

SKRIPSI

PENGARUH LAMA PEMBAKARAN PADA SUHU KONSTAN TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR BERBASIS *FLY ASH* DAN *SILICA FUME* SEBAGAI PENGGANTI PARSIAL SEMEN

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1
Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik
Universitas Lambung Mangkurat

Disusun Oleh:

Muhammad Hamka

NIM. 2210811210032

Pembimbing:

Dr. Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc.

NIP. 196901061995022001



**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS LAMBUNG MANGKURAT
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL
BANJARBARU**

2026

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI PROGRAM STUDI S-1 TEKNIK SIPIL

Pengaruh Lama Pembakaran pada Suhu Konstan terhadap Kuat Tekan Mortar Berbasis *Fly Ash* dan *Silica Fume* sebagai Pengganti Parsial Semen

Oleh

Muhammad Hamka (2210811210032)

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji pada 7 Juli 2026 dan dinyatakan

LULUS

Komite Penguji :

Ketua : Dr. Rahmani Kadarningsih, S.T., M.T.

NIP. 19780430 200604 2 001

Penguji 2 : Dr. Eng. Irfan Prasetya, S.T., M.T.

NIP. 19851026 200812 1 001

Penguji 3 : Ir. Fauzi Rahman, M.T.

NIP. 19660520 199103 1 005

Pembimbing : Dr. Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc.

Utama NIP. 19690106 199502 2 001

Banjarbaru, ...15 JUL 2026.....

Diketahui dan disahkan oleh:

Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas

Teknik ULM,


Dr. Mahmud, S.T., M.T.
NIP. 19740107 199802 1 001

Koordinator Program Studi S-1

Teknik Sipil,


Dr. Muhammad Arsyad, S.T., M.T.
NIP. 19720826 199802 1 001

LEMBAR PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Hamka
NIM : 2210811210032
Fakultas : Teknik
Program Studi : S-1 Teknik Sipil
Judul Skripsi : Pengaruh Lama Pembakaran pada Suhu Konstan
terhadap Kuat Tekan Mortar Berbasis *Fly Ash* dan
Silica Fume sebagai Pengganti Parsial Semen.
Pembimbing : Dr. Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc.

Dengan ini menyatakan bahwa hasil penulisan Tugas Akhir yang telah saya buat ini merupakan hasil karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata di kemudian hari penulisan Tugas Akhir ini merupakan hasil plagiat atau penjiplakan terhadap karya orang lain, maka saya bersedia mempertanggungjawabkan sekaligus bersedia menerima sanksi berdasarkan aturan tata tertib di Universitas Lambung Mangkurat.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tidak dipaksakan.

Banjarbaru, 2026

Penulis,



Muhammad Hamka

NIM. 2210811210032

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim. Segala puji dan syukur dipanjatkan untuk Allah SWT, Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam juga untuk junjungan umat, Nabi Besar Muhammad SAW. Harapan dan doa pun terucap, semoga kita dapat memperoleh kebahagiaan dunia dan akhirat.

Tugas akhir ini disusun sebagai syarat untuk menempuh ujian Strata Satu (S1) pada Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, dengan judul “Pengaruh Lama Pembakaran pada Suhu Konstan terhadap Kuat Tekan Mortar Berbasis *Fly Ash* dan *Silica Fume* sebagai Pengganti Parsial Semen”. Keberhasilan penyusunan Tugas Akhir ini berkat doa restu dan dukungan banyak pihak, untuk itu penyusun mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua dan kedua kakak selaku keluarga penulis yang sangat berjasa dalam hidup penulis. Terimakasih atas semua doa yang selalu kalian panjatkan, serta dukungan yang tidak ada henti-hentinya sehingga penulis dapat menyelesaikan masa perkuliahan ini.
2. Ibu Dr. Ir. Ratni Nurwidayati, M.T., M.Eng.Sc. selaku Dosen Pembimbing atas kebaikan, kesabaran, dan kemurahan hati baik dalam membimbing, mengarahkan, dan memberikan ilmu yang bermanfaat selama masa perkuliahan maupun selama penyusunan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Rahmani Kadarningsih, S.T., M.T., Bapak Dr. Eng. Irfan Prasetya, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Fauzi Rahman, M.T. selaku tim penguji sidang skripsi yang telah membantu memberikan masukan dan saran sehingga menyempurnakan skripsi ini.
4. Segenap Dosen pengajar di Program Studi S-1 Teknik Sipil yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang luar biasa untuk penulis, memberikan kritik, saran, dan juga masukan selama perkuliahan.
5. Dessy Syawalia Rahma, selaku orang yang sangatlah berjasa, yang selalu kebersamai serta selalu memberikan cinta, kasih, bantuan, ilmu, semangat, dan motivasi tanpa henti. Terimakasih telah menjadi tempat pulang yang selalu dapat memberikan kehangatan di kala suka maupun duka.

6. Rekan-rekan Laboratorium Struktur dan Material, khususnya kepada Eka, Miftah, dan Ririn, yang sudah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan di dalam skripsi ini. Oleh karena itu kritik, saran dan masukan yang membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat, menambah wawasan dan pengetahuan bagi setiap pembacanya. Selain itu, tidak lupa juga penulis mengucapkan mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan dan kekurangan dalam hal penyampaian dan penulisan skripsi ini. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Banjarbaru, 2026

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hamka', with a stylized flourish at the end.

Muhammad Hamka

PENGARUH LAMA PEMBAKARAN PADA SUHU KONSTAN TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR BERBASIS *FLY ASH* DAN *SILICA FUME* SEBAGAI PENGANTI PARIAL SEMEN

Muhammad Hamka¹, Ratni Nurwidayati²

Program Studi Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat

Jl. Jenderal Achmad Yani Km 35,5 Banjarbaru, Kalimantan Selatan – 70714

E-mail: ¹muhammadhamka0746@gmail.com

ABSTRAK

Degradasi mekanis pada material mortar akibat paparan termal merupakan tantangan krusial dalam ketahanan struktur bangunan. Selain permasalahan ketahanan material, industri konstruksi menghadapi urgensi pengurangan emisi karbon yang dihasilkan oleh produksi semen portland konvensional. Sebagai langkah mitigasi, substitusi material pozzolan berupa *silica fume* dan *fly ash* diimplementasikan untuk meningkatkan performa mekanis sekaligus efisiensi lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pengaruh persentase substitusi *silica fume* dan *fly ash* terhadap kuat tekan mortar sebelum dan sesudah pembakaran, serta mengevaluasi respons mekanis material akibat variasi durasi paparan panas pada suhu konstan 300°C.

Metode penelitian eksperimental dilakukan melalui pengujian benda uji mortar berbentuk kubus berdimensi 50 mm x 50 mm x 50 mm yang melalui proses perendaman selama 28 hari. Komposisi substitusi semen ditetapkan sebesar 10% dan 15% *silica fume*, yang dikombinasikan dengan 0%, 5%, 10%, dan 15% *fly ash* dari berat total semen. Parameter kuat tekan diukur pada kondisi tanpa pembakaran serta pascapembakaran menggunakan *furnace* dengan variasi durasi waktu pemaparan selama 60, 90, 120, dan 150 menit.

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa pembakaran, mortar dengan substitusi 15% *silica fume* tanpa kombinasi *fly ash* mencapai nilai kuat tekan tertinggi sebesar 32,20 MPa. Analisis pada durasi pembakaran 60 menit menunjukkan variasi 15% *silica fume* menghasilkan kuat tekan 30,83 MPa, sedangkan pada durasi 90 menit dan 120 menit, variasi 10% *silica fume* memberikan kontribusi kekuatan optimal masing-masing sebesar 29,42 MPa dan 30,05 MPa. Selanjutnya, peningkatan durasi paparan hingga 150 menit menunjukkan pergeseran tren mekanis, di mana kombinasi 15% *silica fume* dan 15% *fly ash* menghasilkan kuat tekan 20,76 MPa.

Kata Kunci: *Fly ash*, kuat tekan, lama pembakaran, mortar, *silica fume*.

**THE EFFECT OF BURNING DURATION AT CONSTANT TEMPERATURE
ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF FLY ASH AND SILICA FUME-
BASED MORTAR AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT**

Muhammad Hamka¹, Ratni Nurwidayati²

¹*Civil Engineering Study Program*

Universitas Lambung Mangkurat

Jl. Jenderal Achmad Yani Km 35.5 Banjarbaru, South Kalimantan – 70714

E-mail: ¹muhammadhamka0746@gmail.com

ABSTRACT

Mechanical degradation of mortar material due to thermal exposure is a crucial challenge in structural building resilience. Furthermore, the construction industry faces an urgent need to reduce carbon emissions generated by conventional portland cement production. As a mitigation measure, the substitution of pozzolanic materials, such as silica fume and fly ash, is implemented to improve mechanical performance and environmental efficiency. This study aims to identify the effect of silica fume and fly ash substitution percentages on the compressive strength of mortar before and after burning, as well as to evaluate the material's mechanical response to varying heat exposure durations at a constant temperature of 300°C.

The experimental research method was conducted by testing 50 mm x 50 mm x 50 mm mortar cube specimens that underwent a 28-day water curing process. The cement substitution composition was set at 10% and 15% silica fume, combined with 0%, 5%, 10%, and 15% fly ash by total weight of cement. Compressive strength parameters were measured under conditions without burning and post-burning using a furnace with varied exposure durations of 60, 90, 120, and 150 minutes.

The test results indicate that under non-burning conditions, the mortar with 15% silica fume substitution without fly ash combination achieved the highest compressive strength of 32.20 MPa. Analysis at 60 minutes of burning duration showed that the 15% silica fume variation yielded a compressive strength of 30.83 MPa, while at 90 and 120 minutes of duration, the 10% silica fume variation provided optimal strength contributions of 29.42 MPa and 30.05 MPa, respectively. Furthermore, increasing the exposure duration to 150 minutes showed a shift in the mechanical trend, where the combination of 15% silica fume and 15% fly ash resulted in a compressive strength of 20.76 MPa.

Keywords: *Fly ash, compressive strength, burning duration, mortar, silica fume.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pengertian Mortar	6
2.2 Bahan Penyusun Mortar.....	7
2.3 <i>Silica Fume</i> (SF)	9
2.4 <i>Fly Ash</i> (FA).....	11
2.5 Efek Pembakaran Terhadap Beton dan Mortar	13
2.5.1 Efek Suhu Pembakaran.....	13
2.5.2 Efek Lama Waktu Pembakaran.....	15
2.6 Pengujian <i>Fineness</i>	17
2.7 Waktu Pengikatan	18
2.8 Perawatan Benda Uji (<i>Curing</i>).....	19
2.9 Pengujian Kuat Tekan	20
2.10 Validasi Data dengan Uji Grubbs.....	22
2.11 Pengujian <i>Scanning Electron Microscope</i> (SEM) dan <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	23
2.12 Penelitian Terdahulu	25

2.12.1	Penelitian Pengaruh <i>Silica Fume</i> & <i>Fly Ash</i> terhadap Beton & Mortar Tahan Panas	25
2.12.2	Penelitian Efek Pembakaran Terhadap Beton atau Mortar Terdahulu	32
BAB III METODE PENELITIAN		39
3.1	Bagan Alir Penelitian	39
3.2	Waktu dan Tempat.....	40
3.3	Alat dan Bahan.....	40
3.3.1	Alat.....	40
3.3.2	Bahan	40
3.4	Persiapan dan Pemeriksaan Bahan Dasar	41
3.4.1	<i>Silica Fume</i> (SF)	41
3.4.2	<i>Fly Ash</i> (FA).....	41
3.4.3	Agregat Halus	42
3.4.4	Semen Portland	42
3.4.5	Air	43
3.4.6	Pemeriksaan Bahan Dasar	43
3.5	Pengujian <i>Fineness Silica Fume</i> (SF) dan (<i>Fly Ash</i>)	44
3.6	Waktu Pengikatan	46
3.7	Rancangan Penelitian.....	49
3.8	Perhitungan <i>Mix design</i>	52
3.9	Pembuatan Benda Uji	54
3.10	Perawatan (<i>Curing</i>) Benda Uji.....	57
3.11	Pengujian Benda Uji	58
3.11.1	Pengujian Tanpa Pembakaran	58
3.11.2	Pengujian Dengan Pembakaran.....	60
3.12	Penarikan Kesimpulan	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		65
4.1	Pemeriksaan Bahan	65
4.1.1	Pemeriksaan <i>Silica Fume</i> (SF).....	65
4.1.2	Pemeriksaan <i>Fly Ash</i> (FA).....	66
4.1.3	Pemeriksaan Agregat Halus	66

4.1.4	Pemeriksaan Waktu Pengikatan.....	68
4.2	Pengamatan Visual	70
4.2.1	Pengaruh Lama Pembakaran	70
4.2.2	Pengaruh Persentase <i>Silica Fume</i> (SF) dan <i>Fly Ash</i> (FA)	84
4.3	Perubahan Suhu.....	96
4.3.1	Benda Uji MS10F0	96
4.3.2	Benda Uji MS10F5	100
4.3.3	Benda Uji MS10F10	104
4.3.4	Benda Uji MS10F15	108
4.3.5	Benda Uji MS15F0	112
4.3.6	Benda Uji MS15F5	116
4.3.7	Benda Uji MS15F10	120
4.3.8	Benda Uji MS15F15	124
4.4	Perubahan Berat	128
4.4.1	Benda Uji MS10F0	128
4.4.2	Benda Uji MS10F5	132
4.4.3	Benda Uji MS10F10	135
4.4.4	Benda Uji MS10F15	138
4.4.5	Benda Uji MS15F0	141
4.4.6	Benda Uji MS15F5	144
4.4.7	Benda Uji MS15F10	147
4.4.8	Benda Uji MS15F15	150
4.4.9	Rekapitulasi Berat Benda Uji.....	153
4.5	Kuat Tekan Mortar.....	158
4.5.1	Pengaruh Lama Pembakaran Terhadap Kuat Tekan	159
4.5.2	Pengaruh Persentase <i>Silica Fume</i> dan <i>Fly Ash</i> Terhadap Kuat Tekan	190
BAB V KESIMPULAN.....		203
5.1	Kesimpulan.....	203
5.1	Saran	204
DAFTAR PUSTAKA.....		205

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1	Nomenklatur Benda Uji Mortar <i>Silica Fume</i> dan <i>Fly Ash</i>	50
Tabel 3. 2	<i>Mix Design</i> untuk 6 Sampel berdasarkan ASTM C-109	52
Tabel 3. 3	<i>Mix Design</i> untuk 15 Sampel berdasarkan ASTM C-109	52
Tabel 3. 4	<i>Mix Design</i> SF 10% dan FA 0% sebagai Pengganti Parsial Semen..	52
Tabel 3. 5	<i>Mix Design</i> SF 10% dan FA 5% sebagai Pengganti Parsial Semen..	53
Tabel 3. 6	<i>Mix Design</i> SF 10% dan FA 10% sebagai Pengganti Parsial Semen	53
Tabel 3. 7	<i>Mix Design</i> SF 10% dan FA 15% sebagai Pengganti Parsial Semen	53
Tabel 3. 8	<i>Mix Design</i> SF 15% dan FA 0% sebagai Pengganti Parsial Semen..	53
Tabel 3. 9	<i>Mix Design</i> SF 15% dan FA 5% sebagai Pengganti Parsial Semen..	53
Tabel 3. 10	<i>Mix Design</i> SF 15% dan FA 10% sebagai Pengganti Parsial Semen	54
Tabel 3. 11	<i>Mix Design</i> SF 15% dan FA 15% sebagai Pengganti Parsial Semen	54
Tabel 3. 12	Rekapitulasi <i>Mix Design</i>	54
Tabel 4. 1	Hasil Pemeriksaan <i>Silica Fume</i> (SF)	65
Tabel 4. 2	Hasil Pemeriksaan <i>Fly Ash</i> (FA)	66
Tabel 4. 3	Hasil Pemeriksaan Agregat Halus.....	66
Tabel 4. 4	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS10F0 ...	70
Tabel 4. 5	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS10F5 ...	72
Tabel 4. 6	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS10F10 .	74
Tabel 4. 7	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS10F15 .	75
Tabel 4. 8	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS15F0 ...	77
Tabel 4. 9	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS15F5 ...	78
Tabel 4. 10	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS15F10 .	80
Tabel 4. 11	Hasil Pengamatan Visual Pengaruh Lama Pembakaran MS15F15 .	82
Tabel 4. 12	Hasil Pengamatan Visual Lama Pembakaran 60 Menit	85
Tabel 4. 13	Hasil Pengamatan Visual Lama Pembakaran 90 Menit	87
Tabel 4. 14	Hasil Pengamatan Visual Lama Pembakaran 120 Menit	90
Tabel 4. 15	Hasil Pengamatan Visual Lama Pembakaran 150 Menit	93
Tabel 4. 16	Hasil Perubahan Suhu MS10F0 Durasi 60 Menit Pembakaran	97
Tabel 4. 17	Hasil Perubahan Suhu MS10F0 Durasi 90 Menit Pembakaran	98
Tabel 4. 18	Hasil Perubahan Suhu MS10F0 Durasi 120 Menit Pembakaran	99

Tabel 4. 19	Hasil Perubahan Suhu MS10F0 Durasi 150 Menit Pembakaran ...	100
Tabel 4. 20	Hasil Perubahan Suhu MS10F5 Durasi 60 Menit Pembakaran	101
Tabel 4. 21	Hasil Perubahan Suhu MS10F5 Durasi 90 Menit Pembakaran	102
Tabel 4. 22	Hasil Perubahan Suhu MS10F5 Durasi 120 Menit Pembakaran ...	103
Tabel 4. 23	Hasil Perubahan Suhu MS10F5 Durasi 150 Menit Pembakaran ...	104
Tabel 4. 24	Hasil Perubahan Suhu MS10F10 Durasi 60 Menit Pembakaran ...	105
Tabel 4. 25	Hasil Perubahan Suhu MS10F10 Durasi 90 Menit Pembakaran ...	106
Tabel 4. 26	Hasil Perubahan Suhu MS10F10 Durasi 120 Menit Pembakaran .	107
Tabel 4. 27	Hasil Perubahan Suhu MS10F10 Durasi 150 Menit Pembakaran .	108
Tabel 4. 28	Hasil Perubahan Suhu MS10F15 Durasi 60 Menit Pembakaran ...	109
Tabel 4. 29	Hasil Perubahan Suhu MS10F15 Durasi 90 Menit Pembakaran	110
Tabel 4. 30	Hasil Perubahan Suhu MS10F15 Durasi 120 Menit Pembakaran ..	111
Tabel 4. 31	Hasil Perubahan Suhu MS10F15 Durasi 150 Menit Pembakaran ..	112
Tabel 4. 32	Hasil Perubahan Suhu MS15F0 Durasi 60 Menit Pembakaran	113
Tabel 4. 33	Hasil Perubahan Suhu MS15F0 Durasi 90 Menit Pembakaran	114
Tabel 4. 34	Hasil Perubahan Suhu MS15F0 Durasi 120 Menit Pembakaran	115
Tabel 4. 35	Hasil Perubahan Suhu MS15F0 Durasi 150 Menit Pembakaran	116
Tabel 4. 36	Hasil Perubahan Suhu MS15F5 Durasi 60 Menit Pembakaran	117
Tabel 4. 37	Hasil Perubahan Suhu MS15F5 Durasi 90 Menit Pembakaran	118
Tabel 4. 38	Hasil Perubahan Suhu MS15F5 Durasi 120 Menit Pembakaran	119
Tabel 4. 39	Hasil Perubahan Suhu MS15F5 Durasi 150 Menit Pembakaran ...	120
Tabel 4. 40	Hasil Perubahan Suhu MS15F10 Durasi 60 Menit Pembakaran ...	121
Tabel 4. 41	Hasil Perubahan Suhu MS15F10 Durasi 90 Menit Pembakaran ...	122
Tabel 4. 42	Hasil Perubahan Suhu MS15F10 Durasi 120 Menit Pembakaran .	123
Tabel 4. 43	Hasil Perubahan Suhu MS15F10 Durasi 150 Menit Pembakaran .	124
Tabel 4. 44	Hasil Perubahan Suhu MS15F15 Durasi 60 Menit Pembakaran ...	125
Tabel 4. 45	Hasil Perubahan Suhu MS15F15 Durasi 90 Menit Pembakaran ...	126
Tabel 4. 46	Hasil Perubahan Suhu MS15F15 Durasi 120 Menit Pembakaran .	127
Tabel 4. 47	Hasil Perubahan Suhu MS15F15 Durasi 150 Menit Pembakaran .	128
Tabel 4. 48	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F0-0	129
Tabel 4. 49	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F0-60	129
Tabel 4. 50	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F0-90	130

Tabel 4. 51	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F0-120	131
Tabel 4. 52	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F0-150	131
Tabel 4. 53	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F5-0	132
Tabel 4. 54	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F5-60	133
Tabel 4. 55	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F5-90	133
Tabel 4. 56	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F5-120	134
Tabel 4. 57	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F5-150	134
Tabel 4. 58	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F10-0	135
Tabel 4. 59	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F10-60	136
Tabel 4. 60	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F10-90	136
Tabel 4. 61	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F10-120 ...	137
Tabel 4. 62	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F10-150 ...	137
Tabel 4. 63	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F15-0	138
Tabel 4. 64	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F15-60	139
Tabel 4. 65	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F15-90	139
Tabel 4. 66	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F15-120 ...	140
Tabel 4. 67	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS10F15-150 ...	140
Tabel 4. 68	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F0-0	141
Tabel 4. 69	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F0-60	142
Tabel 4. 70	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F0-90	142
Tabel 4. 71	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F0-120	143
Tabel 4. 72	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F0-150	143
Tabel 4. 73	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F5-0	144
Tabel 4. 74	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F5-60	145
Tabel 4. 75	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F5-90	145
Tabel 4. 76	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F5-120	146
Tabel 4. 77	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F5-150	146
Tabel 4. 78	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F10-0	147
Tabel 4. 79	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F10-60	148
Tabel 4. 80	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F10-90	148
Tabel 4. 81	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F10-120 ...	149
Tabel 4. 82	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F10-150 ...	149

Tabel 4. 83	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F15-0	150
Tabel 4. 84	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F15-60	151
Tabel 4. 85	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F15-90	151
Tabel 4. 86	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F15-120 ...	152
Tabel 4. 87	Hasil Perbandingan Perubahan Berat Benda Uji MS15F15-150 ...	152
Tabel 4. 88	Rekapitulasi Perubahan Berat Benda Uji Tanpa Pembakaran serta Variasi Durasi Pembakaran	153
Tabel 4. 89	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F0-0.....	159
Tabel 4. 90	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F0-60.....	159
Tabel 4. 91	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F0-90.....	160
Tabel 4. 92	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F0-120.....	160
Tabel 4. 93	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F0-150.....	160
Tabel 4. 94	Uji Grubb's Sampel MS10F0-0.....	161
Tabel 4. 95	Uji Grubb's Sampel MS10F0-60.....	162
Tabel 4. 96	Uji Grubb's Sampel MS10F0-90.....	162
Tabel 4. 97	Uji Grubb's Sampel MS10F0-120.....	163
Tabel 4. 98	Uji Grubb's Sampel MS10F0-150.....	163
Tabel 4. 99	Rekapitulasi Uji Grubb's Uji Tekan MS10F0	164
Tabel 4. 100	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F5-0.....	166
Tabel 4. 101	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F5-60.....	167
Tabel 4. 102	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F5-90.....	167
Tabel 4. 103	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F5-120	167
Tabel 4. 104	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F5-150.....	168
Tabel 4. 105	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F10-0.....	169
Tabel 4. 106	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F10-60.....	170
Tabel 4. 107	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F10-90.....	170
Tabel 4. 108	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F10-120.....	170
Tabel 4. 109	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F10-150.....	171
Tabel 4. 110	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F15-0.....	172
Tabel 4. 111	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F15-60.....	172
Tabel 4. 112	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F15-90.....	173
Tabel 4. 113	Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F15-120.....	173

Tabel 4. 114 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS10F15-150.....	173
Tabel 4. 115 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F0-0.....	175
Tabel 4. 116 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F0-60.....	175
Tabel 4. 117 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F0-90.....	176
Tabel 4. 118 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F0-120.....	176
Tabel 4. 119 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F0-150.....	176
Tabel 4. 120 Uji Grubb's Sampel MS15F0-0.....	177
Tabel 4. 121 Uji Grubb's Sampel MS15F0-60.....	178
Tabel 4. 122 Uji Grubb's Sampel MS15F0-90.....	178
Tabel 4. 123 Uji Grubb's Sampel MS15F0-120.....	179
Tabel 4. 124 Rekapitulasi Uji Grubb's Uji Tekan MS15F0.....	179
Tabel 4. 125 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F5-0.....	182
Tabel 4. 126 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F5-60.....	182
Tabel 4. 127 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F5-90.....	182
Tabel 4. 128 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F5-120.....	183
Tabel 4. 129 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F5-150.....	183
Tabel 4. 130 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F10-0.....	185
Tabel 4. 131 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F10-60.....	185
Tabel 4. 132 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F10-90.....	185
Tabel 4. 133 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F10-120.....	186
Tabel 4. 134 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F10-150.....	186
Tabel 4. 135 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F15-0.....	188
Tabel 4. 136 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F15-60.....	188
Tabel 4. 137 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F15-90.....	188
Tabel 4. 138 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F15-120.....	189
Tabel 4. 139 Hasil Pengujian Kuat Tekan MS15F15-150.....	189
Tabel 4. 140 Rekapitulasi Uji Tekan Mortar Tanpa Pembakaran.....	190
Tabel 4. 141 Rekapitulasi Uji Tekan Mortar 60 Menit Pembakaran.....	193
Tabel 4. 142 Rekapitulasi Uji Tekan Mortar 90 Menit Pembakaran.....	195
Tabel 4. 143 Rekapitulasi Uji Tekan Mortar 120 Menit Pembakaran.....	198
Tabel 4. 144 Rekapitulasi Uji Tekan Mortar 150 Menit Pembakaran.....	200

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Kurva Aliran Panas (<i>Heat Flow</i>) Hasil Pengujian Hidrasi	17
Gambar 2. 2	Cetakan Benda Uji Kubus	21
Gambar 2. 3	Gaya dan Luasan Mortar	21
Gambar 2. 4	Skema Pengujian Kuat Tekan Mortar.....	21
Gambar 2. 5	Hasil Pengujian SEM (1300x) untuk Material SF	23
Gambar 2. 6	Hasil Pengujian SEM (5000x) untuk Material SF	24
Gambar 2. 7	Hasil Pengujian SEM (16000x) untuk Material SF	24
Gambar 3. 1	Bagan Alir Penelitian.....	39
Gambar 3. 2	<i>Silica Fume</i>	41
Gambar 3. 3	<i>Fly Ash</i> Lolos Saringan No. 200.....	42
Gambar 3. 4	Agregat Halus	42
Gambar 3. 5	Semen Portland.....	43
Gambar 3. 6	Menimbang <i>Silica Fume</i>	44
Gambar 3. 7	Menimbang <i>Fly Ash</i>	44
Gambar 3. 8	Mencuci <i>Silica Fume</i>	45
Gambar 3. 9	Mencuci <i>Fly Ash</i>	45
Gambar 3. 10	Mengoven <i>Silica Fume</i>	45
Gambar 3. 11	Mengoven <i>Fly Ash</i>	46
Gambar 3. 12	Menimbang <i>Silica Fume</i> setelah di Oven	46
Gambar 3. 13	Menimbang <i>Fly Ash</i> setelah di Oven.....	46
Gambar 3. 14	Alat Vicat	47
Gambar 3. 15	Semen Portland, <i>Silica Fume</i> , <i>Fly Ash</i> dan Air	47
Gambar 3. 16	Pengadukan Mortar.....	47
Gambar 3. 17	Mencetak Pasta ke dalam Cincin Korus	48
Gambar 3. 18	Memasukkan Benda Uji ke dalam Termostatik	48
Gambar 3. 19	Pengujian Waktu Pengikatan untuk Pertama Kali	48
Gambar 3. 20	Pengujian Waktu Pengikatan	49
Gambar 3. 21	Menimbang Agregat Halus.....	55
Gambar 3. 22	Menimbang Semen Portland.....	55
Gambar 3. 23	Menimbang <i>Silica Fume</i>	55

Gambar 3. 24 Menimbang <i>Fly Ash</i>	55
Gambar 3. 25 Bekisting yang Telah Diolesi Oli.....	56
Gambar 3. 26 Memasukkan Air, Semen, <i>Silica Fume</i> dan <i>Fly Ash</i>	56
Gambar 3. 27 Melakukan Pencampuran Adonan Mortar.....	56
Gambar 3. 28 Mortar yang telah Dicitak pada Bekisting.....	57
Gambar 3. 29 Mortar yang telah Dikeluarkan dari Bekisting	57
Gambar 3. 30 <i>Curing</i> Benda Uji.....	58
Gambar 3. 31 Menimbang Benda Uji Sebelum Uji Tekan.....	58
Gambar 3. 32 Meletakkan Benda Uji pada Mesin Uji Tekan.....	59
Gambar 3. 33 Mesin Uji Tekan	59
Gambar 3. 34 Pengujian Kuat Tekan.....	59
Gambar 3. 35 Hasil Uji Kuat Tekan	60
Gambar 3. 36 Menimbang Benda Uji Sebelum dilakukan Pembakaran	60
Gambar 3. 37 Alat <i>Furnace</i>	60
Gambar 3. 38 Mengukur Suhu Sebelum Pembakaran.....	61
Gambar 3. 39 Mengukur Suhu Alat <i>Furnace</i> saat Suhu 300 °C	61
Gambar 3. 40 Memasukkan Benda Uji ke dalam <i>Furnace</i>	61
Gambar 3. 41 Mengukur Suhu Alat <i>Furnace</i> Setelah Pembakaran.....	62
Gambar 3. 42 Mengukur Suhu Benda Uji Setelah Pembakaran.....	62
Gambar 3. 43 Mengukur Suhu Ruang	63
Gambar 3. 44 Mengukur Suhu Benda Uji Setelah 24 Jam.....	63
Gambar 3. 45 Menimbang Benda Uji Setelah Pembakaran	63
Gambar 3. 46 Pengujian Kuat Tekan Setelah Pembakaran.....	64
Gambar 3. 47 Hasil Kuat Tekan Benda Uji Setelah Pembakaran.....	64
Gambar 4. 1 Hasil Analisa Saringan Pasir Barito.....	67
Gambar 4. 2 Perbandingan Berat Volume Agregat Dalam Keadaan Lepas, Goyang dan Pemadatan	68
Gambar 4. 3 Pengaruh Persentase SF dan FA pada <i>Setting Time</i>	68
Gambar 4. 4 Rekapitulasi Perubahan Berat Benda Uji Sebelum dan Setelah Pembakaran Untuk Variasi MS10	157
Gambar 4. 5 Rekapitulasi Perubahan Berat Benda Uji Sebelum dan Setelah Pembakaran Untuk Variasi MS15	157

Gambar 4. 6	Rekapitulasi Sebelum Uji Grubb's MS10F0	164
Gambar 4. 7	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan MS10F0.....	165
Gambar 4. 8	Rekapitulasi Uji Tekan MS10F5	168
Gambar 4. 9	Rekapitulasi Uji Tekan MS10F10	171
Gambar 4. 10	Rekapitulasi Uji Tekan MS10F15	174
Gambar 4. 11	Rekapitulasi Sebelum Uji Grubb's MS15F0	180
Gambar 4. 12	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan MS15F0.....	180
Gambar 4. 13	Rekapitulasi Uji Tekan MS15F5	183
Gambar 4. 14	Rekapitulasi Uji Tekan MS15F10	186
Gambar 4. 15	Rekapitulasi Uji Tekan MS15F15	189
Gambar 4. 16	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan Mortar Tanpa Pembakaran.....	191
Gambar 4. 17	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan Mortar Pembakaran 60 Menit.....	194
Gambar 4. 18	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan Mortar Pembakaran 90 Menit.....	196
Gambar 4. 19	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan Mortar Pembakaran 120 Menit.....	199
Gambar 4. 20	Rekapitulasi Setelah Uji Grubb's Uji Tekan Mortar Pembakaran 150 Menit.....	201

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebakaran bangunan masih menjadi kejadian yang cukup sering terjadi di Indonesia dan menimbulkan dampak serius terhadap keselamatan serta kerusakan bangunan. Data menunjukkan bahwa pada tahun 2021 tercatat lebih dari 10.000 kejadian kebakaran secara nasional (Sarmin dkk., 2025). Tingginya frekuensi kejadian tersebut menyebabkan banyak bangunan mengalami kerusakan fisik dan struktural, sehingga diperlukan evaluasi teknis yang memadai untuk memastikan kelayakan elemen struktur sebelum bangunan dapat difungsikan kembali (Kadriani dkk., 2024).

Beton dan mortar sebagai material utama penyusun bangunan merupakan material yang rentan terhadap paparan suhu tinggi akibat pembakaran. Paparan temperatur tinggi menyebabkan penguapan air terikat dan degradasi struktur pasta semen, yang berdampak pada penurunan sifat mekanik material (Yazici dkk., 2012). Degradasi tersebut juga memicu peningkatan porositas serta terbentuknya retak mikro, sehingga kuat tekan residu beton dan mortar mengalami penurunan setelah proses pendinginan (Khurram dkk., 2018). Oleh karena itu, penilaian kondisi beton dan mortar pasca pembakaran tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan pengamatan visual, tetapi perlu didukung oleh pengujian mekanik untuk menentukan kelayakan strukturalnya (Soamole dkk., 2022).

Selain permasalahan ketahanan terhadap pembakaran, penggunaan beton normal secara luas juga menimbulkan persoalan lingkungan. Industri semen portland diketahui menyumbang sekitar 7-8% dari total emisi karbon dioksida global akibat tingginya konsumsi energi dalam proses produksinya (Andrew, 2018). Kondisi ini mendorong pengembangan material berbasis semen yang lebih berkelanjutan melalui pengurangan penggunaan semen portland (Zhang dkk., 2025). Mortar sebagai material berbasis semen yang terdiri atas semen, air, dan agregat halus berfungsi sebagai bahan pengikat pada pasangan bata dan elemen non-struktural lainnya (Palacios dkk., 2023). Meskipun tidak berperan sebagai elemen struktural utama, kinerja mortar tetap berpengaruh terhadap integritas dan

durabilitas bangunan. Paparan suhu tinggi diketahui menyebabkan penurunan kuat tekan mortar akibat perubahan mikrostruktur dan meningkatnya porositas material (Praneedpolkrang dkk., 2024). Kerusakan ini umumnya tidak terjadi secara instan, melainkan bertahap seiring dengan peningkatan suhu dan lamanya durasi paparan panas.

Pada suhu pemanasan 300 °C, mortar mulai mengalami perubahan internal pada mikrostrukturnya. Peningkatan suhu pada level ini menyebabkan air kapiler dan sebagian air kristal mulai menguap, yang memicu penambahan porositas material serta degradasi awal matriks semen. Suhu 300 °C dapat dianggap sebagai ambang batas atau fase transisi kritis sebelum material memasuki zona kerusakan ekstrem pada rentang 400-600 °C, di mana pada suhu yang lebih tinggi tersebut dekomposisi kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) menjadi kalsium oksida (CaO) berlangsung secara intensif dan menurunkan kekuatan secara drastis (Pereira & Colen, 2020). Oleh karena itu, pemanasan pada 300 °C menjadi tahap yang sangat penting untuk memahami respons awal dan ketahanan mikrostruktur mortar terhadap penetrasi panas sebelum mengalami keruntuhan termal yang lebih lanjut (Lipska dkk., 2021).

Selain tingkat temperatur, lamanya waktu pembakaran (durasi) juga merupakan parameter krusial yang menentukan tingkat akumulasi kerusakan mortar akibat paparan api. Pada suhu konstan yang sama, perbedaan durasi paparan panas dapat menyebabkan kedalaman penetrasi panas yang berbeda, sehingga memicu variasi degradasi mikrostruktur. Cülfik dan Özturan (2002) menyatakan bahwa mortar mengalami kehilangan kuat tekan sebesar 12-29% pada suhu 300 °C, sehingga masih mempertahankan sekitar 71-88% dari kekuatan awalnya. Selain itu, durasi pembakaran yang lebih lama menghasilkan penurunan kuat tekan yang lebih besar, di mana paparan selama 10 jam menyebabkan kehilangan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan paparan selama 1 jam, dengan selisih penurunan sekitar 7%. Temuan ini menunjukkan bahwa durasi pembakaran memiliki pengaruh langsung terhadap tingkat degradasi mekanik mortar meskipun suhu pembakaran tetap.

Penelitian oleh Wiranata dan Afrizal (2016) menunjukkan bahwa pada durasi pembakaran hingga 90 menit, kuat tekan mortar masih relatif tinggi. Namun, pada

rentang waktu 90-120 menit mulai terjadi penurunan kuat tekan yang dipengaruhi oleh peningkatan porositas serta melemahnya matriks internal mortar. Berdasarkan hal tersebut, variasi durasi pembakaran 60, 90, 120, dan 150 menit digunakan dalam penelitian ini untuk merepresentasikan paparan panas jangka pendek hingga menengah, serta untuk mengamati penurunan kuat tekan mortar secara bertahap pada kondisi suhu yang masih berada pada tahap awal kerusakan termal.

Selain parameter suhu dan durasi pembakaran, komposisi material penyusun mortar juga berperan dalam menentukan ketahanan terhadap suhu tinggi. Pemanfaatan *supplementary cementitious materials* (SCM) seperti *silica fume* dan *fly ash* menjadi salah satu upaya yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan performa material sekaligus mengurangi penggunaan semen portland. *Silica fume* merupakan bahan pozolan ultra-halus yang berperan sebagai *micro-filler* dan bereaksi secara pozolanik dengan kalsium hidroksida sehingga membentuk struktur C-S-H yang lebih rapat. Penelitian pada beton dengan penambahan *silica fume* yang dipanaskan pada suhu 27 °C, 250 °C, 500 °C, dan 750 °C menunjukkan peningkatan kuat tekan residu serta struktur mikro yang lebih kompak dibandingkan beton normal, sebagaimana ditunjukkan melalui analisis SEM dan EDS (Balaji dkk., 2025).

Fly ash merupakan bahan pozolan hasil samping pembakaran batu bara yang mengandung silika dan alumina reaktif. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen pada mortar yang dipanaskan pada suhu 200 °C hingga 800 °C menunjukkan bahwa meskipun kuat tekan menurun seiring peningkatan suhu, mortar dengan *fly ash* tetap memiliki performa residu yang lebih stabil dibandingkan mortar tanpa bahan pozolan. Mortar dengan 10% *fly ash* menunjukkan kuat tekan residu yang relatif lebih baik serta kehilangan massa yang lebih terkendali pada beberapa kondisi pembakaran (Quadri & Bankole, 2024). Pemanfaatan kombinasi antara *silica fume* dan *fly ash* secara bersamaan diharapkan mampu memberikan efek sinergis yang optimal. Sifat *silica fume* yang reaktif pada umur awal dikombinasikan dengan kontribusi jangka panjang serta stabilitas termal dari *fly ash* diproyeksikan mampu menghasilkan matriks mortar dengan kerapatan interfisial yang tinggi, sehingga lebih tangguh dalam menahan tekanan uap internal saat terjadi pembakaran. Meskipun masing-masing material SCM dan pengaruh

temperatur telah banyak dikaji secara terpisah, penelitian yang secara spesifik menginvestigasi efek sinergis kombinasi *silica fume* dan *fly ash* terhadap variasi durasi pembakaran pada suhu transisi 300 °C masih sangat terbatas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian berjudul “Pengaruh Lama Pembakaran Pada Suhu Konstan Terhadap Kuat Tekan Mortar Berbasis *Fly Ash* Dan *Silica Fume* Sebagai Pengganti Parsial Semen” dilakukan untuk pendekatan eksperimental yang dirancang secara spesifik guna membuktikan secara empiris efektivitas penggunaan *fly ash* dan *silica fume* sebagai pengganti parsial semen dalam menahan laju kerusakan mortar akibat variasi durasi paparan panas pada fase transisi termalnya. Melalui kajian ini, diharapkan diperoleh pemahaman komprehensif mengenai hubungan antara durasi pembakaran dan optimalisasi komposisi material, serta berkontribusi langsung terhadap pengembangan material konstruksi yang tangguh terhadap api dan berkelanjutan secara lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase *silica fume* dan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan mortar sebelum dan sesudah pembakaran?
2. Bagaimana pengaruh variasi lama pembakaran pada suhu konstan terhadap kuat tekan mortar berbasis *fly ash* dan *silica fume* sebagai pengganti parsial semen?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi persentase *silica fume* dan *fly ash* sebagai pengganti parsial semen terhadap kuat tekan mortar sebelum dan sesudah pembakaran.
2. Menganalisis pengaruh variasi lama pembakaran pada suhu konstan terhadap kuat tekan mortar berbasis *fly ash* dan *silica fume* sebagai pengganti parsial semen.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menjaga ruang lingkup penelitian tetap fokus, batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Objek penelitian dibatasi pada mortar berbasis semen dengan *fly ash* dan *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen.
2. Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir Barito.
3. *Fly ash* yang digunakan berasal dari *fly ash* Pulang Pisau.
4. Variasi kadar bahan pengganti parsial semen yang digunakan meliputi:
 1. *Fly ash* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen.
 2. *Silica fume* sebesar 10% dan 15% dari berat semen.
5. Bahan penyusun mortar dalam penelitian ini dibatasi pada semen, *fly ash*, *silica fume*, agregat halus, dan air.
6. Parameter pembakaran dibatasi pada suhu konstan yang ditetapkan dalam penelitian, dengan acuan rentang suhu tinggi yang digunakan dalam penelitian terdahulu, yaitu 300 °C, sebagai simulasi kondisi pasca pembakaran.
7. Variabel utama yang ditinjau adalah variasi lama pembakaran pada suhu konstan, sedangkan variasi suhu pembakaran tidak menjadi fokus penelitian.
8. Sifat mekanik yang dianalisis dibatasi pada kuat tekan, tanpa membahas sifat mekanik lainnya seperti kuat tarik, kuat lentur, atau modulus elastisitas.
9. Proses pembakaran dilakukan menggunakan *furnace* laboratorium.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menjadi referensi tambahan bagi mahasiswa dan peneliti lain yang ingin mengkaji pengaruh lama pembakaran pada suhu konstan terhadap kuat tekan mortar berbasis *fly ash* dan *silica fume* sebagai pengganti parsial semen.
2. Menjadi referensi teknis bagi praktisi konstruksi dalam pemilihan dan pengembangan mortar yang lebih tahan terhadap paparan suhu tinggi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Mortar

Mortar merupakan material bangunan berbasis bahan pengikat yang digunakan untuk menyatukan elemen *masonry* seperti batu bata, blok, dan batu alam sehingga membentuk satu kesatuan struktur dinding. Fungsi utama mortar tidak hanya sebagai perekat, tetapi juga sebagai media transfer beban antar elemen *masonry* serta penyesuaian toleransi geometris dalam konstruksi dinding (Chyliński dkk., 2024). Dengan peran tersebut, mortar menjadi komponen penting dalam menjaga stabilitas dan kinerja bangunan.

Secara material, mortar diklasifikasikan sebagai material komposit yang tersusun atas satu atau lebih bahan pengikat, agregat halus, dan air. Bahan pengikat yang umum digunakan meliputi semen portland, kapur, atau kombinasi keduanya, sementara agregat halus berfungsi sebagai pengisi yang memengaruhi kepadatan dan stabilitas mortar. Komposisi tersebut menghasilkan sifat mortar yang plastis saat segar dan cukup kuat setelah mengeras untuk mempertahankan integritas pasangan *masonry* (Almeida dkk., 2024).

Dalam konteks perkembangan material bangunan, mortar telah mengalami evolusi yang panjang sejak digunakan pada konstruksi tradisional hingga diaplikasikan pada sistem bangunan modern. Mortar awalnya diformulasikan secara sederhana sebagai campuran kapur dan pasir, namun seiring kemajuan teknologi material, mortar modern berkembang menjadi material berbasis semen dengan sifat mekanik dan durabilitas yang lebih terkendali (Wilkie & Dyer, 2024). Evolusi ini menunjukkan bahwa mortar tidak hanya berfungsi sebagai perekat, tetapi juga sebagai bagian integral dari sistem struktur bangunan.

Pada konstruksi modern, karakteristik mortar dirancang agar selaras dengan sifat elemen *masonry* yang digunakan. Mortar yang baik harus memiliki kekuatan yang memadai, kompatibilitas deformasi, serta daya tahan terhadap pengaruh lingkungan agar tidak menjadi titik lemah dalam sistem bangunan (Gutiérrez dkk., 2024). Oleh karena itu, pemilihan jenis dan komposisi mortar menjadi aspek penting dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi.

Selain itu, kajian terkini menunjukkan bahwa definisi mortar tidak dapat dilepaskan dari variabel komposisi dan tujuan penggunaannya. Mortar dapat diformulasikan untuk memenuhi kebutuhan tertentu, seperti kemudahan pengerjaan, kekuatan tekan, atau ketahanan terhadap lingkungan, dengan tetap mempertahankan fungsi dasarnya sebagai material pengikat *masonry* (Šupić dkk., 2023).

2.2 Bahan Penyusun Mortar

Bahan penyusun mortar pada umumnya terdiri atas semen portland, agregat halus (pasir), dan air. Ketiga material tersebut memiliki fungsi yang saling berkaitan dalam menentukan sifat mortar, baik pada kondisi segar maupun setelah mengeras. Berikut adalah bahan-bahan penyusunnya:

1. Semen Portland

Semen portland merupakan bahan pengikat hidraulis yang berfungsi sebagai komponen utama dalam pembentukan kekuatan mortar. Semen portland didefinisikan sebagai semen hidraulis yang dihasilkan dari proses penggilingan klinker, yang sebagian besar tersusun atas senyawa kalsium silikat, dengan atau tanpa penambahan bahan lain dalam jumlah tertentu. Ketika dicampur dengan air, semen portland mengalami reaksi hidrasi yang menghasilkan produk hidrasi, terutama kalsium silikat hidrat (C-S-H), yang berperan penting dalam memberikan kekuatan dan kekakuan pada mortar (Šupić dkk., 2021).

Jenis semen portland yang umum digunakan dalam pekerjaan mortar adalah semen portland tipe I karena memiliki sifat umum dan dapat digunakan untuk berbagai keperluan konstruksi. Pemilihan jenis semen serta proporsi penggunaannya akan memengaruhi waktu ikat, kuat tekan, dan ketahanan mortar terhadap pengaruh lingkungan. Dalam pengembangan material mortar modern, sebagian semen portland dapat digantikan oleh *supplementary cementitious materials* (SCM) untuk meningkatkan efisiensi material dan mengurangi dampak lingkungan tanpa menghilangkan fungsi utama semen sebagai bahan pengikat (Fode dkk., 2023).

2. Agregat Halus (Pasir)

Agregat halus dalam mortar umumnya berupa pasir alam yang berfungsi sebagai bahan pengisi untuk meningkatkan stabilitas volume dan membantu distribusi tegangan dalam mortar. Pasir yang digunakan sebagai agregat halus harus memenuhi persyaratan kebersihan dan gradasi agar dapat menghasilkan mortar dengan sifat mekanik yang baik. Agregat halus yang memiliki gradasi sesuai mampu menghasilkan mortar dengan struktur yang lebih homogen dan porositas yang lebih terkendali (Šupić dkk., 2021).

Ukuran butir agregat halus pada mortar umumnya berada dalam rentang agregat halus konstruksi, di mana pasir dengan gradasi baik dapat meningkatkan kepadatan mortar dan mengurangi rongga yang terbentuk. Penggunaan agregat halus dengan kualitas yang kurang baik dapat menurunkan kuat tekan serta meningkatkan daya serap air mortar, yang pada akhirnya berdampak pada durabilitas material (Hatungimana dkk., 2019).

3. Air

Air merupakan komponen penting dalam pembuatan mortar karena berperan dalam mengaktifkan reaksi hidrasi semen serta menentukan tingkat kelecakan mortar pada kondisi segar. Air yang digunakan sebagai air pencampur mortar harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat mengganggu proses hidrasi semen, seperti minyak, asam, alkali berlebih, maupun bahan organik. Air yang layak minum pada umumnya dianggap memenuhi syarat sebagai air pencampur mortar (Fode dkk., 2023).

Jumlah air yang digunakan dalam campuran mortar dinyatakan dalam rasio air terhadap bahan pengikat. Rasio air yang terlalu tinggi dapat menyebabkan peningkatan porositas dan penurunan kuat tekan mortar, sedangkan rasio air yang terlalu rendah dapat mengurangi kelecakan dan menyulitkan proses pengerjaan. Oleh karena itu, pengendalian jumlah air pencampur menjadi faktor penting dalam menghasilkan mortar dengan kinerja mekanik dan durabilitas yang optimal (Hatungimana dkk., 2019).

2.3 *Silica Fume* (SF)

Silica fume atau SF merupakan material pozzolan yang berasal dari produk samping industri silikon dan ferrosilikon. Material ini terbentuk dari kondensasi uap silikon oksida selama proses produksi silikon atau ferrosilikon, sehingga menghasilkan partikel silika amorf dengan ukuran yang sangat halus. Karakteristik utama SF meliputi kandungan silika amorf yang tinggi serta ukuran partikel yang jauh lebih kecil dibandingkan partikel semen, yang menyebabkan SF memiliki luas permukaan spesifik yang besar dan tingkat reaktivitas pozzolan yang tinggi. Oleh karena itu, SF banyak dimanfaatkan sebagai bahan pengganti parsial semen dalam campuran mortar dan beton, terutama dalam pengembangan material semen yang lebih berkelanjutan (Chishi dan Gautam, 2023).

Secara internasional, standarisasi mengenai spesifikasi, syarat mutu kimia, dan persyaratan fisik SF yang layak digunakan dalam campuran berbasis semen ini diatur secara ketat dalam ASTM C1240. Berdasarkan standar tersebut, SF yang berkualitas tinggi wajib memenuhi persyaratan kimia berupa kandungan silika dioksida (SiO_2) minimal 85,0%, kadar air maksimal 3,0%, serta nilai hilang pijar (*loss on ignition*) maksimal 6,0%. Selain itu, persyaratan fisik yang harus dipenuhi meliputi akumulasi material tertahan saringan No. 325 (*oversize*) maksimal 10,0%, luas permukaan spesifik minimal 15 m²/g, dan nilai indeks aktivitas kekuatan (*strength activity index*) minimal 105% pada pengujian umur 7 hari. Pemenuhan parameter-parameter tersebut sangat krusial karena pemanfaatan SF sebagai bahan pengganti parsial semen dapat memengaruhi karakteristik pasta semen yang terbentuk setelah proses hidrasi. Penambahan SF ke dalam campuran berbasis semen dilaporkan berkontribusi terhadap peningkatan kerapatan struktur internal pasta semen, yang selanjutnya berpengaruh terhadap nilai kuat tekan material (Toutanji, 1995).

Pengaruh kadar SF dan rasio air-semen terhadap kuat tekan mortar dikaji oleh Badalyan dkk. (2024) melalui penelitian mortar berbasis semen dengan penambahan SF sebagai pengganti parsial semen sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat semen, serta menggunakan variasi rasio air-semen (*water-cement ratio*) sebesar 0,44; 0,47; dan 0,50. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan rasio air-semen berkaitan dengan perubahan kuat tekan mortar pada

seluruh variasi kadar SF yang digunakan, serta variasi kadar SF menghasilkan perbedaan nilai kuat tekan antar campuran mortar yang diuji.

Lebih lanjut, Badalyan dkk. (2024) menyatakan bahwa hubungan antara rasio air-semen dan kuat tekan mortar tetap konsisten pada seluruh variasi kadar SF. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaruh SF terhadap kuat tekan mortar tidak berdiri sendiri, melainkan berinteraksi dengan parameter campuran lainnya, khususnya rasio air-semen, dalam menentukan respons mekanik mortar. Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap kinerja mortar dan beton pada kondisi ekstrem, peran SF tidak hanya dikaji pada kondisi suhu normal, tetapi juga dalam konteks respons material terhadap pemanasan dan paparan suhu tinggi. Selain mempengaruhi kuat tekan pada kondisi normal, SF juga dilaporkan mempengaruhi parameter mekanik dan termal beton berbasis semen portland. Penelitian oleh Albeer dan Hassan (2023) menunjukkan bahwa keberadaan SF berperan dalam respons material terhadap kondisi pemanasan dan perubahan temperatur, yang mengindikasikan relevansi material ini dalam kajian beton pada kondisi termal.

Perilaku mortar yang mengandung SF setelah paparan suhu tinggi dilaporkan oleh Strzałkowski dan Garbalińska (2019). Dalam penelitian tersebut, mortar dengan SF menunjukkan respons kuat tekan residu yang berbeda dibandingkan mortar tanpa SF setelah mengalami proses pemanasan dan pendinginan, yang menegaskan peran SF dalam mempengaruhi perilaku mekanik mortar pasca paparan suhu tinggi. Penggunaan SF juga mempengaruhi karakteristik kekuatan material beton pada berbagai konteks aplikasi. Preetha (2019) menyatakan bahwa penambahan SF berkontribusi terhadap perubahan sifat mekanik beton. Selain itu, penelitian oleh Sicilia (2026) menunjukkan bahwa penambahan 15% SF mampu meningkatkan ketahanan termal mortar hingga suhu 500 °C.

Hal ini sejalan dengan temuan (Laila, 2026) yang mengindikasikan bahwa pada kondisi durasi pembakaran yang lama, yaitu 90 dan 120 menit, kuat tekan mortar tertinggi justru diperoleh pada persentase SF sebesar 10%. Kedua hasil penelitian tersebut menjadi landasan penting bagi penelitian ini untuk memfokuskan evaluasi pada kadar optimum tersebut melalui penerapan variasi SF sebesar 10% dan 15% pasca-pembakaran. Lebih lanjut, Nadim dkk. (2024) menyatakan bahwa penambahan SF mempengaruhi kuat tekan serta karakteristik

durabilitas beton dengan agregat daur ulang, yang mengindikasikan bahwa peran SF tidak hanya terbatas pada peningkatan kekuatan awal, tetapi juga berkaitan dengan performa material dalam jangka waktu tertentu. Meskipun ASTM C1240 fokus pada standarisasi mutu fisik dan mekanik jangka pendek (seperti indeks aktivitas pozzolan 7 hari), penelitian-penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemenuhan standar tersebut juga berimplikasi positif pada performa jangka panjang material, termasuk durabilitas dan ketahanan termal ekstrem.

2.4 *Fly Ash (FA)*

Fly ash atau FA merupakan material pozzolan yang dihasilkan dari residu pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap. Material ini umumnya berbentuk partikel halus dan mengandung senyawa utama berupa silika dan alumina, sehingga berpotensi bereaksi secara pozzolanik dengan produk hidrasi semen. Penggunaan FA sebagai substitusi parsial semen tidak hanya berkaitan dengan aspek keberlanjutan, tetapi juga mempengaruhi perkembangan kuat tekan material melalui mekanisme reaksi pozzolan dan perubahan karakteristik pasta semen (Hawileh dkk., 2025).

Agar dapat digunakan secara aman dan efektif dalam campuran beton tersebut, karakteristik fisik dan kimia FA wajib memenuhi standarisasi mutu yang diatur dalam ASTM C618, yang mengklasifikasikan material ini berdasarkan sifat kimia dan jenis batu bara asalnya. Berdasarkan standar tersebut, FA diklasifikasikan menjadi dua kelas utama, yaitu Kelas F dan Kelas C. FA Kelas F umumnya berasal dari pembakaran batu bara antrasit atau bituminus dan wajib memiliki akumulasi kadar trioksida ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) minimal 70,0% sehingga bersifat pozzolanik murni. Sementara itu, Kelas C dihasilkan dari batu bara sub-bituminus atau lignit dengan kadar trioksida antara 50,0% hingga 70,0% dan memiliki sifat semen mandiri (*cementitious*) karena kadar kalsium oksida (CaO) yang lebih tinggi. Selain unsur kimia, ASTM C618 juga mengunci syarat fisik mutlak, seperti kadar air maksimal 3,0%, nilai hilang pijar (*loss on ignition*) maksimal 6,0%, serta kehalusan dengan material tertahan saringan No. 325 maksimal 34,0%.

Pengaruh FA terhadap kuat tekan material berbasis semen telah dilaporkan dalam berbagai penelitian eksperimental. Penelitian yang dilakukan oleh Lam dkk.

(1998) menyatakan bahwa penggunaan FA sebagai bahan pengganti semen mempengaruhi perilaku kuat tekan beton, yang berkaitan dengan perubahan mekanisme pembentukan mikrostruktur dan respons material terhadap beban tekan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa FA berperan dalam memodifikasi sifat mekanik beton melalui kontribusinya terhadap sistem hidrasi semen.

Kajian lain yang meninjau variasi kandungan FA dilaporkan oleh Anand (2024), yang menyatakan bahwa perubahan kadar FA dalam campuran beton menyebabkan perbedaan nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa proporsi FA dalam campuran merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi performa mekanik beton, khususnya kuat tekan, sehingga penentuan kadar FA perlu dipertimbangkan secara cermat dalam perancangan campuran.

Penggunaan FA sebagai pengganti parsial semen juga dibahas oleh Gupta dkk. (2017), yang menyatakan bahwa FA berkontribusi terhadap perubahan sifat mekanik beton, termasuk kuat tekan. Pengaruh tersebut dipengaruhi oleh interaksi antara FA, semen, dan material tambahan lainnya dalam sistem campuran beton, sehingga respons mekanik beton tidak dapat dilepaskan dari komposisi campuran secara keseluruhan. Pada beton dengan kandungan FA tinggi, yang sering diklasifikasikan sebagai *high-volume FA concrete*, penggunaan FA dalam kadar besar dilaporkan menghasilkan karakteristik mekanik dan durabilitas yang berbeda dibandingkan beton konvensional. Perbedaan tersebut berkaitan dengan perubahan laju hidrasi semen dan perkembangan mikrostruktur pasta semen seiring waktu (Amini dkk., 2025).

Perbedaan dosis FA dalam campuran beton juga dilaporkan menyebabkan perbedaan nilai kuat tekan. Penelitian oleh Guo dkk. (2021) menunjukkan bahwa optimasi kadar FA merupakan aspek penting dalam perancangan campuran beton atau mortar berbasis material pozzolan, karena kadar FA yang digunakan berperan dalam menentukan respons mekanik material yang dihasilkan. Selain digunakan secara tunggal, FA juga banyak dikaji dalam kombinasi dengan material pozzolan lain. Penelitian yang dilakukan oleh Dipta dkk. (2023) menyatakan bahwa penggunaan FA bersama material tambahan lain mempengaruhi perilaku mekanik beton. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peran FA dalam campuran beton tidak

terlepas dari interaksinya dengan material lain yang berkontribusi terhadap pembentukan dan kerapatan pasta semen.

Dalam penelitian Rahmadona dkk. (2024), FA digunakan sebagai pengganti sebagian semen dengan kadar 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen. Variasi kadar FA tersebut diaplikasikan pada campuran beton yang juga mengandung *silica fume*. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan nilai kuat tekan beton pada masing-masing variasi kadar FA, yang mengindikasikan bahwa persentase FA berpengaruh terhadap performa mekanik beton. Penelitian lain oleh Fernando dkk. (2024) menggunakan FA sebagai substitusi parsial semen dengan kadar 5%, 15%, dan 20% pada beton mutu tinggi. Variasi kadar FA tersebut menghasilkan perbedaan karakteristik kuat tekan beton, yang menunjukkan bahwa persentase FA berperan dalam menentukan perilaku mekanik beton mutu tinggi yang dikaji.

2.5 Efek Pembakaran Terhadap Beton dan Mortar

Paparan pembakaran atau suhu tinggi dapat menyebabkan perubahan signifikan pada sifat mekanik dan mikrostruktur beton serta mortar akibat degradasi pasta semen dan kerusakan internal material. Ma dkk. (2015) menyatakan bahwa peningkatan suhu mengakibatkan terjadinya dehidrasi produk hidrasi semen, perubahan struktur mikro, serta berkembangnya retak mikro, yang berdampak pada penurunan kapasitas mekanik beton setelah pendinginan. Sementara itu, Xiang dkk. (2019) menyatakan bahwa beton yang telah mengalami paparan suhu tinggi menunjukkan perubahan respons tekan residu yang berkaitan dengan deformasi dan kerusakan internal akibat proses pemanasan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa tingkat degradasi sifat mekanik beton pasca paparan suhu tinggi dipengaruhi oleh kondisi pemanasan serta karakteristik material penyusunnya.

2.5.1 Efek Suhu Pembakaran

Paparan pembakaran atau suhu tinggi secara umum dapat menyebabkan perubahan signifikan pada sifat mekanik dan mikrostruktur beton serta mortar. Peningkatan suhu mengakibatkan degradasi produk hidrasi, pelemahan ikatan internal, serta berkembangnya kerusakan mikrostruktur akibat tekanan termal dan perubahan fase material. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap penurunan kinerja

mekanik beton dan mortar setelah pendinginan, yang menunjukkan bahwa suhu pembakaran merupakan faktor dominan dalam respons material pasca paparan panas (Alaskar, 2025). Pada material berbasis semen portland, peningkatan suhu memicu terjadinya dehidrasi produk hidrasi semen dan perubahan fase mineral yang menyebabkan penurunan integritas struktur internal material. Mekanisme degradasi tersebut menyebabkan perubahan mikrostruktur beton dan penurunan sifat mekanik residu setelah pendinginan. Kerusakan mikrostruktur yang berkembang selama pemanasan menjadi faktor utama dalam menurunnya kemampuan beton menahan beban tekan residu Ma dkk. (2015).

Dalam konteks material mortar, pengaruh suhu tinggi juga telah dikaji secara eksperimental. Mortar yang diuji pada rentang suhu 80 °C hingga 900 °C mengalami perubahan bertahap pada sifat mekanik dan sifat fisis seiring dengan meningkatnya suhu paparan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa degradasi material bersifat progresif, di mana tingkat kerusakan meningkat seiring dengan kenaikan suhu pembakaran (Dandachy dkk., 2024). Pada beton konvensional, Zhang dkk. (2025) menyatakan bahwa pada rentang suhu 400-800 °C, beton dapat mengalami penurunan kuat tekan lebih dari 50 % dibandingkan kondisi awal. Pada suhu di atas 800 °C, kuat tekan residu beton dilaporkan hanya tersisa sekitar 10-30 % dari kuat tekan awal. Selain itu, pada suhu sekitar 500 °C, modulus elastisitas beton dapat mengalami penurunan sebesar 40-50 %, sedangkan kuat tarik beton menurun sekitar 20 % pada 400 °C dan dapat mencapai penurunan hingga 80 % pada 600 °C.

Pada mortar dan beton *geopolymer* berbasis FA, kuat tekan residu dilaporkan relatif stabil hingga sekitar 400 °C, sebelum mengalami penurunan signifikan pada suhu yang lebih tinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa suhu sekitar 400 °C dapat berperan sebagai titik awal degradasi termal yang nyata pada material berbasis FA (Zhao dkk., 2021). Lebih lanjut, Praneedpolkrang dkk. (2024) menyatakan bahwa mortar yang diuji pada suhu 400 °C, 600 °C, dan 800 °C menunjukkan penurunan kuat tekan residu pada 400 °C dan 600 °C akibat dehidrasi dan dekomposisi produk hidrasi. Namun, pada suhu 800 °C dilaporkan terjadi pembentukan fase kristalin baru yang berkontribusi terhadap pemulihan parsial kuat tekan setelah pendinginan.

2.5.2 Efek Lama Waktu Pembakaran

Selain suhu pembakaran, lama waktu pembakaran merupakan parameter penting yang mempengaruhi tingkat degradasi sifat mekanik beton dan mortar setelah kebakaran. Durasi pemanasan menentukan lamanya material berada pada kondisi termal kritis, sehingga mempengaruhi intensitas dehidrasi produk hidrasi semen, pelepasan air terikat, serta akumulasi kerusakan mikrostruktur di dalam pasta semen. Pasztetnik (2021) menyatakan bahwa beton yang dipanaskan pada suhu 400 °C dan 600 °C dengan variasi durasi paparan 3 jam, 6 jam, dan 9 jam menunjukkan perbedaan tingkat penurunan kuat tekan residu, di mana durasi pemanasan yang lebih lama menghasilkan degradasi mekanik yang lebih signifikan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa pada suhu yang sama, peningkatan lama waktu pembakaran berkontribusi langsung terhadap penurunan kinerja mekanik beton pasca pendinginan, sehingga durasi pembakaran perlu dipertimbangkan sebagai variabel utama dalam analisis ketahanan beton dan mortar terhadap kebakaran.

Beton mutu $f'c$ 20 hingga $f'c$ 50 dipanaskan mengikuti kurva api standar ISO 834 dengan durasi 1, 2, 3, dan 4 jam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada beton mutu $f'c$ 50, paparan api selama 1 jam menyebabkan penurunan kuat tekan sebesar 26,41% dan penurunan kuat lentur sebesar 86,03%, disertai kehilangan massa sekitar 8,38%. Setelah durasi pemanasan 3-4 jam, kuat lentur residu menurun drastis hingga tidak mampu menopang berat sendiri, yang menunjukkan bahwa peningkatan durasi pembakaran secara signifikan memperparah degradasi mekanik beton (Thanaraj dkk., 2019). Temuan tersebut diperkuat oleh Thanaraj dkk. (2020), yang menyatakan bahwa peningkatan durasi pembakaran dari 1 hingga 4 jam pada beton dengan mutu berbeda menyebabkan kenaikan suhu puncak material dari sekitar 925 °C menjadi 1133 °C. Peningkatan durasi pemanasan ini berkorelasi dengan penurunan kuat tekan dan kuat tarik yang semakin besar, khususnya pada beton mutu tinggi, yang menunjukkan sensitivitas material terhadap paparan panas berkepanjangan.

Beton ringan yang dipanaskan hingga suhu 600 °C menunjukkan penurunan kuat tekan residu yang berlanjut setelah pendinginan. Dalam periode 96 jam pasca pendinginan, kuat tekan beton mengalami penurunan tambahan hingga sekitar 20%,

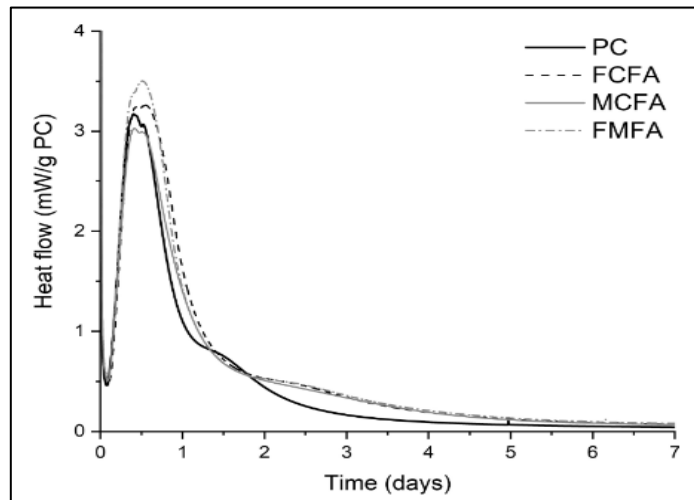
yang mengindikasikan bahwa efek lama pembakaran tidak hanya terjadi selama pemanasan, tetapi juga berlanjut pada fase pasca kebakaran (Torić dkk., 2016). Pada beton dengan kandungan slag tinggi, Shumuye dkk. (2019) menyatakan bahwa paparan suhu 200 hingga 800 °C dengan durasi pemanasan tertentu menghasilkan respons mekanik yang berbeda tergantung lama paparan dan kadar slag. Kuat tekan beton meningkat dari 200 °C ke 400 °C, namun mengalami penurunan signifikan pada suhu 600 °C ke atas, yang menunjukkan bahwa durasi pemanasan pada suhu tinggi mempercepat degradasi mikrostruktur dan sifat mekanik beton.

Dampak lama waktu pembakaran juga diamati pada beton dengan bahan tambahan limbah marmer. Sudarshan dan Vyas (2019) menyatakan bahwa beton yang dipanaskan hingga 400 °C tidak menunjukkan penurunan kuat tekan yang signifikan. Namun, pada paparan suhu di atas 400 °C dengan durasi pemanasan yang lebih lama, terjadi penurunan kuat tekan yang jelas akibat degradasi pasta semen dan kerusakan internal material. Pengaruh durasi pembakaran terhadap mortar diteliti oleh Nuaklong dkk. (2021), yang mengkaji mortar dengan tambahan carbon nanotube dan serat polipropilena pada paparan suhu hingga 1000 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setelah paparan suhu tinggi dalam durasi tertentu, kuat tekan residu mortar optimum masih mencapai sekitar 40% dari kuat tekan awal, dan nilai tersebut sekitar 19% lebih tinggi dibandingkan mortar tanpa bahan tambahan. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun lama pembakaran berdampak pada penurunan kuat tekan, modifikasi material dapat mempengaruhi tingkat degradasi mekanik.

Paparan api selama 1 jam pada suhu hingga 400 °C tidak menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan. Namun, pada suhu 600-800 °C dengan durasi yang sama, terjadi penurunan kuat tekan dan kekakuan material, yang menunjukkan bahwa efek lama pembakaran menjadi semakin signifikan pada suhu tinggi (Sahmaran dkk., 2010). Penelitian oleh Zawadowska dkk. (2021) menunjukkan bahwa degradasi mekanik beton mulai terdeteksi secara permanen pada suhu sekitar 300 °C, dan semakin berkembang seiring dengan lamanya durasi pemanasan. Studi tersebut menegaskan bahwa durasi pemanasan berkontribusi terhadap perkembangan kerusakan mikrostruktur yang tidak sepenuhnya pulih setelah pendinginan.

2.6 Pengujian *Fineness*

Pengujian kehalusan (*fineness*) dilakukan untuk menganalisis distribusi ukuran partikel SF dan FA. Pengujian ini mengacu pada prosedur ASTM C430 menggunakan ayakan No. 325 (45 μm), di mana tingkat kehalusan dinyatakan melalui persentase material yang tertahan pada saringan. Parameter kehalusan sangat krusial dalam menentukan reaktivitas pozolan karena semakin halus partikel, maka semakin besar luas permukaan spesifik yang tersedia untuk bereaksi dengan produk hidrasi semen (Snellings dkk., 2021).



Gambar 2. 1 Kurva Aliran Panas (*Heat Flow*) Hasil Pengujian Hidrasi

(Sumber: Snellings dkk., 2021)

Pada Gambar 2. 1 terlihat bahwa perbedaan karakteristik FA (FCFA, MCFA, FMFA) terhadap kontrol portland *Cement* (PC) menghasilkan puncak laju reaksi yang berbeda. Sampel dengan distribusi ukuran partikel yang lebih halus cenderung memperlihatkan puncak laju pelepasan panas yang lebih tinggi dan intensif pada usia awal. Hal ini mengindikasikan bahwa kehalusan partikel mempercepat kinetika reaksi hidrasi, yang secara langsung berkontribusi pada pembentukan produk hidrat (C-S-H) pada fase awal.

Peningkatan kinetika reaksi ini terbukti berkorelasi positif dengan perbaikan durabilitas beton, sebagaimana yang dikemukakan oleh Singh dkk., (2018) bahwa penggunaan FA dengan tingkat kehalusan tertentu secara signifikan menurunkan porositas dan meningkatkan ketahanan permeabilitas pasta semen. Sementara itu, pada SF, partikel yang jauh lebih halus memungkinkan material tersebut bertindak sebagai pengisi pori mikro, di mana penelitian Zheng dkk. (2025) menyatakan

bahwa distribusi ukuran partikel SF yang sangat halus secara efektif mereduksi pori-pori berbahaya (>200 nm) melalui efek pengisian pori (*micro-filling effect*), sehingga meningkatkan densitas mikrostruktur beton. Adapun batasan syarat mutu kelulusan kehalusan ini diatur dalam ASTM C618 untuk FA (maksimal 34% tertahan) dan ASTM C1240 untuk SF (maksimal 10% tertahan). Adapun persentase kehalusan dihitung menggunakan Persamaan 2.1:

$$Fineness = \frac{B}{A} \times 100\% \quad \dots(2.1)$$

Keterangan:

A = Berat sampel FA atau SF awal sebelum disaring (gram)

B = Berat sampel FA atau SF yang tertahan pada Saringan No. 325 setelah dikeringkan (gram)

2.7 Waktu Pengikatan

Secara umum, waktu pengikatan (*setting time*) diartikan sebagai durasi yang dibutuhkan oleh semen untuk mengalami proses pengerasan, yang dihitung sejak terjadinya reaksi hidrasi antara semen dan air hingga membentuk massa pasta. Periode ini menjadi indikator penting mengenai seberapa cepat pasta semen bertransformasi menjadi material yang cukup kaku, sehingga mampu menyatukan seluruh material penyusun konstruksi dan membentuk satu kesatuan struktur yang kokoh (Trimurtiningrum dkk., 2020). Secara teknis, periode pengikatan ini terbagi menjadi dua tahapan utama, yakni waktu pengikatan awal (*initial setting time*) dan waktu pengikatan akhir (*final setting time*). Waktu pengikatan awal dihitung sejak semen dan air pertama kali berinteraksi membentuk pasta hingga material tersebut mulai kehilangan sifat keplastisannya secara bertahap, yang di laboratorium diidentifikasi saat penurunan jarum Vicat mencapai kedalaman 25 mm. Di sisi lain, waktu pengikatan akhir merepresentasikan total durasi dari awal pencampuran pasta hingga semen benar-benar mengeras sempurna, di mana alat penetrasi Vicat sudah tidak lagi mampu menusuk dalam atau meninggalkan bekas visual yang signifikan pada permukaan sampel (Firdaus & Yuda, 2019). Kriteria pengujian tersebut secara resmi diatur dalam ASTM C191-19 dengan ketentuan sebagai berikut: