

**PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN
PENGANTI SEBAGIAN SEMEN DALAM CAMPURAN BETON
NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

(Skripsi)

Oleh

**HABIB ILHAM ABDULLAH
2015011009**



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRACT

The Effect Of Boiler Ash and Silica Fume As Partial Replacement Materials For Cement In Normal Concrete Mixtures On Compressive Strength

By

HABIB ILHAM ABDULLAH

Normal concrete is a mixture of coarse aggregate, fine aggregate, water, and hydraulic cement or Portland cement, constituting a fundamental component in the construction industry. In Lampung Province, the large-scale production of palm oil generates a significant amount of boiler ash waste. In an effort to improve concrete quality by utilizing industrial waste, boiler ash and silica fume can be effective alternatives as partial replacements for cement. Both contain high levels of Silicon Dioxide (SiO₂), aiding in the concrete hardening process. This study employs an experimental method with various substitutions of cement in normal concrete cubes, including different percentages of boiler ash and silica fume usage. Testing is conducted on cement binding time and concrete compressive strength at ages 28 and 56 days. The results indicate that using boiler ash and silica fume as cement replacements can expedite the cement binding process and produce concrete with lower slump values. The optimum percentage of boiler ash usage for concrete cubes at ages 28 and 56 days is 5%, yielding compressive strengths of 29.47 MPa and 31.29 MPa, respectively. The optimum percentage of silica fume usage for concrete cubes at ages 28 and 56 days is 10%, resulting in compressive strengths of 28.04 MPa and 33.40 MPa, respectively. In combination, the optimum proportion is 85% cement, 5% boiler ash, and 10% silica fume, producing compressive strengths of 28.93 MPa at age 28 days and 30.67 MPa at age 56 days. The utilization of boiler ash and silica fume provides a positive impact on increasing concrete compressive strength and can economically utilize industrial waste.

Keywords: Normal Concrete, boiler ash, silica fume, cement binding time, concrete compressive strength

ABSTRAK

PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN PENGANTI SEBAGIAN SEMEN DALAM CAMPURAN BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN

Oleh

HABIB ILHAM ABDULLAH

Beton normal adalah campuran agregat kasar, agregat halus, air, dan semen hidraulik atau semen *portland*, merupakan komponen dasar dalam industri konstruksi. Di Provinsi Lampung, produksi kelapa sawit yang besar menciptakan limbah abu ketel yang cukup signifikan. Dalam upaya meningkatkan kualitas beton dengan memanfaatkan limbah industri, abu ketel dan *silica fume* bisa menjadi alternatif yang efektif sebagai pengganti sebagian semen. Keduanya mengandung Silikon Dioksida (SiO_2) yang tinggi, membantu dalam proses pengerasan beton. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan berbagai variasi substitusi semen dalam beton normal berbentuk kubus, meliputi persentase penggunaan abu ketel dan *silica fume* yang berbeda. Pengujian dilakukan terhadap waktu pengikatan semen dan kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan abu ketel dan *silica fume* sebagai pengganti semen mampu mempercepat proses pengikatan semen dan menghasilkan beton dengan nilai *slump* yang lebih rendah. Kadar optimum penggunaan abu ketel pada beton kubus umur 28 dan 56 hari adalah 5%, dengan kuat tekan secara berurutan mencapai 29,47 MPa dan 31,29 MPa. Kadar optimum penggunaan *silica fume* pada beton kubus umur 28 hari dan 56 hari adalah 10%, dengan kuat tekan secara berurutan mencapai 28,04 MPa dan 33,40 MPa. Dalam kombinasi, proporsi optimum adalah 85% semen, 5% abu ketel, dan 10% *silica fume*, menghasilkan kuat tekan beton kubus sebesar 28,93 MPa pada umur 28 hari dan 30,67 MPa pada umur 56 hari. Pemanfaatan abu ketel dan *silica fume* sebagai memberikan dampak positif terhadap peningkatan kuat tekan beton, serta dapat memanfaatkan limbah industri secara ekonomis.

Kata kunci: Beton Normal, abu ketel, *silica fume*, waktu pengikatan semen, kuat tekan beton

**PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN
PENGANTI SEBAGIAN SEMEN DALAM CAMPURAN BETON
NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

Oleh

**HABIB ILHAM ABDULLAH
2015011009**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

Judul Skripsi : **PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN DALAM CAMPURAN BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

Nama Mahasiswa : **Habib Tham Abdullah**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011009

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Ir. Laksmi Irianti, M.T.
NIP 19620408 198903 2 001

Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.
NIP 19700430 199703 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil

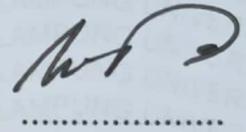
Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

MENGESAHKAN

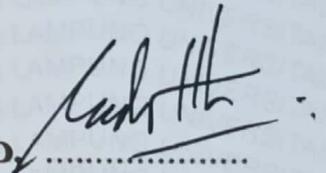
1. Tim Penguji

Ketua : **Ir. Laksmi Irianti, M.T.**



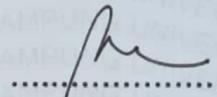
.....

Sekretaris : **Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D.**



.....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng.**



.....

2. Dekan Fakultas Teknik




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **16 April 2024**

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **HABIB ILHAM ABDULLAH**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015011009**

Judul : Pengaruh Abu Ketel dan *Silica Fume* Sebagai
Bahan Pengganti Sebagian Semen Dalam
Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan

Jurusan : **Teknik Sipil**

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, 15 April 2024
Penulis,



HABIB ILHAM ABDULLAH
NPM: **2015011009**

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Habib Ilham Abdullah merupakan anak pertama dari Bapak Mulyadi, S.Pd., M.M. dan Ibu Ns. Gusti Kurnia Wati, S.Kep. Penulis dilahirkan di Kotabumi pada tanggal 8 Desember 2001. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SDN 2 Wonomarto dan lulus pada tahun 2014 kemudian melanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama di SMPN 6 Kotabumi dan lulus pada tahun 2017. Setelah itu, melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas di SMAN 2 Kotabumi dan lulus pada tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis terdaftar sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Pada tahun 2018 penulis aktif sebagai anggota *English Club Competition* (ECC) yang merupakan ekskul di SMAN 2 Kotabumi. Pada tahun 2019 penulis menjabat sebagai ketua umum *English Club Competition* (ECC).

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif di organisasi yakni: sebagai anggota bidang Penelitian dan Pengembangan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) pada tahun 2021 sampai 2022. Pada tahun 2023 penulis menjabat sebagai ketua umum Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) Universitas Lampung. Pada tahun 2023 penulis melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Pampangan, Kecamatan Sekincau, Kabupaten Lampung Barat, Lampung dan penulis melakukan Kerja Praktik (KP) di Proyek pembangunan jembatan penghubung Desa Pujorahayu dengan Desa Lumbirejo, Kecamatan Negeri Katon, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung.

PERSEMBAHAN

Puji Syukur kepada Allah SWT, karena atas limpahan berkah, rahmad, dan karunia-Nya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Ku persembahkan karya ku ini kepada:

Ayah dan Mamah ku tercinta yang selalu mendukung, membimbing, mendoakan, memberi semangat, memotivasi dan hal lainnya yang tak dapat kuungkapkan dengan kata-kata.

Adik ku yang banyak membantu, menemani dan memotivasi agar aku bisa mencapai semua mimpi ku selama ini.

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat berjasa yang selalu membimbing dan mendidikku untuk segera menyelesaikan kewajibanku.

Sahabat dan teman-temanku. Terimakasih karena selalu menemani, mendukung dan memotivasiku selama ini untuk menjadi manusia terbaik dalam hidupku.

Almamaterku Universitas Lampung

KATA INSPIRASI

“Janganlah kamu bersikap lemah dan janganlah pula kamu bersedih hati, padahal kamulah orang-orang yang paling tinggi derajatnya jika kamu beriman.”

(QS. Ali Imran: 139)

Rasulullah SAW bersabda: “Barang siapa yang tidak mensyukuri yang sedikit, maka ia tidak akan mampu mensyukuri sesuatu yang banyak.”

(H.R. Ahmad)

“Cara terbaik untuk mengalahkan seseorang adalah mengalahkannya dengan kesopanan.”

(Umar Bin Khattab)

“Hidup adalah petualangan yang berani atau tidak sama sekali.”

(Helen Keller)

“Menang bukanlah segalanya, tetapi keinginan untuk menang adalah segalanya.”

(Vince Lombardi)

“Kita harus menerima bahwa kita tidak akan selalu membuat keputusan yang tepat, bahwa kita kadang-kadang akan mengacaukannya, memahami bahwa kegagalan bukanlah lawan dari kesuksesan, itu adalah bagian dari kesuksesan.”

(Arianna Huffington)

“Kehidupan yang tidak diuji tidak layak untuk dijalani.”

(Socrates)

“Segala sesuatu yang dapat kamu bayangkan adalah nyata.”

(Pablo Picasso)

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan karunia serta anugerah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “Pengaruh Abu Ketel dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Dalam Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan” dengan tepat waktu.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan, dukungan, bimbingan, dan pengarahan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Plt. Ketua Prodi S-1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku dosen Pembimbing Utama yang memberikan bimbingan, pengarahan dan saran kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.
5. Bapak Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Pembimbing Kedua yang memberikan motivasi saran dan membimbing penulisan skripsi.
6. Ibu Dr. Eng. Ir. Ratna Widayawati, S.T., M.T.IPM., ASEAN Eng. selaku Pembahas atas kesediaannya memberikan kritik dan saran bagi perbaikan skripsi.
7. Bapak Ir. Ashruri, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan.
8. Serta seluruh rekan mahasiswa Jurusan Teknik Sipil UNILA angkatan 2020 yang telah membantu penulis dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari akan keterbatasan pengetahuan dan kemampuan yang dimiliki penulis sehingga masih terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak dan berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Bandar Lampung, 15 April 2024

Penulis,

Habib Ilham Abdullah

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Manfaat Penelitian.....	6
1.6. Hipotesis Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Beton Normal	7
2.2. Material Penyusun Beton	8
2.2.1. Semen PCC (<i>Portland Composite Cement</i>).....	8
2.2.2. Agregat Halus	11
2.2.3. Agregat Kasar	13
2.2.4. Air.....	15
2.3. <i>Silica Fume</i>	17
2.4. Abu Ketel.....	19
2.5. Waktu Pengikatan Semen.....	20
2.6. Perawatan Beton (<i>Curing</i>).....	21
2.7. Pengujian Kuat Tekan	21
2.8. Penelitian Sebelumnya	23
2.8.1. Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi.....	23

2.8.2. Tinjauan Sifat-sifat Mekanik Beton Alir Mutu Tinggi dengan <i>Silica Fume</i> Sebagai Bahan Tambahan	23
2.8.3. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan <i>Fly Ash</i> dan <i>Silica Fume</i> Sebagai Bahan Pengisi.....	24

III. METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan	25
3.2. Peralatan Alat dan Bahan	27
3.2.1. Alat	27
3.2.2. Bahan	29
3.3. Pembuatan Benda Uji	30
3.4. Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar.....	35
3.5. Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>)	35
3.6. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM	36
3.7. Perhitungan Dan Analisis Data	36

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Sifat-Sifat Fisik Material.....	38
4.2. Kebutuhan Material Campuran Beton.....	39
4.3. Hasil Perhitungan Komposisi Material Pengujian Waktu Pengikatan Semen	39
4.4. Hasil Pengujian Waktu Pengikatan Semen	40
4.5. Kelecekan Adukan Beton (<i>Workability</i>).....	48
4.6. Kuat Tekan Beton.....	53

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan.....	64
5.2. Saran	66

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A (PERHITUNGAN *MIX DESIGN*)

LAMPIRAN B (FOTO PENELITIAN)

LAMPIRAN C (LEMBAR ASISTENSI)

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
3.1. Diagram Alir Penelitian	26
4.1. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen Variasi 1	43
4.2. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen Variasi 2.....	45
4.3. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen Variasi 3.....	47
4.4. Hubungan Nilai <i>Slump</i> Beton Terhadap Kadar Abu Ketel	49
4.5. Hubungan Nilai <i>Slump</i> Beton Terhadap Kadar <i>Silica Fume</i>	50
4.6. Hubungan Nilai <i>Slump</i> Beton Terhadap Kadar Abu Ketel + <i>Silica Fume</i>	52
4.7. Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton Terhadap Kadar Abu Ketel	54
4.8. Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton Terhadap Kadar <i>Silica Fume</i>	57
4.9. Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton Terhadap Kadar Abu Ketel + <i>Silica Fume</i>	59

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Susunan Oksida Semen Portland	9
2.2. Komposisi Kimia Semen OPC dan PCC	9
2.3. Senyawa dari Semen Portland.....	9
2.4. Standar Gradasi Agregat Halus	13
2.5. Standar Gradasi Agregat Kasar	15
2.6. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia Dalam Air	17
2.7. Sifat Fisik <i>Silica Fume</i>	19
2.8. Kandungan Senyawa Kimia Dalam Abu Ketel.....	19
2.9. Sifat-sifat Fisik Abu Ketel	20
2.10. Perbandingan Kuat Tekan antara Silinder dan Kubus	22
3.1. Komposisi dan Kode Benda Uji Waktu Pengikatan Semen	31
3.2. Komposisi dan Kode Benda Uji Beton Kubus.....	32
4.1. Hasil Pengujian Material Penyusun Beton.....	38
4.2. Komposisi Kebutuhan Material Per m ³ Beton Kubus Mutu Normal.....	39
4.3. Komposisi Kebutuhan Material Dalam Sebuah Benda Uji Pasta Untuk Pengujian Waktu Pengikatan Semen	40
4.4. Hasil Pengujian Konsistensi Normal Untuk Semua Variasi	42
4.5. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen Variasi 1	43
4.6. Waktu Pengikatan Awal & Akhir Semen Variasi 2.....	44
4.7. Waktu Pengikatan Semen Variasi 3	46
4.8. Nilai <i>Slump</i> Adukan Beton Mutu Normal Variasi 1 Umur 28 Dan 56 Hari...48	
4.9. Nilai <i>Slump</i> Adukan Beton Mutu Normal Variasi 2 Umur 28 Dan 56 Hari...50	
4.10. Nilai <i>Slump</i> Adukan Beton Mutu Normal Variasi 3 Umur 28 Dan 56 Hari	52
4.11. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Normal Variasi 1.....	54

4.12. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Normal Variasi 2.....	56
4.13. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Normal Variasi 3.....	58
4.14. Peningkatan Kuat Tekan Beton 28 Ke 56 Hari.....	61

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton merupakan materi konstruksi yang terdiri dari campuran agregat kasar, agregat halus, semen, air, dan bahan tambahan lainnya. Bahan-bahan pokok untuk membuat beton mudah ditemukan dan tersedia. Salah satu keunggulan penggunaan beton sebagai bahan bangunan adalah kemampuannya untuk dibentuk sesuai dengan kebutuhan di lokasi proyek, bahan-bahan pembentuk relatif tersedia dan pembuatan beton dapat dilakukan oleh para pekerja (Sumajouw dkk., 2014). Pada situasi tertentu, beton dapat diperkaya dengan bahan tambahan seperti *admixture* sesuai dengan kebutuhan, yang bertujuan untuk memodifikasi berbagai karakteristik beton seperti kekuatan pengerasan semen, daya tahan, kelenturan, perubahan volume, ketahanan terhadap air, dan lain sebagainya.

Seiring berjalannya waktu, perkembangan teknologi beton terus meningkat, menghasilkan beton berkualitas baik yang tidak hanya memenuhi permintaan yang semakin tinggi akan beton normal, tetapi juga memperhatikan aspek keberlanjutan dan ramah lingkungan. Perkembangan teknologi menuntut kita untuk melakukan inovasi agar bisa menghasilkan hal-hal baru. Seperti juga penggunaan limbah industri seperti *fly ash*, abu sekam padi, abu ampas tebu, abu kulit kerang, dan tempurung kelapa sawit sebagai komponen tambahan dalam campuran beton (Permatasari dkk., 2022).

Beton yang umum digunakan saat ini adalah beton normal, yang memiliki berat jenis 2200–2500 kg/m³ dengan menggunakan agregat alam yang telah dipecah atau yang belum dipecah. Beton yang berkualitas baik adalah beton

yang memiliki kemampuan untuk menahan kuat desak ketika diberi beban tekanan dengan dipengaruhi oleh komposisi bahan pembentuknya, kemudahan pengerjaan (*workability*), faktor air semen (F.A.S) dan zat tambahan (*admixture*). Beton normal, juga dikenal sebagai beton biasa atau beton konvensional, adalah bahan bangunan yang terbuat dari campuran semen, air, dan agregat (pasir, kerikil, atau batu pecah) yang digunakan secara umum dalam berbagai proyek konstruksi. Beton konvensional adalah salah satu varietas beton yang paling umum diaplikasikan dalam industri konstruksi global.

Dalam upaya menciptakan beton normal yang berkualitas dan ramah lingkungan yang berkelanjutan, beberapa metode dapat diterapkan. Ini termasuk peningkatan kualitas bahan baku, penguatan kekuatan agregat, dan penghalusan butiran semen. Selain itu, peningkatan kualitas beton yang berkelanjutan juga dapat dicapai dengan mengintegrasikan bahan pengganti atau tambahan seperti abu ketel dan *silica fume*.

Untuk mendapatkan beton normal yang berkualitas, diperlukan perancangan dan pengendalian yang cermat terhadap komposisi material yang mencakup unsur semen (*cementitious*), agregat kasar dan halus, air, serta bahan tambahan atau pengganti yang sesuai. Beton berkualitas tinggi dapat dicapai melalui pemilihan kualitas dan ukuran butiran agregat yang akan digunakan, yang akan berdampak pada kekuatan beton yang direncanakan. Penggunaan material seperti semen *portland*, *silica fume*, *fly ash*, abu ketel, dan sisa hasil pembakaran partikel tanah *pozzolan* alami terbukti efektif dalam meningkatkan kekuatan beton. Selain itu, beton normal yang berkualitas juga dapat dicapai dengan mengendalikan proporsi campuran material sesuai dengan target yang diinginkan, serta dilanjutkan dengan perawatan (*curing*) yang baik.

Abu ketel merupakan produk yang dihasilkan dari proses pembakaran cangkang kelapa sawit pada suhu antara 700°C hingga 800°C di dalam dapur

pembakaran (Primandari, 2012). Proses pembakaran ini menghasilkan abu dalam bentuk butiran halus. Berdasarkan uji kimia di laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Unila didapatkan bahwasanya abu ketel memiliki senyawa kimia berupa SiO_2 sebanyak 31,4510%, Fe_2O_3 sebanyak 24,1271%, Al_2O_3 sebanyak 6,7948%, MgO sebanyak 3,0463%, CaO sebanyak 15,2171%, dan pH 9,23% (Irianti dkk., 1998).

Berdasarkan data statistik persebaran luas areal dan produksi komoditas kelapa sawit dinas perkebunan di provinsi lampung, pada tahun 2020, perkebunan kelapa sawit di Provinsi Lampung menempati peringkat ke-13 secara nasional dengan luas area mencapai 196.312 hektar. Ukuran perkebunan kelapa sawit ini mencerminkan jumlah produksi kelapa sawit yang dihasilkan, termasuk limbah dari pembakaran cangkang kelapa sawit yang disebut abu ketel. Menurut (Vitri & Herman, 2019) salah satu limbah pengolahan kelapa sawit dalam jumlah yang cukup besar adalah cangkang kelapa sawit. Cangkang yang di hasilkan mencapai 60% dari produksi minyak.

Menurut (Sebayang, 2011) *Silica fume* merupakan jenis material *pozzolan* yang sangat halus, dominan terdiri dari silika, yang dihasilkan sebagai produk sampingan dalam proses industri metal silikon dari tanur tinggi.

Silica fume merupakan hasil sampingan dari industri silicon metal, memiliki kandungan SiO_2 yang tinggi, dan memiliki tekstur yang sangat halus dalam bentuk butiran mikro silika. Ukuran partikel *silica fume* jauh lebih kecil, sekitar 100 kali lebih kecil dari ukuran partikel semen, dan kandungan SiO_2 -nya mencapai lebih dari 85%. Oleh karena itu, *silica fume* termasuk dalam kategori bahan *pozzoland*. *Silica fume*, yang memiliki butiran lebih halus daripada semen dan kandungan SiO_2 yang tinggi secara kimia, dapat meningkatkan kekuatan beton ketika dimasukkan sebagai bahan tambahan. Pendapat ini beralasan karena secara mekanis, *silica fume* mengisi rongga antara butiran semen, sementara secara kimiawi memberikan sifat hidrolis pada kapur mati yang dihasilkan dari proses hidrasi. Kekuatan tekan optimal

tercapai setelah 56 hari pengerasan beton dengan penambahan *silica fume* sebesar 9% (Sebayang, 2011).

Berdasarkan hasil penelitian di atas, dapat disimpulkan bahwa pencampuran abu ketel dan *silica fume* dalam beton normal dapat dilakukan untuk mempertahankan dan meningkatkan kuat tekan beton. Pendekatan ini memanfaatkan bahan tambahan dari limbah abu ketel dan *silica fume*, menciptakan solusi yang efektif dalam upaya meningkatkan kinerja beton dengan memanfaatkan limbah industri. Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi pemanfaatan abu ketel sebagai pengganti semen, serta penggunaan *silica fume* sebagai bahan tambahan. Penelitian tersebut juga mencakup penambahan zat tambahan lain, seperti serat baja dan komponen lainnya. Selain itu, telah dilakukan sejumlah penelitian yang menggunakan abu ketel sebagai substitusi semen dan *silica fume* sebagai bahan tambahan tanpa adanya penambahan bahan kimia lainnya, dengan variasi persentase yang signifikan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, penulis akan menggunakan abu ketel dan *silica fume* sebagai substitusi sebagian semen dengan tujuan untuk menghasilkan beton mutu normal yang tetap memiliki kekuatan yang optimal, sembari mengurangi konsumsi semen.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penggantian sebagian semen dengan abu ketel dan *silica fume* terhadap waktu pengikatan semen?
2. Bagaimana pengaruh pergantian sebagian semen dengan abu ketel dan *silica fume* dalam beton mutu normal terhadap kuat tekan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh pergantian sebagian semen dengan abu ketel dan *silica fume* terhadap waktu pengikatan semen.
2. Menganalisis pengaruh pergantian sebagian semen dengan abu ketel dan *silica fume* dalam beton mutu normal terhadap kuat tekan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Mutu beton yang direncanakan memiliki K-300 ($f'c$ 24,9 MPa) pada umur beton 28 dan 56 hari.
2. Perhitungan campuran beton normal (*mix design*) menggunakan metode (SNI 7656, 2012).
3. Abu ketel dan *silica fume* digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam ukuran berat.
4. Penelitian ini menguji waktu pengikatan semen dengan menggunakan alat *vicat* guna memperoleh data waktu pengikatan semen akibat variasi penggantian sebagian semen dengan *silica fume* dan abu ketel.
5. Penelitian ini melakukan uji waktu pengikatan semen menggunakan alat *vicat* pada 34 sampel, yang terbagi ke dalam tiga variasi. Variasi pertama terdiri dari 10 sampel, variasi kedua terdiri dari 6 sampel, dan variasi ketiga terdiri dari 8 sampel.
6. Penelitian ini membandingkan kuat tekan beton mutu normal tanpa *silica fume* dan abu ketel terhadap kuat tekan beton mutu normal yang menggunakan bahan tambah *silica fume* dan abu ketel sebagai pengganti sebagian semen (PCC).
7. Penelitian menggunakan benda uji yang berupa kubus dengan ukuran panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm, dengan sampel 72 beton kubus dengan variasi yang masing-masing variasi 6 sampel.

8. Bahan pembuat beton berupa semen PCC dengan merek Semen Tiga Roda, agregat halus dari Gunung Sugih, dan air yang digunakan dari Laboratorium Bahan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu teknologi beton dengan meneliti dampak substitusi sebagian semen oleh abu ketel dan *silica fume* terhadap waktu pengikatan semen dalam campuran beton mutu normal.
2. Memberikan informasi terkait kadar optimum penggunaan abu ketel dan *silica fume* dalam campuran adukan beton mutu normal.

1.6. Hipotesis Penelitian

Penggunaan abu ketel dan *silica fume* sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran beton mutu normal dapat mengurangi konsumsi semen, sementara tetap mempertahankan atau meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan dengan campuran beton mutu normal yang tidak menggunakan abu ketel dan *silica fume*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Normal

Beton merupakan bahan konstruksi yang sering digunakan dalam pembangunan gedung, jembatan, jalan, dan infrastruktur lainnya. Ini adalah material yang terdiri dari campuran agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), atau bahan agregat lainnya yang dicampur dengan air dan semen portland atau semen hidrolik lainnya. Kadang-kadang, bahan tambahan (aditif) kimia atau fisik ditambahkan dalam proporsi tertentu untuk mencapai homogenitas yang diinginkan. Campuran ini mengeras menjadi sebuah kesatuan yang padat melalui reaksi kimia antara semen dan air, menyerupai batuan.

Beton yang umum digunakan saat ini adalah beton normal, yang merupakan campuran agregat kasar, agregat halus, air, serta semen hidrolik atau semen portland lainnya, dengan atau tanpa tambahan bahan yang membentuk massa padat. Beton normal memiliki berat isi sekitar 2200–2500 kg/m³. Kualitas beton yang dihasilkan dipengaruhi oleh desain campuran dan proses pengecoran yang digunakan (Foulhudaan dkk., 2022).

Beton yang berkualitas baik adalah beton yang memiliki kemampuan untuk menahan tekanan secara kuat tanpa mengalami kerusakan ketika diberi beban tekanan, yang dipengaruhi oleh komposisi bahan, kecocokan dalam proses pengerjaan, faktor air semen (F.A.S), dan penggunaan zat tambahan (*admixture*) (Prasetya, 2007).

Kekuatan, keawetan, dan karakteristik beton dipengaruhi oleh bahan dasarnya, rasio bahan, metode pemadatan, dan perawatan selama proses pengerasan. Penggunaan beton yang luas disebabkan oleh ketersediaan bahan yang umum dan kemudahan pengolahan, yang membuatnya cocok untuk berbagai situasi penggunaan. Beton berkualitas adalah beton yang memiliki kekuatan yang tinggi, daya tahan yang baik, dan kedap air.

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-bahan pembentuk beton dan bahan tambahan, yakni abu ketel dan *silica fume*, yang akan diteliti. Bahan-bahan yang membentuk beton terdiri dari:

2.2.1. Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Sesuai dengan (SNI 15-7064, 2004), Semen PCC (*Portland Composite Cement*) merupakan zat pengikat hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen *portland* dan gips bersama-sama dengan satu atau lebih bahan anorganik lainnya, atau melalui pencampuran bubuk semen *portland* dengan bubuk bahan anorganik tambahan. Bahan anorganik tersebut dapat berupa terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), *pozzolan*, senyawa silikat, atau batu kapur, dengan total kandungan bahan anorganik berkisar antara 6% hingga 35% dari massa semen *portland* komposit. (Susanto dkk., 2019).

Komposisi kimia semen portland pada umumnya terdiri dari CaO, SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃, yang merupakan oksida dominan. Sedangkan oksida lain yang jumlahnya hanya beberapa persen dari berat semen adalah MgO, SO₃, Na₂O, dan K₂O. Lihat tabel 2.1.

Tabel 2.1. Susunan Oksida Semen Portland

Oksida	Persen (%)
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 2.2. Komposisi Kimia Semen OPC dan PCC

Oksida	Persentase pada OPC (%)	Persentase pada PCC (%)
Kapur (CaO)	65,21	57,38
Silika (SiO ₂)	20,92	23,04
Alumina (Al ₂ O ₃)	5,49	7,40
Besi (Fe ₂ O ₃)	3,78	3,36

(Sumber: (Pradana dkk, 2016))

Tabel 2.3. 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
Calcium sulfat dihidrat	CaSO ₄ .2H ₂ O	3,5

(Sumber: (Lilies Widodojoko, 2010))

Semen jenis PCC memiliki keunggulan karena memiliki suhu hidrasi yang lebih rendah, memudahkan proses konstruksi, dan menghasilkan permukaan beton yang rata serta halus. Sesuai dengan standar (SNI 15-7064, 2004), Semen PCC dapat dipergunakan dalam beragam proyek konstruksi umum, termasuk pembuatan beton, pemasangan bata, pekerjaan selokan, pembuatan jalan, pagar, dinding, serta

elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, *paving block*, dan lain-lain.

Semen yang digunakan di Indonesia harus memenuhi standar ASTM C150 yang diadopsi dalam SII. 0013-81 (Putra, 2022). Menurut klasifikasi dan persyaratan tersebut, Semen *portland* terbagi menjadi sembilan kategori, yaitu:

1. Semen *Portland* tipe I

Semen *portland* tipe I adalah jenis semen standar yang tidak menunjukkan sifat yang khusus terhadap panas hidrasi maupun kekuatan tekan awal yang tinggi. Umumnya, semen *portland* tipe I digunakan untuk keperluan umum.

2. Semen *Portland* tipe II

Semen *portland* tipe II digunakan dalam pencampuran beton yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi yang moderat. Secara umum, semen ini sering digunakan dalam konstruksi beton di daerah pantai, lepas pantai, dan rawa.

3. Semen *Portland* tipe III

Semen *portland* tipe III diperlukan untuk konstruksi yang membutuhkan kekuatan tekan awal yang tinggi setelah pengerasan. Umumnya digunakan untuk struktur bertingkat tinggi dan bangunan air yang tidak terpapar serangan sulfat.

4. Semen *Portland* tipe IV

Semen *portland* tipe IV merupakan jenis semen yang memiliki tingkat panas hidrasi yang rendah. Biasanya digunakan pada konstruksi beton massif seperti bendungan gravitasi besar.

5. Semen *Portland* tipe V

Semen *portland* tipe V merupakan jenis semen yang diperlukan ketahanannya terhadap kadar sulfat tinggi ($> 0,2\%$), seperti pada aplikasi beton untuk instalasi pengolahan limbah.

6. *Super Mansory Cement*

Super Mansory Cement adalah jenis semen yang optimal digunakan hanya untuk struktur beton dengan mutu tertinggi K-225.

7. *Oil Well Cement, Class G-HSR (High Sulfate Resistance)*

Oil well cement adalah jenis semen yang digunakan khusus untuk konstruksi sumur minyak dan gas alam pada kedalaman dan suhu tertentu.

8. *Portland Composite Cement (PCC)*

Berdasarkan (SNI 15-7064, 2004), semen *portland* komposit merupakan bahan pengikat hidrolis yang diperoleh dari penggilingan terak semen *portland*, gips, dan satu atau lebih bahan anorganik, memiliki kadar total antara 6 hingga 35%.

9. *Portland Pozzolan Cement (PPC)*

Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional SNI 03-02, 2014), semen *pozzolan* merupakan campuran antara semen *portland* dan *pozzolan* halus dalam semen hidrolis, dimana kadar *pozzolan* 6% - 40% massa semen *portland pozzolan*.

2.2.2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan jenis agregat yang terdiri dari pasir alami yang dihasilkan melalui proses alami dari batu-batuan atau pasir buatan yang dihasilkan dengan menggunakan peralatan pemecah batu, dengan ukuran butiran maksimum 4,75 mm. Pasir yang berkualitas adalah yang memiliki butiran yang tajam dan kasar, dengan kadar lumpur yang tidak melebihi 5%, serta bersifat kekal artinya tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan (Prasetyo, 1993).

Berdasarkan (Putra, 2022) terdapat beberapa persyaratan untuk pasir atau agregat halus yang optimal sebagai bahan dasar dalam pembuatan beton atau bahan bangunan lainnya, diantaranya:

- 1) Butiran agregat halus harus terdiri dari butiran yang tajam dan keras, dengan indeks kekerasan yang kurang dari 2,2.
- 2) Pasir atau agregat halus tidak boleh memiliki kandungan lumpur melebihi 5%. Jika kandungan lumpur pada agregat halus atau pasir melebihi 5%, maka pasir harus dicuci hingga kandungan lumpur mencapai di bawah 5%.
- 3) Apabila dites dengan larutan garam sulfat jenuh, sifatnya tetap seperti berikut ini:
 - a) Jika diberikan natrium sulfat bagian hancur maksimal 12%
 - b) Jika diberikan magnesium sulfat bagian halus maksimal 10%
- 4) Pasir atau agregat halus seharusnya tidak memiliki kandungan bahan organik yang berlebihan, yang dapat diuji melalui percobaan warna menggunakan larutan jenuh NaOH 3% menurut metode Abrans-Harder.
- 5) Pasir terbentuk dari beragam butiran dengan ukuran yang bervariasi, di mana butiran yang lebih besar memiliki modulus kehalusan berkisar antara 2,5 hingga 3,8.
- 6) Respon pasir terhadap alkali perlu bersifat nonreaktif agar beton dapat mencapai tingkat keawetan yang optimal.
- 7) Pasir laut hanya dapat digunakan sebagai agregat halus dalam mutu beton tertentu, dengan izin resmi dari lembaga pemerintah yang mengawasi bahan bangunan.
- 8) Persyaratan pasir pasangan harus dipenuhi untuk agregat halus yang akan digunakan untuk plesteran dan spesi terapan.
- 9) Berada di ambang batas gradasi yang optimal.

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

- 1) Partikel yang rentan pecah.
- 2) Mengandung zat organik.
- 3) Partikel kecil yang mengambang di dalam 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 2.4. Standar 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 μ m)	40-75	40-75
No.50 (300 μ m)	10-35	20-40
No.100 (150 μ m)	2-15	10-25
No. 200 (75 μ m)	0	0-10

(Sumber: (SNI 03-6820-2002))

2.2.3. Agregat Kasar

Agregat kasar ialah jenis kerikil yang timbul dari proses disintegrasi alamiah batuan atau batu pecah dari industri pemecah batu dengan ukuran antara 5 mm hingga 40 mm. Agregat kasar dipakai sebagai bahan pengisi dalam pencampuran beton, sesuai standar ASTM C33 dan PBI 1971 Bagian 3.4 dalam (Putra, 2022), agregat kasar yang baik harus memenuhi beberapa syarat berikut:

1. Kekerasan pada butir-butir agregat diselidiki dengan menggunakan alat uji *Rudeloff* atau dengan mesin pengujian *Los Angeles*, di mana agregat kasar tidak boleh kehilangan beratnya lebih dari 50%.
2. Berat jenis (*Specific Gravity*).
3. Pengujian berat jenis agregat kasar dilaksanakan dengan tujuan memperoleh nilai *bulk specific gravity*, *bulk specific gravity SSD*, *apparent specific gravity*, dan *absorpsi*. Rentang nilai *bulk specific*

gravity SSD yang diharapkan untuk agregat kasar adalah antara 2,5 hingga 2,7 gr/cc.

4. Agregat kasar terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori. Agregat kasar yang memiliki porositas akan menyebabkan beton mudah terperosok air. Selain itu, penggunaan agregat kasar yang terdiri dari butir-butir pipih hanya diperbolehkan jika persentasenya tidak melebihi 20% dari total berat agregat.
5. Agregat kasar harus memenuhi syarat tidak mengandung lumpur melebihi 1%. Jika terdapat kandungan lumpur yang melebihi batas tersebut, maka agregat kasar harus dibersihkan hingga kandungan lumpur kurang dari 1%.

Persyaratan mutu agregat kasar yang mampu menghasilkan beton yang optimal berdasarkan (Putra, 2022), yaitu:

a) Porositas rendah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendahnya porositas akan menghasilkan campuran yang seragam, artinya memiliki keteraturan atau keseragaman yang baik dalam hal kekuatan tekan maupun nilai *slump*nya. Idealnya, penggunaan agregat kasar dengan tingkat penyerapan air kurang dari 1% akan sangat menguntungkan. Jika tidak, ini dapat menyulitkan pengendalian total kadar air pada beton segar dan berpotensi menyebabkan ketidakaturan dan variasi besar dalam kualitas serta nilai *slump* beton yang dihasilkan. Oleh karena itu, penggunaan sensor kadar air secara ketat pada setiap kelompok agregat yang akan digunakan adalah langkah yang mutlak diperlukan.

b) Bentuk fisik agregat.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan batu pecah berbentuk kubikal dan tajam menghasilkan mutu beton yang lebih baik daripada menggunakan kerikil bulat. Hal ini disebabkan oleh kemampuan bentuk kubikal dan tajam untuk memberikan daya lekat mekanik yang lebih baik antara batuan dan mortar.

c) Ukuran maksimum agregat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan agregat dengan ukuran kurang dari 15 mm dapat meningkatkan mutu beton (Larrard, 1990) dalam (Pujiyanto, 2010). Namun penggunaan agregat kasar berukuran maksimum 25 mm tetap menunjukkan tingkat keberhasilan yang baik dalam pembuatan beton berkualitas tinggi.

d) Bersih dan kuat tekan hancur yang tinggi.

e) Gradasi yang baik dan teratur (diambil dari sumber yang sama).

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

Tabel 2.5. Standar Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan				% Lolos Saringan		
(Ayakan)				Ukuran Maks 10 mm	Ukuran Maks 20 mm	Ukuran Maks 40 mm
mm	SNI	ASTM	inch			
75,0	76	3 in	3,00			100-100
37,5	38	1 ½ in	1,50		100-100	95-100
19,0	19	¾ in	0,75	100-100	95-100	35-70
9,5	9,6	⅜ in	0,3750	50-50	30-100	10-40
4,75	4,8	no.4	0,1870	0-10	0-10	0-5

2.2.4. Air

Air adalah bahan dasar yang esensial dalam proses pembuatan beton. Penggunaannya diperlukan untuk menginisiasi reaksi kimia dengan semen, yang menghasilkan pengikatan antara pasta semen dan agregat saat proses pengerasan, sementara juga berfungsi sebagai pelumas dalam campuran kerikil, pasir, dan semen untuk mempermudah proses pengerjaan dan pemadatan (*workability*). Menurut Peraturan Beton Indonesia tahun 1971 dalam (Putra, 2022) ada beberapa syarat yang harus dipenuhi untuk air yang akan dipakai untuk pembuatan beton, yaitu:

- 1) Air harus bebas dari minyak, asam, alkali, garam, materi organik, atau zat-zat lain yang berpotensi merusak struktur beton atau baja tulangan.
- 2) Jika mengalami keraguan pada air yang akan digunakan, disarankan membawa sampel air yang akan digunakan ke lembaga pemeriksaan bahan-bahan untuk diuji.
- 3) Jika tidak memungkinkan untuk melakukan pengecekan di lembaga yang dituju, maka air dapat digunakan dalam campuran beton dengan persyaratan bahwa air yang ditambahkan ke campuran semen memiliki kekuatan tekan minimal 90% dari kekuatan semen yang dicampur dengan air suling pada usia beton 7 hari dan 28 hari.

Kekuatan beton dan daya tahannya berkurang jika air mengandung kotoran. Pengaruh pada beton diantaranya pada lamanya waktu ikatan awal serta kekuatan beton setelah mengeras. Kehadiran lumpur dalam air dengan kadar di atas 2 gram/liter dapat mengurangi kekuatan beton. Air dapat memperlambat pembentukan ikatan awal pada beton, sehingga beton akan belum mencapai kekuatan optimal dalam rentang waktu 2-3 hari. Natrium karbonat dan potasium, jika terdapat dalam konsentrasi yang tinggi, dapat mempercepat pembentukan ikatan awal, namun konsentrasi yang berlebihan akan menyebabkan penurunan kekuatan beton.

Air yang dipergunakan dalam pencampuran beton harus terjaga kebersihannya dan bebas dari kandungan minyak, alkali, asam, zat organik, atau bahan lain yang dapat memengaruhi kinerja beton. Reaksi air dengan semen menghasilkan CSH dan CaOH, dimana kandungan CaOH yang tinggi dapat merusak struktur tulangan dalam beton. Oleh karena itu, untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan akibat kandungan CaOH yang berlebihan, air yang digunakan harus memenuhi standar kualitas yang ditentukan.

Berdasarkan (ASTM C 1602, 2006) kriteria kandungan zat kimia dalam air harus memenuhi batasan konsentrasi yang ditetapkan dalam campuran beton, dapat dilihat pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia Dalam Air

No	Kandungan Unsur Kimia	Konsentrasi Maksimum (ppm)
1	Chlorida (CL^-)	500
	Untuk Beton Prategang	
2	Untuk Beton Bertulang	1.000
	Sulfat (SO_4)	3.000
3	Alkali ($Na_2O + 0,658 K_2O$)	600
4	Total Solid	50.000

(Sumber: (ASTM C 1602, 2006))

2.3. *Silica Fume*

Silica fume adalah hasil samping dari proses pemurnian silika dengan menggunakan batu bara dalam tungku listrik tinggi ketika membuat campuran silikon atau ferrosilikon (Silica Fume Association (2005), 2014). Partikel *silica fume* yang sangat halus berbentuk butiran kecil, umumnya dikenal sebagai mikro silika, memiliki ukuran kurang dari 0,1 mikrometer, yang lebih kecil dibandingkan dengan ukuran standar semen *portland* (Tarru, 2018). Sehingga, *silica fume* mempunyai kapasitas untuk mengisi ruang kosong di dalam beton. *Silica fume* mengandung kadar SiO_2 yang tinggi, berbentuk bulat, dan memiliki diameter yang sangat kecil, yakni hanya sekitar 1/100 dari diameter semen (Silica Fume Association, 2005). *Silica fume* yang mengandung lebih dari 85% SiO_2 dapat digolongkan sebagai *pozzolan*. Kandungan tinggi SiO_2 ini menyebabkan reaksi hidrasi antara air dan semen menghasilkan $Ca(OH)_2$. $Ca(OH)_2$ tersebut berinteraksi dengan SiO_2 untuk membentuk C-S-H, yang berdampak pada kekerasan beton (Tarru, 2018).

Menurut *American Concrete Institute* (ACI), ketika sekitar 15% dari total semen dalam campuran beton digantikan dengan *silica fume*, terdapat sekitar 2.000.000 butir *silica fume* untuk setiap butir semen (*American Concrete*

Institute, 1996). Dengan kata lain, *silica fume* dapat menggantikan sebagian semen dalam proporsi yang ditentukan. Selain itu, berkat ukurannya yang sangat kecil, *silica fume* juga berfungsi sebagai pengisi di antara partikel-partikel semen dalam campuran beton.

Pemilihan penggunaan *silica fume* sebagai *mineral admixture* pada campuran beton memiliki keunggulan-keunggulan diantaranya sebagai berikut:

1. Memperkuat kuat tekan beton;
2. Meningkatkan kekuatan lentur beton;
3. Memperbesar modulus elastisitas beton;
4. Mengecilkan regangan beton;
5. Meningkatkan durabilitas beton terhadap serangan unsur kimia;
6. Mencegah reaksi *alkali silika* dalam beton;
7. Meningkatkan kepadatan (*density*) beton;
8. Meningkatkan ketahanan terhadap abrasi dan korosi;
9. Menyebabkan penurunan suhu beton yang dapat mencegah retak pada struktur beton.

Meskipun *silica fume* memiliki beberapa keunggulan dalam meningkatkan kualitas beton, namun terdapat juga beberapa kekurangan yang perlu diperhatikan. Hal ini meliputi masalah *handling*, risiko kesehatan, air *entrainment*, *plastic shrinkage*, dan kontrol kualitas. *Silica fume* merupakan material yang sangat halus dan rentan terhadap dispersi oleh angin, sehingga perlu dilakukan dengan hati-hati dalam proses pengangkutan, penyimpanan, dan pencampuran.

Berdasarkan spesifikasi dari (Silica Fume Association, 2005), sifat fisik *silica fume* dapat dilihat pada tabel 2.7.

Tabel 2.7. Sifat Fisik *Silica Fume*

Sifat	Spesifikasi
Ukuran Butiran	< 1 μm
Berat Volume Produksi	130 – 430 kg/m^3
Berat Volume Dipadatkan	480 – 720 kg/m^3
Berat Jenis	2,2
Luas Permukaan	15.000 – 30.000 m^2/kg

(Sumber: (*Silica Fume Association*, 2005).

2.4. Abu Ketel

Abu ketel merupakan limbah dari kelapa sawit yang dihasilkan melalui pembakaran cangkang atau tempurung kelapa sawit pada suhu antara 700°C hingga 800°C (Primandari, 2012). Proses pembakaran ini menghasilkan partikel-partikel halus yang dikenal sebagai abu. Hasil uji kimia di Laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Universitas Lampung tahun 1998 dalam (Irianti dkk., 1998) menunjukkan bahwa abu ketel mengandung berbagai senyawa kimia, sebagaimana tercantum dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Kandungan Senyawa Kimia Dalam Abu Ketel

Kandungan Senyawa	Persentase Kandungan (%)
SiO_2 (<i>Silikon Dioksida</i>)	31,4510
Fe_2O_3 (<i>Besi III Oksida</i>)	24,1271
Al_2O_3 (<i>Aluminium Oksida</i>)	6,7948
MgO (<i>Magnesium Oksida</i>)	3,0463
CaO (<i>Kalsium Oksida</i>)	15,2171
pH (Derajat Keasaman)	9,23

(Sumber: (Irianti dkk., 1998))

Abu ketel mengandung sejumlah besar senyawa *Silikon Dioksida* (SiO_2). *Silikon Dioksida* (SiO_2) memiliki peran penting dalam pembentukan Kalsium Silikat Hidrat (CSH). Hidrasi air dan semen menghasilkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, suatu substansi yang larut dalam air. $\text{Ca}(\text{OH})_2$, atau kalsium hidroksida, berinteraksi dengan *Silikon Dioksida* (SiO_2) untuk membentuk kalsium silikat hidrat (CSH), yang berperan dalam menentukan kekuatan beton (Tarru, 2018).

Abu ketel tidak hanya memiliki sifat kimia, tetapi juga sifat fisiknya. Sifat fisik abu ketel telah diteliti di Laboratorium Bio Kimia FMIPA Universitas Lampung dalam (Irianti dkk., 1998) adalah sebagai berikut:

Tabel 2.9. Sifat-sifat Fisik Abu Ketel

No	Sifat Fisik	Keterangan
1	Warna	Hitam, abu-abu tua
2	Berat Jenis	2,015 gr/cm ³
3	Berat Volume	0,7-0,8 gr/cm ³
4	Kehalusan	2891,27cm ² /gr

(Sumber: (Irianti dkk., 1998))

2.5. Waktu Pengikatan Semen

Waktu pengikatan semen adalah interval waktu yang diperlukan bagi semen untuk mengeras setelah bereaksi dengan air hingga mencapai keadaan cukup keras untuk menahan tekanan. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan durasi yang diperlukan semen untuk mencapai kekakuan setelah proses bereaksi dengan air dan pembentukan pasta semen (Arianto dkk., 2013). Metode pengujian pengikatan awal menggunakan standar (SNI 15-2049, 2004). Waktu pengikatan semen memiliki dua komponen, yakni waktu pengikatan awal dan waktu pengikatan akhir. Evaluasi terhadap waktu pengikatan hanya dapat dilakukan setelah mencapai konsistensi normal semen. Konsistensi normal dianggap tercapai ketika jarum penetrasi mencapai 10 ± 1 mm, sementara untuk waktu pengikatan awal, pengukuran dilakukan pada 25 ± 1 mm. Standar *setting time* untuk semen PCC adalah SNI 15-2049-2004 yang menyatakan bahwa waktu pengikatan awal minimum adalah 45 menit dan waktu pengikatan akhir adalah maksimum 375 menit (Nasution dkk., 2019).

2.6. Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton, yang disebut juga *curing*, adalah prosedur yang bertujuan untuk menjaga kelembaban beton dan mencegah retak saat mengering. Dalam konteks perawatan beton di laboratorium, ada dua metode yang dapat digunakan, yaitu dengan penguapan (*steaming*) atau perendaman. Tujuan utama dari perawatan ini adalah untuk melindungi beton dari beberapa masalah berikut:

- 1) Menghilangnya banyak air-semen pada waktu-waktu pengerasan (*setting time concrete*)
- 2) Menghilangnya air akibat penguapan yang terjadi pada hari-hari pertama
- 3) Perbedaan suhu antara lingkungan beton dengan beton terlalu jauh.

2.7. Pengujian Kuat Tekan

Aspek yang paling penting dalam beton adalah kekuatan tekan yang dimilikinya. Kekuatan tekan beton meningkat seiring bertambahnya umur beton, mencapai puncaknya pada umur 28 hari. Penentuan nilai kekuatan tekan beton dapat dilakukan melalui pengujian di laboratorium atau di lapangan. Pengujian kuat tekan beton di laboratorium melibatkan pembuatan sampel kubus atau silinder. Perbandingan kuat tekan silinder dan kubus memiliki perbedaan relatif, sesuai dengan ISO *Standard* 3893-1977 yang dijelaskan dalam buku Ilmu Bahan Bangunan (Panennungi & Pertiwi, 2018). Perbandingan kuat tekan antara silinder dan kubus disajikan pada tabel 2.10.

Tabel 2.10. 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))

Umumnya, beton akan mencapai 70% kekuatan tekan pada usia 7 hari dan mencapai antara 85% hingga 90% pada usia 14 hari, sesuai dengan kuat tekan yang direncanakan untuk mencapai pada usia 28 hari (Panennungi & Pertiwi, 2018). Menurut (SNI 1974, 2011) pembebanan beton pada pengujian kuat tekan termasuk dalam pembebanan statik monotorik dengan menggunakan tes tekan (*compressive test*). Beban yang aktif akan terus terdistribusi melalui pusat berat. Maka rumus dari kuat tekan beton dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$f'c = P/A$$

Keterangan:

$f'cr$ = Kuat Tekan Beton (Mpa)

P = Gaya Tekan Maksimum (N)

A = Luas Penampang Benda Uji (mm^2)

2.8. Penelitian Sebelumnya

2.8.1. Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi

Penelitian sebelumnya mengenai pengaruh abu ketel terhadap perilaku beton mutu tinggi telah dilakukan oleh Irianti dkk. (1998). Penelitian ini memanfaatkan sampel beton berbentuk silinder yang memiliki diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Berbagai persentase abu ketel digunakan sebagai substitusi semen, yaitu 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Total sampel yang diuji dalam penelitian mencapai 75 beton silinder dengan tiga sampel untuk setiap variasi.

Temuan penelitian menunjukkan bahwa beton yang belum mencapai usia 28 hari tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kekuatan. Hal ini disebabkan oleh efek penambahan abu ketel dalam campuran beton yang dapat memperlambat proses pengerasan. Namun, pada usia 56 hari, kekuatan beton dengan penambahan abu ketel mengalami peningkatan dibandingkan dengan campuran beton tanpa abu ketel. Peningkatan kekuatan tekan beton berkisar antara 2,67% hingga 20,92%, dengan peningkatan tertinggi terjadi pada campuran dengan kadar abu ketel sebesar 10%.

2.8.2. Tinjauan Sifat-sifat Mekanik Beton Alir Mutu Tinggi dengan *Silica Fume* Sebagai Bahan Tambahan

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sebayang (2011) telah melakukan penelitian mengenai karakteristik mekanik beton alir berkualitas tinggi dengan penggunaan *silica fume* sebagai bahan tambahan dilakukan. Dalam penelitian ini, sampel silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm digunakan dengan variasi persentase *silica fume* sebesar 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15% terhadap berat semen. Sampel uji akan diuji pada empat periode waktu yang berbeda, yaitu pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *slump* beton pada semua tingkat penambahan *silica fume* dalam campuran melebihi 190 mm atau 19 cm, kecuali pada tingkat 15% *silica fume*. Penggunaan *silica fume* dalam campuran beton alir berkualitas tinggi secara umum mengurangi kecenderungan campuran untuk mengalir. Waktu pengikatan awal dan akhir beton menjadi lebih lambat seiring dengan peningkatan kandungan *silica fume*. Peningkatan kekuatan tekan terlihat mulai dari umur 7 hari, mencapai puncaknya pada umur 56 hari, mencapai 51,35 MPa, ketika penggunaan *silica fume* mencapai 9% dari berat semen.

2.8.3. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan *Fly Ash* dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengisi

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Putra (2022) telah mengeksplorasi penggunaan *fly ash* dan *silica fume* sebagai bahan pengisi dalam investigasi kuat tekan beton mutu tinggi. Metodologi ini melibatkan penggunaan sampel uji silinder berukuran 15 cm dalam diameter dan 30 cm dalam tinggi, dengan total 48 sampel uji yang terdiri dari 8 variasi. Variasi dalam kadar *fly ash* berkisar antara 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen, sementara penggunaan *silica fume* berkisar pada 5% dan 10% sebagai bahan tambahan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran beton yang memanfaatkan *fly ash* dan *silica fume* menunjukkan penurunan tingkat *slump* dibandingkan dengan campuran beton tanpa bahan tambahan tersebut. Dari aspek kuat tekan, nilai tertinggi tercatat pada campuran dengan kadar *fly ash* 15% dan *silica fume* 5%, dengan nilai kuat tekan mencapai 41,48 MPa pada umur 28 hari, dan 47,03 MPa pada umur 58 hari. Penemuan ini menyarankan bahwa proporsi optimal untuk campuran beton adalah 15% *fly ash* dan 5% *silica fume*.

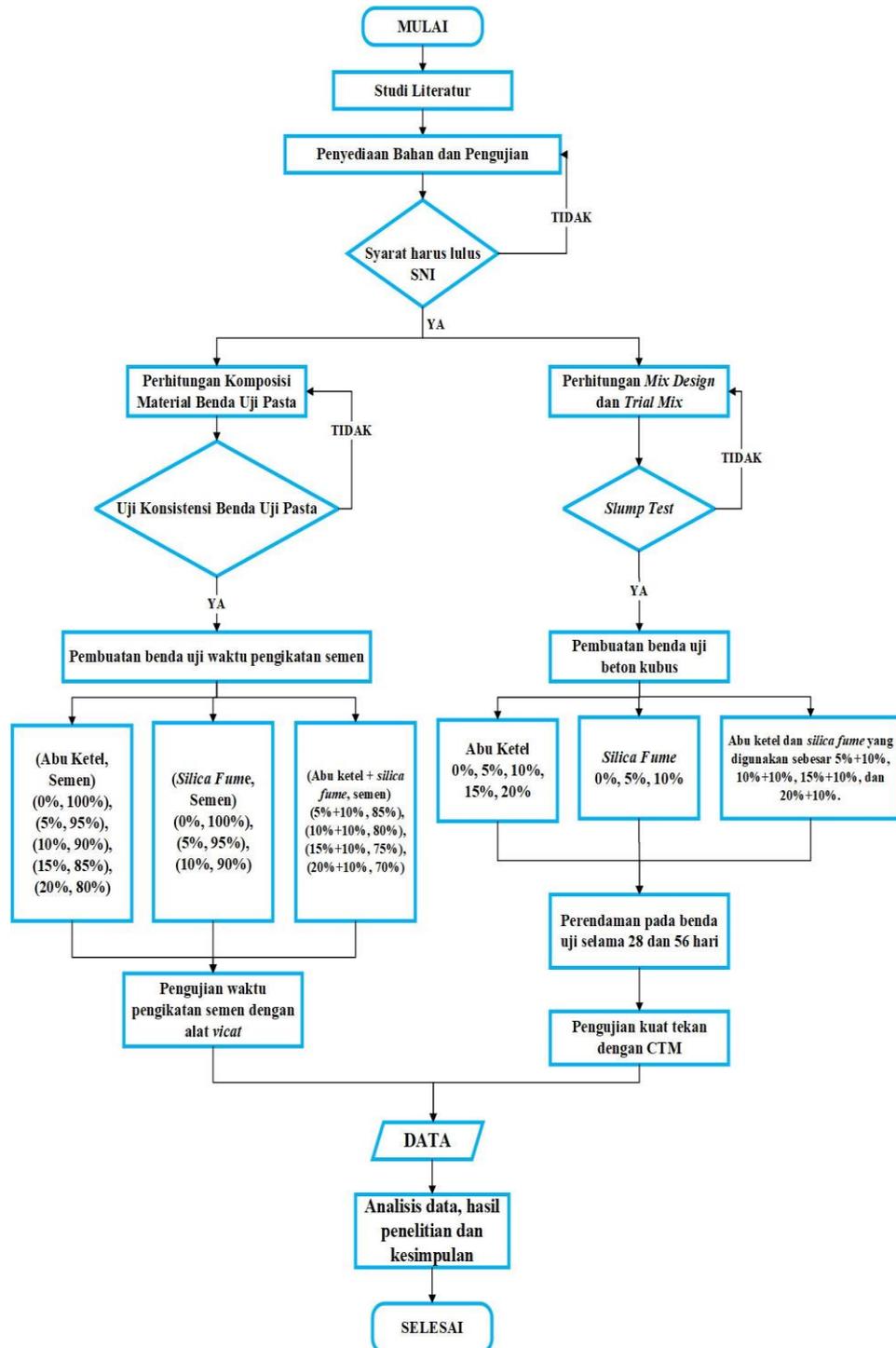
III. METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Penelitian ini akan menerapkan metode eksperimental dengan melakukan pengujian laboratorium untuk mengumpulkan data dan hasil penelitian. Variasi yang digunakan mencakup penggunaan abu ketel dengan persentase 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% berdasarkan berat semen, variasi penggunaan *silica fume* dengan persentase 5% dan 10% berdasarkan berat semen, serta kombinasi abu ketel dan *silica fume* dengan persentase 5%+10%, 10%+10%, 15%+10%, dan 20%+10% berdasarkan berat semen. Semua variasi tersebut akan digunakan sebagai substitusi untuk semen dalam beton mutu normal. Penelitian ini akan melakukan pembuatan benda uji untuk pengujian waktu pengikatan semen, selain itu penelitian ini akan menggunakan sampel berbentuk kubus dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 15 cm untuk pengujian kuat tekan pada umur 28 hari dan 56 hari.

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung. Prosesnya meliputi studi literatur, persiapan peralatan dan bahan, serta pengecekan karakteristik bahan sesuai SNI. Setelah memenuhi syarat SNI, dilakukan perhitungan komposisi material untuk pembuatan benda uji pasta yang kemudian dilakukan uji konsistensi, jika uji konsistensi sudah memenuhi persyaratan maka dapat dilakukan pengujian waktu pengikatan semen. Selain itu, dilakukan *mix design* dan *trial mix*. Apabila nilai *slump* sesuai target, dilanjutkan dengan pembuatan benda uji, baik beton kubus. Uji pasta mencakup waktu pengikatan semen, sementara beton kubus akan dirawat (*curing*) hingga mencapai umur 28 dan 56 hari sebelum diuji kuat tekan dengan CTM

(*Compression Testing Machine*). Data hasil penelitian dianalisis untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen terhadap waktu pengikatan semen dan kuat tekan beton kubus. Alur penelitian tergambar dalam diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.

3.2. Peralatan dan Bahan

Dalam melakukan penelitian ini, perlu dilakukan terlebih dahulu persiapan seluruh peralatan dan bahan yang akan digunakan. Pada penelitian ini, alat dan bahan yang dibutuhkan adalah:

3.2.1. Alat

a. Oven

Sebuah oven merupakan perangkat yang dipergunakan untuk mengeringkan bahan material yang akan diuji. Oven yang diterapkan dalam eksperimen ini memiliki kemampuan suhu maksimum hingga 110°C dan daya sebesar 2800 Watt.

b. Satu set saringan

Dalam penelitian ini, digunakan satu rangkaian saringan dengan berbagai diameter saringan, 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, dan pan. Alat ini digunakan untuk melakukan pemisahan antara agregat halus dan agregat kasar sesuai dengan gradasi yang diperlukan.

c. Timbangan

Timbangan adalah perangkat yang dipakai untuk mengukur berat bahan yang akan digunakan. Alat timbang yang digunakan dalam penelitian ini merupakan timbangan digital elektronik dengan kapasitas 30 kg dan akurasi 0,1 gram.

d. Piknometer

Piknometer adalah perangkat yang digunakan dalam pengujian kandungan zat organik dan densitas agregat halus.

e. Gelas Ukur 1000 cc

Gelas ukur berkapasitas 1000 cc adalah alat pengukur yang digunakan untuk mengukur volume air sesuai dengan persyaratan analisis kadar lumpur dan analisis berat jenis agregat halus (*Specific Gravity*).

f. Cetakan kerucut pasir

Kerucut pasir adalah perangkat yang digunakan untuk menilai kondisi pasir dalam keadaan SSD (*Saturated Surface Dry*).

g. Bejana silinder

Bejana silinder merupakan peralatan yang dipergunakan dalam pengujian berat jenis pada agregat halus dan kasar. Terdapat dua bejana yang digunakan, yakni bejana dengan kapasitas 5 liter untuk mengukur berat jenis agregat halus, dan bejana berkapasitas 10 liter untuk mengukur berat jenis agregat kasar.

h. *Concrete mixer*

Pada penelitian ini, digunakan alat pengaduk beton yang dikenal dengan sebutan *concrete mixer*. *concrete mixer* ini memiliki kapasitas maksimal $0,125 \text{ m}^3$ dan beroperasi dengan kecepatan 20-30 putaran per menit. Alat ini digunakan untuk mencampur semua bahan secara homogen.

i. Satu set alat *slump test*

Alat yang digunakan adalah satu set kerucut *Abrams* dengan diameter bagian atas sekitar 102 mm, diameter bagian bawah sekitar 203 mm, tinggi sekitar 305 mm, dan *base plate* dengan ketebalan sekitar 3 mm serta berukuran 900 x 900 mm. Alat ini digunakan dalam pengujian *Workability* beton mutu tinggi yang telah memenuhi persyaratan tes *slump*.

j. Meteran

Alat meteran digunakan dalam mengukur tinggi *slump test* pada pengujian *slump test* beton mutu tinggi

k. Cetakan benda uji

Cetakan benda uji merupakan perangkat yang dipergunakan untuk membentuk beton sesuai dengan tuntutan bentuk dan keperluan tertentu. Dalam penelitian ini, digunakan cetakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm.

l. Bak perendam

Bak perendam adalah perangkat yang digunakan dalam perawatan beton untuk mempertahankan kelembaban dan mencegah kehilangan air yang cepat dari beton.

m. *Compression testing machine* (CTM)

Compression testing machine (CTM) adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur kekuatan tekan beton. *Compression testing machine* (CTM) yang digunakan memiliki kemampuan beban maksimum sebesar 3000 kN dan merupakan produk dari merek CONTROLS.

n. Peralatan *vicat*

Peralatan *vicat* digunakan untuk mengetahui konsistensi, waktu pengikatan awal dan waktu pengikatan akhir semen.

o. Alat bantu

Peralatan adalah perangkat yang dipergunakan untuk mempermudah dan melancarkan penelitian, seperti stamper, kode warna, sekop, sendok semen, ember, kontainer, kereta dorong, *stopwatch*, wadah pengukur, dan alat tulis.

3.2.2. Bahan

a. Semen PCC

Semen yang digunakan dalam penelitian ini merupakan semen tipe PCC dengan merek Tiga Roda. Semen ini diperoleh dari sebuah toko dalam keadaan tertutup dan dikemas dalam sak berisi 40 kg.

b. Agregat halus

Dalam penelitian ini, agregat halus yang digunakan berasal dari Gunung Sugih, Lampung Tengah, dan harus mematuhi standar SNI dalam sejumlah uji, termasuk pengukuran kadar air, berat jenis, penyerapan (absorpsi), kadar lumpur, gradasi agregat halus, berat jenis, dan kandungan zat organik pada pasir.

c. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari Tanjung, Lampung Selatan, dengan ukuran maksimum 19 mm. Agregat yang digunakan harus mematuhi standar sesuai SNI, termasuk pengujian kadar air agregat kasar, gradasi agregat kasar, berat jenis, penyerapan (absorpsi), dan berat volume agregat kasar.

d. *Silica fume*

Pada penelitian ini, *Silica fume* digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen pada campuran beton dengan proporsi 5% dan 10% terhadap berat semen.

e. Abu ketel

Abu ketel yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT. Perkebunan Nusantara (PTPN 7) dengan variasi kandungan sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dari berat semen sebagai bahan pengganti sebagian semen.

3.3. Pembuatan Benda Uji

Setelah merencanakan campuran secara akurat, langkah selanjutnya adalah membuat benda uji. Benda uji yang akan dihasilkan berbentuk campuran semen yang digantikan sebagian oleh abu ketel dan *silica fume* untuk dapat dilakukannya pengujian waktu pengikatan awal semen dari masing-masing variasi campuran semen yang digantikan oleh abu ketel dan *silica fume* dengan alat *vicat*.

Tabel 3.1. Komposisi dan Kode Benda Uji Waktu Pengikatan Semen

No	Kode Benda Uji Pasta	Persentase Semen	Persentase Abu ketel	Persentase <i>Silica Fume</i>	Jumlah Sampel
1	ptc 0	100%	0%	0%	2 buah
2	pak 1	95%	5%	0%	2 buah
3	pak 2	90%	10%	0%	2 buah
4	pak 3	85%	15%	0%	2 buah
5	pak 4	80%	20%	0%	2 buah
6	psf 1	95%	0%	5%	2 buah
7	psf 2	90%	0%	10%	2 buah
8	pas 1	85%	5%	10%	2 buah
9	pas 2	80%	10%	10%	2 buah
10	pas 3	75%	15%	10%	2 buah
11	pas 4	70%	20%	10%	2 buah
JUMLAH					22 buah

Keterangan tabel:

- a. ptc = pasta tanpa campuran
Kode “ptc” adalah kode untuk benda uji pasta tanpa substitusi sebagian semen dengan abu ketel + *silica fume*.
- b. pak = pasta abu ketel.
Kode “pak” adalah kode untuk benda uji pasta dengan substitusi sebagian semen menggunakan abu ketel.
- c. psf = pasta *silica fume*.
Kode “psf” adalah kode untuk benda uji pasta dengan substitusi sebagian semen menggunakan *silica fume*.
- d. pas = pasta abu ketel + *silica fume*.
Kode “pas” adalah kode untuk benda uji pasta dengan substitusi sebagian semen menggunakan variasi abu ketel + *silica fume*.

Benda uji yang akan dibuat berupa beton kubus 15x15x15 cm untuk pengujian kuat tekan. Terdapat tiga kategori benda uji yang akan diuji pada umur 28 dan 56 hari. Data pengujian dijelaskan dalam tabel 3.2.

Tabel 3.2. Komposisi dan Kode Benda Uji Beton Kubus

No	Kode Benda Uji Beton	Persentase Semen	Persentase Abu ketel	Persentase <i>Silica Fume</i>	Jumlah Sampel	
					Umur 28 hari (buah)	Umur 56 hari (buah)
1	BTC 0	100%	0%	0%	3	3
2	BAK 1	95%	5%	0%	3	3
3	BAK 2	90%	10%	0%	3	3
4	BAK 3	85%	15%	0%	3	3
5	BAK 4	80%	20%	0%	3	3
6	BSF 1	95%	0%	5%	3	3
7	BSF 2	90%	0%	10%	3	3
8	BAS 1	85%	5%	10%	3	3
9	BAS 2	80%	10%	10%	3	3
10	BAS 3	75%	15%	10%	3	3
11	BAS 4	70%	20%	10%	3	3
JUMLAH					33	33
TOTAL SAMPEL					66	

Keterangan tabel:

- a. BTC = beton tanpa campuran.

Kode “BTC” adalah kode untuk benda uji beton kubus tanpa substitusi sebagian semen dengan abu ketel + *silica fume*.

- b. BAK = beton abu ketel.

Kode “BAK” adalah kode untuk benda uji beton kubus dengan substitusi sebagian semen menggunakan abu ketel.

- c. BSF = beton *silica fume*.

Kode “BSF” adalah kode untuk benda uji beton kubus dengan substitusi sebagian semen menggunakan *silica fume*.

- d. BAS = beton abu ketel + *silica fume*.

Kode “BAS” adalah kode untuk benda uji beton kubus dengan substitusi sebagian semen menggunakan variasi abu ketel + *silica fume*.

Tahapan-tahapan dalam pembuatan benda uji, yaitu:

A. Benda uji waktu pengikatan awal semen

1. Menimbang semen semassa 400 gram.
2. Berdasarkan rencana, massa benda uji dengan variasi penggantian sebagian semen disesuaikan dengan persentase massa antara semen dan bahan pengganti yang telah direncanakan, dengan massa akhir campuran semen tetap 400 gram.
3. Memasukkan air ke dalam gelas ukur sebesar 25-30% dari massa adonan semen.
4. Mencampurkan 400 gram adonan semen dengan air sampai membentuk adonan pasta.
5. Membentuk adonan pasta menjadi bulat lalu melempar dengan kedua tangan sejarak 30 cm sebanyak 10 kali lemparan agar pasta menjadi solid.
6. Memasukkan pasta semen ke dalam cetakan kemudian meratakan dengan mistar perata.
7. Menempatkan cetakan berisi benda uji pada alat *vicat* dengan diameter jarum 10 mm, kemudian menurunkan jarum sehingga menyentuh permukaan pasta semen.
8. Menurunkan sekrup sehingga jarum jatuh ke pasta. Pasta telah dikatakan konsisten apabila penurunan jarum sebesar 10 ± 1 mm.
9. Bila penurunan belum mencapai 10 ± 1 mm, ulangi poin (2) dengan mengubah persentase kadar air.
10. Jika penurunan skrup telah mencapai 10 ± 1 mm, maka benda uji pasta sudah memenuhi pengujian konsistensi, sehingga dapat dilanjutkan untuk dilakukan pengujian waktu pengikatan semen.
11. Menyimpan benda uji yang telah lulus pengujian konsistensi di ruang lembab selama 30 menit.
12. Menempatkan cetakan berisi pasta pada alat *vicat* dengan diameter jarum 1 mm, kemudian menurunkan jarum sehingga menyentuh permukaan pasta.

13. Menurunkan sekrup sehingga jarum jatuh ke pasta. Mencatat angka penetrasi.
14. Melakukan pengujian setiap 15 menit dan mencatat angka penetrasi.
15. Melakukan sampai penetrasi sama dengan atau lebih kecil dari 25 mm. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman penetrasi \pm 25 mm merupakan nilai waktu pengikatan awal semen.
16. Melakukan pengujian sampai tidak terjadi penetrasi atau nilai penetrasi 0 mm. Hal ini menunjukkan benda uji pasta yang sudah mengeras. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kedalaman penetrasi 0 mm merupakan nilai waktu pengikatan akhir semen.

B. Benda uji beton

1. Pada pembuatan sampel benda uji dilakukan pengecoran yang dimulai dengan memasukan agregat kasar dan agregat halus terlebih dahulu kedalam *concrete mixer* dan tunggu hingga agregat kasar dan agregat halus tercampur merata.
2. Jika agregat halus dan agregat kasar telah tercampur merata maka langkah selanjutnya adalah memasukan semen dan abu ketel untuk variasi 1, semen dan *silica fume* untuk variasi 2, dan semen dengan abu ketel ditambah *silica fume* untuk variasi 3.
3. Setelah agregat halus dan kasar, semen, campuran variasi 1, campuran variasi 2, ataupun campuran variasi 3 sudah tercampur merata maka selanjutnya memasukan air secara bertahap.
4. Setelah seluruh campuran sudah masuk kedalam *concrete mixer* dan campuran sudah merata maka selanjutnya campuran beton dituangkan dalam *mold* (cetakan benda uji) sembari dilakukan proses penghilangan rongga udara beton menggunakan *vibrator* dan sebagian adukan beton dimasukan kedalam kerucut *Abrams* untuk dilakukan *slump test*.

3.4. Pengujian *Workability* Beton Segar

Sebelum beton segar dimasukkan ke dalam cetakan untuk pencetakan, diperlukan pengujian *workability* dengan *slump test*.

Berdasarkan (Putra, 2022) terdapat 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*.

3.5. Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Benda uji yang telah didiamkan selama 24 jam selanjutnya dikeluarkan dari *mold* dan direndam di dalam bak berisi air selama 28 dan 56 hari. Proses ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi dapat terlaksanakan dengan baik sehingga proses pengerasan dapat terjadi dengan sempurna dan tidak terjadi keretakan saat beton sudah mengering. Proses ini juga berguna untuk menjaga

mutu beton yang telah direncanakan. Setelah sampel uji dikeluarkan dari bak berisi air, sampel uji didiamkan selama 48 jam sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.

3.6. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM

Sampel beton yang telah selesai menjalani proses *curing*, kemudian akan dilakukan pengujian kuat tekan dengan menggunakan benda uji berbentuk kubus. Kuat tekan beton mengacu pada kemampuan beton untuk menahan tekanan tertentu (yang diterapkan oleh mesin pengujian) per satuan area hingga mencapai titik kegagalan (SNI 03-1974, 1990). Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini menggunakan mesin uji tekan (*compression testing machine/CTM*) yang memiliki kapasitas maksimal sebesar 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.

3.7. Perhitungan dan Analisis Data

Setelah dilakukan pengujian pada sampel campuran semen dan beton kubus, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisis data sebagai berikut:

- 1) Menghitung waktu pengikatan semen dari setiap variasi campuran semen dengan abu ketel dan *silica fume*.
- 2) Berdasarkan hasil pengujian waktu pengikatan awal semen untuk setiap variasi campuran semen dengan bahan pengganti dibuat grafik perbandingan waktu pengikatan awal semen antara campuran semen tanpa

bahan pengganti dengan campuran semen yang menggunakan kombinasi bahan pengganti yang kemudian dilakukan analisis data untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan abu ketel dan *silica fume* terhadap waktu pengikatan semen.

- 3) Menghitung kuat tekan beton pada benda uji kubus dengan umur beton 28 hari dan 56 hari pada beton normal dan beton yang sudah dilakukan substitusi sebagian semen dengan material pengganti yaitu abu ketel, *silica fume*, dan abu *ketel + silica fume*.
- 4) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari dibuat grafik perbandingan peningkatan kuat tekan antara beton tanpa bahan pengganti dengan beton yang menggunakan kombinasi bahan campuran yang kemudian dilakukan analisis data.
- 5) Berdasarkan data waktu pengikatan awal semen dan kuat tekan beton dalam campuran beton normal dan campuran beton dengan bahan pengganti semen, dilakukan analisis untuk mengidentifikasi hubungan antara waktu pengikatan awal semen dan kuat tekan beton.
- 6) Data-data yang didapatkan dianalisis untuk dapat melihat potensi terbaik dalam pengurangan penggunaan semen tanpa mengurangi mutu betonnya.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan abu ketel dan *silica fume* sebagai substitusi sebagian semen berdampak signifikan pada percepatan pengikatan semen. Abu ketel memiliki sifat fisik yang tidak beraturan, mampu menyerap air, dan memiliki kandungan Silikon Dioksida (SiO_2) yang tinggi, sedangkan *silica fume*, dengan tekstur yang lebih halus dan kemampuan penyerapan air yang lebih baik, turut berkontribusi pada percepatan ini. Gabungan kedua bahan tersebut mempercepat proses pengikatan semen melalui pembentukan Kalsium Silikat Hidrat (CSH). Data percobaan menunjukkan bahwa semakin besar proporsi campuran abu ketel dan *silica fume*, semakin cepat proses pengikatan semen.
2. Beton dengan kandungan abu ketel dan *silica fume* memiliki nilai *slump* lebih rendah dibandingkan dengan beton tanpa kandungan abu ketel dan *silica fume*. Semakin besar persentase kadar abu ketel dan *silica fume* dalam campuran beton, maka kelecakan beton (nilai *slump*) akan semakin rendah.
3. Kadar optimum penggunaan abu ketel sebagai substitusi sebagian semen pada beton kubus umur 28 hari dan 56 hari adalah 5%, dengan kuat tekan umur 28 hari mencapai 29,47 MPa dan kuat tekan umur 56 hari mencapai 31,29 MPa. Sedangkan kadar optimum penggunaan *silica fume* sebagai substitusi sebagian semen pada beton kubus umur 28 hari dan 56 hari adalah 10%, dengan kuat tekan umur 28 hari mencapai 28,04 MPa dan kuat tekan umur 56 hari mencapai 33,40 MPa. Dalam kombinasi, proporsi

optimum adalah 85% semen, 5% abu ketel, dan 10% *silica fume*, menghasilkan kuat tekan beton kubus sebesar 28,93 MPa pada umur 28 hari dan kuat tekan beton kubus sebesar 30,67 MPa pada umur 56 hari. Pemanfaatan abu ketel dan *silica fume* sebagai bahan campuran pada beton memberikan dampak positif terhadap peningkatan kuat tekan beton, serta dapat memanfaatkan limbah industri secara ekonomis.

4. Abu ketel dalam beberapa variasi kadar dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton. Variasi BAK 1, BAK 2, dan BAK 3 dapat menghasilkan nilai kuat tekan yang cenderung mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari, dengan kuat tekan beton optimal tercapai pada campuran BAK 1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggantian sebagian semen dengan *silica fume* dapat meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari dan 56 hari. Kombinasi abu ketel dan *silica fume* dalam beberapa variasi kandungannya dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton. Variasi BAS 1 dan BAS 2 menghasilkan data kuat tekan yang cenderung mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kuat tekan beton normal pada umur 28 hari dan 56 hari, dengan komposisi BAS 1 mencapai peningkatan kekuatan tekan beton yang optimal.
5. Komposisi optimum dari keseluruhan variasi pengujian untuk kuat tekan beton adalah variasi BAS 2. Hal ini dikarenakan variasi BAS 2 dapat mempertahankan kuat tekan beton normal pada umur 28 hari bahkan meningkatkan kuat tekan beton normal pada umur 56 hari dengan lebih banyak mengurangi penggunaan semen dan lebih banyak memanfaatkan limbah industri dibandingkan variasi lain.

5.2. Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini, maka perlu diadakan penelitian yang lebih lanjut untuk melengkapi dan mengembangkan tema penelitian ini. Saran yang dapat penulis berikan adalah:

1. Sebaiknya pelaksanaan penelitian dari persiapan awal sampai tahap pengujian dilakukan dengan ketelitian yang tinggi.
2. Simpan material penelitian dengan baik.
3. Sebaiknya alat yang digunakan untuk pembuatan benda uji dalam kondisi bersih.
4. Pada saat pembuatan benda uji pasta, harus dilakukan dengan hati-hati dan cermat.
5. Pada saat pemadatan adukan beton, harus dilakukan dengan teliti agar adukan beton padat dan merata.
6. Pada penelitian selanjutnya disarankan menggunakan *superplasticizer*.
7. Perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut mengenai variasi optimum kadar abu ketel dan *silica fume* dengan memperkecil rentangnya sehingga didapatkan variasi optimum kadar abu ketel dan *silica fume* yang lebih spesifik.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriandi, R. F. (2018). Pengaruh Faktor Umur Terhadap Perbandingan Kuat Tekan Beton Normal, Beton Mutu Tinggi Dan Beton Ringan. *Jurnal Universitas Mataram*, 1(1), 1–16.
- Arianto, R., Kurniawandy, A., & Ermiyati. (2013). *Kuat-tekan beton dan waktu ikat semen pozzolan*. Riau: Universitas Riau.
- ASTM C 1602, 2006. *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, Annual Books of ASTM Standards*. USA: Association of Standard Testing Materials.
- Foulhudan, J., Nurtanto, D., & Krisnamurti, K. 2022. Perbandingan *Mix Design* Sni 03-2834-2000 Dan Sni 7656:2012 Ditinjau Dari Proses Pengecoran Beton Normal. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 5(2), 98. <https://doi.org/10.20961/jrrs.v5i2.48172>.
- Irianti, L., Freddi, & Virmaryah. 1998. *pengaruh kadar abu ketel terhadap perilaku beton mutu tinggi 1998*. Laporan Penelitian. Lampung: LPIU DUE Universitas Lampung.
- Nasution, M. H., Putri, N.N. B., & Candra, L. (2019). Pengaruh Komposisi Gypsum Terhadap Setting Time Pada Proses Produksi Semen PCC. *CHEMICA: Jurnal Teknik Kimia*, 6(1), 31. <https://doi.org/10.26555/chemica.v6i1.13804>
- Prasetyo, Agus. 1993. *Penelitian Beton*. Universitas Islam Indonesia.
- Prasetya, Aji. 2007. *Pengertian Umum Beton*. Universitas Islam Riau.
- Pujianto. 2010. Beton Mutu Tinggi dengan Bahan Tambah *Superplastisizer* dan *Fly Ash*. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknik*, 13(2), 171–180.
- Primandari, S. R. P. & Rahmat, B. 2012. Pengaruh konversi minyak sawit menjadi biodiesel dengan katalis abu limbah boiler. *Asian Journal of Control. Asian Journal of Control*, 14(6), 1771–1771. <https://doi.org/10.1002/asjc.637>.
- Panennungi, T. & Pertiwi, N. 2018. *Ilmu bahan Bangunan*. Makassar: Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar.

- Putra, R. H. 2022. *Pengaruh kadar fly ash dan silica fume terhadap kuat tekan beton mutu tinggi*. Skripsi. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Permatasari, S., Agustina, S., & Satriani. 2022. Studi pemanfaatan limbah abu kerak boiler terhadap kualitas bata beton. *Jurnal Teknik Sipil Politeknik Kotabaru*, 12(1), 94–100.
- Pradana, T., Olivia, M., & Sitompul R.S. 2016. Kuat Tekan dan Porositas Beton Semen OPC, PCC, dan OPC POFA di Lingkungan Gambut. *Jorn Fteknik*, 3(1), 1–10.
- Silica Fume Association. 2005. *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*. America: U.S. Department of Transportation.
- Sebayang, S. 2011. *Tinjauan sifat-sifat mekanik beton alir mutu tinggi dengan silika fume sebagai bahan tambahan*. Bandar Lampung: Jurnal Rekayasa Sipil dan Perencanaan Fakultas Teknik Universitas Lampung, 15(2), 131–138.
- Sumajouw, M. D. J., Dapas, S.O., & Windah, R. S. 2014. Pengujian kuat tekan beton mutu tinggi. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(4), 215–218.
- Susanto, D., Djauhari, Z., & Olivia, M. 2019. Karakteristik Beton Portland Composite Cement (PCC) Dan Silica Fume Untuk Aplikasi Struktur di Daerah Laut. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 15(1), 1. <https://doi.org/10.25077/jrs.15.1.1-11.2019>.
- Suryanto, R. F. (2014). Pengaruh Penambahan Fly Ash atau Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton dan Setting Time Pada Semen. *Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents, cm*, 34–54.
- SNI 03-1974-1990.1990. *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- SNI 03-2834-2000. 2000. *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-6820-2002. 2002. *Spesifikasi Agregat Halus Untuk Pekerjaan Adukan dan Plesteran Dengan Bahan Dasar Semen*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-6827-2002. 2002. *Metode Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Portland dengan Menggunakan Alat Vicat untuk Pekerjaan Sipil*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- SNI 15-7064-2004. 2004. *Semen Portland Komposit*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- SNI 1974-2011. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional Indonesia.
- SNI 7656:2012. 2012. *Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-02-2014. 2014. *Semen Portland Pozolan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Tarru, R. O. (2018). Studi Penggunaan Silica Fume Sebagai Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Beton. *Journal Dynamic Saint*, 3(1), 472–485. <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v3i1.271>
- Vitri, G. & Herman, H. 2019. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit Sebagai Material Tambahan Beton. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 6(2), 78–87. <https://doi.org/10.21063/JTS.2019.V602.06>.
- Widjoko, L. 2010. Pengaruh Sifat Kimia Semen Terhadap Unjuk Kerja Mortar Portland. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Bandar Lampung*, 1(1), 52-50.
- Zai, K. A., Syahrizal, & Krolina, R. (2014). Pengaruh Penambahan Silica Fume Dan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Dengan Metode Aci (American Concrete Institute). *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara*, 1(1), 1-9.