
3. Serbuk kaca (*glass powder waste*) mesh 200



Gambar 5. Serbuk kaca

4. Semen (PCC)



Gambar 6. Semen PCC

5. *Foaming agent*



Gambar 7. *Foaming agent*

3.3.2. Alat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini memerlukan berbagai peralatan untuk proses persiapan bahan, pembuatan sampel, dan pengujian laboratorium. Peralatan yang digunakan terdiri dari:

1. Timbangan digital
2. Alat uji konduktivitas termal (*Thermal Conductivity Meter*)

4. *Universal Testing Machine (UTM)*



Gambar 8. *Universal Testing Machine (UTM)*

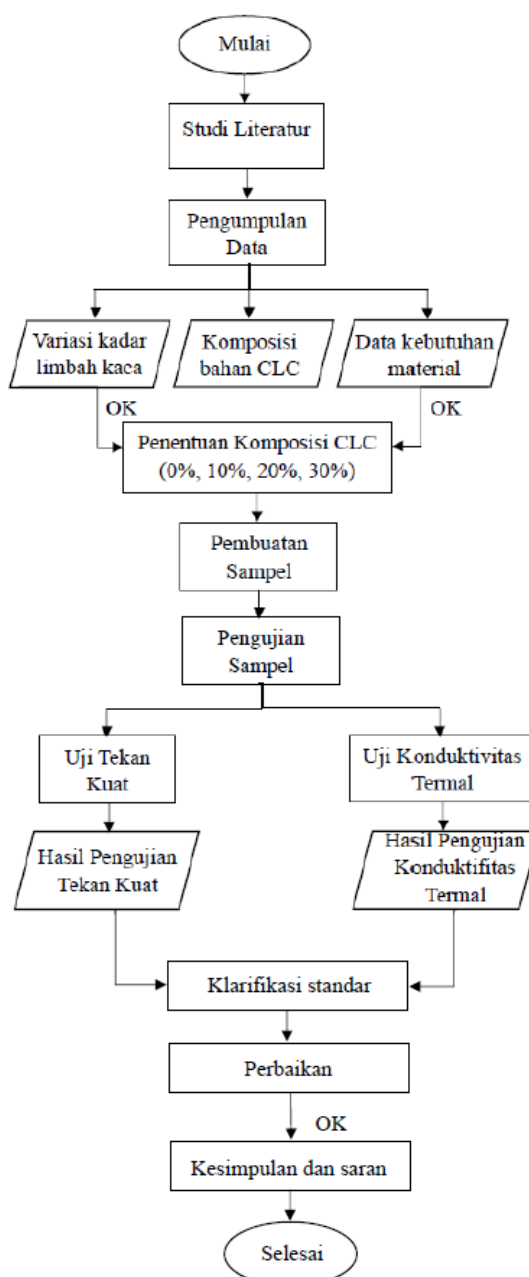
5. Cetakan sampel berukuran $20 \times 10 \times 6,5$ cm



Gambar 9. Cetakan $20 \times 10 \times 6,5$

5.1. Skema Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif laboratorium dengan model *one-factor experiment*, yaitu satu variabel bebas yang divariasikan, yaitu persentase substitusi limbah kaca terhadap agregat halus (pasir) dalam pembuatan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete (CLC)*. Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang dirangkum dalam diagram alur berikut:



Gambar 10. Diagram Alir

1. Studi Literatur

Tahapan awal penelitian ini berupa pengumpulan dan telaah literatur yang berkaitan dengan beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC), karakteristik material berbahan dasar kaca, serta studi mengenai substitusi agregat halus menggunakan serbuk kaca. Literatur yang dikaji mencakup jurnal ilmiah, standar teknis dan material konstruksi, hingga pedoman pengujian sifat mekanis sesuai SNI dan ASTM. Studi awal ini menjadi landasan dalam penyusunan rumusan masalah, penentuan variabel penelitian, dan penetapan metode eksperimen yang digunakan.

2. Perancangan Metodologi

Berdasarkan temuan teoritis, peneliti menyusun metodologi eksperimen laboratorium dengan fokus pada analisis perubahan sifat mekanik dan termal beton ringan CLC akibat variasi kadar limbah kaca. Rancangan campuran disusun menggunakan perbandingan semen–pasir 1:2, dengan substitusi pasir menggunakan serbuk kaca sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30%. Komponen bahan lain seperti air, dan foam agent ditetapkan tetap agar menjaga konsistensi antar perlakuan. Tahap ini mencakup perancangan komposisi, volume sampel yang dibutuhkan, serta urutan proses pencampuran hingga curing selama 28 hari

3. Pengumpulan dan Persiapan Bahan

Pada tahap ini dilakukan persiapan seluruh material sesuai kebutuhan penelitian. Perbandingan dasar campuran ditetapkan dengan rasio semen : pasir = 1 : 2, mengacu pada referensi desain beton ringan. Foam agent ditambahkan sebesar 2,5 mL per 50 mL air, sesuai dengan rekomendasi industri untuk menghasilkan densitas target beton ringan 600–800 kg/m³. Seluruh bahan ditimbang menggunakan timbangan digital untuk memperoleh komposisi campuran yang tepat

4. Pencampuran dan Proses Pencetakan

Tahap pencampuran dimulai dengan menggabungkan bahan kering berupa semen dan pasir/serbuk kaca hingga homogen. Foam kemudian dicampurkan pada kecepatan rendah untuk mempertahankan struktur seluler pada material.

Setelah adukan siap, campuran dituangkan ke dalam cetakan berukuran $20 \times 10 \times 6,5$ cm, kemudian diratakan. Sampel dibiarkan selama 24 jam untuk proses setting awal, lalu dilepas dari cetakan dan menjalani curing pada suhu ruang selama 28 hari agar mencapai kekuatan optimal.

5. Pembuatan Sampel Uji

Setelah curing selesai, sampel beton *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) siap digunakan untuk serangkaian pengujian meliputi uji kuat tekan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dan uji konduktivitas termal dengan perataan permukaan agar sensor termal dapat bekerja secara optimal. Setiap variasi kadar limbah kaca diproduksi dalam jumlah pengulangan tertentu untuk memastikan validitas statistik. Sampel dibersihkan dan ditandai untuk menjaga keteraturan data selama pengujian.

6. Pengujian Sifat Mekanik

Uji kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Sampel diletakkan pada pelat tekan kemudian diberi beban secara bertahap hingga mencapai titik keruntuhan. Nilai beban maksimum yang ditunjukkan mesin dicatat dan dihitung untuk memperoleh kuat tekan (MPa) sesuai standar SNI 8640:2018. Sampel ditempatkan pada plat tekan, kemudian diberi beban secara bertahap hingga terjadi keruntuhan. Gaya maksimum dicatat oleh perangkat digital dan digunakan untuk menghitung kuat tekan sesuai standar pengujian.pengujian.

7. Pengujian Ketahanan Termal

Kemampuan material dalam menghantarkan panas diuji menggunakan *thermal conductivity meter*. Sampel diletakkan pada pelat pengukur, kemudian alat memberikan panas dengan intensitas tertentu. Perubahan aliran panas dicatat untuk memperoleh nilai konduktivitas termal ($W/m \cdot K$). Selain itu, perubahan massa sebelum dan sesudah pengujian dianalisis untuk melihat stabilitas struktural material terhadap paparan panas.

8. Analisis Data

Data yang diperoleh dari seluruh pengujian diolah secara statistik dan dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif-komparatif. Setiap parameter mekanis dan termal dibandingkan antar variasi kadar limbah kaca untuk mengidentifikasi pengaruh substitusi terhadap performa material. Hasil analisis ditampilkan dalam bentuk grafik, tabel, dan interpretasi numerik untuk mendukung pembahasan.

9. Interpretasi dan Penarikan Kesimpulan

Tahap terakhir penelitian berupa interpretasi menyeluruh terhadap hasil pengujian. Peneliti membandingkan nilai eksperimen antar variasi limbah kaca dan menilai kecenderungan hubungan antara komposisi bahan dengan karakteristik material. Temuan penelitian digunakan untuk menjawab rumusan masalah dan memberikan rekomendasi terkait kelayakan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) berbasis limbah kaca untuk aplikasi material konstruksi dan komponen insinerator ramah lingkungan.

5.2. Variabel Penelitian dan Parameter Uji

Penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium yang menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif, dengan tujuan untuk memperoleh data empiris mengenai pengaruh variasi kadar limbah kaca terhadap sifat mekanik dan ketahanan termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Variabel penelitian disusun agar setiap parameter uji dapat menggambarkan hubungan sebab-akibat antara komposisi bahan dan karakteristik material yang dihasilkan.

5.2.1. Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat dua jenis variabel, yaitu variabel bebas (independen) dan variabel terikat (dependen).

1. Variabel Bebas (Independen)

Variabel bebas adalah persentase substitusi limbah kaca terhadap agregat halus (pasir) dalam campuran CLC. Variasi kadar limbah kaca yang digunakan yaitu

0%, 10%, 20%, dan 30% dari total berat pasir. Variasi ini dipilih untuk menganalisis sejauh mana penggantian sebagian agregat halus dengan limbah kaca berpengaruh terhadap mekanik dan ketahanan termal beton ringan.

Tabel 5. Komposisi Beton Ringan CLC

Variansi Kadar Limbah Kaca	Semen (gr)	Pasir (gr)	Limbah Kaca (gr)	Air (ml)	Larutan <i>Foam Agent</i> (ml)	
					Foam A.	Air
0%	750	1500	0	150	2,5	100
10%	750	1350	150	150	2,5	100
20%	750	1200	300	150	2,5	100
30%	750	1050	450	150	2,5	100

2. Variabel Terikat (Dependen)

Variabel terikat merupakan sifat-sifat hasil uji yang dipengaruhi oleh variasi kadar limbah kaca. Dalam penelitian ini, sifat-sifat yang diamati meliputi:

A. Sifat Mekanik

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dalam menahan gaya tekan sebelum mengalami kerusakan. Pengujian ini mengacu pada SNI 8640:2018 yang mengatur metode uji kuat tekan untuk beton bata ringan. Pengujian dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) yang telah terkalibrasi dan beban diberikan secara terus-menerus tanpa kejutan (*shock-free loading*) dengan laju pembebanan 0,9 – 1,8 kN/detik. Dalam pengujian ini, benda uji berbentuk balok *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dengan ukuran 20 cm × 10 cm × 6,5 cm ditempatkan pada pelat penekan UTM secara simetris untuk menghindari eksentrisitas gaya. Beban diberikan secara perlahan dengan laju pembebanan konstan hingga benda uji mengalami keruntuhan. Sensor beban (*load cell*) pada UTM secara otomatis

merekam nilai beban maksimum (P) yang terjadi sesaat sebelum kerusakan material.

B. Sifat Termal

Pengujian konduktivitas termal bertujuan untuk menentukan kemampuan beton ringan *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dalam menghantarkan panas. Pengujian ini penting untuk menilai kelayakan material sebagai komponen konstruksi pada insinerator yang membutuhkan ketahanan terhadap paparan suhu tinggi. metode yang digunakan yaitu *guarded hot plate* berdasarkan ASTM. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan *Thermal Conductivity Meter*, di mana sensor termal ditempatkan pada permukaan benda uji. Alat memberikan impuls panas kecil dan terkontrol, kemudian sensor mengukur perubahan suhu terhadap waktu. Laju perubahan suhu tersebut digunakan untuk menghitung konduktivitas termal (k). Nilai konduktivitas termal yang rendah menunjukkan bahwa material memiliki kemampuan isolasi yang baik, sehingga lebih aman digunakan pada struktur insinerator.

3. Variabel Kontrol

Jenis semen, rasio campuran, volume *foaming agent*, waktu curing (28 hari), serta suhu dan lama pembakaran pada uji ketahanan termal.

5.3. Prosedur Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu persiapan bahan, pembuatan material, pengujian sifat mekanis dan pengujian ketahanan termal.

A. Tahap Persiapan Bahan

- 1) Mempersiapkan pasir halus sebanyak 36 kg sebagai agregat dasar.
- 2) Mempersiapkan serbuk kaca sebanyak 6 kg sebagai bahan substitusi agregat halus sesuai variasi komposisi.
- 3) Membuat *foam* menggunakan *foam generator* dengan mencampurkan 2,5 ml *Foam Agent* yang dilarutkan dengan 50 ml air

- 4) Menyiapkan semen Portland PCC sebanyak 24 kg sebagai bahan pengikat utama.
- 5) Menyiapkan air sebanyak 4 liter untuk pencampuran adukan (tidak termasuk air untuk foam).
- 6) Seluruh bahan ditimbang menggunakan timbangan digital sesuai proporsi campuran pada keempat variasi.

B. Tahap Pembuatan Material CLC

- 1) Pencampuran bahan kering
 - a. Semen PPC dan pasir/serbuk kaca sesuai variasi 0%, 10%, 20%, dan 30% dimasukkan ke dalam mixer.
 - b. Bahan kering diaduk selama 2–3 menit hingga homogen.
- 2) Penambahan air
 - a. Air sebanyak 150 ml ditambahkan secara bertahap.
 - b. Adukan dihomogenkan selama ± 3 menit.
- 3) Penambahan foam
 - a. Foam yang telah dihasilkan dari foam generator (2,5 ml foam agent + 100 ml air) dicampurkan ke dalam adukan.
 - b. Pencampuran dilakukan dengan kecepatan rendah untuk mempertahankan struktur pori busa.
- 4) Pencetakan sampel
 - a. Adukan dituangkan ke dalam cetakan $20 \times 10 \times 6,5$ cm.
 - b. Permukaan sampel diratakan menggunakan spatula.
 - c. Cetakan dibiarkan selama 24 jam untuk proses setting awal.
- 5) Curing

Setelah dilepas dari cetakan, sampel dikeringkan pada suhu ruang selama 28 hari untuk proses curing optimal.

C. Tahap Pengujian Mekanis

Setelah proses curing selesai, dilakukan Kuat Tekan yang dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dimana sampel ditempatkan pada plat uji dan diberikan beban tekan secara bertahap, lalu mesin memberikan gaya tekan hingga sampel mengalami keruntuhan. Setiap pengujian dilakukan triplo (tiga ulangan) untuk setiap variasi kadar limbah kaca, kemudian hasilnya diambil nilai rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (*standard deviation*) untuk analisis statistik deskriptif.

D. Tahap Pengujian Ketahanan Termal

- 1) Pengujian dilakukan menggunakan *Thermal Conductivity Meter*
- 2) Sampel Beton *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dengan permukaan rata ditempatkan pada alat.
- 3) Alat memberikan aliran panas konstan dan mengukur kecepatan rambat panas melalui sampel.
- 4) Konduktivitas termal (k) dicatat langsung oleh alat dalam satuan $W/m \cdot K$.

5.3.1. Analisis Data

Analisis data dilakukan secara kuantitatif deskriptif dengan membandingkan hasil pengujian tiap variasi kadar limbah kaca terhadap parameter standar beton ringan. Langkah-langkah analisis meliputi:

1. Perhitungan nilai rata-rata (*mean*) dan simpangan baku (SD) dari tiap parameter uji.
2. Penentuan komposisi optimum dilakukan dengan mempertimbangkan kombinasi terbaik antara kuat tekan dan ketahanan suhu tinggi sesuai kebutuhan beton ringan untuk aplikasi insinerator ramah lingkungan.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Adapun Kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan terhadap beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) dengan pemanfaatan limbah kaca sebagai bahan substitusi pasir adalah sebagai berikut.

1. Limbah kaca memiliki potensi yang signifikan sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus pada beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai kuat tekan dari 3,24 MPa pada variasi 0% menjadi 5,66 MPa pada variasi 10%, dan mencapai nilai optimum sebesar 5,82 MPa pada variasi 20%. Namun, pada variasi 30% nilai kuat tekan mengalami penurunan menjadi 3,35 MPa. Peningkatan kuat tekan hingga 20% dipengaruhi oleh efek pengisian (*filler effect*) dan reaksi pozzolanik yang meningkatkan kerapatan struktur mikro beton. Sebaliknya, penurunan pada variasi 30% disebabkan oleh meningkatnya porositas dan ketidakseimbangan komposisi material.
2. Substitusi limbah kaca memiliki potensi terhadap nilai konduktivitas termal beton ringan jenis *Cellular Lightweight Concrete* (CLC). Peningkatan kadar limbah kaca dapat memperbaiki sifat isolasi termal melalui pembentukan struktur pori yang lebih stabil, namun pada kadar yang terlalu tinggi, kinerja termal cenderung menurun akibat meningkatnya porositas dan ketidakstabilan struktur internal material, sehingga mempercepat rambatan panas. Pada variasi 30% dengan nilai resistansi termal sebesar 0,1951 m²K/W dengan porositas tinggi dimana struktur pori menjadi tidak stabil dan terbentuk jalur konduksi panas yang lebih mudah. Kondisi ini berbeda dengan variasi 20% yang memiliki resistansi termal lebih tinggi yaitu 0,2501 m²K/W, dimana struktur pori lebih stabil dan mampu menghambat perpindahan panas secara lebih efektif.

3. Persentase substitusi limbah kaca yang paling optimal dalam penelitian ini adalah sebesar 20%, dengan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 5,82 MPa serta kinerja termal yang relatif lebih baik yaitu 0,2501 m²K/W dibandingkan variasi lainnya. Pada komposisi ini, terjadi keseimbangan antara pembentukan gel C-S-H dan struktur pori yang masih stabil. Sementara itu, pada variasi 30%, terjadi penurunan kinerja baik secara mekanis maupun termal akibat kelebihan silika yang tidak bereaksi optimal serta meningkatnya porositas akibat ketidakstabilan foam.

5.2. Saran

Berikut saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

1. Dilakukan penelitian lanjutan terkait penentuan komposisi dan rasio *foaming agent* yang optimal, baik dari segi jumlah maupun metode pencampurannya, sehingga diperoleh struktur pori yang lebih stabil dan seragam tanpa menurunkan kekuatan mekanik dan termal.
2. Disarankan untuk mengkaji penambahan material seperti aluminium dalam campuran beton ringan guna meningkatkan atau mengontrol kinerja konduktivitas termal sesuai kebutuhan aplikasi, serta mengevaluasi pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan stabilitas material.
3. Pada pengujian kuat tekan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM), disarankan menggunakan spesimen beton yang sesuai dengan bentuk dan luas penampang bidang tekan alat uji, seperti spesimen silinder standar. Hal ini bertujuan agar distribusi beban lebih merata, pola keruntuhan beton lebih stabil, serta menghasilkan kurva *stress-strain* yang lebih representatif dan tidak mengalami fluktuasi grafik akibat ketidaksesuaian bentuk spesimen dengan bidang tekan UTM.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajrina, F. I., Putri, H. T., & Maryati, S. (2020). Kinerja pengelolaan sampah kota Bandar Lampung berdasarkan sudut pandang pemerintah. *Journal of Planning and Policy Development*. https://repo.itera.ac.id/assets/file_upload/SB2009100065/22116092_20_163632.pdf.
- ASTM International. 2017. ASTM C177-13: *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- B. N., S. K., Chetan, S., Abhishek, K., URS S., Y., & V B., M. (2024). Methods to Measure the Thermal Conductivity. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2383–2392. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24aug705>
- Bejan, G. (2020). *Lightweight concrete with waste materials: A review. Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.021>
- Eban, K. K., Utomo, S., & Simatupang, P. H. (2018). Perbandingan Kuat Tekan Beton ringan CLC Menggunakan Pasir Gunung Boleng dan Pasir Takari. In *Jurnal Teknik Sipil: Vol. VII*. https://www.academia.edu/100175314/Perbandingan_Kuat_Tekan_Bata_Ringan_CLC_Menggunakan_Pasir_Gunung_Boleng_Dan_Pasir_Takari
- Harrison, E., et al. (2020). *Recycling of waste glass as aggregate in cement-based materials. Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100064>
- Iryani, D. A. (2019). Karakterisasi Dan Estimasi Emisi Gas Rumah Kaca Dari Sampah Padat Kota Di Tpa Bakung Kota Bandar Lampung. *Jurnal*

Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management), 9(2), 218–228.
[10.29244/jpsl.9.2.218-228](https://doi.org/10.29244/jpsl.9.2.218-228)

Jafar, J., & Jamaaludin, K. H. (2022). Pengaruh Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus dan Silica Fume Sebagai Substitusi Parsial Semen terhadap Nilai Properti Mekanik Beton. *Jurnal Potensi*, Politeknik Negeri Bandung. <https://doi.org/10.35313/potensi.v25i2.4718>

Jani, Y., & Hogland, W. (2014). *Waste glass in the production of cement and concrete: A review. Construction and Building Materials*, 41, 107–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.03.016>

Junaid, M. F., Rehman, Z.U., Kuruc, M., dkk. (2022). *Lightweight concrete from a perspective of sustainable reuse of waste byproduct. Construction and Building Materials*. Vol 319.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126061>

Khan, K., et al. (2023). *Evaluating the effectiveness of waste glass powder for compressive strength enhancement. Materials*, 16(4), 1345.
[10.1016/j.heliyon.2023.e16288](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16288)

Kristyawan, I. P. A., Wiharja, Shoiful, A., Hendrayanto, P. A., & Santoso, A. D. (2021). *Update on Waste Reduction Performance by Waste-to-energy Incineration Pilot Plant PLTSa Bantargebang Operations*.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/922/1/012059>

Kudyakov, A., dkk. (2024). *Formation of Cellular Concrete Structures Based on Waste Glass and Liquid Glass. Buildings*, 14(1), 17. MDPI.
<https://doi.org/10.3390/buildings14010017>

Lei, M. (2024). *Review of lightweight cellular concrete: Towards low-carbon, thermally efficient LCC. Journal of Cleaner Production*. Vol. 429.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136324>

- Lopez, J., & El-Fata, A. (2024). *Environmental Implications of Using Waste Glass as Aggregate in Concrete*. *Journal of Composites Science*, 8(12), 507. MDPI. <https://doi.org/10.3390/jcs8120507>
- Muhedin, D. A., et al. (2023). *Effect of waste glass powder as partial replacement of cement in concrete*. *Materials Science Forum*, 1120, 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512>
- Rifqi Pratama, A., Suryanita, R., & Ismediyanto, I. (2019). Simulasi Sifat Termal Bata Ringan Celular Lightweight Concrete Menggunakan LUSAS V.17. *SAINSTEK*, 7(2), 55–61. Retrieved from <https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/article/view/57>
- SIPSN. (2025). Capaian Kinerja Pengelolaan Sampah. Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional. <https://sipsn.menlhk.go.id>
- Semmana, O., Rihan, M. A. M., Barrie, Z. M., Daniel, C., & Abdalla, T. A. (2025). A Systematic Review of the Strength, Durability, and Microstructure Properties of Concrete Incorporating Glass Powder. *Engineering Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1002/eng2.70002>
- SNI 03-1974-1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*.
- SNI 03-2847-2019. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*.
- Wang, J. (2020). *Green and durable lightweight aggregate concrete: A review*. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma13133041>
- Zlateva, P., Petkova-Slipets, R., Mileva, N., & Yanazov, K. (2025). *Foam Concrete as a Thermal Insulation Building Material*. 1–6. <https://doi.org/10.1109/eeae65901.2025.11273569>