

**PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN  
PENAMBAH CAMPURAN BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**HADI HIDAYATULLAH**

**2015011038**



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

## **ABSTRACT**

### ***The Effect Of Kettle Ash and Silica Fume As Enhancing Materials in Normal Concrete Mixtures on Compressive Strength***

**By**

**HADI HIDAYATULLAH**

*Much of the kettle ash waste found in palm oil mills is wasted and can pollute the environment. Therefore, efforts need to be made to handle this waste. One of them is its use as an additional ingredient in concrete mixtures combined with silica fume. In this research, kettle ash was used as an additive to the weight of cement and silica fume as an additive to the weight of cement. This study aims to analyze the effect of kettle ash and silica fume on the rate of increase in compressive strength and increase in compressive strength at the age of 28 and 56 days with variations in the kettle ash used being 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% and variations The silica fume used was 0%, 5% and 10% with testing times at 3 days, 7 days, 14 days, 28 days and 56 days and 28 days and 56 days. Based on analysis of research data, it was found that the majority experienced an increase in the compressive strength of concrete without additional materials. Increases occurred at 3 days, 7 days, 14 days and 28 days. The percentage increase in compressive strength for the majority decreased at the age of 3 days, 7 days, 14 days. Meanwhile, at the age of 56 days the majority experienced an increase in the percentage of compressive strength which was caused by a quite significant increase in compressive strength. In addition, the addition of kettle ash and silica fume increased the compressive strength of concrete at 28 days. The largest percentage increase in compressive strength of concrete at the age of 28 days occurred in test object code BS10 1 (kettle ash 5% + silica fume 10%) of 131.71%, while at the age of 56 days the largest increase in compressive strength of concrete without additives occurred in test object code BS5 1 amounted to 135.6% and the largest increase from 28 to 56 days of age occurred in the test object code BS5 1 amounting to 31.16% of the compressive strength of 28 day concrete code BS5 1.*

*Key words : Kettle ash, silica fume, concrete compressive strength*

## ABSTRAK

### PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN PENAMBAH CAMPURAN BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN

Oleh

**HADI HIDAYATULLAH**

Limbah abu ketel yang terdapat pada pabrik kelapa sawit banyak yang terbuang dan dapat mencemari lingkungan. Oleh karena itu, perlu dilakukan upaya dalam penanganan limbah tersebut. Salah satunya adalah pemanfaatan sebagai bahan tambah pada campuran beton yang dipadukan dengan *silica fume*. Pada penelitian ini, pemanfaatan abu ketel dilakukan sebagai bahan penambah terhadap berat semen dan *silica fume* sebagai bahan tambah terhadap berat semen. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh abu ketel dan *silica fume* terhadap laju peningkatan kuat tekan dan peningkatan kuat tekan pada umur 28 dan 56 hari dengan variasi abu ketel yang digunakan adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dan variasi *silica fume* yang digunakan adalah 0%, 5%, dan 10% dengan waktu pengujian pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari dan 56 hari serta 28 hari dan 56 hari. Berdasarkan analisis data penelitian, didapatkan bahwa mayoritas mengalami peningkatan terhadap kuat tekan beton tanpa bahan tambah. Peningkatan terjadi pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Persentase peningkatan kuat tekan mayoritas mengalami penurunan pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari. Sedangkan, pada umur 56 hari mayoritas mengalami peningkatan persentase kuat tekan yang disebabkan oleh peningkatan kuat tekan yang cukup signifikan. Selain itu, penambahan abu ketel dan *silica fume* meningkatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Persentase peningkatan kuat tekan beton pada umur 28 hari terbesar terjadi pada kode benda uji BS10 1 (abu ketel 5% + *silica fume* 10%) sebesar 131,71%, sedangkan pada umur 56 hari peningkatan kuat tekan terbesar terhadap beton tanpa bahan tambah terjadi pada kode benda uji BS5 1 sebesar 135,6% dan peningkatan terbesar dari umur 28 ke 56 hari yang terbesar terbesar terjadi pada kode benda uji BS5 1 sebesar 31,16% dari kuat tekan beton 28 hari kode BS5 1.

Kata Kunci : Abu ketel, *silica fume*, kuat tekan beton

**PENGARUH ABU KETEL DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN  
PENAMBAH CAMPURAN BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

**Oleh**

**HADI HIDAYATULLAH**

**2015011038**

**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 PENAMBAH CAMPURAN  
BETON NORMAL TERHADAP KUAT TEKAN**

**Nama Mahasiswa : Hadi Hidayatullah**

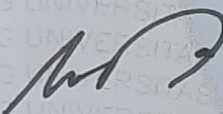
**Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011038**

**Program Studi : Teknik Sipil**

**Fakultas : Teknik**

**MENYETUJUI**

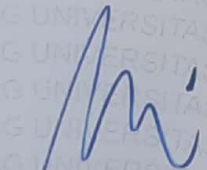
**1. Komisi Pembimbing**

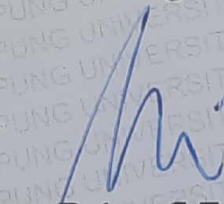
  
**Ir. Laksmi Irianti, M.T.**  
NIP 19620408 198903 2 001

  
**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**

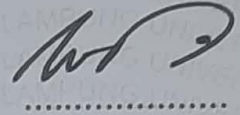
  
**Sasana Putra, S.T., M.T.**  
NIP 19691111 200003 1 002

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

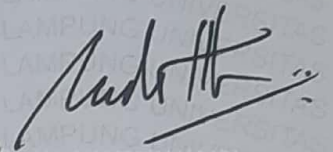
**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

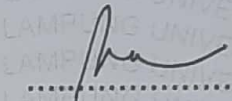
**Ketua : Ir. Laksmi Irianti, M.T.**



**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. J**  
NIP. 19750928 200112 1 002



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

## PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : **HADI HIDAYATULLAH**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015011038**

Judul : Pengaruh Abu Ketel dan *Silica Fume* Sebagai  
Bahan Penambah 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,



**HADI HIDAYATULLAH**  
**NPM: 2015011038**

## RIWAYAT HIDUP



Penulis merupakan anak ketiga dari Bapak Ade Saefudin S.IP dan Ibu Fatiah. Penulis dilahirkan di Jakarta pada tanggal 5 September 2002.

Penulis menempuh Pendidikan Sekolah Dasar di SDS Persatuan dan lulus pada tahun 2014 kemudian melanjutkan Pendidikan ke Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Kelapa Dua dan lulus pada tahun 2017. Setelah itu, melanjutkan Pendidikan kembali ke Sekolah Menengah Atas di SMAS Islamic Centre Kota Tangerang dan lulus pada tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis melanjutkan Pendidikan ke perguruan tinggi yaitu sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif dalam organisasi dalam kampus dan kegiatan luar kampus yakni: sebagai anggota Departemen Kerohanian dan Keolahragaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) pada tahun 2022 sampai 2023 dan sebagai Kepala Departemen Kerohanian dan Keolahragaan Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) pada tahun 2023 sampai 2024. Pada tahun 2023 penulis melakukan Kerja praktik (KP) di salah satu proyek jembatan rangka baja yang terletak di Pesawaran dan melakukan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Pekon Cahaya Negeri, Kecamatan Lemong, Kabupaten Pesisir Barat, Lampung.



## **PERSEMBAHAN**

Puji Syukur kepada Allah SWT, karena berkat limpahan berkah, rahmat, dan Kesehatan darinya skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik  
Ku persembahkan karyaku ini kepada:

Papa dan Mama ku tersayang yang selalu memberikan arahan, semangat, bimbingan, dan selalu mendoakan serta memotivasiku agar selalu semangat dalam mengerjakan semua hal.

Teteh dan Abang ku yang selalu memberikan nasehat dan gambaran di dunia perkuliahan selama aku berkuliah di kampusku.

Dosen Pembimbing dan Penguji yang sangat berjasa dalam mendidikku dan membimbingku dalam menyelesaikan kewajibankanku.

Sahabat dan teman-temanku. Terimakasih karena selalu menemani, mendukung, dan memotivasiku dari aku sampai ke kota ini sampai aku menyelesaikan kewajibanku ini.

**Almamaterku Universitas Lampung**

## **KATA INSPIRASI**

“Keberhasilan bukan milik mereka yang cerdas melainkan milik mereka yang mau”

(Bacharudin Jusuf Habibie)

“Bila kau tak mau merasakan lelahnya belajar, maka kau akan menanggung pahitnya  
kebodohan”

(Imam Assyafi'i)

“Hiduplah seolah-olah kamu akan mati besok. Belajarlah seolah-olah kamu hidup  
selamanya”

(Mahatma Gandhi)

“Jadilah mata air, yang selalu memberikan kehidupan untuk sekitarmu”

(Alwi Abdul Jalil Habibie)

“Menuju tak terbatas dan melampauinya”

(Buzz Lightyear)

## 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 Penambah Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan” dengan tepat waktu.

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

1. Ade Saefudin selaku ayah tersayang yang selalu memberikan dukungan dan nasehat kepada penulis sehingga skripsi ini dapat selesai, Fatiah selaku ibu tercinta yang selalu memberi dukungan dan selalu mendoakan penulis agar lancar dalam penyusunan skripsi ini serta keluarga yang senantiasa memberikan doa, bimbingan kepercayaan, dan semangat baik moral maupun materil dalam menyelesaikan skripsi ini
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Sasana Putra. S.T., M.T., selaku Plt. Ketua Prodi S-1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
5. Ibu Ir. Laksmi Irianti. M.T., selaku dosen Pembimbing Utama yang memberikan bimbingan, pengarahan dan saran kepada penulis dalam proses penyusunan skripsi.

6. Bapak Ir. Masdar Helmi. S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Pembimbing Kedua yang memberikan motivasi saran dan membimbing penulisan skripsi.
7. Ibu Dr. Eng. Ir. Ratna Widyawati, S.T., M.T. IPM. ASEAN Eng., selaku Pembahas atas kesediaannya memberikan kritik dan saran bagi perbaikan skripsi.
8. Ibu Ir. Siti Anugrah Mulya Putri, S.T., M.T. IPM, selaku Pembimbing Akademik yang memberikan bimbingan dan arahan selama perkuliahan..
9. 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, 16 April 2024

Penulis,

**Hadi Hidayatullah**

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iv</b>
 <b>I. PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	4
 <b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1. Beton Normal .....	6
2.2. Material Pembentuk Beton dengan Mutu Normal.....	7
2.2.1. Semen PCC ( <i>Portland Composite Cement</i> ).....	7
2.2.2. Agregat Halus .....	8
2.2.3. Agregat Kasar .....	10
2.2.4. Air.....	12
2.3. <i>Silica Fume</i> .....	12
2.4. Abu Ketel.....	14
2.5. Perawatan Beton ( <i>Curing</i> ).....	15
2.6. Pengujian Kuat Tekan .....	16
2.7. Penelitian Sebelumnya .....	17
 <b>III. METODE PENELITIAN</b>	
3.1. Pendahuluan .....	20
3.2. Peralatan dan Bahan .....	23
3.2.1. Peralatan .....	23

3.2.2. Bahan .....	25
3.3. Pembuatan Benda Uji .....	26
3.4. Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar.....	28
3.5. Perawatan Benda Uji ( <i>Curing</i> ) .....	29
3.6. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM .....	29
3.7. Perhitungan dan Analisis Data .....	30

#### **IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1. Umum .....	31
4.2. Sifat Fisik Material Pembentuk Beton .....	31
4.3. Komposisi Material untuk Setiap Jenis Campuran Beton .....	32
4.4. Keleccakan ( <i>Workability</i> ).....	33
4.5. Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton.....	37
4.6. Kuat Tekan Beton pada Umur 28 dan 56 Hari dengan Menggunakan Tambahan Material Keduanya.....	42

#### **DAFTAR PUSTAKA**

#### **LAMPIRAN A (*MIX DESIGN*)**

#### **LAMPIRAN B (FOTO PENELITIAN)**

#### **LAMPIRAN C (LEMBAR ASISTENSI)**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir penelitian.....	22
2. Pengaruh abu ketel terhadap nilai <i>slump</i> beton.....	34
3. Pengaruh <i>silica fume</i> terhadap nilai <i>slump</i> beton.....	35
4. Pengaruh abu ketel dan <i>silica fume</i> terhadap nilai <i>slump</i> beton.....	36
5. Grafik laju peningkatan kuat tekan beton dengan <i>silica fume</i> .....	40
6. Grafik laju peningkatan kuat tekan beton dengan abu ketel .....	40
7. Diagram batang perbandingan beton normal dengan beton menggunakan Bahan tambah umur 28 hari .....	43
8. Diagram batang perbandingan beton normal dengan beton menggunakan Bahan tambah umur 56 hari .....	44

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Halaman</b>
1. Persentase Kandungan Oksida pada OPC dan PCC .....	7
2. Komposisi Utama Semen Portland .....	8
3. Gradasi Agregat Halus pada Adukan .....	10
4. Gradasi Agregat Kasar .....	11
5. Batasan Maksimum Kandungan Zat Kimia dalam Air .....	12
6. Sifat Fisik <i>Silica Fume</i> .....	14
7. Kandungan Senyawa Kimia dalam Abu Ketel.....	14
8. Sifat-sifat Fisik Abu Ketel .....	15
9. Perbandingan Kuat Tekan antara Silinder dan Kubus .....	16
10. Variabel dan Kode Benda Uji .....	26
11. Variabel dan Kode Benda Uji (Lanjutan) .....	27
12. Hasil Pengujian Material Pembentuk Beton .....	32
13. Komposisi Material pada Campuran Beton per m <sup>3</sup> (kg) .....	33
14. Nilai Slump Beton.....	33
15. Nilai Slump Beton (Lanjutan).....	34
16. Laju Peningkatan Kuat Tekan Peraturan Beton Indonesia 1971 .....	37
17. Hasil Pengujian Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton .....	38
18. Persentase Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton .....	39
19. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 dan 56 Hari.....	42
20. Perbandingan Kuat Tekan terhadap Beton Normal (BAK0) .....	45



## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Meluasnya laju pembangunan saat ini tidak terlepas dari peranan penting dari suatu bahan konstruksi, terkhususnya beton. Beton adalah bahan bangunan yang terdiri dari campuran agregat kasar, agregat halus, semen, air dan bahan tambahan lainnya (Sumajouw dkk, 2014). Dalam pengaplikasiannya beton sering digunakan sebagai bahan struktural maupun bahan non struktural. Material penyusun beton yang mudah didapatkan menjadikan beton sering digunakan sebagai bahan bangunan. Dalam proses pembuatannya, beton dapat ditambahkan bahan tambahan. Bahan tambahan yang dimaksud dapat berupa bahan tambahan yang bersifat kimia (*chemical additive*) dan bahan tambah mineral yang biasa disebut *additive*.

Bahan tambah yang bersifat kimia (*chemical additive*) dapat berupa cairan yang bersifat *water reducing* (mengurangi penggunaan air), *retarding* (memperlambat pengerasan), dan *accelerating* (mempercepat pengerasan). Sedangkan bahan tambah mineral dapat dihasilkan dari sisa-sisa hasil produksi dari suatu produk seperti abu ketel (limbah pembakaran kelapa sawit). Pada bahan tambah mineral juga terdapat *silica fume*. *Silica fume* sering digunakan oleh perusahaan *mix design* untuk meningkatkan kuat tekan beton dengan cepat. Akan tetapi, harga *silica fume* yang lebih mahal dari semen menjadikan biaya produksi semakin besar.

Menurut data Dinas Perkebunan Provinsi Lampung tahun 2020, pada tahun 2020 Provinsi Lampung menduduki posisi ke-13 se-Indonesia dengan luas areal kelapa sawit sebesar 196.312 Ha, dengan kabupaten yang memiliki luas areal tertinggi berada di Kabupaten Mesuji dengan luas areal 21.600 Ha dengan kapasitas produksi mencapai 36.987 ton per tahun. Hal ini menyebabkan limbah dari kelapa sawit memiliki kuantitas yang cukup banyak. Sering kali limbah dari kelapa sawit tidak dimanfaatkan kembali untuk sesuatu hal yang berguna. Limbah yang tidak digunakan kembali pada pabrik dapat digunakan sebagai bahan tambah pada campuran beton sehingga dapat mengurangi kuantitas limbah yang terbuang dan dapat meningkatkan kualitas lingkungan sekitar pabrik.

Abu ketel adalah salah satu limbah kelapa sawit yang diperoleh dari hasil pembakaran cangkang (tempurung kelapa sawit) didalam dapur pembakaran dengan suhu antara  $700^{\circ}\text{C}$  –  $800^{\circ}\text{C}$  (Gunawan dkk., 2018). Proses pembakaran ini akan menghasilkan butiran-butiran halus yaitu abu. Berdasarkan uji kimia di laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Unila yang terdapat dalam penelitian Irianti dkk, 1998 didapatkan bahwasanya abu ketel memiliki senyawa kimia berupa  $\text{SiO}_2$  sebanyak 31,4510%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sebanyak 24,1271%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebanyak 6,7948%,  $\text{MgO}$  sebanyak 3,0463%,  $\text{CaO}$  sebanyak 15,2171%, dan pH 9,23%. Pada abu ketel memiliki senyawa *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) yang cukup banyak. *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) berperan penting dalam pembentukan *Kalsium Silikat Hidrat* (CSH) yang berfungsi sebagai perekat setelah reaksi dengan *Kalsium Hidrat* (CH) yang merupakan sisi lemah beton (Murdock & Brook, 1986). *Silica Fume* merupakan material halus yang kaya akan silika dan merupakan hasil samping dari *industri silikon ferro* (*Silica Fume Association*, 2022). *Silica fume* mengandung *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) sebanyak 90,03% sehingga dapat dikategorikan sebagai pozzolan (Kamal & Mojtahedi, 2023). Pada penggunaan *silica fume* dalam jumlah rendah (dibawah 5% dari berat semen) akan menghasilkan beton mutu yang tinggi dengan kekuatan yang tidak lebih tinggi dari beton normal (Neville & Brooks, 2010).

Berdasarkan referensi-referensi tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan abu ketel dan *silica fume* pada beton dapat meningkatkan kuat tekan beton. Pada beberapa penelitian sebelumnya, penggunaan abu ketel sebagai bahan pengganti semen sudah dilakukan namun tidak menggunakan bahan tambahan berupa *silica fume*. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pemanfaatan limbah dari pembakaran kelapa sawit (abu ketel) dan material *silica fume* sebagai bahan penambah komposisi pada semen.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan material abu ketel dan material *silica fume* terhadap proses laju peningkatan kuat tekan beton?
2. Bagaimana pengaruh material abu ketel dan material *silica fume* terhadap kuat tekan beton?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk menganalisis pengaruh penambahan material abu ketel dan material *silica fume* terhadap proses laju peningkatan kuat tekan beton.
2. Untuk menganalisis pengaruh material abu ketel dan material *silica fume* terhadap kuat tekan beton.

#### 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Mutu beton yang direncanakan memiliki mutu K-300 ( $f'c$  26,4 MPa) pada umur beton 28 hari.
2. Proses laju peningkatan kuat tekan beton diamati pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari.
3. Beton dengan bahan tambah keduanya pada campuran beton normal tidak membahas tentang laju peningkatan kuat tekan.
4. Perhitungan *mix design* beton mutu normal mengacu pada SNI 7656:2012.
5. *Silica fume* dan abu ketel sebagai bahan tambahan semen dalam ukuran berat.
6. Persentase variasi pengaruh penambahan abu ketel yang digunakan adalah sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% dan variasi penambahan *silica fume* sebesar 0%, 5%, dan 10%.
7. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm.
8. Bahan pembuat beton berupa semen PCC, agregat halus yang didapatkan dari Gunung Sugih, agregat kasar yang didapatkan dari Tanjungan dan air yang didapatkan dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung.

#### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi perkembangan ilmu teknologi beton tentang pengaruh penambahan abu ketel dan *silica fume* terhadap karakteristik beton.
2. Memberikan informasi terkait proses laju peningkatan kuat tekan beton normal dengan menggunakan material tambahan abu ketel dan material

*silica fume* pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari serta pengaruh dari material abu ketel dan material *silica fume* terhadap kuat tekan beton umur 28 hari dan 56 hari.

3. Menjadi alternatif pemanfaatan limbah abu ketel sebagai bahan tambah campuran beton normal terhadap kuat tekan untuk kelestarian lingkungan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Beton Normal

Beton normal adalah beton yang memiliki berat isi di antara 2200-2500 kg/m<sup>3</sup> yang menggunakan agregat alam yang dipecah maupun agregat alam yang tidak dipecah dan memenuhi ASTM C33M (Tampubolon, 2022). Menurut SNI 03-2834-2000 beton normal memiliki kuat tekan 21-40 Mpa. Beton normal memiliki material-material pembentuk seperti agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), semen, dan air.

Pada saat pembuatannya kekuatan beton normal dipengaruhi oleh empat bagian utama yang dapat memengaruhi kekuatan beton tersebut yaitu:

- 1) Proporsi bahan-bahan penyusunannya,
- 2) Metode perancangan,
- 3) Perawatan
- 4) Keadaan pada saat dilaksanakan pengecoran.

Dalam pelaksanaannya beton normal sering digunakan pada kegiatan pengecoran struktural maupun pengecoran non-struktural. Campuran beton normal non-struktural umumnya menggunakan campuran dengan berat-volume yang memiliki proporsi perbandingan 1 semen : 2 pasir : 3 batu pecah/kerikil dengan kekuatan tekan yang kurang dari 17,5 Mpa pada umur 28 hari, sedangkan beton struktural normal menghasilkan kuat tekan beton sebesar 21-40 Mpa yang beriringan dengan meningkatnya kekuatan beton normal termasuk kinerja dari beton tersebut dan juga dengan meningkatnya durabilitas, modulus elastisitas,

permeabilitas, rangkai, dan daya tahan terhadap panas dan korosi (Mulyono, 2007).

## 2.2 Material Pembentuk Beton dengan Mutu Normal

Pada pembuatan beton mutu normal, memiliki material pembentuk seperti semen, agregat halus, agregat kasar, air dan bahan tambahan lain seperti abu ketel dan *silica fume*.

### 2.2.1 Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Menurut SNI 15-7064-2004 semen PCC adalah bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik, atau hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik yang dimaksud dapat berupa terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa semen portland komposit (SNI 15-7064-2004).

Tabel 1. Persentase Kandungan Oksida pada OPC dan PCC

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

(Sumber: Pradana dkk, 2016)

Tabel 2. Komposisi Utama Semen Portland

<b>Nama komposisi</b>	<b>Rumus kimia</b>	<b>Bobot (%)</b>
Tricalcium Silika ( $C_3S$ )	$3CaO \cdot SiO_2$	$60 \pm 10$
Dicalcium Silika ( $C_2S$ )	$2CaO \cdot SiO_2$	$16 \pm 10$
Tricalcium Alumina ( $C_3A$ )	$3CaO \cdot Al_2O_3$	1-10
Tetracalcium Alumina Ferrit ( $C_4AF$ )	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	0-16

(Sumber: Neville & Brooks, 2010)

Pada semen jenis PCC memiliki keunggulan yaitu memiliki panas hidrasi lebih rendah sehingga akan lebih mudah dalam proses pengerjaan dan dapat menghasilkan permukaan beton yang rapat dan halus. Menurut SNI 15-7064-2004, semen PCC dapat digunakan untuk konstruksi umum seperti pekerjaan yang menggunakan beton, pekerjaan pemasangan bata, pekerjaan selokan, pekerjaan jalan, pekerjaan pagar, pekerjaan dinding, dan pembuatan elemen bangunan khusus seperti beton pracetak, beton pratekan, panel beton, *paving block*, dan lain-lain.

### 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 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) 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 pada Adukan

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 $\mu\text{m}$ )	40-75	40-75
No.50 (300 $\mu\text{m}$ )	10-35	20-40
No.100 (150 $\mu\text{m}$ )	2-15	10-25
No. 200 (75 $\mu\text{m}$ )	0	0-10

(Sumber : SNI 03-6820-2002)

### 2.2.3 Agregat Kasar

Agregat kasar adalah pemecahan alami dari batuan atau dapat berupa batu pecah yang didapatkan dari pemecahan batu secara manual oleh manusia (Panennungi & Pertiwi, 2018). 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.

mm	Ukuran saringan (Aayakan)			% Lolos saringan		
	SNI	ASTM	inch	Ukuran maks 10 mm	Ukuran maks 20 mm	Ukuran maks 40 mm
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	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 adalah salah satu bahan dalam pembentukan beton. Pemakaian air pada pembuatan beton berguna untuk mengaktifkan reaksi kimia pada semen yang dapat menyebabkan pengikatan antara pasta semen dengan agregat yang berada pada beton pada saat beton sudah memasuki fase pengerasan, selain itu air juga berfungsi untuk mempermudah dalam pengerjaan (*workability*) yang dimana air dapat menjadi pelumas campuran antara agregat kasar, agregat halus, dan semen saat dilakukan pengecoran.

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 bertulang	1000
3	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	3000
4	Alkali (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O)	600
5	Total solid	50000

(Sumber: ASTM C1602, 2006)

### 2.3 Silica Fume

Menurut *American Concrete Institute (ACI)*, *silica fume* adalah "silika yang sangat halus dan tidak berbentuk kristal yang dihasilkan sebagai produk sampingan dalam proses produksi unsur silikon atau paduan yang mengandung silikon dalam tungku busur listrik" (*ACI Concrete Terminology*). Biasanya berbentuk serbuk abu-abu dan memiliki kemiripan dengan semen Portland atau

*fly ash*.. *Silica fume* umumnya digolongkan sebagai adiktif dalam semen. Adiktif adalah istilah yang merujuk pada bahan yang digunakan dalam campuran beton selain semen Portland.

Menurut *Silica Fume Association* pada *silica fume* mengandung >85% *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) atau lebih tepatnya mengandung *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) sebanyak 90,03% sehingga dapat dikategorikan sebagai pozzolan (Abed & Mojtahedi, 2023). *American Concrete Institute* (ACI) menyatakan bahwa penggantian sekitar 15% dari komposisi semen dalam beton dengan *silica fume* akan menghasilkan sekitar 2.000.000 butir *silica fume* untuk setiap butir semen. Selain itu, diameter *silica fume* yang sangat kecil yaitu 1/100 kali diameter semen dapat dimanfaatkan sebagai pengisi di antara partikel-partikel semen.

Penggunaan *silica fume* sebagai *mineral additive* dalam campuran beton memiliki sejumlah kelebihan, seperti:

- 1) Memudahkan pengerjaan (*workability*).
- 2) Mengurangi rembesan air pada beton (*bleeding*).
- 3) Menjadikan waktu pengikatan (*setting time*) yang lebih lama.
- 4) Dalam kondisi beton yang sudah keras *silica fume* dapat meningkatkan kuat tekan.
- 5) Dalam kondisi beton yang sudah keras *silica fume* dapat meningkatkan kuat lentur.
- 6) Dapat memperkecil susut dan rangkai ketika beton sudah mengering.
- 7) Dapat meningkatkan ketahanan terhadap sulfat dan dari lingkungan yang agresif.
- 8) Sebagai penetrasi klorida.
- 9) Permeabilitas atau kemudahan beton untuk dilalui air lebih kecil.
- 10) Ketahanan terhadap keausan lebih tinggi.
- 11) *Silica fume* dapat menempati celah atau ruang yang sangat rapat antar partikel karena ukuran *silica fume* yang sangat kecil.

Berdasarkan spesifikasi dari *Silica Fume Association* (2022), *silica fume* memiliki sifat fisik sebagai berikut :

Tabel 6. Sifat Fisik *Silica Fume*

Sifat	Spesifikasi
Ukuran butiran	< 1 $\mu\text{m}$
Berat volume produksi	130 – 430 $\text{kg}/\text{m}^3$
Berat volume dipadatkan	480 – 720 $\text{kg}/\text{m}^3$
Berat jenis	2,2
Luas permukaan	15.000– 30.000 $\text{m}^2/\text{kg}$

(Sumber: *Silica Fume Association*, 2022)

## 2.4 Abu Ketel

Abu ketel adalah salah satu limbah kelapa sawit yang diperoleh dari hasil pembakaran cangkang (tempurung kelapa sawit) didalam dapur pembakaran dengan suhu antara  $700^{\circ}\text{C}$  –  $800^{\circ}\text{C}$  (Gunawan dkk., 2018). Pada proses pembakaran ini akan menghasilkan butiran-butiran halus yaitu abu. Berdasarkan uji kimia di Laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Univesitas Lampung yang terdapat pada penelitian Laksmi Irianti, Freddi, dan Virmansyah tahun 1998 didapatkan bahwa abu ketel memiliki beberapa senyawa kimia yang terlampir pada tabel 7 berikut.

Tabel 7. Kandungan Senyawa Kimia dalam Abu Ketel

Kandungan senyawa	Persentase kandungan (%)
$\text{SiO}_2$ ( <i>Silikon Dioksida</i> )	31,4510
$\text{Fe}_2\text{O}_3$ ( <i>Besi III Oksida</i> )	24,1271
$\text{Al}_2\text{O}_3$ ( <i>Aluminium Oksida</i> )	6,7948
$\text{MgO}$ ( <i>Magnesium Oksida</i> )	3,0463
$\text{CaO}$ ( <i>Kalsium Oksida</i> )	15,2171
pH (Derajat Keasaman)	9,23

(Sumber: Irianti dkk, 1998)

Pada abu ketel memiliki senyawa *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) yang cukup banyak. *Silikon Dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ) berperan penting dalam pembentukan *Kalsium Silikat Hidrat* (CSH) yang berfungsi sebagai perekat setelah reaksi dengan *Kalsium Hidrat* (CH) yang merupakan sisi lemah beton (Murdock & Brook, 1986). Selain memiliki sifat kimia, abu ketel juga memiliki sifat fisik. Sifat fisik abu ketel adalah sebagai berikut:

Tabel 8. Sifat-sifat Fisik Abu Ketel

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

(Sumber: Irianti dkk, 1998)

## 2.5 Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton (*curing*) adalah metode untuk menjaga agar beton tetap lembab dan tidak terjadi keretakan ketika sudah mengering. Pada perawatan beton di laboratorium dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan cara menggunakan penguapan (*steam*) atau perendaman. Fungsi utama dari dilakukannya *curing* ini adalah untuk menjauhi beton dari beberapa hal 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.

## 2.6 Pengujian Kuat Tekan

Pada beton yang paling utama adalah kuat tekan pada beton itu sendiri. Nilai kuat tekan beton akan meningkat berdampingan dengan penambahan atau peningkatan umurnya, dan pada umur beton yang ke 28 hari, beton mencapai kekuatan maksimal (Panennungi & Pertiwi, 2018). Nilai kuat tekan pada beton didapatkan dari uji laboratorium maupun uji lapangan. Pengujian kuat tekan beton pada laboratorium dilakukan dengan cara membuat sampel kubus maupun silinder. Perbandingan kuat tekan silinder dan kubus relatif berbeda, pernyataan ini berdasarkan pada ISO *Standard* 3893-1997 yang tertuang pada buku Ilmu Bahan Bangunan, Panennungi & Pertiwi, 2018. Perbandingan kuat tekan antara silinder dan kubus disajikan pada tabel 9.

Tabel 9. 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
25	30
30	35
35	40
40	45
45	50
50	55

(Sumber: ISO *Standard* 3893, 1997)

Beton pada umumnya beton akan mencapai kuat tekan 70% pada umur 7 hari dan pada umur 14 hari sedangkan kekuatan beton akan mencapai 85%-90% dari kuat tekan rencana pada umur beton 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:

$f'c$  = Kuat tekan beton (MPa)

P = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji ( $\text{mm}^2$ )

## 2.7 Penelitian Sebelumnya

### 1. Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi

Irianti dkk (1998) telah melakukan penelitian mengenai pengaruh abu ketel terhadap perilaku beton mutu tinggi. Penelitian ini menggunakan sampel beton silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Persentase abu ketel yang digunakan sebagai bahan pengganti dari semen adalah 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Total sampel yang digunakan pada penelitian ini adalah 75 sampel beton silinder dengan masing-masing variasi sebanyak 3 sampel.

Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan beton yang berada dibawah umur 28 hari tidak begitu menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan,. Pada umur 56 hari kekuatan beton dengan material tambahan berupa abu ketel mengalami peningkatan dibandingkan dengan campuran beton tanpa bahan tambahan berupa material abu ketel. Peningkatan pada kuat tekan beton sebesar 2,67% sampai 20,92% dan peningkatan terbesar kuat tekan beton didapatkan pada campuran abu ketel dengan kadar 10%.

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

Sebayang (2011) telah melakukan penelitian mengenai tinjauan sifat-sifat mekanik beton alir mutu tinggi dengan *silica fume* sebagai bahan tambahan. Pada penelitian ini menggunakan sampel silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm serta menggunakan persentase *silica fume* sebesar 0%, 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15% terhadap berat semen. Sampel uji yang telah dibuat akan diuji pada umur 7,14,28, dan 56 hari.

Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan nilai slump pada semua kadar *silica fume* dalam adukan beton lebih besar dari 190 mm atau 19 cm kecuali pada kadar *silica fume* sebesar 15%. Penambahan *silica fume* pada adukan beton alir mutu tinggi secara umum dapat mengurangi kelecakan adukan beton. Waktu pengikat awal maupun waktu pengikatan akhir akan semakin lambat jika penggunaan *silica fume* semakin besar. Pemakaian *silica fume* sebagai bahan tambah memberikan peningkatan kuat tekan dimulai pada umur 7 hari. Kuat tekan paling optimm didapatkan pada umur 56 hari dengan kuat tekan sebesar 51,35 MPa dengan penggunaan *silica fume* sebesar 9% sebagai bahan tambah.

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

Putra (2022) telah melakukan penelitian sebelumnya mengenai kuat tekan beton mutu tinggi dengan memanfaatkan *fly ash* dan *silica fume* sebagai bahan pengisi. Pada penelitian ini menggunakan sampel uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Total sampel uji sebanyak 48 buah dengan 8 variasi. Kadar *fly ash* yang digunakan sebesar 0%, 5%, 10%, 15% dari berat semen sedangkan persentase *silica fume* yang digunakan adalah 5% dan 10% sebagai bahan tambah.

Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan adukan beton dengan kandungan *fly ash* dan *silica fume* mempunyai nilai slump yang lebih rendah dibandingkan dengan adukan beton tanpa campuran *fly ash* dan *silica fume* sedangkan jika ditinjau dari hasil pengujian kuat tekannya, kuat tekan terbesar dihasilkan pada kadar *fly ash* 15% dan *silica fume* 5% dengan nilai kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 41,48 MPa dan nilai kuat tekan pada umur 58 hari adalah 47,03 MPa. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa kadar optimum yang dapat digunakan pada adukan beton adalah *fly ash* dengan kadar 15% dan *silica fume* dengan kadar 5%.

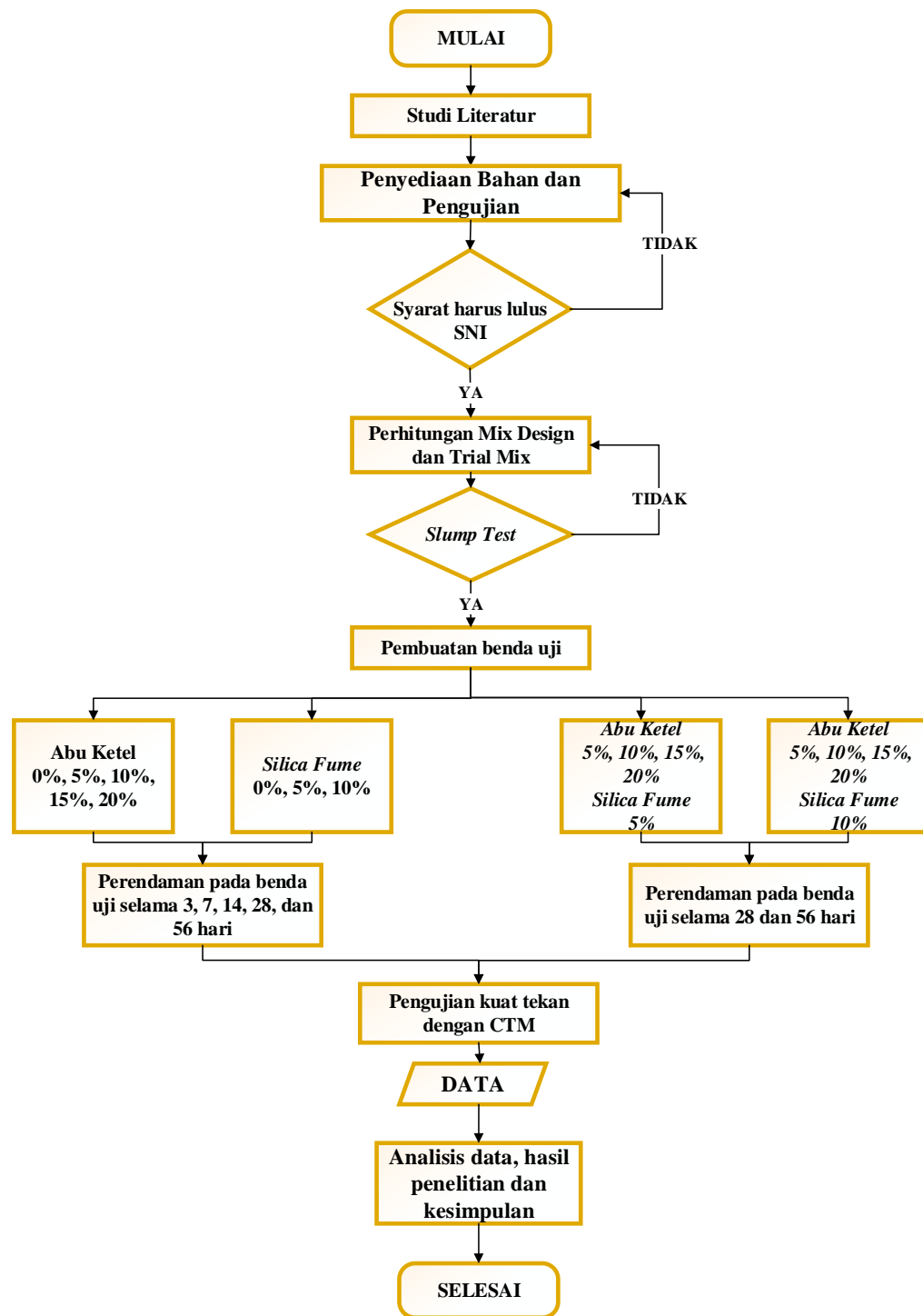
### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Pendahuluan

Metode yang akan dipakai pada penelitian ini adalah metode eksperimental yang dimana akan dilakukan pengujian di laboratorium untuk mendapatkan data dan hasil dari penelitian yang telah dilakukan. Penelitian ini menggunakan variasi dari abu ketel sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% didapatkan dari berat semen yang digunakan sebagai bahan penambah beton normal dan variasi *silica fume* sebesar 0%, 5% dan 10% yang didapatkan dari berat semen yang digunakan sebagai bahan penambah pada beton normal juga. Penelitian ini menggunakan sampel beton berbentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm. serta akan diuji kuat tekan pada umur beton 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari pada beton yang hanya mengandung salah satu material penambah yaitu abu ketel atau *silica fume* saja untuk melihat pengaruh masing-masing material terhadap proses laju peningkatan kuat tekan beton serta akan dilakukan uji kuat tekan pada umur beton 28 hari dan 56 hari pada beton yang mengandung kedua material penambah yaitu abu ketel dan *silica fume* untuk melihat pengaruh kedua material terhadap kuat tekan beton normal. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

Permulaan penelitian dilakukan dengan studi literatur terlebih dahulu sebelum melakukan sebuah proses praktik. Pada proses praktik dilakukan penyediaan material dan pengujian material untuk beton, syarat pada material harus sesuai dengan persyaratan yang tertera pada SNI. Material yang telah dinyatakan lulus syarat menurut SNI maka disimpan dan dilanjutkan dengan perhitungan *mix*

*design* dan *trial mix* untuk memastikan mutu beton yang dibuat sesuai dengan rencana. Adukan beton yang sudah memenuhi mutu rencana dilakukan pengujian slump untuk memastikan *workability* sesuai dengan rencana. Beton tanpa bahan tambah yang sudah sesuai dengan rencana akan ditambah bahan tambah berupa abu ketel dan *silica fume* untuk pembuatan sampel sebagai pokok pembahasan pada penelitian ini. Sampel yang telah selesai dibuat akan direndam terlebih dahulu sebagai proses perawatan beton (*curing*). Beton yang telah melewati masa curing akan dilakukan pengujian pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari untuk menganalisis laju peningkatan kuat tekan beton dengan menggunakan salah satu bahan tambah dan diuji pada umur 28 dan 56 hari untuk menganalisis pengaruh peningkatan kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari. Data yang telah didapat diolah untuk mendapatkan hasil dan kesimpulan dari penelitian ini. Proses penelitian lebih rinci dapat dilihat pada Gambar 1 dibawah ini:



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

## 3.2. Peralatan dan Bahan

### 3.2.1 Peralatan

a. Oven

Oven pada penelitian ini digunakan untuk mengeringkan bahan material yang akan diuji. Oven yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas 110°C serta memiliki daya sebesar 2800 Watt.

b. Satu set saringan

Saringan yang digunakan pada penelitian ini adalah satu set saringan dengan diameter 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. Satu set saringan ini berfungsi untuk memisahkan dan mengelompokkan gradasi agregat halus dan agregat kasar.

c. Timbangan

Pada penelitian ini timbangan digunakan untuk mengukur berat dari suatu material yang akan digunakan pada adukan beton. Timbangan yang digunakan pada penelitian ini adalah timbangan dengan ketelitian 0,1 gram dan memiliki kapasitas 30 kg.

d. Piknometer

Piknometer berfungsi untuk menguji dari kandungan zat organik dan berat jenis pada agregat halus.

e. Gelas ukur 1000 cc

Gelas ukur 1000 cc pada penelitian ini digunakan untuk mengukur volume air yang dibutuhkan pada pengujian analisis kadar lumpur dan analisis berat jenis.

f. Cetakan kerucut pasir

Cetakan kerucut pasir pada penelitian ini digunakan untuk pengujian kondisi SSD (*surface saturated dry*) pada agregat halus (pasir).

g. Bejana silinder

Bejana silinder pada penelitian ini digunakan untuk pengujian berat volume agregat kasar dan agregat halus dalam kondisi kering, basah, maupun SSD (*surface saturated dry*). Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis bejana yaitu bejana dengan kapasitas 5 liter yang digunakan untuk pengujian berat volume agregat halus dan bejana dengan kapasitas 10 liter yang digunakan untuk pengujian berat volume agregat kasar.

h. *Concrete mixer*

*Concrete mixer* pada penelitian ini digunakan untuk mencampur semua material pembentuk beton. Alat *concrete mixer* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas 0,125 m<sup>3</sup> yang memiliki kecepatan putaran sebesar 20-30 putaran setiap 1 menit.

i. Satu set alat *slump test*

Alat yang dipakai pada penelitian ini adalah satu set kerucut abrams dengan diameter atas 102 mm, diameter bawah 203 mm, tinggi 305 mm dan *base plate* yang digunakan memiliki ketebalan 3 mm dengan ukuran sisi 900 x 900 mm. Alat ini digunakan untuk menguji *workability* beton mutu normal yang telah memenuhi syarat pada *slump test*.

j. Meteran

Meteran pada penelitian ini digunakan untuk mengukur ketinggian *slump test* pada pengujian *slump test* untuk beton dengan mutu normal.

k. Cetakan benda uji (*mold*)

Cetakan benda uji digunakan untuk mencetak beton sesuai dengan bentuk dan kebutuhan penelitian. Penelitian ini menggunakan cetakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm.



- l. Bak perendam  
Bak perendam pada penelitian ini digunakan untuk merendam beton beton dalam proses perawatan. Perawatan beton ini dilakukan untuk menjaga kelembaban beton agar beton tidak cepat kehilangan air saat beton sudah dalam fase mengering.
- m. *Compression testing machine* (CTM)  
*Compression testing machine* digunakan untuk menguji kuat tekan pada sampel beton mutu normal yang telah dibuat. Alat CTM yang digunakan pada penelitian ini memiliki beban kapasitas maksimal sebesar 3000 KN dengan merk CONTROLS.
- n. Alat bantu lainnya  
Alat bantu yang digunakan untuk memaksimalkan penelitian yang dilakukan seperti tongkat pemadat, kode warna untuk analisis zat organis agregat halus, sekop, sendok semen, ember, kontainer, , kuas, dan alat tulis.

### 3.2.2 Bahan

- a. Semen PCC  
Semen yang digunakan adalah semen jenis PCC dengan merek Tiga Roda. Semen yang digunakan diperoleh dari toko dalam kondisi tertutup dengan berat 50 kg per sak.
- b. Agregat halus  
Agregat halus yang digunakan berasal dari Gunung Sugih, Lampung Tengah yang harus memenuhi standar SNI dalam beberapa pengujian seperti kadar air, berat jenis, dan absorpsi (penyerapan), kadar lumpur, gradasi agregat halus, berat volume serta kandungan zat organis pada pasir.
- c. Agregat kasar  
Agregat kasar yang digunakan berasal dari daerah Tanjung, Lampung Selatan dengan ukuran maksimum 20 mm. Agregat yang

digunakan harus memenuhi standar pada SNI dari beberapa pengujian seperti kadar air agregat kasar, gradasi agregat kasar, berat jenis dan absrobsi (penyerapan), dan berat volume agregat kasar.

d. *Silica Fume*

*Silica fume* pada penelitian ini digunakan sebagai bahan tambah semen terhadap adukan beton dengan kadar 0%, 5% dan 10% terhadap berat semen yang digunakan sebagai bahan tambah semen.

e. Abu Ketel

Abu ketel pada penelitian ini berasal dari PT. Perkebunan Nusantara (PTPN 7) dengan variasi kadar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen yang digunakan sebagai bahan tambah semen.

### 3.3. Pembuatan Benda Uji

Setelah merencanakan campuran dengan tepat, langkah berikutnya adalah membuat benda uji. Benda uji yang akan dibuat adalah benda uji dengan bentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm yang akan digunakan untuk pengujian kuat tekan. Terdapat 3 kategori benda uji yaitu benda uji yang tidak menggunakan tambahan kedua material, benda uji yang hanya menggunakan satu material tambah yaitu abu ketel atau *silica fume* saja yang akan diuji pada umur 3, 7, 14, 28 dan 56 hari dan benda uji yang menggunakan kombinasi bahan tambah material keduanya yang akan diuji pada umur 28 dan 56 hari. Data dari jumlah benda uji dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10. Variabel dan Kode Benda Uji

No	Jenis komposisi	Kode benda uji	Jumlah sampel
1	100%S + 0%SF + 0% AK	BAK 0	15
2	100%S + 0%SF + 5% AK	BAK 1	15
3	100%S + 0%SF + 10% AK	BAK 2	15
4	100%S + 0%SF + 15% AK	BAK 3	15

Tabel 11. Variabel dan Kode Benda Uji (Lanjutan)

No	Jenis komposisi	Kode benda uji	Jumlah sampel
5	100%S + 0%SF + 20% AK	BAK 4	15
6	100%S + 5%SF + 0% AK	BSF 1	15
7	100%S + 10%SF + 0% AK	BSF 2	15
8	100%S + 5%SF + 5% AK	BS5 1	6
9	100%S + 5%SF + 10% AK	BS5 2	6
10	100%S + 5%SF + 15% AK	BS5 3	6
11	100%S + 5%SF + 20% AK	BS5 4	6
12	100%S + 10%SF + 5% AK	BS10 1	6
13	100%S + 10%SF + 10% AK	BS10 2	6
14	100%S + 10%SF + 15% AK	BS10 3	6
15	100%S + 10%SF + 20% AK	BS10 4	6
Total sampel			153

Keterangan:

- S = Semen  
 AK = Abu ketel  
 SF = *Silica fume*

Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pembuatan sampel benda uji adalah seperti berikut:

- 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 untuk kategori 1; semen, abu ketel atau *silica fume* untuk kategori 2 atau semen, abu ketel dan *silica fume* untuk kategori 3.
- 3) Setelah agregat halus dan kasar, semen, campuran kategori 1, campuran kategori 2 ataupun kategori 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

Pada saat sebelum beton segar dimasukan kedalam  *mold*  untuk dicetak, beton segar harus diuji terlebih dahulu *workability*nya dengan menggunakan *slump test*. Berdasarkan SNI 03-1972-1990, tahapan pada pelaksanaan pengujian *slump* adalah sebagai berikut:

- 1) Kerucut abrams dibersihkan terlebih dahulu dengan air baik pada bagian dalamnya maupun bagian luarnya
- 2) Kerucut abrams yang telah dibersihkan diletakkan di atas pelat baja dengan ukuran 900 mm x 900 mm.
- 3) Setelah diletakkan di atas pelat baja, kerucut abrams dipegang pada bagian kakinya dengan kuat agar tidak terjadi pergeseran saat adukan beton dimasukkan kedalamnya.
- 4) Adukan beton yang segar dimasukkan kedalam kerucut abrams dengan ketinggian 1/3 dari kerucut abrams lalu ditumbuk dengan tongkat penumbuk sebanyak 25 kali.
- 5) Lakukan hal yang sama setiap pertambahan ketinggian 1/3 dari ketinggian kerucut abrams.
- 6) Ratakan permukaan adonan pada bagian atas kerucut abrams dengan menggunakan sendok semen.
- 7) Kemudian kerucut abrams diangkat perlahan-lahan secara tegak lurus ke atas.
- 8) Ukur penurunan adonan beton dari tinggi mula-mula, dengan mengurangi tinggi kerucut abrams dengan tinggi adonan sekarang. Hasil pengurangan tersebut 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 1, 5, 12, 26, dan 54 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 24 jam sebelum dilakukan pengujian kuat tekan.

### 3.6. Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM

Sampel beton yang telah selesai dilakukan *curing*, selanjutnya dilakukan pengujian kuat tekan dengan benda uji berbentuk kubus. Kuat tekan beton adalah Kekuatan tekan beton yang merujuk pada kapasitas beton untuk menahan gaya tekan tertentu (yang diterapkan oleh mesin pengujian) dengan beban per satuan area sampai mencapai titik kegagalan (SNI 03-1974-1990). Pengujian kuat tekan pada penelitian ini menggunakan *compression testing machine* (CTM) yang memiliki kapasitas maksimal sebesar 3000 KN dengan kecepatan pembebanan sebesar 0,14-0,34 MPa/detik. Rumus yang dapat dipakai pada 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<sup>2</sup>)

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 beton, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisis data sebagai berikut:

- 1) Menghitung kuat tekan beton pada benda uji kubus dengan umur beton 3, 7, 14, 28, 56 hari pada beton normal dan beton dengan tambahan salah satu material yaitu abu ketel atau *silica fume* untuk melihat pengaruhnya terhadap laju peningkatan kuat tekan beton.
- 2) Menghitung kuat tekan beton pada benda uji kubus dengan umur beton 28 dan 56 hari dengan tambahan kombinasi dua material yaitu abu ketel dan *silica fume* dengan kadar tertentu untuk melihat peningkatan kuat tekan beton.
- 3) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari dibuat grafik perbandingan laju peningkatan kuat tekan antara beton tanpa bahan tambah dengan beton yang diberikan salah satu bahan tambah yaitu abu ketel atau *silica fume* dengan kadar persentase tertentu yang kemudian dilakukan analisis data.
- 4) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari dibuat diagram batang perbandingan kuat tekan antara beton tanpa bahan tambah dengan beton yang menggunakan kombinasi bahan tambah yang kemudian dilakukan analisis data.
- 5) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 dan 56 hari dibuat tabel perbandingan persentase peningkatan kuat tekan beton antara variasi kombinasi bahan tambah yang kemudian dilakukan analisis data.

## **BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan penjelasan di atas, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan abu ketel, *silica fume* atau abu ketel + *silica fume* menurunkan nilai *slump* beton, semakin besar kadar abu ketel dan *silica fume* yang digunakan maka semakin kecil pula nilai *slump* yang dihasilkan.
2. Laju peningkatan kuat tekan beton tanpa bahan tambah tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan PBI 1971 dan laju peningkatan beton dengan bahan tambah mengalami peningkatan kuat tekan pada umur 3, 7, 14 hari. Akan tetapi peningkatan yang signifikan terjadi pada umur 28 dan 56 hari. Sedangkan persentase kuat tekan terhadap beton tanpa bahan tambah mayoritas kode benda uji mengalami penurunan pada umur 3, 7, 14 hari yang diakibatkan oleh peningkatan kuat tekan yang signifikan pada umur 28 hari dan tidak ada peningkatan yang signifikan pada umur 3, 7, dan 14 hari
3. Persentase peningkatan kuat tekan beton pada umur 28 hari terbesar terjadi pada kode benda uji BS10 1, sedangkan pada umur 56 hari peningkatan kuat tekan terbesar terhadap beton tanpa bahan tambah terjadi pada kode benda uji BS5 1. Selain mengalami peningkatan pada umur 28 hari dan 56 hari terhadap beton tanpa bahan tambah, beton juga mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 28 hari ke 56 hari pada setiap komposisi beton. Persentase peningkatan kuat tekan terbesar terjadi pada kode benda uji BS5 1, sedangkan beton dengan kode BS10 4 mengalami penurunan kuat tekan.

4. Kadar optimum pada penggunaan bahan tambah abu ketel dan *silica fume* terdapat pada kode benda uji BS5 1. Hal ini disebabkan karena nilai *slump* yang dihasilkan oleh kode benda uji ini terbesar dari kode benda uji lain. Selain itu, kuat tekan yang dihasilkan kode ini pada umur 28 hari lebih besar dari kuat tekan tanpa bahan tambah dan memiliki persentase peningkatan kuat tekan di umur 56 hari terhadap beton tanpa bahan tambah terbesar dari kode benda uji lain. Persentase peningkatan kuat tekan dari umur 28 hari ke 56 hari pada kode BS5 1 juga memiliki persentase terbesar diantara persentase peningkatan kuat tekan umur 28 hari ke 56 hari kode benda uji lain.

## 5.2 Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini, maka perlu diadakan penelitian lebih lanjut untuk menyempurnakan dan melengkapi serta mengembangkan penelitian ini. Saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Pelaksanaan penelitian dari persiapan material sampai pengujian sampel harus dilakukan dengan ketelitian tinggi agar mendapatkan hasil yang maksimal.
2. Pada pemadatan adukan beton menggunakan *vibrator*, harus dilakukan dengan teliti agar tidak terjadi *bleeding* pada adukan beton dan cetakan yang akan digunakan untuk mencetak beton harus dipastikan dalam kondisi terkunci rapat agar tidak terjadi rembesan pada sela-sela cetakan saat dilakukan *vibrating*.
3. Pada penelitian selanjutnya dalam penggunaan abu ketel dan *silica fume* disarankan menggunakan *superplasticizer* agar *slump* beton yang dihasilkan adukan tidak terlalu kecil.



## DAFTAR PUSTAKA

- Abed, A. A., & Mojtahedi, A. 2023. *Enhancing Concrete Properties Using Silica Fume: Optimized Mix Design*. Iraq: Iraq University College-Basra
- ACI Committee 234. 2006. *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*, ACI Committee. *American Concrete Institute*, 96, 1–51.
- 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.
- SNI 03-1972-1990. 1990. Metode Pengujian Slump Beton. Jakarta. Badan Standarisasi Nasional
- SNI 03-1974-1990. 1990. Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- 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 03-6861.1-2002. 2002. Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam). Bandung: Departemen Pekerjaan Umum, Yayasan LPMB.
- SNI 15-7064-2004. 2004. Semen Portland Komposit: Jakarta: Badan Standarisasi Nasional
- SNI 7656:2012. 2012. Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional

- Departemen Pekerjaan Umum dan Tenaga Listrik. 1971. Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971. *Jakarta: Direktorat Penyelidikan Masalah Bangunan*, 7, 130.
- Dinas Perkebunan Provinsi Lampung. 2020. Data Statistik Persebaran Luas Areal Dan Produksi Komoditas Kelapa Sawit Dinas Perkebunan di Provinsi Lampung Tahun 2020 Melalui Peta Gis (*Geographic Information System*). Dinas Perkebunan Provinsi Lampung. <https://disbun.lampungprov.go.id/detail-post/penyajian-data-statistik-persebaran-luas-areal-dan-produksi-komoditas-kelapa-sawit-dinas-perkebunan-di-provinsi-lampung-tahun-2020-melalui-peta-gis-geographic-information-system>
- Emda, F. A., Safriani, M., & Farizal, T. 2023. Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton Normal dengan Campuran Abu Boiler Pada Proyek Jembatan di PT. Socfindo Kebun Seunagan. *Journal of Civil Engineering Building and Transportation*, 7(1), 132–137.
- Ginting, A. 2011. Perbandingan Peningkatan Kuat Tekan dengan Kuat Lentur pada Berbagai Umur Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 7(2), 112
- Gunawan, H. C., Mungok, C. D., & Lestyowati, Y. 2018. Pemanfaatan Abu Boiler Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Beton. *JeLAST : Jurnal PWK, Laut, Sipil, Tambang*, 5(2), 1–9.
- International Organization for Standardization*. 1997. ISO Standard 3893. *Concrete Classification by compressive strength*.
- Irianti, L., Freddi, & Virmaryah. 1998. Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi. Laporan Penelitian. Lampung: LPIU DUE Universitas Lampung
- Irianti, L. 1999. Pengaruh Abu ketel Sebagai Bahan Tambahan Dalam Desain Beton Mutu Tinggi. *Jurnal Penelitian Rekayasa Sipil dan Perencanaan*, 2(2), 14-25.
- Kamal, A. A., & Mojtahedi, I. 2023. Enhancing Concrete Properties Using Silica Fume: Optimized Mix Design. *Journal of Smart Buildings and Construction Technology CITATION Abed*, 5(1).
- Mulyono, T. 2007. Kapur Sebagai Bahan Tambah Untuk Beton Normal. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 11.
- Murdock, L.J, Brook, K.M. 1986. *Bahan dan Praktek Beton*, Edisi Ke-4. Jakarta : Erlangga

- Neville, A. M., & Brooks, J. J. 2010. *Concrete Technology Second Edition*. England: Pearson
- Panennungi, T., & Pertiwi, N. 2018. Ilmu bahan Bangunan. Malang: *Badan Penerbit UNM*.
- Pradana, T, Olivia, M., & Sitompul, R.I. 2016. Kuat Tekan dan Porositas Beton Semen OPC, PCC, dan OPC POFA di Lingkungan Gambut. *Jorn Fteknik*, 3, 1–10.
- Putra, R.H. 2022. *Compressive Strength Of High Strength Concrete By Using Fly Ash and Silica Fume As Filling Materials*. Skripsi. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Satriani, S., Permatasari, S., & Agustina, S. 2022. Studi Pemanfaatan Limbah Abu Kerak Boiler Terhadap Kualitas Bata Beton. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi) : Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 12(1), 94.
- Sebayang, S. 2011. *Tinjauan Sifat-Sifat Mekanik Beton Alir Mutu Tinggi Dengan Silika Fume Sebagai Bahan Tambah*. Bandar Lampung: Jurnal Rekayasa Sipil dan Perencanaan Fakultas Teknik Universitas Lampung, 15(2).
- Sirait, E. G. 2023. *Pengaruh Penggunaan Bahan Tambah Silica Fume terhadap Kuat Tekan Beton Mutu 25 MPa*. Skripsi. Bandung: Universitas Komputer Indonesia.
- Silica Fume Association*. 2022. *Silica Fume User's Manual Second Edition*. *Taiwan Review* (Vol. 69, Issue 4).
- Sumajouw, M. D. J., Teknik, F., Sam, U., Manado, R., & Windah, R. S. 2014. PENGUJIAN KUAT TEKAN BETON MUTU TINGGI Servie O. Dapas. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(4), 215–218.
- Tampubolon, S. P. 2022. Struktur Beton I. dalam *Nusantara* (Vol. 1, Issue 1).
- Widjoko, L. 2010. Pengaruh Sifat Kimia Terhadap Unjuk Kerja Mortar. Lampung: *Jurnal Teknik Sipil UBL*, 1(1), 52–59.