

**PENGARUH PENGGUNAAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN
SUBSTITUSI SEMEN DAN PENAMBAHAN SERAT *POLYPROPYLENE*
TERHADAP SIFAT MEKANIK MORTAR**

(Skripsi)

Oleh

HELEN KANUWIJAYA

2215011076



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

PENGARUH PENGGUNAAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN DAN PENAMBAHAN SERAT *POLYPROPYLENE* TERHADAP SIFAT MEKANIK MORTAR

Oleh

HELEN KANUWIJAYA

Industri konstruksi saat ini mengalami perkembangan pesat dalam bidang teknologi material guna menghasilkan bangunan yang lebih kuat, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu upaya yang dilakukan adalah memanfaatkan *silica fume* sebagai bahan substitusi sebagian semen dan serat *polypropylene* sebagai bahan tambah untuk meningkatkan performa mortar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen serta penambahan serat *polypropylene* sebesar 0%, 0,02%, 0,04%, dan 0,06% terhadap volume benda uji untuk menghasilkan mortar dengan sifat mekanik terbaik. Pengujian yang dilakukan meliputi kelecakan (*workability*), absorpsi, kuat tekan, dan kuat lentur pada umur 28 hari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar *silica fume* dan serat *polypropylene* menyebabkan nilai *workability* mortar menurun, dengan nilai *flow* tertinggi sebesar 66,00% pada mortar normal dan terendah sebesar 5,00% pada variasi SF 20% dan PPF 0,06%. Pada pengujian sifat mekanik, nilai kuat tekan mortar normal sebesar 35,82 MPa, kemudian mencapai nilai optimum sebesar 47,81 MPa pada variasi SF 10% dan PPF 0,02%. Sementara itu, kuat lentur meningkat dari 10,81 MPa pada mortar normal, lalu optimum pada variasi SF 5% dan PPF 0,02% yaitu sebesar 17,19 MPa. Di sisi lain, hasil pengujian absorpsi mortar terus mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar *silica fume* dan serat *polypropylene*. Mortar normal memiliki nilai absorpsi sebesar 8,69%, kemudian menurun hingga mencapai 1,10% pada variasi SF 20% dan PPF 0,06%. Kombinasi *silica fume* 5–10% dan serat *polypropylene* 0,02% mampu menghasilkan performa mortar yang paling optimal.

Kata kunci: mortar, *silica fume*, serat *polypropylene*, kuat tekan, kuat lentur, absorpsi.

ABSTRACT

THE EFFECT OF USING SILICA FUME AS A CEMENT SUBSTITUTE AND THE ADDITION OF POLYPROPYLENE FIBER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR

By

HELEN KANUWIJAYA

The construction industry is currently experiencing rapid advancements in material technology to produce structures that are stronger, more efficient, and sustainable. One effort that can be implemented is the utilization of silica fume as a partial cement replacement and polypropylene fiber as an additive to improve mortar performance. This study aims to analyze the effect of silica fume variations of 0%, 5%, 10%, 15%, and 20% by cement weight and polypropylene fiber additions of 0%, 0.02%, 0.04%, and 0.06% by specimen volume to produce mortar with the best mechanical properties. The tests conducted included workability, absorption, compressive strength, and flexural strength at 28 days.

The results showed that increasing the silica fume and polypropylene fiber contents reduced the workability of mortar, with the highest flow value of 66.00% obtained in normal mortar and the lowest value of 5.00% obtained in the SF 20% and PPF 0.06% variation. In the mechanical property tests, the compressive strength of normal mortar was 35.82 MPa and reached an optimum value of 47.81 MPa at the SF 10% and PPF 0.02% variation. Meanwhile, the flexural strength increased from 10.81 MPa in normal mortar and reached an optimum value of 17.19 MPa at the SF 5% and PPF 0.02% variation. On the other hand, the absorption value continuously decreased with the increase of silica fume and polypropylene fiber contents. Normal mortar had an absorption value of 8.69%, which decreased to 1.10% at the SF 20% and PPF 0.06% variation. The combination of 5–10% silica fume and 0.02% polypropylene fiber was able to produce the most optimal mortar performance.

Keywords: mortar, silica fume, polypropylene fiber, compressive strength, flexural strength, absorption.

**PENGARUH PENGGUNAAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN
SUBSTITUSI SEMEN DAN PENAMBAHAN SERAT *POLYPROPYLENE*
TERHADAP SIFAT MEKANIK MORTAR**

Oleh

HELEN KANUWIJAYA

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

Judul Skripsi

: **PENGARUH PENGGUNAAN *SILICA FUME*
SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN
DAN PENAMBAHAN SERAT
POLYPROPYLENE TERHADAP SIFAT
MEKANIK MORTAR**

Nama Mahasiswa

: **Helen Kanuwijaya**

Nomor Pokok Mahasiswa : 2215011076

Program Studi

: S1 Teknik Sipil

Jurusan

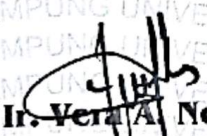
: Teknik Sipil

Fakultas

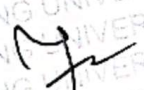
: Teknik



1. Komisi Pembimbing


**Ir. Vera A. Noorhidana, S.T.,
M.T., Ph.D.**

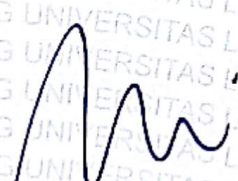
NIP 19740831 200003 2 002


Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.

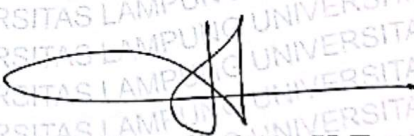
NIP 19721026 200003 1 001

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.

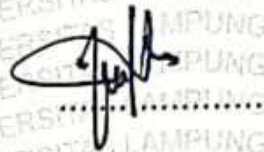
NIP 19741225 200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

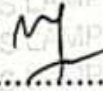
Ketua

: **Ir. Vera A. Noorhidana, S.T.,
M.T., Ph.D.**



Sekretaris

: **Dr. Eng. Mohd. Isneini, S.T., M.T.**



Penguji

Bukan Pembimbing

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



2. Dekan Fakultas Teknik



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

NIP 19691030 200003 1 001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **8 Juni 2026**

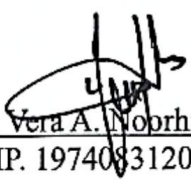
PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi saya yang berjudul "*Pengaruh Penggunaan Silica Fume Sebagai Bahan Substitusi Semen Dan Penambahan Serat Polypropylene Terhadap Sifat Mekanik Mortar*" adalah bagian dari penelitian Ibu Ir. Vera Agustriana Noorhidana, S.T., M.T., Ph.D. mengenai pengaruh *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap mortar.
2. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya maupun pendapat yang telah dipublikasikan oleh pihak lain, kecuali yang secara tertulis dan jelas dicantumkan sebagai rujukan serta disebutkan nama pengarangnya dan dimuat dalam daftar pustaka.
3. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat penyimpangan atau ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Lampung, termasuk pencabutan gelar yang telah diperoleh.

Bandar Lampung, 08 Juni 2026

Mengetahui
Dosen Pembimbing Skripsi


Ir. Vera A. Noorhidana, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197408312000032002



Helen Kanuwijaya
NPM. 2215011076

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kotabumi pada tanggal 06 Agustus 2004 dan merupakan anak kedua yang terlahir dari pasangan Bapak Henry Kanuwijaya dan Ibu Nurhayati. Penulis memiliki satu orang saudara, yaitu kakak yang bernama Richard Kanuwijaya. Penulis memulai jenjang pendidikan taman kanak-kanak di TK Nasional 3 Bahasa Budi Luhur Mataram yang diselesaikan pada tahun 2010, kemudian dilanjutkan ke pendidikan sekolah dasar di SD Nasional 3 Bahasa Budi Luhur Mataram yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu dilanjutkan ke pendidikan sekolah menengah pertama di SMP Nasional 3 Bahasa Budi Luhur Mataram pada tahun 2019, dan dilanjutkan menempuh pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 3 Mataram yang diselesaikan pada tahun 2022.

Penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung pada tahun 2022 melalui jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama perkuliahan, penulis berkesempatan menjadi asisten dosen di beberapa mata kuliah yaitu, statika, analisis statis tertentu, analisis statis tak tentu, dan balok beton bertulang, serta aktif dalam organisasi HIMATEKS (Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil) Universitas Lampung sebagai anggota departemen eksplorasi dan pengembangan. Selain itu penulis berkesempatan menjadi sekretaris pelaksana dalam acara tahunan terbesar Jurusan Teknik Sipil yaitu *The 9th Civil Brings Revolution*. Pada bulan Januari 2025, penulis mengikuti KKN (Kuliah Kerja Nyata) di Desa Budidaya, Kecamatan Sidomulyo, Lampung Selatan yang berlangsung selama 40 hari. Pada bulan Mei 2025, penulis juga melaksanakan KP (Kerja Praktik) di Proyek Pembangunan Masjid Nuurul Atsar II Lampung yang berlokasi di Jl. Batu Putuk, Kecamatan Teluk Betung Utara, Kota Bandar Lampung selama 3 bulan. Penulis mengambil tugas akhir dengan judul “Pengaruh Penggunaan *Silica Fume* Sebagai Bahan Substitusi Semen Dan Penambahan Serat *Polypropylene* Terhadap Sifat Mekanik Mortar”.

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil ‘Aalamiin

Segala puji dan syukur saya haturkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya. Setiap kemudahan yang hadir, setiap rintangan yang terlewati, adalah bagian dari kehendak dan pertolongan-Nya. Sebagai bentuk rasa syukur dan terima kasih, karya sederhana ini saya persembahkan dengan tulus kepada:

Papa dan Mama, yang selalu menjadi sumber doa tanpa henti serta menghadirkan kasih sayang yang tak terbatas dalam setiap langkah perjalanan hidup saya.

Dosen pembimbing, dosen penguji, serta seluruh dosen Teknik Sipil, yang telah memberikan ilmu, arahan, pengalaman, dan motivasi selama proses perkuliahan hingga penyusunan karya ini.

Sahabat dan teman-teman seperjuangan, serta almamater tercinta yang telah menjadi ruang bertumbuh dan menempa diri.

Semoga setiap upaya yang tertuang dalam karya ini membawa manfaat dan menjadi jejak awal menuju perjalanan yang lebih bermakna.

MOTTO

“Bermimpilah setinggi langit, jika engkau jatuh, engkau akan jatuh di antara bintang-bintang.”

(Soekarno)

“It always seems impossible until it’s done.”

(Nelson Mandela)

“Believe you can and you’re halfway there.”

(Theodore Roosevelt)

SANWACANA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Penggunaan *Silica Fume* Sebagai Bahan Substitusi Semen Dan Penambahan Serat *Polypropylene* Terhadap Sifat Mekanik Mortar”** dengan baik tepat pada waktunya. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Lebih dari itu, skripsi ini juga menjadi bagian dari proses belajar dan perjuangan penulis dalam mencapai cita-cita yang diharapkan.

Penulis menyadari bahwa perjalanan dalam menyusun skripsi ini tidaklah mudah dan tidak mungkin dapat dilalui seorang diri. Oleh karena itu, dengan penuh rasa syukur dan hormat, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M, selaku Rektor Universitas Lampung sekaligus Dosen Teknik Sipil.
2. Bapak Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
3. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.
4. Bapak Dr. Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Lampung.
5. Ibu Ir. Vera Agustriana Noorhidana, S.T., M.T., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan arahan, serta bimbingan, yang sangat berarti selama proses penyusunan skripsi ini.

6. Bapak Dr. Eng. Mohd. Isneini, M.T., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan saran, koreksi, dan motivasi sehingga skripsi ini dapat tersusun dengan lebih baik dan sistematis.
7. Bapak Prof. Ir. Masdar Helmi, S.T., D.E.A., Ph.D., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan evaluasi yang membangun demi penyempurnaan skripsi ini.
8. Bapak dan Ibu Dosen beserta Staf Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung atas ilmu, pelajaran dan pengalaman yang penulis terima.
9. Seluruh teknisi dan karyawan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik, Universitas Lampung yang turut membantu dan mendukung dalam melaksanakan penelitian skripsi ini.
10. Keluarga tercinta, terutama Papa, Mama, serta kakak, yang selalu menjadi sumber kasih sayang, kekuatan, dan tempat pulang terbaik bagi penulis. Terima kasih atas setiap doa yang tidak pernah terputus, pengorbanan yang tanpa pamrih, perhatian, kesabaran, serta dukungan yang selalu diberikan dalam setiap langkah penulis. Terima kasih karena selalu percaya dan tetap menemani penulis, bahkan di saat penulis merasa lelah dan ingin menyerah. Segala pencapaian hingga titik ini tidak akan berarti tanpa kehadiran dan cinta dari keluarga.
11. Orang terdekat penulis, sahabat-sahabat, serta rekan-rekan penelitian yang telah menemani penulis dalam berbagai cerita selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih karena telah menjadi tempat berbagi keluh kesah, memberikan semangat di tengah tekanan, serta menghadirkan banyak hal baik di saat hari-hari terasa berat. Kehadiran kalian memberikan arti bahwa perjuangan ini tidak dijalani sendirian. Terima kasih untuk setiap perhatian kecil, bantuan, dan momen kebersamaan yang secara tidak langsung membantu penulis bertahan hingga sampai pada titik ini.
12. Keluarga besar Teknik Sipil Angkatan 2022 (TEGAS 22) yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan penulis selama menempuh masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, canda tawa, serta berbagai pengalaman yang telah dilewati bersama, baik dalam suka maupun duka. Setiap pertemuan, perjuangan, dan kenangan yang tercipta bersama TEGAS 22

memberikan warna dan makna tersendiri dalam perjalanan ini. Semoga segala cerita yang pernah dilalui bersama dapat selalu dikenang sebagai bagian indah yang tidak terlupakan.

13. Semua pihak yang telah membantu dan terlibat dalam proses penyusunan skripsi ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Penulis mengucapkan terima kasih atas segala dukungan dan kontribusi yang telah diberikan.
14. Dan terakhir, tak lupa untuk diri saya sendiri, apresiasi sebesar-besarnya karena telah mampu melewati begitu banyak hal hingga berada di titik ini. Terima kasih untuk segala usaha, air mata, doa, dan perjuangan yang sering kali harus dijalani dalam diam. Banyak hal yang mungkin tidak terlihat oleh orang lain, namun berhasil dilalui dengan penuh ketulusan dan harapan. Semoga setiap proses yang telah dilewati menjadi pengingat bahwa penulis mampu menghadapi hal-hal yang sebelumnya terasa mustahil.

Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna serta menambah wawasan bagi pembaca dan dapat menjadi referensi bagi pihak berkepentingan.

Bandar Lampung, 08 Juni 2026
Penulis,

Helen Kanuwijaya
NPM. 2215011076

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iv
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	5
1.5. Manfaat Penelitian	6
1.6. Hipotesis Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Mortar	7
2.2. Bahan Penyusun Mortar	10
2.2.1. Semen PCC (<i>Portland Composite Cement</i>)	10
2.2.2. Agregat Halus	11
2.2.3. Air	13
2.3. Bahan Tambahan Mineral	14
2.4. Bahan Tambahan Serat	16
2.5. Kuat Tekan Mortar	18
2.5. Uji Kuat Lentur	19
2.6. Penelitian Terdahulu	20
III. METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1. Umum	23
3.2. Alat	24
3.3. Bahan	30
3.4. Prosedur Pelaksanaan Penelitian	32
3.4.1. Persiapan Alat dan Bahan	32
3.4.2. Pemeriksaan Bahan	33
3.4.3. Perencanaan Campuran	33
3.4.4. Pembuatan Benda Uji	34
3.4.5. Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>)	42
3.4.6. Pelaksanaan Pengujian	43
3.4.7. Analisis Hasil Penelitian	46
3.5. Diagram Alir Penelitian	47

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1. Umum	48
4.2. Hasil Pengujian Material.....	48
4.3. Keleccakan (<i>Workability</i>)	49
4.3.1. Pengaruh <i>Silica Fume</i> terhadap <i>Workability</i> Mortar.....	51
4.3.2. Pengaruh Serat <i>Polypropylene</i> terhadap <i>Workability</i> Mortar	53
4.3.3. Evaluasi <i>Workability</i> dan Implikasi Perancangan Campuran	56
4.4. Seleksi Data Hasil Pengujian Mekanik (<i>Metode Dixon Criteria</i>)	57
4.5. Kuat Tekan Kubus Mortar.....	61
4.5.1. Pengaruh <i>Silica Fume</i> terhadap Kuat Tekan Mortar.....	62
4.5.2. Pengaruh Serat <i>Polypropylene</i> terhadap Kuat Tekan Mortar	65
4.5.3. Nilai Optimum dan Pola Keruntuhan Benda Uji	67
4.6. Kuat Lentur Balok Mortar	69
4.6.1. Pengaruh <i>Silica Fume</i> terhadap Kuat Lentur Mortar	70
4.6.2. Pengaruh Serat <i>Polypropylene</i> terhadap Kuat Lentur Mortar.....	73
4.6.3. Nilai Optimum dan Pola Keruntuhan Benda Uji	75
4.7. Penyerapan Air (Absorpsi).....	77
4.7.1. Pengaruh <i>Silica Fume</i> terhadap Penyerapan Air Mortar	78
4.7.2. Pengaruh Serat <i>Polypropylene</i> terhadap Penyerapan Air Mortar.....	81
4.7.3. Nilai Absorpsi Optimum dan Korelasinya dengan Kuat Mekanik.....	83
4.8. Kadar Optimum <i>Silica Fume</i> dan Serat <i>Polypropylene</i>	84
V. KESIMPULAN DAN SARAN	85
5.1. Kesimpulan	85
5.2. Saran	86

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A (UJI BAHAN)

LAMPIRAN B (KOMPOSISI CAMPURAN MORTAR)

LAMPIRAN C (HASIL PENGUJIAN)

LAMPIRAN D (SPESIFIKASI BAHAN TAMBAH)

LAMPIRAN E (PELAKSANAAN DI LABORATORIUM)

LAMPIRAN F (LEMBAR ASISTENSI)

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1 Persyaratan spesifikasi mortar.....	10
2.2 Persentase oksida semen	11
2.3 Spesifikasi gradasi pasir	12
2.4 Sifat fisik <i>silica fume</i>	15
2.5 Kandungan kimia <i>silica fume</i>	16
3.1 Komposisi campuran mortar per 1 m ³	34
3.2 Variasi benda uji kubus dan balok.....	35
4.1 Hasil pengujian material	49
4.2 Hasil pengujian dan perhitungan <i>flow</i> mortar	50
4.3 Hasil seleksi data pengujian kuat tekan mortar menggunakan metode <i>dixon criteria</i>	59
4.4 Hasil seleksi data pengujian kuat lentur mortar menggunakan metode <i>dixon criteria</i>	60
4.5 Hasil pengujian dan perhitungan kuat tekan mortar	62
4.6 Hasil pengujian dan perhitungan kuat lentur mortar.....	70
4.7 Hasil pengujian dan perhitungan absorpsi mortar.....	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Uji kuat tekan	19
2.2 Uji kuat lentur	20
3.1 Saringan	24
3.2 Oven	24
3.3 (a) Timbangan dengan ketelitian pembacaan 1 gram; (b) Timbangan dengan ketelitian pembacaan 0,1 gram.....	25
3.4 Cetakan benda uji	25
3.5 <i>Picnometer</i>	26
3.6 Cetakan kerucut pasir	26
3.7 Mesin pengaduk mortar.....	27
3.8 <i>Flow table</i>	27
3.9 <i>Compression testing machine</i>	28
3.10 <i>Flexural testing machine</i>	28
3.11 <i>Loading frame</i>	29
3.12 Bak perendam.....	29
3.13 Semen.....	30
3.14 Agregat halus.....	30
3.15 Air.....	31
3.16 <i>Silica fume</i> dalam kontainer; (b) <i>Silica fume</i> dalam kemasan.....	31
3.17 Serat <i>polypropylene</i>	32
3.18 (a) Benda uji mortar kubus dimensi 50 x 50 x 50 mm; (b) Benda uji mortar balok dimenci 40 x 40 x 160 mm.....	35
3.19 Bahan campuran mortar	36
3.20 Memasukkan pasir, semen, dan <i>silica fume</i>	36
3.21 Memasukkan air sekitar 75%	37
3.22 Memasukkan sisa air dan serat <i>polypropylene</i>	37

3.23 Menyiapkan alat <i>flow table</i>	38
3.24 Memasukkan mortar ke dalam <i>flow mold</i>	38
3.25 Melepaskan cetakan <i>flow mold</i>	39
3.26 Menghidupkan mesin <i>flow table</i>	39
3.27 Melakukan pengukuran pada 4 sisi	40
3.28 Mengoleskan oli pada cetakan	40
3.29 Memasukkan adukan mortar ke dalam cetakan	41
3.30 Melepaskan benda uji.....	41
3.31 Memberi kode benda uji.....	42
3.32 Perawatan benda uji	42
3.33 Diagram alir	47
4.1 Grafik pengaruh SF terhadap <i>workability</i> mortar dengan variasi PPF	51
4.2 Grafik pengaruh PPF terhadap <i>workability</i> mortar dengan variasi SF	54
4.3 (a) <i>Flow</i> mortar tanpa SF dan PPF; (b) <i>Flow</i> mortar dengan SF dan PPF	56
4.4 Grafik pengaruh SF terhadap kuat tekan mortar dengan variasi PPF	63
4.5 Grafik pengaruh PPF terhadap kuat tekan mortar dengan variasi SF	65
4.6 (a) Benda uji mortar kubus tanpa SF dan PPF; (b) Benda uji mortar kubus dengan SF dan PPF	68
4.7 Grafik pengaruh SF terhadap kuat lentur mortar dengan variasi PPF	71
4.8 Grafik pengaruh PPF terhadap kuat lentur mortar dengan variasi SF	73
4.9 (a) Benda uji mortar balok tanpa SF dan PPF; (b) Benda uji mortar balok dengan SF dan PPF	76
4.10 Grafik pengaruh SF terhadap absorpsi mortar dengan variasi PPF	79
4.11 Grafik pengaruh PPF terhadap absorpsi mortar dengan variasi SF	81

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri konstruksi saat ini mengalami perkembangan yang pesat dalam bidang teknologi material guna menghasilkan bangunan yang lebih kuat, efisien, dan berkelanjutan. Pertumbuhan populasi dan urbanisasi mendorong peningkatan permintaan terhadap material yang tidak hanya memiliki kinerja mekanik tinggi, tetapi juga ramah lingkungan. Laporan *Global Status Report for Buildings and Construction* menyebutkan bahwa industri konstruksi masih menyumbang emisi yang signifikan dan membutuhkan inovasi material untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan kualitas bangunan (UNEP, 2020). Salah satu tren utama adalah pemanfaatan bahan alternatif untuk mengurangi emisi karbon dan meningkatkan durabilitas struktur, seperti penggantian sebagian semen dengan bahan pozzolan dan penambahan serat untuk memperbaiki sifat mekanik (Mehta & Monteiro, 2014).

Mortar merupakan salah satu material penting dalam pekerjaan konstruksi dengan komposisi utamanya terdiri dari semen, pasir halus, dan air, karena berfungsi sebagai perekat antar elemen bangunan seperti bata, batako, maupun plesteran. Sifat mekanik mortar meliputi kekuatan kompresi, kekuatan lentur, dan modulus elastisitas, yang menentukan kemampuan mortar dalam menahan beban dan deformasi (Neville, 2011). Mortar memiliki keunggulan seperti kemudahan aplikasi, kekuatan tekan yang baik, dan kemampuan mengisi celah antar elemen struktural. Mortar berperan penting dalam konstruksi karena memberikan kekakuan dan kekuatan awal, namun sering kali menghadapi tantangan seperti retak dan degradasi akibat

lingkungan agresif (ACI Committee 318, 2019). Keterbatasan tersebut mendorong banyak penelitian yang berfokus pada modifikasi komposisi mortar dengan menambahkan material tambahan yang dapat memperbaiki sifat fisik dan mekaniknya. Upaya ini menjadi penting seiring meningkatnya kebutuhan material yang lebih kuat, lebih tahan terhadap penetrasi air, dan memiliki perilaku retak yang lebih baik (Badalyan *et al.*, 2024).

Salah satu inovasi yang banyak digunakan untuk meningkatkan performa mortar adalah penambahan *silica fume* sebagai bahan substitusi sebagian semen. *Silica fume* merupakan hasil sampingan dari proses produksi silikon atau ferrosilikon yang memiliki ukuran partikel sangat halus, dengan kandungan utama silikon dioksida (SiO_2) melebihi 85% (Tarru., 2018). Standar ASTM C1240-20 menspesifikasikan persyaratan *silica fume* untuk penggunaan dalam campuran semen, dengan substitusi optimal hingga 15% yang dapat meningkatkan kekuatan kompresi hingga 20–30% (Siddique & Khan, 2011). Namun, penggunaan *silica fume* dapat memengaruhi *workability* mortar, partikel halusnya cenderung menyerap air lebih banyak, sehingga mengurangi aliran campuran dan memerlukan penambahan *superplasticizer* untuk mempertahankan *workability* (ACI Committee 234, 2012). Penggunaan *silica fume* sebagai substitusi semen mampu meningkatkan kuat tekan dan menurunkan nilai resapan air pada mortar karena terbentuknya struktur yang lebih rapat dan homogen (Sutriono *et al.*, 2018).

Selain bahan pozzolanik, penambahan serat sintetis juga menjadi salah satu strategi efektif untuk meningkatkan ketahanan mortar terhadap retak. Serat *polypropylene* merupakan material polimer termoplastik yang ringan, memiliki ketahanan kimia baik, dan tidak mudah menyerap air (Poerwodihardjo & Dwi, 2016). Serat ini bekerja sebagai penguat mikro yang menahan perambatan retak akibat penyusutan maupun tegangan tarik yang timbul pada tahap pengerasan awal, distribusi serat yang merata di dalam matriks mortar meningkatkan daktilitas dan ketangguhan material, sekaligus memperbaiki perilaku pasca-retak (Abusogi *et al.*, 2023). Penggunaan serat

polypropylene dalam jumlah tertentu juga terbukti mampu meningkatkan ketahanan terhadap beban dinamis dan kondisi lingkungan ekstrem (Segre *et al.*, 1998). Penambahan serat *polypropylene* dapat memperbaiki kuat tekan dan kuat lentur, meskipun peningkatan jumlah serat dapat menurunkan *workability* karena meningkatnya kohesi dan hambatan aliran pada campuran (Suma *et al.*, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serat harus diatur secara proporsional agar tidak mengganggu kemudahan pengerjaan.

Penggunaan *silica fume* dan serat *polypropylene* dalam penelitian ini didasarkan pada kinerja material yang saling melengkapi. *Silica fume* dipilih karena kemampuannya dalam memperbaiki mikrostruktur mortar, meningkatkan kekuatan, serta mengurangi porositas, sehingga diharapkan dapat menghasilkan mortar dengan durabilitas yang lebih baik. Di sisi lain, serat *polypropylene* digunakan karena kemampuannya dalam meningkatkan ketahanan retak dan sifat mekanik mortar. Kombinasi kedua material ini diharapkan dapat bekerja secara sinergis dalam meningkatkan kinerja mortar secara keseluruhan.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa kombinasi antara *silica fume* dan serat *polypropylene* dapat memberikan efek sinergis terhadap peningkatan sifat mekanik dan durabilitas mortar. *Silica fume* meningkatkan kepadatan matriks, sementara serat *polypropylene* mengkompensasi kerapuhan yang mungkin timbul, sehingga mortar menjadi lebih kuat secara keseluruhan dan cocok untuk aplikasi konstruksi modern (ACI Committee 544, 2018). *Silica fume* memperbaiki kepadatan matriks semen, sedangkan serat *polypropylene* meningkatkan ketangguhan dan kapasitas lentur (Akbulut *et al.*, 2024). Sementara itu, nilai penyerapan air mortar dapat berkurang secara signifikan dengan kombinasi ini, karena *silica fume* mengisi pori mikro dan serat *polypropylene* memperkuat struktur, sehingga mortar lebih tahan terhadap infiltrasi air dan korosi (Siddique, 2008).

Namun demikian, hingga saat ini masih terdapat kesenjangan penelitian terkait variasi proporsi optimal *silica fume* dan serat *polypropylene* yang dapat menghasilkan kinerja terbaik pada mortar. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada beton struktural daripada mortar, sehingga data empiris mengenai kombinasi kedua bahan ini pada mortar masih terbatas. Selain itu, penelitian terdahulu menunjukkan hasil kadar optimum yang bervariasi dan belum konsisten dalam menjelaskan pengaruhnya terhadap kuat tekan dan kuat lentur mortar. Hal ini menunjukkan perlunya kajian eksperimental lebih lanjut untuk menentukan komposisi yang paling optimum. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *silica fume* sebagai bahan substitusi sebagian semen dan penambahan serat *polypropylene* terhadap karakteristik mortar.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas, diperoleh rumusan masalah yang hendak dibahas adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap sifat mekanik, meliputi kuat tekan dan kuat lentur mortar?
2. Bagaimana pengaruh variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap sifat fisik, meliputi aspek kemudahan pengerjaannya (*workability*) dan nilai penyerapan air (absorpsi)?
3. Berapakah kadar optimum variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* agar menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur mortar yang paling optimal?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan dengan rumusan masalah diatas, terdapat tujuan yang hendak dicapai yakni:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap sifat mekanik, meliputi kuat tekan dan kuat lentur mortar.
2. Mengetahui dan menganalisis pengaruh variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap sifat fisik, meliputi aspek kemudahan pengerjaannya (*workability*) dan nilai penyerapan air (absorpsi).
3. Menentukan kadar optimum variasi penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene* agar menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur mortar yang paling optimal.

1.4. Batasan Masalah

Untuk memastikan penelitian ini terarah pada tujuan yang telah ditetapkan, maka diperlukan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian hanya difokuskan pada pada mortar dengan campuran semen *portland*, air, agregat halus, *silica fume*, dan serat *polypropylene*, tanpa penambahan bahan aditif lain.
2. Variasi persentase *silica fume* dibatasi pada beberapa kadar tertentu yaitu, 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% dari berat semen. Rentang ini dipilih karena 5–15% merupakan kadar yang umum digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik mortar, 0% sebagai campuran kontrol, dan 20% untuk melihat batas pengaruh maksimum penambahan *silica fume*.
3. Variasi persentase serat *polypropylene* dibatasi pada beberapa kadar tertentu yaitu, 0%, 0,02%, 0,04% dan 0,06% dari volume benda uji. Dengan pertimbangan bahwa berdasarkan penelitian terdahulu, kadar 0,04% menunjukkan nilai optimum. Kadar 0,06% digunakan untuk mengevaluasi batas atas pengaruh penambahan serat, dan 0% sebagai campuran kontrol.

4. Pengujian sifat mekanik berupa uji kuat tekan dan uji kuat lentur
5. Menggunakan benda uji kubus berukuran 50 x 50 x 50 mm untuk uji kuat tekan dan benda uji balok berukuran 40 mm x 40 x 160 mm untuk uji kuat lentur.
6. Pengujian benda uji mortar dilakukan pada umur 28 hari.
7. Menggunakan semen dan pasir dengan perbandingan 1:2,5.
8. Menggunakan Faktor Air Semen (FAS) sebanyak 0,4.
9. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Memberikan wawasan lebih mendalam, khususnya mengenai pengaruh penggunaan *silica fume* sebagai bahan substitusi semen dan penambahan serat *polypropylene* terhadap sifat mekanik mortar.
2. Sebagai sumber acuan dan bahan referensi yang dapat digunakan untuk mendukung serta mengembangkan penelitian selanjutnya agar memperoleh kualitas yang lebih baik.

1.6. Hipotesis Penelitian

Penggunaan *silica fume* sebagai bahan substitusi sebagian semen dan penambahan serat *polypropylene* berpengaruh dalam meningkatkan sifat mekanik mortar, berupa kuat tekan dan kuat lentur, menurunkan penyerapan air, serta mempengaruhi kemudahan pengerjaannya (*workability*) tanpa menurunkan kualitas pengerjaan secara signifikan sesuai dengan komposisi tertentu.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mortar

Mortar merupakan campuran homogen yang terdiri atas semen sebagai pengikat hidrolis, agregat halus, dan air. Material ini berfungsi sebagai pengikat unit pasangan, pengisi rongga, serta lapisan pelindung pada konstruksi bangunan. Sifat dasar mortar ditentukan oleh karakteristik semen, kualitas agregat, dan rasio air-semen yang mengatur kepadatan dan porositas material (Neville, 2011).

Secara material, performa mortar bergantung pada interaksi antara pasta semen dan agregat halus. Agregat halus berfungsi sebagai pengisi utama yang meningkatkan stabilitas volume dan mengurangi penyusutan. ASTM C144 (ASTM International, 2017) menetapkan bahwa agregat untuk mortar harus memiliki gradasi seragam dan bebas kontaminan karena ketidaksesuaian gradasi dapat meningkatkan porositas dan menurunkan kekuatan mekanik. Dalam penelitian Rahman & Ghani (2014) menunjukkan bahwa kualitas agregat halus berpengaruh langsung terhadap *workability*, ikatan antarunit pasangan, serta kapasitas beban mortar.

Semen *portland* dalam mortar mengalami reaksi hidrasi yang menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang menjadi penentu utama kekuatan material. Struktur mikro yang terbentuk pada fase awal hidrasi memengaruhi porositas, permeabilitas, dan durabilitas mortar (Mehta & Monteiro, 2014). Kelebihan air dalam campuran dapat meningkatkan jarak antartikel, memperbesar pori kapiler, dan menurunkan kuat tekan (Hossain & Lachemi, 2010).

Menurut Tjokrodinuljo (2007), mortar dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan bahan pengikat dan fungsinya, yaitu;

1. Mortar Lumpur

Mortar ini terdiri dari campuran tanah liat dan air tanpa bahan pengikat hidrolis. Biasa digunakan pada pekerjaan tradisional atau bangunan sementara karena kekuatannya rendah dan tidak tahan terhadap air.

2. Mortar Semen

Merupakan campuran semen, pasir, dan air dengan perbandingan volume antara semen dan pasir umumnya 1:2 hingga 1:6. Jenis ini paling banyak digunakan dalam konstruksi modern karena memiliki kekuatan tinggi, daya rekat baik, dan tahan cuaca. Cocok untuk pasangan bata, plesteran, dan pekerjaan struktural.

3. Mortar Kapur

Mortar ini menggunakan kapur sebagai pengikat yang dicampur dengan pasir dan air. Proporsi pasir biasanya sekitar tiga kali volume kapur. Sifatnya plastis dan mudah dikerjakan, tetapi kekuatannya lebih rendah dibanding mortar semen.

4. Mortar Ringan

Menggunakan agregat ringan seperti batu apung, perlit, atau vermikulit untuk menghasilkan berat jenis rendah. Umumnya digunakan pada elemen non-struktural, terutama plesteran pada bangunan bertingkat.

5. Mortar Tahan Api

Dibuat dari material tahan panas seperti semen alumina tinggi dan agregat tahan api. Digunakan pada konstruksi yang terpapar suhu tinggi, misalnya tungku, cerobong, dan dapur industri.

Menurut ASTM C270-14a, standar mortar berdasarkan kekuatannya dapat dibedakan atas beberapa tipe, yaitu:

1. Mortar Tipe M

Mortar tipe M dikategorikan sebagai mortar dengan kapasitas tekan tinggi dan sesuai untuk pasangan, baik bertulang maupun tanpa tulangan, yang

direncanakan menanggung beban tekan besar. Nilai kuat tekan minimumnya ditetapkan pada 17,2 MPa.

2. Mortar Tipe S

Mortar tipe S direkomendasikan untuk elemen struktur yang memikul beban tekan menengah namun memerlukan kekuatan lentur dan daya lekat tinggi untuk menahan tekanan lateral dari tanah, angin, maupun gempa. Dengan tingkat keawetan yang baik, tipe ini sesuai digunakan pada konstruksi yang berada pada atau di bawah permukaan tanah serta yang bersentuhan langsung dengan tanah, seperti pondasi, dinding penahan, perkerasan, saluran drainase, dan *manhole*. Mortar ini memiliki kuat tekan minimum sebesar 12,4 MPa.

3. Mortar Tipe N

Mortar tipe N adalah mortar berkekuatan sedang yang banyak digunakan untuk pekerjaan pasangan di atas permukaan tanah. Jenis ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban, baik di ruang dalam maupun luar. Kombinasi kekuatan tekan, kekuatan lentur, serta tingkat pengerjaan yang seimbang menjadikan mortar tipe N sesuai untuk sebagian besar aplikasi pasangan. Kuat tekan minimumnya ditetapkan pada 5,2 MPa.

4. Mortar Tipe O

Mortar tipe O merupakan mortar berkadar kapur tinggi dengan kekuatan tekan relatif rendah. Jenis ini direkomendasikan untuk pasangan interior maupun eksterior yang tidak berfungsi sebagai elemen penahan beban dan tidak mengalami kondisi pembekuan saat lembap atau jenuh air. Mortar tipe O umum dipakai untuk pekerjaan perbaikan lokal karena tingkat keterkerjaannya baik dan biaya penggunaannya cukup ekonomis. Nilai kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

Persyaratan spesifikasi properti mortar dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Persyaratan spesifikasi mortar

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

(Sumber: ASTM C270-14a)

2.2. Bahan Penyusun Mortar

2.2.1. Semen PCC (*Portland Composite Cement*)

Semen *Portland* Komposit (PCC) merupakan jenis semen hidrolik yang dikembangkan dari semen *portland* biasa dengan penambahan bahan anorganik tertentu untuk meningkatkan sifat mekanis dan durabilitasnya. PCC dapat diperoleh melalui dua cara, yaitu dengan menggiling klinker semen *portland* bersama gipsum dan satu atau lebih bahan anorganik tambahan, atau dengan mencampurkan bubuk semen *portland* dengan bubuk bahan anorganik. Bahan anorganik tersebut dapat berupa terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat, atau batu kapur, dengan total kandungan bahan anorganik berkisar antara 6% hingga 35% dari massa semen *portland* komposit. (Susanto *et al.*, 2019). Kandungan silika yang tinggi pada pozzolan menyebabkan semen ini memiliki waktu pengerasan awal

yang lebih lambat dan panas hidrasi rendah, namun kekuatan beton pada umur 28 hari dapat meningkat secara signifikan.

Walaupun kekuatan awal PCC lebih rendah dibandingkan semen *portland* biasa, perawatan yang baik dan rutin dapat menghasilkan kekuatan akhir yang hampir setara. Selain itu, sifat pozzolan yang mampu mengikat kalsium hidroksida membuat beton lebih tahan terhadap serangan sulfat, serta umumnya lebih tahan terhadap reaksi alkali-agregat dibandingkan semen *portland* konvensional dalam kondisi tertentu. Dengan karakteristik tersebut, PCC banyak digunakan dalam konstruksi yang membutuhkan durabilitas tinggi, seperti beton ringan, mortar tahan sulfat, atau struktur yang terpapar kondisi agresif.

Tabel 2.2 Persentase oksida semen

Oksida	Jumlah (%)
Kapur, CaO	60–65
Silika, SiO ₂	17–25
Alumina, Al ₂ O ₃	3,0–8,0
Besi, Fe ₂ O ₃	0,5–6
Sulfur, So ₃	1,0–2,0
Potash, Na ₂ O + K ₂ O	0,5–1

(Sumber: Tjokrodinuljo, 1996)

2.2.2. Agregat Halus

Agregat halus adalah material granular yang lolos dari saringan berukuran 4,75 mm (No. 4), baik yang berasal dari bahan alami seperti pasir sungai maupun dari hasil pemecahan batuan (pasir buatan). Menurut SNI 03-2461-2002, agregat halus merupakan butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran beton atau mortar, dengan batas ukuran maksimum sesuai dengan ketentuan gradasi standar. Sementara itu, ASTM C33-18 juga mendefinisikan

agregat halus sebagai material granular yang lolos dari saringan 4,75 mm dan tertahan pada saringan 75 μ m (No. 200). Agregat halus harus memenuhi syarat mutu tertentu, Menurut SK SNI S-04-1989-F, agregat halus yang digunakan harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Agregat halus terdiri dari butiran yang tajam dan keras.
2. Agregat halus harus bersifat kekal.
3. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat keringnya). Apabila lebih maka agregat halus perlu dicuci.
4. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan organik yang terlalu banyak

Salah satu faktor yang sering diabaikan namun sangat berpengaruh terhadap kualitas mortar adalah gradasi agregat halus. Gradasi yang baik memastikan setiap celah antarpartikel terisi sempurna. Agregat halus berfungsi sebagai bahan pengisi, yaitu untuk menutup rongga udara yang ada di dalam campuran mortar. Distribusi ukuran butiran pasir yang seimbang mampu mengoptimalkan kelecakan, mengurangi kebutuhan air dan semen, serta menekan porositas mortar. Karena itu, pengendalian gradasi agregat halus menjadi langkah penting dalam memastikan mortar memiliki mutu yang stabil, efisien, dan tahan lama. Gradasi standar agregat halus menurut ASTM C-33 terdapat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi gradasi pasir

Ukuran saringan	Persentase lolos saringan (%)
3/8 in (9,50 mm)	100
No. 4 (4,75 mm)	95–100
No. 8 (2,36 mm)	80–100
No. 16 (1,18 mm)	50–85
No. 30 (0,6 mm)	25–60
No. 50 (0,3 mm)	10–30
No. 100 (0,15 mm)	2–10

(Sumber: ASTM C-33)

2.2.3. Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam pembuatan mortar yang berfungsi tidak hanya sebagai bahan pencampur, tetapi juga sebagai elemen penting dalam proses kimiawi antara semen dan air yang disebut hidrasi. Agar dapat bereaksi sempurna dengan semen, jumlah air yang dibutuhkan hanya sekitar 25% dari berat semen. Selain digunakan dalam proses pencampuran, air juga berperan penting dalam tahap perawatan beton, yaitu dengan melakukan pembasahan setelah pengecoran (Tjokrodinuljo, 1996). Dalam proses pembuatan mortar, air memiliki beberapa fungsi penting antara lain:

1. Sebagai media reaksi hidrasi, yaitu memungkinkan terjadinya reaksi kimia antara semen dan air menjadi pasta semen dan akan mengeras setelah beberapa waktu tertentu.
2. Memberikan kelecakan (*workability*) pada adukan mortar sehingga mudah diaduk dan diaplikasikan.
3. Mendukung proses perawatan (*curing*) dengan menjaga kelembaban mortar setelah diaplikasikan sehingga pengerasan berlangsung sempurna dan retak dini dapat dicegah.
4. Menentukan mutu akhir mortar, karena jumlah air yang terlalu banyak atau terlalu sedikit dapat memengaruhi kekuatan tekan, daya rekat, dan keawetan hasil akhir

Menurut SNI 03-2847-2002, air yang digunakan dalam campuran mortar harus memenuhi standar kualitas tertentu agar tidak menurunkan kekuatan dan mutu hasilnya. Air perlu diperiksa kandungan mineralnya terlebih dahulu dan sebaiknya menggunakan air bersih yang layak minum. Air tersebut harus bebas dari garam, minyak, bahan kimia, serta klorida, dengan kandungan sulfat tidak melebihi 1 gram per liter. Selain itu, kualitas air diharapkan minimal 90% dari air standar agar kuat tekan mortar tetap optimal.

2.3. Bahan Tambahan Mineral

Penggunaan bahan tambahan mineral bertujuan untuk meningkatkan kinerja mortar, baik dari segi kekuatan, durabilitas, maupun efisiensi penggunaan semen. Bahan ini umumnya digunakan sebagai substitusi sebagian semen dan dikenal juga sebagai *Supplementary Cementitious Materials* (SCM). Beberapa jenis bahan tambahan mineral yang umum digunakan dalam campuran mortar antara lain:

a. *Fly Ash*

Fly ash merupakan bahan sisa hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap, yang memiliki kandungan silika, alumina, dan oksida besi. Berdasarkan ASTM C618, *fly ash* diklasifikasikan menjadi *fly ash* kelas F dan kelas C, yang dibedakan berdasarkan kandungan kalsium oksida (CaO). *Fly ash* kelas F umumnya memiliki kandungan CaO rendah dan bersifat pozzolan murni, sedangkan *fly ash* kelas C memiliki kandungan CaO lebih tinggi. Menurut ACI Committee 226, *fly ash* memiliki ukuran butiran yang relatif halus, dengan persentase partikel yang lolos ayakan No. 325 (45 μm) berkisar antara 5–27%. *Fly ash* memiliki berat jenis sekitar 2,15–2,8 dan umumnya berwarna abu-abu hingga kehitaman. Penambahan *fly ash* dalam mortar dapat meningkatkan kuat tekan jangka panjang, serta meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia. Namun, penggunaan *fly ash* cenderung memperlambat perkembangan kuat awal, sehingga perlu adanya perencanaan campuran yang sesuai.

b. *Slag (Ground Granulated Blast Furnace Slag)*

Slag merupakan produk sampingan dari proses pembuatan baja di tungku *blast furnace*. Menurut ASTM C989, *slag* bersifat hidrolis laten, yaitu mampu bereaksi dengan air dan membentuk senyawa pengikat ketika diaktifkan oleh alkali dari semen. Penggunaan *slag* dapat memperbaiki daya tahan mortar terhadap korosi sehingga dapat bertahan di lingkungan dengan suhu yang ekstrem. Partikel *slag* yang halus berkontribusi dalam memperbaiki kepadatan mikrostruktur mortar. Namun, seperti halnya *fly*

ash, *slag* dapat memperlambat perkembangan kuat awal apabila digunakan dalam kadar tinggi.

c. *Silica Fume*

Menurut ASTM C618-86, *silica fume* adalah bahan dengan kandungan SiO₂ lebih dari 85%. Partikel *silica fume* berbentuk sangat halus, dengan diameter sekitar 0,1 µm, lebih kecil dibandingkan semen. *Silica fume* mampu memperbaiki mikrostruktur mortar, sehingga menghasilkan kekuatan tekan, tarik belah, dan lentur yang lebih tinggi dibanding mortar tanpa bahan tambahan. Peningkatan ini terjadi karena terbentuknya kalsium silikat hidrat (C-S-H) dalam jumlah lebih banyak dan pori-pori yang lebih rapat. Dari segi durabilitas, mortar dengan *silica fume* memiliki ketahanan lebih baik terhadap serangan kimia, seperti sulfat dan klorida, serta lebih tahan terhadap reaksi alkali-agregat. Penurunan porositas juga membuat mortar lebih kedap air dan tahan terhadap pelapukan lingkungan. Dalam hal proporsi penggunaan, *silica fume* umumnya ditambahkan sebagai bahan substitusi semen sebesar 5–15% dari berat semen, sesuai rekomendasi ASTM C1240. Penggunaan yang melebihi batas tersebut dapat menurunkan *workability* dan menyulitkan proses pengerjaan. Adapun sifat fisik dan kandungan kimia dari *silica fume* yang dapat dilihat pada tabel 2.3 dan 2.4 dibawah ini.

Tabel 2.4 Sifat fisik *silica fume*

Sifat fisik	Nilai
Berat jenis	2,02
Rata-rata ukuran partikel (µm)	0,1
Lolos ayakan no. 25 (%)	99,0
Keasaman (pH)	7,3

(Sumber: Yogendran et al., 1987)

Tabel 2.5 Kandungan kimia *silica fume*

Nama senyawa kimia	Persentase (%)
Silikon dioksida, SiO ₂	92–94
Karbon, C	0,61
Besi oksida, Fe ₂ O ₃	0,10–0,50
Kalsium oksida, CaO	0,10–0,15
Aluminium oksida, Al ₂ O ₃	0,20–0,40
Mangan(II) oksida, MnO	0,008
Magnesium oksida, MgO	0,10–0,20
Kalsium oksida, K ₂ O	0,10
Natrium dioksida, Na ₂ O	0,10

(Sumber: Yogendran et al., 1987)

2.4. Bahan Tambahan Serat

Serat ditambahkan ke dalam mortar untuk meningkatkan sifat mekanik, terutama dalam menahan retak dan beban lentur. Serat bekerja dengan mekanisme penyaluran dan penahan tegangan pada retakan mikro. Menurut ACI Committee 544, terdapat 4 macam serat yang digunakan dalam campuran beton untuk perkuatan, antara lain:

1. SFRC (*Steel Fiber Reinforced Concrete*)
2. GFRF (*Glass Fiber Reinforced Concrete*)
3. SNFRC (*Synthetic Fiber Reinforced Concrete*)
4. NFRC (*Natural Fiber Reinforced Concrete*)

Sifat-sifat dari serat yang umum digunakan yakni:

d. Serat Kaca

Dibuat dari campuran silikat yang dilelehkan lalu ditarik menjadi filamen tipis. Serat ini memiliki kuat tarik yang tinggi dan modulus elastisitas yang besar, sehingga mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan lentur mortar. Pada aplikasi berbasis semen, serat kaca sering digunakan dalam bentuk alkali *resistant* karena jenis kaca biasa mudah mengalami degradasi ketika terekspos alkalinitas tinggi.

e. Serat Baja

Serat baja termasuk penguat yang memiliki kontribusi mekanik paling besar. Kuat tariknya tinggi dan modulus elastisitasnya mendekati baja struktural, sehingga mampu memberikan peningkatan nyata pada ketangguhan, kekuatan lentur, dan deformasi pasca-retak. Tantangan utamanya adalah kerentanan terhadap korosi, terutama pada beton dengan permeabilitas tinggi atau lingkungan agresif.

f. Serat Polimer

Serat polimer dikenal ringan dan stabil dalam lingkungan agresif. Modulus elastisitasnya lebih rendah dibandingkan dengan serat baja maupun kaca, sehingga bukan ditujukan untuk meningkatkan kekakuan, tetapi lebih pada pengendalian retak mikro dan peningkatan daktilitas. Serat polimer sangat efektif mengurangi retak susut plastis pada tahap awal pengerasan. Adapun tipe-tipe serat polimer yaitu:

1) *Acrylic*

Serat *acrylic* memiliki densitas sekitar 1,16–1,18 g/cm³ dan sifat permukaannya cenderung halus. Serat ini tidak menyerap air dalam jumlah besar dan stabil terhadap sinar UV maupun kondisi lingkungan. Diameter serat *acrylic* biasanya 10–20 mikron dengan panjang 6–12 mm saat digunakan pada mortar. Secara mekanis, kekuatan tariknya berkisar 400–600 MPa dengan modulus elastisitas 8–10 GPa.

2) *Aramid*

Serat *aramid* memiliki densitas sekitar 1,38 g/cm³, dengan panjang serat umumnya 6–12 mm dan diameternya berkisar 10–20 mikron. Serat *aramid* memiliki kekuatan tarik sangat tinggi, umumnya berada pada kisaran 2.400–3.600 MPa, dengan modulus elastisitas berkisar antara 60–120 GPa.

3) *Nylon*

Serat *nylon* memiliki densitas mendekati 1,14 g/cm³ dan cenderung sedikit menyerap kelembapan. Serat ini biasanya memiliki diameter 10–50 mikron dengan panjang 6–19 mm untuk aplikasi mortar. Serat

ini mempunyai kekuatan tarik sekitar 650–950 MPa dan modulus elastisitas 2–4 Gpa.

4) *Polyester*

Serat *polyester* memiliki densitas sekitar 1,38 g/cm³ dan bersifat hidrofobik, sehingga tidak menyerap air dan stabil terhadap perubahan kelembapan. Diameter umum serat ini berkisar 10–25 mikron dengan panjang 6–12 mm untuk aplikasi mortar atau beton. Secara mekanis, *polyester* memiliki kekuatan tarik sekitar 600–900 MPa dengan modulus elastisitas 8–12 GPa

5) *Polyethylene*

Serat *polyethylene* memiliki densitas sekitar 0,95 g/cm³. Serat ini memiliki diameter yang sangat halus, biasanya 10–20 mikron. Dapat mencapai kekuatan tarik lebih dari 2.000 MPa dengan modulus elastisitas sekitar 80–120 Gpa. Serat tipe ini tidak menyerap air dan memiliki permukaan licin, sehingga ikatan dengan matriks semen cenderung lemah tanpa perlakuan permukaan

6) *Polypropylene*

Serat *polypropylene* memiliki densitas rendah, biasanya sekitar 0,90 g/cm³, sehingga sangat ringan dan mudah terdispersi dalam mortar. Panjang serat yang digunakan untuk campuran biasanya 6–19 mm dengan diameter sekitar 20–40 mikron. Memiliki kekuatan tarik berkisar 300–600 MPa dan modulus elastisitas 3–5 Gpa. Regangan putusnya cukup tinggi, bisa mencapai 15–25%, membuatnya efektif meredam retak akibat penyusutan plastis pada tahap awal pengerasan.

2.5. Kuat Tekan Mortar

Kuat tekan adalah gaya maksimum per satuan luas yang dapat ditahan oleh benda uji sebelum mengalami kerusakan atau hancur. Nilai kuat tekan pada benda uji dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (SNI 6825:2002)

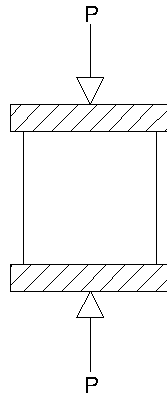
$$\sigma_m = \frac{P_{maks}}{A} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

σ_m = Kuat tekan (MPa)

P_{maks} = Beban maksimum (kN)

A = Luas penampang (mm^2)



Gambar 2.1 Uji kuat tekan.

2.5. Uji Kuat Lentur

Kuat lentur adalah kemampuan mortar untuk menahan beban tarik secara tidak langsung pada sisi bawah benda uji hingga terjadi retak atau patah. Balok mortar diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya tegak lurus terhadap benda uji. Nilai kuat lentur dengan satu titik pembebanan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut (SNI 4154:2014).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

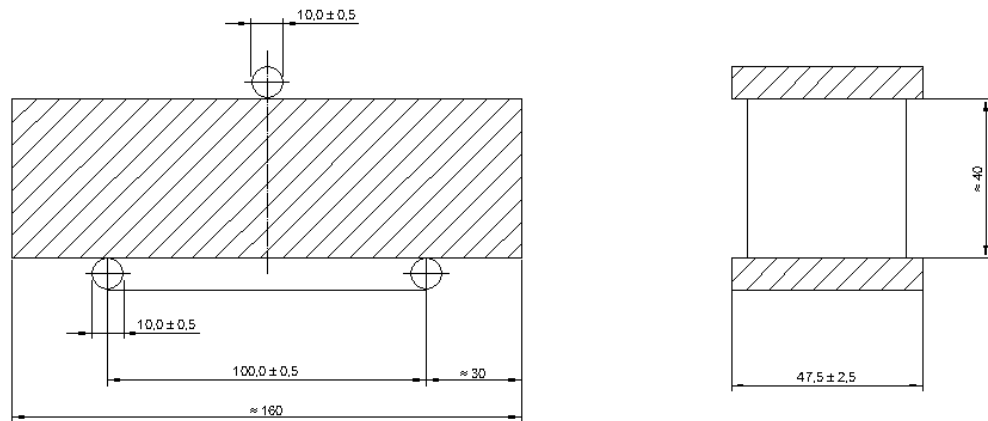
σ = Kuat lentur (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Luas penampang (mm)

b = Lebar rata-rata spesimen pada daerah runtuh (mm)

h = Tinggi rata-rata spesimen pada daerah runtuh (mm)



Gambar 2.2 Uji kuat lentur.

2.6. Penelitian Terdahulu

1. Pengaruh Komposisi Penambahan Serat *Polypropylene* Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur *Self Compacting Mortar* (SCM)

Suma et al., (2023) melakukan penelitian guna mengetahui variasi penambahan serat *polypropylene* terhadap kuat tekan dan kuat lentur *Self Compacting Mortar* (SCM), serta mengetahui kadar optimum dari penambahan serat *polypropylene* agar menghasilkan adukan mortar yang terbaik. Serat *polypropylene* ditambahkan dengan variasi 0%, 0,04%, 0,06%, 0,08%, dan 0,1% dari volume benda uji mortar dengan adanya penambahan *superplasticizer* sebanyak 2%. Terdapat 2 ukuran benda uji, yaitu benda uji berukuran 50 x 50 x 50 mm untuk uji kuat tekan dan benda uji balok berukuran 40 x 40 x 160 mm untuk uji kuat lentur, dimana pengujian dilakukan saat benda uji berumur 28 hari.

Dari hasil pengujian diperoleh nilai kuat tekan tertinggi pada variasi serat *polypropylene* 0,04% yaitu sebesar 34,81 MPa dan mengalami penurunan kuat tekan setelahnya dengan kuat tekan sebesar 25,35 Mpa pada variasi serat *polypropylene* sebanyak 0,1%. Sedangkan untuk kuat lentur tertinggi pada variasi serat *polypropylene* 0,1% yaitu sebesar 11,72 Mpa dan nilai kuat lentur terendah pada variasi serat *polypropylene* 0% yaitu sebesar 9,3 Mpa. Penambahan serat *polypropylene* dapat meningkatkan kuat tekan

hingga batas tertentu, tetapi dosis berlebih justru menurunkannya. Sebaliknya, pada kuat lentur, peningkatan kadar serat *polypropylene* terbukti memperbaiki kekuatan lentur mortar, terutama pada campuran *self compacting mortar*.

2. Pengaruh *Silica Fume* sebagai Substitusi Semen terhadap Nilai Resapan dan Kuat Tekan Mortar

Sutriono et al., (2018) menyelidiki pengaruh *silica fume* sebagai pengganti parsial semen terhadap nilai resapan dan kekuatan tekan mortar. Persentase *silica fume* yang digunakan bervariasi yaitu sebesar 0%, 5%, 8%, 12%, dan 15% dari berat semen. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 6 cm dan tinggi 12 cm dengan pengujian pada 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari.

Berdasarkan hasil pengujian, nilai penyerapan air tertinggi sebesar 3,970% diperoleh pada sampel kontrol tanpa penambahan *silica fume*. Sementara itu, nilai penyerapan air terendah sebesar 3,276% dicapai pada sampel dengan 15% kandungan *silica fume*. Sedangkan untuk kuat tekan tertinggi terdapat pada persentase *silica fume* 8% yaitu sebesar 312,574 kg/cm² dan setelah itu mengalami penurunan dengan kuat tekan terendah pada persentase *silica fume* sebesar 15% yaitu 209,365 kg/cm². Sehingga dapat disimpulkan bahwa nilai resapan air berkurang seiring dengan meningkatnya persentase *silica fume*, namun terdapat kadar optimum agar memperoleh kuat tekan terbaik. Penambahan *silica fume* yang terlalu banyak justru akan menurunkan kuat tekan.

3. *Study on Durability Properties of Concrete Using Silica Fume with Addition of Polypropylene Fibre*

Reddy & Ahmed (2017) melakukan penelitian untuk mengetahui daya serap air (*water absorption*) dari beton dengan campuran *silica fume* dan serat *polypropylene* sebagai bahan tambahan. Dalam penelitian ini digunakan variasi *silica fume* sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen.

Sedangkan untuk serat *polypropylene* digunakan variasi 0,25% dan 0,5% dari berat total benda uji. Benda uji yang digunakan berupa kubus dengan ukuran 150 x 150 x 150 mm. Pengujian dilakukan pada benda uji dengan umur 28 hari.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton yang mengandung *silica fume* dan serat *polypropylene* memiliki porositas lebih rendah dibandingkan beton kontrol. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel *silica fume* yang jauh lebih halus daripada semen, sehingga mampu mengisi rongga mikro dalam pasta semen dan menurunkan penyerapan air pada beton. Beton tanpa campuran *silica fume* dan serat *polypropylene* memiliki penyerapan air sebesar 4,21%. Kadar optimal yang dihasilkan yaitu beton dengan variasi tambahan 10% *silica fume* dan 0,5% serat *polypropylene*, menghasilkan penyerapan air paling rendah, yaitu hanya 2,97%. Penurunan ini mengonfirmasi bahwa kombinasi *silica fume* dan serat *polypropylene* efektif dalam mengurangi porositas beton.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental yang dilakukan untuk mendapatkan data-data hasil penelitian mortar dengan menggunakan *silica fume* sebagai bahan substitusi semen dan penambahan serat *polypropylene*. Pada penelitian ini digunakan campuran *silica fume* dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen dan penambahan serat *polypropylene* dengan variasi 0%, 0,02%, 0,04%, dan 0,06% terhadap volume benda uji. Dari hasil pengujian kemudian dilakukan analisis, agar mengetahui berapa kadar optimum untuk menghasilkan mortar dengan sifat mekanik terbaik.

Pengujian yang dilakukan ada 2 yakni, pengujian kuat tekan pada benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 50 x 50 x 50 mm, dan pengujian kuat lentur pada benda uji berbentuk balok dengan dimensi 40 x 40 x 160 mm. Semua pengujian sifat mekanik mortar dilakukan pada umur 28 hari. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.

3.2. Alat

1. Saringan

Saringan adalah alat yang digunakan untuk memisahkan dan menganalisis ukuran butir agregat halus. Saringan yang digunakan pada penelitian ini adalah saringan nomor 4 atau ukuran 4,75 mm.



Gambar 3.1 Saringan.

2. Oven

Oven digunakan untuk mengeringkan bahan ataupun benda uji. Oven yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kemampuan suhu maksimum hingga 110°C dan daya sebesar 2800 Watt.



Gambar 3.2 Oven.

3. Timbangan

Timbangan adalah alat yang digunakan untuk mengukur berat bahan yang akan digunakan serta untuk mengukur benda uji. Timbangan yang digunakan pada persiapan dan pelaksanaan ini adalah timbangan dengan ketelitian pembacaan 1 gram dan timbangan dengan ketelitian pembacaan 0,1 gram.



(a)



(b)

Gambar 3.3 (a) Timbangan dengan ketelitian pembacaan 1 gram;
(b) Timbangan dengan ketelitian pembacaan 0,1 gram.

4. Cetakan Benda Uji

Cetakan digunakan untuk membentuk mortar sesuai dengan bentuk dan kebutuhannya. Cetakan yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk kubus dengan ukuran 50 x 50 x 50 mm dan cetakan balok dengan ukuran 40 x 40 x 160 mm.



Gambar 3.4 Cetakan benda uji.

5. *Picnometer*

Picnometer adalah alat yang digunakan untuk menguji kandungan zat organik dan densitas agregat halus.



Gambar 3.5 *Picnometer*.

6. Cetakan Kerucut Pasir

Kerucut pasir adalah alat yang digunakan dalam pengujian agregat halus untuk menilai kondisi pasir dalam keadaan SSD (*Saturated Surface Dry*).



Gambar 3.6 Cetakan kerucut pasir.

7. Mesin Pengaduk Mortar

Mesin pengaduk mortar adalah alat yang digunakan untuk mencampur bahan-bahan mortar seperti semen, pasir, air, dan bahan tambahan lainnya agar diperoleh adukan yang homogen.



Gambar 3.7 Mesin pengaduk mortar.

8. *Flow Table*

Flow table adalah alat yang digunakan untuk mengukur kelecakan atau kemampuan alir mortar. Alat ini membantu menentukan seberapa mudah mortar menyebar ketika diberi getaran atau ketukan. Alat yang digunakan berupa *flow table motorized* dari merek “Controls”.



Gambar 3.8 *Flow table*.

9. *Compression Testing Machine*

Compression testing machine adalah alat yang digunakan untuk mengukur kekuatan tekan dan kekuatan lentur dari benda uji mortar. Mesin yang digunakan ini berasal dari merek “Controls” dengan kapasitas beban maksimum sebesar 3000 kN.



Gambar 3.9 *Compression testing machine.*

10. *Flexural Testing Machine*

Flexural testing machine adalah alat yang digunakan untuk mengukur kuat lentur dari benda uji mortar. Mesin yang digunakan berasal dari merek “Controls” dengan kapasitas beban maksimum sebesar 100 kN. Dalam pelaksanaannya, mesin ini bekerja bersamaan dengan *loading frame* sebagai media perletakan benda uji mortar.



Gambar 3.10 *Flexural testing machine.*

11. *Loading Frame*

Loading frame adalah alat/frame yang terbuat dari profil baja, berfungsi sebagai perletakan benda uji mortar saat melakukan pengujian kuat lentur. Alat ini dilengkapi dengan tumpuan rol yang dapat diatur posisinya.



Gambar 3.11 *Loading frame*.

12. Bak Perendam

Bak perendam adalah wadah yang digunakan untuk perawatan benda uji mortar dengan cara direndam didalam air, guna menjaga kelembaban dan mencegah kehilangan air yang cepat dari mortar.



Gambar 3.12 Bak perendam.

13. Peralatan bantu

Peralatan bantu yang digunakan seperti gelas ukur, sendok semen, sekop, palu karet, kereta dorong, ember, kontainer, dan alat tulis yang berfungsi untuk mempermudah serta memperlancar dalam melakukan penelitian.

3.3. Bahan

1. Semen

Semen adalah bahan pengikat hidrolis yang akan mengeras bila dicampur dengan air. Setelah mengeras, material ini menjadi padat dan mampu merekatkan agregat dalam mortar. Semen yang digunakan adalah semen PCC bermerek “Semen Tiga Roda”, dengan kemasan 50 kg.



Gambar 3.13 Semen.

2. Agregat halus

Agregat halus adalah material berbutir kecil yang digunakan sebagai komponen utama dalam campuran mortar. Agregat halus ini harus mematuhi standar ASTM dalam sejumlah uji, termasuk pengukuran kadar air, berat jenis, penyerapan air (absorpsi), kadar lumpur, gradasi agregat halus, berat jenis, dan kandungan zat organik pada pasir.



Gambar 3.14 Agregat halus.

3. Air

Air berfungsi sebagai pengaktif reaksi semen, dimana air memulai dan menjaga proses hidrasi, yaitu reaksi kimia yang membuat semen mengeras dan mengikat pasir. Air juga membantu dalam proses *curing* mortar.



Gambar 3.15 Air.

4. *Silica Fume*

Silica fume digunakan sebagai bahan substitusi semen pada mortar berupa serbuk abu-abu yang sangat halus dengan kandungan partikel silika dioksida, dan akan aktif bereaksi dalam proses hidrasi semen *Silica fume* yang digunakan berasal dari “Sika Fume” dengan kemasan 20 kg, dan memiliki densitas sekitar 0,65 kg/L. Digunakan *silica fume* dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15% dan 20% dari berat semen.



(a)



(b)

Gambar 3.16 (a) *Silica fume* dalam kontainer; (b) *Silica fume* dalam kemasan.

5. Serat *Polypropylene*

Serat *polypropylene* digunakan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan mortar. Serat ini berasal dari “Sika Fiber” dan memerlukan waktu 3–5 menit hingga tercampur dengan baik. Serat ini memiliki berat jenis sebesar 900 kg/m^3 , dengan panjang 12 mm, diameter 18 mikron, dan modulus elastisitas 6000–9000 MPa. Pada penelitian ini digunakan proporsi serat *polypropylene* sebanyak 0%, 0,02%, 0,04%, dan 0,06% dari berat volume benda uji.



Gambar 3.17 Serat *polypropylene*.

3.4. Prosedur Pelaksanaan Penelitian

3.4.1. Persiapan Alat dan Bahan

Tahapan ini penting untuk menjaga ketelitian, konsistensi, dan mutu hasil penelitian. Pada tahap persiapan alat, peneliti memastikan seluruh peralatan yang digunakan berada dalam kondisi baik dan berfungsi dengan benar. Peralatan dibersihkan dari sisa material sebelumnya, serta dikalibrasi bila diperlukan. Untuk persiapan bahan, seluruh material yang akan digunakan diperiksa dan disiapkan sesuai kebutuhan penelitian.

3.4.2. Pemeriksaan Bahan

Pemeriksaan bahan bertujuan memastikan bahwa seluruh material yang digunakan dalam penelitian memenuhi standar mutu yang diperlukan sebelum masuk ke tahap pencampuran. Pemeriksaan ini dilakukan agar karakteristik setiap bahan diketahui dengan jelas, sehingga campuran mortar yang dihasilkan konsisten dan sesuai dengan rancangan penelitian. Melalui pemeriksaan bahan ini, peneliti dapat memastikan semua material berada dalam kondisi optimal.

3.4.3. Perencanaan Campuran

Perencanaan campuran berfungsi menentukan komposisi mortar yang akan digunakan dalam penelitian agar sesuai dengan tujuan pengujian. Tahap ini mencakup penetapan proporsi setiap material, seperti semen, pasir, *silica fume*, serat *polypropylene*, dan air. Dalam penelitian ini perbandingan antara semen dan pasir adalah 1:2,5 dan menggunakan Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4. Digunakan bahan tambahan berupa *silica fume* sebagai bahan substitusi semen dengan variasi 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen serta penambahan serat *polypropylene* dengan variasi 0,02%, 0,04%, dan 0,06% terhadap volume benda uji. Komposisi campuran mortar dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini.

Tabel 3.1 Komposisi campuran mortar per 1 m³

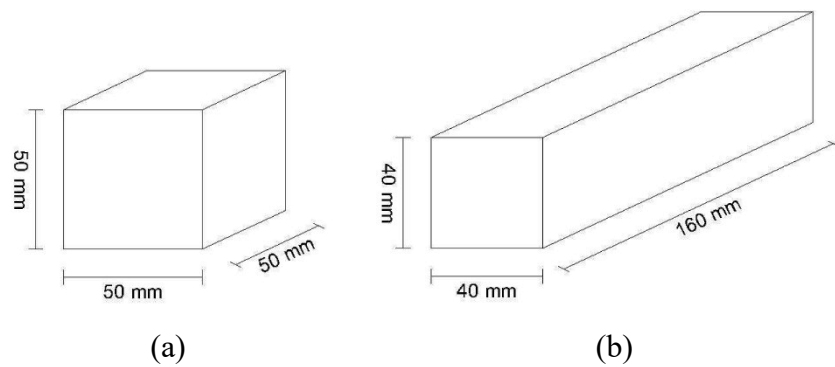
PPF (%)	SF (%)	Material (kg)				
		Semen	SF	Pasir	Air	PPF
0,00	0	564,1	0,0	1410,3	225,6	0,00
	5	535,9	28,2	1410,3	225,6	0,00
	10	507,7	56,4	1410,3	225,6	0,00
	15	479,5	84,6	1410,3	225,6	0,00
	20	451,3	112,8	1410,3	225,6	0,00
0,02	0	564,1	0,0	1410,3	225,6	0,18
	5	535,9	28,2	1410,3	225,6	0,18
	10	507,7	56,4	1410,3	225,6	0,18
	15	479,5	84,6	1410,3	225,6	0,18
	20	451,3	112,8	1410,3	225,6	0,18
0,04	0	564,1	0,0	1410,3	225,6	0,36
	5	535,9	28,2	1410,3	225,6	0,36
	10	507,7	56,4	1410,3	225,6	0,36
	15	479,5	84,6	1410,3	225,6	0,36
	20	451,3	112,8	1410,3	225,6	0,36
0,06	0	564,1	0,0	1410,3	225,6	0,55
	5	535,9	28,2	1410,3	225,6	0,55
	10	507,7	56,4	1410,3	225,6	0,55
	15	479,5	84,6	1410,3	225,6	0,55
	20	451,3	112,8	1410,3	225,6	0,55

3.4.4. Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang akan dibuat sebanyak 300 sampel, dengan 180 benda uji berbentuk kubus dengan lebar 50 mm, tinggi 50 mm dan panjang 50 mm, serta 120 benda uji berbentuk balok dengan lebar 40 mm, tinggi 40 mm, dan panjang 160 mm. Masing-masing variasi terdiri dari 15 benda uji, meliputi 9 benda uji kubus (6 untuk uji kuat tekan dan 3 untuk uji absorpsi) serta 6 benda uji balok untuk uji kuat lentur. Semua benda uji mortar akan dilakukan pengujian pada umur 28 hari, dengan rincian sebagai berikut.

Tabel 3.2 Variasi benda uji kubus dan balok

No.	PPF (%)	SF (%)	Kubus	Balok	Jumlah benda uji	Total
1	0,00	0	K 0.0	B 0.0	15	300
2		5	K 0.5	B 0.5	15	
3		10	K 0.10	B 0.10	15	
4		15	K 0.15	B 0.15	15	
5		20	K 0.20	B 0.20	15	
6	0,02	0	K 2.0	B 2.0	15	
7		5	K 2.5	B 2.5	15	
8		10	K 2.10	B 2.10	15	
9		15	K 2.15	B 2.15	15	
10		20	K 2.20	B 2.20	15	
11	0,04	0	K 4.0	B 4.4	15	
12		5	K 4.5	B 4.0	15	
13		10	K 4.10	B 4.10	15	
14		15	K 4.15	B 4.15	15	
15		20	K 4.20	B 4.20	15	
16	0,06	0	K 6.0	B 6.0	15	
17		5	K 6.5	B 6.5	15	
18		10	K 6.10	B 6.10	15	
19		15	K 6.15	B 6.15	15	
20		20	K 6.20	B 6.20	15	



Gambar 3.18 (a) Benda uji mortar kubus dimensi 50 x 50 x 50 mm;
 (b) Benda uji mortar balok dimensi 40 x 40 x 160 mm.

a. Pembuatan benda uji

Tahap-tahap yang dilakukan dalam membuat benda uji yakni:

1. Menimbang bahan-bahan campuran mortar seperti semen, agregat halus, air, *silica fume*, dan serat *polypropylene* sesuai dengan rencana.



Gambar 3.19 Bahan campuran mortar.

2. Memasukkan pasir, semen, dan *silica fume* ke dalam wadah, lalu aduk bahan-bahan tersebut menggunakan *mixer* selama 1 menit.



Gambar 3.20 Memasukkan pasir, semen, dan *silica fume*.

3. Memasukkan air sekitar 75% dari total berat air ke dalam campuran sebelumnya, lalu aduk kembali dengan *mixer* selama 2 menit.



Gambar 3.21 Memasukkan air sekitar 75%.

4. Memasukkan serat *polypropylene* secara perlahan sesuai rencana agar tidak terjadi penggumpalan dan memasukkan sisa air sebanyak 25% pada kondisi *mixer* masih menyala. Aduk selama 1 menit hingga bahan tercampur dengan merata.



Gambar 3.22 Memasukkan sisa air dan serat *polypropylene*.

b. Pemeriksaan nilai konsistensi *flow* mortar (*flow table*)

Tahap-tahap yang dilakukan dalam pemeriksaan nilai konsistensi *flow* mortar yakni:

1. Menyiapkan alat *flow table* yaitu sebuah meja datar berbentuk lingkaran yang memiliki kemampuan untuk memberikan getaran pada sampel, serta alat lainnya berupa kerucut logam (*flow mold*) dan spatula.



Gambar 3.23 Menyiapkan alat *flow table*.

2. Meletakkan *flow mold* di tengah meja *flow table*, lalu masukkan sampel mortar ke dalam *flow mold* sampai penuh, pastikan sudah padat dan tidak ada lagi rongga udara didalamnya, kemudian meratakan permukaannya dengan spatula secara perlahan.



Gambar 3.24 Memasukkan mortar ke dalam *flow mold*.

3. Melepaskan *flow mold* dengan cara diangkat secara vertikal dan hati-hati agar adukan tidak tergeser.



Gambar 3.25 Melepaskan cetakan *flow mold*.

4. Menghidupkan mesin *flow table* dan atur selama 15 detik atau sebanyak 25 ketukan sesuai prosedur pengujian, selanjutnya menekan tombol mulai agar *flow table* dapat beroperasi secara otomatis dan menghasilkan ketukan yang konsisten untuk menyebarkan adukan mortar.



Gambar 3.26 Menghidupkan mesin *flow table*.

5. Melakukan pengukuran pada 4 sisi yang berbeda menggunakan penggaris ataupun jangka sorong, kemudian menghitung nilai rata-ratanya untuk mengetahui diameter aliran mortar.

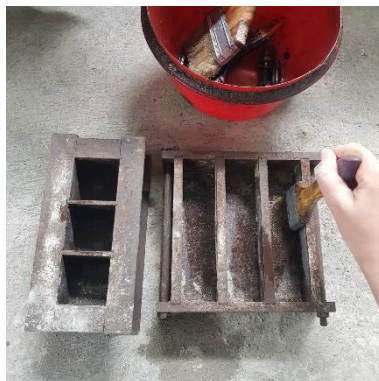


Gambar 3.27 Melakukan pengukuran pada 4 sisi.

c. Pencetakan benda uji

Tahap-tahap yang dilakukan dalam pencetakan benda uji mortar yakni:

1. Mengoleskan oli pada sisi dalam cetakan benda uji, guna mencegah adukan menempel pada dinding cetakan.



Gambar 3.28 Mengoleskan oli pada cetakan.

2. Memasukkan adukan mortar segar ke dalam cetakan secara bertahap dalam tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan menggunakan batang besi untuk mengurangi rongga udara yang terperangkap. Setelah cetakan terisi penuh, melakukan pemadatan lanjutan dengan memukul sisi luar cetakan menggunakan palu karet. Selanjutnya, meratakan permukaan benda uji menggunakan spatula hingga diperoleh bidang yang rata dan halus.



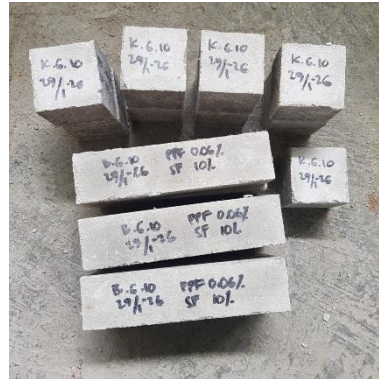
Gambar 3.29 Memasukkan adukan mortar ke dalam cetakan.

3. Melepaskan benda uji dari cetakan selama 24 jam.



Gambar 3.30 Melepaskan benda uji.

4. Memberikan kode pada setiap sampel benda uji sesuai dengan variasi campuran mortar.



Gambar 3.31 Memberikan kode benda uji.

3.4.5. Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Benda uji yang telah dilepaskan dari cetakan kemudian direndam di dalam bak yang berisi air selama 28 hari. Proses ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi dapat terlaksana dengan baik, sehingga proses pengerasan dapat terjadi dengan optimal dan tidak terjadi keretakan saat mortar sudah mengering. Setelah benda uji dikeluarkan dari bak air, benda uji harus didiamkan terlebih dahulu selama 24 jam atau hingga kondisinya benar-benar kering sebelum dilakukan pengujian kuat tekan ataupun pengujian kuat lentur.



Gambar 3.32 Perawatan benda uji.

3.4.6. Pelaksanaan Pengujian

Pada penelitian ini, sampel benda uji dilakukan 3 pengujian, diantaranya uji kuat tekan, uji kuat lentur dan uji peyerapan air (absorpsi).

1. Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji berumur 28 hari menggunakan alat *compression testing machine* berkapasitas maksimum 3000 KN. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan sampel menahan beban tekan hingga mencapai kondisi runtuh. Benda uji yang telah mencapai umur pengujian diangkat satu hari sebelumnya dan dibiarkan pada suhu ruang. Setiap sampel diukur dimensinya untuk menentukan luas penampang yang diperlukan dalam perhitungan kuat tekan. Mesin uji disiapkan dengan membersihkan pelat atas dan bawah agar kontak antara benda uji dan pelat merata. Sampel ditempatkan tepat di tengah pelat bawah dalam posisi stabil dan pastikan jarum indikator berada di angka nol. Kemudian jalankan mesin hingga tekanan meningkat secara bertahap. Pembebanan diteruskan sampai benda uji menunjukkan keretakan dan akhirnya runtuh. Nilai beban maksimum yang tercatat digunakan untuk menghitung kuat tekan berdasarkan luas penampang sampel. Semua hasil, termasuk beban runtuh, nilai kuat tekan, serta kondisi kerusakan sampel, dicatat sebagai data yang akan digunakan dalam analisis penelitian. Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan mortar sebagai berikut (SNI 6825:2002).

$$\sigma_m = \frac{P_{maks}}{A} \dots\dots\dots (3.1)$$

Keterangan:

σ_m = Kuat tekan mortar (MPa)

P_{maks} = Gaya tekan maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji mortar (mm²)

Pada penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 50 x 50 x 50 mm.

2. Uji Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur bertujuan untuk mengetahui kemampuan balok mortar dalam menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji hingga terjadi patah. Pengujian ini dilakukan menggunakan *flexural testing machine* pada benda uji berumur 28 hari. Sehari sebelum pelaksanaan pengujian, benda uji dikeluarkan dari proses *curing* dan dibiarkan berada pada suhu ruang. Pada saat pengujian, dimensi balok terlebih dahulu diukur sebagai dasar perhitungan kuat lentur. Benda uji kemudian ditempatkan di atas dua perletakan pada *loading frame* dengan posisi memanjang dan stabil. Namun sebelum itu, permukaan balok terlebih dahulu diberi tanda dengan jarak 30 mm dari masing-masing ujung bentang kanan dan kiri sebagai acuan penempatan perletakan dan titik pembebanan. Sistem pembebanan diatur sehingga gaya bekerja pada bagian tengah bentang balok. Setelah posisi sampel dipastikan tepat dan alat berada dalam kondisi siap, pembebanan diberikan secara bertahap hingga terjadi retak lentur yang umumnya muncul di sekitar tengah bentang, lalu berlanjut sampai balok mengalami keruntuhan. Beban maksimum yang tercatat pada saat patah digunakan sebagai dasar perhitungan kuat lentur mortar. Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tekan mortar sebagai berikut (SNI 4154:2014).

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \dots\dots\dots (3.2)$$

Keterangan:

σ = Kuat lentur (MPa)

P = Beban maksimum (N)

L = Panjang bentang (mm)

b = Lebar rata-rata spesimen pada daerah runtuh (mm)

h = Tinggi rata-rata spesimen pada daerah runtuh (mm)

Pada penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran 40 x 40 x 160 mm.

3. Uji Penyerapan Air (Absorpsi)

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai seberapa besar kemampuan mortar menyerap air, yang mencerminkan tingkat porositas dan kepadatan material. Setelah benda uji mencapai umur rencana 28 hari, sampel diangkat dari bak perendam, dilap secara perlahan untuk menghilangkan air pada permukaan, kemudian ditimbang untuk memperoleh berat SSD (*Saturated Surface Dry*), yang dinyatakan sebagai berat B. Selanjutnya, benda uji dikeringkan dalam oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hingga mencapai berat konstan. Setelah proses pengeringan selesai, benda uji didinginkan pada suhu ruang dan ditimbang sebagai berat kering, yang dinyatakan sebagai berat A. Nilai penyerapan air dapat dihitung menggunakan rumus berikut (ASTM C642-21).

$$\text{Absorpsi} = \frac{(B - A)}{A} \times 100\% \dots \dots \dots (3.3)$$

Keterangan:

A = Berat kering (gram)

B = Berat SSD (gram)

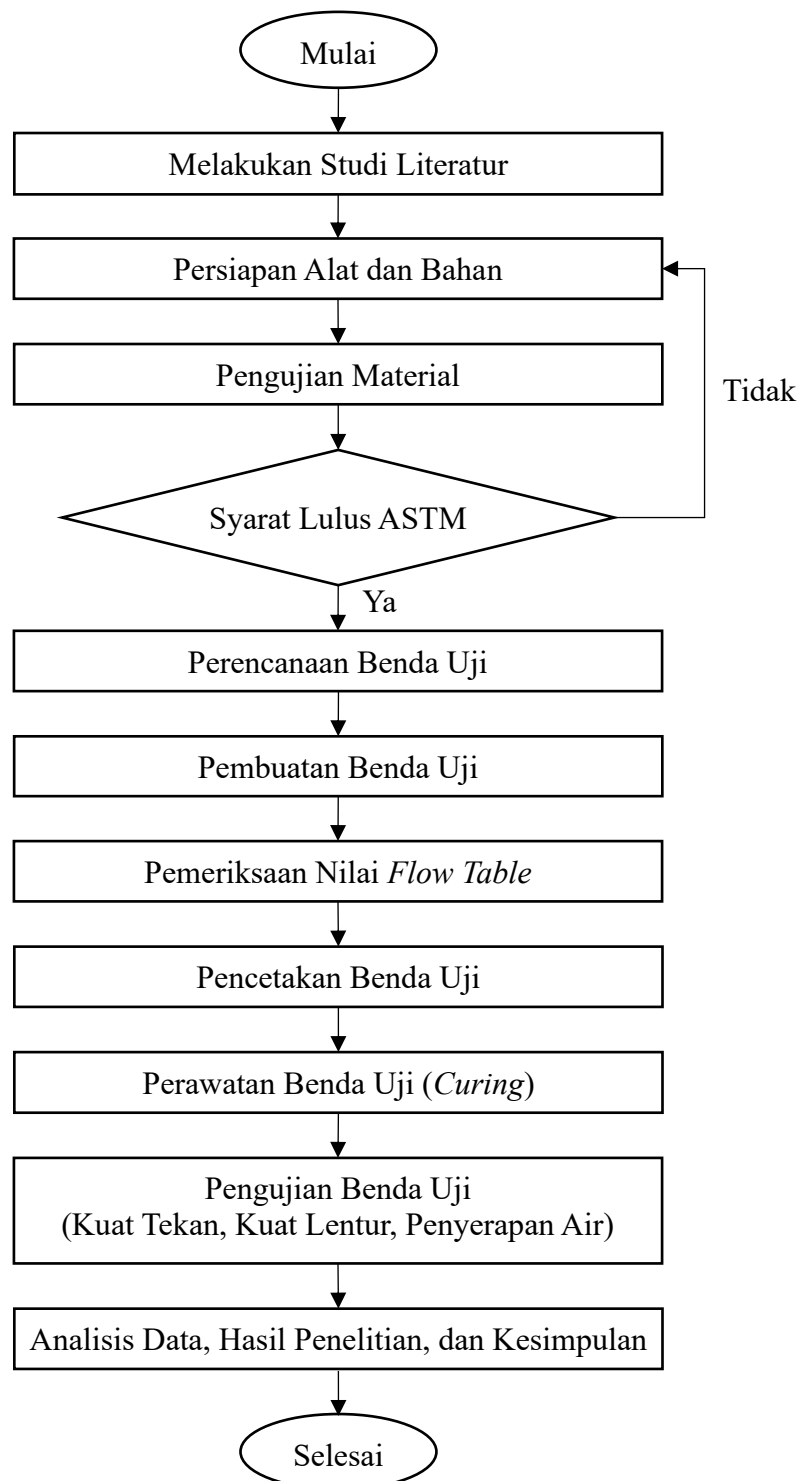
Pada penelitian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan panjang 50 mm, lebar 50 mm, dan tinggi 50 mm.

3.4.7. Analisis Hasil Penelitian

Setelah melakukan pengujian, maka dapat dilakukan perhitungan dan analisis data sebagai berikut :

1. Menghitung kuat tekan mortar pada benda uji kubus dengan umur 28 hari kemudian disajikan dalam bentuk tabel.
2. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan mortar, dibuat grafik hubungan yang menunjukkan variasi *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap kuat tekan, kemudian dilakukan analisis data.
3. Menghitung kuat lentur mortar kemudian disajikan dalam bentuk tabel.
4. Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur mortar, dibuat grafik hubungan yang menunjukkan variasi *silica fume* dan serat *polypropylene* terhadap kuat lentur, kemudian dilakukan analisis data.
5. Menghitung nilai penyerapan air (absorpsi) mortar kemudian disajikan dalam bentuk tabel.
6. Data-data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk dapat melihat nilai optimum dari tiap pengujian.

3.5. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.33 Diagram alir.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan serta analisis terhadap data yang diperoleh, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan kadar *silica fume* dan serat *polypropylene* cenderung meningkatkan kuat tekan dan kuat lentur mortar hingga kadar optimum tertentu, kemudian menurun pada kadar yang lebih tinggi. Nilai kuat tekan meningkat dari 35,82 MPa pada mortar kontrol menjadi 47,81 MPa pada kombinasi SF 10% dan PPF 0,02%, sedangkan kuat lentur meningkat dari 10,81 MPa menjadi 17,19 MPa pada kombinasi SF 5% dan PPF 0,02%.
2. Peningkatan kadar *silica fume* dan serat *polypropylene* menyebabkan nilai *workability* dan penyerapan air mortar cenderung menurun. Nilai *flow* menurun dari 66,00% pada mortar kontrol menjadi 5,00% pada kombinasi SF 20% dan PPF 0,06%, sedangkan penyerapan air menurun dari 8,69% menjadi 1,10% pada kombinasi yang sama.
3. Kadar optimum penambahan bahan diperoleh pada kombinasi *silica fume* 5–10% dan serat *polypropylene* 0,02%, yang memberikan peningkatan kuat tekan dan kuat lentur mortar.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian yang telah dilakukan, dapat dirumuskan beberapa saran guna menyempurnakan penelitian selanjutnya sebagai berikut:

1. Perlu dikaji variasi kadar *silica fume* dan serat *polypropylene* dalam rentang yang lebih luas guna menemukan komposisi optimum yang mampu menghasilkan peningkatan *workability* dan sifat mekanik mortar secara lebih signifikan, mengingat penelitian ini hanya mencakup rentang kadar yang terbatas.
2. Disarankan untuk melakukan pengujian sifat fisik tambahan, seperti pengujian kerapatan (*density*) dan volume rongga (*voids*), guna memperoleh gambaran yang lebih mendalam mengenai karakteristik porositas dan kerapatan matriks mortar akibat penambahan *silica fume* dan serat *polypropylene*.
3. Analisis mikrostruktur pada permukaan retakan mortar perlu dilakukan sebagai langkah lanjutan, guna menilai distribusi pori dan kepadatan matriks secara lebih mendalam, serta mengidentifikasi pola retak yang terbentuk akibat pengaruh variasi bahan tambah yang digunakan.
4. Sebelum pelaksanaan pengujian *workability*, disarankan untuk melakukan pemeriksaan menyeluruh terhadap kondisi dan fungsi alat *flow table*, guna memastikan alat bekerja secara optimal sehingga data yang dihasilkan lebih valid.
5. Penggunaan jangka sorong dalam mengukur diameter sebaran mortar pada pengujian *flow table* disarankan untuk diterapkan pada penelitian berikutnya, sebagai upaya meningkatkan ketelitian dan akurasi hasil pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 226. (2001). *Ground granulated blast-furnace slag as a cementitious constituent in concrete* – Report: ACI 226R-01. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Committee 234. (2012). *Guide for the use of silica fume in concrete* – Report: ACI 234R-06. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. (2019). *Building code requirements for structural concrete* – Report: ACI 318-19. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- ACI Committee 544. (2018). *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete* – Report: ACI 544.1R-96. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Abusogi, O. A., Adeyemi, A. O., Olofinnade, O. M., & Raheem, A. A. (2023). *Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete*. Construction and Building Materials, 362, 129726.
- Ahmed, A., Kamau, J., Pone, J., Hyndman, F., & Fitriani, H. (2019). *Chemical reactions in pozzolanic concrete*. Modern Approaches in Materials Science, 1(4). <https://doi.org/10.32474/MAMS.2019.01.000120>
- Akbulut, Z. F., Kuzielová, E., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., & Guler, S. (2024). *Synergistic effects of polypropylene fibers and silica fume on structural lightweight concrete: analysis of workability, thermal conductivity, and strength properties*. Materials, 17(20), 5042. <https://doi.org/10.3390/ma17205042>
- Abed, A. A., Kamal, I., & Mojtahedi, A. (2023). *Enhancing concrete properties using silica fume: optimized mix design*. Journal of Smart Buildings and Construction Technology, 5(1), 84–91. <https://doi.org/10.30564/jsbct.v5i1.5678>
- ASTM C618-86. (1986). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.
- ASTM C1437. (2015). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar*. ASTM International.

- ASTM C144. (2017). *Standard specification for aggregate for masonry mortar*. ASTM International.
- ASTM C33/C33M-18. (2018). *Standard specification for concrete aggregates*. ASTM International.
- ASTM C1240. (2018). *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures*. ASTM International.
- ASTM C270-14a. (2019). *Standard specification for mortar for unit masonry*. ASTM International.
- ASTM C618. (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.
- ASTM C989. (2019). *Standard specification for slag cement for use in concrete and mortars*. ASTM International.
- ASTM E178-16a. (2020). *Standard practice for dealing with outlying observations*. ASTM International.
- ASTM C109/C109M. (2021). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. ASTM International.
- ASTM C642-06. (2021). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International.
- Asadollahfardi, G., Mahdavi, S., Keneshloo, A., & Jahandideh, H. (2025). *Impact of propylene fibers and industrial wastewater on the properties of self-compacting concrete*. Scientific Reports, 15, Article 13454. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13454-w>
- Badalyan, M. M., Muradyan, N. G., Shainova, R. S., Arzumanyan, A. A., Kalantaryan, M. A., Sukiasyan, R. R., Yerosyan, M., Laroze, D., Vardanyan, Y. V., & Barseghyan, M. G. (2024). *Effect of silica fume concentration and water–cement ratio on the compressive strength of cement-based mortars*. Buildings, 14(3), 757. <https://doi.org/10.3390/buildings14030757>
- Chen, Y., Waheed, M. S., Iqbal, S., Rizwan, M., & Room, S. (2024). *Durability properties of macro-polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete*. Materials, 17(2), 284. <https://doi.org/10.3390/ma17020284>
- Dawood, E., & Waleed, T. (2020). *Mechanical properties of mortar using polypropylene fibers*. Journal of Civil Engineering Research & Technology, 1–4.

- Faldo, & Hudori, M. (2021). *Pengaruh efektivitas penggunaan serat polypropylene terhadap kuat tekan beton normal*. Jurnal Teknik Sipil, 10(2), 45–52. <https://doi.org/10.37253/jcep.v2i1.745>
- Fuad, M. (2021). *Pengaruh penambahan superplasticizer dan silica fume terhadap kuat tekan mortar*. Jurnal Teknik, 12(1), 23–30. <http://dx.doi.org/10.52333%2Fdestek.v9i2.785>
- Han C., Pang, J., Hu, S., & Yang, C. (2024). *Study on static and dynamic mechanical properties and microstructure of silica fume-polypropylene fiber modified rubber concret*. Scientific Reports, 14, 12573. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63341-z>
- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2010). *Fresh, mechanical, and durability characteristics of mortar containing nano-silica*. Construction and Building Materials, 24(12), 2513–2521.
- Ji, Y., Peng, X., Tian, H., & Ding, X. (2025). *Analysis of pore structure and its relationship to water transport and electrical flux in mortars incorporated with slag and silica fume*. Buildings, 15(19), 3450. <https://doi.org/10.3390/buildings15193450>
- Jithendra, C., & Elavenil, S. (2020). *Effects of silica fume on workability and compressive strength properties of aluminosilicate-based flowable geopolymer mortar under ambient curing*. Silicon, 12(8), 1965–1974. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00308-0>
- Kumar, A., Iqbal, F., Memon, R. A., & Habib, A. F. (2018). *Tensile and flexural strength of cement silica fume concrete*. International Journal of Civil Engineering and Technology, 9(7), 390–402. https://iaeme.com/Home/article_id/IJCIET_09_07_040?utm_source
- Li, L. G., Chu, S. H., Zeng, K. L., Zhu, J., & Kwan, A. K. H. (2018). *Roles of water film thickness and fibre factor in workability of polypropylene fibre reinforced mortar*. Cement and Concrete Composites, 93, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.07.014>
- Liu, X., Nie, Z., Wu, S., & Wang, C. (2015). *Self-monitoring application of conductive asphalt concrete under indirect tensile deformation*. Case Studies in Construction Materials, 3, 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2015.07.002>
- Lou, Y., Khan, K., Amin, M. N., Ahmad, W., Deifalla, A. F., & Ahmad, A. (2023). *Performance characteristics of cementitious composites modified with silica fume: A systematic review*. Case Studies in Construction Materials, 18, e01753. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01753>

- Mahmood, R. A. & Kockal, N. U. (2022). *Effects of silica fume and micro silica on the properties of mortars containing waste pvc plastic fibers*. Microplastics, 1, 587–609. <https://doi.org/10.3390/microplastics1040041>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson.
- Poerwodihardjo, F. E., & Istiningsih, D. (2016). *Fiber polypropylene dalam campuran beton dan mortar semen*. 17(2), 22–29. <https://doi.org/10.53810/jt.v17i2.277>
- Rahman, M., & Ghani, A. N. A. (2014). *Effect of fine aggregate properties on mortar performance*. International Journal of Civil Engineering, 12(3), 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.498>
- Rajiman, R. (2025). *Zat aditif dalam beton: Inovasi material untuk konstruksi modern*. PT Nawala Gama Education.
- Reddy, A., & Ahmed, M. M. (2017). *Study on durability properties of concrete using silica fume with addition of polypropylene fibre*. JournalNX- A Multidisciplinary Peer Reviewed Journal, 3(11), 21–25. <https://repo.journalnx.com/index.php/nx/article/view/2247>
- Segre, N., Monteiro, P. J. M., & Isaia, G. C. (1998). *Durability of fiber reinforced concrete*. Materials and Structures, 31(8), 573-577.
- Senff, L., Barbetta, P. A., Repette, W. L., Hotza, D., Paiva, H., Ferreira, V. M., & Labrincha, J. A. (2009). *Mortar composition defined according to rheometer and flow table tests using factorial designed experiments*. Construction and Building Materials, 23(10), 3107–3111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.028>
- Siddique, R. (2008). *Waste materials and by-products in concrete*. Springer.
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary cementing materials*. Springer Science & Business Media.
- SNI 03-2461-2002. (2002). *Spesifikasi agregat ringan untuk beton ringan stuktur*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-2847-2002. (2002). *Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 03-6825-2002. (2002). *Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil*. Badan Standardisasi Nasional.

- SNI 15-2049-2004. (2004). *Semen Portland*. Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 4154:2014. (2014). *Metode uji kekuatan lentur beton (menggunakan balok sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang)*. Badan Standardisasi Nasional.
- Singh, A., & Singh, N. (2024). *Mechanical properties of silica fume based concrete: A review*. Construction and Building Materials, 411, artikel 134496. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532400333X>
- Song, P. S., Hwang, S., & Sheu, B. C. (2005). *Strength properties of nylon- and polypropylene-fiber-reinforced concretes*. Cement and Concrete Research, 35(8), 1546–1550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.033>
- Suma, D. N., Noorhidana, V. A., Sebayang, S., Isneini, M. (2023). *Pengaruh komposisi penambahan serat polypropylene terhadap kuat tekan dan kuat lentur self compacting mortar (SCM)*. Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain. 11. 43-52. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v11i1.3019>
- Susanto, D., Djauhari, Z., & Olivia, M. 2019. *Karakteristik beton portland composite cement (pcc) dan silica fume untuk aplikasi struktur di daerah laut*. Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand), 15(1), 1. <https://doi.org/10.25077/jrs.15.1.1-11.2019>
- Sutriyono, B., Trimurtiningrum, R., & Rizkiardi, A. (2018). *Pengaruh silica fume sebagai substitusi semen terhadap nilai resapan dan kuat tekan mortar*. RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil, 4(4), 12–21. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v4i4.12>
- Tarru, R. O. (2018). *Studi penggunaan silica fume sebagai bahan pengisi (filler) pada campuran beton*. Journal Dynamic Saint, 3(1), 472–485. <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v3i1.271>
- Tjokrodimuljo, K. (1996). *Teknologi beton*. Yogyakarta: Nafiri.
- Tjokrodimuljo, K. (2007). *Teknologi beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit KMTS FT UGM.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Global status report for buildings and construction*.
- Wei, J., Zhang, S., Li, Z., & Zhang, Q. (2022). *Experimental study on compressive and flexural performances of polypropylene fiber-reinforced concrete*. Geofluids, 2022, 4168918. <https://doi.org/10.1155/2022/4168918>
- Yogendran, V., Langan, B. W., Haque, M. N., & Ward, M. A. (1987). *Silica fume in high-strength concrete*. ACI Materials Journal, 84(2), 124–129. <https://doi.org/10.14359/1848>