

**PENGARUH PENAMBAHAN ABU KETEL, *SILICA FUME*, DAN *CURING*
AIR LAUT PADA KUAT TEKAN BETON YANG MENGGUNAKAN
AGREGAT KASAR BATU PUTIH**

(Skripsi)

Oleh

DANI AHMAD FERDIAN

2215011060



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

PENGARUH PENAMBAHAN ABU KETEL, *SILICA FUME*, DAN *CURING* LAUT PADA KUAT TEKAN BETON YANG MENGGUNAKAN AGREGAT KASAR BATU PUTIH

Oleh

DANI AHMAD FERDIAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan abu ketel dan *silica fume* masing-masing sebesar 5% terhadap kuat tekan beton yang menggunakan agregat kasar batu putih asal Bandar Lampung, serta mengevaluasi dampak perawatan (*curing*) menggunakan air laut. Metode yang digunakan merupakan metode eksperimental dengan benda uji silinder 15 cm x 30 cm, penelitian ini menguji variasi campuran pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari dengan target mutu beton $f'c$ 20,75 MPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan *silica fume* memberikan kuat tekan tertinggi sebesar 37,76 MPa pada umur 56 hari. Penggunaan agregat kasar batu putih memiliki daya serap air yang tinggi (6,67%), namun penambahan *admixture* Naptha E121 sebesar 1% efektif dalam menjaga kelecakan (*workability*) adukan beton. Selain itu, hasil penelitian menyimpulkan bahwa perawatan dengan air laut tidak memberikan pengaruh penurunan yang signifikan terhadap kuat tekan beton dibandingkan dengan perawatan air tawar, meskipun terdapat sedikit penurunan kekuatan pada umur 56 hari.

Kata Kunci: Abu ketel, *silica fume*, kuat tekan beton, batu putih, *curing* air laut

ABSTRACT

THE EFFECT OF ADDING BOILER ASH, SILICA FUME, AND SEAWATER CURING ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE USING WHITE STONE AS COARSE AGGREGATE

By

DANI AHMAD FERDIAN

This study aims to analyze the effect of adding 5% boiler ash and 5% silica fume on the compressive strength of concrete using coarse white stone aggregate from Bandar Lampung, as well as to evaluate the impact of curing with seawater. The method used was an experimental method with 15 cm x 30 cm cylindrical test specimens, this study tested mixture variations at 3, 7, 14, 28, and 56 days with a target concrete strength of $f'c$ 20.75 MPa. Test results showed that the combination of boiler ash and silica fume yielded the highest compressive strength of 37.76 MPa at 56 days. The use of coarse white stone aggregate resulted in high water absorption (6.67%), however, the addition of 1% Naptha E121 admixture was effective in maintaining the workability of the concrete mix. Furthermore, the study concluded that curing with seawater did not result in a significant decrease in concrete compressive strength compared to freshwater curing, although there was a slight decrease in strength at 56 days.

Keywords: *Boiler ash, silica fume, concrete compressive strength, white stone, seawater curing*

**PENGARUH PENAMBAHAN ABU KETEL, *SILICA FUME*, DAN *CURING AIR*
LAUT PADA KUAT TEKAN BETON YANG MENGGUNAKAN AGREGAT
KASAR BATU PUTIH**

Oleh:

Dani Ahmad Ferdian

Skripsi

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

JURUSAN TEKNIK SIPIL

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

: **PENGARUH PENAMBAHAN ABU KETEL,
SILICA FUME, DAN CURING AIR LAUT
PADA KUAT TEKAN BETON YANG
MENGUNAKAN AGREGAT KASAR
BATU PUTIH**

Nama Mahasiswa

: **Dani Ahmad Ferdian**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011060

Program Studi

: **S1 Teknik Sipil**

Jurusan

: **Teknik Sipil**

Fakultas

: **Teknik**



1. Komisi Pembimbing


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


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

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil


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


Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Ir. Laksmi Irianti, M.T.



Sekretaris

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



Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. Suyadi, S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 21 Mei 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dani Ahmad Ferdian
Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011060
Judul Skripsi : Pengaruh Penambahan Abu Ketel, *Silica Fume*,
dan *Curing* Air Laut Pada Kuat Tekan Beton yang
Menggunakan Agregat Kasar Batu Putih
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 Penulisan Karya Ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, Juni 2026
Pembuat Pernyataan



Dani Ahmad Ferdian

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Dani Ahmad Ferdian, dilahirkan di Kecamatan Baturaja Timur yang terletak di Ogan Komering Ulu pada tanggal 13 Agustus 2004. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Feri Andi dan Ibu Susi Nurdian. Penulis merupakan 3 bersaudara dengan memiliki 1 (satu) kakak laki-laki yang bernama Naufal Asmanda Ferdian dan 1 (satu) adik perempuan bernama Asyifa Ramadhani.

Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Kartika II, OKU yang diselesaikan pada tahun 2010, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Dasar di SDN 2 OKU yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan Pendidikan Tingkat Pertama di SMP Negeri 1 OKU yang diselesaikan pada tahun 2019, dan dilanjutkan Pendidikan Menengah Atas di SMA Negeri 1 OKU yang diselesaikan pada tahun 2022. Kemudian, penulis diterima di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN pada tahun 2022. Selama menjadi mahasiswa, penulis berperan aktif di dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung sebagai Anggota dan Kepala Departemen Eksplorasi dan Pengembangan pada periode 2023-2024 dan 2024-2025.

Penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode I di Desa Ogan Campang, Kecamatan Abung Pekurun, Kabupaten Lampung Utara, Lampung selama 40 hari, yaitu Januari – Februari 2025, Kemudian pada Juli – Oktober 2025 penulis melaksanakan Kerja Praktik pada Proyek Peningkatan D.I. Way Sekampung (Sub. D.I. Raman Utara) Kab. Lampung Timur Tahap 2. Mulai pada tahun 2025 juga, penulis melakukan penelitian yang berjudul “Pengaruh Penambahan Abu Ketel, *Silica Fume*, dan *Curing* Air Laut Pada Kuat Tekan Beton yang Menggunakan Agregat Kasar Batu Putih” sebagai tugas akhir dan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahhirabbalamin, dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji bagi Allah Swt atas limpahan rahmat, nikmat, kekuatan, dan kesempatan, kuucapkan syukur atas Karunia Mu dan dengan segala kerendahan hati. Akhirnya saya dapat menyelesaikan karya yang semoga menjadikan saya insan yang berguna, bermanfaat, dan bermartabat.

Skripsi ini kupersembahkan kepada kedua orangtuaku Ayah dan Bunda yang selalu menuntunku dengan sabar dan penuh kasih. Terima kasih tiada terhingga atas semua pelajaran hidup, semangat, dukungan finansial, doa, dan segala hal yang kalian berikan. Aku bersyukur memiliki orangtua sekuat dan setulus kalian. Semoga karya sederhana ini bisa membuat kalian tersenyum bangga.

Untuk Kakak dan Adik saya yang selalu menjadi motivasi dan inspirasi, terimakasih atas semua dukungan yang telah diberikan.

Untuk keluarga yang selalu hadir dengan doa, semoga karya ini menjadi hadiah kecil yang membawa kebahagiaan untuk kita semua.

Skripsi ini kupersembahkan untuk sahabat-sahabat yang menjadi keluarga kedua bagiku. Tanpa kalian, mungkin perjalanan ini terasa lebih sulit.

Untuk dosen yang selalu memberikan kritik dan saran dengan sabar, terima kasih atas semua ilmu berharga yang tak ternilai.

Terima kasih untuk teman-teman keluarga besar Angkatan 2022 atas dukungannya dalam proses yang panjang menemanin perjalanan kuliah dari awal hingga akhir studi.

Skripsi ini kupersembahkan untuk diriku sendiri, yang telah berjuang keras melewati segala tantangan. Terima kasih karena tidak menyerah meski banyak rintangan menghadang. Semoga karya ini menjadi pijakan untuk masa depan yang lebih baik.

MOTTO

“Maka sesungguhnya beserta kesulitan ada kemudahan.”

(Q.S. Al-'Insyirah:5)

“Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya. ”

(Q.S. Al-Baqarah:286)

“That there will always be a part of me that's holding on and still believes that everything is fine, and that i'm living a normal life”

(Rex Orange County)

“Last but not least, i wanna thank me, i wanna thank me for believing in me, i wanna thank me for doing all this hard work, i wanna thank me for having no days off, i wanna thank me for never quitting, i wanna thank me for always being a giver and trying give more than i receive, i wanna thank me for trying do more right than wrong, i wanna thank me for just being me at all time”

SANWACANA

Atas berkat Rahmat hidayat Allah S.W.T. dengan mengucapkan puji Syukur Alhamdulillah, penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Abu Ketel, *Silica Fume*, dan *Curing* Air Laut Pada Kuat Tekan Beton yang Menggunakan Agregat Kasar Batu Putih” sebagai salah satu syarat dalam mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung. Penelitian ini dilakukan bersama Ibu Ir. Lakmi Irianti, M.T., dan pada penyusunan laporan ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dukungan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM, ASEAN, Eng., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama, yang dengan penuh kesabaran telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan banyak ilmu serta masukan selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas waktu, perhatian, dan dedikasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan yang Ibu berikan dibalas dengan keberkahan dan kebaikan yang berlipat.
6. Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Kedua yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan selama proses penyelesaian skripsi ini. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya atas perhatian,

ilmu, dan motivasi yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Bapak senantiasa dibalas dengan keberkahan.

7. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Sipil Universitas Lampung, sekaligus dosen Penguji yang telah memberikan evaluasi, masukan yang konstruktif, serta kritik dan saran yang sangat membantu dalam penyempurnaan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kontribusi dan ilmu yang telah diberikan. Semoga segala kebaikan Ibu senantiasa mendapatkan keberkahan.
8. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik, terimakasih atas bimbingan dan pengarahan selama masa perkuliahan.
9. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Sipil yang sudah memberikan ilmu dan wawasan yang bermanfaat dalam proses pembelajaran agar lebih baik kedepannya.
10. Seluruh Staff dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi (Pak Jali, Mas Tio, Pak Eko, dan Mba Eva) yang sudah memberikan fasilitas sarana prasarana dalam menunjang penelitian serta memberikan saran, dan dukungan serta bimbingan selama kami melakukan penelitian.
11. Seluruh Staff Administrasi Jurusan Teknik Sipil yang selalu membantu dalam administrasi selama perkuliahan penulis.
12. Kedua orang tua yang penulis cintai, Bapak Feri Andi dan Ibu Susi Nurdian. Terimakasih telah membesarkan penulis dengan penuh kasih sayang dan cinta yang sangat besar, terimakasih tiada terhingga atas dukungan mental, moral, dan finansial, serta untuk semua arahan, nasihat, dan perhatian yang telah kalian berikan. Terimakasih selalu menguatkan dan kebersamaan penulis melalui semua doa yang telah kalian panjatkan. Teruntuk pria yang selalu menjadi inspirasi penulis, terimakasih ayah atas segala pengorbanan, lelah, dan keringat. Walaupun jarang bertukar cerita, cara hidup mu akan selalu menjadi pembimbing, dan langkah kaki mu akan selalu menjadi penuntun. Terimakasih telah mengajarkan penulis cara menjadi laki-laki. Teruntuk perempuan yang penulis sangat cintai, terimakasih bunda untuk rasa hangat, kasih sayang, canda tawa, dan doa yang menguatkan dan menjadikan hari-hari penulis selalu diiringi dengan hal baik. Semua

pencapaian yang penulis raih bukan semata-mata karena kemampuan penulis, melainkan buah didikan dan doa dari ayah dan bunda hingga akhirnya penulis sampai dititik ini.

13. Kakak dan Adik yang selalu menjadi motivasi penulis, Teruntuk Naufal Asmanda Ferdian, kakak penulis yang langkah nya selalu ingin penulis ikuti sedari kecil, dan sosok yang hebat dalam ingatan penulis. Terimakasih atas dukungan yang secara tidak langsung, dan selalu hadir menjadi sosok kakak teruntuk si bungsu. Teruntuk Asyifa Ramadhani, adik yang tidak ingin saya kecewakan, dan selalu menjadi semangat penulis untuk mencapai mimpinya, terimakasih atas semua bentuk dukungan dan perasaan yang telah diberikan.
14. Seseorang yang selalu membersamai dan menemani penulis dalam segala hal, Dhea Amelya Putri. Terimakasih atas warna yang telah diberikan, kehadiran yang selalu engkau usahakan, dan semua bentuk dukungan dalam hal apapun didalam kehidupan penulis. Terimakasih telah meringankan beban di hari-hari berat yang penulis lalui, ucapan semangat yang tidak terhitung jumlah nya, canda tawa, dan rasa bahagia yang telah diberikan. Kehadiran mu selalu membawa suasana yang positif bagi penulis.
15. Rekan seperjuangan, Aditya Pebriansyah. Terimakasih telah berjalan bersama melalui semua suka duka yang dialami dalam menyelesaikan penelitian ini sedari awal, candaan yang selalu terselip di hari-hari yang berat sehingga menjadikan suasana dalam menjalankan penelitian ini menjadi lebih ringan, dan saling membantu dari semasa perkuliahan hingga akhirnya menyelesaikan semua nya sampai di titik yang selalu ingin kita raih bersama.
16. Kepada Ibu Lismitah, orang tua dari teman penulis yang sudah menjadi orang tua kedua penulis disaat sedang jauh dari rumah. Terimakasih telah menanggapi dan memperlakukan penulis seperti anak sendiri. Terimakasih atas semua bentuk dukungan yang telah diberikan dari awal perkuliahan hingga sampai saat ini.

17. YONGKO, sahabat-sahabat penulis semasa perkuliahan. Terimakasih atas kebersamaan yang telah kita lalui sedari awal perkuliahan, dan candaan yang membuat hari-hari penuh tawa dan penuh kebahagiaan.
18. MAGER YOK, sahabat penulis yang selalu bisa di andalkan. Terimakasih telah membersamai penulis dan memberikan segala bentuk dukungan kepada penulis, baik dukungan mental, pikiran, dan fasilitas yang telah diberikan. Terimakasih telah membuat masa perkuliahan penulis terasa lebih ringan dengan semua perilaku yang menyenangkan, dan telah melewati suka duka bersama. Terimakasih telah membantu menyelesaikan perkuliahan ini dan menjadi salah satu alasan penulis dapat bertahan.
19. RB'S, sahabat yang sudah penulis anggap keluarga. Terimakasih telah menjadi sahabat yang senantiasa menemani penulis sedari masa sekolah hingga saat ini. Terimakasih telah menjadi tempat berbagi cerita, keluh kesah, dan kebahagiaan yang tiada habis nya.
20. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2022 (TEGAS) yang menemani penulis berjuang dari awal perkuliahan, memberikan semangat dan dukungan sampai penulis bisa menyelesaikan penulisan ini. terimakasih kita sudah bertahan dan menjalani kehidupan skripsi yang menyenangkan ini.
21. Kepada abang dan kakak, khususnya keluarga besar Teknik Sipil angkatan 2020, terima kasih atas bantuan, arahan, dan pengalaman yang telah diberikan selama masa perkuliahan. Kepada adik-adik angkatan 2024, terima kasih atas kebersamaan dan canda tawa yang telah diberikan. Semoga kalian semua dapat menyelesaikan studi dengan lancar dan tepat waktu.
22. Ucapan terimakasih yang terakhir penulis berikan kepada diri sendiri, Dani Ahmad Ferdian. Terimakasih telah bertahan dan tidak pernah menyerah untuk melewati semua keraguan dan ketakutan yang datang setiap harinya. Terimakasih atas semua keberanian, jerih payah, dan terus memberikan upaya terbaik untuk terus melangkah hari demi hari. Terimakasih atas semua pengorbanan yang tidak diketahui oleh orang lain. Terakhir, terimakasih sudah bertanggung jawab dengan menyelesaikan apa yang telah dimulai.

Semoga segala doa dan dukungan yang diberikan kepada penulis mendapatkan balasan terbaik dari Allah Subhanahu wa ta'ala. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih banyak memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun. Harapannya, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang memerlukannya.

Bandar Lampung, Juni 2026

Penulis,

Dani Ahmad Ferdian

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Beton Normal	8
2.2. Material Penyusun Beton	9
2.2.1. Semen PCC (<i>Portland Composite Cement</i>)	9
2.2.2. Agregat Halus	11
2.2.3. Agregat Kasar	12
2.2.4. Air	14
2.3. Batu Putih	16
2.4. Abu Ketel	17
2.5. <i>Silica Fume</i>	18
2.6. Perawatan Beton (<i>Curing</i>)	19
2.6.1. Perawatan Beton (<i>Curing</i>) Dengan Air Laut	19
2.7. Pengujian Kuat Tekan	21
2.8. Penelitian Sebelumnya	22

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Pendahuluan	25
3.2	Peralatan dan Bahan	28
3.2.1.	Alat	28
3.2.2.	Bahan	30
3.3.	Pembuatan Benda Uji	32
3.4.	Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar	33
3.5.	Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>)	34
3.6.	Pengujian Benda Uji menggunakan CTM.....	35
3.7.	Perhitungan dan Analisis Data	36

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Pengujian Material Penyusun Beton.....	38
4.2	Komposisi Material Campuran Beton.....	39
4.3	Hasil Trial Mix dan Evaluasi <i>Workability</i> Awal.....	40
4.4	Kelecekan Adukan Beton (<i>Workability</i>)	43
4.5	Besar Peningkatan Kuat Tekan Beton.....	44
4.6	Pengaruh Air Lajut Terhadap Kuat Tekan beton	52

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan.....	56
5.2	Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A (PENGUJIAN BAHAN)

LAMPIRAN B (PERHITUNGAN *MIX DESIGN*)

LAMPIRAN C (DATA HASIL PENELITIAN)

LAMPIRAN D (DOKUMENTASI PENELITIAN)

LAMPIRAN E (LEMBAR ASISTENSI)

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 1. Skema perusakan beton akibat air laut.....	21
Gambar 2. Diagram alir penelitian.....	27
Gambar 3. Hasil nilai <i>slump test trial mix</i> tanpa <i>admixture</i>	41
Gambar 4. Hasil nilai <i>slump test trial mix</i> dengan <i>admixture</i>	42
Gambar 5. Nilai <i>slump test</i> dengan Naptha E121	44
Gambar 6. Perbandingan besar peningkatan kuat tekan beton batu putih	51
Gambar 7. Perbandingan nilai kuat tekan beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut	55

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 1. Persentase kandungan bahan utama pada semen portland	9
Tabel 2. Senyawa dari semen portland.....	9
Tabel 3. Persentase kandungan oksida pada semen OPC dan PPC.....	10
Tabel 4. Ukuran gradasi agregat halus untuk adukan	11
Tabel 5. Ukuran gradasi agregat halus	14
Tabel 6. Batasan konsentrasu kandungan zat kimia pada air	15
Tabel 7. Kandungan zat kimia pada batu putih	16
Tabel 8. Kandungan kimia dalam abu ketel	17
Tabel 9. Sifat fisik abu ketel.....	17
Tabel 10. Sifat-sifat fisik <i>silica fume</i>	19
Tabel 11. Kandungan ion air laut	20
Tabel 12. Perbandingan kuat tekan benda uji silinder dan kubus	22
Tabel 13. Variabel dan kode benda uji	32
Tabel 14. Hasil pengujian fisik material penyusun beton	38
Tabel 15. Kebutuhan material per m ³	39
Tabel 16. Kebutuhan material untuk 72 benda uji silinder	39
Tabel 17. Hasil <i>slump test trial mix</i> tanpa <i>admixture</i>	40
Tabel 18. Hasil <i>slump test trial mix</i> dengan <i>admixture</i>	41
Tabel 19. Hasil <i>slump test</i> beton	43
Tabel 20. Laju peningkatan kuat tekan beton PBI 1971	45
Tabel 21. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 3 hari	45
Tabel 22. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari	46
Tabel 23. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 14 hari	46
Tabel 24. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari	46
Tabel 25. Hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 56 hari	47

Tabel 26. Hasil perhitungan outlier data benda uji umur 3 hari.....	48
Tabel 27. Hasil perhitungan outlier data benda uji umur 7 hari.....	48
Tabel 28. Hasil perhitungan outlier data benda uji umur 14 hari.....	48
Tabel 29. Hasil perhitungan outlier data benda uji umur 28 hari.....	49
Tabel 30. Hasil perhitungan outlier data benda uji umur 56 hari.....	49
Tabel 31. Rekapitulasi <i>outlier</i> data pada sampel dengan <i>curing</i> air tawar.....	50
Tabel 32. Hasil rata-rata pengujian kuat tekan beton.....	50
Tabel 33. Persentase besar peningkatan kuat tekan beton.....	51
Tabel 34. Hasil pengujian kuat tekan beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut pada umur 28 hari.....	53
Tabel 35. Hasil pengujian kuat tekan beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut pada umur 56 hari.....	53
Tabel 36. Hasil perhitungan <i>outlier</i> data beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut pada umur 28 hari.....	54
Tabel 37. Hasil perhitungan <i>outlier</i> data beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut pada umur 56 hari.....	54
Tabel 38. Rekapitulasi <i>outlier</i> data pada sampel dengan <i>curing</i> air laut.....	54
Tabel 39. Hasil pengujian kuat tekan beton dengan <i>curing</i> air tawar dan <i>curing</i> air laut.....	54

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Beton adalah material paling umum yang digunakan untuk konstruksi di Indonesia baik dalam infrastruktur gedung ataupun jalan, penggunaan beton jauh lebih banyak dibandingkan material lain seperti kayu dan baja. Hal ini dikarenakan bahan-bahan untuk campuran beton mudah di dapatkan di Indonesia dan memiliki harga yang relatif murah, selain itu beton juga memiliki kemampuan menahan kuat tekan yang besar serta mempunyai daya tahan yang baik (Mulyono 2019).

Pada umumnya beton terdiri dari campuran semen Portland atau jenis semen hidraulik lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan lainnya. Beton normal atau dapat juga disebut sebagai beton konvensional memiliki berat jenis antara 2155–2560 kg/m³, dan normal nya diambil nilai sebesar 2320–2400 kg/m³ (SNI 2847-2019). Beton yang memiliki kualitas yang baik adalah beton yang memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik, hal ini dapat di pengaruhi oleh beberapa faktor seperti komposisi campuran beton, faktor air semen (F.A.S), dan tambahan zat aditif (*admixture*). Selain itu, proses perawatan (*curing*) juga menjadi faktor penting terhadap kekuatan dan daya tahan beton yang dihasilkan.

Proses perawatan (*curing*) beton pada umum nya menggunakan air tawar tanpa tambahan bahan kimia lainnya yang dapat menurunkan kualitas dari beton itu sendiri. Namun dalam beberapa pembangunan infrastruktur

paparan zat kimia pada beton tidak dapat dihindari, salah satu contohnya adalah bangunan pesisir dan bangunan lepas pantai. Proses perawatan (*curing*) beton di wilayah pesisir dan lepas pantai pasti akan bersentuhan langsung dengan air laut. Hal ini pasti akan mempengaruhi kualitas mutu dari beton yang dihasilkan (Nurtanto dkk. 2021).

Kontak langsung beton dengan air laut saat proses curing akan memberikan pengaruh yang besar, Kandungan garam terdapat pada air laut (sekitar 3,5%) dapat mengurangi kekuatan beton. Kadar klorida (Cl) yang tinggi pada air laut membuat sifat garamnya menjadi korosif, sehingga mampu menembus ke dalam beton dan bereaksi dengan senyawa di dalam beton, hal ini mengakibatkan penurunan kualitas beton, hilangnya daya tahan dan kekakuan akibat proses pelapukan yang lebih cepat (Sidiq dan Walujodjati 2021).

Untuk meminimalisir dampak permeabilitas air laut yang dapat merusak beton terdapat beberapa metode, salah satu pendekatan yang efektif adalah menggunakan material tambahan yang memiliki kandungan silika, seperti abu sekam padi dan *fly ash* (Nurtanto dkk. 2021). Selain memanfaatkan material bersilika yang mengandung pozzolan berupa silikon dioksida (SiO_2), kekuatan beton dapat ditambahkan dengan material lain, salah satu contohnya adalah penggunaan batu putih sebagai pengganti kerikil/*split* sebagai agregat kasar. Batu putih memiliki kandungan kapur (CaO) yang dapat bereaksi mengikat dengan pozzolan (SiO_2) jika ditambahkan dengan air.

Sifat dari beton sangat dipengaruhi oleh agregat, yang dimana agregat berperan sebagai pengisi, ini menjadikan pemilihan agregat menjadi salah satu tahap terpenting dalam pembuatan beton. Secara umum, penggunaan kerikil/*split* akan menjadi pilihan utama sebagai agregat kasar dalam campuran beton. Akan tetapi, seiring berjalannya waktu, permintaan akan kebutuhan material konstruksi berhadapan dengan ketersediaan material

yang terbatas, sehingga membuat harga material agregat yang kian meningkat dan tidak efisien secara ekonomis. Oleh karena itu, mencari alternatif bahan pengganti menjadi salah satu opsi yang sangat disarankan. Berdasarkan penelitian sebelumnya, penggunaan batu putih sebagai pengganti kerikil/*split* terbukti efektif untuk campuran beton. Selain itu, ketersediaan batu putih sangat berlimpah di berbagai lokasi menjadikannya pilihan yang lebih ekonomis (Irianti 2010).

Agar penggunaan batu putih sebagai bahan pengganti kerikil/*split* sebagai pengganti agregat kasar dapat memberikan hasil yang optimal serta dapat diterapkan di lapangan, struktur balok yang menggunakan batu putih sebagai agregat kasar harus dapat memberikan indikasi yang jelas sebelum terjadinya keruntuhan (*collaps*). Indikasi tersebut dapat berupa retakan yang memanjang serta peningkatan lendutan pada balok, atau dengan kata lain bersifat daktil. Hal ini bertujuan agar penghuni bangunan dapat mengevakuasi diri dengan aman saat terjadi indikasi keruntuhan (Irianti 2010). Selain penggunaan batu putih sebagai bahan pengganti batu putih, dalam campuran beton dapat ditambahkan dengan bahan-bahan campuran lain yang dapat meningkatkan kekuatan serta daya tahan beton. Mengingat saat ini perkembangan teknologi terus meningkat serta permintaan untuk penggunaan material ramah lingkungan demi mencapai pembangunan yang berkelanjutan, diperlukan inovasi dalam teknologi beton. Penggunaan bahan-bahan dari limbah industri seperti abu ketel dan *silica fume* dapat menjadi salah satu opsi sebagai bahan tambahan pada campuran beton.

Abu ketel merupakan materi organik terbarukan yang memiliki kandungan silika (SiO_2) yang tinggi. Abu ketel berasal dari penggilingan kerak yang cangkang dan serat buah kelapa sawit yang terbentuk saat pembakaran dengan dapur tungku boiler pada suhu 500-700 °C (Gunawan dkk., 2018). Pada proses pembakaran tersebut akan menghasilkan abu dengan butiran halus. Berdasarkan penelitian terlebih dahulu yang dilakukan oleh Irianti dkk., 1998, di laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Unila menunjukkan bahwa abu yang

dihasilkan dari proses pembakaran ini memiliki komposisi senyawa berupa SiO₂ (31,4510%), Fe₂O₃ (24,1271%), Al₂O₃ (6,7948%), MgO (3,0463%), CaO (15,2171%), dan pH (9,23%) (Abdullah 2024).

Silica fume merupakan material berwarna abu-abu yang dihasilkan dari produk sampingan industri *silicon ferro*. *Silica fume* memiliki butiran partikel yang sangat halus yaitu antara 0,1-0,2 mikrometer yang dimana ukurannya sekita 100 lebih kecil dibanding semen. *Silica fume* memiliki kandungan silika yang tinggi, sehingga dapat meningkatkan kekuatan serta daya tahan beton. Hal ini terjadi karena *silica fume* memiliki sifat *pozzolan* dan *inert filter* yang mampu mengisi rongga-rongga kecil diantara pasta semen dan agregate, sehingga dapat mengurangi volume pori-pori di dalam beton (Arman dkk., 2024).

Silica fume memiliki kandungan senyawa silika minimal sebesar 85%, dan dapat mencapai hingga 93%. Hal ini membuat kekuatan beton yang ditambahkan dengan campuran *silica fume* dapat mencapai hasil yang lebih besar pada usia 3 hingga 28 hari dibanding dengan beton tanpa campuran *silica fume*. Namun, pengaruh dari *silica fume* setelah usia beton melewati 28 hari tidak terlalu besar (Sebayang 2011).

Berdasarkan beberapa referensi diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan batu putih menjadi alternatif pengganti kerikil/split sebagai agregat kasar serta dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* dapat menambah kuat tekan beton, hal ini dikarenakan kandungan pozzolan yang berupa silikon dioksida (SiO₂) yang terdapat pada abu ketel dan *silica fume* dapat bereaksi mengikat dengan kapur (CaO) yang terdapat pada batu putih jika ditambahkan dengan air. Beton yang dihasilkan dari campuran material-material tersebut dapat dimanfaatkan sebagai bangunan di wilayah pesisir dan lepas pantai karena memiliki kekuatan dan daya tahan yang baik terhadap reaksi dari zat kimia yang terkandung di dalam air laut. Pada penelitian sebelumnya, penggunaan batu putih sebagai bahan pengganti agregat kasar untuk campuran beton dan

dengan tambahan material bersilika sudah dilakukan namun tidak melalui proses perawatan (*curing*) dengan air laut. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pemanfaatan batu putih sebagai agregat kasar dengan tambahan zat adiktif berupa material bersilika dan *superplasticizer* dalam campuran beton mutu tinggi yang melalui proses perawatan (*curing*) dengan menggunakan air laut.

1.2. Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana proses besar peningkatan kuat tekan beton agregat kasar batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* melalui proses perawatan (*curing*) dengan air tawar ?
2. Bagaimana pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton agregat kasar batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* ?

1.3. Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis besar peningkatan kuat tekan beton agregat kasar batuh putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* melalui proses perawatan (*curing*) dengan air tawar.
2. Menganalisis pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton agregat kasar batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume*.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Mutu beton yang direncanakan memiliki mutu $f'c = 20,75$ Mpa pada umur beton 56 hari.
2. Proses besar peningkatan kuat tekan beton diamati pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari melalui proses perawatan (*curing*) dengan air tawar.
3. Perbandingan kuat tekan beton melalui proses perawatan (*curing*) dengan air laut dan dengan air tawar pada 28 hari, dan 56 hari.
4. Perhitungan campuran beton mutu normal (*mix design*) menggunakan metode (SNI 7656 : 2012).
5. Batu putih sebagai bahan pengganti agregat kasar
6. Persentase pengaruh penambahan abu ketel yang digunakan adalah sebesar 5% dan persentase penambahan *silica fume* sebesar 5%
7. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm, dengan sampel 66 beton silinder dengan variasi yang masing-masing variasi 3 sampel.
8. Bahan pembuat beton berupa semen PCC dengan merk Semen Baturaja, agregat halus dari Gunung Sugih, agregat kasar dari Gunung Perahu, dan air laut yang digunakan dari Pantai Kunyit.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah :

1. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu teknologi beton tentang pengaruh penggantian agregat kasar menggunakan batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* terhadap kuat tekan beton.
2. Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu teknologi beton tentang pengaruh air laut pada beton aggregate kasar batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume*.

3. Menambah pengetahuan tentang beton agregat kasar batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* dapat dijadikan sebagai campuran beton untuk bangunan di air laut.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Normal

Beton merupakan material yang umumnya terdiri dari campuran agregat halus, agregat kasar, semen portland atau semen hidrolis lainnya, dan air sebagai bahan pengikat. Namun, campuran beton dapat ditambahkan dengan bahan tambahan lainnya seperti zat aditif untuk memenuhi kebutuhan konstruksi yang diinginkan. Beton digunakan dalam berbagai kebutuhan pembangunan seperti gedung, jalan jembatan, bendungan, dan infrastruktur lainnya. Kemampuannya yang dapat dicetak dalam berbagai bentuk kebutuhan struktur menjadikannya sebagai material utama untuk struktur bangunan, selain itu beton memiliki kekuatan dan daya tahan yang besar.

Mutu dari beton dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti, material penyusun beton, bahan tambahan, proses pengerjaan, dan alat yang digunakan. Kualitas beton dapat dikatakan baik jika material yang digunakan berkualitas baik, proses pengadukan homogen, pelaksanaan dilakukan dengan baik, menggunakan alat yang memadai, serta memiliki porositas yang kecil. (Tumpudkk. 2022)

Berdasarkan standar yang berlaku (SNI 03-6468-2000, ACI 318-2019, dan ACI 363R-1992), mutu beton dengan benda uji silinder 15 cm (diameter) x 30 cm (tinggi), dikelompokkan menjadi 3 kelas, antara lain :

1. Beton mutu rendah, memiliki nilai kuat tekan $f'c < 17$ MPa
2. Beton mutu normal, memiliki nilai kuat tekan $17 \text{ MPa} \leq f'c \leq 41$ MPa
3. Beton mutu tinggi, memiliki nilai kuat tekan $f'c > 41$ MPa

2.2. Material Penyusun Beton

Pada umumnya material penyusun beton terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, dan air. Penelitian ini akan menjelaskan penggunaan batu putih sebagai material pengganti agregat kasar, serta penggunaan abu ketel dan *silica fume* sebagai bahan tambahan dalam campuran beton.

2.2.1. Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen PCC (*Portland Composite Cement*) merupakan bahan pengikat hidrolis dari campuran terak semen Portland, gips, dan bahan anorganik lainnya, atau dapat juga dengan mencampurkan bubuk semen Portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik yang digunakan dapat berupa terak tanur tinggi (blast furnace slag), pozolan, senyawa silikat, atau batu kapur, dengan kadar kandungan total antara 6% sampai dengan 35% dari berat total semen (SNI-7064-2004).

Tabel 1. Persentase kandungan bahan utama pada semen portland

Komposisi	Persentase (%)
Kapur (CaO)	60-65
Silika (SiO ₂)	17-25
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 (K ₂ O + NO ₂ O)	0,5-1

(Sumber: (Rajiman 2020))

Tabel 2. Senyawa dari semen portland

Nama senyawa	Rumus oksida	Notasi	Kadar rata-rata (%)
Trikalsium Silikat	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	50
Dicalcium Silikat	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	25
Tricalcium Alumina	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	12
Tetracalsium Aluminoforit	4CaO.Al ₂ O ₃ .FeO ₃	C ₄ Af	8
Calcium sulfat dihidrat	CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH ₂	3,5

(Sumber : (Widojoko 2010))

Tabel 3. Persentase kandungan oksida pada semen OPC dan PCC

Kandungan	Jenis semen	
	OPC	PCC
Al ₂ O ₃ (%)	5,49	8,76
CaO (%)	65,21	58,66
SiO ₂ (%)	20,92	23,13
Fe ₂ O ₃ (%)	3,78	4,62
Kehalusan (%)	4,00	5,00
Berat isi (Kg/L)	1,29	1,19

(Sumber: (Prameswari Tw dkk. 2023))

Kehalusan pada Tabel 3 merujuk pada jumlah residu (sisa) semen yang lolos dari saringan No. 200 (0,075 mm). Berdasarkan (SNI 2049 : 2015) semen *portland* memiliki beberapa peraturan dan jenis sebagai berikut :

1. Jenis I, merupakan semen *portland* yang digunakan untuk kebutuhan umum tanpa memerlukan persyaratan khusus lain.
2. Jenis II, merupakan semen *portland* yang memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang untuk penggunaannya.
3. Jenis III, merupakan semen *portland* yang dirancang untuk mencapai kekuatan awal yang tinggi setelah proses pengikatan.
4. Jenis IV, merupakan semen *portland* yang memiliki karakteristik kalor hidrasi yang rendah dalam penggunaannya.
5. Jenis V, merupakan semen *portland* yang memiliki ketahanan tinggi terhadap sulfat.

Penggunaan semen jenis PCC (*Portland Composite Cement*) dalam campuran beton umumnya sama dengan semen *portland* jenis 1, karena nilai kuat tekan beton yang dihasilkan dari kedua jenis semen tersebut hampir sama. Salah satu karakter dari semen PCC (*Portland Composite Cement*) adalah memiliki panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pengerasan, Hal ini membuat pengerjaan beton menjadi lebih mudah dan akan menghasilkan beton yang lebih rapat dan halus (Lasino dkk. 2012).

2.2.2. Agregat Halus

Agregat halus merupakan material penyusun beton yang berupa pasir yang berasal dari batuan alam atau pasir buatan dari hasil pemecahan batu. Agregat halus memiliki ukuran butiran 0,15 mm – 4,75 mm. Fungsi utama dari agregat halus dalam campuran beton adalah sebagai *filler* atau pengisi celah-celah diantara agregat kasar, sehingga menjadikan campuran beton menjadi lebih padat dan homogeny (SNI 03-6820-2002).

Tabel 4. Ukuran gradasi agregat halus untuk 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 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))

Menurut (Dumyati dan Manalu 2015) agregat halus memiliki beberapa persyaratan yang mengacu kepada SK SNI S-04-1989-F, antara lain :

1. Memiliki butiran pasir yang keras dan dan tidak memiliki pori-pori.
2. Memiliki sifat permanen (tidak mudah hancur) dan tahan terhadap cuaca, seperti terik matahari dan hujan. Untuk mengukur ketahanannya, material ini dapat diuji dengan menggunakan larutan garam natrium sulfat (kehancuran maksimal 12%), dan dengan menggunakan larutan garam magnesium sulfat (Kehancuran maksimal 18%)
3. Kandungan lumpur pada agregat halus (partikel yang lolos ayakan ukuran 0,06 mm) tidak boleh lebih dari 5%.
4. Agregat halus tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat bereaksi dengan alkali.
5. Persentase jumlah butiran agregat yang berbentuk pipih dan

panjang tidak boleh melebihi 20% dari total agregat yang digunakan.

6. Tingkat kehalusan butiran agregat halus harus memenuhi rentang antara 1,5 sampai 3,8, dan variasi ukuran butiran agregat halus harus sesuai dengan standar gradasi.
7. Ukuran maksimal butiran agregat halus tidak boleh melebihi beberapa ketentuan, antara lain :
 - a. 1/5 dari jarak terkecil antar sisi cetakan.
 - b. 1/3 dari ketebalan pelat beton.
 - c. 3/4 dari jarak bersih antar tulangan.

Ketentuan ini digunakan untuk memastikan agregat halus dapat mengisi celah-celah pada cetakan secara merata.

8. Penggunaan agregat halus yang diambil dari daerah laut atau pantai dapat digunakan jika mendapatkan persetujuan dan petunjuk teknis dari lembaga pemeriksa material yang berwenang. Hal ini bertujuan untuk memastikan agregat halus yang digunakan memenuhi standar kualitas dan keamanan yang disyaratkan.

2.2.3. Agregat Kasar

Menurut (Mumtaz dkk. 2020) agregat kasar memiliki beberapa persyaratan untuk dapat digunakan sebagai bahan campuran penyusun beton, antara lain :

1. Secara umum agregat kasar merupakan material yang berukuran lebih dari 5 mm. Agregat kasar untuk bahan campuran beton bisa terdiri dari kerikil yang terbentuk secara alami dari disintegrasi batuan, atau dapat berupa batu pecah yang dihasilkan dari mesin pemecah batu.
2. Agregat kasar yang digunakan untuk campuran beton harus terdiri dari butiran-butiran keras dan tidak memiliki pori-pori. Butiran pipih yang dapat digunakan untuk campuran tidak boleh lebih dari 20% dari total agregat. Selain itu, agregat kasar juga harus bersifat permanen, yang dimana harus memiliki ketahanan yang tinggi terhadap kondisi cuaca seperti terik matahari dan hujan agar tidak

mudah pecah dan hancur.

3. Agregat kasar tidak boleh memiliki kandungan lumpur lebih dari 1% dari berat keringnya. Lumpur didefinisikan sebagai partikel yang melewati ayakan berukuran 0,063 mm. Apabila kadar lumpur yang terdapat pada agregat kasar lebih dari 1% maka agregat kasar harus dicuci agar tetap memenuhi standar.
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat yang bersifat reaktif terhadap alkali, karena reaksi kimia yang dihasilkan dapat merusak struktur beton dan mengurangi kekuatannya dari waktu ke waktu.
5. Kekerasan agregat kasar dapat diuji dengan menggunakan bejana penguji dari Rudolf dengan beban 20 ton, atau dapat juga diuji dengan mesin Los Angeles. Hasil pengujian harus memenuhi syarat berikut :
 - a. Agregat kasar ukuran 9,5 mm sampai 19 mm, persentase butiran yang hancur (menjadi bubuk) tidak boleh lebih dari 24% dari total berat.
 - b. Agregat kasar ukuran 19 mm sampai 30 mm, persentase butiran yang hancur (menjadi bubuk) tidak boleh lebih dari 22% dari total berat.Dan, dengan mesin Los Angeles tidak boleh terjadi kehilangan berat lebih dari 50%
6. Agregat kasar harus memiliki gradasi ukuran butiran. Jika diayak dengan saringan berukuran 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, dan 0,25 mm secara berurutan, maka agregat kasar harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :
 - a. Sisa ayakan dari saringan berukuran 31,5 mm harus 0% dari total berat. Hal ini bertujuan agar tidak ada butiran yang terlalu besar.
 - b. Sisa ayakan dari saringan ukuran 4 mm harus berada di kisaran 90% sampai 98% dari total berat.
 - c. Selisih kumulatif dari antara sisa-sisa ayakan yang berurutan tidak boleh lebih dari 60% dan tidak boleh kurang dari 10% dari

berat, hal ini bertujuan untuk menjamin distribusi ukuran butir yang lebih merata.

7. Ukuran maksimum dari agregat kasar dibatasi oleh 3 kondisi untuk memastikan beton padat dan seragam. Ukuran maksimal agregat kasar tidak boleh lebih besar dari :
 - a. 1/5 dari jarak terdekat antara sisi-sisi cetakan
 - b. 1/3 dari tebal pelat beton
 - c. 3/4 dari jarak bersih antar tulangan

Namun, ada beberapa pengecualian jika pengawas ahli menilai metode pengecoran yang digunakan tidak akan membentuk sarang-sarang kecil (*honeycomb*) pada beton.
8. Agregat kasar memiliki berat isi minimal 1200 kg/m³ (ASTM C-33 Tabel 33).
9. Agregat kasar memiliki modulus kehalusan butiran (FM) sebesar 6 - 7 (ASTM C 33-93).

Tabel 5. Ukuran gradasi agregat halus

Ukuran saringan				% Lolos saringan		
(Ayakan)				Ukuran maks	Ukuran maks	Ukuran maks
mm	SNI	ASTM	inch	10 mm	20 mm	40mm
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	30-70
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

(Sumber : (SNI 03-2834-2000))

2.2.4. Air

Air pada campuran beton berfungsi sebagai pemicu reaksi kimia dari semen, membahasi agregat, dan meningkatkan kemudahan dalam pengerjaan (*workability*). Kualitas dari air sangat berpengaruh kepada kualitas beton, air yang terkontaminasi garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya dapat menurunkan kualitas beton. Dalam campuran beton, perbandingan antara air dan semen atau yang dikenal sebagai

faktor air semen (FAS) merupakan hal terpenting. Penggunaan air yang berlebihan akan menghasilkan banyak gelembung (*voids*) setelah proses hidrasi, sementara itu, air yang terlalu sedikit akan menghambat proses hidrasi, dua hal tersebut dapat mengurasi kualitas dari beton, maka dari, itu di perlukan persentase faktor air semen yang sesuai (Irianto dkk. 2023).

Menurut Kardiyono Tjokrodikumyo, 1992 dalam (Rajiman 2020), Air yang digunakan untuk campuran beton harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a. Air yang digunakan tidak boleh memiliki kandungan lumpur atau benda melayang lainnya lebih dari 2 gram/liter.
- b. Air tidak boleh mengandung garam seperti asam dan zatorganik lebih dari 15 gram/liter, karena kadungan ini dapat merusak beton.
- c. Air tidak boleh memiliki kandungan klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
- d. Air tidak boleh mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter.

Berdasarkan (ASTM C 1602, 2006), Kandungan zat kimia air yang dapat digunakan sebagai campuran beton memiliki batasan konsentrasi tertentu, dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Batasan konsentrasi kandungan zat kimia pada air

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

(Sumber: (ASTM C 1602, 2006))

2.3. Batu Putih

Batu putih merupakan material alam yang biasanya digunakan sebagai bahan pondasi di dalam bidang konstruksi, namun tidak jarang masyarakat yang menggunakan batu putih sebagai agregat kasar dalam bahan campuran pembuatan beton. Batu putih memiliki kandungan kimia berupa kapur (CaO) di dalamnya, kandungan ini dapat beraksi mengikat dengan kandungan lain seperti pozzolan yang berupa silikon dioksida (SiO₂) yang terdapat pada material lain seperti *silica fume* dan abu ketel.

Pada penelitian yang dilakukan oleh (Irianti 2010), Penggunaan batu putih sebagai bahan pengganti agregat kasar dalam campuran beton memiliki hasil yang menunjukkan bahwa kandungan kimia yang terdapat pada batu putih memiliki pengaruh yang cukup baik kepada beton. Hal ini disebabkan batu putih memiliki kandungan kapur dan memiliki permukaan yang kasar sehingga menjadikan gaya lekat antara agregat kasar dan pasta semen menjadi lebih besar. Dalam beberapa pengujian pada penelitian ini menunjukkan bahwa batu putih dapat dijadikan sebagai bahan campuran beton untuk elemen struktur.

Menurut (Irianti 1999), Kandungan zat kimia yang terdapat pada batu putih memiliki beberapa kandungan sama dengan semen, dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Kandungan zat kimia pada batu putih

Komposisi kimia	Komposisi (% berat)
Kalsium oksida (CaO)	8,584
Magnesium oksida (MgO)	8,174
Alkali (Na ₂ O)	0,980
Kalium oksida (K ₂ O)	1,841
Silika dioksida (SiO ₂)	4,110
Aluminium oksida (Al ₂ O ₃)	12,097
Kandungan lainnya	64,214

(Sumber : (Irianti 1999))

2.4. Abu Ketel

Abu ketel merupakan material berupa abu dengan butiran halus yang berasal dari kerak pembakaran cangkang kelapa sawit di dalam tungku boiler dengan suhu 500-700 °C. Abu Ketel memiliki kandungan pozzolan berupa silikon dioksida (SiO_2), sehingga abu ketel dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran semen tanpa mengurangi kualitas dari beton (Gunawan dkk., 2018).

Berdasarkan penelitian mengenai abu ketel telah dilakukan oleh (Irianti dkk. 1998) di Laboratorium Bio-Kimia Fakultas MIPA Universitas Lampung, tahun 1998. Dalam penelitian ini memberikan beberapa hasil, salah satu nya menunjukkan kandungan kimia yang terdapat pada abu ketel, dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Kandungan kimia dalam abu ketel

Kandungan kandungan kimia	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 (<i>Derajat Keasaman</i>)	9,23

(Sumber : (Irianti dkk.,1998))

Abu ketel memiliki kandungan kimia yang dapat bereaksi dengan campuran beton. Kandungan *Silikon Dioksida* (SiO_2) pada abu ketel memiliki peran yang penting dalam pembentukan *Kalsium Silikat Hidrat* (CSH), kandungan ini merupakan produk utama dalam reaksi hidrasi semen yang berfungsi sebagai perekat (Abdullah 2024). Selain memiliki kandungan kimia, abu ketel juga memiliki beberapa sifat fisik, dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Sifat fisik abu ketel

No	Sifat fisik	Keterangan
----	-------------	------------

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	2891,27 cm ² /gr

(Sumber: (Irianti dkk.,1998))

2.5. *Silica Fume*

Menurut ASTM-C618-86 (*Spesification for Silica Fume for Use in Hydraulic Cemen Concrete and Mortar*), *silica fume* merupakan material yang memiliki kandungan silika SiO₂ lebih dari 85%, dan memiliki sifat fisik yang berbentuk bulat dan sangat halus, yang dimana memiliki diameter hanya sekitar 1/100 dari diameter butiran semen. Berdasarkan sifat kimianya, *silica fume* berperan sebagai pengisi (filler) yang masuk ke pori-pori kecil diantara butiran semen. Hal ini membuat kandungan pori pada beton berkurang, sehingga dapat menghasilkan beton yang lebih padat. Sedangkan berdasarkan sifat mekanik, *silica fume* menunjukkan sifat pozzolan yang dapat beraksi dengan semen. Saat semen hidrasi dengan air, akan menghasilkan senyawa yang mudah larut dalam air berupa *kalsium hidroksida* (Ca(OH)₂), yang dimana akan bereaksi dengan kandungan *Silikon Dioksida* (SiO₂) yang ada pada *silica fume*, sehingga membentuk *Kalsium Silikat Hidrat* (CSH) yang merupakan perekat utama dalam beton (Tarru 2018).

Silica fume pada campuran beton biasanya digunakan untuk menghasilkan beton dengan kekuatan dan daya tahan yang tinggi. Berdasarkan (Tarru 2018), penggunaan *silica fume* sebagai campuran beton memiliki beberapa kelebihan, antara lain :

1. Saat proses pengikatan
 - a. Meningkatkan kemudahan proses pengerjaan (*workability*) beton;
 - b. Mengurangi rembesan air dan beton (*bleeding*);
 - c. Membuat waktu pengikatan (*setting time*) beton menjadi lebih lama.
2. Saat beton sudah mengeras

- a. Menambah kuat tarik dan kuat lentur pada beton;
- b. Memperkecil susut dan rangkak (*shrinkage and creep*) pada beton;
- c. Memperkuat ketahanan beton terhadap kandungan sulfat dan akibat lingkungan agresif;
- d. Berfungsi untuk penetrasi klorida;
- e. Mengurangi permeabilitas pada beyond;
- f. Menambah ketahan beton terhadap keausan.

Berdasarkan (Silica Fume Assosiation 2022), *silica fume* memiliki beberapa sifat fisik, dapat dilihat pada tabel 10.

Tabel 10. Sifat-sifat fisik *silica fume*

Sifat	Keterangan
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 Assosiation 2022))

2.6. Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton (*curing*) merupakan langkah penting dalam proses hidrasi beton agar mencapai kekuatan yang optimal. Perawatan beton (*curing*) bertujuan untuk menjaga beton agar tetap dalam keadaan lembab sehingga tidak terjadi keretakan saat beton mengering. Pada umumnya perawatan beton (*curing*) dapat dilakukan dengan beberapa cara, seperti perendaman, penyiraman, pembungkusan dengan karung basah, atau penggunaan *curing compound* untuk pelapisan permukaan beton. Namun, untuk perawatan beton (*curing*) yang dilakukan di laboratorium, terdapat 2 metode yang dapat digunakan, yaitu dengan perendaman atau penguapan (*steaming*).

2.6.1. Perawatan Beton (*Curing*) Dengan Air Laut

Kualitas beton dipengaruhi banyak faktor, salah satu nya adalah proses

perawatan beton (*curing*). Perawatan beton (*curing*) dilakukan dengan menggunakan air tawar tanpa mengandung zat kimia yang dapat merusak dan menurunkan kualitas beton. Namun, di wilayah pesisir atau lepas pantai, kontak beton dengan air laut tidak dapat dihindari. Paparan zat kimia dari air laut kepada beton dapat mempengaruhi kualitas dari beton yang dihasilkan (Nurtanto dkk. 2021). Perkiraan kandungan ion dari air laut pada umumnya dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 11. Kandungan ion dalam air laut pada umumnya

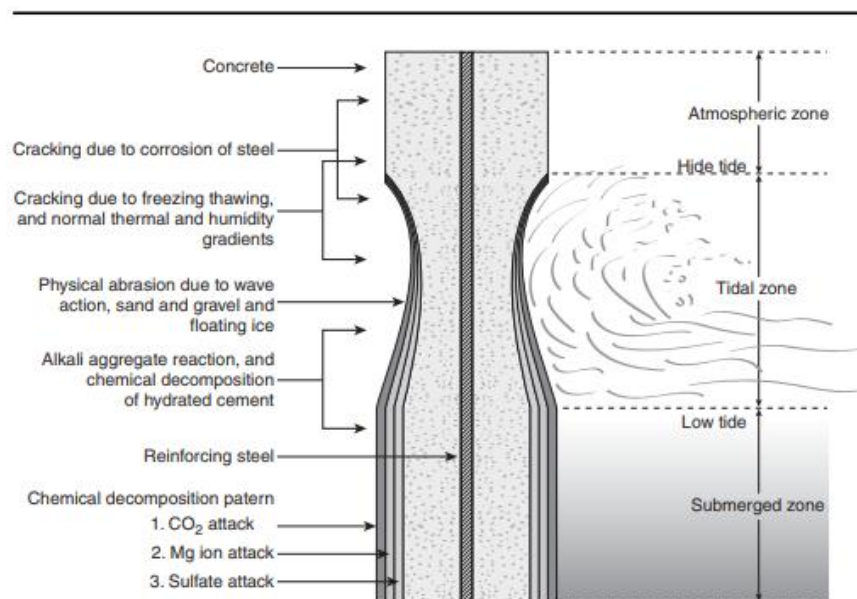
Nama umum	Ion	(g)
Sodium	Na	10360
Magnesium	Mg ⁺⁺	1,294
Calcium	Ca ⁺⁺	0,413
Potassium	K ⁺	0,387
Strontium	Sr ⁺⁺	0,008
Clorida	CL ⁻	19,353
Sulfat	SO ₄ ²⁻	2,712
Bromide	Br ⁻	0,008
Boron	N ₃ B ₃	0,001
Bikarbonat	HCO ³⁻	0,142
Fluor	F ⁻	0,001

(Sumber: ((Wedhanto 2017))

Kandungan kimia dalam air laut seperti *Magnesium Sulfat* (MgSO₄) dan ditambah dengan klorida dapat memberikan reaksi yang merusak beton. Reaksi yang diakibatkan dari kandungan tersebut dapat mengganggu proses pengerasan beton dan melemahkan kekuatan beton (Wedhanto 2017). Tanda-tanda kerusakan pada beton akibat pengaruh dari air laut, antara lain :

1. Permukaan beton berwarna keputih-putihan.
2. Terjadi keretakan dan pengelupasan (*spalling*) pada beton.
3. Beton mulai mengembang.
4. Bagian beton yang terpapar sulfat akan menjadi lunak dan membentuk lapisan seperti lumpur.

Gambar 1. Skema kerusakan beton akibat air laut.



(Sumber: (Mehta dan Monteiro 2001))

2.7. Pengujian Kuat Tekan

Beton memiliki sifat yang kuat terhadap tekanan. Kuat tekan beton terus meningkat seiring bertambahnya umur beton jika dilakukan perawatan yang tepat. Pengujian beton pada umumnya dilakukan pada umur 3 hari, 4 hari, 7 hari, 14 hari, dan akan mencapai puncak dari kuat tekannya pada umur 28 hari (mencapai 70% kekuatan tekan pada umur 7 hari, dan mencapai 85% - 90% kekuatan tekan pada umur 14 hari). Pengujian kuat tekan beton dapat dilakukan di lapangan ataupun di laboratorium. Pengujian kuat tekan beton di laboratorium pada umumnya menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) dengan benda uji silinder ataupun kubus. Berdasarkan ISO Standard 3893-1997 yang tertuang dalam buku Ilmu bahan Bangunan (Panennungi dan Pertiwi 2018).

Tabel 12. Perbandingan kuat tekan benda uji 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 dan Pertiwi 2018))

Menurut (SNI 1974 : 2011) Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan pembebanan beton dan termasuk dalam pembebanan statik monotorik dengan menggunakan pengujian tes tekan (*compressive test*). Beban aktif akan di distribusikan ke pusat berat. Rumus 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 (mm^2)

2.8. Penelitian Sebelumnya

1. Pemanfaat Batu Putih Sebagai Alternatif Pengganti Agregat Beton

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Irianti (1999) mengenai pemanfaatan batu putih sebagai alternatif pengganti agregat beton telah dilakukan. Pada penelitian ini menggunakan benda uji silinder dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Penelitian ini

menggunakan faktor air semen (FAS) dengan variasi 0.4, 0.45, 0.5, 0.55. Agregat kasar yang digunakan merupakan batu putih local yang berasal dari Gunung Perahu Bandar Lampung. Penelitian ini menggunakan 60 sampel berbentuk silinder, dengan 3 sampel per masing-masing variasi.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, beton masih mengalami peningkatan saat mencapai umur beton pada 56 hari. Batu putih memiliki kandungan kapur yang dapat memperlambat waktu pengikatan beton. Faktor air semen (fas) yang semakin rendah akan menghasilkan kuat tekan beton yang semakin tinggi, hal ini dikarenakan penggunaan air yang konstan pada fas 0.4, 0.45, 0.5, 0.55. Faktor air semen (FAS) yang rendah akan memerlukan semen yang lebih banyak, semakin banyak semen yang digunakan dalam campuran beton maka kuat tekan beton akan semakin besar, asalkan mudah dalam pematatannya. Untuk itu penggunaan faktor air semen (FAS) 0,4 lebih memberikan kuat tekan beton yang lebih tinggi yaitu sebesar 43,027 Mpa.

2. Pemanfaatan Limbah Industri Berupa Abu Ketel dan *Silica Fume* Untuk Peningkatam Kuat Tekan Beton

Irianti dkk (2025) telah melakukan penelitian mengenai pemanfaatan limbah industri berupa abu ketel dan *silica fume* untuk peningkatan kuat tekan beton. Penelitian ini menggunakan sampel kubus dengan diameter 15 cm x 15 cm x 15 cm. Penggunaan abu ketel dan silica fume sebagai bahan penambah menggunakan kombinasi abu ketel dan silica fume dengan persentase 5%, 10%, 15%, 20% abu ketel dan 5%, 10% *silica fume*.

Berdasarkan penelitian tersebut didapatkan bahwa penambahan abu ketel dan silica fume pada campuran adukan beton dapat menaikkan kuat tekan beton pada umur 28 hari ke 56 hari dengan kadar

optimum 5% abu ketel dan 5% *silica fume* dengan kenaikan kuat tekan sebesar 9,42 MPa. Kenaikan ini lebih besar dari kenaikan kuat tekan pada beton tanpa bahan tambahan

3. Pengaruh Air Laut Pada Proses Curing dan *Treatment* Terhadap Kekuatan Beton

Penelitian sebelumnya mengenai pengaruh air laut pada poses curing dan *treatment* terhadap kekuatan beton telah dilakukan oleh Rendityas Mayang Sari dkk., 2023. Pengujian beton menggunakan sampel berbentuk kubus dengan dimensi 15x15x15 cm dengan variasi perawatan dengan air tawar dan air laut dengan umur beton 7, 14, 28, dan 56 hari.

Berdasarkan penelitian tersebut, menunjukkan hasil penelitian menunjukkan bahwa beton yang diperlakukan dengan air laut memiliki kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan beton yang diperlakukan dengan air tawar, dengan nilai kekuatan tekan berturut-turut adalah 273,53 kg/cm², 302,23 kg/cm², 331,21 kg/cm², dan 316,01 kg/cm². Selain itu, beton yang terpapar lingkungan pesisir juga mengalami penurunan nilai kekuatan tekan pada usia 28 dan 56 hari untuk setiap sampel.

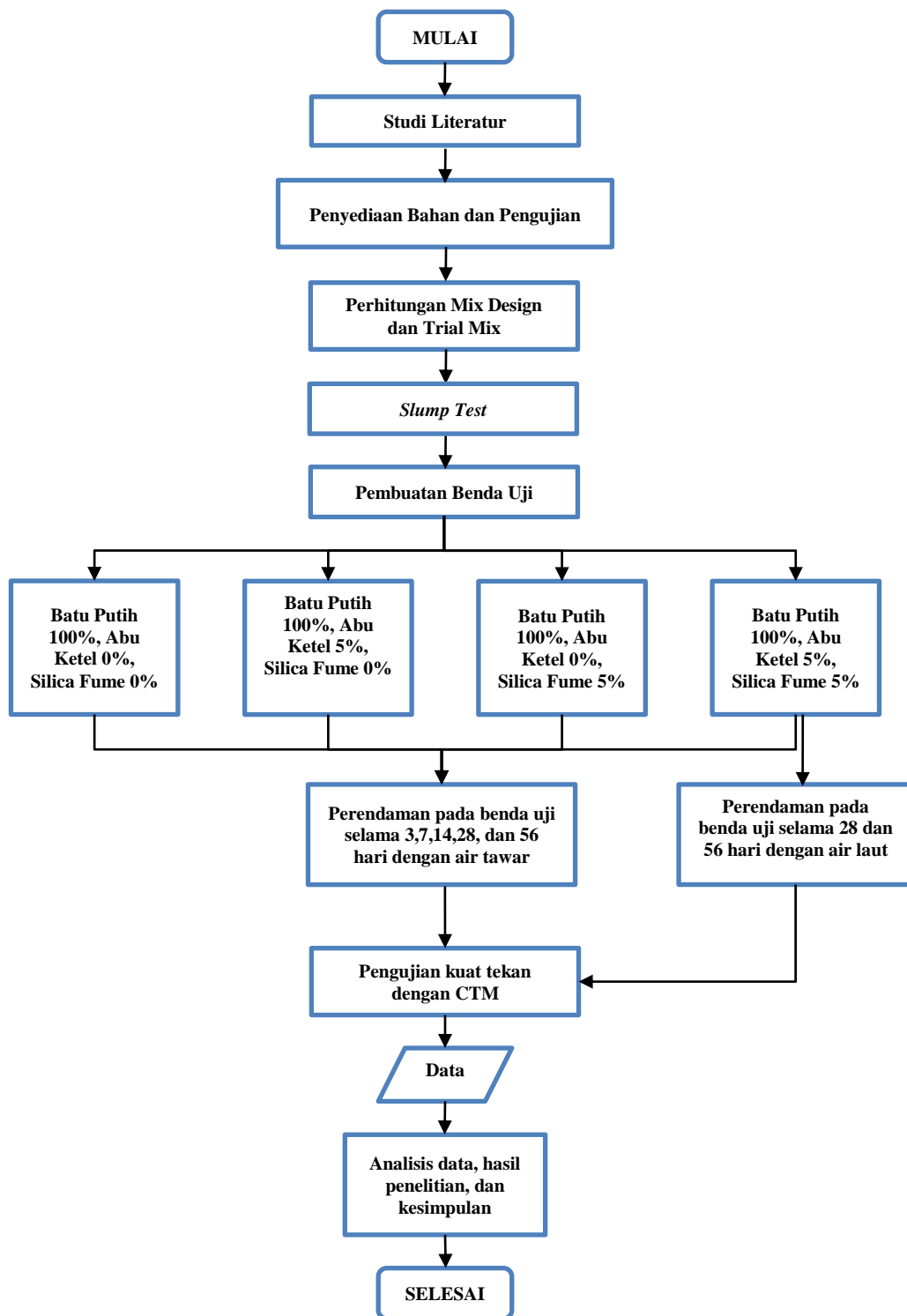
III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Pada penelitian ini akan menggunakan metode penelitian eksperimental, di mana data dan hasil penelitian akan di dapatkan melalui pengujian di laboratorium. Penelitian ini menggunakan beton mutu normal agregat kasar batu putih dengan perawatan (*curing*) menggunakan air tawar dengan variasi tambahan abu ketel (0%) dan *silica fume* (0%) dari persentase berat semen, variasi tambahan abu ketel (5%) dan *silica fume* (0%) dari persentase berat semen, variasi tambahan abu ketel (0%) dan *silica fume* (5%) dari persentase berat semen, serta kombinasi tambahan abu ketel (5%) dan *silica fume* (5%) berdasarkan persentase berat semen. Selain itu, pada penelitian ini akan menggunakan beton mutu normal agregat kasar batu putih dengan perawatan (*curing*) menggunakan air laut dengan kombinasi abu ketel (5%) dan *silica fume* (5%) berdasarkan persentase berat semen. Semua variasi dari bahan tersebut akan digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton dengan mutu normal. Dalam penelitian ini, akan dilakukan pembuatan benda uji berbentuk silinder dengan dimensi 15 cm x 30 cm dan akan melakukan pengujian kuat tekan beton pada umur beton 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari.

Pengujian benda uji akan dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung. Penelitian ini akan diawali dengan studi literatur sebelum melakukan pengujian di laboratorium. Tahapan dalam proses pengujian yaitu penyediaan material dan pengujian material yang akan digunakan, dimana material harus memenuhi syarat yang telah ditetapkan di dalam SNI. Jika material sudah memenuhi persyaratan di dalam SNI, maka

akan dilanjutkan dengan perhitungan *mix design* dan *trial mix* untuk memastikan mutu beton yang dibuat sesuai dengan perencanaan. Adukan beton yang telah mencapai rencana akan dilakukan *slump test* untuk memastikan kemudahan pengerjaannya (*workability*) sesuai dengan rencana. Benda uji yang telah dibuat akan dilakukan perawatan beton (*curing*) dan akan dilakukan pengujian kuat tekan beton menggunakan CTM (*Compression Testing Machine*) pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari untuk dianalisis besar peningkatan kuat tekan pada beton. Pada umur beton 28 hari dan 56 hari akan dilakukan pengujian kuat tekan pada beton dengan perawatan (*curing*) dengan air tawar dan beton dengan perawatan (*curing*) dengan air laut untuk menganalisis perbandingan serta pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton. Data yang di dapat dari hasil penelitian akan dianalisis untuk mengetahui pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton mutu normal dengan tambahan abu ketel dan *silica fume*. Tahapan – tahapan dari penelitian dapat dilihat dalam *flowchart* pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian.

3.2. Peralatan dan Bahan

Dalam penelitian ini, peralatan dan bahan yang akan di gunakan adalah :

3.2.1. Alat

a. Oven

Oven adalah alat yang berfungsi untuk mengeringkan material yang akan diuji pada penelitian ini. Oven yang digunakan pada penelitian ini mampu mencapai suhu 110°C dan memiliki daya sebesar 2800 Watt.

b. Satu set saringan

Saringan berfungsi sebagai pemisah agregat kasar dan agregat halus agar mendapatkan gradasi agregat yang digunakan. Pada penelitian ini menggunakan beberapa diameter saringan, antara lain 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, serta pan.

c. Timbangan

Timbangan merupakan alat yang digunakan untuk mengukur berat dari bahan dan material yang akan digunakan dalam pengujian. Dalam penelitian ini menggunakan timbangan digital elektronik dengan kemampuan menimbang sebesar 30 kg dengan ketelitian 0,1 gram.

d. Piknometer

Piknometer berfungsi sebagai alat untuk menguji agregat halus untuk mengetahui kandungan zat organik dan densitas agregat.

e. Gelas ukur 1000 cc

Gelas ukur yang digunakan memiliki kapasitas 1000 cc dengan fungsi sebagai pengukur volume air untuk pengujian kadar lumpur dan berat jenis dari agregat halus.

f. Cetakan kerucut pasir

Kerucut pasir merupakan alat yang digunakan untuk menguji agregat halus agar dalam kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*).

g. Bejana silinder

Bejana silinder yang digunakan pada penelitian ini menggunakan 2 tipe kapasitas bejana yaitu bejana dengan kapasitas 5 liter dan bejana dengan kapasitas 10 liter. Bejana berkapasitas 5 liter digunakan untuk pengujian berat volume agregat halus, dan bejana berkapasitas 10 liter digunakan untuk pengujian berat volume agregat kasar. Agregat halus dan agregat kasar yang digunakan berada dalam kondisi kering, basah, dan SSD (*Saturated Surface Dry*).

h. *Concrete mixer*

Concrete mixer adalah alat yang berfungsi untuk mencampur semua material dan bahan untuk campuran adukan beton. *Concrete mixer* yang digunakan pada penelitian ini memiliki kapasitas isi sebesar 0,125 m³ dengan kemampuan kecepatan putaran sebesar 20 – 30 putaran untuk 1 menit.

i. Satu set alat *slump test*

Satu set alat *slump test* berfungsi untuk menguji kemudahan pengerjaan (*workability*) dari adukan beton agar sesuai dengan persyaratan *slump test*. pada pengujian *slump test*, alat yang digunakan berupa satu set kerucut abrams dengan dimensi diameter atas 102 mm, diameter bawah 203 mm, dan tinggi 305 mm, *base plate* yang digunakan memiliki ukuran sisi 900 mm x 900 mm dan dengan tebal 3 mm.

j. Meteran

Meteran merupakan alat yang digunakan mengukur tingkat konsistensi dari campuran adukan beton pada pengujian *slump test* berdasarkan seberapa banyak penurunan yang dialami oleh beton segar setelah kerucut abrams di angkat.

k. Cetakan benda uji (*mold*)

Cetakan benda uji (*mold*) berfungsi sebagai tempat untuk mencetak beton segar agar sesuai dengan bentuk yang diperlukan untuk kebutuhan pengujian beton. Pada penelitian ini cetakan

benda uji yang digunakan berupa silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

l. Bak perendam

Bak perendam pada pembuatan beton berfungsi untuk proses perawatan (*curing*) pada beton. Beton yang sudah di lepas dari cetakan benda uji akan direndam di dalam bak perendam, hal ini bertujuan untuk menjaga kelembaban beton dan mencegah kehilangan air pada beton.

m. *Compression testing machine* (CTM)

Compression testing machine (CTM) merupakan perangkat yang berfungsi untuk menguji kuat tekan beton yang telah dibuat untuk mengetahui mutu atau kualitas dari beton. Pada penelitian ini alat *Compression testing machine* (CTM) yang digunakan memiliki kemampuan kuat tekan maksimal sebesar 3000 kN, dengan merk alat CONTROLS.

n. Alat bantu

Pada penelitian ini digunakan alat bantu lainnya yang berfungsi untuk membantu dan mendukung kelancaran dari pelaksanaan penelitian ini. Alat bantu lainnya berupa tongkat pemadat, kode warna untuk pengujian zat organik pada agregat halus, sekop, sendok semen, ember, kontainer, kereta dorong, *stopwatch*, wadah pengukur, kuas, palu karet, dan alat tulis.

3.2.2. Bahan

a. Semen PCC

Pada penelitian ini, menggunakan semen dengan tipe PCC dan produk dari merk PT. Semen Baturaja. Semen yang digunakan berada dalam kondisi tertutup dengan berat 50 kg per sak dan didapat dari toko.

b. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini didapat dari tambang pasir Gunung Sugih, Kabupaten Lampung Tengah.

Agregat halus yang digunakan harus melalui pengujian sesuai dengan persyaratan yang sudah ditetapkan didalam SNI, meliputi pengujian pengukuran kadar air, uji berat jenis, uji penyerapan (absorpsi), uji kadar lumpur, uji gradasi agregat halus, uji berat jenis, serta pengujian kandungan zat organik yang terdapat pada pasir.

c. Agregat kasar batu putih

Pada penelitian ini menggunakan agregat kasar batu putih yang di dapat dari Gunung Perahu, Kota Bandar Lampung dengan ukuran maksimum agregat 20 mm. Agregat kasar yang digunakan harus melalui pengujian sesuai dengan persyaratan yang sudah ditetapkan didalam SNI, meliputi pengujian kadar air agregat kasar, uji gradasi agregat kasar, uji berat jenis, uji penyerapan (absorpsi), dan pengujian berat volume agregat kasar.

d. Abu ketel

Abu ketel yang digunakan pada penelitian ini berfungsi sebagai bahan tambahan untuk campuran adukan beton. Abu ketel yang digunakan dengan persentase variasi sebesar 5% berdasarkan berat semen.

e. *Silica fume*

Silica fume pada penelitian ini berfungsi sebagai bahan tambahan untuk campuran adukan beton dengan persentase variasi sebesar 5% berdasarkan berat semen.

f. Air laut

Air laut yang digunakan pada penelitian ini berfungsi untuk merendam beton pada proses perawatan beton (*curing*) untuk beton dengan umur 28 hari dan 56 hari. Air laut yang digunakan didapat dari air pantai di daerah Lampung.

g. Naptha E121

Naptha E121 pada penelitian ini digunakan sebagai *admixture* terhadap adukan beton dengan kadar 1% terhadap berat semen yang digunakan untuk meningkatkan *workability* beton.

3.3. Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan setelah semua proses perencanaan untuk campuran beton telah dilaksanakan dengan tepat. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berupa silinder dengan diameter 15 cm dan dengan tinggi 30 cm. Penelitian ini menggunakan 3 variasi benda uji, yang pertama tidak menggunakan bahan tambahan dari kedua material baik itu abu ketel maupun *silica fume*, benda uji kedua menggunakan salah satu dari bahan tambahan baik itu abu ketel ataupun *silica fume*, semua benda uji tersebut akan melalui pengujian kuat tekan pada umur beton 3, 7, 14, 28, dan 56 hari. Untuk benda uji ketiga menggunakan tambahan kombinasi dari kedua bahan tersebut, dan akan di rendam di 2 jenis air yaitu air tawar dan air laut, untuk benda uji yang di rendam di air tawar akan melalui pengujian kuat tekan pada umur 3,7,14,28, dan 56 hari, dan untuk benda uji yang direndam di air laut akan diuji kuat tekannya pada umur beton 28 dan 56 hari.

Tabel 13. Variabel dan kode benda uji

No	Jenis komposisi	Kode benda uji	Jumlah sampel
1	100%BP + 100%S + 0%SF + 0% AK + 1% SP	BTC	15
2	100%BP +100%S + 0%SF + 5% AK + 1% SP	BAK	15
3	100%BP +100%S + 5%SF + 0% AK + 1% SP	BSF	15
4	100%BP +100%S + 5%SF + 5% AK + 1% SP	BASAT	15
5	100%BP +100%S + 5%SF + 5% AK + 1% SP	BASAL	12
Total sampel			72

Keterangan :

S	= Semen
AK	= Abu ketel
SF	= <i>Silica fume</i>
BP	= Batu putih
SP	= <i>Superplasticizer</i> Naptha E121

Tahapan – tahapan dalam pembuatan benda uji adalah sebagai berikut :

- 1) Tahapan pertama pada pengecoran untuk pembuatan benda uji adalah memasukkan agregat kasar dan agregat halus ke dalam concrete mixer dan tunggu sampai agregat kasar dan agregat halus tercampur dengan rata.
- 2) Jika agregat kasar dan agregat halus sudah tercampur dengan rata, maka tahapan selanjutnya adalah memasukan bahan semen (untuk variasi pertama), semen dan abu ketel atau *silica fume* (untuk variasi kedua), semen, abu ketel, dan *silica fume* (untuk variasi ketiga) ke dalam *concrete mixer*.
- 3) Setelah agregat kasar, agregat halus, dan campuran untuk variasi pertama, variasi ke dua, ataupun variasi ketiga sudah tercampur dengan rata, maka tahapan selanjutnya adalah memasukkan air ke dalam *concrete mixer* secara bertahap.
- 4) Setelah semua bahan untuk campuran beton sudah masuk ke dalam *concrete mixer* dan tercampur dengan rata. Maka tahapan selanjutnya adalah menuangkan campuran beton ke dalam cetakan benda uji (*mold*) dan gunakan alat *vibrator* untuk menghilangkan rongga udara didalam beton. Selanjutnya, masukkan sebagian campuran adukan beton kedalam kerucut abrams untuk dilakukan uji *slump test*.

3.4. Pengujian *Workability* Beton Segar

Saat semua campuran beton sudah tercampur merata, beton segar harus di uji kemudahan pengerjaan (*workability*) pada beton dengan cari uji *slump test*. Tahapan pengujian slump test tertera pada (SNI-1972-1990), yaitu sebagai berikut :

- 1) Bersihkan bagian luar dan bagian dalam kerucut abrams menggunakan air.
- 2) Selanjutnya letakkan kerucut abrams yang telah dibersihkan di atas pelat baja dengan ukuran sisi 900 mm x 900 mm.

- 3) Setelah kerucut abrams diletakkan diatas pelat baja, selanjutnya pegang bagian kaki kerucut abrams dengan kuat dan pastikan tidak bergeser saat memasukkan adukan beton kedalamnya.
- 4) Masukkan adukan beton segar ke dalam kerucut abrams setinggi $1/3$ dari tinggi kerucut abrams, lalu lakukan penumbukan sebanyak 25 kali menggunakan tongkat penumbuk.
- 5) Lalu lakukan prosedur yang sama untuk setiap penambahan adukan beton setinggi $1/3$ dari tinggi kerucut abrams.
- 6) Setelah kerucut abrams telah dipenuhi dengan adukan beton ratakan permukaan atas dari adukan beton pada kerucut abrams menggunakan sendok semen.
- 7) Angkat perlahan-lahan kerucut abrams pada posisi tegak lurus ke atas.
- 8) Ukur penurunan ketinggian dari adukan beton dari tinggi awalnya, dengan cara tinggi kerucut abrams dikurangi dengan tinggi adukan beton segar sekarang. Hasil penurunan tersebut merupakan nilai dari *slump*.

3.5. Perawatan Benda Uji (*Curing*)

a. *Curing* air tawar

Benda uji dicetak kedalam cetakan silinder dan didiamkan selama 24 jam. Setelah 24 jam keluarkan beton dari cetakan beton (*mold*) dan di lanjutkan dengan perendaman untuk proses perawatan (*curing*) dengan pada beton. Semua variasi beton di rendam di bak berisi air tawar selama 1, 5, 12, 26, dan 54 hari. Proses ini bertujuan untuk memastikan proses hidrasi pada beton berjalan dengan baik, proses pengerasan dapat terbentuk dengan sempurna, dan tidak terjadi keretakan pada beton, sehingga mutu beton dapat mencapai mutu yang direncanakan.

b. *Curing* air laut

Pada penelitian ini, air laut yang digunakan berasal dari Pantai Kunyit, Kota Bandar Lampung. Proses dari *curing* air laut adalah dengan cara mengambil air laut dalam jumlah yang dibutuhkan, lalu dibawa ke Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik, Sipil Universitas

Lampung, kemudian dimasukkan kedalam bak yang akan digunakan untuk perendaman sampel beton. Sampel beton yang di *curing* dengan air laut adalah beton dengan campuran kedua bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*) akan di buat 2 jenis perawatan (*curing*) yaitu perendaman dengan air tawar dan air laut. Beton yang melalui perawatan (*curing*) dengan air laut akan di rendam di dalam bak berisi air laut selama 26 hari dan 54 hari. Proses ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh air laut terhadap beton dan dapat membandingkan hasil kuat tekan beton yang mengalami proses perawatan (*curing*) dengan air tawar dan dengan air laut. Setelah semua benda uji direndam dengan waktu yang telah di rencanakan, proses selanjutnya adalah mengeluarkan benda uji dari bak berisi air tawar maupun air laut dan di diamkan selama 24 jam sebelum melakukan pengujian kuat tekan beton.

3.6. Pengujian Sampel Menggunakan CTM

Benda uji yang telah melewati proses perawatan (*curing*) beton akan dilakukan pengujian kuat tekan beton sesuai dengan umur rencana dengan benda uji berbentuk silinder. Berdasarkan (SNI 03-1974-1990) kuat tekan beton merupakan batas maksimal gaya tekan (yang diberikan oleh mesin uji) per satuan area yang mampu di tahan oleh beton sebelum beton mengalami kegagalan struktur. Dalam penelitian ini, pengujian kuat tekan beton menggunakan alat *compression testing machine* (CTM) sebagai mesin uji, alat ini memiliki kemampuan gaya tekan maksimal sebesar 3000 kN dengan kecepatan pembebanan berkisar antara 0,14 – 0,34 MPa/detik. Rumus yang akan digunakan untuk menghitung kuat tekan beton adalah :

$$f^c = P/A$$

keterangan :

$$f^c = \text{Kuat tekan beton (MPa)}$$

$$P = \text{Gaya tekan maksimum (N)}$$

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

Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan diameter

15 cm dan dengan tinggi 30 cm.

3.7. Perhitungan dan Analisis Data

Setelah semua prosedur pengujian beda uji beton telah dilaksanakan, maka tahapan selanjutnya adalah perhitungan dan analisis data hasil pengujian, yaitu sebagai berikut :

- 1) Menghitung kuat tekan beton agregat kasar batu putih pada benda uji silinder dengan umur beton 3,7,14,28, dan 56 hari pada beton mutu normal tanpa bahan tambahan, pada beton mutu normal dengan tambahan salah satu bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*) dan, beton mutu normal dengan tambahan kedua bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*) yang melewati proses perawatan (*curing*) dengan air tawar, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap besar peningkatan kuat tekan beton.
- 2) Menghitung kuat tekan beton agregat kasar batu putih pada benda uji silinder dengan umur beton 28 hari dan 56 hari pada beton dengan tambahan kedua bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*) yang melewati proses perawatan (*curing*) dengan air laut untuk melihat pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton mutu normal.
- 3) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton agregat kasar batu putih pada umur 3,7,14,28, dan 56 hari yang melewati perawatan (*curing*) dengan air tawar dibuat grafik perbandingan besar peningkatan kuat tekan antara beton tanpa bahan tambahan, beton dengan tambahan salah satu bahan tambahan (abu ketel atau *silica fume*), dan beton dengan tambahan kedua bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*). Kemudian dilakukan analisis data.
- 4) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton agregat kasar batu putih pada umur 28 hari dan 56 hari untuk beton yang melewati proses perawatan (*curing*) dengan air laut akan dibuat diagram batang perbandingan kuat tekan antara beton dengan tambahan kedua bahan tambahan (abu ketel dan *silica fume*) yang melewati proses perawatan (*curing*) dengan air tawar dan air laut.

- 5) Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton agregat kasar batu putih pada umur 28 hari dan 56 hari dibuat tabel perbandingan persentase peningkatan kuat tekan beton antara semua variasi beton dengan ataupun tanpa bahan tambahan, kemudian dilakukan analisis data.
- 6) Data – data yang didapatkan akan dianalisis untuk melihat potensi terbaik dalam penggunaan bahan tambahan untuk besar peningkatan kuat tekan beton agregat kasar batu putih.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Berdasarkan hasil pengujian material, batu putih yang digunakan dalam campuran beton memenuhi standar SNI, kecuali untuk penyerapan agregat kasar yaitu di dapat hasil 6,67%, hal ini lebih besar dari persyaratan yang ditetapkan dalam SNI 1970:2008.
2. Penggunaan batu putih sebagai pengganti agregat kasar dengan tambahan abu ketel dan *silica fume* dapat menurunkan nilai *Slump* karena daya serap air yang tinggi dan ukuran partikel yang sangat kecil. Maka, digunakan Naptha E121 sebesar 1% sebagai *admixture* untuk meningkatkan nilai *workability* agar dapat memenuhi nilai *Slump* rencana.
3. Besar peningkatan kuat tekan beton menunjukkan peningkatan yang signifikan pada umur 3 hari, dan pada umur 3 sampai 7 hari semua variasi memiliki persentase kuat tekan yang berada di atas grafik standar PBI 1971. Semua variasi sampel terus mengalami peningkatan kuat tekan kecuali untuk sampel BAK yang sempat mengalami penurunan persentase di umur 28 hari. Pada umur 56 hari sampel BAK menunjukkan persentase peningkatan yang paling besar yaitu mencapai 135,34%, sedangkan sampel BSF menunjukkan peningkatan yang paling rendah yaitu sebesar 103,36%.
4. Pada umur 56 hari, beton batu putih tanpa campuran menunjukkan hasil nilai kuat tekan yang sangat baik yaitu sebesar 31,29 Mpa, variasi beton yang memiliki nilai kuat tekan tertinggi di tunjukkan oleh beton dengan campuran abu ketel dan *silica fume* yaitu sebesar 37,76 Mpa, sedangkan untuk variasi beton dengan nilai kuat tekan terkecil di tunjukkan oleh beton

dengan campuran abu ketel yaitu sebesar 22,73 Mpa.

5. Pengaruh *curing* dengan air laut tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap mutu beton batu putih dengan tambahan abu ketel dan *silica fume*, hal ini dapat dilihat pada Gambar 7, yang dimana beton dengan *curing* air tawar memiliki nilai kuat tekan sebesar 30,98 Mpa pada umur 28 hari, dan 30,96 Mpa pada umur 56 hari, sedangkan beton dengan *curing* air laut sedikit lebih besar yaitu sebesar 31,31 Mpa pada umur 28 hari dan 30,29 Mpa pada umur 56 hari. Selain itu terjadi sedikit penurunan kuat tekan pada kedua beton yang di *curing* dengan air tawar dan air laut pada umur 56 hari, namun penurunan yang lebih besar ditunjukkan oleh beton yang di *curing* dengan air laut.

5.2. Saran

1. Batu putih yang akan digunakan sebagai bahan campuran beton harus di rendam secara optimal agar mencapai kondisi *saturated surface dry* (SSD) untuk menghindari penyerapan air bebas dalam campuran beton.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan batu putih sebagai bahan campuran beton dengan *treatment* yang berbeda dari penelitian ini.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai variasi optimum penggunaan abu ketel dan *silica fume* terhadap beton batu putih.
4. Diperlukan pengujian tambahan seperti uji kuat tarik belah atau uji modulus elastisitas beton batu putih untuk mendapatkan hasil yang lebih komprehensif terhadap kinerja beton batu putih.
5. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai beton batu putih dengan mutu tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, H. (2024). Pengaruh Abu Ketel Dan Silica Fume Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Dalam Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan. (Skripsi). Universitas Lampung, Lampung.
- ACI 318-19. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute*. doi: 10.14359/51716937.
- ACI 363R-92. (1992). Report on High-Strength Concrete (Reapproved 1997). *American Concrete Institute*.
- ASTM C 1602/C 1602M - 06. (2006). Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete¹. *ASTM International*.
- Dumyati, A., dan Manalu, D. F. (2015). Analisis Penggunaan Pasir Pantai Sampur Sebagai Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Fropil* 3(1):1–13.
- Gistyantoro, S., Noorhidana, V. A., Sebayang, S., & Junaedi, T. (2022). Pengaruh Penambahan Admixture Naptha E121 Terhadap Perkembangan Kekuatan Beton Rigid Pavement. 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.23960/prosidingsinta.v5i.80>
- Gunawan, H. C., Mungok, C. D., dan 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.
- Hidayatullah, H., Irianti, L., Helmi, M., & Widyawati, R. (2024). Pengaruh Abu Ketel Sebagai Bahan Penambah Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan. *REKAYASA: Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Lampung*, 28(3), 18–23. <https://doi.org/10.23960/rekrjits.v28i3.112>
- Irianti, L. (2010). Kapasitas Ultimit Dan Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi Beragregat Batu Putih. *Jurnal Rekayasa Vol.14 No.1, April 2010* 16(2):17–26.
- Irianti, L., Andoharman, H., dan Arief, K. S. (2001). Pengaruh Steam Curing Terhadap Kekuatan Beton Abu Ketel Mutu Tinggi. LPIU DUE Universitas Lampung.

- Irianto, Didik, S. S. M., Reny, R., Andung, Y., Miswar, T., Franky, E. P. L., Sigit, R., dan Fauzi, M. (2023). *Beton Jenis dan Kegunaannya. Tohar Media* Vol. 1.
- Lasino, Rachman, D., dan Sugiharto, B. (2012). Kajian Penggunaan Semen Portland Komposit Untuk Beton. *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik* 2(2):41. doi: 10.37209/jtbtt.v2i2.22.
- Mehta, P. K., dan Paulo, J. M. M. (2001). *Theoretical concepts of stress wave propagation in solids. McGraw-Hill, DOI: 10.1036/0071462899 worksaccounts.com*
- Mulyono, T. (2019). *Teknologi Beton: Dari Teori Ke Praktek*. Lembaga Pengembangan Pendidikan - UNJ
- Mumtaz, Nur, S., Sumirin, dan Antonius. (2020). Studi penggunaan agregat kasar ungaran dalam pencapaian kuat tekan beton mutu sedang. *Prosiding Konferensi Ilmiah Mahasiswa Unissula (KIMU)* 3 181–88.
- Arman, A., Nugroho, F., Mulyati, dan Azman, H. F. (2024). Pengaruh Penambahan Silika Fume Terhadap Kuat Tekan Beton. 2(1):9–16.
- Nurtanto, D., Rahayu, A. A., dan Wahyuningtyas, W. T. (2021). Pengaruh Perawatan Air Laut dan Air Tawar terhadap Kuat Tekan Beton Geopolymer yang Memadat Sendiri. *Rekayasa* 14(1):32–38. doi: 10.21107/rekayasa.v14i1.8375.
- Panennungi, dan Pertiwi, N. (2018). *Ilmu Bahan Bangunan*. Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar
- Prameswari Tw, A., R., Irianti, L., Sebayang, S., dan Isneini, M. (2023). Pengaruh Penggunaan Ordinary Portland Cement (OPC), Semen Modifikasi Jenis III dan Jenis IV, dan Portland Composite Cement (PCC) Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain* 11(4):703–14. doi: 10.23960/jrsdd.v11i4.3759.
- Rajiman. (2020). Substitusi Pasir Besi dalam Agregat Halus dengan Agregat Kasar Batu Basalt Scoria. *Agregat Beton* 1:1–2.
- Sebayang, S. (2011). Tinjauan sifat-sifat mekanik beton alir mutu tinggi dengan silika fume sebagai bahan tambahan. *Jurnal Rekayasa* Vol. 15 No. 2, Agustus 2011
- Sidiq, F. A., dan Walujodjati, E. (2021). Meninjau Kekuatan Beton Pada Lingkungan Air Laut Pameungpeuk Kabupaten Garut. *Jurnal Konstruksi* 19(1):43–51. doi: 10.33364/konstruksi/v.19-1.892.

- Silica Fume Assosiation. (2022). *Silica Fume User's Manual Second edition*. Vol. 69.
- SNI-03-2834-2000. (2000). Tata Cara Pembuatan Rencana Beton Normal. *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 03-1972-1990. (1990). Metode Pengujian Slump Beton. *Badan Standardisasi Nasional* 3–5.
- SNI 03-6468-2000. (2000). Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan Abu terbang. *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 03-6820-2002. (2002). Spesifikasi Agregat Halus Untuk Pekerjaan Adukan dan Plesteran Dengan Bahan Dasar Semen. *Badan Standardisasi Nasional* 6820.
- SNI 15-7064-2004. (2004). Semen portland komposit. *Badan Standardisasi Nasional* 20–21.
- SNI 1970:2008. (2008). Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus. *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 1974-2011. (2011). Cara Uji Kuat Tekan. *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 2049:2015. (2015). Semen Portland. *Badan Standardisasi Nasional* 1–128.
- SNI 2847-2019. (2019). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. *Badan Standardisasi Nasional* (8):720.
- SNI 7656:2012. (2012). Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal Beton Berat dan Beton Massa. *Badan Standardisasi Nasional* 1–44.
- Tarru, Reni Oktaviani. (2018). Studi Penggunaan Silica Fume Sebagai Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Beton. *Journal Dynamic Saint* 3(1):472–85. doi: 10.47178/dynamicsaint.v3i1.271.
- Tumpu, M., Hamdi, F., Lapian, F. E. P., Irianto, M., Mabui, D. S. S. Raidyarto, A., Sila, A. A., Masdiana, Hamkah, dan Rangan, P. R. (2022). *Teknologi Beton*. *Tohar Media*
- Wedhanto, S. (2017). Pengaruh Air Laut Terhadap Kekuatan Tekan Beton Yang Terbuat Dari Berbagai Merk Semen Yang Ada Di Kota Malang. *Jurnal Bangunan* 22(2):21–30.
- Widjojoko, L. (2010). Pengaruh Sifat Kimia Semen Terhadap Unjuk Kerja Mortar Tabel 2.1 Susunan oksida semen Portland. *Jurnal Teknik Sipil UBL Volume 1 No. 1, Oktober 2010* 1(1):52–59.