

**PENGARUH *CURING* AIR LAUT PADA KUAT TEKAN BETON
NORMAL YANG MENGGUNAKAN SUBSTITUSI ABU KETEL DAN
PENAMBAHAN SIKACIM**

(Skripsi)

Oleh :

SIGIT MAULANA YUSUF

2015011027



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRACT

THE EFFECT OF SEAWATER CURING ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF NORMAL CONCRETE USING BOILER ASH SUBSTITUTION AND SIKACIM ADDITION

By

SIGIT MAULANA YUSUF

Concrete is one of the most widely used construction materials due to its strength, yet it has weaknesses when exposed to aggressive environments such as seawater. Improving concrete quality can be achieved by utilizing industrial by-products as partial cement substitutes and incorporating additives. This study aims to investigate the effect of substituting boiler ash (5%) as a partial replacement for cement and adding Sikacim (0.7%) on the compressive strength of normal concrete under different curing conditions, namely immersion in freshwater and seawater. The results show that the addition of boiler ash and Sikacim increases the compressive strength of concrete compared to normal concrete. At 28 days, the compressive strength of concrete with boiler ash and Sikacim cured in freshwater (BAKS T) reached 31.99 MPa, an increase of 7.28% compared to normal concrete. At 56 days, it further increased to 34.71 MPa, or 11.38% higher than normal concrete. Meanwhile, concrete cured in seawater (BAKS L) only increased by 3.35% from 28 to 56 days, and its strength was 6.55% lower than BAKS T at 56 days. It can be concluded that the combination of 5% boiler ash and 0.7% Sikacim enhances the compressive strength of concrete, with the best results obtained from freshwater curing. On the other hand, seawater curing reduces the strengthening effect due to the presence of aggressive ions, indicating that the use of boiler ash and Sikacim is more suitable for applications in non-aggressive environments.

Keywords: boiler ash, Sikacim, compressive strength, seawater curing, normal concrete

ABSTRAK

PENGARUH *CURING* AIR LAUT PADA KUAT TEKAN BETON NORMAL YANG MENGGUNAKAN SUBSTITUSI ABU KETEL DAN PENAMBAHAN SIKACIM

Oleh

SIGIT MAULANA YUSUF

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan karena kekuatannya, namun memiliki kelemahan terhadap lingkungan agresif seperti air laut. Upaya peningkatan kualitas beton dapat dilakukan melalui pemanfaatan limbah industri sebagai bahan substitusi semen dan penggunaan bahan aditif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh substitusi abu ketel sebesar 5% sebagai pengganti sebagian semen serta penambahan Sikacim sebesar 0,7% terhadap kuat tekan beton normal, dengan kondisi curing berbeda yaitu perendaman dalam air tawar dan air laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu ketel dan Sikacim mampu meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan beton normal. Pada umur 28 hari, kuat tekan beton dengan abu ketel dan Sikacim yang direndam air tawar (BAKS T) mencapai 31,99 MPa atau meningkat 7,28% dibandingkan beton normal, sedangkan pada umur 56 hari meningkat menjadi 34,71 MPa atau 11,38% lebih tinggi dibandingkan beton normal. Beton dengan perendaman air laut (BAKS L) hanya mengalami kenaikan 3,35% dari umur 28 ke 56 hari, lebih rendah 6,55% dibandingkan BAKS T pada umur 56 hari. Dapat disimpulkan bahwa kombinasi abu ketel 5% dan Sikacim 0,7% mampu meningkatkan kuat tekan beton, dengan hasil terbaik diperoleh pada beton yang direndam dalam air tawar. Sementara itu, perendaman dalam air laut menurunkan efektivitas penguatan karena pengaruh ion-ion agresif, sehingga penggunaan kombinasi abu ketel dan Sikacim lebih direkomendasikan untuk aplikasi beton di lingkungan non-agresif.

Kata Kunci: abu ketel, Sikacim, kuat tekan, perendaman air laut, beton normal

**PENGARUH *CURING* AIR LAUT PADA KUAT TEKAN BETON
NORMAL YANG MENGGUNAKAN SUBSTITUSI ABU KETEL DAN
PENAMBAHAN SIKACIM**

Oleh

SIGIT MAULANA YUSUF

2015011027

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada
Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik



**JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi

**PENGARUH CURING AIR LAUT PADA
KUAT TEKAN BETON NORMAL YANG
MENGUNAKAN SUBSTITUSI ABU
KETEL DAN PENAMBAHAN SIKACIM**

Nama Mahasiswa

Sigit Maulana Yusuf

Nomor Pokok Mahasiswa

2015011027

Program Studi

S1 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 S1 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. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. J

NIP 19750928/200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 27 November 2025

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sigit Maulana Yusuf

NPM : 2015011027

Program Studi : S1/Teknik Sipil – Universitas Lampung

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Skripsi dengan judul “Pengaruh *Curing* Air Laut pada Kuat Tekan Beton Normal yang Menggunakan Substitusi Abu Ketel dan Penambahan Sikacim” sepenuhnya merupakan hasil pekerjaan saya sendiri. Seluruh data, analisis, dan isi penulisan berasal dari proses penelitian yang saya lakukan tanpa melakukan plagiarisme dalam bentuk apa pun.
2. Setiap kutipan atau referensi yang digunakan telah dicantumkan dan diakui sesuai aturan penulisan ilmiah yang berlaku.
3. Hak intelektual karya ilmiah ini saya serahkan kepada dosen pembimbing dan Universitas Lampung untuk digunakan sesuai kepentingan akademik.

Saya bersedia menerima konsekuensi dan sanksi apabila di kemudian hari ditemukan pelanggaran atas pernyataan ini.

Bandar Lampung, Desember 2025

Penulis,



Sigit Maulana Yusuf

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Sigit Maulana Yusuf, anak keempat dari empat bersaudara, lahir di Gombong pada tanggal 18 April 2002 dari pasangan Bapak Nasirun dan Ibu Siti Khotimah.

Pendidikan dasar ditempuh di SD Negeri 2 Pojodadi (lulus 2014), kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 1 Ambarawa (lulus 2017) dan SMA Negeri 1 Gadingrejo (lulus 2020). Pada tahun 2020, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Selama masa studi, penulis aktif dalam kegiatan organisasi, salah satunya sebagai anggota Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil (HIMATEKS) periode 2022–2023. Penulis juga melaksanakan Kerja Praktik pada tahun 2023 di proyek Escape Ramp di Jalan Prof. Dr. Ir. Sutami, Kota Bandar Lampung. Pada tahun 2024, penulis dipercaya sebagai Ketua Kelompok KKN yang berlokasi di Desa Kahuripan Jaya, Kecamatan Banjar Baru, Kabupaten Tulang Bawang.

PERSEMBAHAN

Puji syukur ke hadirat Allah SWT, karena berkat limpahan rahmat, karunia, dan kesehatan-Nya, skripsi ini dapat penulis selesaikan dengan baik.

Karya ini penulis persembahkan kepada:

Bapak Nasirun dan Mama Siti Khotimah,
yang selalu memberikan doa, dukungan, semangat, serta menjadi sumber
kekuatan dalam setiap langkah penulis.

Kakak-kakak tercinta,
yang senantiasa memberikan arahan, dukungan, dan dorongan selama penulis
menempuh pendidikan.

Dosen pembimbing dan penguji,
yang telah membimbing, mengarahkan, dan memberikan ilmu berharga sehingga
penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.

Sahabat dan teman-teman,
yang selalu menemani, mendukung, serta memotivasi penulis hingga dapat
menyelesaikan tugas akhir ini.

Almamaterku Universitas Lampung

KATA INSPIRASI

“Hello world”

(Cyrene)

“Masa lalu tidak akan bisa diubah, tapi kamu bisa melanjutkan hidupmu. Kalau masa depan cukup panjang, suatu hari masa lalumu cuma akan menjadi bagian kecil dalam kehidupanmu”

(Nahida)

“Look up at the sky more often and smile more. Many stubborn ailments fear optimism, but it's the best medicine”

(Hyacine)

“See you tomorrow”

(Chrysos Heirs)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Pengaruh *Curing* Air Laut pada Kuat Tekan Beton Normal yang Menggunakan Substitusi Abu Ketel dan Penambahan Sikacim”

Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini tidak akan dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Nasirun, ayah tercinta yang selalu memberikan dukungan, arahan, serta nasihat berharga sehingga penulis dapat melalui proses penyusunan skripsi ini dengan baik. Ibu Siti Khotimah, ibu tersayang yang senantiasa mendoakan, memberikan perhatian, serta dorongan tanpa henti demi kelancaran studi dan penelitian ini. Serta seluruh keluarga yang selalu memberikan doa, kepercayaan, bimbingan, serta semangat baik secara moral maupun material, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya.”
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 Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Lampung.
5. Ibu Ir. Laksmi Irianti, M.T., selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta masukan berharga selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.

6. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, serta evaluasi yang sangat membantu dalam penyempurnaan skripsi ini
7. Bapak Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta motivasi selama penulis menempuh studi.
8. Seluruh dosen dan staf pengajar di Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman berharga selama masa perkuliahan.
9. Mas Yoyok yang telah banyak membantu dalam hal finansial selama proses penelitian, Abang Ali yang telah membantu secara langsung dalam pelaksanaan penelitian, serta Iga selaku sahabat yang selalu menemani dan menjadi tempat berkeluh kesah ketika penulis merasa lelah dan hampir menyerah.
10. Ryan, Billy, Farrizqie, dan Dika sebagai teman seperjuangan di perkuliahan yang selalu memberi dukungan, canda tawa, serta kebersamaan yang berarti hingga terselesaikannya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi isi maupun penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun demi kesempurnaan karya ini di masa yang akan datang.

Bandar Lampung, November 2025

Penulis,

Sigit Maulana Yusuf

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
I. PENDAHULUAN.....	1
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
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Beton Normal.....	6
2.2 Bahan Beton Normal.....	7
2.3 Abu Ketel	17
2.4 <i>Additive</i> Sikacim	18
2.5 Perawatan Beton (<i>Curing</i>)	20
2.6 Air Laut.....	21
2.7 Pengaruh Kimia Air Laut terhadap Beton	22
2.8 Pengujian Kuat Tekan.....	23
2.9 Penelitian Sebelumnya.....	25
III. METODE PENELITIAN	30
3.1 Pendahuluan.....	30
3.2 Peralatan dan Bahan.....	34
3.3 Pembuatan Benda Uji	37
3.4 Pengujian <i>Workability</i> Beton Segar	39
3.5 Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>).....	40
3.6 Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM.....	41
3.7 Perhitungan dan Analisa Data.....	41

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN 43

4.1 Umum	43
4.2 Sifat Fisik Material Pembentuk Beton	43
4.3 Komposisi Campuran Beton	44
4.4 Keleccakan Adukan Beton (<i>Workability</i>)	45
4.5 Kuat Tekan Beton	48
4.6 Pengaruh Media Curing terhadap Kuat Tekan Beton Subtitusi Abu Ketel dan Penambahan Sikacim	51
4.7 Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton	54

V. KESIMPULAN DAN SARAN 59

5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	60

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Diagram alir penelitian.....	33
2. Diagram alir penelitian (Lanjutan).....	34
3. Pembuatan Sampel Beton	39
4. Lokasi <i>Curing</i> Air Laut pada <i>Google Maps</i>	40
5. Perendaman Sampel pada Air Laut	41
6. Nilai <i>slump</i>	45
7. Uji <i>Slump</i> BN	46
8. Uji <i>Slump</i> BAK	46
9. Uji <i>Slump</i> BAKS	46
10. Diagram Batang Perbandingan Kuat Tekan Umur 28 dan 56 Hari.....	49
11. Diagram Batang Perbandingan Kuat Tekan Umur 28 dan 56 Hari pada Perbedaan Media <i>Curing</i>	52
12. Perbandingan Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton.....	56

DAFTAR TABEL

TABEL	HALAMAN
1. Pembagian Zona Gradasi Agregat Halus	10
2. Batasan Maksimal Kandungan Zat Kimia dalam Air	16
3. Kandungan Senyawa Kimia dalam Abu Ketel.....	17
4. Komposisi Ion pada Air Laut	21
5. Perbandingan Kuat Tekan antara Silinder dan Kubus.....	25
6. Variabel dan Kode Benda Uji.....	38
7. Hasil Pemeriksaan Material Pembentuk Beton.....	44
8. Komposisi Kebutuhan Material per m ³	44
9. Nilai <i>Slump</i> Adukan Beton.....	45
10. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Mutu Normal	49
11. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Substitusi Abu Ketel dan Penambahan Sikacim .	52
12. Laju Peningkatan Kuat Tekan Peraturan Beton Indonesia 1971	55
13. Hasil Pengujian Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton	55
14. Persentase Laju Peningkatan Kuat Tekan Beton.....	55

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam sektor konstruksi, beton menempati posisi penting dalam berbagai jenis pembangunan, termasuk di Indonesia, karena memiliki kapasitas dalam menerima beban tekan yang besar sekaligus menunjukkan ketahanan yang unggul terhadap berbagai kondisi lingkungan. Di sisi lain, meningkatnya kebutuhan beton juga berdampak pada tingginya konsumsi semen sebagai bahan pengikat utama. Produksi semen sendiri membutuhkan energi yang besar dan menyumbang sekitar 5–8% emisi CO₂ dunia, sehingga menjadi perhatian utama dalam isu perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan (Worrell dkk., 2001). Menurut Scrivener dkk., (2018), emisi CO₂ dari produksi semen bahkan diperkirakan akan meningkat sebesar 260% antara tahun 1990 hingga 2050. Di sisi lain, berbagai industri menghasilkan limbah padat yang berpotensi dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian semen, salah satunya adalah abu ketel (*boiler ash*), yaitu residu hasil pembakaran bahan bakar dalam ketel industri. Pemanfaatan abu ketel sebagai bahan substitusi semen tidak hanya dapat mengurangi limbah industri dan dampak lingkungan, tetapi juga menekan biaya material konstruksi sekaligus menurunkan jejak karbon beton.

Sebagai negara kepulauan, Indonesia menghadapi tantangan besar terhadap durabilitas struktur beton yang terpapar lingkungan laut. Ion klorida (Cl⁻) dan sulfat (SO₄²⁻) yang terdapat pada air laut berpotensi menyusup ke dalam rongga pori beton. Ion klorida mempercepat korosi tulangan baja dan menimbulkan retakan, sementara ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi semen membentuk etringite dan gypsum yang menyebabkan ekspansi, peningkatan porositas, serta kerusakan struktural (Monteiro & Mehta, 2006). Kondisi ini

menjadi semakin kritis ketika proses perawatan (*curing*) beton dilakukan langsung dengan media air laut, sebagaimana sering terjadi pada konstruksi di wilayah pesisir, dermaga, maupun jembatan laut, karena ion-ion agresif tersebut dapat bermigrasi lebih cepat ke dalam beton yang masih muda.

Berbagai studi telah menunjukkan bahwa material pozzolan seperti abu ketel mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Tingginya kadar silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang terdapat pada abu ketel membuat material ini bersifat reaktif terhadap kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Reaksi pozzolanik yang muncul sebagai hasil dari interaksi tersebut menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang berperan memperkuat serta memperpadat struktur beton (Irianti dkk., 1998). Sementara itu, berdasarkan hasil penelitian Hidayatullah dkk. (2024), penggunaan abu ketel dalam komposisi beton terbukti mampu memperbaiki performa kuat tekan beton, khususnya pada tahap pengerasan lanjutan setelah umur 28 hari. Nath & Sarker (2011) juga melaporkan bahwa penggunaan fly ash digunakan sebagai material substitusi sebagian semen mampu menurunkan tingkat absorpsi air, menekan difusi ion klorida, dan memperbaiki ketahanan terhadap serangan sulfat. Dengan demikian, abu ketel memiliki potensi untuk meningkatkan kekuatan sekaligus daya tahan beton terhadap lingkungan laut.

Selain material substitusi, bahan aditif kimia juga memiliki peran penting dalam meningkatkan kualitas beton. Sikacim *Concrete Additive* merupakan salah satu admixture yang berfungsi sebagai *superplasticizer*. Penambahan Sikacim dapat meningkatkan *workability*, memperbaiki struktur mikro, menurunkan permeabilitas, serta menghasilkan beton dengan kepadatan lebih tinggi. Dengan sifat tersebut, penggunaan Sikacim diharapkan dapat memperkuat beton agar lebih tahan terhadap penetrasi ion agresif pada lingkungan laut (Sika Indonesia, 2022)

Merujuk pada pembahasan terdahulu, fokus penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh kombinasi substitusi abu ketel 5% dan penambahan

Sikacim 0,7% terhadap kuat tekan beton normal yang menjalani proses curing dalam media air tawar dan air laut. Diharapkan, kombinasi kedua bahan ini menunjukkan kemampuan dalam menghasilkan beton dengan mutu lebih baik dengan kekuatan tekan yang lebih optimal serta ketahanan yang lebih baik terhadap lingkungan agresif. Selain itu, penelitian ini juga berkontribusi dalam upaya pengembangan beton ramah lingkungan yang efisien secara ekonomi dan mendukung prinsip keberlanjutan, khususnya untuk penerapan pada infrastruktur di kawasan pesisir.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil kajian yang telah disampaikan dalam latar belakang, penelitian ini memusatkan perhatian pada sejumlah permasalahan utama sebagaimana diuraikan berikut:

1. Bagaimana pengaruh substitusi abu ketel sebagai pengganti sebagian semen dan penambahan Sikacim terhadap kuat tekan beton normal?
2. Bagaimana perbedaan proses *curing* menggunakan media air tawar dan air laut memengaruhi kuat tekan beton dengan substitusi abu ketel dan penambahan Sikacim?
3. Bagaimana laju peningkatan kuat tekan beton pada umur tertentu ditinjau dari substitusi abu ketel, penambahan Sikacim, dan perbedaan media curing?

1.3 Tujuan Penelitian

Merujuk pada rumusan masalah yang telah dirumuskan sebelumnya, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh substitusi abu ketel sebagai pengganti sebagian semen dan penambahan Sikacim terhadap kuat tekan beton normal.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan proses *curing* menggunakan media air tawar dan air laut terhadap kuat tekan beton dengan substitusi abu ketel dan penambahan Sikacim.

3. Menganalisis laju peningkatan kuat tekan beton pada umur tertentu akibat substitusi abu ketel, penambahan Sikacim, dan perbedaan media *curing*.

1.4 Batasan Masalah

Lingkup kajian dalam penelitian ini mencakup hal-hal berikut:

1. Penelitian ini menggunakan mutu beton K-300 pada umur 28 hari.
2. Penelitian ini Menggunakan SNI 7656:2012 untuk acuan perhitungan *mix design*.
3. Sikacim dan abu ketel menggunakan ukuran berat sebagai tambahan beton.
4. Persentase substitusi abu ketel yang ditambahkan 5% dari berat semen dan penambahan Sikacim sebesar 0,7% dari berat semen.
5. Proses laju peningkatan kuat tekan beton diamati pada umur 3 hari, 7 hari, 14 hari, 28 hari, dan 56 hari.
6. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang 15 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm.
7. Bahan pembuat beton berupa semen PCC, agregat halus yang didapatkan dari Gunung Sugih melalui penjual, agregat kasar yang didapatkan dari Tanjungan melalui penjual dan air yang didapatkan dari Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Lampung.
8. *Curing* dilakukan di dua tempat, *curing* air tawar dilakukan di lab Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung. Sedangkan Untuk *curing* air laut dilakukan berada didaerah Pondok Nelayan Lempasing, Desa Sukamaju, Kecamatan Telukbetung Timur, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menambah referensi ilmiah terkait teknologi material beton, khususnya dalam penggunaan abu ketel sebagai bahan substitusi dan Sikacim sebagai

bahan tambahan dalam beton. Hal ini dapat memperluas wawasan tentang inovasi dalam bidang material bangunan, terutama yang berhubungan dengan beton yang direndam dalam lingkungan air laut.

2. Memberikan solusi bagi para praktisi konstruksi terkait peningkatan performa beton dalam kondisi lingkungan ekstrem seperti air laut, yang sering menyebabkan korosi dan degradasi material beton. Oleh karena itu, hasil penelitian ini bisa diterapkan dalam proyek pembangunan infrastruktur di daerah pesisir atau lingkungan laut.
3. Mengurangi dampak lingkungan dengan memanfaatkan abu ketel, yang merupakan limbah industri, sebagai bahan substitusi dalam campuran beton. Oleh karena itu, penelitian ini turut berkontribusi terhadap upaya pengelolaan limbah dan pembangunan yang lebih berkelanjutan.
4. Penggunaan abu ketel sebagai substitusi material beton dapat mengurangi biaya produksi beton karena bahan tersebut lebih murah dan tersedia dalam jumlah besar. Hal ini berpotensi mengurangi ketergantungan pada bahan baku beton konvensional dan memberikan alternatif yang lebih ekonomis dalam industri konstruksi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Normal

Beton normal dibuat dari perpaduan antara semen, agregat halus, agregat kasar, dan air, yang dikombinasikan dalam proporsi sesuai standar perencanaan beton yang berlaku (SNI 2847:2019). Beton jenis ini memiliki berat isi rata-rata sekitar 2400 kg/m^3 dan kuat tekan yang umumnya berkisar antara 20–40 MPa. Karena sifat mekaniknya yang baik dan kemudahan pengerjaannya, beton normal banyak digunakan pada berbagai proyek konstruksi umum seperti bangunan gedung, jalan raya, maupun elemen struktural lainnya.

Kualitas beton normal terutama ditentukan oleh kuat tekannya, yaitu Daya tahan beton terhadap tekanan yang bekerja pada tiap satuan luas hingga batas sebelum terjadinya kerusakan. Nilai kuat tekan merupakan tolok ukur utama dalam menilai daya dukung serta keamanan suatu struktur beton. Menurut (Neville, 2012) Berbagai variabel berkontribusi terhadap pencapaian kuat tekan beton antara lain perbandingan air terhadap semen, proses hidrasi yang berlangsung, serta metode perawatan (*curing*) yang digunakan.

1. Faktor Air-Semen (*Water-Cement Ratio*)

Rasio air terhadap semen merupakan parameter paling krusial dalam menentukan kuat tekan beton. Neville (2012) menjelaskan bahwa semakin kecil nilai FAS (Faktor Air–Semen), maka semakin padat struktur beton yang terbentuk karena volume pori menurun, sehingga kuat tekan meningkat. Sebaliknya, apabila FAS terlalu besar, beton menjadi rapuh akibat tingginya porositas. Oleh karena itu, penentuan rasio air–semen yang tepat sangat penting agar beton memiliki kekuatan dan durabilitas yang optimal.

2. Proses Hidrasi Semen

Reaksi antara air dan partikel semen dikenal sebagai proses hidrasi, yang membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) dan *Calcium Hydroxide* ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Produk C–S–H merupakan komponen utama penyumbang kekuatan beton karena bersifat padat dan mampu merekatkan butiran agregat dengan baik (Taylor, 1997). Proses hidrasi akan terus berlangsung selama masih tersedia air, sehingga ketersediaan kelembapan sangat menentukan peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur beton.

3. Metode *Curing*

Curing atau perawatan merupakan tahap penting dalam menjaga kelembapan dan suhu beton setelah proses pengecoran agar reaksi hidrasi dapat berlangsung dengan sempurna. Berdasarkan ACI 308R-16, *curing* memiliki peran yang sangat penting untuk meminimalkan penguapan air pada permukaan beton, menjaga suhu yang stabil, dan meningkatkan pembentukan C-S-H. Beton yang tidak dirawat dengan baik akan mengalami retak susut, kekuatan yang rendah, serta daya tahan yang buruk terhadap lingkungan agresif. Oleh karena itu, penerapan metode *curing* yang tepat, seperti perendaman atau pembasahan kontinu, sangat dianjurkan dalam upaya memperoleh beton dengan kualitas optimal.

2.2 Bahan Beton Normal

Pada dasarnya, beton terdiri atas tiga komponen pokok, yaitu semen sebagai unsur pengikat dan agregat halus maupun kasar yang berfungsi memiliki fungsi utama sebagai pengisi volume beton, serta air sebagai elemen reaksi kimia. Dalam praktiknya, terkadang juga ditambahkan bahan tambahan seperti aditif atau pozzolan untuk meningkatkan kinerja beton. Secara umum, komposisi beton terdiri atas sekitar 1–2% udara, 25–40% pasta semen (campuran semen dan air), dan 60–75% agregat (Mulyono, 2004). Sifat serta karakteristik masing-masing bahan ini perlu dipahami secara mendalam untuk memastikan

kekuatan beton yang optimal. Berikut ini adalah penjelasan singkat mengenai material penyusun beton.

2.3.1 Semen

Semen Portland digunakan secara luas sebagai bahan pengikat hidrolis utama dalam produksi beton. Menurut SNI 2049:2015, semen ini tersusun atas beberapa senyawa utama dengan fungsi berbeda. Senyawa trikalsium silikat (C_3S) memiliki kandungan terbesar, yaitu sekitar 45–60%, dan berperan dominan dalam memberikan kekuatan awal pada beton. Selanjutnya, terdapat dikalsium silikat (C_2S) dengan kandungan 15–30% yang berkontribusi terhadap pengembangan kekuatan jangka panjang. Senyawa trikalsium aluminat (C_3A) berkisar antara 6–12% dan bertanggung jawab terhadap proses ikatan awal, meskipun reaksi yang terlalu cepat dapat menyebabkan masalah sehingga biasanya dikendalikan dengan penambahan gipsum. Terakhir, tetrakalsium aluminoforit (C_4AF) sekitar 6–8%, yang lebih berperan pada kestabilan warna semen serta sedikit berkontribusi terhadap kekuatan (Taylor, 1997).

Seiring berkembangnya teknologi material, kini tersedia berbagai jenis semen dengan karakteristik dan fungsi berbeda sesuai kebutuhan konstruksi. Jenis-jenis semen yang lazim digunakan dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Semen Portland (OPC *Ordinary Portland Cement*)

Semen ini tergolong jenis standar yang penerapannya mencakup hampir seluruh kebutuhan konstruksi umum. OPC dihasilkan dengan menggiling terak semen Portland dan gipsum, memiliki waktu ikat sekitar 1–2 jam, serta digunakan untuk pekerjaan beton struktural, pasangan, dan plesteran (SNI 15-2049:2004). Semen ini digunakan untuk konstruksi beton umum, pekerjaan pasangan, plesteran, dan pembuatan paving block karena karakteristiknya yang universal (Mulyono, 2004).

2. Semen Portland Pozzolan (PPC *Portland Pozzolana Cement*)

Semen jenis ini dikembangkan dari campuran semen Portland dengan bahan pozzolan bertekstur halus dengan kadar 15–40% sesuai SNI 0302:2004, di mana kandungan senyawa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ dalam pozzolan minimal harus mencapai 70% (Mulyono, 2004). PPC memiliki panas hidrasi yang lebih rendah dibanding OPC, sehingga cocok untuk pekerjaan beton massal (mass concrete). Selain itu, PPC lebih tahan terhadap lingkungan agresif seperti air laut karena reaksi pozzolaniknya mampu membentuk *Calcium Silicate Hydrate (C–S–H)* tambahan dan mengurangi *Calcium Hydroxide (Ca(OH)₂)* yang dapat bereaksi destruktif dengan ion sulfat (Neville & Brooks, 2010).

3. Semen Portland Komposit (PCC *Portland Composite Cement*)

PCC merupakan semen hasil inovasi yang lebih ramah lingkungan karena mengandung bahan anorganik tambahan seperti pozzolan, batu kapur, atau terak tanur tinggi dengan kadar 6–35% (SNI 15-7064:2004). Komposisinya menghasilkan panas hidrasi rendah, permukaan beton lebih halus, serta kelecakan yang lebih baik. Hasil penelitian Lasino dkk. (2012) menunjukkan bahwa penggunaan PCC meningkatkan *workability* beton dan mengurangi risiko retak akibat panas hidrasi, sehingga cocok untuk konstruksi besar dan lingkungan bersuhu tinggi.

2.3.2 Agregat

Komponen dengan jumlah paling dominan pada campuran beton adalah agregat berkisar antara 60% hingga 80% dari volume total. Menurut data ACI 211.1-91, volume agregat kasar kering dalam beton dapat berkisar antara 50% hingga 87% dari volume total beton, tergantung pada ukuran maksimum agregat dan modulus kehalusan pasir yang digunakan. Dengan demikian, agregat berperan bukan sekadar sebagai bahan pengisi, melainkan turut memengaruhi sifat mekanik serta ketahanan beton.

Pemilihan agregat harus memenuhi ketentuan mutu yang diatur dalam ASTM C33M-18 agar beton yang dihasilkan memiliki kekuatan sesuai yang direncanakan. terdapat sejumlah elemen kunci yang menuntut perhatian lebih lanjut, mencakup:

1. Gradasi Agregat:

Gradasi yang baik menghasilkan campuran beton yang padat dan mudah dikerjakan (*workable*). Menurut SNI 03-2834:2000, agregat halus diklasifikasikan dalam empat zona (I–IV) sesuai standar BS 882:1992. Gradasi optimal membantu meminimalkan rongga udara dan meningkatkan kepadatan beton, sehingga kekuatannya menjadi lebih tinggi dan ekonomis.

Tabel 1. Pembagian Zona Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Persentase Tembus Kumulatif (%)				Menurut ASTM C33:78
	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	
10	100	100	100	100	100
4,8	90-100	90-100	95-100	95-100	95-100
2,4	60-95	75-100	85-100	95-100	80-100
1,2	30-70	55-90	75-100	90-100	50-85
0,6	15-34	35-59	60-79	80-100	25-60
0,3	5-20	8-30	12-40	15-50	10-30
0,15	0-10	0-10	0-10	0-15	2-10

Sumber : Mulyono, 2004

Keterangan : Daerah gradasi I = Pasir kasar
 Daerah gradasi II = Pasir agak kasar
 Daerah gradasi III = Pasir halus
 Daerah gradasi IV = Pasir agak halus

2. Kebersihan Agregat:

Kebersihan agregat harus terjaga dari lumpur, unsur organik, serta bahan pengotor lainnya. Kandungan lumpur maksimum yang diizinkan adalah 5% untuk agregat halus dan 1% untuk agregat kasar (SNI 03-1750:1990). Jika kandungan kotoran pada agregat terlalu tinggi, ikatan antara pasta semen dan butiran agregat akan terganggu, yang pada akhirnya menurunkan kekuatan tekan beton.

3. Bentuk dan Tekstur:

Agregat yang berbentuk bersudut (*angular*) memberikan ikatan mekanis yang lebih baik dibandingkan agregat bulat. SNI 03-1750:1990 membatasi penggunaan agregat pipih dan memanjang maksimum 15% dari total volume. Tekstur kasar lebih disukai karena meningkatkan ikatan antara matriks semen dan butiran agregat.

4. Kekuatan dan Kekerasan:

Agregat harus memiliki ketahanan aus yang tinggi. Berdasarkan SNI 03-2417-2008, nilai keausan maksimum (uji Los Angeles) tidak boleh melebihi 40%. Agregat juga perlu tahan terhadap siklus beku-cair untuk menjaga durabilitas beton.

5. Karakteristik Fisik:

Karakteristik fisik agregat meliputi berat jenis, penyerapan, kadar air, dan volume padat yang harus dijaga konsistensinya karena mempengaruhi proporsi campuran beton. SNI 03-1750-1990 menetapkan modulus kehalusan pasir antara 2.3-3.1. Kadar air agregat sangat mempengaruhi *water-cement ratio* yang pada akhirnya berpengaruh pada kekuatan beton, sementara volume padat (*bulk density*) berpengaruh pada proporsi campuran yang digunakan.

6. Batasan Ukuran:

Ukuran terbesar dari agregat kasar harus dibatasi, yaitu tidak lebih dari seperlima ukuran terkecil elemen struktur yang akan dicor, 3/4 jarak antar tulangan, atau 1/3 tebal pelat (ASTM C33 dan ACI 318-19). Pemilihan ukuran yang tepat membantu mencegah segregasi dan meningkatkan *workability* beton. Material harus lolos saringan No.4 (4.75 mm) untuk agregat halus,. Batasan ini penting untuk memastikan kelecakan yang baik dan mencegah terjadinya segregasi dalam campuran beton.

Dalam bidang konstruksi, dalam penggunaannya, agregat dibagi menjadi dua golongan besar, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Kedua jenis

agregat ini memegang peran vital dalam menentukan kualitas, kekuatan, dan keawetan beton, sekaligus memengaruhi berbagai karakteristik penting seperti kelecakan dan kestabilan volume struktur beton.

1. Agregat Halus

Agregat halus merupakan salah satu unsur utama dalam campuran beton yang umumnya berasal dari pasir alami atau pasir buatan. Berdasarkan ketentuan ASTM C33, agregat halus adalah material yang lolos dari saringan dengan ukuran 4,75 mm.

Menurut Ilham (2024), pasir yang digunakan sebagai agregat halus harus memenuhi beberapa ketentuan agar dapat menghasilkan beton dengan mutu optimal, antara lain:

- 1) Butiran pasir harus keras, tajam, serta memiliki indeks kekerasan tidak lebih dari 2,2 untuk menjamin daya tahan terhadap beban tekan dan geser.
- 2) Kadar lumpur yang terdapat pada pasir dibatasi maksimal sebesar 5%. Apabila nilainya melebihi batas tersebut, pasir perlu dibersihkan terlebih dahulu sebelum digunakan hingga kadar lumpurnya berada di bawah ambang yang diizinkan.
- 3) Ketika diuji dengan larutan garam sulfat jenuh, pasir harus memenuhi syarat:
 - a) Hancuran maksimum 12% Bila pengujian dilakukan dengan menggunakan larutan natrium sulfat.
 - b) Nilai kehilangan maksimum ditetapkan sebesar 10% ketika pengujian dilakukan menggunakan larutan magnesium sulfat.
- 4) Pasir harus bebas dari kandungan bahan organik berlebih, yang dapat diperiksa melalui pengujian menggunakan larutan NaOH jenuh 3% dengan metode Abrans–Harder.
- 5) Pasir harus bersifat non-reaktif terhadap alkali agar beton memiliki keawetan optimal.

- 6) Pasir laut hanya dapat digunakan untuk mutu beton tertentu dengan izin resmi dari lembaga terkait.
- 7) Pasir harus memenuhi persyaratan pasir pasangan untuk plesteran dan spesi,
- 8) Gradasi pasir harus berada pada batas yang optimal.

2. Agregat Kasar

Dalam campuran beton, agregat kasar berperan sebagai bahan pengisi dan umumnya memiliki ukuran partikel lebih besar dari 4,75 mm. Material ini umumnya berupa batu pecah, kerikil, atau batu alam lainnya yang telah melalui proses penyaringan sesuai standar ASTM C33. Agregat kasar berperan penting dalam meningkatkan kekuatan tekan, mengurangi penyusutan, serta menekan biaya produksi karena dapat mengurangi penggunaan semen (Neville, 2012).

Sesuai dengan SNI 2461:2014, ukuran partikel agregat kasar umumnya berada dalam rentang 5 mm sampai 40 mm. Pemilihan ukuran agregat disesuaikan dengan jenis konstruksi yang direncanakan, agregat berukuran 10–20 mm digunakan untuk elemen struktural tipis seperti pelat, sedangkan ukuran 20–40 mm lebih cocok untuk pekerjaan fondasi atau struktur masif. Pemilihan ukuran agregat yang tepat sangat berpengaruh terhadap *workability*, kepadatan, dan performa beton secara keseluruhan.

Persyaratan agregat kasar dalam beton normal diatur terutama oleh standar SNI 2461:2014 tentang Spesifikasi Agregat Kasar untuk Campuran Beton. Beberapa persyaratan utama agregat kasar yang harus dipenuhi antara lain:

1) Ukuran butir

Agregat kasar merupakan butiran material yang tidak lolos melalui saringan berukuran 4,75 mm dengan ukuran maksimum

tidak melebihi 40 mm. Ukuran maksimum juga harus disesuaikan dengan bentuk elemen struktur. Agar campuran beton tetap padat dan homogen, ukuran maksimum agregat kasar ditetapkan dengan batas tertentu, yakni tidak lebih dari 1/5 sisi terkecil cetakan, 1/3 tebal pelat, atau 3/4 jarak antar tulangan tanpa penutup beton (SNI 2461:2014).

2) Kebersihan

Agregat harus bebas dari lumpur, bahan organik, maupun kotoran lain yang dapat mengganggu ikatan antara pasta semen dan agregat. Kadar lumpur maksimum yang diizinkan adalah 1% (SNI 2461:2014).

3) Bentuk dan tekstur

Agregat kasar sebaiknya berbentuk bersudut (angular) agar memberikan ikatan mekanis yang lebih baik dengan pasta semen. Agregat berbentuk pipih atau panjang dengan rasio dimensi > 3 dibatasi maksimum 15% dari berat total agregat (SNI 2461:2014).

4) Kekuatan dan kekerasan

Agregat kasar perlu memiliki ketahanan yang baik terhadap gesekan maupun keausan. Berdasarkan SNI 2417:2008, nilai keausan maksimum yang diperbolehkan dari hasil uji mesin Los Angeles adalah $\leq 40\%$.

5) Karakteristik fisik

Berdasarkan SNI 1969:2008 dan SNI 2461:2014, berat jenis agregat kasar berada pada kisaran 2,5–2,9 dengan daya serap air maksimum 3% (atau $\leq 2\%$ untuk beton mutu tinggi). Berat isi padat (bulk density) agregat kasar umumnya berada antara 1400–1600 kg/m³.

2.3.3 Air

Air termasuk komponen utama dalam campuran beton yang memiliki peran penting, baik terhadap reaksi kimia maupun karakteristik fisik beton. Air dalam beton memiliki dua peran utama. Pertama, air berfungsi sebagai pereaksi kimia dengan senyawa semen untuk Menghasilkan C–S–H (kalsium silikat hidrat), produk hidrasi utama yang sangat menentukan kekuatan beton. Kedua, air berperan dalam memberikan kelecakan (*workability*) pada beton segar sehingga memudahkan proses pengecoran, pemadatan, dan pembentukan beton (Mehta & Monteiro, 2006).

Menurut SNI 2847:2019, air yang digunakan untuk membuat beton harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat mengganggu reaksi hidrasi, seperti minyak, asam, alkali, garam, dan bahan organik. Keberadaan zat-zat tersebut dapat menghambat pembentukan produk hidrasi, mengurangi ikatan antartpartikel, bahkan menurunkan kekuatan akhir beton.

Namun demikian, jumlah air yang digunakan harus dikontrol secara cermat. Perbandingan antara air dan semen (*water–cement ratio*) menjadi faktor utama yang memengaruhi kekuatan tekan beton. Semakin kecil nilai perbandingan tersebut, semakin padat dan kuat struktur beton yang terbentuk. Sebaliknya, penggunaan air yang berlebihan akan meningkatkan porositas, menurunkan kepadatan, dan memperburuk durabilitas beton (Neville, 2012)

Standar ASTM C1602/C1602M-22 merupakan salah satu acuan internasional yang secara khusus mengatur standar mutu air yang digunakan sebagai bahan pencampur beton. Standar ini menekankan bahwa kualitas air harus dijaga agar tidak menimbulkan gangguan pada proses hidrasi semen, tidak menyebabkan penurunan kuat tekan, serta

tidak mengurangi durabilitas beton terhadap pengaruh lingkungan agresif, seperti korosi tulangan maupun serangan sulfat. Untuk menjamin hal tersebut.

ASTM C1602/C1602M-22 juga menetapkan batasan kandungan kimia dalam air pencampur beton yang bertujuan untuk menjaga durabilitas. Kandungan klorida dibatasi karena dapat mempercepat korosi pada tulangan, dengan batas maksimum 500 ppm untuk beton prategang dan 1000 ppm untuk beton bertulang biasa. Kandungan sulfat juga dibatasi hingga 3000 ppm untuk mencegah terjadinya serangan sulfat yang dapat menimbulkan ekspansi dan retak pada beton. Sementara itu, alkali dibatasi maksimum 600 ppm karena kadar yang tinggi berpotensi memicu reaksi alkali-silika (ASR) apabila agregat yang digunakan bersifat reaktif. Adapun total padatan terlarut dalam air tidak boleh melebihi 50.000 ppm, karena kelebihan padatan dapat menurunkan mutu hidrasi semen dan membuat beton lebih permeabel. Dengan adanya batasan-batasan tersebut, kualitas air yang digunakan dapat lebih terjamin sehingga beton tetap memiliki performa mekanik dan ketahanan yang optimal meskipun berada pada lingkungan yang bersifat agresif.

Tabel 2. Batasan Maksimal Kandungan Zat Kimia dalam Air

No.	Kandungan Unsur Kimia	Konsentrasi Maksimal (ppm)
1	Chlorida (CL-)	
	(beton prategang)	500
	(beton bertulang)	1000
2	Sulfat (SO ₄)	3000
3	Alkali (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O)	600
4	Total Solid	50000

(Sumber: (ASTM C1602/C1602M-22))

2.3 Abu Ketel

Abu ketel didefinisikan sebagai residu padat yang terbentuk dari proses pembakaran biomassa, seperti cangkang kelapa sawit, pada suhu tinggi berkisar 700–800°C (Primandari, 2012). Komponen utama abu ketel adalah silika (SiO_2), besi oksida (Fe_2O_3), alumina (Al_2O_3), dan kapur (CaO), kandungan silika yang tinggi menjadikan abu ketel berpotensi sebagai material pozzolanik, kemampuan abu ketel dalam meningkatkan kekuatan beton berasal dari reaksinya dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen, yang membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C–S–H) sebagai produk pengikat utama (Irianti dkk., 1998).

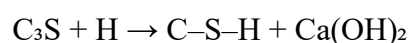
Tabel 3. Kandungan Senyawa Kimia dalam Abu Ketel

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

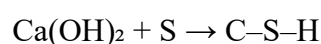
(Sumber: (Irianti dkk., 1998)).

Karakter kimia abu ketel menyerupai fly ash, membuka kemungkinan penggunaannya sebagai substitusi sebagian semen. Golewski (2022) memberi bukti bahwa silika reaktif di dalam abu ketel menjalankan reaksi pozzolanik sehingga terbentuk lebih banyak C–S–H, yang pada gilirannya meningkatkan kekuatan serta mengurangi porositas beton.

Reaksi Hidrasi Semen :



Reaksi Pozolanik :



Melalui mekanisme tersebut, abu ketel tidak hanya meningkatkan kekuatan jangka panjang, tetapi juga memperbaiki mikrostruktur beton dengan

mengurangi porositas dan permeabilitasnya. Pengurangan kandungan Ca(OH)_2 bebas juga membantu meningkatkan ketahanan beton terhadap ion klorida dan sulfat, sehingga durabilitas beton meningkat signifikan (American Coal Ash Association, 2003).

American Coal Ash Association (2003) melaporkan beberapa manfaat penggunaan material pozzolanik seperti fly ash yang juga berlaku bagi abu ketel antara lain:

1. meningkatkan ketahanan beton sehingga memperpanjang umur pakai jalan maupun struktur,
2. menurunkan kebutuhan energi dan emisi gas rumah kaca melalui pengurangan pemakaian semen portland,
3. mengurangi volume limbah padat hasil pembakaran yang berpotensi mencemari lingkungan, serta
4. mendukung konservasi material dan sumber daya alam.

Dengan karakteristik kimia yang mirip, abu ketel sebagai limbah biomassa berpotensi memberikan dampak positif yang sama. Pemanfaatan abu ketel dalam beton bukan hanya memperbaiki sifat mekanik dan durabilitas beton, tetapi juga berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan dengan menurunkan ketergantungan terhadap semen portland dan mengurangi pencemaran lingkungan.

2.4 Additive Sikacim

Sikacim merupakan produk aditif beton yang dikembangkan oleh Sika, sebuah perusahaan terkemuka dalam bidang bahan kimia konstruksi. Produk ini dirancang sebagai *high range water reducer* (pengurang air dengan efisiensi tinggi) dan *superplasticizer* dengan komponen utama adalah *Modified Naphthalene Formaldehyde Sulfonate* (MNFS) (Sika Indonesia, 2021). Sikacim diklasifikasikan sebagai admixture tipe F sesuai dengan standar

ASTM C494/C494M:2020, yang mengacu pada aditif pengurang air dengan efisiensi tinggi.

Sikacim bekerja dengan cara menyebarkan partikel semen secara merata melalui mekanisme dispersi, sehingga mampu menurunkan kebutuhan air dalam campuran beton tanpa mengurangi kelecakan. Prinsip kerja ini serupa dengan *superplasticizer* berbasis *sulfonated naphthalene formaldehyde* (SNF), dimana molekul aditif akan teradsorpsi pada permukaan partikel semen dan membentuk lapisan bermuatan ganda yang menghasilkan gaya tolak elektrostatis. Efek ini mencegah penggumpalan partikel semen dan meningkatkan fluiditas adukan. (Capacchione dkk., 2020).

Penggunaan Sikacim pada beton memberi sejumlah keuntungan, yaitu: meningkatkan *workability* beton segar, memperbaiki kepadatan struktur mikro, serta membentuk beton yang memiliki kekuatan tekan serta ketahanan lebih tinggi. Serta, dengan rasio air-semen yang lebih rendah, beton yang dihasilkan memiliki porositas rendah, sehingga ketahanan terhadap penetrasi air, ion klorida, maupun senyawa sulfat menjadi lebih tinggi (Capacchione dkk., 2020). Karakteristik ini menjadikan Sikacim efektif digunakan pada beton yang diaplikasikan di lingkungan agresif, seperti daerah pantai atau konstruksi yang terpapar air laut.

Hasil penelitian (Bediako & Ametefe, 2024a) juga menunjukkan bahwa penambahan SNF *superplasticizer* dalam beton mampu meningkatkan *workability* sekaligus menurunkan mobilitas ion di dalam beton. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya jumlah pori yang saling terhubung, sehingga memberikan peningkatan signifikan pada sifat mekanik, seperti kuat tekan, modulus elastisitas, dan modulus dinamis. Selain itu, beton dengan tambahan SNF juga terbukti lebih tahan terhadap serangan asam dibandingkan beton tanpa *superplasticizer*. Dengan demikian, penggunaan SNF *superplasticizer* direkomendasikan untuk memperoleh beton dengan kelecakan lebih baik, pergerakan ion yang lebih terbatas, serta sifat mekanik dan durabilitas yang lebih tinggi.

2.5 Perawatan Beton (*Curing*)

Menurut ACI 308:2022 Istilah *curing* merujuk pada proses pematangan beton semen hidraulik di mana terjadi perkembangan kekerasan seiring waktu akibat kelanjutan reaksi hidrasi, yang memerlukan kondisi kelembaban dan suhu yang sesuai. Meskipun semua beton mengalami pengerasan, laju dan kualitas perkembangan sifat-sifat tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan tindakan perawatan baik melalui pengendalian kehilangan air dan panas maupun pemberian kelembaban atau panas tambahan dari luar.

Menurut ACI 116R: 2000 dan ASTM C125:2015, *curing* juga dapat dimaknai sebagai tindakan yang bertujuan untuk menjaga kestabilan suhu dan kelembaban pada campuran beton dalam kondisi segar agar hidrasi semen hidraulik serta reaksi pozzolanik dapat berlangsung secara optimal, sehingga sifat potensial dari campuran dapat berkembang. Suatu campuran beton dikatakan proporsional dan dirawat dengan baik apabila sifat yang dicapai setara atau bahkan melebihi sifat beton yang direncanakan. Periode *curing* sendiri dimulai sejak beton dituang, melalui tahap pemadatan dan perataan, hingga sifat-sifat beton yang diharapkan tercapai.

Tujuan utama *curing* menurut ACI 308 adalah mencegah kehilangan kelembaban dari beton, menambah suplai air apabila diperlukan, serta menjaga suhu beton pada kondisi yang mendukung proses hidrasi. Perawatan yang tepat memungkinkan material semen dalam beton terhidrasi dengan sempurna. Proses hidrasi ini merupakan reaksi kimia maupun fisik antara semen portland dengan air, termasuk reaksi pozzolanik bila terdapat bahan tambahan. Baik pada permukaan maupun bagian dalam, *curing* memiliki pengaruh besar terhadap sifat beton yang mengeras, antara lain kuat tekan, permeabilitas, ketahanan aus, stabilitas volume, serta ketahanan terhadap siklus beku-cair dan pengaruh bahan kimia agresif. Dengan demikian, *curing* merupakan tahap krusial yang menentukan kualitas akhir beton, baik dari segi kekuatan maupun ketahanannya terhadap lingkungan.

2.6 Air Laut

Air laut merupakan medium alami yang kompleks, terdiri atas air (H_2O) dan berbagai zat terlarut dengan komposisi ion yang relatif konstan sebagian besar, atau sekitar 99% zat terlarut dalam air laut, tersusun atas enam jenis ion dominan: klorida, natrium, sulfat, magnesium, kalsium, dan kalium. Dari jumlah tersebut, natrium dan klorida merupakan komponen terbesar, yakni menyumbang sekitar 85–86% dari total salinitas, sedangkan magnesium dan sulfat sekitar 11%, serta kalsium dan kalium sekitar 2–3%. Sisanya adalah ion minor seperti bikarbonat (HCO_3^-), bromida (Br^-), fluorida (F^-), dan borat, yang secara kolektif kurang dari 1%. (Mackenzie dkk., 2025).

Kandungan ion klorida dan sulfat berperan penting dalam reaksi korosif terhadap beton di lingkungan laut. Meskipun komposisinya bervariasi antarwilayah, secara umum air laut mengandung sekitar 3,5% garam terlarut. Tabel berikut merangkum jenis-jenis ion dan konsentrasinya berdasarkan penelitian Duxbury dkk. (2025):

Tabel 4. Komposisi Ion pada Air Laut

Nama Umum	Ion	(g)/kg air laut
Sodium	Na	10,679
Magnesium	Mg ⁺⁺	1,278
Calcium	Ca ⁺⁺	0,4096
Potassium	K ⁺	0,3953
Strontium	Sr ⁺⁺	0,0079
Clorida	CL ⁻	19,162
Sulfat	SO ₄ ²⁻	2,680
Bromide	Br ⁻	0,0663
Boron	N ₃ B ₃	0,0044
Bikarbonat	HCO ³⁻	0,0276
Fluor	F ⁻	0,0013

Sumber : Duxbury dkk. (2025).

2.7 Pengaruh Kimia Air Laut terhadap Beton

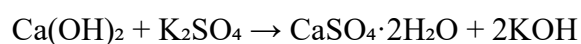
Beton yang terpapar air laut memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan beton yang menggunakan air tawar. Air laut mengandung ion-ion agresif seperti klorida (Cl^-), sulfat (SO_4^{2-}), dan magnesium (Mg^{2+}), yang dapat menyebabkan berbagai reaksi kimia yang merusak komponen beton, baik pada matriks beton maupun baja tulangan. Hal ini mempengaruhi ketahanan beton terhadap kerusakan struktural dalam jangka panjang (Wedhanto, 2017)

Monteiro & Mehta (2006) menjelaskan bahwa pada tahap awal, reaksi antara sulfat dan komponen semen dapat meningkatkan kekuatan tekan beton karena pembentukan *ettringite* yang mengisi pori-pori, namun peningkatan ini bersifat sementara. Penelitian Wedhanto (2017) menunjukkan bahwa pada perendaman awal selama 7 hari, beton justru mengalami peningkatan kuat tekan karena pengaruh mineral terlarut yang mempercepat hidrasi. Namun, setelah perendaman lebih lama (14–28 hari), kuat tekan mulai menurun.

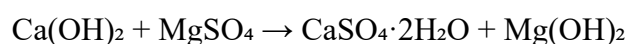
Menurut Monteiro & Mehta (2006) proses deteriorasi dimulai ketika ion sulfat dari berbagai senyawa, terutama K_2SO_4 dan MgSO_4 , berinteraksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil reaksi hidrasi semen, yang kemudian mempercepat timbulnya korosi.

Reaksi ion sulfat :

1. Reaksi dengan kalium sulfat



2. Reaksi dengan magnesium sulfat



3. Reaksi pembentukan *ettringite*



Hasil serupa juga dilaporkan oleh Helmi dkk., (2024), bahwa paparan lingkungan laut menurunkan kuat tekan beton dengan variasi tingkat

keparahan. Penurunan terjadi sekitar 2% pada lingkungan atmosfer pantai, 11% pada zona pasang surut, dan hingga 19% pada perendaman penuh air laut. Meskipun proses *curing* dengan air laut hingga 28 hari masih menghasilkan kuat tekan yang hampir sama dengan perendaman menggunakan air tawar, paparan jangka panjang terbukti mempercepat degradasi beton.

Selain sulfat, ion klorida juga memiliki peranan besar dalam proses degradasi beton. Saat ion klorida masuk ke dalam material berbasis semen, sebagian akan bereaksi secara kimia dengan produk hidrasi semen, sementara sebagian lainnya menempel secara fisik pada dinding pori atau gel C–S–H. Proses ini secara keseluruhan dikenal sebagai *chloride binding* (Wang dkk., 2013). Ikatan kimia yang paling dominan adalah pembentukan garam Friedel ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), yaitu senyawa kalsium kloroaluminat hidroksida hasil reaksi antara ion klorida dengan kalsium hidroksida dan fase aluminat (C_3A) dari pasta semen.

Garam Friedel memiliki sifat ekspansif. Pada tahap awal, kristal yang terbentuk mengisi rongga-rongga beton sehingga struktur terlihat lebih rapat. Akan tetapi, apabila perendaman klorida berlangsung dalam jangka waktu lama, kristal ini akan terus berkembang hingga memberikan tekanan berlebih pada dinding pori. Tekanan tersebut menimbulkan retakan mikroskopis dalam matriks beton yang membuka jalur transportasi bagi ion-ion agresif lainnya. Kondisi ini pada akhirnya mempercepat korosi tulangan serta memperburuk ketahanan (durabilitas) beton (Wang dkk., 2013)

2.8 Pengujian Kuat Tekan

Kekuatan tekan menjadi parameter pokok yang digunakan untuk menilai mutu serta kualitas beton. Secara umum, besarnya kuat tekan diperoleh dengan membandingkan beban maksimum yang menyebabkan benda uji runtuh terhadap luas penampang yang menerima gaya tekan (Wariyatno & Haryanto,

2013). Faktor penentunya meliputi rasio air-semen, tingkat pemadatan, sifat agregat, usia beton, serta prosedur pengujian. (Neville, 2012)

Seiring bertambahnya waktu pengerasan, kapasitas tekan beton mengalami peningkatan. Biasanya pada umur 7 hari, beton sudah mencapai sekitar 70% dari kekuatan rencana, kemudian meningkat menjadi sekitar 85–90% pada usia 14 hari, dan mencapai kekuatan optimum pada umur 28 hari (Panennungi & Pertiwi, 2018). Oleh karena itu, umur 28 hari sering dijadikan acuan standar dalam evaluasi kekuatan beton.

Menurut ISO 3893:1997 dan kajian Panennungi & Pertiwi (2018), bentuk benda uji beton memengaruhi hasil kuat tekan yang diperoleh. Dalam praktik laboratorium, benda uji biasanya dibuat dalam bentuk kubus atau silinder, dan perbedaan bentuk ini menghasilkan variasi nilai kuat tekan. Pengujian dapat dilakukan baik melalui pendekatan uji terkendali dan observasi langsung di lapangan.

Nilai Kuat tekan beton merupakan hasil perbandingan antara beban maksimum saat benda uji mengalami keruntuhan dengan luas bidang tekan. Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$f'_c = P/A$$

Keterangan:

f'_c = Kuat tekan beton (Mpa)

P = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

Dalam pengujian laboratorium, benda uji berbentuk silinder biasanya dibuat dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, dengan rasio tinggi terhadap diameter 2 banding 1. Sedangkan untuk benda uji kubus, dimensi yang digunakan umumnya 150 mm pada setiap sisinya.

Tabel 5. 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
10	15
16	20
25	30
30	35
35	40
40	45
45	50
50	55

Sumber: ISO *Standart* 3839, 1997

2.9 Penelitian Sebelumnya

2.11.1 Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi

Penelitian yang dilakukan oleh Irianti dkk., (1998) yang menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, membahas tentang penggunaan abu ketel sebagai bahan pengganti sebagian dari semen untuk beton mutu tinggi. Substitusi material dilakukan pada rasio 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Total sampel yang diuji sebanyak 75 beton silinder, di mana setiap variasi memiliki tiga sampel. Penelitian ini menemukan bahwa penambahan abu ketel dapat meningkatkan kuat tekan beton dengan rentang 2,67% hingga 20,92%, dengan nilai tertinggi diperoleh dengan kadar abu ketel 10% dari total campuran, bila dibandingkan dengan beton yang tidak ditambah abu ketel pada usia 56. Namun tidak ada peningkatan yang signifikan jika usia beton kurang dari 28 hari.

2.11.2 Pengaruh Air Laut Terhadap Kekuatan Tekan Beton yang Terbuat dari Berbagai Merk Semen yang Ada Di Kota Malang

Wedhanto, (2017) melakukan penelitian untuk mengkaji pengaruh air laut terhadap kuat tekan beton. Penelitian yang dilakukan dengan dua jenis semen yang umum ditemukan di Malang, Tipe I dan Tipe II ini menggunakan sampel berbentuk silinder dengan standar mutu $f_c' = 17$ Mpa dan di rendam di air laut dengan interval 7, 14, dan 28 hari. Semen Tipe II menunjukkan adanya peningkatan cepat pada kuat tekan pada perendaman 7 hari dan penurunan kekuatan pada umur 28 hari. Hal ini dikarenakan oleh sifat semen Tipe II yang memiliki daya ikat awal yang rendah, hal ini berbalikan dengan semen Tipe I yang memiliki kuat tekan tertinggi setelah 28 hari direndam. Hal ini menunjukkan bahwa semen Tipe I lebih tahan terhadap kondisi air laut berdasarkan penelitian ini.

2.11.3 Pengaruh Penggunaan Sikacim *Concrete Additive* Terhadap Kuat Tekan Beton dengan Menggunakan Agregat Kasar Bengalon dan Agregat Halus Pasir Mahakam

Jamal dkk., (2018) melakukan penelitian dengan penambahan Sikacim Concrete Additive dalam beton yang menggunakan agregat kasar berupa koral Bengalon dan agregat halus dari pasir Mahakam terhadap kuat tekan beton tersebut. Sampel yang digunakan berbentuk kubus $15 \times 15 \times 15$ cm, dengan variasi penambahan Sikacim sebesar 0,5%, 0,7%, dan 0,9% dari berat semen, dengan umur 7, 14, dan 28 hari. Terdapatnya pengaruh positif daam penambahan Sikacim Concrete Additive terhadap peningkatan kuat tekan beton sekuat 23,78 MPa, diperoleh pada variasi penambahan Sikacim sebesar 0,7% pada umur 28 hari. Dengan nilai slump yang lebih tinggi, menunjukkan bahwa Sikacim dapat meningkatkan workability atau kelecakan dengan campuran beton tanpa tambahan Hasilnya menunjukkan potensi besar bahan tambah ini dalam mencapai mutu beton yang diharapkan,

meskipun diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengeksplorasi agregat dan kondisi lingkungan yang berbeda.

2.11.4 Effect of sulphonated naphthalene formaldehyde superplasticizer on the mechanical and durability properties of concrete produced using locally sourced fine aggregate from Ghana

Penelitian oleh Bediako & Ametefe (2024) mengkaji dampak pemanfaatan superplasticizer Sulphonated Naphthalene Formaldehyde (SNF) pada karakteristik mekanis dan ketahanan beton yang menggunakan agregat halus asli dari Ghana. Temuan penelitian mengungkapkan bahwa penambahan SNF berhasil meningkatkan kelenturan beton dalam kondisi segar, yang terlihat dari kenaikan nilai slump dibandingkan dengan beton kontrol, tanpa perlu menambah volume air campuran.

Dari segi karakteristik mekanis, beton yang menggunakan SNF menunjukkan peningkatan kekuatan tekan antara 7–33% pada rentang waktu 1 hingga 90 hari, serta perbaikan kekuatan lentur dan modulus elastisitas, baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Pada aspek ketahanan, beton dengan SNF memiliki tingkat penyerapan air, porositas, dan infiltrasi ion klorida yang lebih rendah, disertai dengan resistivitas listrik yang lebih tinggi, sehingga lebih kuat menghadapi kerusakan dari lingkungan yang keras. Meskipun beton tersebut mengalami pengurangan massa yang lebih signifikan ketika diuji dengan larutan asam, kekuatan yang tersisa tetap lebih baik daripada beton biasa, membuktikan ketahanan yang lebih unggul terhadap serangan kimia. Oleh karena itu, penelitian ini menyimpulkan bahwa penerapan superplasticizer SNF tidak hanya memperkuat sifat mekanis beton, tetapi juga meningkatkan daya tahannya terhadap faktor lingkungan yang merusak.

2.11.5 Study on the Effect of Fly Ash on Mechanical Properties and Seawater Freeze–Thaw Resistance of Seawater Sea Sand Concrete

Penelitian oleh He dkk, (2024) mengkaji dampak abu terbang terhadap karakteristik mekanis dan daya tahan beton yang terpapar siklus pembekuan dan pencairan air laut, dengan menggunakan campuran air laut dan pasir laut. Studi ini mengungkapkan bahwa kehadiran ion korosif dalam air laut dan pasir laut, seperti klorida dan sulfat, dapat mempercepat kerusakan beton melalui pembentukan garam Friedel, ettringite, serta reaksi dengan ion magnesium. Meskipun demikian, penambahan abu terbang terbukti efektif dalam meningkatkan sifat mekanis dan ketahanan terhadap degradasi dari siklus beku-cair tersebut.

Hasil uji coba menunjukkan bahwa penggantian dengan abu terbang sebanyak 20% menghasilkan kenaikan kekuatan tekan hingga 13,22%, serta mengurangi tingkat pengurangan massa sebesar 57,26% dan penurunan kekuatan hingga 43,14% setelah 75 siklus pembekuan dan pencairan dalam air laut. Melalui pemeriksaan mikrostruktur, abu terbang berfungsi sebagai mikroagregat dan bahan pozzolanik yang memperbaiki kepadatan beton melalui reaksi tambahan, sehingga mampu menghalangi infiltrasi ion agresif. Selain itu, pemodelan ramalan kerusakan dengan menggunakan teori sistem abu-abu (GM 1,1) menunjukkan tingkat ketepatan yang tinggi dalam memprediksi degradasi beton di kondisi laut, sehingga penelitian ini menegaskan potensi abu terbang sebagai bahan aditif untuk memperkuat ketahanan beton laut.

2.11.6 Effect of Sea Water, Coastal Sand, and Clam Shell Powder on Compressive Strength of Normal Concrete

Penelitian oleh Helmi dkk. (2024) meneliti pengaruh penggunaan air laut, pasir pantai, dan serbuk cangkang kerang terhadap kuat tekan beton normal menggunakan benda uji kubus $15 \times 15 \times 15$ cm yang diuji

pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari. Hasil menunjukkan bahwa *curing* dengan air laut hingga 28 hari memberikan kuat tekan yang hampir setara dengan beton yang dirawat di air tawar, meskipun terjadi penurunan kekuatan hingga 19% pada perendaman penuh. Penggunaan pasir pantai menurunkan kuat tekan, sedangkan penambahan serbuk cangkang kerang meningkatkan kekuatan beton. Selain itu, terjadi karbonasi pada beton yang terpapar lingkungan laut, dengan kedalaman hingga 7,4 mm. Temuan ini menunjukkan potensi pemanfaatan material laut yang berkelanjutan, meskipun paparan air laut jangka panjang tetap mempercepat degradasi beton.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Pendahuluan

Pendekatan yang diterapkan dalam penelitian ini bersifat eksperimental, dengan pelaksanaan serangkaian uji laboratorium untuk mendapatkan hasil yang bersifat empiris mengenai kuat tekan beton normal setelah perendaman di air laut dianalisis untuk menilai pengaruh penggunaan abu ketel sebagai substitusi semen dan tambahan *Sikacim Concrete Additive*.. Metode ini bertujuan untuk menguji hipotesis bahwa abu ketel dan Sikacim, dapat meningkatkan kuat tekan beton sekaligus memberikan perlindungan terhadap paparan air laut.

Penelitian ini menggunakan dua bahan tambahan: abu ketel dan Sikacim. Penggantian sebagian semen dengan abu ketel bertujuan untuk mengkaji sejauh mana material ini dapat memengaruhi sifat mekanis beton, khususnya kuat tekan setelah perendaman air laut. Substitusi abu ketel dimaksudkan untuk mengetahui sejauh mana material tersebut dapat memengaruhi sifat mekanik beton, terutama setelah proses perendaman, sedangkan penambahan Sikacim diharapkan mampu meningkatkan *workability*, mempercepat perkembangan kekuatan, serta mengurangi kebutuhan air tanpa menurunkan kualitas beton.

Spesimen pengujian dibuat dalam bentuk kubus berdimensi $15 \times 15 \times 15$ cm, sesuai standar uji kuat tekan. Pemilihan bentuk kubus sesuai dengan standar yang berlaku untuk pengujian kuat tekan beton, karena bentuk ini memungkinkan distribusi beban yang merata selama pengujian. Setiap variasi beton dibuat dalam bentuk beberapa sampel kubus yang kemudian diuji kuat tekannya pada berbagai umur beton. Pemilihan ukuran 15 cm ini umum

digunakan dalam pengujian beton, karena memungkinkan pengujian yang konsisten dan relevan dengan standar konstruksi. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung. Laboratorium ini dilengkapi dengan peralatan yang dibutuhkan untuk melakukan berbagai pengujian mekanis terhadap beton, termasuk mesin untuk evaluasi sifat mekanik beton melalui uji tekan. Mesin ini mampu memberikan data kuat tekan yang akurat pada setiap variasi beton yang diuji. Sebelum pengujian kuat tekan dilakukan, beton dirawat (*curing*) dengan dua metode perendaman, yaitu di air tawar dan air laut. Proses ini dilakukan untuk menjaga kelembapan optimal selama hidrasi sekaligus mengkaji pengaruh lingkungan perendaman terhadap kekuatan tekan beton. *Curing* ini penting agar beton mencapai kekuatan maksimal sesuai kondisi masing-masing media.

Penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperoleh dasar teori yang relevan terkait penggunaan abu ketel dan Sikacim pada beton normal, standar mutu beton menurut SNI, serta metode pengujian kuat tekan setelah perendaman air laut. Langkah ini memastikan bahwa seluruh tahapan penelitian memiliki landasan teoritis yang kuat dan sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

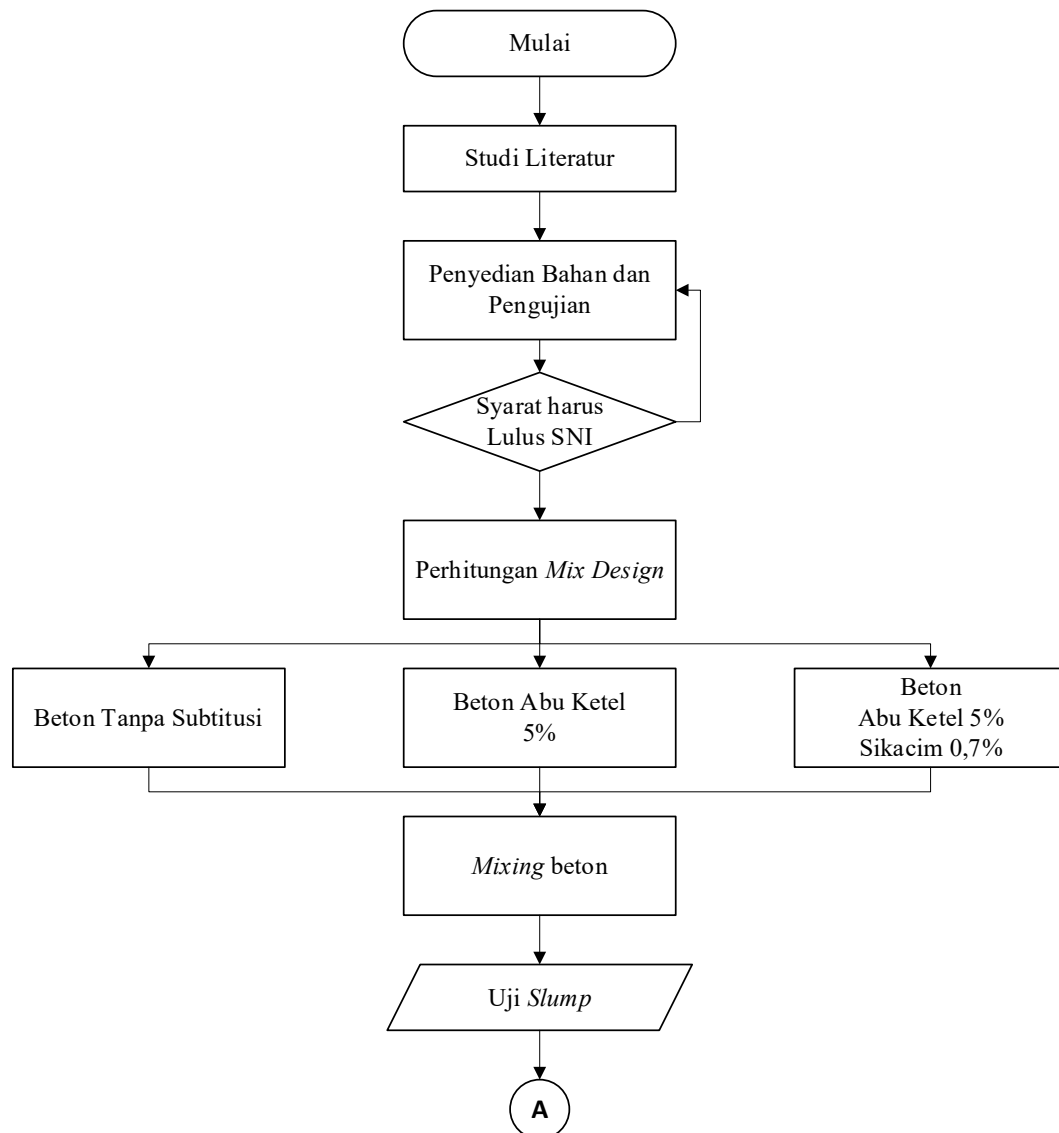
Setelah tahap literatur, dilakukan persiapan material. Seluruh material diuji terlebih dahulu mengacu pada standar SNI untuk memastikan kesesuaiannya, mencakup uji gradasi, berat jenis, kadar air dan lumpur, dan berat jenis. Hanya material yang memenuhi syarat yang digunakan dalam penelitian.

Langkah berikutnya adalah perhitungan rancangan campuran dilakukan untuk menetapkan proporsi komponen beton agar mencapai mutu sesuai dengan target perancangan., diikuti uji coba campuran guna memastikan hasil campuran memenuhi target kuat tekan. Setelah campuran optimal diperoleh, dilakukan uji *slump* untuk menilai *workability* beton segar.

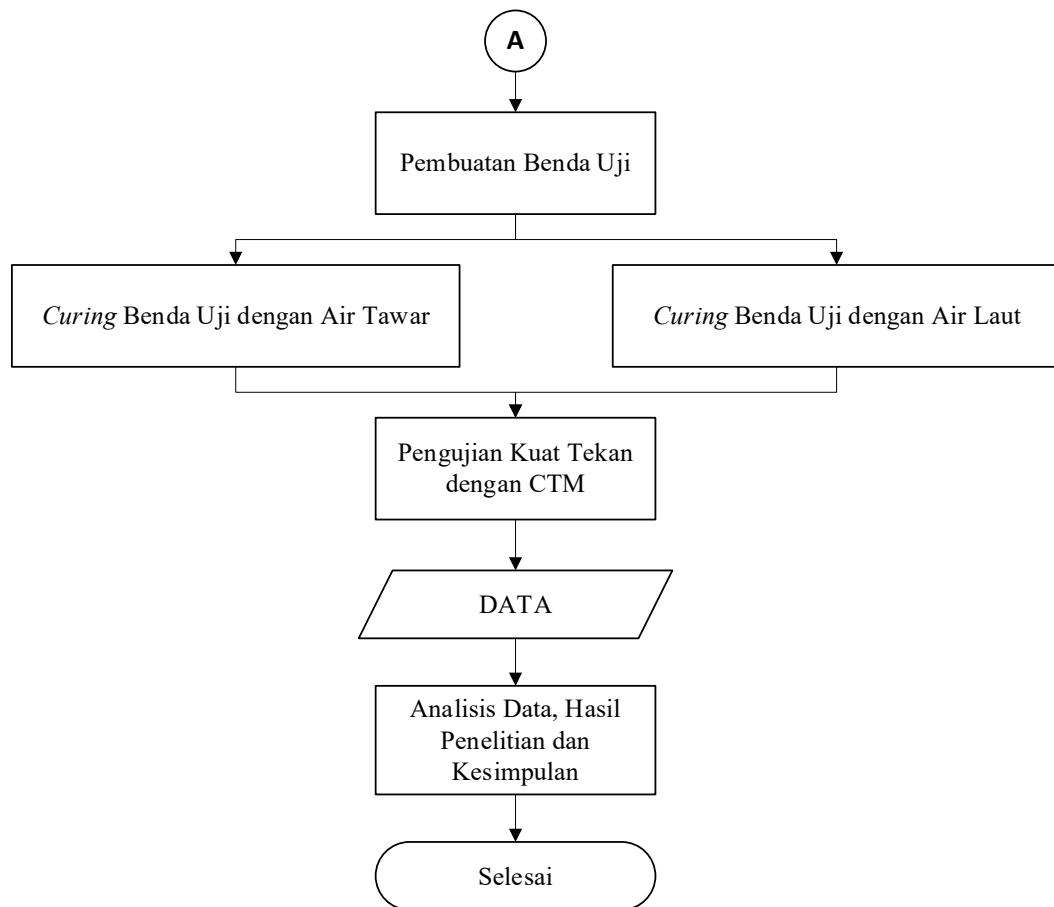
Selanjutnya, beton normal tanpa bahan tambahan yang sesuai dengan standar digunakan sebagai kontrol. Kemudian, bahan tambah berupa abu ketel sebesar 5% dan Sikacim sebesar 0,7% dari berat semen diintegrasikan ke dalam adonan beton. Beton dengan kombinasi bahan tambah ini menjadi fokus penelitian, di mana sampel dibuat dan diuji untuk menganalisis pengaruh substitusi abu ketel dan penambahan Sikacim pada performa kuat tekan beton setelah direndam dalam air laut.

Spesimen beton pasca proses pencetakan direndam dalam air tawar dan air laut untuk proses *curing* (perawatan beton). Proses *curing* dilakukan sesuai standar untuk menjaga kelembapan optimal selama proses hidrasi, yang penting dalam mencapai kekuatan tekan beton secara maksimal. Setelah tahap *curing* selesai, beton diuji menggunakan mesin tekan pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari guna memantau peningkatan kekuatan beton seiring pertambahan usia. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh *curing* air laut dan kombinasi bahan tambah, yaitu abu ketel 5% dan Sikacim 0,7%, terhadap laju peningkatan kekuatan beton dari waktu ke waktu. Khusus untuk beton dengan kombinasi bahan tambah, perhatian khusus diberikan pada hasil uji di umur 28 dan 56 hari untuk menilai efektivitas penggunaan bahan tersebut terhadap kekuatan tekan beton.

Data hasil pengujian diolah dan dianalisis secara komprehensif. Analisis mencakup perbandingan kuat tekan beton pada berbagai kondisi *curing* dan pengaruh bahan tambah terhadap beton dibandingkan dengan beton kontrol (tanpa bahan tambah). Hasil analisis ini, ditarik kesimpulan mengenai efektivitas abu ketel dan Sikacim terhadap kualitas beton, serta kontribusi kombinasi keduanya dalam meningkatkan kuat tekan beton.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.



Gambar 2. Diagram alir penelitian (Lanjutan).

3.2 Peralatan dan Bahan

3.2.1 Alat

Persiapan alat dan bahan menjadi langkah awal sebelum kegiatan penelitian dilaksanakan. Alat serta material yang digunakan dalam penelitian ini mencakup:

a. Oven

Peralatan oven digunakan untuk proses pengeringan material uji. Oven yang dipakai pada penelitian ini memiliki kemampuan pemanasan hingga 110°C dengan konsumsi daya sebesar 2800 Watt.

b. Satu Set Saringan

Satu set saringan dengan ukuran bertingkat, mulai dari 37,5 mm hingga 0,02 mm beserta pan, digunakan dalam penelitian ini untuk memisahkan agregat kasar dan halus sesuai gradasinya.

c. Timbangan

Alat ukur massa yang digunakan pada penelitian ini adalah timbangan digital elektronik dengan kapasitas 30 kg dan ketelitian hingga 0,1 gram.

d. Piknometer

Alat yang digunakan untuk menentukan berat jenis serta kadar organik agregat halus adalah piknometer. Pengukuran dilakukan dengan membandingkan berat sampel agregat dalam keadaan kering dan saat terendam air. Alat ini juga membantu mengidentifikasi adanya zat organik yang dapat menurunkan performa beton.

e. Gelas Ukur 1000 cc

Dalam penelitian ini digunakan gelas ukur 1000 cc sebagai alat pengukur volume air pada uji kadar lumpur serta penentuan berat jenis agregat halus. Penggunaan alat ini bertujuan menjaga ketepatan volume air selama proses pengujian.

f. Bejana Silinder

Bejana silinder berfungsi sebagai alat ukur densitas agregat, baik halus maupun kasar. Dalam pengujian, digunakan dua ukuran bejana, yaitu berkapasitas 5 liter untuk agregat halus dan 10 liter untuk agregat kasar.

g. *Concrete Mixer*

Alat pengaduk beton (*concrete mixer*) digunakan dalam penelitian ini untuk memastikan seluruh bahan tercampur secara merata. Perangkat ini memiliki kapasitas 0,125 m³ dan beroperasi pada kecepatan 20–30 rpm.

h. Satu Set Alat *Slump Test*

Dalam menguji tingkat *workability* atau *slump test* beton digunakan seperangkat kerucut logam dengan diameter atas 102 mm, diameter bawah 203 mm, tinggi 305 mm, serta pelat dasar berukuran 900×900 mm dan tebal 3 mm.

i. Meteran

Dalam pengujian *slump test* beton mutu tinggi, meteran digunakan untuk menentukan tinggi penurunan (*slump*) beton.

j. Cetakan Benda Uji

Dalam penelitian ini digunakan cetakan beton berbentuk kubus berukuran 15 cm untuk setiap sisinya. Alat ini berperan dalam membentuk benda uji beton agar sesuai dengan spesifikasi yang telah ditetapkan.

k. Bak Perendam

Bak perendam berfungsi sebagai media perawatan beton guna mempertahankan kelembapan dan mencegah hilangnya air secara berlebihan dari permukaan beton.

l. *Compression Testing Machine* (CTM)

Dalam penelitian ini digunakan *Compression Testing Machine* (CTM) dengan kapasitas beban maksimum 3000 kN, yang berfungsi untuk mengukur kekuatan tekan beton.

m. Alat Bantu

Peralatan yang digunakan berfungsi untuk menunjang serta memperlancar proses penelitian. Beberapa di antaranya meliputi *stamper*, kode warna, sekop, sendok semen, ember, kontainer, kereta dorong, *stopwatch*, wadah pengukur, dan alat tulis.

3.2.2 Bahan

a. Semen PCC

Portland Composite Cement (PCC) merek Tiga Roda menjadi bahan pengikat utama pada campuran beton penelitian ini. Semen

diperoleh dalam bentuk kemasan 40 kg yang masih tertutup rapat dari toko material.

b. Agregat Halus

Pasir yang digunakan sebagai agregat halus berasal dari Gunung Sugih, Lampung Tengah. Pengujian dilakukan sesuai standar SNI, meliputi pemeriksaan kadar air, berat jenis, penyerapan, kadar lumpur, gradasi, dan kandungan zat organik.

c. Agregat Kasar

Penelitian ini menggunakan agregat kasar yang diambil dari Tanjungan, Lampung Selatan, dengan ukuran maksimum 19 mm. Serangkaian pengujian dilakukan berdasarkan standar SNI, mencakup uji kadar air, gradasi, berat jenis, penyerapan, dan berat volume agregat kasar.

d. Sikacim

Sikacim Concrete Additive dicampurkan bersama komponen penyusun beton lainnya dengan kadar 0,7% dari berat semen sebagai bahan aditif pada penelitian ini.

e. Abu Ketel

Dalam penelitian ini, abu ketel berperan sebagai bahan substitusi semen dengan proporsi sebesar 5% dari berat semen dalam campuran beton.

3.3 Pembuatan Benda Uji

Setelah campuran direncanakan dengan baik, tahap selanjutnya adalah membuat benda uji. Untuk pengujian kuat tekan beton, digunakan benda uji berbentuk kubus dengan ukuran $15 \times 15 \times 15$ cm. Terdapat tiga kategori benda uji: pertama, benda uji tanpa penambahan material tambahan; kedua, benda uji dengan satu material tambahan, yaitu abu ketel, yang akan diuji pada usia 3, 7, 14, 28, dan 56 hari; dan ketiga, benda uji dengan kombinasi kedua material tambahan yang akan diuji pada usia 3, 7, 14, 28 dan 56 hari. Jumlah benda uji yang digunakan dapat dilihat pada Tabel

Tabel 6. Variabel dan Kode Benda Uji

No	Kode		Jumlah
	Benda	Variasi Komposisi	Sampel
	Uji		
1	BN	Semen 100% + Abu Ketel 0% + Sikacim 0%	15
2	BAK	Semen 95% + Abu Ketel 5% + Sikacim 0%	15
3	BAKS T	Semen 95% + Abu Ketel 5% + Sikacim 0,7%	15
4	BAKS L	Semen 95% + Abu Ketel 5% + Sikacim 0,7%	15
Total Sampel			60

Keterangan:

- BN = Beton Normal
- BAK = Beton dengan substitusi abu ketel 5% dari berat semen
- BAKS T = Beton dengan substitusi abu ketel 5% dan penambahan Sikacim 0,7% dari berat semen serta *curing* di air tawar
- BAKS L = Beton dengan substitusi abu ketel 5% dan penambahan Sikacim 0,7% dari berat semen serta *curing* di air laut

Tahapan pembuatan sampel benda uji dilakukan sebagai berikut:

1. Tahap awal pengecoran dilakukan dengan memasukkan agregat kasar dan agregat halus ke dalam *concrete mixer*, lalu diaduk hingga kedua agregat tercampur secara merata.
2. Setelah agregat halus dan kasar tercampur dengan baik, langkah berikutnya adalah menambahkan semen untuk kategori 1; semen, abu ketel untuk kategori 2; atau semen, abu ketel, dan Sikacim untuk kategori 3.
3. Setelah semua bahan, termasuk agregat halus, agregat kasar, semen, dan campuran dari masing-masing kategori, tercampur merata, air ditambahkan secara bertahap.
4. Setelah seluruh campuran masuk ke dalam *concrete mixer* dan tercampur merata, campuran beton dituangkan ke dalam cetakan (*mold*) benda uji sambil dilakukan proses penghilangan rongga udara menggunakan vibrator. Sebagian campuran beton juga dimasukkan ke dalam kerucut abrams untuk dilakukan pengujian *slump test*.



Gambar 3. Pembuatan Sampel Beton

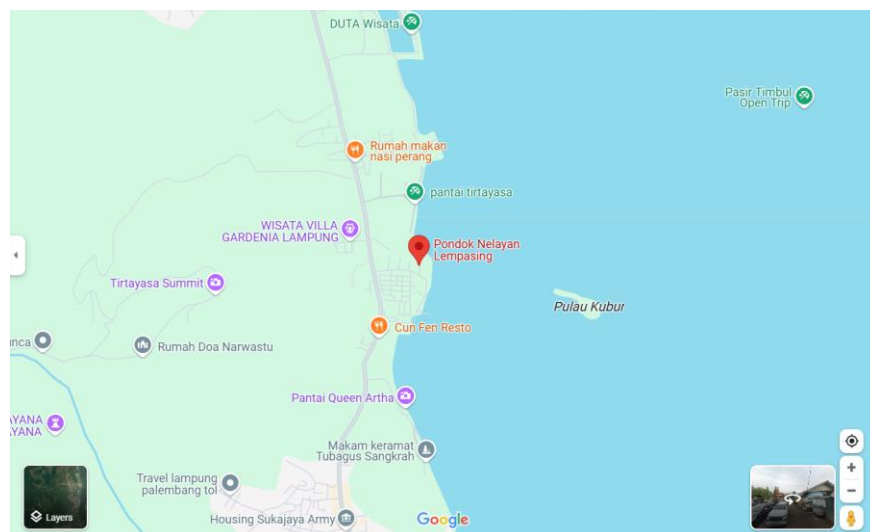
3.4 Pengujian *Workability* Beton Segar

Pengujian *slump test* dilakukan terlebih dahulu terhadap beton segar sebelum dimasukkan ke dalam cetakan, guna menilai tingkat *workability*-nya. Menurut SNI 03-1972-1990, pelaksanaan uji *slump* dilakukan secara bertahap sesuai prosedur berikut:

1. Kerucut Abrams dibersihkan terlebih dahulu, baik pada bagian dalam maupun luar, menggunakan air bersih.
2. Pelat baja berukuran 900×900 mm digunakan sebagai alas tempat meletakkan kerucut Abrams yang telah dibersihkan.
3. Saat pengisian beton segar, kerucut Abrams dijaga posisinya dengan memegang bagian kaki alat agar tidak bergeser.
4. Pengisian beton segar dilakukan hingga sepertiga tinggi kerucut dan setiap lapisan dipadatkan dengan 25 tusukan menggunakan tongkat penumbuk.
5. Setiap penambahan sepertiga tinggi adukan beton dalam kerucut Abrams diikuti dengan proses pemadatan yang sama seperti sebelumnya.
6. Gunakan sendok semen untuk meratakan permukaan beton pada bagian atas kerucut hingga setara dengan tepi alat.
7. Angkat kerucut abrams ke atas secara vertikal.
8. Ukur selisih tinggi antara beton yang turun dengan tinggi awal kerucut abrams untuk mendapatkan nilai *slump*.

3.5 Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Setelah didiamkan selama 24 jam, benda uji dikeluarkan dari cetakan dan direndam dalam dua jenis media, yaitu air laut dan air tawar, selama 1, 5, 12, 26, dan 54 hari. Satu hari sebelum pengujian, benda uji diangkat dari media perendaman untuk mengurangi kelebihan air bebas pada permukaan dan pori-pori beton. Perendaman dilakukan untuk menjaga proses hidrasi agar beton mengeras dengan optimal tanpa mengalami keretakan, sekaligus memastikan kualitas beton sesuai spesifikasi yang direncanakan. Curing air tawar dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, sedangkan curing air laut dilakukan di Pondok Nelayan Lempasing, Desa Sukamaju, Kecamatan Telukbetung Timur, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung.



Gambar 4. Lokasi *Curing* Air Laut pada *Google Maps*



Gambar 5. Perendaman Sampel pada Air Laut

3.6 Pengujian Benda Uji Menggunakan CTM

Pengujian kuat tekan terhadap beton dilakukan setelah proses *curing*. Menurut SNI 03-1974-1990, kuat tekan menunjukkan kemampuan beton menahan beban tekan sampai titik keruntuhan. Pada penelitian ini digunakan *Compression Testing Machine* (CTM) berkapasitas 3000 kN dengan laju pembebanan 0,14–0,34 MPa/detik. Nilai kuat tekan dihitung melalui rumus berikut:

$$f'_c = P/A$$

Keterangan:

f'_c = Kuat tekan beton (Mpa)

P = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

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

3.7 Perhitungan dan Analisa Data

Setelah pengujian pada sampel beton dilakukan, berikut langkah perhitungan dan analisis data:

1. Menghitung kuat tekan beton kubus pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari untuk beton normal serta beton dengan substitusi abu ketel dan

penambahan Sikacim, guna mengetahui pengaruh kombinasi bahan tersebut serta perbedaan media curing (air tawar dan air laut) terhadap peningkatan kuat tekan beton.

2. Membuat grafik perbandingan laju peningkatan kuat tekan pada umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari antara beton normal dan beton dengan variasi abu ketel dan/atau Sikacim serta perbedaan media curing (air tawar dan air laut), kemudian menganalisis data.
3. Menyusun diagram batang perbandingan kuat tekan beton umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari antara beton normal dan beton dengan substitusi abu ketel dan/atau penambahan Sikacim serta perbedaan media curing (air tawar dan air laut), lalu melakukan analisis.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Hasil penelitian dan analisis data yang telah diperoleh menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan sebagai berikut:

1. Substitusi abu ketel sebagai pengganti sebagian semen sebesar 5% dan penambahan Sikacim sebesar 0,7% terbukti mampu meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan dengan beton normal. Pada umur 28 hari, kuat tekan beton BAKS mencapai 31,99 MPa, yaitu sekitar 7,28% lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal (29,82 MPa). Pada umur 56 hari, peningkatan tersebut semakin jelas, di mana BAKS mencapai 34,71 MPa, yaitu 11,38% lebih tinggi dibandingkan BN (31,16 MPa). Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan kuat tekan, khususnya pada umur lanjut.
2. Beton dengan perendaman air tawar (BAKS T) memperlihatkan peningkatan kuat tekan dari 31,99 MPa pada umur 28 hari menjadi 34,71 MPa pada umur 56 hari, dengan persentase kenaikan sebesar 8,51%. Sementara itu, beton dengan perendaman air laut (BAKS L) hanya meningkat dari 31,39 MPa menjadi 32,44 MPa pada periode yang sama, atau sekitar 3,35%. Perbandingan pada umur 56 hari menunjukkan bahwa BAKS L memiliki kuat tekan lebih rendah 6,55% dibandingkan BAKS T. Hal ini disebabkan oleh adanya ion agresif dalam air laut seperti klorida (Cl^-) dan sulfat (SO_4^{2-}) yang dapat mengganggu proses hidrasi dan memperbesar porositas beton.
3. Seluruh variasi beton mengalami peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur pengujian. Beton normal (BN) meningkat dari 29,82

MPa pada umur 28 hari menjadi 31,16 MPa pada umur 56 hari (naik 4,47%), sedangkan beton dengan substitusi abu ketel tanpa Sikacim (BAK) meningkat dari 30,56 MPa menjadi 32,12 MPa (naik 5,11%). Namun, laju peningkatan paling signifikan terjadi pada variasi BAKS T dengan kenaikan 8,51%, jauh lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim dengan curing air tawar mampu memberikan sinergi positif dalam memperkuat beton, terutama pada umur lanjut.

5.2 Saran

Penelitian ini masih memiliki ruang untuk pengembangan, sehingga disarankan dilakukan penelitian lanjutan guna memperdalam serta menyempurnakan hasil yang telah diperoleh. Beberapa saran dari penulis disajikan sebagai berikut:

1. Untuk aplikasi di lingkungan laut, penelitian menunjukkan adanya penurunan kinerja akibat ion agresif. Oleh karena itu, disarankan penelitian lanjutan dengan menambahkan bahan aditif lain yang bersifat waterproofing atau pelindung, serta menguji variasi kadar abu ketel dan Sikacim yang berbeda untuk menemukan komposisi yang lebih optimal.
2. Penelitian ini terbatas pada umur beton hingga 56 hari. Untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai perkembangan kuat tekan dan reaksi pozzolanik abu ketel, disarankan dilakukan penelitian lanjutan dengan pengujian hingga umur 90 hari atau lebih.
3. Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan menambah parameter uji lain seperti kuat tarik belah, modulus elastisitas, porositas, serta ketahanan terhadap penetrasi ion klorida. Selain itu, perlu dikaji juga beton bertulang yang menggunakan abu ketel dan Sikacim pada kondisi perendaman air laut untuk menilai pengaruh bahan tambahan tersebut terhadap korosi tulangan dan durabilitas struktur secara keseluruhan.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI 116R. (2000). *Cement and Concrete Terminology*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute
- ACI 211.1. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute
- ACI 318-19. (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute
- American Coal Ash Association. (2003). *Fly Ash Facts for Highway Engineers*. Washington, DC: Federal Highway Administration
- ASTM C33M. (2018). *Standard specification for concrete aggregates*. Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C125. (2015). *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C494/C494M. (2020). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. Association of Standard Testing Materials.
- ASTM C1602/C1602M-22. (2022). *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. Association of Standard Testing Materials.
- Bediako, M., & Ametefe, T. (2024). *Effect of sulphonated naphthalene formaldehyde superplasticizer on the mechanical and durability properties of concrete produced using locally sourced fine aggregate from Ghana*.
- BS 882. (1992). *Aggregates from natural sources for concrete*. British Standards Institution.
- Capacchione, C., Picariello, D., Della Sala, P., Talotta, C., Neri, P., Bruno, I., Pauciulo, A., Bartiromo, A. R., Gliubizzi, R., & Gaeta, C. (2020). *Dispersing and Retarding Properties of Water-Soluble Tetrasulfonate Resorcin [4]arene and Pyrogallol [4]arene Macrocycles in Cement-Based Mortar*. ACS Omega, 5(29), 18218–18225.

- Duxbury, A.C., Byrne, R.H., Mackenzie, F.T. (2025, September 15). *seawater*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/seawater>
- Golewski, G. L. (2022). *The Role of Pozzolan Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites*. *Sustainable Chemistry*, 3(4), 520–534. <https://doi.org/10.3390/suschem3040032>
- He, J., Sun, C., & Wang, X. (2024). *Study on the Effect of Fly Ash on Mechanical Properties and Seawater Freeze–Thaw Resistance of Seawater Sea Sand Concrete*. *Buildings*, 14(7), 2191. <https://doi.org/10.3390/buildings14072191>
- Helmi, M., Alami, F., Isneini, M., Mayang Sari, R., & Zikrillah, M. D. (2024). *Effect of Sea Water, Coastal Sand, and Clam Shell Powder on Compressive Strength of Normal Concrete*. *Jurnal Teknologi*, 86(3), 205–213. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v86.21484>
- Herwani, H., Imran, I., Budiono, B., Pane, I., Zulkifli, E., & Elvira, E. (2018). *Efektivitas Superplasticizer Terhadap Workabilitas Dan Kuat Tekan Beton Geopolimer*. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), 12–18.
- Hidayatullah, H., Irianti, L., Helmi, M., & Widyawati, R. (2024). *Pengaruh Abu Ketel sebagai Bahan Penambah Campuran Beton Normal terhadap Kuat Tekan*. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain*, 12(1), 13–26.
- Ilham, H. (2024). *Pengaruh Abu Ketel dan Silica Fume sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Dalam Campuran Beton Normal Terhadap Kuat Tekan*. Universitas Lampung.
- Irianti, L., Freddi, & Virmasyah. (1998). *Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi*.
- Irianti, L., Helmi, M., Widyawati, R., Abdullah, H. I., & Hidayatullah, H. (2025). *Pemanfaatan Limbah Industri Berupa Abu Ketel dan Silica Fume Untuk Peningkatan Kuat Tekan Beton*. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 253–264. <https://doi.org/10.29103/tj.v15i2.1247>
- ISO 3893. (1997). *Concrete—Classification by compressive strength—Designations*.
- Jamal, M., Widiastuti, M., & Anugrah, A. T. (2018). *Pengaruh penggunaan SikaCim Concrete Additive terhadap kuat tekan beton dengan menggunakan agregat kasar bengalon dan agregat halus pasir Mahakam*. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi, Inovasi dan Aplikasi di Lingkungan Tropis*, 1(1), 28–36.

- Lasino, L., Rachman, D., & Sugiharto, B. (2012). *Kajian Penggunaan Semen Portland Komposit untuk Beton*. Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik, 2, 41. <https://doi.org/10.37209/jtbtt.v2i2.22>
- Mackenzie, F. T., Byrne, R. H., & Duxbury, A. C. (2025, September 3). *Seawater*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/seawater>
- Monteiro, P., & Mehta, P. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. McGraw-Hill.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi beton*. Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Nath, P., & Sarker, P. (2011). *Effect of Fly Ash on the Durability Properties of High Strength Concrete*. Procedia Engineering, 14, 1149–1156. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.144>
- Neville, A. (2012). *Properties of Concrete, Fifth Edition*. Prentice Hall.
- Neville, A. M., & Brooks, J. J. (2010). *Concrete Technology*. Prentice Hall. <https://books.google.co.id/books?id=iVr8QQAACAAJ>
- Panennungi, P., & Pertiwi, N. (2018). *Ilmu Bahan Bangunan*. Badan Penerbit Universitas Negeri Makassar.
- Permatasari, S. (2021). *Analisis Perbandingan Komposisi Campuran Beton Mutu K-300 antara Beton Tanpa Additive dan Beton Menggunakan Additive Tipe C Merk Sikacim Concrete Additive dengan Agregat Kasar Desa Sungai Dua Kabupaten Tanah Bumbu dan Agregat Halus Desa Sungup Kabupaten Kota Baru Kalimantan Selatan*. TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil, 11(1), 13–19.
- Primandari, S. R. P. & Rahmat, B. (2012). *Pengaruh konversi minyak sawit menjadi biodiesel dengan katalis abu limbah boiler*. Asian Journal of Control, 14(6), 1771–1771. <https://doi.org/10.1002/asjc.637>.
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry*. Cement and Concrete Research, 114, 2–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Sika Indonesia. (2022). *Lembar data teknis SikaCim® Concrete Additive*.
- SNI 03 1972 (1990) *Tata cara pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03 1974 (1990) *Tata cara pengujian slump beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- SNI 15 2049 (2004) *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03 1750. (1990). *Mutu dan cara uji agregat beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03 2417. (2008). *Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03 2834. (2000). *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 15 7064. (2004). *Semen Portland Komposit*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 0302. (2004). *Semen portland pozolan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1969. (2008). *Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2049. (2015). *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2417. (2008). *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2461. (2014). *Spesifikasi agregat ringan untuk beton struktural*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 7656. (2012). *SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal Beton*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford Publishing. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>
- Wang, X., Shi, C., He, F., Yuan, Q., Wang, D., HUANG, Y., & Qingling, L. (2013). *Chloride Binding and Its Effects on Microstructure of Cement-based Materials*. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 41. <https://doi.org/10.7521/j.issn.0454-5648.2013.02.11>
- Wariyatno, N. G., & Haryanto, Y. (2013). *Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Sebagai Nilai Estimasi Kekuatan Sisa Pada Beton Serat Kasa Aluminium akibat Variasi Suhu*. *Dinamika Rekayasa*, 9(1), 21–28. <https://doi.org/10.20884/1.dr.2013.9.1.98>
- 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.

Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2001). *CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY*. Annual Review of Environment and Resources, 26(Volume 26, 2001), 303–329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>