

SKRIPSI

KUAT TEKAN, UPV, *RESISTIVITY*, DAN *EMBODIED CARBON MORTAR* YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT, DAN *SILICA FUME*

COMPRESSIVE STRENGTH, UPV, RESISTIVITY, AND EMBODIED CARBON MORTAR CONTAINING MIXED CEMENT, SEAWATER, AND SILICA FUME

Disusun dan diajukan oleh:

**PUTRI WULAN SUCI
D011 20 1080**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI

KUAT TEKAN, UPV, *RESISTIVITY*, DAN *EMBODIED CARBON MORTAR* YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT, DAN *SILICA FUME*

COMPRESSIVE STRENGTH, UPV, RESISTIVITY, AND EMBODIED CARBON MORTAR CONTAINING MIXED CEMENT, SEAWATER, AND SILICA FUME

Disusun dan diajukan oleh:

**PUTRI WULAN SUCI
D011 20 1080**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

KUAT TEKAN, UPV, *RESISTIVITY* DAN *EMBODIED CARBON* MORTAR YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT, DAN *SILICA FUME*

Disusun dan diajukan oleh

**PUTRI WULAN SUCI
D011 20 1080**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 12 Februari 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr.Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST, M.Eng
NIP: 198604092019043001

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng
NIP: 196805292002121002

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Putri Wulan Suci

NIM : D011 20 1080

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**{KUAT TEKAN, UPV, RESISTIVITY, DAN EMBODIED CARBON
MORTAR YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT,
DAN SILICA FUME}**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, Januari 2024

Yang Menyatakan,


Putri Wulan Suci

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**KUAT TEKAN, UPV, RESISTIVITY, DAN EMBODIED CARBON MORTAR YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT, DAN SILICA FUME**”, sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Fakultas Teknik Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bimbingan, dorongan dan bantuan baik materi maupun non materi dari berbagai pihak, sehingga penelitian yang telah direncanakan dapat terealisasi dengan baik dan dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Oleh karena itu, perkenankanlah penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada:

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng.**, dan **Dr. Eng. Bambang Bakri, S.T., M.T.**, selaku ketua dan sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, ST., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng.**, selaku dosen pembimbing II, yang telah banyak meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan kepada saya.
5. **Bapak Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.**, dan **Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng.**, selaku Kepala dan Sekretaris Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.

6. **Ibu Prof. Dr. Eng. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT., dan Bapak Dr. Ir. Miswar Tumpu, ST., MT.** selaku dosen penguji I dan penguji II yang telah memberikan arahan dan masukan serta sangat membantu dalam penulisan dan perbaikan tugas akhir ini.
7. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
8. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf dan asisten Laboratorium Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu **ibunda Dahlia Haya dan ayahanda E. Sutrisna S.H.** atas doa, kasih sayang, pengorbanan dan segala dukungan baik spritiual maupun material yang telah diberikan selama ini.
2. **Tante Mulyati dan Om Yusuf** yang selalu mendoakan, memberikan kasih sayang dan segala dukungan yang telah diberikan selama ini. Serta seluruh keluarga besar atas sumbangsih dan dorongan yang telah diberikan.
3. Teman-teman seperjuangan yang selalu menemani, menyemangati, dan juga selalu menghibur penulis. Terimakasih kepada **Nurul Annisa Rahmawan, Dhafiyah Salsabila Khansa, dan Aswar Basri** (sobattolmnp).
4. Teman-teman seperjuangan yang ada di **adu nazib dan Prefty Aryand Sukma** yang juga senantiasa menemani dan telah memberikan dukungan sedari masa mahasiswa baru.
5. Teman-teman seperjuangan di **Laboratorium Riset Eco Material** Gloria, Dayat, Rahmi, Diki, Awi, Mita, Fadhil, Jabal, Yazid, Dhyland, dan Raihan yang senantiasa memberikan semangat, membantu dan memberi masukan selama proses penelitian.
6. Kelompok 5 PBST A khususnya **Aswar dan Alif Gamayo Putrasela** yang selalu kebersamai dari asistensi, pengerjaan tugas besar dan sampai akhirnya tugas dapat dikumpul.
7. Teman-teman **ENTITAS 2021** yang senantiasa memberikan dukungan yang tiada henti, semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

8. Dan yang terakhir, kepada perempuan sederhana namun terkadang sangat sulit dimengerti isi kepalanya, sang penulis sebuah karya tulis ini, diri saya sendiri, **Putri Wulan Suci**. Seorang perempuan yang berumur 22 tahun saat menciptakan karya tulis ini namun terkadang sifatnya seperti anak kecil pada umumnya. Terima kasih telah hadir di dunia walaupun mungkin tidak sedikit yang tidak ikut serta merayakan hadirmu di dunia namun selalu bersyukur karena banyak pula manusia yang dengan bahagia merayakan kehadiranmu di dunia. Terima kasih sudah bertahan sejauh ini melewati banyaknya rintangan hidup yang tidak tertebak adanya. Terima kasih tetap memilih hidup dan merayakan dirimu sendiri sampai di titik ini, walaupun seringkali merasa putus asa atas apa yang diusahakan dan belum berhasil namun terima kasih tetap menjadi manusia yang selalu mau berusaha dan tidak lelah mencoba. Berbahagialah selalu dimanapun berada, Puput. Rayakan selalu kehadiranmu di dunia semua hal yang membuatmu hidup. Pastikan jiwamu selalu menjadi bagian dari hal baik di alam semesta, semoga engkau lahir berkali-kali.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhir kata semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, Januari 2024

Penulis

ABSTRAK

PUTRI WULAN SUCL. *KUAT TEKAN, UPV, RESISTIVITY, DAN EMBODIED CARBON MORTAR YANG MENGANDUNG SEMEN CAMPURAN, AIR LAUT, DAN SILICA FUME* (dibimbing oleh Muhammad Akbar Caronge dan M. Wihardi Tjaronge)

Penggunaan bahan bangunan yang ramah lingkungan dan berkinerja tinggi menjadi fokus penelitian dalam industri konstruksi modern. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi sifat mekanis dan lingkungan dari mortar yang mengandung semen campuran, air laut, dan *silica fume*. Campuran tersebut dirancang untuk meningkatkan ketahanan tekan (kuat tekan), kecepatan gelombang ultrasonik (UPV), dan resistivitas, sambil meminimalkan dampak lingkungan melalui penggunaan bahan alternatif. Penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 5 x 5 x 5 cm sebanyak 45 buah. Terdapat lima variasi campuran, variasi pertama mortar normal dibuat dengan menggunakan air tawar, untuk variasi kedua dibuat dengan menggunakan air laut sebagai air pencampur, dan variasi ketiga, keempat, dan kelima mortar diproduksi dengan menggunakan air laut dan mengganti 5%, 7%, dan 10% semen campuran dengan *silica fume* dengan menggunakan perbandingan berat semen. Pada penelitian ini parameter yang diperiksa: kuat tekan, UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*), *resistivity*, *embodied carbon*, index antara *embodied carbon* dengan kuat tekan, index antara *embodied carbon* dengan UPV, dan index antara *embodied carbon* dengan *resistivity*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan air laut dan penambahan *silica fume* sebagai pengganti semen secara signifikan meningkatkan kuat tekan, UPV, dan *resistivity* daripada mortar normal. Analisis *embodied carbon* mortar menunjukkan bahwa penggunaan bahan alternatif dapat mengurangi jejak karbon konstruksi. Penelitian ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang sifat-sifat mortar yang mengandung campuran semen, air laut, dan *silica fume*.

Kata Kunci: *Silica Fume*, Air Laut, Semen Campuran, Kuat Tekan, *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), *Resistivity*, Dan *Embodied Carbon*

ABSTRACT

PUTRI WULAN SUCI. COMPRESSIVE STRENGTH, UPV, RESISTIVITY, AND EMBODIED CARBON MORTAR CONTAINING MIXED CEMENT, SEAWATER, AND SILICA FUME (supervised by Muhammad Akbar Caronge and M. Wihardi Tjaronge)

The use of environmentally friendly and high-performance building materials is the focus of research in the modern construction industry. This study aims to investigate the mechanical and environmental properties of mortars containing mixed cement, seawater, and silica fume. The mixture is designed to improve compressive resistance (compressive strength), ultrasonic wave velocity (UPV), and resistivity while minimizing environmental impact through the use of alternative materials. This study used cube-shaped test objects with a size of 5 x 5 x 5 cm as many as 45 pieces. There are five variations of the mixture, the first variation of normal mortar is made using fresh water, the second variation is made using seawater as mixing water, and the third, fourth, and fifth variations of mortar are produced using seawater and replace 5%, 7%, and 10% of mixed cement with silica fume using a ratio of cement weight. This study examined the parameters: compressive strength, UPV (Ultrasonic Pulse Velocity), resistivity, embodied carbon, index between embodied carbon and compressive strength, index between embodied carbon and UPV, and index between embodied carbon and resistivity. The results showed that the use of seawater and the addition of silica fume instead of cement significantly increased compressive strength, UPV, and resistivity than normal mortar. Analysis of embodied carbon mortar shows that using alternative materials can reduce the carbon footprint of construction. This research provides a deep understanding of the properties of mortar containing a mixture of cement, seawater, and silica fume.

Keywords: Silica Fume, Seawater, Mixed Cement, Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), Resistivity, and Embodied Carbon

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	xvi
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Teori Dan Aplikasi Mortar.....	10
2.2.1 Tipe mortar.....	11
2.2.2 Sifat-sifat mortar.....	14
2.3 Material Penyusun Mortar.....	16

2.3.1 Semen campuran	16
2.3.2 <i>Silica fume</i>	19
2.3.3 Air laut	22
2.3.4 Agregat halus.....	24
2.4 Pengujian Kuat Tekan.....	25
2.5 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	26
2.6 Pengujian <i>Resistivity</i>	28
2.7 <i>Embodied Carbon</i> (emisi CO ₂).....	29
2.8 Analisa Gabungan Setiap Parameter.....	30
BAB III. METODE PENELITIAN	32
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	32
3.2 Variabel Penelitian.....	32
3.3 Bahan Uji dan Alat Penelitian	32
3.4 Teknik Pengumpulan Data	34
3.4.1 Pemeriksaan karakteristik material	34
3.4.1.1 Semen campuran	34
3.4.1.2 <i>Silica fume</i>	35
3.4.1.3 Air laut	35
3.4.1.4 Agregat halus.....	36
3.4.2 Rancangan campuran mortar (<i>mix design</i>).....	37
3.4.3 Pembuatan benda uji	37
3.4.4 Perawatan (curing) benda uji.....	40
3.4.5 Pengujian kuat tekan	41
3.4.6 Pengujian <i>ultrasonic pulse velocity</i> (UPV).....	42
3.4.7 Pengujian <i>resistivity</i>	43
3.4.8 <i>Embodied carbon</i> (emisi CO ₂).....	44

3.5 Teknik Analisis.....	44
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Karakteristik Material.....	46
4.1.1 Karakteristik <i>silica fume</i>	46
4.1.2 Karakteristik air laut.....	46
4.1.3 Karakteristik agregat halus	47
4.2 Rancangan Campuran Mortar (<i>Mix Design</i>).....	47
4.3 Pengujian Kuat Tekan.....	48
4.4 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	51
4.5 Pengujian <i>Resistivity</i>	53
4.6 <i>Embodied Carbon</i> (emisi CO ₂).....	55
4.6.1 Index antara <i>embodied carbon</i> dengan kuat tekan	56
4.6.2 Index antara <i>embodied carbon</i> dengan UPV	58
4.6.3 Index antara <i>embodied carbon</i> dengan <i>resistivity</i>	60
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persyaratan spesifikasi proporsi mortar	13
Tabel 2. Persyaratan spesifikasi properti mortar	16
Tabel 3. Persyaratan fisik semen portland komposit	18
Tabel 4. Properti fisik tipikal dari <i>silica fume</i>	19
Tabel 5. Persyaratan spesifikasi kimia dan fisik untuk <i>silica fume</i>	21
Tabel 6. Komponen utama dalam air laut.....	24
Tabel 7. faktor emisi CO ₂	30
Tabel 8. Properti dari PCC.....	35
Tabel 9. komposisi <i>silica fume</i>	35
Tabel 10. Komposisi kimia air laut alami.....	36
Tabel 11. Metode dan standar pengujian karakteristik fisik agregat halus	36
Tabel 12. Rancangan campuran mortar dan jumlah benda uji	37
Tabel 13. Data-data kandungan karbon.....	44
Tabel 14. komposisi <i>silica fume</i> dari pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)	46
Tabel 15. Komposisi kimia air laut alami.....	47
Tabel 16. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus.	47
Tabel 17. Rancangan campuran mortar dalam 1m ³	48
Tabel 18. Nilai kuat tekan pada umur 7, 28 dan 90 hari	48
Tabel 19. Nilai <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV) pada umur 7, 28 dan 90 hari	51
Tabel 20. Nilai resistivitas mortar pada umur 7, 28 dan 90 hari	53
Tabel 21. Data <i>embodied carbon</i>	55
Tabel 22. Hasil perbandingan antara GHG terhadap KT	56
Tabel 23. Hasil perbandingan antara GHG terhadap UPV	58

Tabel 24. Data perbandingan antara GHG dengan R	60
---	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Fotomikrograf SEM menunjukkan partikel <i>silica fume</i>	20
Gambar 2. Skematik pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	27
Gambar 3. Pengukuran resistivitas pada bata	29
Gambar 4. Alat yang digunakan	33
Gambar 5. Bahan campuran mortar	34
Gambar 6. Lokasi pengambilan air laut.....	36
Gambar 7. Menimbang material	37
Gambar 8. Pencampuran material.....	38
Gambar 9. Pengukuran slump flow	39
Gambar 10. Mencetak mortar	39
Gambar 11. Memadatkan mortar	39
Gambar 12. Mendinginkan mortar selama ± 24 jam	40
Gambar 13. Mengeluarkan mortar dari cetakan	40
Gambar 14. Proses curing benda uji	41
Gambar 15. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM)	42
Gambar 16. Pengujian kuat tekan	42
Gambar 17. Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	43
Gambar 18. Pengujian <i>resistivity</i>	44
Gambar 19. Grafik nilai kuat tekan pada umur 7, 28 dan 90 hari	50
Gambar 20. Grafik nilai UPV pada umur 7, 28 dan 90 hari	52
Gambar 21. Grafik nilai resistivitas mortar pada umur 7, 28 dan 90 hari	54
Gambar 22. Grafik nilai <i>embodied carbon</i>	55
Gambar 23. Index antara <i>embodied carbon</i> terhadap kuat tekan	57

Gambar 24. Index antara <i>embodied carbon</i> terhadap UPV.....	59
Gambar 25. Index antara <i>embodied carbon</i> terhadap resistivitas.....	61

LAMPIRAN

Lampiran 1. Logbook Pembuatan Benda Uji	67
Lampiran 2. Logbook Pembongkaran Benda Uji	72
Lampiran 3. Pengujian Kuat Tekan 7 Hari	74
Lampiran 4. Pengujian UPV 7 Hari	81
Lampiran 5. Pengujian <i>Resistivity</i> 7 Hari	82
Lampiran 6. Pengujian Kuat Tekan 28 Hari	83
Lampiran 7. Pengujian UPV 28 Hari	90
Lampiran 8. Pengujian <i>Resistivity</i> 28 Hari	91
Lampiran 9. Pengujian Kuat Tekan 90 Hari	92
Lampiran 10. Pengujian UPV 90 Hari	99
Lampiran 11. Pengujian <i>Resistivity</i> 90 Hari	100

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
CO_{2_i}	Faktor emisi untuk material (kg.CO ₂ /kg)
CO_{2eq}	Embodied carbon CO ₂ (kg.CO ₂ /m ³)
W_i	Berat material (kg/m ³)
A	Luas penampang melintang benda uji (mm ²)
cm	Sentimeter
CO ₂	Karbon dioksida
f ^c	Kuat tekan mortar (MPa)
GHG	Embodied Greenhouse Gas (efek rumah kaca) (kg.CO ₂ /m ³)
gr	Gram
HRWRA	High-Range Water Reducing Admixture
kg	Kilogram
KT	Kuat tekan (N/mm ²)
L	Jarak antara pusat permukaan transduser (m)
L	Panjang kawat melintang bata (m)
m	Meter
mm	Milimeter
N	Newton
NW	Mortar normal
P	Gaya tekan aksial (N)
PCC	Portland Composite Cement
PCM	Portland Cement Mortar
R	Resistansi (Ω)
RGKT	Rasio antara GHG dengan KT (kg.CO ₂ /Kn.m)

RGR	Rasio antara GHG dengan R ($\text{kg.CO}_2/\Omega\text{m}^4$)
RGUPV	Rasio antara GHG dengan UPV ($\text{kg.CO}_2.\text{s}/\text{m}^4$)
s	Sekon/detik
SF	Silica Fume
SNI	Standar Nasional Indonesia
SSD	Kering permukaan
SW	Mortar air laut
SW-5SF	Mortar air laut + 5% SF
SW-7SF	Mortar air laut + 7% SF
SW-10SF	Mortar air laut + 10% SF
T	Waktu tempuh (s)
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity (m/s)
UTM	Universal Testing Machine
V	Kecepatan rambat gelombang (m/s)
ρ	Resistivitas (Ωm)
Ω	Ohm
Ωm	Ohm meter

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam konteks global yang semakin menuntut keberlanjutan dan inovasi dalam industri konstruksi, pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan dan efisien menjadi sangat krusial. Mortar, sebagai komponen penting dalam konstruksi, memainkan peran kunci dalam memenuhi standar kekuatan struktural dan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Salah satu komponen vital dalam pembuatan mortar yang juga memiliki dampak signifikan pada kekuatannya adalah air. Namun, permintaan yang terus meningkat untuk mortar meningkatkan konsumsi bahan alam yang diperlukan untuk persiapan mortar. Dampaknya termasuk peningkatan biaya konstruksi global dan tekanan terhadap sumber daya air tawar alami. Meskipun banyak penelitian mendukung keberlanjutan dengan menggunakan produk sampingan atau bahan daur ulang, penelitian yang fokus pada pelestarian air tawar alami masih terbatas.

Air adalah bahan utama untuk proporsi campuran mortar dan juga kebutuhan paling vital untuk kehidupan. Secara umum, air tawar yang digunakan untuk mencampur dan mengawetkan mortar, merupakan sumber daya yang terbatas. Menurut laporan dari *Economist Intelligence Unit*, percepatan urbanisasi, perluasan populasi, dampak perubahan iklim, dan kemajuan ekonomi secara bersama-sama menimbulkan tekanan pada sistem air (Armstrong, 2023). Laporan Pengembangan Air Dunia PBB 2022 menyatakan bahwa industri dan energi menyumbang 19% dari penarikan air tawar global, termasuk air tanah. Menurut PBB (2019), ketersediaan air tawar telah menjadi tantangan bagi lebih dari 40% populasi dunia.

Kebutuhan air global yang diperkirakan akan meningkat antara 20% dan 25% pada tahun 2050 (Kuzma et al., 2023). Masalah ini menjadi lebih rumit karena perkembangan infrastruktur, yang menuntut lebih banyak beton/mortar dan pada akhirnya memberikan tekanan pada sumber daya air alami. Oleh karena itu, penggunaan sumber alternatif untuk air tawar alami menjadi penting. Permukaan

bumi terdiri dari sekitar 71% air, di mana 96,5% adalah air laut dan sisanya 3,5% adalah air tawar, di mana hanya 0,8% atau kurang tersedia untuk keperluan minum (Howard et al., 2019). Dengan memfokuskan pada hal ini, penggunaan air laut alih-alih air tawar untuk pemortaran dapat potensial menghemat sumber daya air tawar untuk generasi mendatang dan menjaga keberlanjutan.

Air laut merupakan kombinasi yang kompleks dari beberapa garam, termasuk organisme, gas terlarut, sedimen terapung, dan materi organik. Air laut memiliki konsentrasi garam khas sekitar 3,5%. Namun, ini juga tergantung pada lokasi geografis berbagai laut. Selain itu, komposisi garam air laut dapat memberikan efek yang menguntungkan dan tidak menguntungkan pada sifat-sifat mortar yang dicampur dengan air laut. Garam-garam yang terdapat dalam air laut bereaksi kimia dengan bahan mortar dan mengubah sifat-sifatnya. Selain itu, studi ini juga menyoroti masalah korosi batang baja akibat air laut dalam mortar. Untuk mengurangi masalah korosi, alternatif yang dapat diambil yaitu dengan memanfaatkan *silica fume* yang memungkinkan dapat digunakan sebagai salah satu material penyusun mortar. Karena sifat yang tidak korosif, *silica fume* akan digunakan sebagai bahan penguat dalam mortar air laut.

Silica fume merupakan produk sampingan (*by-product*) dari suatu proses industri silicon metal. *Silica fume* mengandung kadar SiO_2 yang tinggi dan merupakan bahan sangat halus, berbentuk butiran, sangat kecil, dan biasanya disebut dengan mikro silika. *Silica fume* mengandung unsur SiO_2 lebih dari 85% dengan demikian *silica fume* dapat dikategorikan sebagai pozzoland. Terdapat kelebihan tersendiri apabila menggunakan *silica fume* dalam proses pembuatan beton mutu tinggi, kelebihan tersebut antara lain: meningkatkan workabilitas untuk jangka waktu yang lama, meningkatkan stabilitas dan keterpaduan campuran beton segar, ketahanan beton meningkat drastis, air resapan pada beton banyak berkurang, gas didalam beton banyak berkurang, peningkatan yang besar ketahanan terhadap karbonasi, perembesan klorid dalam beton banyak berkurang, kekuatan awal dan akhir yang tinggi, dan dapat menghambat laju korosi pada beton/mortar.

Penggunaan semen campuran, air laut, dan *silica fume* dalam mortar muncul sebagai solusi yang menjanjikan. Semen campuran dapat meningkatkan sifat

mekanis mortar, sementara air laut sebagai bahan campuran dapat berperan sebagai alternatif yang berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada sumber daya air tawar. Sementara itu, penggunaan *silica fume* sebagai bahan tambahan diharapkan dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan abrasi mortar, sekaligus berkontribusi pada pengurangan emisi karbon melalui *embodied carbon* yang lebih rendah.

Meskipun potensi positif dari penggunaan bahan-bahan ini telah diidentifikasi, pemahaman mendalam terhadap pengaruhnya terhadap sifat-sifat kritis mortar masih memerlukan penyelidikan lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki secara komprehensif kuat tekan, UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*), *resistivity*, dan *embodied carbon* pada mortar yang mengandung kombinasi semen campuran, air laut, dan *silica fume*.

Dengan memahami dampak dan interaksi antara bahan-bahan ini, diharapkan dapat ditemukan formulasi mortar yang tidak hanya mencapai kinerja struktural yang optimal tetapi juga berperan dalam mendukung tujuan keberlanjutan. Keberhasilan penelitian ini akan membawa kontribusi positif terhadap arah industri konstruksi menuju praktik-praktik yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan kata lain, penelitian ini bukan hanya tentang meningkatkan kualitas material, tetapi juga tentang menciptakan masa depan konstruksi yang lebih berkelanjutan bagi lingkungan dan masyarakat secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Dari penjelasan yang diberikan pada bagian latar belakang, terdapat beberapa perumusan masalah, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi proporsi semen campuran, air laut, dan *silica fume* terhadap kuat tekan mortar?
2. Apakah *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) pada mortar yang mengandung semen campuran, air laut, dan *silica fume* dapat memberikan indikasi kualitas struktural yang baik?
3. Bagaimana nilai resistivitas pada mortar dengan kombinasi semen campuran, air laut, dan *silica fume*, dan bagaimana perubahan proporsi bahan tersebut mempengaruhi nilai resistivitas?

4. Seberapa tinggi tingkat *embodied carbon* pada mortar yang mengandung semen campuran, air laut, dan *silica fume*, dan bagaimana dapat mengurangi dampak lingkungan melalui penyesuaian proporsi bahan tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah yang telah disebutkan, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh perubahan proporsi semen campuran, air laut, dan *silica fume* terhadap kuat tekan mortar guna mendapatkan komposisi yang optimal.
2. Menilai keterkaitan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) pada mortar yang mengandung kombinasi semen campuran, air laut, dan *silica fume* sebagai indikator kualitas struktural.
3. Menentukan nilai resistivitas pada mortar dengan campuran semen, air laut, dan *silica fume*, serta menyelidiki bagaimana variasi proporsi bahan memengaruhi nilai resistivitas.
4. Mengukur tingkat *embodied carbon* pada mortar yang mengandung semen campuran, air laut, dan *silica fume*, dan mengeksplorasi strategi penyesuaian proporsi bahan untuk mengurangi dampak lingkungan.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Memberikan wawasan tentang kombinasi optimal proporsi semen campuran, air laut, dan *silica fume* untuk meningkatkan kuat tekan mortar.
2. Menyediakan informasi tentang korelasi antara *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dengan struktur dan kualitas material pada mortar berbasis semen campuran, air laut, dan *silica fume*.

3. Menambah pemahaman mengenai resistivitas pada mortar yang terdiri dari campuran semen, air laut, dan *silica fume* serta implikasinya terhadap ketahanan material.
4. Mengidentifikasi tingkat *embodied carbon* pada mortar dengan komposisi tersebut dan menawarkan strategi untuk mengurangi dampak lingkungan melalui penyesuaian komposisi bahan.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk memastikan kelancaran dan pencapaian tujuan yang diinginkan, penelitian ini dibatasi dengan parameter sebagai berikut:

1. Semen yang digunakan adalah jenis semen PCC (*Portland Composite Cement*) yang diproduksi dari PT. Semen Tonasa.
2. Pasir yang digunakan berasal dari Sungai Jeneberang, Kabupaten Gowa, Provinsi Sulawesi Selatan.
3. *Silica fume* yang digunakan diproduksi oleh PT. Sika Indonesia sebagai material pengganti semen dengan variasi 5%, 7%, dan 10%.
4. Air tawar, air bersih yang diambil dari Laboratorium Struktur dan Bahan.
5. Air laut yang digunakan diambil dari Pantai Galesong, Kabupaten Takalar, Sulawesi Selatan.
6. Pengujian kuat tekan, UPV, dan resistivitas dilakukan pada sampel berbentuk kubus dengan ukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm pada masa pengujian 7 dan 28 hari.
7. Proses perawatan (curing) yang diterapkan adalah curing menggunakan air.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara keseluruhan, tulisan ini disusun dalam 5 (lima) bab yang meliputi Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut adalah gambaran umum mengenai kandungan yang tercakup dalam setiap bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, dan diakhiri dengan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, menyajikan kumpulan informasi, konsep, teori, temuan penelitian sebelumnya, atau kerangka pemahaman yang menjadi dasar atau landasan bagi penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai waktu dan lokasi penelitian, variabel penelitian, bahan uji dan alat, teknik pengumpulan data, dan teknik analisis.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pembahasan karakteristik material, rancangan campuran mortar (*mix design*), kuat tekan mortar, *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), *resistivity*, *embodied carbon*, index antara *embodied carbon* dengan kuat tekan, index antara *embodied carbon* dengan UPV, dan index antara *embodied carbon* dengan *resistivity*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, terdapat kesimpulan hasil dari analisis penelitian yang telah dilakukan dan juga saran serta rekomendasi yang dapat diambil sebagai panduan untuk penelitian mendatang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh S.I. Choi et al. (2022) bertujuan menyelidiki secara eksperimental pengaruh paparan air laut pada sifat mekanik, daya tahan, dan mikrostruktur mortar semen, yang mengandung *silica fume*, metakaolin, atau bubuk kaca pada dua rasio penggantian yang berbeda. Variabel uji meliputi kondisi paparan, periode paparan, jenis bahan semen tambahan, dan rasio penggantian. Kekuatan tekan, lentur, dan tarik diukur secara berkala. Perubahan massa, penyerapan air, dan uji permeabilitas klorida cepat dilakukan untuk mengevaluasi kinerja daya tahan mortar semen Portland (PCM). Microcomputed tomography digunakan untuk mendapatkan informasi pori dari PCM yang representatif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa paparan air laut menghasilkan efek positif, termasuk kekuatan lentur dan peningkatan daya tahan selama periode paparan jangka pendek sementara efek tersebut mungkin tidak bertahan lama. Metakaolin adalah bahan semen tambahan yang paling efektif untuk meminimalkan pengurangan kekuatan tekan, sementara *silica fume* berkontribusi pada peningkatan daya tahan. Di sisi lain, PCM yang mengandung GP tidak menunjukkan perubahan kekuatan dan daya tahan yang signifikan. Korelasi kuat antara kekuatan lentur dan daya tahan diamati, dan itu dijelaskan oleh hidrasi tambahan (yaitu, densifikasi matriks) PCM (kecuali untuk GP) karena proses curing air laut yang mengisi ukuran pori-pori tertentu berkisar 50-200 μm .

Penelitian yang dilakukan oleh F. Qu et al. (2021) bertujuan menyelidiki secara eksperimental pengaruh air laut dan pasir laut tanpa garam pada hidrasi usia dini, kinerja mekanik, penyerapan air, perilaku pencucian dan produk hidrasi mortar semen portland dengan hanya pasir laut, air laut, atau air laut dan pasir laut secara mendasar diselidiki dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan garam dalam pasir laut dapat mempercepat reaksi hidrasi dan meningkatkan kuat tekan tahap awal, sedangkan sifat fisik pasir laut memiliki efek buruk pada pengembangan kekuatan, yang mengarah pada kekuatan tekan mortar

semen dengan pasir laut hanya lebih rendah daripada yang dengan air demineralisasi dan pasir sungai. Penambahan air laut secara signifikan dapat mempercepat hidrasi karena kandungan garamnya yang tinggi, yang dapat mengimbangi efek samping pasir laut dan membuat mortar semen dengan air laut dan pasir laut dengan kekuatan tekan tertinggi. Ion klorida, sulfat dan magnesium dalam air laut dan/atau pasir laut dapat menyebabkan perubahan fase mortar semen. Ion klorida dan sulfat dalam air laut dan pasir laut bereaksi dengan tricalcium aluminat (C_3A) dan produk terhidrasi dari *portlandite* untuk membentuk lebih banyak garam Friedel/Kuzel dan ettringit. Selain itu, ion magnesium terutama dalam air laut menghasilkan magnesium hidroksida ($Mg(OH)_2$) dan magnesium silikat hidrat (M-S-H) dengan mengganti Ca^{2+} dan dekalsifikasi kalsium silikat hidrat (C-S-H). Pengganti air laut juga dapat membuat rasio Si/Ca dari C-S-H (Cl) ditingkatkan dari kisaran masing-masing 0.2-0.4 hingga 0.6-1.2. Oleh karena itu, pemanfaatan air laut dan pasir laut yang tidak mengandung garam (setelah dalam proses pencucian) dalam produksi beton memberikan cara berkelanjutan untuk mengatasi kekurangan air tawar alami dan pasir sungai.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh S. Saxena & M.H. Baghban (2023) mengatakan bahwa produksi beton memerlukan sejumlah besar air yang menyebabkan kelangkaan air tawar alami. Sebaliknya, penggunaan air laut dalam beton dapat meningkatkan keberlanjutan dalam konstruksi dengan mengurangi konsumsi berlebihan air tawar alami. Dalam literatur, penggunaan air laut dalam beton masih memiliki reputasi kontroversial. Oleh karena itu, sangat penting untuk memahami sifat-sifat beton yang dicampur dan diawetkan dengan air laut. Penelitian masa lalu dan terkini tentang beton air laut dipelajari secara menyeluruh dalam makalah ini dan mengidentifikasi perbedaan signifikan dalam karakteristik antara beton air laut dan beton konvensional. Studi yang ada menunjukkan bahwa kadar klorida tinggi dalam air laut meningkatkan laju hidrasi, mempersingkat waktu pengaturan, dan meningkatkan kekuatan awal beton. Untuk mengurangi efek klorida dan meningkatkan daya tahan beton air laut, campuran mineral, retarder, dan superplastisizer telah direkomendasikan. Penelitian masa lalu juga mengungkapkan bahwa penggunaan air laut dalam beton pada akhirnya akan mengakibatkan korosi pada batang baja. Artikel ini mencakup kelebihan dan

kekurangan penggunaan batang FRP (Fiber Reinforced Polymer) dan baja tahan karat untuk mencegah korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh air laut. Ini juga menyarankan kemungkinan penggunaan aluminium alami dan daur ulang sebagai tulangan dalam beton air laut, yang tidak hanya melindungi beton dari korosi tetapi juga mendukung keberlanjutan beton. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini akan berkontribusi pada penelitian lebih lanjut yang bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat beton air laut.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Erniati et al. (2015) Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia, sehingga memiliki banyak wilayah sehingga kualitas sumber airnya tidak memenuhi syarat sebagai pencampuran air dalam konstruksi. Selain itu, konstruksi beton di daerah yang kemungkinan kuantitas air atau air tawar sangat minim atau bahkan tidak ada maka air laut tidak dapat dihindari dalam pencampuran beton. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen, sampel untuk uji kuat tekan adalah ukuran bangunan silinder 10 mm×20 mm. Hubungan porositas, daya tekan, umur dan model hubungan porositas dengan kuat tekan beton SCC yang menggunakan air laut dibahas dalam tulisan ini. Pengujian kuat tekan mengikuti standar ASTM 39 / C 39-99. *Universal Testing Machine* (UTM) digunakan dalam pengujian kekuatan tekan. Uji spesimen untuk porositas yang dibuat dengan mengambil bagian silinder kemudian dipotong dengan ukuran kurang lebih 2 cm×3 cm dengan ketebalan 0,003 mm. Jenis dan ukuran pori serta porositas dianalisis dengan menggunakan mikroskop petrografi polarisasi Olympus BX 51-P. Hasil penelitian adalah meningkatkan kuat tekan dan densitas struktur mikro sejalan dengan penurunan porositas dan ukuran pori beton dan umur beton. Hubungan kuat tekan (σ_{ss}) dan porositas (pss) SCC yang digunakan air laut dapat didekati persamaan $\sigma_{ss} = \sigma_0 (1-p)K$, dengan $\sigma_0 = 119,6$ dan $K = 7,502$.

Menurut penelitian yang dilakukan R. Suryanita et al. (2022), Beton berbuisa memiliki keunggulan praktis dan ekonomis dalam konstruksi, termasuk mengurangi berat struktur dengan membangun pondasi. Permintaan pasar untuk beton berbuisa seperti blok Cellular Lightweight Concrete (CLC) telah meningkat belakangan ini. Salah satu cara untuk mengurangi densitas CLC adalah dengan menambahkan pori udara ke dalam pasta semen atau campuran mortar. Namun,

penambahan pori dapat mengurangi kekuatan bata ringan. Oleh karena itu, diperlukan inovasi untuk meningkatkan kualitas blok CLC dengan menggantikan sebagian semen dengan bahan tambahan lain. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan blok CLC berkualitas baik dengan menggunakan *silica fume* untuk menggantikan sebagian semen dalam campuran mortar. Spesimen adalah blok CLC berukuran 10 cm lebar, 20 cm tinggi, dan 60 cm panjang. Variasi campuran mortar menggunakan persentase *silica fume* sebesar 0%, 0.5%, 1%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen. Data keluaran yang dihasilkan dari sampel ini meliputi kekuatan tekan, perpindahan, tegangan, regangan, dan modulus elastisitas. Hasil pengujian mendapatkan kekuatan tekan CLC optimum sebesar 1.03 MPa pada komposisi 10% *silica fume*. Kekuatan tekan optimum CLC ini disimulasikan menggunakan analisis elemen hingga LUSAS untuk mendapatkan pola perpindahan dan tegangan-regangan. Berdasarkan analisis numerik LUSAS, kekuatan tekan optimum blok CLC adalah 1.06 MPa. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan 10% *silica* ke dalam campuran mortar CLC dapat meningkatkan kekuatan tekan sebesar 81.25% dibandingkan dengan mortar tanpa *silica fume*.

2.2 Teori dan Aplikasi Mortar

Mortar adalah bahan perekat yang digunakan dalam konstruksi untuk menyatukan dan merekatkan bahan bangunan seperti batu bata, batu, blok beton atau bahan lainnya menjadi satu kesatuan yang kokoh. Mortar adalah lapisan tipis di antara bahan bangunan, yang tujuannya adalah untuk mengisi celah kecil di antara bahan tersebut. Mortar memiliki sifat perekat, sehingga melekat pada permukaan bahan bangunan dan melekat dengan baik selama pengerasan. Komposisi umum mortar terdiri dari tiga komponen utama: semen, pasir dan air (SNI 03-6825-2002). Semen berperan sebagai bahan pengikat utama, yang mengeras jika terkena air, membentuk ikatan yang kuat antara partikel pasir dengan bahan bangunan. Pasir berfungsi sebagai pengisi dan membantu meningkatkan stabilitas dan daya tahan mortar. Air digunakan untuk mengaktifkan proses pengerasan semen dan membentuk pasta yang mudah dioleskan. Selain bahan dasar tersebut, beberapa mortar mungkin mengandung bahan tambahan lain seperti bahan pemlastis, retarder, atau bahan pengisi lainnya. Bahan aditif ini digunakan untuk

mengubah sifat mortar, seperti meningkatkan elastisitas, mengurangi waktu pengeringan, meningkatkan daya rekat atau meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan tertentu.

2.2.1 Tipe mortar

Berdasarkan SNI 6882:2014, Spesifikasi mortar untuk pekerjaan unit pasangan, ada empat jenis utama campuran mortar: M, S, N, dan O. Setiap jenis dicampur dengan rasio berbeda dari semen, kapur, dan pasir untuk menghasilkan karakteristik kinerja tertentu seperti fleksibilitas, sifat perekatan, dan kekuatan tekan.

1. Mortar Tipe M

Campuran mortar tipe M memiliki jumlah semen Portland tertinggi dan direkomendasikan untuk beban berat serta aplikasi di bawah permukaan, termasuk pondasi, dinding penahan, dan *driveway*. Meskipun mortar tipe M memberikan kekuatan tekan minimal 2500 psi atau 17.2 MPa, ia memiliki sifat perekatan dan penutupan yang relatif buruk, sehingga tidak cocok untuk banyak aplikasi yang terpapar. Tipe M lebih disukai untuk digunakan dengan batu alam karena memberikan kekuatan yang serupa dengan batu.

2. Mortar Tipe S

Menawarkan kekuatan tekan yang tinggi lebih dari 1800 psi atau 12.4 MPa dan kekuatan kuat tarik yang tinggi, mortar tipe S cocok untuk banyak proyek struktur pada atau di bawah permukaan tanah. Tipe ini berkinerja sangat baik untuk menahan tekanan tanah, beban angin dan beban gempa. Tipe S adalah pilihan umum untuk banyak aplikasi kelas bawah, seperti pondasi pasangan bata, *manholes*, dinding penahan, dan saluran pembuangan, serta proyek kelas atas seperti teras batu bata dan jalan setapak. Meskipun mortar tipe S harus memiliki kuat tekan minimal 1800 psi, mortar ini sering dicampur untuk mendapatkan kekuatan antara 2300 dan 3000 psi.

3. Mortar Tipe N

Mortar Tipe N biasanya direkomendasikan untuk dinding eksterior dan di atas permukaan (termasuk veneer batu) yang terpapar cuaca buruk dan panas tinggi. Campuran mortar Tipe N memiliki kekuatan tekan menengah dan terdiri dari 1 bagian semen Portland, 1 bagian kapur, dan 6 bagian pasir. Campuran ini dianggap sebagai campuran serbaguna, berguna untuk instalasi di atas permukaan, eksterior, dan interior yang memikul beban. Ini juga merupakan campuran mortar yang disukai untuk konstruksi batu yang lembut (seperti batu kapur). Tipe N adalah mortar yang paling sering digunakan oleh pemilik rumah dan merupakan pilihan terbaik untuk aplikasi umum. Biasanya, kekuatan pada hari ke-28 berada dalam kisaran *750 pounds per square inch* (psi) atau sebesar 5.2 MPa.

4. Mortar Tipe O

Campuran mortar tipe O memiliki kekuatan tekan yang relatif rendah, hanya sekitar 350 psi atau 2,4 MPa. Biasanya digunakan untuk dinding interior di atas permukaan tanah yang tidak memikul beban. Tipe O dapat digunakan sebagai alternatif Tipe N untuk beberapa aplikasi interior, namun penggunaan eksteriornya terbatas karena kapasitas strukturalnya yang rendah. Tidak disarankan untuk digunakan di daerah yang terpapar angin kencang. Namun, campuran mortar tipe O ideal digunakan untuk pekerjaan *repointing* dan perbaikan serupa pada struktur yang sudah ada, berkat konsistensinya dan kemudahan aplikasinya.

5. Mortar Tipe K

Mortar tipe K jarang digunakan untuk konstruksi baru tetapi mungkin dikhususkan untuk restorasi atau aplikasi khusus lainnya. Mortar ini memiliki kekuatan tekan yang sangat rendah, hanya sekitar 75 psi atau 0.52 MPa. Karena kelembutannya, mortar tipe K utamanya digunakan untuk restorasi pasangan bata pada bangunan bersejarah atau kuno yang memerlukan campuran khusus yang tidak jauh lebih kuat dari pasangan bata yang sudah ada.

Persyaratan spesifikasi proporsi tipe mortar sesuai dengan SNI 6882:2014 dapat dilihat pada **Tabel 1** di bawah ini:

Tabel 1. Persyaratan spesifikasi proporsi mortar

Mortar	Tipe	Proporsi dengan Volume (Material Sementisius)								Rasio agregat (Diukur dalam Kondisi Lembab, Lepas)
		Semen Portland atau Semen Campur	Semen Mortar			Semen Pasangan			Kapur hidroksida atau dempul kapur	
			M	S	N	M	S	N		
Semen-Kapur	M	1	$\frac{1}{4}$	Tidak kurang dari $2\frac{1}{4}$ dan tidak lebih dari 3 kali jumlah dari volume terpisah material sementisius
	S	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{4}$ sampai $\frac{1}{2}$
	N	1	...	...	...	...	...	...	$> \frac{1}{2}$ sampai $1\frac{1}{4}$
	O	1	...	...	...	...	...	...	$> 1\frac{1}{4}$ sampai $2\frac{1}{2}$
Semen Mortar	M	1	...	...	1	...	...	...	...
	M	...	1	...	...	...	...	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	1	...	...	...	...
	S	...	...	1	...	...	...	...	...
	N	...	...	...	1	...	...	...	...
	O	...	...	...	1	...	...	...	...
Semen Pasangan	M	1	...	...	...	...	...	1	...
	M	...	...	...	...	1	...	...	...
	S	$\frac{1}{2}$	...	...	...	...	...	1	...
	S	...	...	...	...	...	1	...	...
	N	...	...	...	...	...	...	1	...
	O	...	...	...	...	...	...	1	...

Sumber: SNI 6882:2014 (2014)

Mortar jika ditinjau dari jenis bahan pengikatnya, umumnya terbagi menjadi empat jenis utama. Keempat jenis tersebut melibatkan penggunaan bahan pengikat yang berbeda untuk mencapai karakteristik dan kekuatan yang diinginkan. Berikut adalah empat jenis mortar berdasarkan bahan pengikatnya:

1. Mortar Semen-Pasir (Portland)

Komposisi dari mortar semen-pasir terdiri dari semen Portland, pasir, dan air. Umumnya digunakan dalam berbagai proyek konstruksi sebagai mortar standar. Cocok untuk aplikasi di atas permukaan, eksterior, dan interior.

2. Mortar Kapur

Komposisi dari mortar kapur adalah menggunakan kapur hidup atau kapur mati sebagai bahan pengikat, kadang-kadang dengan tambahan pasir. Cocok untuk konstruksi yang melibatkan batu alam atau bahan bangunan yang memerlukan mortar yang lebih lembut. Biasanya digunakan pada proyek restorasi bangunan bersejarah.

3. Mortar Campuran

Komposisi dari mortar campuran merupakan kombinasi semen portland, pasir, dan kapur. Memberikan kombinasi kelembutan dan kekuatan, sering digunakan pada konstruksi dengan kebutuhan khusus.

4. Mortar Epoxy

Komposisi dari mortar epoxy adalah berbasis epoxy sebagai bahan pengikat. Memberikan kekuatan tinggi, daya rekat yang kuat, dan tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras. Digunakan dalam situasi di mana mortar biasa mungkin tidak mencukupi.

Setiap jenis mortar memiliki kelebihan dan kekurangan sendiri, dan pemilihan tergantung pada kebutuhan spesifik proyek konstruksi.

2.2.1 Sifat-sifat mortar

Mortar memiliki sejumlah sifat yang menentukan kemampuannya dalam berbagai aplikasi konstruksi. Beberapa sifat-sifat mortar yang penting melibatkan aspek kekuatan, kelembutan, daya rekat, dan lainnya. Berikut adalah beberapa sifat mortar berdasarkan SNI 6882:2014:

1. Sifat Mortar Segar

Sifat mortar segar adalah sifat ketika mortar belum mengeras. Beberapa sifat mortar segar tersebut antara lain:

- a. **Workability** mortar dapat dilihat dari nilai *flow* yang dihasilkan oleh adukan tersebut. Salah satu unsur yang mempengaruhi kemudahan pengerjaan adalah jumlah air pencampur. Semakin banyak air semakin

mudah dikerjakan. Pengujian *flow* dilakukan untuk mengetahui tingkat kemudahan pengerjaan adukan mortar. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan alat *flow table*.

- b. **Setting Time** merupakan waktu yang dibutuhkan suatu adukan untuk mencapai kekuatan 500 psi. Untuk mengetahui waktu ikat suatu adukan mortar dilakukan dengan alat penetrometer.

2. Sifat Mortar Keras

Sifat mortar keras merupakan sifat dimana mortar telah mengeras. Ada beberapa sifat mortar keras yaitu:

- a. **Penyerapan air** adalah presentase berat air yang mampu diserap oleh agregat jika direndam oleh air. Dalam adukan mortar, air dan semen membentuk pasta yang disebut pasta semen. Pasta tersebut berfungsi sebagai pengisi rongga antar butiran-butiran agregat halus serta bersifat sebagai pengikat antara butiran-butiran agregat halus sehingga membentuk suatu massa yang padat.
- b. **Kuat Tekan**, Kekuatan tekan mortar adalah gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada benda uji mortar berbentuk kubus dengan ukuran tertentu dan umur tertentu (SNI 3-6825-2002). Kuat tekan mortar diwakili oleh kuat tekan maksimum dengan satuan MPa. Kuat tekan mortar sangat dipengaruhi oleh proporsi campurannya. Disamping itu, air juga berpengaruh terhadap kuat tekan mortar. Semakin rendah faktor air semen, maka semakin tinggi kuat tekan yang akan dimilikinya. Namun, faktor air semen yang rendah menyebabkan *workability* menurun.

Persyaratan spesifikasi properti mortar sesuai dengan SNI 6882:2014 dapat dilihat pada **Tabel 2** di bawah ini:

Tabel 2. Persyaratan spesifikasi properti mortar

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata pada umur 28 hari, min, Mpa, (psi)	Retensi air, min, %	Kadar udara, maks, % ^A	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, lepas)
Semen-Kapur	M	17,2 (2500)	75	12	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3½ jumlah dari volume-volume terpisah dari material sementisius
	S	12,4 (1800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^B	
	O	2,4 (350)	75	14 ^B	
Semen Mortar	M	17,2 (2500)	75	12	
	S	12,4 (1800)	75	12	
	N	5,2 (750)	75	14 ^B	
	O	2,4 (350)	75	14 ^B	
Semen Pasangan	M	17,2 (2500)	75	18	
	S	12,4 (1800)	75	18	
	N	5,2 (750)	75	20 ^C	
	O	2,4 (350)	75	20 ^C	

^AKadar udara mortar kapur-semen portland tanpa bahan pembuat gelembung udara biasanya kurang dari 8 %.

^BBila terdapat tulangan struktural dalam mortar semen-kapur atau mortar semen mortar, kadar udara maks. harus 12 %.

^CBila terdapat tulangan struktural dalam mortar semen pasangan, kadar udara maksimum harus 18 %.

Sumber: SNI 6882:2014 (2014)

2.3 Material Penyusun Mortar

2.3.1 Semen campuran

Menurut BS EN 197-1:2011 Semen adalah bahan pengikat hidrolis, yaitu penambahan anorganik yang digiling halus, yang bila dicampur dengan air akan membentuk pasta yang mengeras dan mengeras melalui reaksi dan proses hidrasi dan yang setelah pengerasan, mempertahankan kekuatannya dan stabilitas bahkan di bawah air.

Semen PCC atau *Portland Composite Cement* merupakan semen portland yang termasuk dalam kategori semen campuran atau *belended cement*. Semen campuran ini dibuat atau dirancang karena memerlukan sifat-sifat tertentu yang tidak dimiliki oleh semen portland Tipe I. Untuk memperoleh sifat tertentu diperlukan bahan tambahan seperti pozzolan, fly ash, silika fume, dan lain-lain untuk ditambahkan ke semen campuran selama proses pembuatan.

Standar Nasional Indonesia (SNI) 7064:2014 memberikan definisi untuk semen portland komposit, yang diartikan sebagai semen hidrolis yang diproduksi

dengan menggiling terak semen portland, khususnya terak hidrolik, bersama dengan penambahan bahan anorganik, seperti satu atau lebih bahan anorganik atau hasil pencampuran bubuk semen portland dengan bubuk anorganik lainnya. Bahan anorganik tersebut meliputi terak tanur sembur (*Blast Furnace Slag*), pozzolan, senyawa silikat, dan batu kapur, dengan proporsi bahan anorganik berkisar antara 6% hingga 35% dari total massa semen portland komposit. Semen ini dapat digunakan dalam berbagai proyek konstruksi seperti pekerjaan beton, pemasangan bata, serta konstruksi lainnya seperti beton pracetak dan paving block beton.

Semen Portland Composite (PPC) adalah jenis semen yang terdiri dari campuran semen portland biasa dengan bahan tambahan tertentu. Semen portland komposit (*portland composite cement*, PCC) merupakan semen campuran yang digunakan untuk mempersiapkan mortar dalam penelitian ini memiliki kelebihan yaitu:

1. Peningkatan Kekuatan: Aditif pozzolan memberikan kekuatan tambahan dan daya tahan terhadap serangan kimia.
2. Ketahanan Terhadap Retak: Mampu mengurangi risiko retakan beton.
3. Pengurangan Panas Hidrasi: Dapat mengurangi panas yang dihasilkan selama proses hidrasi beton.
4. Keberlanjutan: Penggunaan bahan tambahan seperti abu terbang dapat mendukung praktik konstruksi berkelanjutan dengan mengurangi limbah industri.

Persyaratan kimia untuk semen portland komposit, kandungan SO₃ tidak lebih dari 4%, senyawa kimia lainnya sama dengan komposisi kimia semen portland. Sedangkan persyaratan fisik semen portland komposit ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Persyaratan fisik semen portland komposit

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1.	Kehalusan dengan alat blaine	m ² /kg	Min. 280
2.	Kekekalan bentuk dengan autoclave:		
	- Pemuaian	%	Maks. 0,8
	- Penyusutan	%	Maks. 0,2
3.	Waktu pengikatan dengan alat vikat:		
	- Pengikatan awal	Menit	Min. 45
	- Pengikatan akhir	Menit	Maks. 375
4.	Kuat tekan:		
	- Umur 3 hari	Kg/cm ²	Min. 130
	- Umur 7 hari	Kg/cm ²	Min. 200
	- Umur 28 hari	Kg/cm ²	Min. 280
5.	Pengikatan semu:		
	- Penetrasi akhir	%	Min. 50
6.	Kandungan udara dalam mortar	% volume	Maks. 12

Sumber: SNI 7064:2014 (2014)

Menurut BS EN 197-1:2011, Semen Portland Komposit CEM II terbagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. CEM II/A-M, komposisi semen ini mengandung 80 - 90% klinker/ slag, 6 - 20% bahan anorganik (*Blast-furnace slag, Silica fume, Pozzolana, Fly ash, Burnt shale, Limestone*), bahan aditif 0 - 5% *Minor additional constituents*.
2. CEM II/B-M, komposisi semen ini mengandung 65 - 79% klinker/slag, 21 - 35% bahan anorganik (*Blast-furnace slag, Silica fume, Pozzolana, Fly ash, Burnt shale, Limestone*), 0 - 5% *Minor additional constituents*.

Sedangkan menurut ASTM C 595, *blended cement* terbagi menjadi:

1. Tipe IS – *Portland Blast-Furnace Slag Cement*
2. Tipe IP – *Portland-Pozzolan Cement*

2.3.2 *Silica fume*

Menurut BS EN 197-1:2011, *Silica fume* berasal dari reduksi kuarsa berkualitas tinggi dengan batubara dalam tungku busur listrik dalam produksi paduan silikon dan ferrosilikon dan terdiri dari partikel bulat sangat halus yang mengandung setidaknya 85% massa dioksida silikon amorf. Kandungan silikon unsur (Si) yang ditentukan sesuai dengan ISO 9286, tidak boleh lebih besar dari 0,4% massa. *Silica fume* dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti beton, grout, mortar, produk serat semen, semen tahan api, semen sumur minyak/gas, keramik, elastomer, dan aplikasi polimer. *Silica fume* diproduksi sesuai dengan spesifikasi ASTM C-1240. Kualitasnya dikendalikan dan dimonitor selama seluruh proses produksi untuk memastikan bahwa memenuhi atau melebihi persyaratan spesifikasi. Properti fisik tipikal dari *silica fume* diberikan dalam **Tabel 4**.

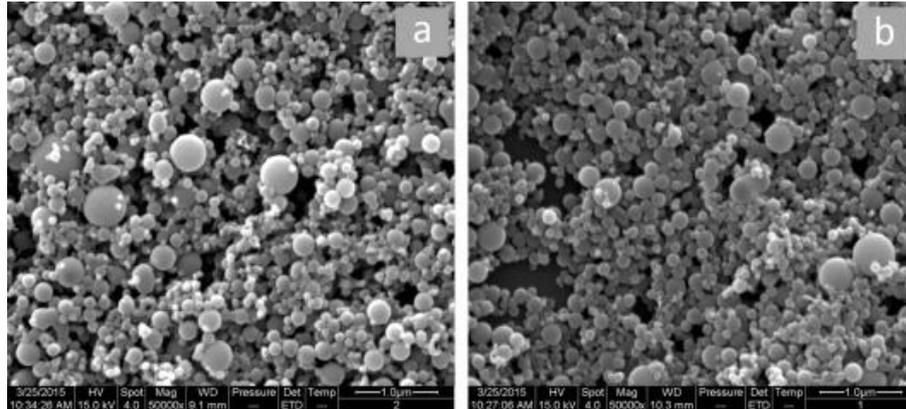
Tabel 4. Properti fisik tipikal dari *silica fume*

Properti	
Bentuk	Amorfus - Serbuk sub-mikron
Warna	Abu-abu hingga abu-abu sedang
Berat Jenis	2.25
Kelarutan	Tidak larut
Kerapatan Massa - Dipadatkan (produk curah dan berbungkus)	41 - 48 lb/ft ³ (655 - 770 kg/m ³)
Kerapatan Massa – Tidak dipadatkan (produk curah dan kantong kertas)	16 - 22 lb/ft ³ (256 - 352 kg/m ³)
Kerapatan Massa - Tidak dipadatkan (<i>super sacks</i>)	22 - 26 lb/ft ³ (252 - 416 kg/m ³)

Sumber: SILICA FUME-TECHNICAL DATA SHEET (2019)

1. Sifat Fisik

Menurut Soomro et al. (2023), Partikel *silica fume* sangat kecil, dengan ukuran partikel primer rata-rata berkisar dari 0,1 hingga 0,2 μm , dan 95% dari partikel lebih halus dari 1 μm . *Silica fume* mengandung 85%–95% silika (SiO_2) dan memiliki bentuk bulat. Mikrograf SEM dari partikel *silica fume* yang tidak padat (a) dan padat (b) disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Fotomikrograf SEM menunjukkan partikel *silica fume* (a) yang belum dipadatkan (b) yang telah dipadatkan (Soomro et al., 2023).

Luas permukaan tinggi dari partikel *silica fume* adalah faktor penting yang memengaruhi reaktivitas partikel dan berperan sangat penting dalam meningkatkan sifat fisik dan kimia beton. Penambahan *silica fume* memberikan manfaat pada beton dalam dua cara, pertama, partikel-partikel kecil secara fisik mengurangi ruang void dalam matriks semen, dan kedua, *silica fume* berfungsi sebagai pozzolan yang sangat efektif, bereaksi kimia untuk menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang mengakibatkan peningkatan kekuatan tekan beton.

Silica fume memiliki berat jenis sekitar 2,25 yang lebih rendah daripada semen portland, oleh karena itu penambahan *silica fume* ke campuran beton tidak akan meningkatkan densitasnya.

2. Komposisi Kimia

Komposisi kimia *silica fume* tergantung pada komposisi kimia bahan baku yang digunakan dalam tungku. Kandungan silika pada *silica fume* umumnya lebih dari 85%. Oksida lain seperti alumina, besi, kalsium oksida, dan kandungan alkali dari *silica fume* relatif rendah. Magnesium oksida juga rendah, sedangkan kandungan karbon bervariasi dari 0,5% hingga 1,5% dan biasanya tetap kurang dari 2%. Berikut adalah persyaratan kimia dan fisik untuk *silica fume* menurut ASTM C-1240, beserta nilai-nilai tipikalnya dapat dilihat dalam **Tabel 5** di bawah ini:

Tabel 5. Persyaratan spesifikasi kimia dan fisik untuk *silica fume*

Spesifikasi		
Persyaratan Kimia	ASTM	Tipikal
Silicon Dioxide (SiO ₂) %	85.0 % Minimum	93.74 %
Moisture Content %	3.0 % Maksimum	0.45 %
Loss on Ignition (LOI) %	6.0 % Maksimum	3.75 %
Persyaratan Fisik	ASTM	Tipikal
Persen kebesaran dipertahankan pada 45- µm (325 saringan)	10.0 % Maksimum	1.91 %
Indeks aktivitas kekuatan <i>Pozzolanik</i> yang dipercepat dengan semen portland (7 hari)	105.0 % Minimum	139 %
Permukaan Spesifik	15 m ² /g Minimum	22.49 m ² /g

Sumber: SILICA FUME-TECHNICAL DATA SHEET (2019)

Menurut ACI 234R-96, terdapat dua kegunaan *silica fume*, yaitu:

1. Menggunakan *silica fume* dalam beton/mortar

Silica fume awalnya dilihat sebagai bahan pengganti semen dan di beberapa wilayah, masih digunakan sebagai bahan tersebut. Secara umum, sebagian semen dapat digantikan oleh jumlah *silica fume* yang jauh lebih kecil. Sebagai contoh, satu bagian *silica fume* dapat menggantikan 3 hingga 4 bagian semen (berdasarkan massa) tanpa kehilangan kekuatan, asalkan kandungan air tetap konstan. Diingatkan bahwa penggantian semen oleh *silica fume* mungkin tidak memengaruhi sifat beton yang telah mengeras. *Silica fume* memberikan pengaruh pada sifat beton yang telah mengeras, tidak hanya pada kekuatan dalam tingkat yang sama.

Penambahan *silica fume* biasanya meningkatkan kebutuhan air. Jika diinginkan untuk mempertahankan rasio air terhadap bahan pengikat yang sama (berdasarkan massa), admixture pengurang air atau HRWRA atau keduanya harus digunakan untuk mendapatkan *workability* yang diperlukan. Untuk mempertahankan tingkat *workability* yang sama, slump yang sedikit lebih tinggi biasanya diperlukan untuk beton dengan *silica fume* karena adanya peningkatan koherensi.

Karena keterbatasan ketersediaan dan harga yang tinggi saat ini (relatif terhadap semen *portland* dan pozzolan atau slag lainnya), *silica fume* semakin digunakan sebagai bahan peningkat sifat beton. Dalam peran ini, *silica fume* telah digunakan untuk memberikan beton dengan kekuatan tekan sangat tinggi atau dengan tingkat daya tahan yang sangat tinggi atau keduanya. Di Amerika Serikat, saat ini *silica fume* digunakan secara dominan untuk menghasilkan beton dengan permeabilitas yang rendah untuk aplikasi seperti struktur parkir dan lapisan jembatan.

2. Menggunakan *silica fume* dalam semen campuran

Penggunaan *silica fume* dalam semen campuran juga menarik minat, yaitu untuk mengurangi panas hidrasi. Secara umum, properti semen yang mengandung *silica fume* sebagai bahan campuran dapat diharapkan sama seperti jika *silica fume* ditambahkan secara terpisah. Seperti halnya dengan setiap semen campuran, akan ada kehilangan fleksibilitas dalam perbandingan campuran terkait jumlah *silica fume* yang tepat dalam campuran beton tertentu. Kecuali dinyatakan lain, hasil dan informasi yang disajikan dalam dokumen ini berasal dari beton yang dibuat dengan penambahan *silica fume* secara terpisah.

2.3.3 Air laut

Bahan penting dalam produksi mortar adalah air. Air tidak hanya bereaksi dengan seluruh komponen mortar (agregat halus, semen, dan bahan tambahan lainnya), tetapi juga ketika beton mengeras (*curing*). Karena air mempengaruhi sifat mekanik mortar, maka air yang digunakan dalam produksi mortar harus memenuhi standar produksi campuran mortar. Syarat penggunaan air pada campuran mortar harus bersih dan bebas dari asam, minyak, dan zat lain yang dapat merusak mortar. Kekuatan mekanik mortar dapat berkurang jika air yang digunakan mengandung senyawa-senyawa berbahaya, termasuk yang bersih, serta bebas dari asam, minyak dan unsur-unsur lain yang dapat merusak beton. Pada penelitian ini menggunakan air laut sebagai pencampur mortar.

Menurut Mackenzie, F. T. et al. (2023) Air laut, air yang membentuk samudera dan lautan, menutupi lebih dari 70 persen permukaan bumi. Air laut

adalah campuran kompleks dari 96,5 persen air, 2,5 persen garam, dan sejumlah kecil zat lain, termasuk bahan anorganik dan organik terlarut, partikulat, dan beberapa gas atmosfer.

Air laut merupakan sumber yang kaya berbagai unsur kimia komersial penting. Sebagian besar magnesium dunia diperoleh kembali dari air laut, seperti juga bromin dalam jumlah besar. Di beberapa bagian dunia, natrium klorida (garam dapur) masih diperoleh dengan menguapkan air laut. Selain itu, air dari laut, ketika dihilangkan garamnya, dapat menyediakan pasokan air minum yang tak terbatas. Banyak pabrik desalinasi besar telah dibangun di daerah kering di sepanjang pantai di Timur Tengah dan di tempat lain untuk mengurangi kekurangan air tawar. Terdapat sifat fisik dan kimia air laut, yaitu:

Enam ion air laut yang paling melimpah adalah klorida (Cl^-), natrium (Na^+), sulfat (SO_4^{2-}), magnesium (Mg^{2+}), kalsium (Ca^{2+}), dan kalium (K^+). Beratnya ion-ion ini membentuk sekitar 99 persen dari semua garam laut. Jumlah garam-garam ini dalam volume air laut bervariasi karena penambahan atau pembuangan air secara lokal (misalnya, melalui presipitasi dan penguapan). Kandungan garam dalam air laut ditunjukkan oleh salinitas (S), yang didefinisikan sebagai jumlah garam dalam gram yang dilarutkan dalam satu kilogram air laut dan dinyatakan dalam bagian per seribu. Salinitas di laut terbuka telah diamati berkisar antara 34 hingga 37 bagian per seribu (0/00 atau ppt), yang juga dapat dinyatakan sebagai 34 hingga 37 unit salinitas praktis (psu).

Karbon anorganik, bromida, boron, strontium, dan fluorida merupakan zat terlarut utama lainnya dari air laut. Dari sekian banyak konstituen kimia terlarut kecil, fosfor anorganik dan nitrogen anorganik adalah yang paling menonjol, karena mereka penting untuk pertumbuhan organisme yang menghuni lautan. Air laut juga mengandung berbagai gas atmosfer terlarut, terutama nitrogen, oksigen, argon, dan karbon dioksida. Beberapa komponen lain dari air laut adalah zat organik terlarut, seperti karbohidrat dan asam amino, dan partikulat kaya organik. Bahan-bahan ini berasal terutama di atas 100 meter (330 *feet*) laut, di mana karbon anorganik terlarut diubah oleh fotosintesis menjadi bahan organik.

Banyak karakteristik air laut sesuai dengan air pada umumnya, karena sifat kimia dan fisiknya yang umum. Misalnya, struktur molekul air laut, seperti air tawar, mendukung pembentukan ikatan antar molekul. Beberapa kualitas khas air laut disebabkan oleh kandungan garamnya. Viskositas (yaitu, resistansi internal terhadap aliran) air laut, misalnya, lebih tinggi daripada air tawar karena salinitasnya yang lebih tinggi. Kepadatan air laut juga lebih tinggi karena alasan yang sama. Titik beku air laut lebih rendah daripada air murni, dan titik didihnya lebih tinggi.

Berikut adalah komponen utama dalam air laut, beserta konsentrasinya dalam gram per kilogram (g/kg) air laut, dapat dilihat pada **Tabel 6** di bawah ini:

Tabel 6. Komponen utama dalam air laut

Komponen utama air laut			
Ion constituent	(g/kg) air laut	moles/kg	Konsentrasi Relatif
Klorida (chloride)	19.162	0.5405	1.0000
Natrium (sodium)	10.679	0.4645	0.8593
magnesium	1.278	0.0526	0.0974
Sulfat (sulfate)	2.680	0.0279	0.0517
Kalsium (calcium)	0.4096	0.01022	0.0189
Kalium (potassium)	0.3953	0.01011	0.0187
Karbon (anorganik)	0.0276	0.0023	0.0043
Bromida (bromide)	0.0663	0.00083	0.00154
boron	0.0044	0.00041	0.00075
strontium	0.0079	0.00009	0.000165
Fluorida (fluoride)	0.0013	0.00007	0.000125

Sumber: Mackenzie, F. T. et al. (2023)

2.3.4 Agregat halus

Agregat halus digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar, dan karakteristik dari agregat halus memiliki dampak signifikan pada mutu mortar. Ciri-ciri agregat halus melibatkan pengukuran kadar lumpur, berat jenis, kadar organik, dan kadar air, semua penting untuk memastikan mortar yang dihasilkan mencapai kekuatan yang diinginkan. Menurut ketentuan SNI 03-2847-2002,

agregat halus didefinisikan sebagai butiran halus dengan ukuran antara 2 mm hingga 5 mm, dan merupakan agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus yang berkualitas harus bebas dari bahan organik, lempung, atau zat-zat lain yang dapat merusak campuran mortar atau produk bahan bangunan seperti batako.

Pasir sebagai salah satu bentuk agregat halus, digunakan sebagai bahan pengisi dalam adukan dengan semen. Keberadaan pasir juga memiliki pengaruh terhadap sifat-sifat mortar, termasuk tahan terhadap susut, kecenderungan retak, dan kekerasan pada batako atau produk campuran semen lainnya. Agregat halus diperoleh melalui disintegrasi batuan atau proses pemecahan batu pecah, dengan ukuran yang bervariasi. Sesuai dengan standar saringan Amerika, agregat halus lolos pada saringan No.4 dan tertahan pada saringan No.100.

2.4 Pengujian Kuat Tekan

Kuat tekan mortar didefinisikan sebagai rasio antara beban maksimum dan luas penampang suatu bentuk silinder yang diukur dalam satuan N/mm atau MPa. Pengujian kuat tekan mortar dipengaruhi oleh komponen penyusun dari mortar itu sendiri. Dalam SNI 03-6825-2002, kuat tekan mortar dihitung dengan membagi beban tekan maksimum yang diterima oleh benda uji selama pengujian dengan luas penampang melintangnya. Menurut T. Mulyono (2018), tingkat kekuatan suatu struktur sangat ditentukan oleh kuat tekan mortar; semakin tinggi tingkat kekuatan yang dibutuhkan oleh struktur, maka mutu mortar yang dihasilkan juga semakin tinggi.

Dalam penelitian ini, kuat tekan mortar diwakili oleh tegangan tekan maksimum $f'c$ yang diukur dalam satuan N/mm² atau MPa (Mega Pascal) terlihat pada **Persaman 1**.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana:

$$f'c = \text{Kuat tekan mortar (MPa)}$$

P = Gaya tekan aksial (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

Besarnya kuat tekan mortar dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a. Jenis semen dan kualitasnya
- b. Jenis dan tekstur permukaan agregat.
- c. Perawatan beton
- d. Suhu
- e. Umur beton

Kecepatan peningkatan kekuatan tergantung pada jenis semen yang digunakan; misalnya, semen dengan kandungan alumina yang tinggi dapat menghasilkan mortar dengan kekuatan hancur pada umur 24 jam setara dengan semen *portland* biasa pada umur 28 hari. Pengerasan terus berlangsung seiring pertambahan umur mortar.

2.5 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) dilakukan sesuai dengan standar SNI ASTM C597:2012 dengan cara merambatkan gelombang longitudinal yang dihasilkan oleh transduser elektroakustik yang bersentuhan dengan salah satu permukaan mortar yang diuji. Perambatan gelombang tersebut diterima dan diubah menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang terletak pada jarak (L) dari transduser pemancar setelah merambat melalui mortar. T adalah pengukuran waktu perjalanan. Perbandingan antara L dan T digunakan untuk mendapatkan kecepatan rambat gelombang (V). Menurut **Persamaan 2**, kecepatan rambat gelombang longitudinal pada suatu massa mortar berkaitan dengan parameter elastisitas dan densitas.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

Dimana:

V = Kecepatan rambat gelombang (m/s)

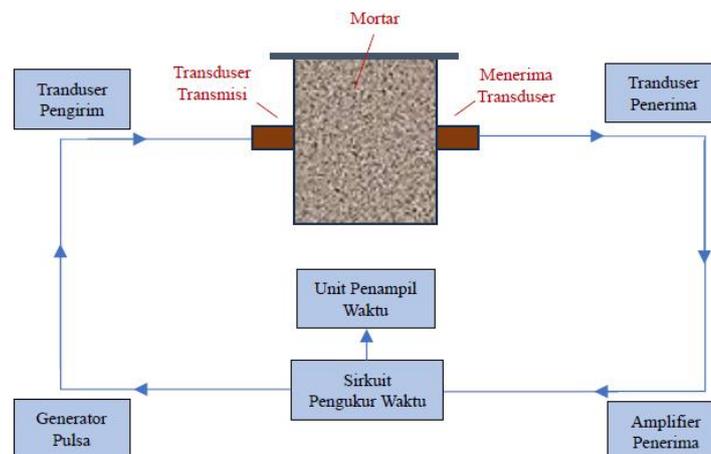
L = Jarak antara pusat permukaan transduser (m)

T = Waktu tempuh (s)

Kecepatan perambatan gelombang pada mortar diukur dengan tujuan untuk menganalisis atau mengidentifikasi tingkat keseragaman dan mutu relatif mortar, mendeteksi keberadaan rongga dan retakan, serta memperkirakan keberhasilan dalam perbaikan retak. Pengujian ini juga berguna untuk mengevaluasi perubahan karakteristik mortar dan menilai sejauh mana kerusakan atau retakan pada mortar saat menginspeksi suatu konstruksi. Jika digunakan untuk memonitor perubahan kondisi dari waktu ke waktu, penting untuk menandai lokasi pengujian pada struktur sehingga pengujian dapat diulangi di lokasi yang sama.

Tingkat kejenuhan mortar berpengaruh pada laju perambatan gelombang, yang perlu diatasi ketika menganalisis hasil pengujian. Selain itu, laju perambatan gelombang pada mortar yang sudah jenuh air cenderung kurang rentan terhadap variasi kualitas mortar relatif. Kecepatan perambatan gelombang pada mortar yang jenuh air dapat menjadi 5% lebih cepat dibandingkan dengan mortar yang kering. Faktor-faktor seperti ukuran benda uji atau pantulan gelombang dari permukaan benda uji tidak memengaruhi kecepatan perambatan gelombang. Akurasi pengukuran bergantung pada kemampuan operator untuk mengukur jarak yang tepat antara transduser pemancar dan penerima, serta kualitas peralatan dalam mengukur waktu tempuh kecepatan perambatan gelombang.

Skematik pengujian *Ultrasonik Pulse Velocity* (UPV) dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Skematik pengujian *Ultrasonik Pulse Velocity* (UPV)

2.6 Pengujian *Resistivity*

Resistivitas (*resistivity*) adalah ukuran dari sejauh mana suatu bahan menghambat arus listrik. Nilai resistivitas dinyatakan dalam satuan ohm meter (Ωm) dan mencerminkan kemampuan suatu material untuk menghambat aliran arus listrik. Semakin tinggi nilai resistivitas, semakin baik material tersebut sebagai isolator listrik, sedangkan semakin rendah nilainya, semakin baik sebagai konduktor listrik. Resistivitas suatu material dipengaruhi oleh komposisi, struktur, dan kondisi fisiknya.

Kuranchie, F. A. Et al. (2016) melakukan pengujian resistivitas listrik dari bata geopolimer limbah serta bata komersial. Dalam proses pengukuran, bata dijepit dengan dua *probe* yang terpasang pada dua pelat logam kecil, langsung menghadap kedua ujung bata. Memberikan media untuk aliran arus. Ujung-ujung lain dari dua *probe* tersebut dihubungkan ke sebuah multimeter, dengan kapasitas hingga $40\text{ m}\Omega$, untuk menampilkan resistansi akhir dari bata. Resistivitas bata dihitung menggunakan nilai resistansi yang dicatat dan dimensi bata, dengan menggunakan rumus berikut:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (3)$$

Dimana:

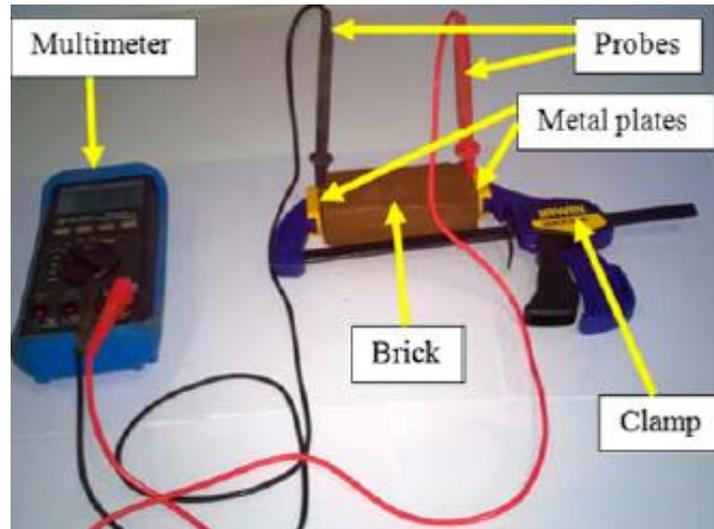
ρ = Resistivitas (Ωm)

R = Resistansi (Ω)

A = Luas permukaan tempat arus mengalir melalui bata (m^2)

L = Panjang kawat melintang bata (m)

Susunan yang digunakan untuk pengukuran resistivitas ditunjukkan pada **Gambar 3.**



Gambar 3. Pengukuran resistivitas pada bata (Kuranchie, F. A. Et al. (2016))

2.7 *Embodied Carbon* (emisi CO₂)

Embodied carbon merujuk pada total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan selama siklus hidup suatu produk atau proyek, termasuk produksi bahan mentah, manufaktur, transportasi, konstruksi, penggunaan, pemeliharaan, dan akhirnya pembongkaran atau daur ulang. Ini mencakup semua emisi yang terkait dengan kegiatan tersebut, terutama fokus pada emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan selama proses tersebut. Konsep *embodied carbon* digunakan untuk mengukur dampak lingkungan dari suatu produk atau proyek dari perspektif emisi karbon, membantu dalam upaya mengurangi jejak karbon dan menghadapi perubahan iklim.

Dampak penggantian semen dengan menggunakan *silica fume* dan air laut sebagai pencampur terhadap keberlanjutan mortar semen diestimasi dari total emisi karbon dari setiap material dan efisiensi kekuatan ekologis mortar semen. Faktor emisi CO₂ untuk setiap material diperoleh dengan menghitung emisi selama proses transportasi, penggilingan, dan penyaringan. Faktor emisi CO₂ untuk air, semen, dan agregat halus diperoleh dari studi yang telah dipublikasikan. **Tabel 7** menyajikan faktor emisi untuk air, semen, agregat halus, dan *silica fume*. Emisi karbon total dari mortar semen dihitung menggunakan **Persamaan 5**.

Tabel 7. faktor emisi CO₂

Material	Air ¹	Semen ²	Silica fume ³	Pasir ⁴
Embodied Carbon CO ₂ , kg.CO ₂ /kg	0.000196	0.832	0.0003	0.0026

Sumber:

¹ Caronge, M. A. et al. (2022)

² X.-Y. Zhao et al. (2023)

³ X.-Y. Zhao et al. (2023)

⁴ Caronge, M. A. et al. (2022)

$$CO_{2eq} = \sum_{i=1}^n (W_i \times CO_{2_i}) \quad (5)$$

Dimana:

$$CO_{2eq} = \text{Embodied carbon CO}_2 \text{ (kg.CO}_2\text{/m}^3\text{)}$$

$$W_i = \text{Berat material (kg/m}^3\text{)}$$

$$CO_{2_i} = \text{Faktor emisi untuk material (kg.CO}_2\text{/kg)}$$

2.8 Analisa gabungan setiap parameter

Penelitian ini menghubungkan kandungan karbon pada setiap campuran dengan kuat tekan, UPV, dan *resistivity*. Rumus 1, 2, dan 3 masing-masing memperlihatkan perbandingan antara kandungan karbon kuat tekan, UPV, dan *resistivity*.

Persamaan antara *embodied carbon* dengan kuat tekan diperlihatkan pada **Persamaan 6**.

$$RGKT = \frac{GHG}{KT} \quad (6)$$

Dimana:

$$RGKT = \text{Rasio antara GHG dengan KT (kg.CO}_2\text{/Kn.m)}$$

$$GHG = \text{Embodied Greenhouse Gas (efek rumah kaca) (kg.CO}_2\text{/m}^3\text{)}$$

$$KT = \text{Kuat tekan (Kn/m}^2\text{)}$$

Persamaan antara *embodied carbon* dengan UPV diperlihatkan pada **Persamaan 7.**

$$RGUPV = \frac{GHG}{UPV} \quad (7)$$

Dimana:

RGUPV = Rasio antara GHG dengan UPV (kg.CO₂.s/m⁴)

GHG = *Embodied Greenhouse Gas* (efek rumah kaca) (kg.CO₂/m³)

UPV = *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) (m/s)

Persamaan antara *embodied carbon* dengan *resistivity* diperlihatkan pada **Persamaan 8.**

$$RGR = \frac{GHG}{R} \quad (8)$$

Dimana:

RGR = Rasio antara GHG dengan R (kg.CO₂/Ωm⁴)

GHG = *Embodied Greenhouse Gas* (efek rumah kaca) (kg.CO₂/m³)

R = *Resistivity* (resistivitas) (Ωm)