

**PENGARUH SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN DENGAN
ABU SEKAM PADI DAN AGREGAT HALUS DENGAN SERBUK KACA
TERHADAP KARAKTERISTIK BETON NORMAL**

(Skripsi)

Oleh

**ADITYA RIDHO PRATAMA
NPM 2255011014**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

ABSTRACT

THE EFFECT OF PARTIAL SUBSTITUTION OF CEMENT WITH RICE HUSK ASH AND FINE AGGREGATE WITH GLASS POWDER ON THE CHARACTERISTICS OF NORMAL CONCRETE

By

ADITYA RIDHO PRATAMA

Concrete is the most widely used construction material in the world; however, cement production contributes approximately 7% of global CO₂ emissions, driving the search for more environmentally friendly substitutes. Rice husk ash (RHA) and glass powder are agricultural and industrial waste materials with high silica content and pozzolanic properties, making them potential substitutes for partial replacement of cement and fine aggregate in concrete mixtures. This study aims to determine the effect of such substitution on the setting time, slump value, and compressive strength of normal concrete with a target strength of K-300 (f'c 25 MPa). The research employed a laboratory experimental method with RHA variations of 8%, 10%, and 12% by cement weight, and glass powder at 2.5% by fine aggregate weight, with mix design calculations referring to SNI 7656:2012. A total of 30 cube specimens measuring 15 × 15 × 15 cm were tested at 28 and 56 days using a Compression Testing Machine (CTM). Results showed that 8% RHA substitution extended the initial setting time to 105 minutes and the final setting time to 165 minutes, while higher proportions of 10% and 12% accelerated setting due to reduced active cement compounds and increased water absorption by RHA particles. The highest slump value was recorded at the GP2.5RH8 variation of 100 mm, while increasing RHA content reduced workability due to its high water absorption characteristics. At 28 days, all variations produced lower compressive strength than normal concrete due to the not yet optimal pozzolanic reaction. At 56 days, the GP2.5RH0 variation achieved an optimum compressive strength of 28.56 MPa, exceeding the normal concrete value of 27.64 MPa, indicating a positive long-term contribution of glass powder.

Keywords: compressive strength, glass powder, normal concrete, rice husk ash, workability.

ABSTRAK

PENGARUH SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN DENGAN ABU SEKAM PADI DAN AGREGAT HALUS DENGAN SERBUK KACA TERHADAP KARAKTERISTIK BETON NORMAL

Oleh

ADITYA RIDHO PRATAMA

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia, namun produksi semen sebagai bahan utamanya menyumbang sekitar 7% emisi CO₂ global sehingga mendorong pencarian bahan substitusi yang lebih ramah lingkungan. Abu sekam padi (ASP) dan serbuk kaca merupakan limbah pertanian dan industri yang memiliki kandungan silika tinggi dan bersifat pozzolanik, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen dan agregat halus dalam campuran beton. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh substitusi tersebut terhadap waktu pengikatan semen, nilai *slump*, dan kuat tekan beton normal mutu K-300 (*f*'c 25 MPa). Penelitian menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan variasi ASP sebesar 8%, 10%, dan 12% dari berat semen, serta serbuk kaca sebesar 2,5% dari berat agregat halus, dengan perhitungan campuran mengacu pada SNI 7656:2012. Benda uji berupa kubus berukuran 15 × 15 × 15 cm sebanyak 30 sampel, diuji pada umur 28 dan 56 hari menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Hasil menunjukkan substitusi ASP 8% memperpanjang waktu pengikatan awal menjadi 105 menit dan waktu pengikatan akhir menjadi 165 menit, sedangkan kadar 10% dan 12% mempercepat pengikatan akibat berkurangnya senyawa aktif semen dan meningkatnya penyerapan air oleh partikel ASP. Nilai *slump* tertinggi diperoleh pada variasi GP2,5RH8 sebesar 100 mm, sementara peningkatan kadar ASP menurunkan *workability* akibat sifat penyerapan air yang tinggi. Pada umur 28 hari, seluruh variasi menghasilkan kuat tekan lebih rendah dari beton normal akibat belum optimalnya reaksi pozzolanik. Pada umur 56 hari, variasi GP2,5RH0 mencapai kuat tekan optimum 28,56 MPa, melampaui beton normal 27,64 MPa, menunjukkan kontribusi positif serbuk kaca dalam jangka panjang.

Kata kunci: abu sekam padi, beton normal, kuat tekan, serbuk kaca, *workability*.

**PENGARUH SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN DENGAN
ABU SEKAM PADI DAN AGREGAT HALUS DENGAN SERBUK KACA
TERHADAP KARAKTERISTIK BETON NORMAL**

Oleh

ADITYA RIDHO PRATAMA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

**: PENGARUH SUBSTITUSI SEBAGIAN
SEMEN DENGAN ABU SEKAM PADI
DAN AGREGAT HALUS DENGAN
SERBUK KACA TERHADAP
KARAKTERISTIK BETON NORMAL**

Nama Mahasiswa

: Aditya Ridho Pratama

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2255011014

Program Studi

: S-1 Teknik Sipil

Fakultas

: Teknik



Ir. Laksmi Irianti, M.T.

NIP 19620408 198903 2 001

Ketua Jurusan Teknik Sipil

Hasti Rikara Husni, S.T., M.T.

NIP 19740530 200012 2 001

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Sasana Putra, S.T., M.T.

NIP 19691111 200003 1 002

Dr. Suyadi, S.T., M.T.

NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

: Ir. Laksmi Irianti, M.T.

Ketua

Sekretaris

: Hasti Riakara Husni, S.T., M.T.

Penguji

Bukan Pembimbing : Ir. Fikri Alami, S.T., M.Sc., M.Phil.

2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 19691030 200005 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 5 Juni 2026

SURAT PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : ADITYA RIDHO PRATAMA
Nomor Pokok Mahasiswa : 2255011014
Judul Skripsi : PENGARUH SUBSTITUSI SEBAGIAN SEMEN
DENGAN ABU SEKAM PADI DAN AGREGAT
HALUS DENGAN SERBUK KACA TERHADAP
KARAKTERISTIK BETON NORMAL
Jurusan : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti Kaidah Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 5 Juni 2026

Penulis



Aditya Ridho Pratama
NPM 2255011014

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung pada tanggal 13 Juni 2004, sebagai anak pertama dari dua bersaudara. Penulis merupakan putri dari pasangan Bapak Hendra dan Ibu Retno. Penulis memulai pendidikan di TK Bunga Bangsa dan melanjutkan pendidikan sekolah dasar di SD Al-Azhar yang diselesaikan pada tahun 2016. Pada tahun 2019, penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Bandar Lampung dan melanjutkan Sekolah Menengah Atas di SMA YP UNILA yang diselesaikan pada tahun 2022.

Pada tahun 2022, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Mandiri Masuk Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat (SMM PTN-Barat). Selama menjadi mahasiswa Program Studi Teknik Sipil penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil sebagai anggota Departemen Media dan Informasi HIMATEKS Tahun 2024 Periode 1 dan 2. Penulis juga tercatat sebagai Pembimbing Mahasiswa Baru pada pengkaderan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung periode 2024/2025, serta menjadi panitia inti pada acara Civil Brings Revolution (CBR) kesembilan.

Pada Januari 2025, penulis mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) di desa Bina Karya Buana, Lampung Tengah. Selanjutnya, pada Agustus 2025, penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) pada Proyek Rekonstruksi Jalan Ruas Kalirejo – Padang Ratu, Lampung Tengah. Selain itu, penulis juga pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Mekanika Teknik I. Penulis memiliki ketertarikan pada bidang ilmu struktur, sehingga pada tahun 2025, penulis memutuskan untuk

mengambil tugas akhir skripsi dengan judul skripsi Pengaruh Substitusi Sebagian Semen Dengan Abu Sekam Padi dan Agregat Halus Dengan Serbuk Kaca Terhadap Karakteristik Beton Normal.

Persembahan

Bismillāhirrahmānirrahīm

Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan karunia-Nya yang memungkinkan penulis menyelesaikan skripsi ini. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wasallam.

Kupersembahkan karyaku ini kepada:

Orang Tuaku

Yang tiada henti berusaha memberikan yang terbaik, memanjatkan doa, serta mencurahkan restu yang selalu mengiringi setiap langkahku. Terima kasih atas didikan, kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan yang begitu besar dan belum mampu dibalas.

Dosen Pembimbing dan Penguji

Yang jasanya begitu besar, selalu dengan sabar memberikan ilmu, memberi semangat, serta membimbing untuk lebih memahami ilmu pengetahuan hingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Teman, Sahabat, dan Keluarga Teknik Sipil Angkatan 2022

Yang senantiasa memberikan semangat, bantuan, serta dukungan tanpa henti.

Almamater Tercinta, Universitas Lampung dan Civitas Akademik Jurusan Teknik Sipil

Tempat penulis bertumbuh dan mengemban ilmu yang kelak menjadi bekal berharga dalam kehidupan.

Motto

“Jika kamu berbuat baik berarti kamu berbuat baik untuk dirimu sendiri. Dan jika kamu berbuat jahat, maka kerugian kejahatan itu untuk dirimu sendiri.”

(QS. Al-Isra : 7)

“And the worldly life is not but amusement the home of the here after is best for those who fear God.”

(QS. Al-An’am : 32)

“Just Keep Swimming.”

(Dory, *Finding Nemo*)

“Perhaps you hate a thing and it's good for you, And perhaps you love a thing and it's bad for you.”

(QS. Al-Baqarah : 216)

“Kita buat menyenangkan di sisa waktu yang ada.”

(Kita Buat Menyenangkan – Bernadya)

“I've failed over and over again in my life. And that is why I succeed.”

(Michael Jordan)

"Be the help someone else needs."

(Aditya Ridho)

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah senantiasa memberikan rahmat dan hidayah-nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Substitusi Sebagian Semen Dengan Abu Sekam Padi Dan Agregat Halus Dengan Serbuk Kaca Terhadap Karakteristik Beton Normal”** dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Pada kesempatan ini penulis meyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada berbagai pihak yang telah berkontribusi dalam penulisan skripsi ini, yaitu:

1. Allah SWT yang selalu memberikan petunjuk, kekuatan, kesabaran, dan pertolongan, serta senantiasa memberikan berkah ilmu kepada setiap hamba-Nya.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Lampung.
5. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediannya dalam meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, serta saran dalam proses perkuliahan terutama selama penelitian dan penyusunan skripsi ini.
6. Ibu Hasti Riakara Husni, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Kedua atas kesediannya dalam meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta kritik dan saran dalam proses penyusunan skripsi ini.

7. Bapak Ir. Fikri Alami, S.T. M.Sc. M.Phil., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis guna penyempurnaan skripsi ini.
8. Bapak Ir. Nur Arifaini, M.S., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan.
9. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Sipil yang telah memberikan bekal ilmu kepada penulis, serta seluruh karyawan jurusan atas bantuannya kepada penulis selama menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
10. Kedua orang tua, Bapak Hendra dan Ibu Retno, serta Adek yang telah memberikan dorongan, dukungan, dan doa yang tidak pernah putus sehingga penulis dapat menyelesaikan segala proses perkuliahan.
11. Diri sendiri yang sudah kuat, pantang menyerah, dan berusaha keras untuk bertahan sejauh ini.
12. Rekan skripsi, Aldi Rafsanjani Mudia atas kerjasama dan bantuan selama proses penyusunan skripsi ini.
13. Rekan-rekan lab, Monik, Tarisa, Alip, Dapa, Pakih, Acay, dan Arik yang telah memberikan bantuan dan semangat dalam melaksanakan kegiatan di lab.
14. Seluruh keluarga besar Laboratorium Bahan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membantu dan mendukung kelancaran pelaksanaan penelitian ini.
15. Tour Lambar (Kobul, Falih, Aldi, Akhdan, Yanyil, Bapet, Irsyat, Ikker, Zikri, Zaki, Abay, Noy, Wais, Cool, Vetto) yang selalu menghibur, menemani, membantu untuk penulis.
16. Kawan-Kawan SMA MIPA 6 (Goji, Rehan, Aldo, dan Mugi) yang selalu setia menemani sampai tirik ini.
17. Real Madrid yang selalu memberikan semangat kepada penulis untuk memenangkan segalanya
18. Sahabat dan teman teman terdekat yang selalu memberikan kebersamaan, bantuan, dukungan, serta semangat kepada penulis sampai terselesaikannya skripsi ini.

19. Rekan-rekan Teknik Sipil Universitas Lampung Angkatan 2022, yang tidak dapat disebutkan satu persatu, yang telah banyak membantu penulis secara langsung ataupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan baik dari segi isi maupun sistematika. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan pengetahuan dan kemampuan penulis. Oleh karena itu, kritik dan saran diperlukan untuk kesempurnaan skripsi ini dikemudian hari. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan.

Bandar Lampung, 5 Juni 2026

Penulis,

ADITYA RIDHO PRATAMA

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
1.6. Hipotesis Sementara	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Beton Normal	7
2.2. Material Penyusun Beton	8
2.2.1. Semen Portland Komposit (PCC).....	8
2.2.2. Agregat Halus	9
2.2.3. Agregat Kasar	11
2.2.4. Air	13
2.3. Abu Sekam Padi	13
2.4. Serbuk Kaca.....	14
2.5. Waktu Pengikatan Semen	15
2.6. Perawatan Beton (<i>Curing</i>).....	16
2.7. Pengujian Kuat Tekan.....	16
2.8. Penelitian Sebelumnya	18
2.8.1. Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton.....	18

2.8.2. Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Tambah Terhadap Kuat Tekan Beton	18
2.8.3. <i>Effectiveness of Rice Husk Ash and Glass Powder Waste as Partial Replacements of Cement in Concrete Construction</i>	19

III. METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan	21
3.2. Peralatan dan Bahan	24
3.2.1. Alat	24
3.2.2. Bahan	26
3.3. Pengujian material	28
3.3.1. Agregat halus	28
3.3.2. Agregat Kasar	29
3.3.3. Semen	30
3.3.4. Serbuk Kaca	30
3.4. Pembuatan Benda Uji	30
3.5. Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar	33
3.6. Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>)	34
3.7. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM	35
3.8. Perhitungan dan Analisis Data	35

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Material	37
4.1.1. Pengujian Material Agregat Halus	37
4.1.2. Pengujian Material Agregat Kasar	41
4.1.3. Pengujian Material Semen	46
4.1.4. Pengujian Material Serbuk Kaca	47
4.2. Perhitungan <i>Mix Design</i>	48
4.3. Kebutuhan Material Pengganti	53
4.4. Komposisi Material Untuk Pengujian Waktu Pengikatan Semen	53
4.5. Hasil pengujian waktu pengikatan semen	54
4.6. <i>Workability</i> beton	57
4.7. Uji Kuat Beton	60

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan	66
5.2. Saran	68

DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN A (DATA HASIL PENELITIAN)****LAMPIRAN B (FOTO PENELITIAN)****LAMPIRAN C (LEMBAR ASISTENSI)**

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram Alir Penelitian.....	23
2. Pengujian Kadar Air Agregat Halus	38
3. Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus	38
4. Pengujian Berat Volume Agregat Halus	39
5. Pengujian Berat Jenis Agregat Halus	40
6. Pengujian Gradasi Agregat Halus.....	41
7. Pengujian Kadar Air Agregat Kasar	42
8. Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar	42
9. Pengujian Berat Volume Agregat Kasar	43
10. Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar	44
11. Pengujian Gradasi Agregat Kasar.....	46
12. Pengujian Berat Jenis Semen	46
13. Pengujian Gradasi Serbuk Kaca	48
14. Perkiraan Air Campuran Dan Persyaratan Kandungan Udara Untuk Berbagai <i>Slump</i> Dan Ukuran Agregat Maksimum	49
15. Nilai Faktor Semen.....	49
16. Volume Agregat Kasar Per Satuan Volume Beton.....	50
17. Pengujian <i>mix design</i> dan <i>curing</i>	52
18. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen serta Campurannya.....	56
19. Hubungan Kadar Substitusi Abu Sekam Padi dan Serbuk Kaca terhadap Nilai <i>Slump</i> Beton	58
20. Hubungan Kadar Substitusi Abu Sekam Padi dan Serbuk Kaca terhadap Nilai Kuat Tekan Beton	61
21. Peningkatan Kuat Tekan Beton 28 Hari Ke 56 Hari	64

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Susunan Oksida Semen Portland.....	9
2. Komposisi Kimia Semen PCC	9
3. Gradasi Agregat Halus.....	11
4. Gradasi Agregat Kasar.....	12
5. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia dalam Air	13
6. Kandungan Senyawa Abu Sekam Padi	14
7. Kandungan Senyawa Kimia Serbuk Kaca.....	15
8. Perbandingan Kuat Tekan antara Silinder dan Kubus	17
9. Komposisi dan Kode Benda Uji Waktu Pengikatan Semen	30
10. Komposisi dan Kode Benda Uji Beton Kubus	31
11. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Halus	41
12. Hasil Perhitungan Gradasi Agregat Halus.....	41
13. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Kasar	46
14. Hasil Perhitungan Gradasi Agregat Kasar.....	46
15. Hasil Pengujian Gradasi Serbuk Kaca.....	48
16. Hasil Perhitungan Gradasi Serbuk Kaca	48
17. Kesimpulan Hasil Pengujian Material.....	49
18. Komposisi Kebutuhan Material Beton Kubus Mutu Normal.....	54
19. Komposisi Material Benda Uji Pasta Untuk Pengujian Waktu Pengikatan Semen	55
20. Hasil Pengujian Konsistensi Normal.....	56
21. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen serta Campurannya.....	57
22. Nilai Slump Adukan Beton Umur 28 Dan 56 Hari	59
23. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari dan 56 Hari	62
24. Peningkatan Kuat Tekan Beton 28 Hari Ke 56 Hari	64

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton adalah material konstruksi yang sangat penting dan paling banyak digunakan di Indonesia maupun dunia. Menurut SNI 2847:2013, beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa admixture. Seiring pertambahan umur, beton mengeras dan mencapai kekuatan rencana pada usia 28 hari. Keunggulan beton mencakup biaya yang relatif terjangkau dan bahan penyusunnya mudah diperoleh (Ode dkk., 2024). Di sektor infrastruktur sumber daya air, penggunaan beton dapat mencapai 80 persen, sedangkan di jalan, jembatan, dan bangunan gedung juga sangat signifikan.

Kekuatan beton terutama ditentukan oleh semen sebagai bahan pengikat utama. Namun, produksi semen memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon dioksida global. Industri semen menyumbang sekitar 7% dari total emisi CO₂ tahunan dunia, menjadikannya salah satu kontributor utama gas rumah kaca (Pranadiarso dkk., 2024). Emisi ini memicu pemanasan global dan perubahan iklim yang semakin mengkhawatirkan. Kondisi tersebut mendorong penelitian untuk mencari bahan substitusi yang lebih ramah lingkungan. Akibatnya, sektor konstruksi mulai mencari alternatif yang lebih bersih untuk mengurangi jejak karbon.

Bahan pengganti adalah material yang disubstitusikan saat atau selama proses pencampuran beton dengan tujuan mengubah sifat beton sesuai kebutuhan tertentu atau mengefisienkan biaya produksi (Ode dkk., 2024). Dalam teknologi beton modern, inovasi terus dikembangkan dengan memasukkan

sebagian bahan substitusi ke dalam campuran beton (Erfanda, 2019). Tren masa depan mengarah pada material beton yang terjangkau, berkualitas tinggi, dan ramah lingkungan. Substitusi ini juga memanfaatkan limbah industri dan pertanian. Pendekatan ini selaras dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.

Salah satu alternatif menjanjikan adalah abu sekam padi (ASP), limbah pertanian kaya silika amorf dengan sifat pozzolanik. Indonesia menghasilkan sekam padi dalam jumlah besar; pada tahun 2024 produksi gabah kering giling mencapai 53,14 juta ton, menghasilkan sekam sekitar 20% dari berat gabah (Badan Pusat Statistik). Abu sekam padi mengandung silika (SiO_2) tinggi yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen. Reaksi ini membentuk senyawa silikat kalsium hidrat (C–S–H), yang meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton (Farhan dkk., 2023). Potensi ASP mendorong pengurangan limbah pertanian sekaligus mengurangi ketergantungan pada semen murni. Potensi ASP ini mulai diterapkan pada skala laboratorium dan pilot plant.

Selain ASP, limbah industri berupa serbuk kaca juga memiliki potensi besar sebagai substitusi agregat halus dalam beton. Serbuk kaca mengandung silika tinggi yang berperan sebagai filler untuk memperbaiki kepadatan campuran dan bersifat pozzolanik dalam pembentukan C–S–H (Amiwarti & Mahipal, 2019). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan serbuk kaca memberikan hasil paling optimal pada kadar sekitar 2,5%, di mana partikel kaca mampu mengisi rongga mikro secara efektif sehingga meningkatkan homogenitas dan kuat tekan beton (Ode dkk., 2024). Namun, penambahan di atas nilai optimum tersebut justru dapat memicu risiko reaksi alkali–silika (ASR) serta mengganggu gradasi agregat, yang berdampak pada penurunan sifat mekanik beton (Pranadiarso dkk., 2024). Dengan demikian, pengaturan komposisi serbuk kaca sangat penting untuk memperoleh manfaat maksimal tanpa menurunkan durabilitas struktur.

Beberapa penelitian melaporkan efek sinergis dari kombinasi bahan tambahan untuk meningkatkan kualitas beton. Kombinasi abu sekam padi dan serbuk kaca dalam proporsi tertentu dapat meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan beton normal (Amiwarti dan Mahipal, 2019). Selain itu, penggantian sebagian semen dengan *glass powder waste* (GPW) dan *rice husk ash* (RHA) terbukti meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan (Pranadiarso dkk., 2024). Partikel silika halus dari material ini mampu mengisi rongga beton, menjadikannya lebih padat dan struktur mikronya lebih rapat (Farhan dkk., 2023). Pendekatan kombinasi ini membuka peluang untuk aplikasi beton berperforma tinggi pada berbagai kondisi beban.

Meskipun banyak penelitian dilakukan, studi yang mengevaluasi kombinasi optimum ASP dan serbuk kaca untuk mencapai kuat tekan maksimal masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya fokus pada penggunaan masing-masing bahan secara terpisah atau kombinasi dengan abu sekam padi. Keterbatasan ini penting, karena kedua material memiliki karakteristik silika tinggi tetapi sifat pozzolaniknya berbeda. Sinergi keduanya berpotensi menghasilkan beton berkinerja lebih baik dibandingkan penggunaan tunggal. Studi ini akan menilai efisiensi reaksi pozzolanik dalam berbagai komposisi.

Mengingat urgensi pengurangan emisi CO₂ di sektor konstruksi dan meningkatnya permintaan material ramah lingkungan, penelitian mengenai substitusi ASP dan serbuk kaca pada beton sangat penting. Penelitian ini akan mencakup analisis komprehensif sifat fisik dan mekanik beton dengan kombinasi kedua material. Tujuannya untuk memastikan substitusi tidak mengurangi ketahanan struktur beton serta mengevaluasi aspek ekonomis dan durabilitas jangka panjang di berbagai kondisi lingkungan. Penelitian ini mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan melalui pengoptimalan sumber daya lokal.

Berdasarkan uraian di atas, pemanfaatan ASP dan serbuk kaca sebagai substitusi sebagian semen dan agregat halus dalam campuran beton harus

diteliti lebih lanjut. Kombinasi kedua bahan ini dapat mengurangi ketergantungan pada semen konvensional dan menekan akumulasi limbah pertanian serta industri. Dengan kandungan silika tinggi dan sifat pozzolanik, penggunaannya diharapkan meningkatkan struktur mikro beton menjadi lebih rapat, menurunkan permeabilitas, dan meningkatkan kekuatan mekanik tanpa menambah biaya produksi secara signifikan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh substitusi sebagian semen dengan abu sekam padi dan agregat halus dengan serbuk kaca terhadap karakteristik beton berdasarkan parameter waktu pengikatan, nilai *slump*, dan kuat tekan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan abu sekam padi dan agregat halus dengan serbuk kaca terhadap karakteristik beton berdasarkan parameter waktu pengikatan, nilai *slump*, dan kuat tekan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Mutu beton yang direncanakan memiliki K-300 ($f'c$ 25 MPa) pada benda uji kubus dengan umur beton 28 & 56 hari.
2. Perhitungan campuran beton normal (*mix design*) menggunakan metode (SNI 7656, 2012).
3. Abu sekam padi digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan variasi tertentu berdasarkan ukuran berat.
4. Serbuk kaca digunakan sebagai bahan pengganti sebagian agregat halus sebesar 2,5% dari ukuran berat.

5. Penelitian ini menguji waktu pengikatan semen dengan menggunakan alat vicat guna memperoleh data waktu pengikatan semen akibat variasi penggantian sebagian semen dengan abu sekam padi.
6. Penelitian ini melakukan uji waktu pengikatan semen menggunakan alat vicat pada 12 sampel. yang terbagi ke dalam empat variasi. Setiap variasi terdiri dari 3 sampel.
7. Penelitian ini menguji nilai *slump* dengan menggunakan kerucut Abrams guna memperoleh ketinggian *slump* akibat variasi penggantian sebagian agregat halus dengan serbuk kaca.
8. Penelitian ini melakukan uji *slump* menggunakan kerucut Abrams pada 30 sampel, yang terbagi ke dalam lima variasi. Setiap variasi terdiri dari 6 sampel.
9. Penelitian ini membandingkan kuat tekan beton mutu normal tanpa abu sekam padi dan serbuk kaca terhadap kuat tekan beton mutu normal yang menggunakan bahan abu sekam padi sebagai pengganti sebagian semen dan serbuk kaca sebagai pengganti sebagian agregat halus.
10. Penelitian menggunakan benda uji yang berupa kubus dengan ukuran panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm, dengan sampel 30 beton kubus dengan variasi yang masing-masing variasi 6 sampel.
11. Bahan pembuat beton berupa semen PCC dengan merek Semen Batu Raja, agregat halus dari Gunung Sugih, agregat kasar berasal dari Tanjungan dan air yang digunakan dari Laboratorium Bahan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah memberikan informasi tentang pengaruh substitusi sebagian semen dengan abu sekam padi dan agregat halus dengan serbuk kaca terhadap karakteristik beton berdasarkan parameter kuat tekan, waktu pengikatan, dan nilai *slump*.

1.6. Hipotesis Sementara

Penggunaan abu sekam padi sebagai bahan pengganti sebagian semen dan serbuk kaca sebagai bahan pengganti sebagian agregat halus dalam campuran beton mutu normal dapat mengurangi konsumsi semen dan agregat halus, sementara tetap mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan dengan campuran beton mutu normal yang tidak menggunakan abu sekam padi dan serbuk kaca.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Normal

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena sifatnya yang kuat, mudah dibentuk, tahan lama, dan ekonomis. Beton adalah material komposit yang terbentuk dari campuran bahan pengikat (semen), agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan (*admixture*) apabila diperlukan. Semua bahan tersebut setelah dicampur dan mengalami proses hidrasi akan membentuk massa padat yang menyerupai batu (Sumajouw dkk., 2014). Beton digunakan hampir pada setiap jenis pekerjaan struktur, mulai dari pondasi, kolom, balok, pelat, hingga jembatan dan bangunan bertingkat.

Menurut Prasetya (2007), beton normal adalah jenis beton yang memiliki berat isi antara 2200–2500 kg/m³ dan menggunakan agregat alam seperti pasir dan batu pecah. Beton normal biasanya memiliki kuat tekan antara 17 MPa hingga 41 MPa, tergantung pada mutu bahan penyusun dan proporsi campuran. Beton jenis ini paling banyak digunakan karena proses pembuatannya sederhana, bahan penyusunnya mudah didapatkan, serta memiliki sifat mekanis yang memadai untuk kebutuhan struktural umum.

Kuat tekan beton merupakan indikator utama dalam menentukan mutu beton. Kuat tekan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti rasio air terhadap semen (faktor air semen), kualitas bahan penyusun, gradasi agregat, serta metode pencampuran dan perawatan (*curing*). Rasio air-semen (FAS) yang kecil akan menghasilkan beton dengan porositas rendah dan kekuatan tinggi, namun jika terlalu kecil beton sulit dikerjakan (*workability* rendah). Sebaliknya, rasio air-

semen yang besar akan meningkatkan kelecakan beton, tetapi menyebabkan kekuatan beton menurun karena terbentuk lebih banyak rongga udara.

Faktor lain yang turut mempengaruhi kekuatan beton adalah mutu semen yang digunakan, kebersihan agregat, serta homogenitas campuran. Semakin baik mutu bahan dan semakin cermat proses pencampuran serta perawatannya, maka semakin besar kemungkinan beton mencapai kekuatan rencana ($f'c$). Oleh karena itu, dalam proses pembuatan beton normal, diperlukan kontrol mutu yang ketat mulai dari pemilihan bahan hingga tahap pengujian agar beton yang dihasilkan memiliki karakteristik yang sesuai dengan spesifikasi teknis (Panennungi & Pertiwi, 2018).

2.2. Material Penyusun Beton

Dalam pembuatan beton normal, terdapat bahan penyusun seperti semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Penelitian ini akan menjelaskan bahan pembentuk beton dan bahan tambahan, yakni abu sekam padi dan serbuk kaca, yang akan diteliti. Bahan-bahan yang membentuk beton terdiri dari:

2.2.1. Semen Portland Komposit (PCC)

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis yang paling penting dalam campuran beton. Ketika bereaksi dengan air, semen membentuk senyawa hidrat yang mengikat butir-butir agregat menjadi massa yang padat dan keras. Jenis semen yang paling banyak digunakan di Indonesia adalah semen Portland Komposit (PCC), sebagaimana diatur dalam SNI 15-7064-2004.

Komposisi semen Portland terdiri dari oksida utama seperti CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , disertai oksida lain dalam jumlah kecil. Persentase masing-masing oksida ditunjukkan pada Tabel 1, sedangkan Tabel 2 menyajikan senyawa utama beserta rumus kimia dan kadar rata-ratanya.

Tabel 1. Susunan Oksida Semen Portland

Oksida	Persentase (%)
Kapur (CaO)	60-65
Silika (SiO ₂)	7-25
Alumina (Al ₂ O ₃)	3-8
Besi (Fe ₂ O ₃)	0,5-6
Magnesia (MgO)	0,5-4
Sulfur (SO ₃)	1-2
Potash (Na ₂ O + K ₂ O)	0,5-1

(Sumber: (Lilies Widodojoko, 2010))

Tabel 2. Senyawa dari Semen Portland

Nama Komposisi	Rumus Kimia	Kadar Rerata (%)
Tricacium Silika (C ₃ S)	3CaO. SiO ₂	50
Dicalcium Silika (C ₂ S)	2CaO. SiO ₂	25
Tricalcium Alumina (C ₃ A)	3CaO. Al ₂ O ₃	12
Tetracalcium Alumina Ferrit (C ₄ AF)	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	8
Calsium Sulfat Dihidrat	CaSO ₄ .2H ₂ O	3,5

(Sumber: (Lilies Widodojoko, 2010))

2.2.2. Agregat Halus

Menurut SNI 03-6820-2002, agregat halus adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,76 mm berasal dari alam atau hasil olahan Pada beton agregat halus dapat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang didapatkan dari dari alat-alat pemecah batu.

Pada SNI 03-6861.1-2002, “Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam)” terdapat beberapa persyaratan pasir atau agregat halus yang baik digunakan sebagai bahan dasar pembentuk beton atau bahan bangunan lainnya, diantaranya:

- 1) Butiran agregat halus harus terdiri dari butiran yang tajam dan keras dengan indeks kekerasan sebesar $< 2,2$

- 2) Pasir atau agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5%, apabila agregat halus atau pasir mengandung kandungan lumpur lebih dari 5% maka pasir harus dicuci sampai kadar lumpur berada dibawah 5%.
- 3) Jika diuji dengan larutan jenuh garam sulfat memiliki sifat kekal sebagai berikut: a)
 - a) Jika diberikan natrium sulfat bagian hancur maksimal 12%
 - b) Jika diberikan magnesium sulfat bagian halus maksimal 10%
- 4) Pasir atau agregat halus tidak boleh mengandung bahan organik terlalu banyak. Hal ini dapat dibuktikan dengan percobaan warna dari Abrans-Harder dengan larutan jenuh NaOH 3%
- 5) Pasir terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam dengan susunan besar butir pasir yang memiliki modulus kehalusan antara 2,5 dan 3,8.
- 6) Reaksi pasir terhadap alkali harus negatif untuk beton dengan tingkat keawetan yang tinggi .
- 7) Pasir laut tidak boleh digunakan sebagai agregat halus untuk semua mutu beton kecuali dengan petunjuk dari lembaga pemerintahan bahan bangunan yang diakui.
- 8) Persyaratan pasir pasangan harus dipenuhi untuk agregat halus yang akan digunakan untuk plesteran dan spesi terapan.
- 9) Berada pada syarat ambang batas gradasi yang baik.

Menurut SNI 03-6820, 2002 ada beberapa unsur perusak yang dapat terjadi pada agregat halus, seperti:

- 1) Partikel yang mudah pecah
- 2) Mengandung zat organik
- 3) Partikel ringan yang terapung pada cairan
- 4) Lumpur
- 5) Kotoran yang dapat merusak warna

Syarat beton yang baik salah satunya adalah gradasi yang sebagaimana tertuang dalam SNI 03-6820-2002. Gradasi pada adukan terbagi menjadi dua yakni gradasi pasir alam dan gradasi pasir olahan, seperti tertuang dalam tabel berikut:

Tabel 3. Gradasi Agregat Halus

Saringan	Persen lolos (%)	
	Pasir alam	Pasir olahan
No. 4 (4,76 mm)	100	100
No. 8 (2,36 mm)	99–100	95–100
No. 16 (1,18 mm)	70–100	70–100
No. 30 (600 μm)	40–75	40–75
No. 50 (300 μm)	10–35	20–40
No. 100 (150 μm)	2–15	10–25
No. 200 (75 μm)	0	0–10

(Sumber : SNI 03-6820-2002)

2.2.3. Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan salah satu komponen utama dalam campuran beton yang memiliki peranan sangat penting terhadap sifat mekanik, terutama kekuatan tekan dan kekuatan lentur beton. Proporsi agregat kasar dalam campuran beton mencapai sekitar 60–70% dari total volume beton, sehingga kualitas dan karakteristiknya sangat menentukan mutu akhir beton yang dihasilkan (Sumajouw dkk., 2014). Agregat kasar pada umumnya adalah agregat yang memiliki ukuran butir lebih dari 5 mm. Berbagai mutu beton, baik yang biasa maupun yang tinggi, memiliki persyaratan pengawasan kualitas agregat yang harus dipenuhi oleh agregat kasar sesuai dengan beberapa atau semua dari ayat berikut yang tercantum pada ASTM C33:

- 1) Agregat kasar harus tersusun dari partikel yang padat dan tidak berpori. Pada agregat yang memuat butir pipih hanya dapat digunakan, jika banyaknya butir pipih tidak melampaui 20% dari berat agregat keseluruhan. Agregat kasar harus memiliki sifat yang

tetap, yang berarti mereka tidak boleh retak atau rusak akibat cuaca, seperti sinar matahari yang panas dan hujan.

- 2) Kandungan lumpur dalam agregat kasar tidak boleh melebihi 1% dari berat keringnya. Lumpur dalam konteks ini merujuk pada material yang dapat lolos melalui ayakan dengan ukuran lubang 0,063 mm. Jika kadar lumpur melebihi 1%, maka agregat kasar harus menjalani proses pencucian.
- 3) Zat-zat yang dapat merusak beton tidak boleh ada dalam kandungan agregat. Zat-zat yang dapat merusak beton seperti zat-zat relatif alkali.
- 4) Agregat kasar harus mengandung berbagai ukuran butiran, dan ketika disaring menggunakan rangkaian ayakan, harus memenuhi persyaratan-persyaratan berikut:
 - a) Tidak boleh ada sisa di atas ayakan dengan ukuran 31,5 mm.
 - b) Pada ayakan pada ayakan 4 mm, harus memiliki kisaran antara 90% dan 98%.
 - c) Perbedaan antara akumulasi sisa-sisa di atas dua ayakan yang berdampingan harus berada dalam rentang 10% hingga 60% dari berat total.

Gradasi agregat kasar menurut SNI 03-2834-2000 seperti terlampir pada tabel berikut:

Tabel 4. Gradasi Agregat Kasar

Ukuran saringan (Aayakan)				% Lolos saringan		
mm	SNI	ASTM	inch	Ukuran Maks 10 mm	Ukuran Maks 20 mm	Ukuran Maks 30 mm
75,0	76	3 in	3,00			100–100
37,5	38	1 1/2 in	1,50		100–100	95–100
19,0	19	3/4 in	0,75	100–100	95–100	35–70
9,5	9,6	3/8 in	0,3750	50–50	30–100	10–40
4,75	4,8	no.4	0,1870	0–10	0–10	0–5

(Sumber: SNI 03-2834-2000)

2.2.4. Air

Air merupakan komponen penting dalam campuran beton karena berperan sebagai bahan reaksi hidrasi semen dan pelumas dalam proses pencampuran serta pemadatan. Air yang digunakan harus bersih, tidak mengandung bahan kimia berbahaya seperti minyak, asam, garam, atau zat organik yang dapat mengganggu reaksi hidrasi (ASTM C1602, 2006).

Berdasarkan pada ASTM C 1602 tahun 2006, kriteria kandungan zat kimia yang berada pada air dengan batasan tingkat konsentrasi tertentu pada beton, dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia dalam Air

No	Kandungan unsur kimia	Konsentrasi maksimum (ppm)
1	Chlorida (Cl) Beton Prategang	500
2	Chlorida (Cl) Beton Berulang	1000
3	Sulfat (SO ₄)	3000
4	Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	600
5	Total solid	50000

(Sumber: Silica Fume Association, 2022)

2.3. Abu Sekam Padi

Abu sekam padi (ASP) merupakan hasil pembakaran limbah pertanian berupa sekam padi yang mengandung silika tinggi. Sekam padi sendiri merupakan lapisan pelindung luar dari butiran padi yang jumlahnya sekitar 20% dari total berat padi giling. Proses pembakaran sekam padi pada suhu 600–700°C menghasilkan abu yang sebagian besar terdiri dari silika amorf (SiO₂) yang bersifat pozzolanik (Saptari, 2021). Untuk mengetahui potensi pozzolanik dari abu sekam padi yang digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen, dilakukan identifikasi terhadap komposisi kimia yang terkandung di dalamnya. Kandungan senyawa kimia tersebut memberikan gambaran

mengenai kemampuan abu sekam padi dalam bereaksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sehingga dapat membentuk senyawa pozzolan yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan beton. Berdasarkan hasil analisis dari Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro (2022), komposisi kimia abu sekam padi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kandungan Senyawa Abu Sekam Padi

Kandungan Senyawa	Persentase Kandungan (%)
SiO_2 (<i>Silikon Dioksida</i>)	91,13
C (<i>Karbon</i>)	5,19
K_2O (<i>Kalium Oksida</i>)	1,50
CaO (<i>Kalsium Oksida</i>)	0,92
FeO (<i>Ferros Oksida</i>)	0,67
MgO (<i>Magnesium Oksida</i>)	0,59

(Sumber: Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, 2022)

2.4. Serbuk Kaca

Kaca merupakan salah satu material yang memiliki sifat khas dibandingkan dengan kelompok keramik lainnya. Kekhasan tersebut terutama disebabkan oleh proses pembentukan kaca yang melibatkan kandungan utama berupa silika (SiO_2). Struktur amorf pada kaca menjadikannya memiliki sifat fisik dan kimia yang berbeda dari material kristalin pada umumnya. Kandungan silika yang tinggi berperan penting dalam memberikan ketahanan terhadap abrasi, perubahan cuaca, serta pengaruh zat kimia, sehingga kaca dikenal sebagai material yang memiliki durabilitas tinggi dan stabil terhadap reaksi kimia (Apriwelni & Wirawan, 2020).

Selain itu, kaca juga bersifat non-porous dan memiliki permukaan yang halus, sehingga tidak mudah menyerap air maupun zat lain dari lingkungan. Sifat ini menjadikan serbuk kaca potensial digunakan sebagai bahan substitusi dalam campuran beton, khususnya sebagai pengganti sebagian agregat halus. Penggunaan serbuk kaca dalam campuran beton diharapkan dapat

meningkatkan kekuatan serta ketahanan beton terhadap lingkungan agresif, sekaligus mengurangi limbah kaca yang sulit terurai secara alami.

Kandungan unsur kimia pada serbuk kaca menjadi faktor penting dalam menentukan potensi reaktivitasnya terhadap semen dan bahan pengikat lainnya. Komposisi kimia tersebut memberikan gambaran mengenai kandungan silika dan oksida logam yang dapat berperan dalam proses hidrasi semen maupun reaksi pozzolan. Adapun kandungan kimia serbuk kaca dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Kandungan Senyawa Kimia Serbuk Kaca

Kandungan Senyawa	Persentase (%)
SiO ₂ (<i>Silikon Dioksida</i>)	61,72
Al ₂ O ₃ (<i>Aluminium Oksida</i>)	3,45
Fe ₂ O ₃ (<i>Ferri Oksida</i>)	0,18
CaO (<i>Kalsium Oksida</i>)	2,59

(Sumber: N. Hanafiah, 2011)

2.5. Waktu Pengikatan Semen

Waktu pengikatan semen merupakan rentang waktu yang diperlukan semen untuk mulai mengeras setelah bereaksi dengan air hingga mencapai kondisi cukup kuat menahan tekanan. Proses ini menunjukkan terjadinya reaksi hidrasi antara senyawa aktif semen dan air yang membentuk senyawa pengeras. Pengujian waktu pengikatan bertujuan mengetahui durasi yang dibutuhkan semen untuk mencapai kekakuan awal dan akhir sesuai standar SNI 15-2049:2004, yang menetapkan waktu pengikatan awal minimum 45 menit dan waktu pengikatan akhir maksimum 375 menit untuk semen jenis PCC (Nasution dkk., 2019). Pengujian dilakukan setelah semen mencapai konsistensi normal, yaitu saat jarum Vicat menembus sedalam 10 ± 1 mm, sedangkan waktu pengikatan awal ditentukan ketika jarum mencapai kedalaman 25 ± 1 mm. Waktu pengikatan awal menandai dimulainya pengerasan, sedangkan waktu pengikatan akhir menunjukkan saat semen telah mengeras sepenuhnya (Arianto dkk., 2013).

2.6. Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton (*curing*) merupakan tahap penting setelah pengecoran yang bertujuan menjaga kelembapan dan suhu beton agar proses hidrasi semen berlangsung sempurna. Proses hidrasi yang optimal sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikroskopis beton yang padat, kuat, dan tahan terhadap retak maupun pengaruh lingkungan. Menurut Mulyono (2015), kehilangan air yang terlalu cepat dapat menyebabkan pengerasan tidak sempurna dan menurunkan kuat tekan beton. Oleh karena itu, perawatan perlu dilakukan segera setelah beton mulai mengeras dengan menjaga permukaan tetap lembap melalui penyiraman air, penutupan dengan bahan basah, atau penggunaan bahan kimia pelapis (*curing compound*). Berdasarkan SNI 2847:2019, waktu perawatan minimum untuk beton normal adalah tujuh hari dan dapat diperpanjang hingga empat belas hari untuk beton yang mengandung bahan tambahan pozzolan. Hasil penelitian Kusuma dkk. (2023) menunjukkan bahwa perawatan beton secara teratur selama 14 hari dapat meningkatkan kuat tekan hingga 18% dibandingkan dengan beton yang tidak dirawat, sehingga menunjukkan bahwa tahapan *curing* memiliki pengaruh signifikan terhadap mutu dan durabilitas beton.

2.7. Pengujian Kuat Tekan

Salah satu aspek terpenting dalam penilaian mutu beton adalah kekuatan tekannya, karena parameter ini mencerminkan kemampuan beton menahan beban tekan sebelum mengalami kerusakan. Nilai kuat tekan beton akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton hingga mencapai kekuatan optimal pada usia 28 hari. Pengujian kuat tekan dapat dilakukan baik di laboratorium maupun di lapangan, dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus atau silinder. Menurut Panennungi dan Pertiwi (2018), terdapat perbedaan nilai antara hasil pengujian benda uji silinder dan kubus, di mana hubungan tersebut dijelaskan dalam ISO Standard 3893:1977

mengenai perbandingan nilai kuat tekan kedua bentuk benda uji. Perbandingan kuat tekan antara silinder dan kubus dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan Kuat Tekan antara Silinder dan Kubus

Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kuat Tekan Kubus (MPa)
2	2,5
4	5
6	7,5
8	10
10	12,5
12	15
16	20
20	25
25	30
30	35
35	40
40	45
45	50
50	55

(Sumber: ISO Standard 3893-1977 dalam (Panennungi & Pertiwi, 2018))

Pada umumnya, beton mencapai 85% hingga 90% pada usia 14 hari, dengan target kekuatan penuh tercapai pada usia 28 hari (Panennungi & Pertiwi, 2018).

Sesuai dengan standar SNI 1974:2011, penentuan kuat tekan beton dilakukan melalui uji tekan (*compressive test*) yang menggunakan pembebanan statik monotorik. Dalam pengujian ini, beban diterapkan dan didistribusikan secara kontinu melalui pusat berat benda uji. Oleh karena itu, kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan rumus:

$$f'c = P/A$$

Keterangan:

F'c = Kuat Tekan Beton (MPa)

P = Gaya Tekan Maksimum (N)

A = Luas Penampang Benda Uji (mm²)

2.8. Penelitian Sebelumnya

2.8.1. Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton

Penelitian yang dilakukan oleh Ode dkk. (2024) ini mengevaluasi pengaruh substitusi sebagian agregat halus dengan bahan pengganti serbuk kaca pada beton mutu tinggi. Sampel beton berbentuk kubus dengan ukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dibuat dengan variasi kadar serbuk kaca sebesar 0%, 2,5%, dan 5%. Hasil pengujian *slump* test menunjukkan bahwa penambahan serbuk kaca meningkatkan nilai *slump* dari 8 cm pada beton normal menjadi 8,8 cm pada kadar 2,5% dan 10,8 cm pada kadar 5%, yang menunjukkan beton menjadi lebih encer dan mudah dikerjakan.

Pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari menunjukkan beton dengan 2,5% serbuk kaca menghasilkan kuat tekan rata-rata 252,26 kg/cm², lebih tinggi dibanding beton normal sebesar 233,16 kg/cm². Namun, dengan kadar 5% serbuk kaca, kuat tekan menurun menjadi 192,80 kg/cm², meskipun masih memenuhi standar minimal kuat tekan 200 kg/cm². Penelitian ini menyimpulkan penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi agregat halus optimal pada kadar 2,5% untuk meningkatkan performa beton mutu tinggi, sedangkan penambahan lebih banyak dapat menurunkan kualitas beton karena perubahan sifat fisik campuran.

2.8.2. Pengaruh Penggunaan Abu-Sekam Padi sebagai Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tekan Beton

Penelitian yang dilakukan oleh Farhan dkk. (2023) ini tentang pemanfaatan limbah abu sekam padi sebagai bahan tambahan dalam campuran beton untuk meningkatkan kekuatan tekan. Abu sekam padi

yang digunakan berasal dari Kabupaten Kerinci dan ditambahkan pada beton dengan variasi 0%, 6%, 8%, 10%, dan 12% dari berat semen. Beton yang diuji berbentuk silinder dengan mutu rencana $f'c$ 20 MPa. Hasil uji laboratorium menunjukkan adanya peningkatan kekuatan tekan secara linear pada campuran dengan tambahan abu sekam padi sebesar 6%, 8%, dan 10%, dengan nilai optimum mencapai 29,32 MPa. Kandungan silika (SiO_2) dalam abu sekam padi yang tinggi, yaitu 91,13%, berperan penting dalam memperkuat ikatan antarpartikel semen dan agregat sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan kuat.

Secara umum, penelitian tersebut membuktikan bahwa abu sekam padi dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan ramah lingkungan untuk meningkatkan mutu beton. Peningkatan kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada penambahan 10% abu sekam padi, yang menunjukkan kenaikan sebesar 25,41% dibandingkan dengan beton normal tanpa campuran abu sekam padi. Namun, pada kadar 12%, kekuatan beton mulai menurun walaupun masih lebih tinggi dari beton tanpa tambahan. Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penambahan abu sekam padi dalam rentang 7,5–10% mampu menghasilkan kekuatan tekan optimum karena partikel halus silika membantu mengisi pori-pori beton dan memperkuat struktur mikro material.

2.8.3. Effectiveness of Rice Husk Ash and Glass Powder Waste as Partial Replacements of Cement in Concrete Construction

Penelitian yang dilakukan oleh Pranadiarso dkk. (2024) meneliti efektivitas penggunaan abu sekam padi (*Rice Husk Ash/RHA*) dan serbuk kaca (*Glass Powder Waste/GPW*) sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Sampel uji berupa beton silinder berukuran 15 cm × 30 cm dengan variasi campuran GPW dan RHA

masing-masing sebesar 0%, 3%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian dilakukan pada umur beton 7 dan 28 hari untuk menilai kuat tekan dan berat jenis beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur 28 hari, campuran dengan proporsi 5% GPW dan RHA menghasilkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 33,1 MPa. Namun, penambahan campuran di atas persentase tersebut justru menurunkan kekuatan tekan serta berat jenis beton, meskipun nilai densitasnya masih termasuk dalam kategori beton normal.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan abu sekam padi dan serbuk kaca dapat meningkatkan kinerja beton jika digunakan pada kadar optimum. Kombinasi bahan tersebut berperan dalam memperbaiki struktur mikro beton melalui reaksi pozzolan yang terjadi antara silika amorf dalam abu sekam padi dan serbuk kaca dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran GPW dan RHA pada kadar 3–5% efektif meningkatkan kekuatan tekan beton, sedangkan kadar yang lebih tinggi menyebabkan penurunan performa akibat berkurangnya kandungan semen aktif. Temuan ini menegaskan potensi penggunaan limbah industri dan pertanian sebagai bahan bangunan ramah lingkungan dengan tetap memperhatikan proporsi yang tepat agar mutu beton tetap terjaga.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

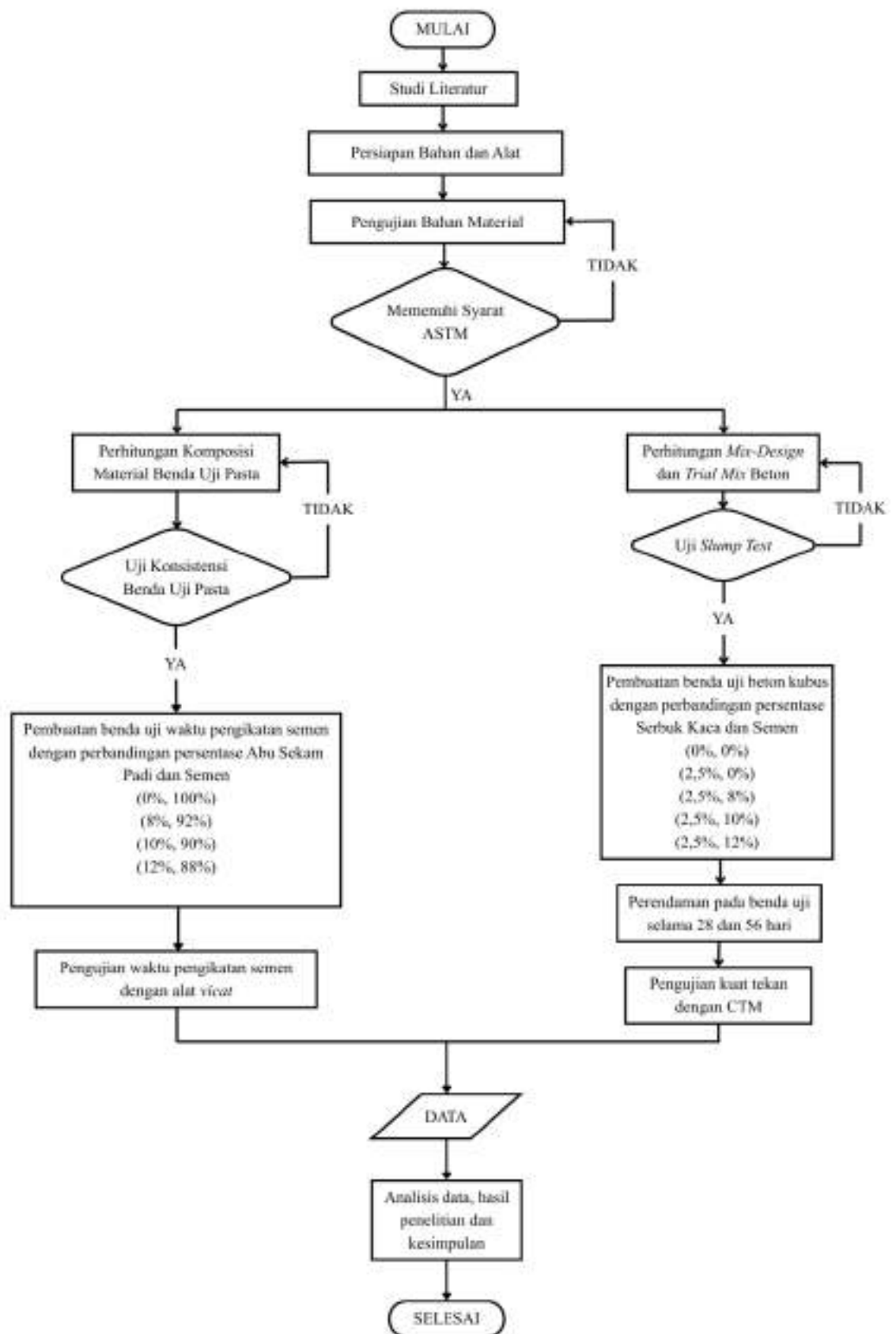
Penelitian ini dirancang menggunakan metode eksperimental yang menekankan pada kegiatan pengujian laboratorium untuk memperoleh data kuantitatif yang akurat. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran langsung mengenai perilaku material ketika mengalami proses substitusi sebagian semen dan agregat halus pada campuran beton mutu normal K-300. Variasi material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi penggantian serbuk kaca (*glass powder*) dengan persentase 2,5% dari berat agregat halus, serta penggantian abu sekam padi (*rice husk ash*) dengan variasi kadar 8%, 10%, dan 12% dari berat semen. Selain pengujian individual, penelitian ini juga mengevaluasi kombinasi glass powder dan rice husk ash dengan variasi 0% + 0%, 2,5% + 0%, 2,5% + 8%, 2,5% + 10%, dan 2,5% + 12% untuk mengetahui sejauh mana interaksi antar kedua material tersebut dapat memengaruhi sifat mekanik dan karakteristik beton.

Selanjutnya, benda uji yang digunakan dalam penelitian mencakup dua jenis, yaitu benda uji pasta semen dan benda uji beton berbentuk kubus. Benda uji pasta digunakan untuk mengkaji perubahan karakteristik pada tingkat mikro, khususnya terhadap waktu pengikatan awal dan akhir semen, dengan variasi abu sekam padi sebesar 0%, 8%, 10%, dan 12%. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah penggantian material pozolan seperti abu sekam padi dapat mempercepat atau memperlambat proses hidrasi pada fase awal. Sementara itu, benda uji beton berbentuk kubus dengan dimensi 15 cm × 15 cm × 15 cm disiapkan untuk pengujian kuat tekan pada umur 28 hari dan 56

hari. Pengujian kuat tekan ini merupakan indikator utama dalam mengetahui kualitas dan kemampuan beton untuk menahan beban tekan setelah diberi perlakuan substitusi material.

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, dengan mengikuti standar pengujian yang berlaku. Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperkuat teori serta menentukan variabel yang diteliti terkait pemanfaatan serbuk kaca dan abu sekam padi sebagai material substitusi. Selanjutnya dilakukan persiapan alat dan pengujian karakteristik bahan sesuai SNI, termasuk pemeriksaan gradasi, kadar lumpur, berat jenis, dan kehalusan. Setelah semua bahan dinyatakan memenuhi syarat, dilakukan perhitungan *mix design* serta pembuatan pasta untuk uji konsistensi. Jika konsistensi memenuhi batas yang ditetapkan, pengujian waktu pengikatan semen dilanjutkan untuk mengetahui pengaruh penggantian abu sekam padi sebagai bahan pozolan.

Tahap berikutnya meliputi *trial mix* dan uji *slump* untuk menilai *workability* campuran beton sebelum benda uji kubus dicetak. Setelah cetakan dilepas, benda uji dirawat (*curing*) dalam bak perendaman hingga mencapai umur 28 dan 56 hari sebelum diuji kuat tekannya menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh substitusi serbuk kaca dan abu sekam padi terhadap sifat pasta semen dan kuat tekan beton. Seluruh rangkaian kegiatan penelitian dirangkum dalam diagram alir pada Gambar 1 memberikan gambaran yang terstruktur dan menyeluruh.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

3.2. Peralatan dan Bahan

Dalam pelaksanaan penelitian ini, terlebih dahulu dilakukan persiapan seluruh peralatan dan bahan yang akan digunakan. Pada penelitian ini, alat dan bahan yang diperlukan disesuaikan dengan kebutuhan pengujian agar diperoleh hasil yang akurat dan sesuai standar.

3.2.1. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

a. Oven

Oven merupakan alat yang digunakan untuk mengeringkan bahan material sebelum dilakukan pengujian.

b. Satu set saringan

Penelitian ini menggunakan satu rangkaian saringan dengan berbagai ukuran diameter, yaitu 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, 0,15 mm, 0,02 mm, serta pan. Alat ini berfungsi untuk memisahkan agregat halus dan agregat kasar sesuai dengan gradasi yang dibutuhkan dalam campuran beton.

c. Timbangan

Timbangan digunakan untuk menentukan berat bahan yang akan digunakan dalam proses penelitian. Alat yang digunakan berupa timbangan digital elektronik dengan kapasitas 30 kg dan akurasi 0,1 gram, sehingga hasil penimbangan lebih presisi.

d. Piknometer

Piknometer berfungsi untuk mengukur kandungan zat organik serta menentukan densitas (berat jenis) agregat halus.

e. Gelas ukur

Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume air sesuai kebutuhan dalam analisis kadar lumpur dan pengujian berat jenis agregat halus (*Specific Gravity*).

f. Cetakan kerucut pasir

Cetakan kerucut pasir merupakan alat yang digunakan untuk menentukan kondisi pasir dalam keadaan SSD (*Saturated Surface Dry*) atau jenuh kering permukaan. Alat ini berfungsi memastikan kadar air pada agregat halus sesuai dengan kondisi standar sebelum digunakan dalam campuran beton.

g. Bejana Silinder

Bejana silinder digunakan dalam pengujian berat jenis agregat halus dan agregat kasar. Dalam penelitian ini digunakan dua jenis bejana, yaitu bejana berkapasitas 5 liter untuk pengujian berat jenis agregat halus dan bejana berkapasitas 10 liter untuk pengujian berat jenis agregat kasar.

h. *Concrete Mixer*

Alat pengaduk beton (*concrete mixer*) digunakan untuk mencampur seluruh bahan penyusun beton secara merata dan homogen.

i. Satu set alat *slump test*

Alat yang digunakan berupa satu set kerucut Abrams dengan diameter bagian atas 102 mm, diameter bagian bawah 203 mm, tinggi 305 mm, serta base plate berukuran 900×900 mm dengan ketebalan 3 mm. Perangkat ini digunakan untuk mengukur nilai workability beton melalui pengujian *slump test*.

j. Meteran

Meteran digunakan untuk mengukur tinggi penurunan (*slump*) pada saat melakukan pengujian *slump test* terhadap beton.

k. Cetakan benda uji

Cetakan benda uji berfungsi untuk membentuk beton sesuai ukuran standar yang diperlukan dalam pengujian kuat tekan. Dalam penelitian ini digunakan cetakan berbentuk kubus dengan ukuran $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$.

l. Bak perendam

Bak perendam digunakan dalam proses perawatan (*curing*) beton untuk menjaga kelembapan dan mencegah terjadinya penguapan air yang berlebihan. Alat ini berfungsi memastikan proses hidrasi semen berlangsung optimal sehingga beton dapat mencapai kekuatan yang diharapkan.

m. *Compression testing machine* (CTM)

Compression Testing Machine (CTM) merupakan alat yang digunakan untuk mengukur kuat tekan beton. CTM yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kapasitas beban maksimum sebesar 3000 kN.

n. Peralatan *vicat*

Peralatan *vicat* digunakan untuk menentukan konsistensi pasta semen, serta mengukur waktu pengikatan awal dan akhir semen. Alat ini berfungsi untuk mengetahui sifat fisik semen sebelum digunakan dalam campuran beton.

o. Alat bantu

Alat bantu merupakan peralatan tambahan yang digunakan untuk memperlancar proses penelitian. Peralatan ini meliputi stamper, kode warna, sekop, sendok semen, ember, kontainer, kereta dorong, *stopwatch*, wadah pengukur, dan alat tulis.

3.2.2. Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

a. Semen PCC

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah semen tipe PCC (*Portland Composite Cement*) dengan merek Baturaja. Semen tersebut diperoleh dari toko bangunan dalam kondisi tertutup rapat dan dikemas dalam karung seberat 50 kg

b. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Gunung Sugih, Lampung Tengah. Bahan ini diuji berdasarkan

standar SNI melalui beberapa pengujian, meliputi kadar air, berat jenis, daya serap (absorpsi), kadar lumpur, gradasi agregat halus, serta kandungan zat organik pada pasir, guna memastikan kualitasnya memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan campuran beton.

c. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Tanjung, Lampung Selatan, dengan ukuran maksimum 19 mm. Agregat ini harus memenuhi persyaratan sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI), yang meliputi pengujian kadar air, gradasi, berat jenis, daya serap (absorpsi), dan berat volume agregat kasar.

d. Abu sekam padi (*Rice husk ash*)

Dalam penelitian ini, abu sekam padi yang akan digunakan merupakan abu sekam padi komersial dengan merk BioE yang melalui proses pembakaran dengan suhu lebih dari 700°C. Selanjutnya, abu sekam padi diayak menggunakan saringan No. 200 dengan tujuan memperoleh ukuran partikel yang sama dengan semen. abu sekam padi digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen pada campuran beton dengan variasi 8%, 10%, dan 12% terhadap berat semen. Penggunaan abu sekam padi diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanik beton.

e. Serbuk kaca (*Glass powder*)

Dalam penelitian ini, limbah kaca dimanfaatkan sebagai bahan baku utama untuk pembuatan serbuk kaca. Limbah kaca tersebut dihancurkan menggunakan alat penumbuk berbahan besi hingga menjadi serbuk, kemudian diayak menggunakan saringan No. 4, dan hanya fraksi yang lolos saringan yang digunakan. Serbuk kaca digunakan sebagai bahan substitusi sebagian agregat halus dengan proporsi sebesar 2,5% dari berat agregat halus. Material ini diperoleh dari hasil penghalusan limbah kaca hingga mencapai ukuran partikel halus, dan berfungsi untuk meningkatkan kekuatan beton.

3.3. Pengujian Material

Tahapan pengujian material dilakukan melalui beberapa jenis pengujian yang disesuaikan dengan karakteristik masing-masing bahan yang dijelaskan secara rinci sebagai berikut.

3.3.1. Agregat Halus

Pengujian terhadap agregat halus dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik material sebelum digunakan dalam campuran beton. Adapun jenis pengujian yang dilakukan meliputi:

a. Kadar Air

Pengujian kadar air bertujuan untuk menentukan jumlah kandungan air yang terdapat dalam agregat halus dan serbuk kaca dengan metode pengeringan. Prosedur ini mengacu pada ASTM C70-94 dan SNI 03-1971-1990.

b. Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai berat jenis agregat halus dan serbuk kaca pada kondisi SSD (*Surface Saturated Dry*), serta untuk mengetahui kemampuan material dalam menyerap air. Standar yang digunakan adalah ASTM C128-97, ASTM C128-01, ASTM C33-03, dan SNI 1970:2008.

c. Gradasi

Pengujian gradasi bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel agregat halus dan serbuk kaca melalui analisis saringan, serta menentukan nilai modulus kehalusan (*fineness modulus*). Pengujian ini mengacu pada ASTM C33-03 dan ASTM C136-01.

d. Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur dilakukan untuk mengukur persentase material halus atau lumpur yang terkandung dalam agregat halus dan serbuk kaca. Prosedur ini mengacu pada ASTM C117-03.

e. Berat Volume

Pengujian berat volume bertujuan untuk menentukan berat isi agregat halus dan serbuk kaca, yaitu perbandingan antara berat

material dalam kondisi kering dengan volume yang ditempatinya. Standar yang digunakan adalah ASTM C29 M-97.

3.3.2. Agregat Kasar

Karakteristik agregat kasar juga dianalisis melalui beberapa pengujian untuk memastikan kesesuaiannya dalam campuran beton. Jenis pengujian yang dilakukan antara lain:

a. Kadar Air

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kandungan air dalam agregat kasar dengan metode pengeringan sesuai standar ASTM C566-97 dan SNI 03-1971-1990.

b. Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian dilakukan untuk menentukan berat jenis agregat kasar pada kondisi SSD serta mengukur tingkat penyerapan airnya. Standar yang digunakan adalah ASTM C127-01, ASTM C33-03, ASTM C136, dan SNI 1969:2008.

c. Gradasi

Pengujian gradasi dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat kasar melalui analisis saringan serta menghitung nilai modulus kehalusan. Prosedur ini mengacu pada ASTM C33-03 dan ASTM C136-01.

d. Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengetahui persentase kandungan partikel halus pada agregat kasar. Kandungan lumpur yang tinggi dapat mempengaruhi daya lekat antara pasta semen dan agregat sehingga perlu dikontrol sesuai standar ASTM C117-03.

e. Berat Volume

Pengujian berat volume dilakukan untuk menentukan berat isi agregat kasar dalam kondisi kering terhadap volume tertentu, baik dalam kondisi lepas maupun dipadatkan. Nilai ini digunakan sebagai dasar dalam perhitungan perencanaan campuran beton dan mengacu pada ASTM C29 M-97.

3.3.3. Semen

Pengujian terhadap semen difokuskan pada pengukuran berat jenis material. Tujuan pengujian ini adalah untuk memperoleh nilai berat jenis berdasarkan perbandingan antara berat volume kering material pada suhu ruang dengan berat volume air suling pada suhu 4°C. Prosedur pengujian mengacu pada standar ASTM C188-95 dan SNI 15-2531-1991.

3.3.4. Serbuk Kaca

Pengujian terhadap serbuk kaca difokuskan pada pengujian gradasi. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui distribusi ukuran butiran agregat kasar melalui analisis saringan serta menghitung nilai modulus kehalusan. Prosedur ini mengacu pada ASTM C33-03 dan ASTM C136-01.

3.4. Pembuatan Benda Uji

Setelah perencanaan campuran dilakukan dengan cermat, tahap selanjutnya adalah pembuatan benda uji. Benda uji yang dibuat merupakan campuran semen yang sebagian digantikan oleh abu sekam padi, yang selanjutnya digunakan untuk pengujian waktu pengikatan awal semen pada setiap variasi campuran. Pengujian dilakukan menggunakan alat *vicat* guna memperoleh data karakteristik waktu pengikatan dari abu sekam padi sebagai bahan pengganti semen. Data pengujian dijelaskan dalam tabel 9.

Tabel 9. Komposisi dan Kode Benda Uji Waktu Pengikatan Semen

NO	KODE SAMPLE	RICE HUSK ASH (%)	SEMEN (%)	JUMLAH SAMPLE (BUAH)
1	RH0	0	100	3
2	RH8	8	92	3
3	RH10	10	90	3
4	RH12	12	88	3
JUMLAH				12

Keterangan:

RH : *Rice Husk Ash*

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa beton berbentuk kubus berukuran $15 \times 15 \times 15$ cm yang diperuntukkan bagi pengujian kuat tekan. Penelitian ini mencakup tiga kategori benda uji yang akan diuji pada umur 28 hari dan 56 hari. Data pengujian dijelaskan dalam tabel 10.

Tabel 10. Komposisi dan Kode Benda Uji Beton Kubus

NO	KODE SAMPLE	GLASS POWDER (%)	AGREGAT HALUS (%)	RICE HUSK ASH (%)	SEMEN (%)	JUMLAH SAMPEL	
						UMUR 28 HARI (BUAH)	UMUR 56 HARI (BUAH)
1	GP0RH0	0	100	0	100	3	3
2	GP2,5RH0	2,5	97,5	0	100	3	3
3	GP2,5RH8	2,5	97,5	8	92	3	3
4	GP2,5RH10	2,5	97,5	10	90	3	3
5	GP2,5RH12	2,5	97,5	12	88	3	3
JUMLAH						15	15
TOTAL SAMPLE						30	

Keterangan:

GP : *Glass Powder*

RH : *Rice Husk Ash*

Tahapan-tahapan dalam pembuatan benda uji pengujian waktu pengikatan awal semen dan benda uji beton adalah sebagai berikut:

A. Benda Uji Waktu Pengikatan Awal Semen

1. Menimbang semen sebanyak 400 gram.
2. Berdasarkan rancangan campuran, massa semen yang digunakan disesuaikan dengan persentase bahan pengganti sebagian semen, dengan massa total campuran tetap 400 gram.
3. Menakar air pencampur sebanyak 25–30% dari massa total adonan semen menggunakan gelas ukur.
4. Mencampurkan semen dan air hingga membentuk adonan pasta yang homogen.
5. Membentuk adonan pasta menjadi bulat, kemudian melemparkannya perlahan dengan kedua tangan sejauh ± 30 cm

sebanyak 10 kali untuk mendapatkan pasta yang lebih padat dan homogen.

6. Memasukkan pasta semen ke dalam cetakan *vicat* dan meratakan permukaannya menggunakan mistar perata.
7. Menempatkan cetakan berisi pasta semen pada alat Vicat dengan jarum berdiameter 10 mm, kemudian menurunkan jarum hingga menyentuh permukaan pasta.
8. Menurunkan sekrup alat sehingga jarum jatuh ke dalam pasta. Adonan dikatakan mencapai konsistensi standar apabila jarum menembus hingga kedalaman 10 ± 1 mm dari permukaan.
9. Apabila penurunan jarum belum mencapai 10 ± 1 mm, maka langkah nomor (2) diulangi dengan menyesuaikan persentase kadar air.
10. Jika penurunan jarum telah sesuai (10 ± 1 mm), maka pasta dinyatakan memenuhi pengujian konsistensi dan dapat dilanjutkan ke tahap pengujian waktu pengikatan semen.
11. Menyimpan benda uji yang telah memenuhi pengujian konsistensi di ruangan lembap selama ± 30 menit.
12. Menempatkan kembali cetakan berisi pasta pada alat Vicat dengan jarum berdiameter 1 mm, kemudian menurunkan jarum hingga menyentuh permukaan pasta untuk memulai pengujian waktu pengikatan.
13. Menurunkan sekrup alat Vicat hingga jarum jatuh ke dalam pasta semen, kemudian mencatat hasil pembacaan angka penetrasi.
14. Melakukan pengujian secara berkala setiap 15 menit dan mencatat nilai penetrasi yang diperoleh pada setiap interval waktu.
15. Pengujian dilanjutkan hingga nilai penetrasi mencapai atau lebih kecil dari 25 mm. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman penetrasi ± 25 mm ditetapkan sebagai waktu pengikatan awal semen.
16. Pengujian diteruskan hingga jarum tidak lagi menembus permukaan pasta atau menunjukkan nilai penetrasi 0 mm. Kondisi ini menandakan bahwa pasta telah mengeras sempurna, dan waktu yang

dicapai pada tahap ini dinyatakan sebagai waktu pengikatan akhir semen.

B. Benda Uji Beton

1. Proses pembuatan benda uji diawali dengan proses pengecoran, yaitu dengan memasukkan agregat kasar, agregat halus, dan abu sekam padi sebagai bahan pengganti semen terlebih dahulu ke dalam concrete mixer, kemudian mengaduk hingga kedua jenis agregat tercampur secara merata.
2. Setelah agregat tercampur homogen, langkah berikutnya adalah menambahkan semen dan abu sekam padi sebagai bahan pengganti semen.
3. Setelah agregat, semen, dan bahan pengganti tercampur secara merata, air ditambahkan secara bertahap sambil proses pengadukan dilanjutkan hingga campuran beton mencapai kondisi homogen.
4. Campuran beton yang telah merata kemudian dituangkan ke dalam cetakan (mold) berbentuk kubus berukuran $15 \times 15 \times 15$ cm. Selama proses pengecoran, penggetaran dilakukan menggunakan *vibrator* untuk menghilangkan rongga udara di dalam adukan beton.
5. Sebagian campuran beton juga diambil untuk dilakukan pengujian *slump* menggunakan kerucut Abrams, guna menentukan nilai *workability* dari masing-masing variasi campuran beton.

3.5. Pengujian *Workability* Beton Segar

Sebelum beton segar dimasukkan ke dalam cetakan, terlebih dahulu dilakukan pengujian *workability* menggunakan metode *slump test* untuk mengetahui tingkat kelecakan adukan beton. Langkah-langkah pelaksanaan pengujian *slump* adalah sebagai berikut:

1. Kerucut Abrams perlu dibersihkan baik bagian dalam maupun bagian luar dengan air.

2. Kemudian, letakkan kerucut Abrams di atas pelat baja berukuran 900 mm x 900 mm.
3. Pastikan bahwa kerucut Abrams dipegang dengan kuat pada kakinya agar tidak terjadi pergeseran saat adukan beton dimasukkan.
4. Adukan beton segar dimasukkan ke dalam kerucut Abrams hingga mencapai tinggi 1/3 dari kerucut Abrams dan kemudian ditumbuk dengan tongkat penumbuk sebanyak 25 kali.
5. Lakukan proses yang sama setiap kali tinggi adukan bertambah 1/3 dari tinggi kerucut Abrams.
6. Ratakan permukaan adonan beton di bagian atas kerucut Abrams menggunakan sendok semen.
7. Selanjutnya, perlahan-lahan angkat kerucut Abrams secara tegak lurus ke atas.
8. Ukur penurunan adonan beton dari tinggi awal dengan mengurangi tinggi awal kerucut Abrams dengan tinggi adonan saat ini. Hasil pengurangan ini disebut nilai *slump*.

3.6. Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Benda uji yang telah didiamkan selama 24 jam dilepaskan dari cetakan (*mold*) dan kemudian direndam dalam bak berisi air selama 28 hari dan 56 hari sesuai dengan umur pengujian yang telah direncanakan. Proses perendaman ini bertujuan untuk memastikan reaksi hidrasi semen berlangsung secara optimal, sehingga proses pengerasan beton dapat terjadi secara sempurna tanpa menimbulkan retak akibat kehilangan kelembapan. Selain itu, tahapan *curing* juga berfungsi untuk menjaga mutu beton agar sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang. Setelah masa perendaman selesai, sampel beton dikeluarkan dari bak air dan didiamkan selama 48 jam sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.

3.7. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM

Setelah sampel beton selesai menjalani proses *curing*, tahap selanjutnya adalah pengujian kuat tekan dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus. Pengujian kuat tekan beton bertujuan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan per satuan luas hingga mencapai titik kegagalan, sesuai dengan standar SNI 03-1974 (1990). Pada penelitian ini, pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tekan (*Compression Testing Machine/CTM*) dengan kapasitas maksimum 3000 kN dan kecepatan pembebanan berkisar antara 0,14 hingga 0,34 MPa per detik. Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan beton adalah:

$$f'c = P/A$$

Keterangan:

$F'c$ = Kuat Tekan Beton (Mpa)

P = Gaya Tekan Maksimum (N)

A = Luas Penampang Benda Uji (mm^2)

Pada penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan Panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm.

3.8. Perhitungan dan Analisis Data

Setelah dilakukan pengujian terhadap sampel campuran semen dan beton berbentuk kubus, maka langkah perhitungan dan analisis data yang dilakukan meliputi hal-hal berikut:

1. Menentukan waktu pengikatan semen untuk setiap variasi campuran yang menggunakan abu sekam padi sebagai bahan pengganti sebagian semen.
2. Berdasarkan hasil uji waktu pengikatan awal, dibuat grafik perbandingan antara campuran semen tanpa bahan pengganti dengan campuran yang mengandung abu sekam padi. Dari grafik tersebut kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen terhadap waktu pengikatan.

3. Melakukan pengujian nilai *slump* pada setiap variasi campuran beton yang menggunakan abu sekam padi sebagai pengganti sebagian semen dan serbuk kaca sebagai pengganti sebagian agregat halus untuk mengetahui tingkat *workability* adukan beton.
4. Dari hasil pengujian *slump* tersebut, disusun grafik perbandingan antara campuran beton normal dengan campuran yang mengandung kadar abu sekam padi dan serbuk kaca. Grafik ini kemudian digunakan sebagai dasar analisis untuk menilai pengaruh penggunaan serbuk kaca terhadap tingkat *workability* beton.
5. Menghitung kuat tekan beton pada benda uji berbentuk kubus dengan umur 28 hari dan 56 hari, baik untuk beton normal maupun beton yang sebagian semennya diganti dengan abu sekam padi dan agregat halusnya di ganti dengan serbuk kaca.
6. Berdasarkan hasil uji kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari, dibuat grafik perbandingan peningkatan kuat tekan antara beton normal dan beton dengan bahan pengganti, kemudian dilakukan analisis terhadap hasil tersebut.
7. Seluruh data hasil pengujian dianalisis untuk menentukan kombinasi bahan pengganti terbaik yang dapat mengurangi penggunaan semen atau agregat halus tanpa menurunkan mutu beton.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai pengaruh variasi persentase penggantian sebagian semen dengan abu sekam padi dan penggantian sebagian agregat halus dengan serbuk kaca terhadap karakteristik beton, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada pengujian waktu pengikatan semen, substitusi abu sekam padi sebesar 8% (RH8) menghasilkan waktu pengikatan awal dan akhir yang lebih lama dibandingkan beton normal (RH0), namun variasi RH8 menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan RH0. Sementara itu, pada kadar 10% (RH10) dan 12% (RH12), waktu pengikatan mengalami percepatan dibandingkan RH8, akan tetapi kuat tekan yang dihasilkan kedua variasi tersebut masih lebih rendah dibandingkan RH0. Hal ini menunjukkan bahwa waktu pengikatan yang lebih lama tidak selalu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, sebaliknya percepatan waktu pengikatan juga tidak menjamin peningkatan kuat tekan beton yang optimal.
2. Pada *workability* beton, variasi GP2,5RH8 menghasilkan nilai slump tertinggi sebesar 100 mm dibandingkan variasi lainnya. Meskipun demikian, variasi GP2,5RH0 justru menghasilkan kuat tekan tertinggi pada 56 hari sebesar 28,56 MPa dibandingkan variasi GP2,5RH8, GP2,5RH10, dan GP2,5RH12. Hal ini menunjukkan bahwa pada variasi serbuk kaca 2,5%, nilai *slump* yang lebih rendah cenderung menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, sehingga terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara *workability* dan kuat tekan beton.

Semakin kecil nilai *slump* yang dihasilkan, semakin besar kuat tekan yang diperoleh pada variasi tersebut.

3. Pada uji kuat tekan, seluruh variasi kombinasi abu sekam padi dan serbuk kaca menunjukkan nilai kuat tekan lebih rendah dibandingkan beton normal pada umur 28 hari akibat berkurangnya jumlah semen aktif dan belum optimalnya reaksi pozzolan abu sekam padi pada umur awal. Pada umur 56 hari, nilai kuat tekan optimum dicapai pada variasi GP2,5RH0 sebesar 28,56 MPa, menunjukkan kontribusi positif serbuk kaca 2,5% dalam jangka panjang. Namun, peningkatan kadar abu sekam padi pada variasi GP2,5RH8, GP2,5RH10, dan GP2,5RH12 tetap menyebabkan penurunan kuat tekan dibandingkan beton normal pada kedua umur pengujian.
4. Meskipun kuat tekan beton dengan campuran abu sekam padi dan serbuk kaca belum mencapai nilai beton normal, kombinasi kedua material limbah ini tetap memiliki potensi untuk dikembangkan. Pemanfaatan abu sekam padi dan serbuk kaca sebagai bahan substitusi dapat menjadi solusi alternatif yang ramah lingkungan sekaligus menekan biaya produksi beton, sehingga lebih tepat diaplikasikan pada pekerjaan konstruksi yang tidak mensyaratkan mutu beton tinggi namun mengutamakan efisiensi dan keberlanjutan lingkungan.

5.2. Saran

Untuk mengembangkan penelitian ini, diperlukan penelitian lanjutan yang dapat melengkapi serta memperdalam kajian yang telah dilakukan. Saran yang dapat penulis sampaikan adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan *superplasticizer*.
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian kandungan kimia pada abu sekam padi guna mengetahui kadar pozzolan yang terkandung di dalamnya.
3. Perlu dilakukan penelitian pengujian pada umur beton yang lebih lama untuk melihat perkembangan kuat tekan seperti 90 hari atau 120 hari karena reaksi pozzolan masih berjalan.
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai variasi optimum kadar abu sekam padi sehingga diperoleh kadar optimum yang lebih spesifik dan menghasilkan kuat tekan yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 221. 1998. *Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete*. American Concrete Institute.
- Amiwarti dan Mahipal. 2019. *Analisa Pengaruh Serbuk Kaca Dan Abu Terbang Sebagai Bahan Pengganti Alternatif Terhadap Kuat Tekan Beton*. Jurnal Deformasi. 4(1): 1–12.
- Arianto, R., Kurniawandy, A., & Ermiyati, E. (2014). *Kuat Tekan Beton Dan Waktu Ikat Semen Portland Pozzolan*. Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau, 1(1), 1–14.
- ASTM C1602. 2006. *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*.
- Badan Pusat Statistik. 2024. *Produksi Padi Indonesia Tahun 2024*. Badan Pusat Statistik. Jakarta.
- Devi, D. S., Nurmeyliandari, R., & Pramadona, A. P. 2024. *Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Limbah Granit Terhadap Kuat Tekan Beton*. Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil, 8(1), 74–82.
- Dewi, S. U., Afni, D. N., & Renaldi, S. 2024. *Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi terhadap Kuat Tekan Beton K-175*. Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik, 9(2), 260–271.
- Erfanda, F. 2019. *Pengaruh Penambahan Fly Ash Dan Serbuk Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton K-300*. Jurnal Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Palembang. 6(2): 97–107.
- Farhan, M., M. Nuklirullah, & F.F. Bahar. 2023. *Pengaruh Penggunaan Abu-Sekam Padi Sebagai Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tekan Beton*. Jurnal Teknik. 21(1): 58–67.

- Iqbal, R. M., & Hayu, G. A. 2020. *Pemanfaatan Abu Sekam Padi 10% dan Limbah Kaca Sebagai Bahan Substitusi pada Campuran Beton Mutu f_c' 25 MPa*. Jurnal Teknik Sipil: Sondir, 4(2), 6–15.
- Jafar, J., & Jamaaludin, K. H. (2024). *Pengaruh Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Agregat Halus Dan Silica Fume Sebagai Substitusi Parsial Semen Terhadap Nilai Propertis Mekanik Beton*. Potensi: Jurnal Sipil Politeknik, 25(2), 69–77.
- Kusuma, R., Pratama, A., & Nugroho, S. 2023. *Pengaruh Metode Curing Terhadap Peningkatan Kuat Tekan Beton Normal*. Jurnal Rekayasa Struktur, 9(2): 112–120.
- Lubis, R. T. P., Taufik, T., & Veronika, V. (2023). *Pengaruh Serbuk Kaca Sebagian Pengganti Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu F_c' 25 Mpa*. Kumpulan Executive Summary Tugas Akhir Wisudawan Teknik Sipil Ke-79, 1(1), 181–182.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- Mulyono, T. 2015. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi.
- Nasution, R., Haryanto, B., & Safitri, N. 2019. *Analisis Waktu Pengikatan Semen PCC Menggunakan Alat Vicat*. Jurnal Teknologi Bahan Bangunan, 7(1): 45–52.
- Ode, T., T. Sahusilawane, & M. Marantika. 2024. *Pengaruh Penggunaan Serbuk Kaca Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton*. Journal Agregate. 3(1): 1–6.
- Panennungi, A., & Pertiwi, S. N. 2018. *Ilmu Bahan Bangunan*. Yogyakarta: UII Press.
- Pranadiarso, T., I. Junaidi, S.R.B. Prasetyo, & A.L. Putra. 2024. *Effectiveness Of Rice Husk Ash And Glass Powder Waste As Partial Replacements Of Cement In Concrete Construction*. CIVED. 11(3): 1016-1023.
- Prasetya, A. 2007. *Teknologi Beton dan Campurannya*. Jakarta: Erlangga.
- Saptari, Y. 2021. *Pozzolan Alam dan Abu Sekam Padi pada Beton Ramah Lingkungan*. Jurnal Rekayasa Sipil, 17(2).

- Shao, Y., Lefort, T., Moras, S., & Rodriguez, D. (2000). *Studies on concrete containing ground waste glass*. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91–100.
- SNI 03-2834. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*.
- SNI 03-6820. 2002. *Spesifikasi Agregat Halus*.
- SNI 15-7064. 2004. *Semen Portland Komposit*.
- SNI 1974. 2011. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*.
- Standar Nasional Indonesia. 2013. SNI 2847:2013 tentang *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Sumajouw, D. M. J. 2014. *Pengantar Teknologi Beton*. Universitas Sam Ratulangi.
- Suryanto, R. F. 2014. *Pengaruh Penambahan Fly Ash atau Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton dan Setting Time Pada Semen*. *Pape Knowledge Toward a Media History of Documents*, cm, 34–54.
- Utari, R., & Khanza, A. K. (2024). *Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Dan Zat Additive Bestmittel Sebagai Bahan Tambah Campuran Semen Terhadap Kuat Tekan Beton Fc 24, 9 MPa*. *Jurnal Deformasi*, 9(2), 156–166.
- Widjoko, L. 2010. *Pengaruh sifat kimia terhadap unjuk kerja mortar*. *Jurnal Teknik Sipil UBL*, 1(1), 52–59.
- Widjoko, L. 2010. *Teknologi Beton*. Bandung: ITB Press.