TUGAS AKHIR

PENGARUH PERSENTASE *PALM OIL FUEL ASH* (POFA) DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN PENGGANTI PARSIAL SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON

(Studi Penelitian)

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat-Syarat Untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Sipil Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Disusun Oleh :

FIRZATULLAH

2207210122

UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

MEDAN

2026

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Firzatullah
NPM	: 2207210122
Program Studi	: Teknik Sipil
Judul Skripsi	: Pengaruh Persentase *Palm Oil Fuel Ash* (Pofa) Dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Parsial Semen Terhadap Kuat TekanBeton

DISETUJUI UNTUK DISAMPAIKAN KEPADA

PANITIA UJIAN SKRIPSI

Medan, 26 Agustus 2026

Dosen Pembimbing

Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain, S.T.,M.Sc., Ph.D., IPM.

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama	: Firzatullah
NPM	: 2207210122
Program Studi	: Teknik Sipil
Judul Skripsi	: Pengaruh Persentase *Palm Oil Fuel Ash* (Pofa) Dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Parsial Semen Terhadap Kuat TekanBeton
Bidang Ilmu	: Struktur

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Medan, 26 Agustus 2026

Mengetahui dan menyetujui

Dosen Pembimbing

Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain, S.T.,M.Sc., Ph.D., IPM.

Dosen Pembanding I	Dosen Pembanding II
Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D.	Dr. Fetra Venny Riza, S. T, M. Sc

Ketua Prodi Teknik Sipil

Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D.

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama	: Firzatullah
NPM	: 2207210122
Program Studi	: Teknik Sipil
Judul Skripsi	: Pengaruh Persentase *Palm Oil Fuel Ash* (Pofa) Dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Parsial Semen Terhadap Kuat TekanBeton
Bidang Ilmu	: Struktur

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa Tugas Laporan Akhir saya yang berjudul : "Pengaruh Persentase *Palm Oil Fuel Ash* (Pofa) Dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Parsial Semen Terhadap Kuat Tekan Beton".

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian dan hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non material, ataupun segala kemungkinan lainnya, yang pada hakikatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga adanya ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh tim fakultas yang dibentuk untuk melakukan untuk memverifikasi, dengan melakukan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/Kerjasama saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 26 Agustus 2026

Saya yang menyatakan



Firzatullah

ABSTRAK

PENGARUH PERSENTASE *PALM OIL FUEL ASH* (POFA) DAN *SILICA FUME* SEBAGAI BAHAN PENGGANTI PARSIAL SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON

Firzatullah
2207210122
Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain, S.T.,M.Sc., Ph.D., IPM.

Beton menjadi salah satu material yang banyak digunakan dalam pekerjaan konstruksi, sedangkan produksi semen sebagai bahan utama beton berkontribusi terhadap peningkatan emisi karbon. Oleh karena itu, diperlukan pemanfaatan material alternatif untuk mengurangi penggunaan semen dalam campuran beton. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan 24 benda uji berbentuk silinder yang terdiri atas beton normal, beton dengan POFA sebesar 5%, 7,5%, dan 10%, *silica fume* sebesar 5%, serta kombinasi POFA dan *silica fume*. Benda uji dirawat selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *silica fume* sebesar 5% dapat meningkatkan kuat tekan beton dibandingkan beton normal, sedangkan penggunaan POFA menghasilkan nilai kuat tekan yang cenderung lebih rendah. Peningkatan persentase POFA dapat menyebabkan berkurangnya jumlah semen yang tersedia untuk proses hidrasi sehingga berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan beton. Penggunaan kombinasi POFA dan *silica fume* pada komposisi tertentu mampu memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan penggunaan POFA dengan persentase yang lebih tinggi. Dengan demikian, penggunaan POFA dan *silica fume* sebagai pengganti sebagian semen perlu memperhatikan komposisi campuran yang tepat untuk memperoleh kuat tekan beton yang optimal.

Kata Kunci: *Palm Oil Fuel Ash* (POFA), *Silica Fume*, Beton Normal, Kuat Tekan, Pengganti Parsial Semen.

ABSTRACT

THE EFFECT OF PALM OIL FUEL ASH (POFA) AND SILICA FUME PERCENTAGES AS PARTIAL CEMENT REPLACEMENT MATERIALS ON CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH

Firzatullah
2207210122
Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain, S.T.,M.Sc., Ph.D., IPM.

Concrete is one of the most widely used materials in construction, while cement production as the main component of concrete contributes significantly to carbon emissions. Therefore, the utilization of alternative materials is needed to reduce the amount of cement used in concrete mixtures. This study aims to analyze the effect of Palm Oil Fuel Ash (POFA) and silica fume as partial cement replacement materials on the compressive strength of concrete. An experimental method was employed using 24 cylindrical specimens consisting of normal concrete, concrete containing 5%, 7.5%, and 10% POFA, 5% silica fume, and a combination of POFA and silica fume. All specimens were cured for 28 days prior to the compressive strength test. The results indicated that the use of 5% silica fume increased the compressive strength compared with normal concrete, while the addition of POFA tended to produce lower compressive strength values. Increasing the POFA percentage may reduce the amount of cement available for the hydration process, thereby affecting the development of concrete strength. The combination of POFA and silica fume at certain proportions was able to provide better performance than the use of higher POFA percentages. Therefore, the application of POFA and silica fume as partial cement replacement materials requires an appropriate mixture proportion to achieve optimum concrete compressive strength.

Keywords: Palm Oil Fuel Ash (POFA), Silica Fume, Normal Concrete, Compressive Strength, Partial Cement Replacement.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING i
LEMBAR PENGESAHAN ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR iii
ABSTRAK iv
ABSTRACT v
DAFTAR ISI vi
DAFTAR TABEL viii
DAFTAR GAMBAR ix
KATA PENGANTAR x
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1. 1 Latar Belakang 1
1. 2 Rumusan Masalah 2
1. 3 Ruang Lingkup Penelitian 3
1. 4 Tujuan Penelitian 3
1. 5 Manfaat Penelitian 4
1. 6 Sistematika Penulisan 4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 5
2. 1 Penelitian Terdahulu 5
2. 2 *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) 6
2. 3 *Silica Fume* (SF) 9
2. 4 Bahan Dasar Pembentuk Beton 12
2. 4. 1 Semen 12
2. 4. 2 Agregat 13
2. 4. 3 Air 14
2. 5 Interaksi *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) Dan *Silica Fume* Terhadap Kuat Tekan Beton 15
2. 6 Perbedaan Senyawa *Silica Fume* dan POFA 16
2. 7 Kuat Tekan Beton 18
BAB 3 METODE PENELITIAN 19
3. 1 Diagram Alir 19

3. 2 Metode Penelitian 20
3. 3 Lokasi dan Waktu Penelitian 21
3. 4 Sumber dan Pengambilan Data 22
3. 4. 1 Data Primer 22
3. 4. 2 Data Sekunder 22
3. 5 Alat dan Bahan 22
3. 5. 1 Alat 23
3. 5. 2 Bahan 23
3. 6 Persiapan Bahan Tambah 24
3. 7 Justifikasi Pemilihan Bahan Tambah dan Persentase 25
3. 8 Tahap pengujian 27
3. 8. 1 Pengujian Analisa Saringan 27
3. 8. 2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan 27
3. 8. 3 Pengujian Kadar Air 28
3. 8. 4 Pengujian Berat Isi 28
3. 8. 5 Pengujian Kadar Lumpur 29
3. 8. 6 Perencanaan *Mix Design* 29
3. 8. 7 Pembuatan Benda Uji 31
3. 8. 8 Pengujian *Slump* 31
3. 8. 9 Perawatan/Perendaman Benda Uji 32
3. 8. 10 Pengujian Kuat Tekan 32
BAB 4 KESIMPULAN DAN SARAN 34
4. 1 Kesimpulan 34
4. 2 Saran 35
DAFTAR PUSTAKA 36
DAFTAR RIWAYAT HIDUP 41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1: Unsur-unsur yang terkandung dalam POFA. 7
Tabel 2.2: Penelitian terdahulu menggunakan POFA. 8
Tabel 2.3: Penelitian terdahulu menggunakan *Silica fume.* 11
Tabel 2.4: Perbedaan senyawa *Silica fume* dan POFA. 16
Tabel 3.1: Komposisi campuran pada benda uji beton umur 28 hari. 30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1: Diagram Alir 19
Gambar 3.2: Benda Uji Silinder 31

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Alhamdulillahirabbil"alamin, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul "Pengaruh Persentase *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) Dan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengganti Parsial Semen Terhadap Kuat Tekan Beton" sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Ir. Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara sekaligus Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara sekaligus Dosen Penguji I yang telah banyak membantu dan memberikan saran demi kelancaran penulis dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Dr. Fetra Venny Riza, S. T, M. Sc., selaku Dosen Penguji II yang telah banyak membantu dan memberikan saran serta masukan demi kelancaran penulis dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Assoc. Prof. Ir. Fahrizal Zulkarnain, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbingan saya yang telah banyak membantu dan memberikan saran serta masukan demi kelancaran penulis dalam proses menyelesaikan Tugas Akhir ini
5. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknisipilan kepada penulis.

6. Bapak/Ibu staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Teristimewa sekali kepada Ayahanda tercinta Alm Karseno dan Ibunda tercinta Misriani M yang telah bersusah payah membesarkan dan memberikan kasih sayangnya yang tidak ternilai kepada penulis.
8. Teristimewa sekali juga kepada Saudara Kandung Kakak Nurul Fitriani S.K.M, yang telah menyemangati hingga akhir dan telah banyak membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Riska Dwi Antika, selaku partner penulis dalam berbagai kegiatan akademik maupun nonakademik, yang selalu memberikan dukungan, bantuan, dan semangat selama proses penyusunan skripsi ini.
10. Terima kasih kepada rekan-rekan seperjuangan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Stambuk 2020.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia konstruksi teknik sipil.

Medan, 26 Agustus 2026

Penulis



Firzatullah

BAB 1

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu bahan bangunan yang paling umum digunakan dalam berbagai jenis bangunan, seperti gedung, jembatan, jalan raya, bendungan, dan infrastruktur sipil lainnya. Kompos isinya terdiri dari campuran agregat kasar, agregat halus, semen, air, dan terkadang aditif kimia atau non-kimia dalam proporsi tertentu (Arman dkk., 2023). Dalam proses pengolahan limbah dari minyak sawit, dihasilkan abu sisa pembakaran yang disebut *Palm Oil Fuel Ash* (POFA). Peningkatan volume POFA tahunan menimbulkan risiko terhadap kelestarian lingkungan. Untuk mengatasi masalah tersebut, salah satu pendekatan yang efektif adalah dengan menggunakan POFA sebagai bahan stabilisasi tanah, yang dapat mengurangi volume sampah dan menghindari kerusakan lingkungan dkk., 2025)

Beton dengan silica fume mengalami penurunan kuat tarik yang jauh lebih kecil dibanding fly ash karena partikel silica fume yang sangat halus dan reaktif mempercepat pembentukan gel C-S-H sehingga memperbaiki mikrostruktur beton (Zulkarnain dkk., 2026). Penerapan POFA juga pada beton juga dapat mengurangi kehilangan massa akibat penetrasi klorida dan asam sulfat pada konsentrasi rendah (Olivia dkk., 2023). Kemudian teknologi beton terus berkembang untuk meningkatkan kualitas beton. Salah satu inovasi yang sering muncul dalam berbagai uji coba di dunia adalah penambahan material pozzolanik pada campuran beton (Ramanda Putri dkk., 2021).

Silica fume adalah campuran mineral berupa material pozolan bertekstur halus. *Silica fume* berfungsi sebagai pengisi dan material pozolan yang bereaksi secara kimia dalam campuran beton. Partikel *silica fume* berukuran sangat kecil, berkisar antara 0,1 hingga 1 mikron, jauh lebih kecil daripada butiran semen yang umumnya berkisar antara 5 hingga 50 mikron. Berkat ukuran partikelnya yang sangat halus, *silica fume* mampu mengisi celah-celah antar butiran semen, sehingga campuran beton menjadi lebih padat melalui proses penjenuhan, yang pada akhirnya dapat meningkatkan kuat tekan beton (Sopa N.R dkk., 2023). Selain itu,

POFA menunjukkan ketahanan yang baik terhadap serangan kimia seperti sulfat, asam, dan bahan kimia lainnya saat digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam beton *(*Yuari Farandi dkk., 2021).

Pada penelitian terdahulu tentang dampak penggunaan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) sebagai bahan pengganti sebagian semen, yang dipadukan dengan *silica fume* (mikrosilika), terhadap kekuatan tekan dan porositas beton. Penelitian tersebut menggunakan variasi kadar POFA sebesar 0%, 20%, dan 40%, sementara kadar *silica fume* divariasikan menjadi 0%, 5%, 10%, serta 15% dari berat semen. Temuan penelitian mengungkapkan bahwa penambahan *silica fume* 5–10% dapat meningkatkan kekuatan tekan beton yang mengandung POFA secara bermakna, khususnya pada usia 28 hari, jika dibandingkan dengan beton POFA tanpa *silica fume*. Peningkatan tersebut dikaitkan dengan aktivasi pozzolanik yang lebih kuat serta pembentukan gel C–S–H tambahan, yang pada akhirnya mengurangi porositas beton. Meskipun demikian, kenaikan kadar POFA hingga 40% masih berakhir pada penurunan kekuatan tekan beton, walaupun sebagian penurunan tersebut dapat diimbangi melalui penambahan silika fume (Olivia dkk., 2025). Variasi campuran menunjukkan bahwa penambahan bahan tertentu dapat meningkatkan maupun menurunkan kuat tekan beton tergantung jenis dan persentase material yang digunakan (Zulkarnain dkk., 2025).

Dalam hal ini, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh penggunaan kombinasi dari *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton. Variasi persentase dari *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) sebesar 0%, 5%, 7,5%, dan 10% dengan penambahan *silica fume* sebesar 5% dari berat semen. Penelitian ini dilakukan selama 28 hari untuk mengetahui perkembangan kekuatan beton pada tahap awal dan akhir.

1. 2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada bagian latar belakang, maka permasalahan yang akan diteliti adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase POFA 5%, 7,5%, dan 10% terhadap kuat tekan beton umur 28 hari?

2. Pada pengaruh penggunaan *silica fume* 5% terhadap kuat tekan beton umur 28 hari?
3. Bagaimana perbandingan kuat tekan antara beton normal dengan beton yang menggunakan kombinasi *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume*?

1. 3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup yang akan dibahas oleh penulis pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimental laboratorium.
2. Untuk perencanaan campuran menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834-2000 Tentang Tata Cara Pembuatan Campuran Beton Normal dan SNI 1974 - 2011 Tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder).
3. Melakukan pengujian kuat tekan beton dengan menggunakan variasi campuran *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen.
4. Penelitian ini menggunakan cetakan silinder ukuran 15 cm x 30 cm dengan kuat tekan pada umur 28 hari dengan total sampel sebanyak 24 sampel.
5. Penelitian ini hanya difokuskan pada pengujian kuat tekan beton, tanpa membahas parameter lain seperti *workability, durabilitas*, atau struktur mikro beton.

1. 4 Tujuan Penelitian

Mengacu pada rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) sebagai bahan pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton.
2. Mengetahui pengaruh *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton.
3. Membandingkan hasil kuat tekan beton normal dengan beton yang menggunakan bahan pengganti parsial semen berupa *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume*.

1. 5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan baru dan refrensi mengenai penggunaan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* dalam campuran beton normal.
2. Penelitian ini mendukung penggunaan bahan tambah yang lebih ramah lingkungan, seperti *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) yang merupakan limbah industry. Penelitian ini berkontribusi pada pengurangan limbah dan penggunaan sumber daya yang lebih berkelanjutan dalam industri konstruksi.
3. Dengan memahami pengaruh *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume*, penelitian ini dapat membantu merumuskan campuran beton berkualitas.

1. 6 Sistematika Penulisan

Agar pembahasan lebih terstruktur, penelitian ini disusun dalam beberapa bab dengan sistematika sebagai berikut:

Bab 1 Pendahuluan

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, ruang lingkup penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori yang berkaitan dengan penjelasan beton, *Palm Oil Fuel Ash* (POFA), *silica fume*, dan metode perhitungan yang digunakan.

Bab 3 Metode Penelitian

Bab ini menguraikan tentang tahapan penelitian, pelaksanaan penelitian, teknik pengumpulan data, dan metode analisa data.

Bab 4 Hasil Dan Pembahasan

Bab ini membahas tentang hasil pengujian dan analisa data kekuatan tekan beton dengan bahan POFA dan *silica fume* sebagai bahan pengganti parsial semen

Bab 5 Kesimpulan Dan Saran

Pada bab ini berisikan kesimpulan dan saran yang diperoleh dari bab-bab sebelumnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2. 1 Penelitian Terdahulu

Untuk mendukung penyusunan penelitian ini, penulis menyajikan beberapa hasil penelitian terdahulu sebagai bahan refrensi. Selain itu, penulis juga menjelaskan antara penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian terdahulu.

Penelitian yang dilakukan oleh (Kudus dkk., 2022) yang mengkaji pengaruh *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) sebagai pengganti parsial semen pada beton mutu sangat tinggi (UHPC) dengan variasi 5%, 10%, dan 15%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan POFA hingga 5% menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari, sedangkan peningkatan kadar POFA di atas nilai tersebut menyebabkan penurunan kuat tekan akibat berkurangnya *workability* dan meningkatnya kebutuhan air. Peningkatan kuat tekan pada kadar optimum dikaitkan dengan efek pengisian pori dan reaksi pozzolanik POFA yang menghasilkan tambahan kalsium silikat hidrat (C–S–H), sehingga beton menjadi lebih padat dan kuat.

Penelitian yang dilakukan oleh (Ismail & Khalid, 2022) mengkaji penggunaan POFA sebagai pengganti parsial semen pada bata semen pasir dengan variasi 5%, 10%, dan 15%, serta mengevaluasi kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan POFA sebesar 5% mampu meningkatkan kuat tekan secara signifikan dibandingkan beton kontrol, sedangkan peningkatan kadar POFA yang lebih tinggi cenderung menurunkan kuat tekan akibat meningkatnya porositas dan berkurangnya ikatan antar partikel. Penelitian ini menyimpulkan bahwa POFA efektif digunakan pada kadar rendah karena berperan sebagai *filler* mikro dan material pozzolanik yang memperbaiki mikrostruktur semen.

Penelitian yang dilakukan oleh Sopa N.R dkk., (2023) yang mengkaji pengaruh penambahan *silica fume* terhadap kuat tekan beton fc’25, menggunakan variasi kadar 10% dan 20%. Penelitian ini mengungkapkan bahwa silika fume, yang terdiri dari senyawa silika dioksida (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), memberikan dampak penting pada proses pemadatan beton melalui reaksi pozzolanik. Kekuatan

tekan tertinggi dicapai pada kadar 20%, yaitu 27,20 MPa pada usia 28 hari. Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan bahan pozzolan, bahkan dalam jumlah kecil, masih mampu meningkatkan kekuatan mekanis beton dengan cara mengisi pori-pori mikroskopis.

Penelitian yang dilakukan oleh (Faisal dkk., 2024) mengkaji penggunaan *silica fume* sebagai campuran komposisi rancangan mutu beton dengan mutu K-300. Hasil uji menunjukkan bahwa penambahan silika fume secara bertahap meningkatkan kekuatan tekan beton seiring dengan bertambahnya usia beton, dengan kekuatan tekan maksimum mencapai 328 kg/cm² pada kadar 8% di usia 28 hari.

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut dapat disimpulkan bahwa POFA dan *silica fume* efektif digunakan sebagai bahan pengganti parsial semen pada kadar tertentu untuk meningkatkan kuat tekan beton. POFA menunjukkan kinerja optimum pada kadar rendah, khususnya sekitar 5%, sedangkan penggunaan pada kadar yang lebih tinggi cenderung menurunkan kuat tekan akibat berkurangnya *workability* dan meningkatnya porositas beton. Sementara itu, *silica fume* terbukti mampu meningkatkan kuat tekan beton melalui reaksi pozzolanik dan efek filler mikro, bahkan pada kadar rendah seperti 5%. Oleh karena itu, kombinasi POFA 5–10% dan *silica fume* 5% berpotensi meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan kuat tekan beton, asalkan proporsi penggunaannya tetap terkontrol.

2. 2 *Palm Oil Fuel Ash* (POFA)

Palm Oil Fuel Ash (POFA) merupakan limbah padat hasil pembakaran serat dan cangkang kelapa sawit yang digunakan sebagai bahan bakar boiler pada pabrik kelapa sawit, setelah melalui proses pengolahan yang sesuai, POFA dapat dimanfaatkan bahan pengganti sebagian semen karena memiliki aktivitas pozzolanik yang baik dan pemanfaatan POFA juga dapat mengurangi limbah industri kelapa sawit sekaligus penggunaan dalam produksi beton (Safiuddin dkk., 2011).

POFA merupakan material dengan sifat pozzolan berkat kandungan silika dan alumina di dalamnya. Sifat pozzolan ini memungkinkan POFA tidak hanya

berfungsi sebagai bahan pengganti semen dalam campuran beton, tetapi juga untuk meningkatkan kuat tekan dan daya tahan beton (Ramanda Putri dkk., 2021).

Palm Oil Fuel Ash (POFA), merupakan salah satu jenis limbah yang dihasilkan oleh industri. POFA mengandung pozzolan, sehingga dapat dicampur dengan Semen Portland sebagai pengganti semen, dengan demikian POFA berpotensi untuk dimanfaatkan dalam produksi beton yang tahan lama. Penambahan POFA pada Semen Portland diharapkan dapat meningkatkan pembentukan gel *calcium silicate hydrate* (CSH), yang dapat meningkatkan kekuatan dan kinerja beton secara keseluruhan (Dasar & Patah, 2024).

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Tanash dkk., (2025). Peningkatan kuat tekan pada kadar POFA sebesar 10% dapat dikaitkan dengan pembentukan gel C-S-H yang lebih kuat, yang berasal dari proses hidrasi dan reaksi pozzolan. Manfaat positif penggunaan POFA 10% sebagai abu pozzolan terhadap kekuatan mekanik bahan bangunan telah didokumentasikan pada beton agregat ringan dengan kekuatan tinggi. Namun, kekuatannya menurun ketika tingkat POFA melebihi 20%. Penurunan kekuatan pada komposit berbahan dasar semen yang memiliki proporsi abu pozzolan lebih tinggi disebabkan oleh kandungan semen yang lebih rendah, yang pada akhirnya mengurangi pembentukan gel C-S-H serta jumlah kalsium hidroksida yang dibutuhkan untuk reaksi pozzolan. Secara keseluruhan, jumlah gel C-S-H yang dihasilkan dari proses hidrasi dan pozzolan lebih sedikit jika dibandingkan dengan campuran yang mengandung POFA dalam jumlah yang lebih sedikit.

Unsur-unsur yang terkandung dalam *Palm Oil Fuel Ash* dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 2.1: Unsur-unsur yang terkandung dalam POFA.
Sumber : (Yuari Farandi dkk., 2021).

Unsur	% Berat
SiO_2	64,36
Al_2O_3	4,36
Fe_2O_3	3,41

Tabel 2.1: *Lanjutan.*

Unsur	% Berat
CaO	7,92
MgO	4,58
SO_3	0,04
K_2O	5,57
TiO_2	0,87
MnO	0,1
P_2O_5	3,64
H_2O	0,59

POFA menunjukkan potensi sebagai bahan alternatif yang dapat menggantikan sebagian semen dalam campuran beton ketika digunakan sebagai pengganti sebagian untuk semen tersebut, POFA menunjukkan ketahanan yang baik terhadap serangan bahan kimia, seperti sulfat, asam, dan bahan kimia lainnya. (Yuari Farandi dkk., 2021).

Penggunaan POFA sebagai pengganti sebagian semen menyebabkan waktu ikat awal dan waktu ikat akhir beton cenderung meningkat seiring bertambahnya persentase penggantian POFA, hal ini menunjukkan bahwa POFA memperlambat proses hidrasi semen dibandingkan beton normal, terutama pada kadar penggantian yang tinggi (Amran dkk*.,* 2021).

Tabel 2.2: Penelitian terdahulu menggunakan POFA.

No	Nama dan Judul	*Filler* dan Campuran	Hasil
1	(Devdhe dkk., 2025) "*Performance of Concrete Using Partial Replacement of Cement by Palm Oil Fuel Ash (POFA): Eco-Friendly Concrete Composite* "	POFA	28 Hari: 0% = 35,75 MPa 10% = 34,88 MPa 20% = 32,3 MPa 30% = 27,68 MPa 40% = 22,42 MPa

Tabel 2.2: *Lanjutan.*

No	Nama dan Judul	*Filler* dan Campuran	Hasil
2	(Kudus dkk., 2022) *"Influence of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete"*	POFA	28 Hari: 0% = 80,32 MPa 5% = 84,12 MPa 10% = 81,89 MPa 15% = 82,81 MPa
3	(Ismail & Khalid, 2022) *"Strength and Durability of Cement Sand Brick Containing Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Fine Recycled Concrete as Partial Cement Replacement"*	POFA +5% RCA	28 Hari : 0% = 23,7 MPa 5% = 29,5 MPa 10% = 27,1 MPa 15% = 25,3 MPa

Penambahan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* sebagai bahan pengganti sebagian semen dapat memengaruhi kekuatan tekan beton. Temuan penelitian mengungkapkan bahwa penerapan POFA sebanyak 5% menghasilkan kekuatan tekan beton yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan variasi 7,5% dan 10%. Dengan bertambahnya persentase POFA, kekuatan tekan beton umumnya menurun karena berkurangnya jumlah semen aktif dalam adukan. Sementara itu, kehadiran *silica fume* berkontribusi pada peningkatan kepadatan beton melalui reaksi pozzolan dan efek pengisian pori, meskipun efektivitas POFA tetap terbaik pada persentase yang rendah. Oleh karena itu, penggunaan POFA sebesar 5% dapat dianggap sebagai komposisi yang paling efisien untuk meningkatkan kekuatan tekan beton dalam penelitian ini.

2. 3 *Silica Fume* (SF)

Silica fume merupakan material pozzolan yang memiliki ukuran partikel sangat halus dengan kandungan utama berupa silika (SiO_2) dan material ini berasal dari hasil samping proses produksi silikon atau paduan *ferrosilikon* pada tanur tinggi, yang dikenal juga sebagai *micro silica* atau *silica fume* (Agustian dkk.,

2023). *Silica fume* memiliki warna abu-abu dan mempunyai diameter berukuran antara 0,1 sampai 0,2-micron meter atau sekitar 1/100 ukuran semen. Karena material silica fume merupakan hasil samping industri, maka material tersebut relatif mudah untuk didapatkan(Arman dkk., 2023). Silica fume mengandung unsur SiO2 lebih dari85% dengan demikian silica fume dapat dikategorikan sebagai pozzoland. Terdapat kelebihan tersendiri apabila kita menggunakan silica fume dalam proses pembuatan beton mutu tinggi, kelebihan tersebut antara lain adalah meningkatkan workabilitas untuk jangka waktu yang lama, meningkatkan stabilitas dan keterpaduan campuran beton segar (Tarru dkk., 2017)

Silica Fume memainkan peran penting dalam mengubah sifat kimia dan mekanik beton. Dari segi kimia, *silica fume* mengisi celah antara partikel semen, sehingga mengurangi ukuran pori dan volume pori total. Dari segi mekanik, material ini menunjukkan reaksi pozzolanik yang dapat berinteraksi dengan semen dihasilkan dari kapur. Berkat kandungan SiO2 yang tinggi, material ini memfasilitasi reaksi antara Ca(OH)2 dan SiO2, yang kemudian menghasilkan berupa C-S-H (Davendra, 2022).

Penambahan silica fume pada campuran beton dapat mempercepat proses hidrasi semen sehingga waktu ikat awal menjadi lebih singkat dibandingkan campuran beton tanpa silica fume, hal tersebut disebabkan oleh tingginya reaktivitas silica fume yang mempercepat terbentuknya produk hidrasi semen (Solikin & Ariska, 2023).

Selain meningkatkan kuat tekan beton, penambahan *silica fume* juga diketahui memperbaiki mikrostruktur beton melalui pengurangan porositas total dan peningkatan kepadatan pasta semen (Noorfauzi dkk., 2025). Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel *silica fume* yang sangat halus sehingga mampu mengisi rongga-rongga kecil dalam pasta semen, serta mendorong pembentukan produk hidrasi C-S-H yang lebih rapat dibandingkan tanpa penambahan *silica fume* (Chaudhary & Sinha, 2020). Perbaikan mikrostruktur akibat penggunaan *silica fume* berkontribusi terhadap meningkatnya kepadatan beton dan kuat tekan yang dihasilkan (Zulkarnain dkk., 2026). Peningkatan persentase *silica fume* dapat mengurangi *workability* dan membuat beton menjadi lebih kental karena ukuran

partikelnya yang sangat halus serta luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga meningkatkan kebutuhan air dalam campuran (Chaudhary & Sinha, 2020).

Untuk menghasilkan beton dengan kualitas yang lebih tinggi dari pada beton biasa, diperlukan bahan-bahan dengan sifat pozzolanik dan struktur yang jauh lebih halus daripada semen seperti salah satu contoh bahan pozzolanik adalah *silica fume*, dengan menambahkan *silica fume*, yang secara fisik lebih halus daripada semen dan mengandung silika (SiO_2), diharapkan dapat meningkatkan kekuatan tekan beton (Arman dkk., 2023).

Tabel 2.3: Penelitian terdahulu menggunakan *Silica fume.*

No	Nama dan Judul	*Filler* dan Campuran	Hasil
1	(Sopa N.R dkk., 2023) Pengaruh Penambahan *Silica Fume* Terhadap Kuat Tekan Beton Fc'25	*Silica Fume*	28 hari : 0% = 25,95 MPa 10% = 26,24 MPa 20% = 27,20 MPa
2	(Faisal dkk., 2024) Analisa Penggunaan *Silica Fume* Campuran Komposisi Rancangan Mutu Beton	*Silica Fume*	28 hari : 0% = 303 kg/cm^2 4% = 313 kg/cm^2 6% = 324 kg/cm^2 8% = 334 kg/cm^2
3	(Arman dkk., 2023) Pengaruh Penambahan *Silica Fume* Terhadap Kuat Tekan Beton	*Silica Fume*	28 Hari : 0% = 27,02 MPa 4% = 27,45 MPa 7% = 24,76 MPa 10% = 19,75 MPa

Dapat disimpulkan berdasarkan dari beberapa penelitian terdahulu bahwa pemanfaatan *silica fume* dengan kadar 5% sebagai bahan pengganti sebagian semen, dapat meningkatkan kuat tekan. Kemudian dari penelitian yang dilakukan, penambahan *silica fume* pada tingkat rendah hingga sedang (sekitar 5%) efektif

dalam mengisi celah antar partikel semen (*filler effect*) serta meningkatkan kepadatan struktur mikro beton. Walaupun hasil optimal sering kali tercapai pada kadar yang lebih tinggi, seperti 8% atau 15%, penggunaan 5% tetap menjadi pilihan awal yang andal untuk meningkatkan kinerja mekanis beton tanpa risiko penurunan signifikan akibat kelebihan bahan halus. Oleh karena itu, terdapat perbedaan yang nyata antara beton kontrol dan beton yang diperkaya dengan silika fume 5%, di mana bahan ini secara signifikan memperbaiki kualitas dan kekuatan tekan beton.

2. 4 Bahan Dasar Pembentuk Beton

Pada umumnya campuran beton terdiri dari semen, agregat kasar, agregat halus, dan air dengan menambahkan bahan tambah (*admixture*). Berikut ini adalah campuran dasar pembentuk beton yaitu:

2. 4. 1 Semen

Semen merupakan bahan pengikat utama dalam pembuatan beton yang berfungsi menyatukan agregat halus dan agregat kasar melalui proses hidrasi sehingga membentuk massa beton yang padat dan memiliki kekuatan *(*Raghav dkk*.,* 2021). Semen Portland adalah semen hidrolik yang diproduksi dengan cara menggiling klinker semen, yang pada dasarnya terdiri dari silikat kalsium hidrolik, dan dicampur dengan aditif berupa satu atau lebih bentuk kristalin senyawa sulfat kalsium, serta aditif lain juga dapat ditambahkan SNI 2049-2015 (Sopa N.R dkk., 2023).

Semen berfungsi sebagai bahan pengikat utama yang menyatukan agregat halus dan agregat kasar sehingga membentuk beton yang memiliki kekuatan dan durabilitas yang baik dan kualitas semen sangat menentukan mutu beton karena memengaruhi proses hidrasi, perkembangan kuat tekan, serta ketahanan beton terhadap berbagai kondisi lingkungan (Djaelani dkk., 2022).

Jenis semen yang paling banyak digunakan dalam konstruksi beton adalah Ordinary Portland Cement (OPC) karena memiliki sifat yang sesuai untuk berbagai jenis pekerjaan beton. Ordinary Portland Cement (OPC) merupakan jenis semen yang paling umum digunakan dalam konstruksi beton di seluruh dunia, OPC tersusun dari beberapa senyawa utama yaitu tricalcium silicate (C_3S), dicalcium

silicate (C_2S), tricalcium aluminate (C_3A), dan tetracalcium aluminoferrite (C_4AF), keempat senyawa tersebut berperan penting dalam proses hidrasi, perkembangan kuat tekan, serta karakteristik beton yang dihasilkan (Sutar dkk., 2021).

Sifat kimia dan sifat mekanik semen merupakan faktor yang sangat memengaruhi perkembangan kuat tekan beton, perbedaan jenis maupun karakteristik semen dapat menghasilkan kuat tekan beton yang berbeda meskipun menggunakan proporsi campuran yang sama dan setiap perubahan komposisi bahan pengikat, termasuk penggunaan bahan substitusi semen, perlu mempertimbangkan karakteristik material agar mutu beton yang direncanakan tetap dapat tercapai (Okumu dkk., 2017)

Semen secara fungsional adalah bubuk halus yang berperan sebagai bahan pengikat hidrolik antara agregat halus dan agregat kasar, yang dapat diaktifkan secara kimia setelah dicampur dengan air (Ali dkk., 2023). Secara umum, kinerja semen ditentukan oleh reaksi hidrasi yang terjadi ketika semen dicampur dengan air, di mana produk hidrasi berperan dalam menentukan sifat mekanik beton (Li dkk., 2024).

2. 4. 2 Agregat

Agregat merupakan salah satu bahan dasar penyusun beton disamping bahan lainnya seperti semen, air dan bahan tambah. Agregat dalam beton dibedakan berdasarkan ukuran diameter maksimum ukuran butirannya yaitu agregat kasar dan agregat halus. (Kencanawati dkk., 2023). Agregat dibagi menjadi dua jenis, yaitu agregat kasar dan agregat halus. Aggregat halus didefinisikan sebagai agregat yang dapat melewati saringan nomor 4 (4,75 mm) sesuai standar ASTM, sedangkan agregat kasar adalah agregat yang tertahan oleh saringan tersebut (Ramanda Putri dkk., 2021).

Agregat merupakan partikel mineral yang berfungsi sebagai pengisi dalam campuran mortar dan beton. Agregat diklasifikasikan berdasarkan diameternya melalui pengukuran partikel agregat, yang didasarkan pada pemeriksaan menggunakan saringan dengan ukuran lubang tertentu (Setiawan & Subhan, 2022).

Daya serap air agregat menunjukkan kemampuan agregat dalam menyerap air. Agregat dengan nilai penyerapan air yang tinggi cenderung menghasilkan kuat

tekan beton yang lebih rendah karena sebagian air pencampur terserap ke dalam agregat sehingga memengaruhi proses hidrasi semen dan kepadatan beton (Kencanawati dkk., 2023)

Karakteristik agregat juga memengaruhi kuat tekan beton, terutama nilai abrasi agregat kasar. Agregat dengan nilai abrasi yang rendah umumnya memiliki ketahanan yang lebih baik sehingga mampu menghasilkan kuat tekan beton yang lebih tinggi dibandingkan agregat dengan nilai abrasi yang besar (Amelia & Amalia, 2021)

a) Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang semua butirannya lolos saringan 4,8 mm (Setiawan & Subhan, 2022). Agregat halus berfungsi untuk mencegah retak dan penyusutan, serta agar adonan berpori-pori sehingga gelembung udara dalam campuran bisa keluar. Agregat halus yang baik harus bebas bahan organik, lempung, partikel yang lebih kecil dari saringan No. 200, atau bahan-bahan yang dapat merusak beton. Kemudian ada juga batasan gradasi untuk agregat halus sesuai dengan ASTM C33-74a.

b) Agregat Kasar

Agregat disebut agregat kasar apabila ukurannya sudah melebihi ¼ inch (6 mm), sifat agregat kasar memengaruhi kekuatan akhir beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca dan efek-efek perusak lainnya dan agregat kasar ini harus bersih dari bahan-bahan organik dan harus mempunyai ikatan yang baik dengan sel semen (Setiawan & Subhan, 2022). Adapun persyaratan mengenai proporsi gradasi saringan untuk campuran beton berdasarkan standar SNI 03-2834-2002 (Tata cara pembuatan campuran beton normal).

2. 4. 3 Air

Air merupakan bahan dasar dalam beton, digunakan untuk memicu proses kimia semen, membasahi agregat, dan memudahkan pekerjaan beton dan juga air minum dapat digunakan sebagai campuran dalam produksi beton, air yang dimaksud di sini adalah air yang digunakan sebagai campuran dalam bahan bangunan, yang harus bersih dan bebas dari zat-zat yang dapat mengurangi kualitas beton (Sopa N.R dkk., 2023).

Air memainkan peran penting dalam proses hidrasi semen, yang secara langsung memengaruhi kuat tekan beton. Penggunaan air yang tidak memenuhi spesifikasi dapat mengganggu reaksi kimia semen dan menurunkan kualitas beton. Oleh karena itu, pemilihan air yang memenuhi standar menjadi faktor utama untuk mencapai kuat tekan beton yang maksimal.

2. 5 Interaksi *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) Dan *Silica Fume* Terhadap Kuat Tekan Beton

Pada penelitian terdahulu yang di lakukan oleh Olivia dkk., (2023). menjelaskan POFA adalah material dengan kandungan silika (SiO_2) yang tinggi, sehingga cocok sebagai material pozzolanik. Penggunaan POFA dalam campuran beton dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap infiltrasi sulfat dan klorida, serta mengurangi kehilangan massa akibat paparan klorida dan asam sulfat. Teknologi beton terus berkembang untuk meningkatkan kualitas dan efisiensinya. Penambahan bahan pozzolanik ke dalam komposisi beton, seperti *microsilica* atau *silica fume*, merupakan inovasi yang terus diuji di Indonesia dan secara global. *Microsilica*, yang juga dikenal sebagai *silica fume*, adalah bahan pozzolanik berbutir halus dengan kandungan silika tinggi yang diperoleh dari tungku peleburan atau limbah produksi silikon. *Silica fume* efektif sebagai aditif dalam beton karena ukuran partikelnya yang sangat kecil. Partikel-partikel ini mampu mengisi rongga dalam beton, membuatnya kurang permeabel, mengurangi porositasnya, dan meningkatkan kualitasnya. Maka dari itu dengan penambahan *silica fume* diharapkan akan digunakan secara lebih luas dalam formulasi beton di masa depan. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi *silica fume* dapat meningkatkan sifat mekanik beton setelah 28 hari.

Penggunaan POFA dan *silica fume* secara bersamaan diharapkan mampu meningkatkan kinerja beton melalui mekanisme reaksi pozzolanik yang saling melengkapi antara kedua material dan POFA berperan sebagai material pozzolanik yang mengandung silika reaktif (Abdulhaleem dkk., 2025). Sementara *silica fume* yang sangat halus bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H) tambahan yang

memperbaiki densitas mikrostruktur dan kekuatan matriks beton (Irawan dkk., 2025).

Penelitian yang dilakukan oleh Olivia dkk., (2025) menjelaskan tentang penggunaan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* secara bersamaan berpotensi memberikan efek sinergis terhadap peningkatan kuat tekan beton melalui mekanisme reaksi pozzolanik yang saling melengkapi dimana POFA berfungsi sebagai bahan pozzolanik dengan kandungan silika reaktif yang mampu bereaksi secara bertahap dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sementara silika fume yang memiliki ukuran partikel ultra-halus bereaksi lebih cepat dengan $Ca(OH)_2$ untuk membentuk gel kalsium silikat hidrat (C–S–H) tambahan yang meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan kekuatan matriks beton.

2. 6 Perbedaan Senyawa *Silica Fume* dan POFA

Berikut tabel perbedaan komposisi kimia utama antara *silica fume* dan POFA, yang menjadi dasar pembentukan hipotesis penelitian mengenai potensi perilaku *silica Fume* ketika dikombinasikan dengan POFA.

Tabel 2.4: Perbedaan senyawa *Silica fume* dan POFA.
Sumber: (Tanash dkk*.,* 2025) dan (Rodrigues dkk., 2020).

Komponen Kimia	Silica Fume	POFA	Implikasi Dalam Beton
Silika (SiO_2)	91%	58,4%	Kandungan SiO_2 tinggi meningkatkan reaksi *pozzolanic* dan pembentukan gel C-S-H, *silica fume* sangat dominan dalam peningkatan kuat tekan
Alumina (Al_2O_3)	0,7%	3,24%	Alumina pada POFA berperan dalam pembentukan gel C-A-H yang mendukung kekuatan beton
Ferric Oxide (Fe_2O_3)	0,2%	7,85%	Fe_2O_3 pada POFA memengaruhi stabilitas mineralogi dan karakteristik mikrostruktur beton

Tabel 2.4: *Lanjutan.*

Komponen Kimia	Silica Fume	POFA	Implikasi Dalam Beton
Kalsium Oksida (CaO)	1%	9,58%	POFA memiliki sifat semi-sementasi, sedangkan silica fume bersifat *pozzolanic* murni
Magnesium Oksida (MgO)	1,7%	3,71%	Kandungan MgO pada POFA lebih memengaruhi durabilitas beton di bandingan *silica fume*
Sulfur Trioksida (SO_3)	0,3%	0,9%	Kandungan (SO_3) pada POFA membantu waktu ikat semen, sedangkan *silica fume* memiliki pengaruh lebih kecil

Dari penjelasan Tabel 2.4 menjelaskan bahwa silikon dioksida (SiO_2) merupakan senyawa yang berperan penting dalam proses peningkatan kuat tekan beton. Tingginya kandungan silikon dioksida (SiO_2). Pada campuran beton diantisipasi dapat meningkatkan kualitas beton secara signifikan dari rencana awal, terutama dari umur 28 hari menjadi 56 hari, dengan target kuat tekan beton pada umur 28 hari mencapai 25 MPa ini bertujuan untuk mengetahui tingkat optimal penggunaan abu boiler dan *silica fume* dalam rangka meningkatkan kuat tekan beton (Irianti dkk., 2025)

Perbedaan ini menunjukkan bahwa, meskipun POFA dan *silica fume* sama-sama memiliki sifat pozzolan, *silica fume* menunjukkan reaktivitas yang lebih tinggi berkat kandungan silika amorf dan ukuran partikelnya yang sangat kecil, menghasilkan volume gel C-S-H yang lebih besar. Akibatnya, dalam kombinasi dengan POFA sebagai pengganti parsial semen, *silica fume* dianggap berperan besar dalam meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan kuat tekan beton, jika dibandingkan dengan penggunaan POFA.

2. 7 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton normal merupakan kemampuan beton yang tersusun dari semen, air, agregat halus, dan agregat kasar dalam menerima beban tekan hingga mencapai kondisi keruntuhan dan kuat tekan menjadi salah satu parameter utama dalam menentukan mutu beton karena menunjukkan kemampuan beton menahan beban yang bekerja padanya (Rahmadi dkk., 2017). Benda uji digunakan dalam pengujian kuat tekan dapat berbentuk kubus maupun silinder, dengan ukuran benda uji yang dapat memengaruhi nilai kuat tekan yang diperoleh (Talinusa dkk., 2014).

Kekuatan tekan beton merujuk pada kemampuan material untuk menahan beban tekan per satuan luas dengan parameter ini memainkan peran penting dalam menentukan kualitas suatu konstruksi dengan menguji kekuatan tekan beton yang menggunakan alat yang disebut mesin kompresi, beton harus mampu mencapai tingkat kekuatan tekan yang direncanakan, dengan nilai kekuatan tekan meningkat seiring bertambahnya usia beton hingga 28 hari (Sopa N.R dkk., 2023).

Menurut SNI 1974:2011, pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan benda uji silinder yang diberi beban tekan secara aksial hingga mencapai beban maksimum. Kekuatan tekan beton merujuk pada jumlah beban per satuan luas yang dapat menyebabkan sampel beton runtuh saat diuji dengan mesin tekan. Semakin tinggi kekuatan struktural yang direncanakan, semakin baik kualitasnya (Davendra, 2022).

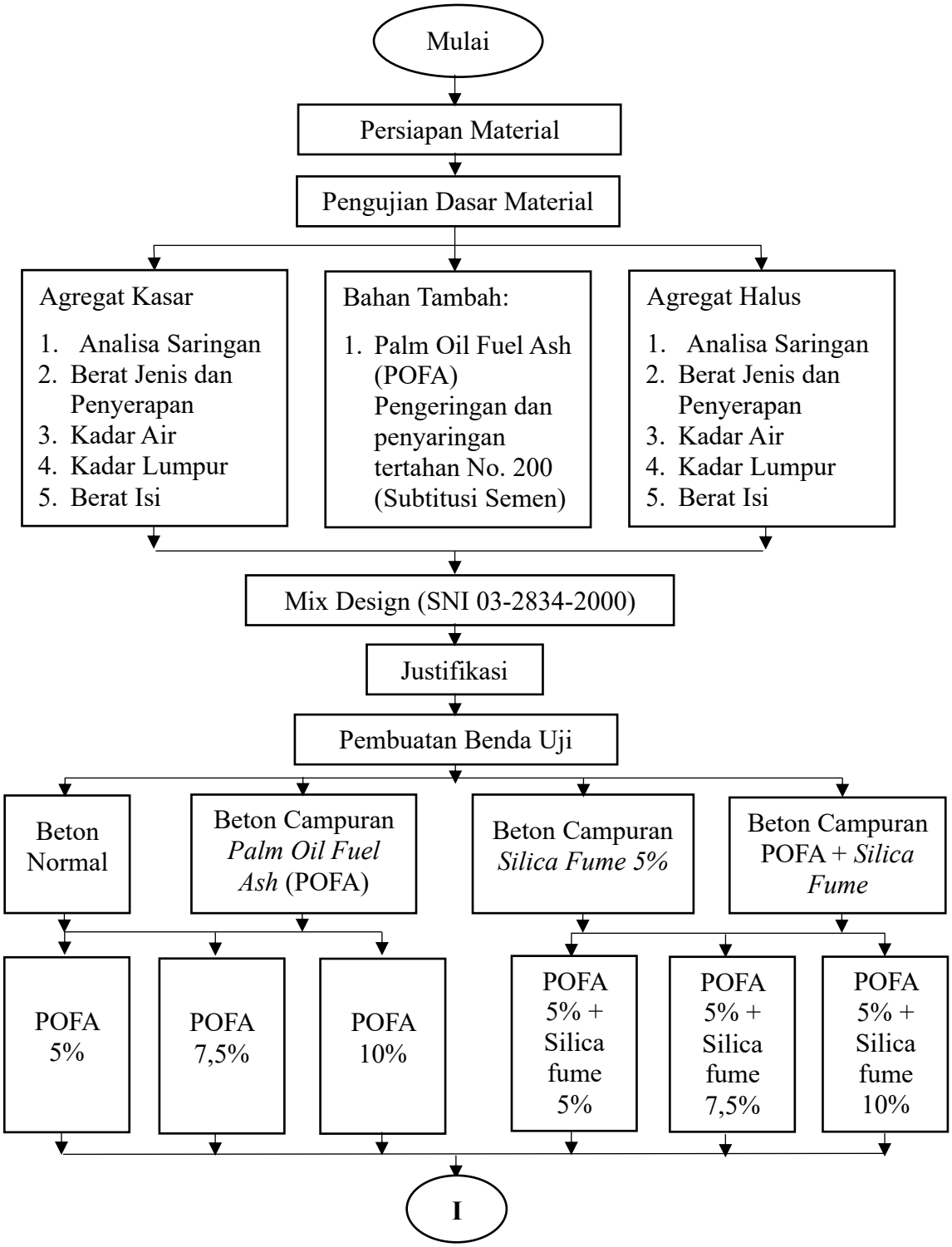
Kuat tekan beton normal dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya komposisi campuran, kualitas material penyusun, faktor air-semen, proses pencampuran, pemadatan, serta proses perawatan beton, perawatan beton (*curing*) merupakan salah satu faktor penting karena kondisi perawatan dapat memengaruhi proses hidrasi semen dan perkembangan kekuatan beton. Oleh karena itu, pelaksanaan perawatan yang baik diperlukan agar perkembangan kuat tekan beton dapat berlangsung secara optimal (Mulyati & Arkis, 2020).

Dengan demikian, kuat tekan beton normal dapat digunakan sebagai nilai dasar atau beton kontrol dalam penelitian yang menggunakan bahan pengganti Sebagian semen. Nilai kuat tekan beton normal selanjutnya dapat dijadikan pembanding untuk mengetahui perubahan kemampuan tekan beton setelah penggunaan bahan tertentu dalam campuran.

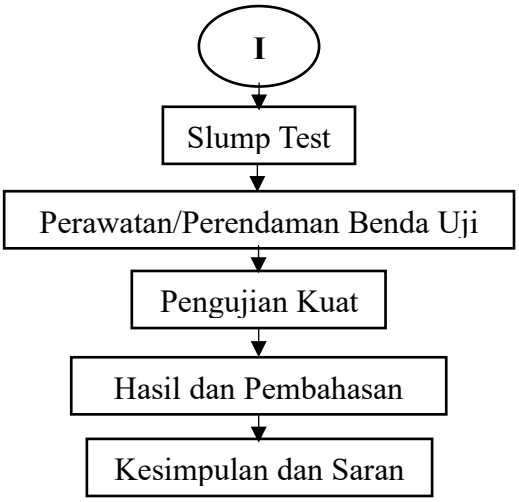
BAB 3

METODE PENELITIAN

3. 1 Diagram Alir



Gambar 3.1: Diagram Alir



Gambar 3.1: *Lanjutan*

3. 2 Metode Penelitian

Metode penelitian menggunakan metode eksperimental yang merujuk pada serangkaian langkah atau prosedur yang dirancang secara sistematis untuk memperoleh, menganalisis, dan menafsirkan data, dengan tujuan menjawab pertanyaan penelitian atau mencapai tujuan suatu studi. Pembuatan beton menggunakan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume* dilakukan dengan mengumpulkan data melalui serangkaian percobaan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Tahap Penelitian

1. Mulai

Penelitian ini dilakukan setelah proposal proyek akhir disetujui oleh kepala program studi. Kemudian, penelitian dimulai dengan uji dasar di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

2. Persiapan Material

Bahan dasar untuk produksi beton disiapkan, yaitu agregat kasar, agregat halus, semen, air, dan bahan tambahan yang digunakan dalam penelitian ini, seperti *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *silica fume.*

3. Pengujian Dasar Material

Pengujian dilakukan pada sampel agregat kasar, agregat halus, *Palm Oil Fuel Ash* (POFA), dan *silica fume* dengan memeriksa berat jenis, kandungan air, kandungan lumpur, dan densitas volume.

4. Mix Design Beton

Sesuai dengan SNI 03-2834-2000, desain campuran adalah proses perencanaan komposisi beton untuk mendapatkan campuran dengan karakteristik yang diinginkan, seperti kekuatan, ketahanan, dan kemudahan pengerjaan, dengan memanfaatkan bahan yang tersedia secara efisien dari segi biaya.

5. Pembuatan Benda Uji

Pada tahap ini, kegiatan yang dilakukan meliputi:

a) Pembuatan campuran beton
b) Pengujian *slump*
c) Pencetakan ke dalam wadah silinder
d) Pengambilan sampel uji dari wadah cetakan silinder

6. Perawatan Benda Uji

Perawatan (*Curring*) benda uji dengan merendam masing-masing sampel benda uji yang sudah dilepas dari cetakan silinder yang telah berumur 28 hari.

7. Pengujian Kuat Tekan Beton

Pada tahap ini, kekuatan tekan beton diuji menggunakan alat uji tekan setelah spesimen uji mencapai usia 28 hari. Hasil uji ini kemudian digunakan sebagai data untuk analisa pada bab 4 akhir.

8. Hasil dan Pembahasan

Pada tahap ini, data yang diperoleh dari setiap uji dianalisis menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Selanjutnya, pembahasan dilakukan terhadap hasil uji yang telah selesai.

9. Kesimpulan dan Saran

Selanjutnya, kesimpulan ditarik berdasarkan hasil data yang telah dianalisis dan diuji.

3. 3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dari bulan April-Juni 2026. Untuk pembuatan beton, pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

3. 4 Sumber dan Pengambilan Data

3. 4. 1 Data Primer

Data yang didapat dari hasil pemeriksaan dan pengujian yang dilakukan di Laboratorium Beton Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

1) Analisis Ayakan Agregat (SNI ASTM C136-2012).
2) Uji Kandungan Air Agregat (SNI 1971-2011)
3) Berat jenis dan penyerapan agregat halus (SNI 1970:2016)
4) Berat jenis dan penyerapan agregat kasar (SNI 1969:2016)
5) Kadar Air agregat (SNI 1971:2011)
6) Uji Kandungan Lumpur Agregat Halus (SNI 03-2461-2002)
7) Berat isi (SNI 03-4804-1998)
8) Desain Campuran Beton Berdasarkan (SNI 03-2834-2000)
9) Uji *Slump* (SNI 1972-2008)
10) Perawatan benda uji beton (SNI 2493:2011)
11) Uji Kekuatan Tekan Beton (SNI 1974-2011)

3. 4. 2 Data Sekunder

Data sekunder ini diperoleh dari bahan ajar studi seperti buku, jurnal dan peraturan yang berlaku, seperti Standar Nasional Indonesia (SNI) yang memiliki keterkaitan dengan beton dan juga sebagai referensi dalam melakukan penelitian pembuatan beton ini. Berikut data sekunder dibutuhkan dalam penelitian yaitu:

1. SNI (Standard Nasional Indonesia) 03-2834-2000, tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.
2. Buku-buku serta jurnal ilmiah, sebagai referensi dalam penelitian ini.
3. Laporan praktikum beton, sebagai referensi pendukung dalam penelitian ini.

3. 5 Alat dan Bahan

Alat-alat dan bahan yang diperlukan pada penelitian ini sebagai berikut:

3. 5. 1 Alat

1. Satu set saringan untuk agregat halus meliputi saringan No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, dan panci. Sementara itu, satu set saringan untuk agregat kasar terdiri dari saringan No. 1/2 inci, 3/4 inci, 3/8 inci, dan No. 4.
2. Timbangan digital digunakan untuk mengukur berat bahan dengan presisi.
3. Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume air dan aditif yang digunakan dalam pembuatan beton.
4. Pycnometer adalah alat yang digunakan untuk menguji densitas spesifik dan penyerapan POFA dan *silica fume*.
5. Oven digunakan untuk mengeringkan sampel beton.
6. Bak rendam digunakan untuk merendam sampel beton yang telah dikeluarkan dari cetakan.
7. Kantong plastik 10 kg digunakan sebagai wadah untuk menyimpan bahan yang telah disiapkan sebelum dimasukkan ke dalam *mixer*.
8. Wadah digunakan sebagai dasar selama proses pencampuran beton.
9. Sekop tangan digunakan untuk mencampur, menuangkan beton segar ke dalam cetakan, dan meratakan permukaan beton segar di dalam cetakan.
10. Cetakan beton (Bekisting) dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.
11. Vaseline dan kuas digunakan untuk melumasi cetakan agar memudahkan pengeluaran beton dari cetakan.
12. Satu set peralatan uji *slump*, terdiri dari kerucut Abrams, penggaris, dan plat.
13. Mesin pencampur beton (*Concrete Mixer*) digunakan untuk mencampur semua bahan.
14. Mesin uji kuat tekan beton (*Compression Testing Machine*).

3. 5. 2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian pembuatan beton ini yaitu sebagai berikut:

1. Agregat Kasar

   Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini berupa kerikil yang didapat dari toko material bangunan terdekat

2. Agregat Halus

   Agregat halus berupa pasir didapat dari toko material bangunan terdekat.

3. Semen

   Semen yang digunakan pada penelitian ini berupa semen portland tipe I, yang didapat dari toko material bangunan terdekat.

4. Air

   Air yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis air yang tidak terkontaminasi dengan zat lain, dan telah disediakan oleh Laboratorium Beton Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

5. *Palm Oil Fuel Ash* (POFA)

   Palm Oil Fuel Ash (POFA) yang digunakan pada penelitian adalah POFA yang didapat dari limbah pembakaran pabrik PT. Sudara Sejati Luhur

6. *Silica Fume*

   Silica fume yang digunakan dengan kadar 5% dari berat semen didapat dari toko bangunan yang berada di kota Medan

3. 6 Persiapan Bahan Tambah

Sebelum digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran beton, POFA (Palm Oil Fuel Ash) terlebih dahulu dilakukan proses persiapan untuk memperoleh material yang sesuai dengan kebutuhan penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Pengumpulan POFA

   POFA yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari limbah pembakaran pabrik PT. Sudara Sejati Luhur. Material POFA yang telah diperoleh kemudian dikumpulkan dan dipersiapkan untuk dilakukan proses pengolahan sebelum digunakan dalam campuran beton.

2. Pengeringan POFA

   POFA yang telah dikumpulkan terlebih dahulu dilakukan proses pengeringan dengan cara dijemur di bawah sinar matahari hingga mencapai kondisi kering. Proses pengeringan bertujuan untuk mengurangi kadar air yang masih

terdapat pada POFA sehingga material lebih mudah dalam proses penyaringan dan tidak mempengaruhi komposisi campuran beton.

3. Penyaringan POFA

Setelah proses pengeringan, POFA kemudian disaring menggunakan saringan No. 200. Proses penyaringan dilakukan untuk memperoleh ukuran butiran POFA yang lebih halus dan seragam. POFA yang lolos saringan No. 200 selanjutnya digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen pada campuran beton.

4. Penyimpanan POFA

POFA yang telah melalui proses penyaringan kemudian disimpan dalam wadah tertutup untuk menjaga kondisi material agar tetap kering dan terhindar dari kontaminasi sebelum digunakan pada proses pencampuran beton.

POFA yang telah dipersiapkan selanjutnya digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dengan variasi penggunaan sebesar 5%, 7,5%, dan 10% sesuai dengan rancangan penelitian.

3. 7 Justifikasi Pemilihan Bahan Tambah dan Persentase

Pada penelitian ini penggunaan *Silica fume* dan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) sebagai aditif dalam penelitian ini didasarkan pada sifat pozzolanik kedua material tersebut. *Silica fume* memiliki kandungan silika amorf yang sangat tinggi dan ukuran partikel yang sangat halus, yang dapat meningkatkan kekuatan tekan dan kepadatan beton melalui reaksi pozzolanik dan efek pengisian pori. Sementara itu, POFA dipilih karena merupakan produk limbah industri minyak sawit dengan kandungan silika yang relatif tinggi, sehingga berpotensi menjadi pengganti semen yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan.

Pada *Silica fume*, berdasarkan penelitian terdahulu, kadar 5% silica fume dipilih sebagai variasi penelitian karena penggunaan silica fume pada kadar rendah hingga sedang terbukti mampu meningkatkan kuat tekan beton melalui efek pengisian rongga (filler effect) dan reaksi pozzolan. Penelitian yang berjudul "Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton Fc'25" menunjukkan bahwa penggunaan silica fume sebesar 10% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 27,20 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton normal sebesar 25,95 MPa (Maya dkk., 2023), selanjutnya, penelitian yang berjudul "Analisa

Penggunaan Silica Fume Campuran Komposisi Rancangan Mutu Beton" memperoleh peningkatan kuat tekan optimum pada kadar 4% silica fume sebesar 313 kg/cm², sedangkan pada kadar yang lebih tinggi peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan (Faisal dkk., 2024), sementara itu, penelitian yang berjudul "Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton" menunjukkan bahwa penambahan silica fume sebesar 4% masih mampu meningkatkan kuat tekan menjadi 27,45 MPa, namun pada kadar 7% dan 10% justru menyebabkan penurunan kuat tekan menjadi 24,76 MPa dan 19,75 MPa (Arman dkk., 2023). Berdasarkan hasil tersebut, kadar 5% silica fume dipilih karena mendekati kadar optimum yang banyak dilaporkan dalam penelitian terdahulu serta belum mencapai kadar tinggi yang berpotensi menurunkan kuat tekan beton.

Untuk POFA, berdasarkan penelitian terdahulu, variasi kadar POFA sebesar 5%, 7,5%, dan 10% dipilih untuk mengetahui pengaruh penambahan POFA terhadap kuat tekan beton pada kadar rendah hingga sedang. Penelitian ini berjudul *"Performance of Concrete Using Partial Replacement of Cement by Palm Oil Fuel Ash (POFA): Eco-Friendly Concrete Composite"* menunjukkan bahwa peningkatan kadar POFA cenderung menurunkan kuat tekan beton, dari 35,75 MPa pada beton normal menjadi 34,88 MPa pada kadar 10% POFA (Devdhe dkk., 2025), selanjutnya, penelitian yang berjudul *"Influence of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete"* menunjukkan bahwa penggunaan POFA sebesar 5% menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 84,12 MPa, sedangkan pada kadar 10% dan 15% kuat tekan mengalami penurunan (Rodrigues et al., 2020), kemudian hasil serupa juga ditunjukkan pada penelitian yang berjudul *"Strength and Durability of Cement Sand Brick Containing Palm Oil Fuel Ash (POFA) and Fine Recycled Concrete as Partial Cement Replacement"*, dimana penggunaan POFA sebesar 5% menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 29,5 MPa, sedangkan pada kadar 10% dan 15% terjadi penurunan kuat tekan (Ismail & Khalid, 2022). Oleh karena itu, variasi POFA sebesar 5%, 7,5%, dan 10% dipilih untuk mengevaluasi pengaruh POFA di sekitar kadar optimum yang dilaporkan penelitian terdahulu. Kadar POFA di atas 10% tidak digunakan karena berdasarkan beberapa penelitian terdahulu cenderung menyebabkan penurunan kuat tekan

Selanjutnya, pengujian kekuatan tekan beton dilakukan pada usia 28 hari karena usia ini merupakan standar umum untuk mengevaluasi kekuatan beton, karena proses hidrasi semen telah berlangsung secara signifikan, sehingga hasil yang diperoleh dapat mewakili kekuatan beton secara optimal. Oleh karena itu, pemilihan jenis admixture, variasi persentase, dan usia pengujian dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan ilmiah dari hasil penelitian sebelumnya.

3. 8 Tahap pengujian

Untuk memperoleh hasil yang akurat, maka ada beberapa tahapan pengujian terhadap bahan dan material dengan menggunakan metode yang telah ditentukan sebelumnya. Berikut tahap-tahap tersebut disampaikan di bawah ini:

3. 8. 1 Pengujian Analisa Saringan

Pengujian analisis ayakan adalah teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi distribusi ukuran agregat halus dan kasar dengan menyaring sampel agregat. Dalam proses ini, persentase berat partikel agregat yang melewati serangkaian ayakan dihitung. Hasil perhitungan ini divisualisasikan dalam bentuk grafik distribusi ukuran partikel, sesuai dengan standar (SNI ASTM C136:2012).

3. 8. 2 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Metode pengujian bertujuan untuk menentukan berat jenis curah, berat jenis kering permukaan, berat jenis semu dan penyerapan air oleh agregat halus dan kasar. Pengujian ini berdasarkan SNI 1969:2016 untuk agregat kasar dan SNI 1970:2016 untuk agregat halus. Menghitung densitas spesifik dan penyerapan pada agregat kasar menggunakan persamaan sebagai berikut:

Berat Jenis Curah $$S_d = \frac{A}{(B-C)} \quad (3.\ 1)$$

Berat Jenis Curah Kondisi SSD $$S_S = \frac{B}{(B-C)} \quad (3.\ 2)$$

Berat Jenis Semu $$S_a = \frac{A}{(A-C)} \quad (3.\ 3)$$

Penyerapan $$S_w = \left[\frac{B-A}{A}\right] \times 100\% \quad (3.\ 4)$$

Dimana:

A = Berat benda uji kering oven (gr)

B = Berat benda uji jenuh kering permukaan di udara (gr)

C = Berat benda uji jenuh kering permukaan dalam air (gr)

Untuk menghitung densitas spesifik dan penyerapan pada agregat halus menggunakan persamaan berikut:

Berat Jenis Curah $$S_d = \frac{A}{(B+S-C)} \quad (3.\ 5)$$

Berat Jenis Curah Kondisi SSD $$S_S = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (3.\ 6)$$

Berat Jenis Semu $$S_a = \frac{A}{(B+A-C)} \quad (3.\ 7)$$

Penyerapan $$S_w = \left[\frac{S-A}{A}\right] \times 100\% \quad (3.\ 8)$$

Dimana:

A = Berat benda uji kering oven (gram)

B = Berat piknometer yang berisi air (gram)

C = Berat piknometer dengan benda uji dan air sampai bata pembacaan (gram)

S = Berat benda uji kondisi jenuh kering permukaan/SSD (gram).

3. 8. 3 Pengujian Kadar Air

Metode pengukuran kandungan air adalah pendekatan yang digunakan untuk menentukan kandungan air dalam agregat, yang secara ideal melibatkan perbandingan antara kondisi permukaan kering jenuh (SSD) dengan kondisi agregat yang telah dikeringkan dalam oven. Kandungan ini diukur berdasarkan berat air yang terkandung dalam agregat. Metode ini, yang berlaku untuk agregat kasar dan halus, merujuk pada standar SNI 1971:2011. Berikut rumus persentase yang digunakan:

Kadar air $$= \frac{Berat\ SSD - Berat\ kering\ oven}{Berat\ kering\ oven}\ x\ 100\% \quad (3.\ 9)$$

3. 8. 4 Pengujian Berat Isi

Metode pengujian ini diterapkan untuk mengukur densitas volume agregat yang diperlukan dalam metode penentuan proporsi campuran beton. Untuk

Langkah-langkah kerja pengujian berat isi berdasarkan SNI 03-4804-1998. Berikut adalah persyaratan yang digunakan menentukan berat isi :

$$M = \frac{(G-T)}{V} \quad (3.\ 10)$$

Dimana:

M = Berat isi agregat kering oven (kg/m^3)

G = Berat agregat dan wadah (kg)

T = Berat wadah (kg)

V = Volume wadah (m^3)

3. 8. 5 Pengujian Kadar Lumpur

Uji ini dimaksudkan untuk mengukur kandungan lumpur dalam sampel agregat, sehingga memungkinkan penilaian kepatuhan agregat terhadap batas-batas yang ditetapkan. Uji ini merujuk pada standar SNI 03-2461-1991/2002. Berikut Persamaan yang digunakan untuk menghitung persentase kandungan lumpur:

$$L = \frac{(A-C)}{A} \text{ x } 100\% \quad (3.\ 11)$$

Dimana:

L = Persentase lumpur dalam agregat (%)

A = Berat agregat sebelum dicuci (kg)

C = Berat agregat setelah dicuci dan kering oven (kg)

3. 8. 6 Perencanaan *Mix Design*

Mix design adalah proses penentuan sifat-sifat yang diperlukan dari campuran beton. Proses ini bertujuan untuk mengembangkan spesifikasi beton, sedangkan proporsi campuran merujuk pada penentuan jumlah bahan beton, yaitu penggunaan bahan lokal yang tersedia, untuk mencapai sifat-sifat yang ditentukan pada beton. Mix design ini menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834-2000 Tentang Tata Cara Pembuatan Campuran Beton Normal dan SNI 1974-2011 Tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder).

Parameter perencanaan campuran beton:

1. Mutu beton rencana (f'c)

   ↪ 25 MPa

2. Metode perancangan campuran beton

↪ SNI 03-2834-2000

3. Jenis semen

   ↪ Semen Portland Tipe I

4. Bahan pengganti sebagian semen

   ↪ - *Palm Oil Fuel Ash* (POFA)

   - Silica Fume (SF)

5. Nilai slump

   ↪ 60 mm – 180 mm

6. Bentuk dan ukuran benda uji

   ↪ - Silinder

   - Diameter (Ø) → 15 cm

   - Tinggi (t) → 30 cm

7. Umur pengujian beton

   ↪ 28 hari

8. Jumlah Sampel

   ↪ 24 sampel

Tabel 3.1: Komposisi campuran pada benda uji beton umur 28 hari.

Kode Benda Uji	**Semen**	**Agregat Kasar**	**Agregat Halus**	**Air**	**POFA**	***Silica Fume (SF)***	**Jumlah Sampel**
BN	100%	100%	100%	100%	0%	0%	3
BNPOFA 1	95%	100%	100%	100%	5%	0%	3
BNPOFA 2	92,5%	100%	100%	100%	7,5%	0%	3
BNPOFA 3	90%	100%	100%	100%	10%	0%	3
BNSF	95%	100%	100%	100%	0%	5%	3
BNPOFASF1	90%	100%	100%	100%	5%	5%	3
BNPOFASF2	87,5%	100%	100%	100%	7,5%	5%	3
BNPOFASF3	85%	100%	100%	100%	10%	5%	3
Total							24

Keterangan :

BN = Beton Normal

BNPOFA 1 = Beton normal + *Palm Oil Fuel Ash* 5%

BNPOFA 2 = Beton normal+ *Palm Oil Fuel Ash* 7,5%

BNPOFA 3 = Beton normal + *Palm Oil Fuel Ash* 10%

BNSF = Beton normal + *Silica Fume* 5%

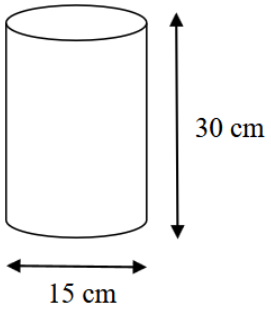
BNPOFASF 1 = Beton normal + *Palm Oil Fuel Ash* 5% + *Silica Fume* 5%

BNPOFASF 2 = Beton normal+ *Palm Oil Fuel Ash* 7,5% + *Silica Fume* 5%

BNPOFASF 3 = Beton normal + *Palm Oil Fuel Ash* 10% + *Silica Fume* 5%

3. 8. 7 Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji ini dimaksudkan untuk melaksanakan persiapan material yang dibutuhkan, cara mencampur, pembuatan, dan perawatan benda uji beton sesuai dengan persyaratan standar. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berbentuk silinder dengan ukuran 15 cm x 30 cm dengan jumlah 24 sampel. Untuk tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton menggunakan SNI-2493-2011.



Gambar 3.2: Benda Uji Silinder

3. 8. 8 Pengujian *Slump*

Pengujian ini dimaksudkan untuk menentukan nilai *slump* beton dan menentukan plastisitas beton dengan mengukur ketinggian keruntuhan *slump.* Menurut SNI 1972-2008 langkah-langkah yang harus dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Basahi cetakan dan letakan di atas permukaan datar, lembab, tidak menyerap air dan kaku.
2. Segera isi cetakan denagan adonan beton dalam 3 lapis yaitu setiap lapis 1/3 dari volume cetakan
3. Padatkan setiap lapisan dengan 25 tusukan menggunakan batang pemadat.
4. Dalam pengisian dan pemadatan lapisan atas, lebihkan adukan beton di atas cetakan sebelum pemadatan dimulai. Setelah lapisan atas selesai dipadatkan, ratakan permukaan beton pada bagian atas cetakan dengan cara menggelindingkan batang penusuk di atasnya. Lepaskan segera cetakan dari beton dengan cara mengangkat dalam arah *vertical* secara hati-hati.
5. Setelah beton menunjukkan penurunan pada permukaan, ukur segera *slump* dengan menentukan perbedaan vertikal antara bagian atas cetakan dan pusat permukaan atas beton.

3. 8. 9 Perawatan/Perendaman Benda Uji

Setelah beton dikeluarkan dari cetakan, spesimen dikeringkan dengan cara dibiarkan pada suhu ruangan hingga uji kekuatan tekan beton dilakukan pada usia 28 hari. Berikut adalah langkah-langkah dalam proses perendaman spesimen:

1. Angkat spesimen dari cetakan dengan hati-hati.
2. Pastikan spesimen benar-benar kering.
3. Siapkan tangki perendaman dengan mengisinya menggunakan air bersih dari keran di Laboratorium Beton, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
4. Letakkan spesimen ke dalam tangki perendaman secara perlahan dan hati-hati.
5. Rendam spesimen selama 27 hari, lalu angkat pada hari ke-28.
6. Biarkan spesimen mengering, lalu timbang.

3. 8. 10 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kekuatan tekan beton ini dilakukan untuk menentukan kekuatan tekan beton sesuai dengan standar dan peraturan yang berlaku, sehingga tujuannya

dapat tercapai. Persamaan kekuatan tekan beton berdasarkan SNI 03-1974-2011 dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (3.12)$$

Keterangan:

f'c = Kekuatan tekan beton (MPa)

P = Tekanan (N)

A = Luas Penampang (cm^2)

Adapun langkah – Langkah pengujian kuat tekan :

1. Benda uji dikeluarkan dari bak perendam.
2. Permukaan benda uji dibersihkan.
3. Benda uji diletakkan pada plat tekan mesin CTM.
4. Beban diberikan secara bertahap hingga benda uji runtuh.
5. Beban maksimum dicatat

BAB 4

KESIMPULAN DAN SARAN

4. 1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah saya lakukan mengenai pengaruh persentase *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan *Silica Fume* sebagai bahan pengganti parsial semen terhadap kuat tekan beton umur 28 hari, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan variasi persentase POFA sebesar 5%, 7,5%, dan 10% berpengaruh terhadap kuat tekan beton umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan variasi POFA 5% menghasilkan kuat tekan sebesar 24,16 MPa, POFA 7,5% sebesar 23,33 MPa, dan POFA 10% sebesar 23,05 MPa. Seluruh variasi POFA mengalami penurunan kuat tekan dibandingkan beton normal yang memiliki kuat tekan sebesar 25,13 MPa.
2. Penggunaan Silica Fume sebesar 5% berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan beton umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton dengan penambahan Silica Fume 5% menghasilkan kuat tekan sebesar 25,97 MPa, atau meningkat sekitar 3,34% dibandingkan beton normal sebesar 25,13 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa Silica Fume mampu meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton melalui reaksi pozzolanik dan efek pengisian rongga (*filler effect*).
3. Perbandingan kuat tekan antara beton normal dan beton dengan kombinasi POFA serta Silica Fume menunjukkan bahwa kombinasi tersebut belum mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton normal maupun beton dengan Silica Fume 5%. Hasil pengujian kombinasi POFA + SF 5%, POFA + SF 7,5%, dan POFA + SF 10% masing-masing menghasilkan kuat tekan sebesar 24,30 MPa, 23,88 MPa, dan 23,74 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, variasi terbaik diperoleh pada beton dengan penambahan Silica Fume 5% dengan kuat tekan sebesar 25,97 MPa, sedangkan kombinasi POFA dan Silica Fume belum memberikan peningkatan kuat tekan yang optimum.

4. 2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan variasi persentase POFA dan Silica Fume yang lebih beragam untuk mendapatkan komposisi optimum antara kedua bahan tersebut.
2. Disarankan melakukan pengujian pada umur beton yang lebih panjang, seperti umur 56 hari atau 90 hari, karena material pozzolan seperti POFA dan silica fume membutuhkan waktu lebih lama untuk mengalami reaksi sekunder yang dapat meningkatkan kekuatan beton.
3. Perlu diperhatikan proses pengolahan POFA, terutama tingkat kehalusan dan kandungan kimianya, karena karakteristik material tersebut sangat berpengaruh terhadap efektivitasnya sebagai bahan pengganti parsial semen.

DAFTAR PUSTAKA

Abdulhaleem, K. N., Hamada, H. M., Majdi, A., Yousif, T., Kn, A., Hm, H., Majdi, A., St, Y., Abdulhaleem, K. N., Hamada, H. M., Majdi, A., & Yousif, S. T. (2025). *Influence Of Palm Oil Fuel Ash As Agricultural Waste On The Environment And Strength Of Geopolymer Concrete To Cite This Article Influence Of Palm Oil Fuel Ash As Agricultural Waste On The Environment And Strength Of Geopolymer Concrete*.

Agustian, R., Khadavi, & Zufrimar. (2023). Pengaruh Silica Fume Sebagai Substitusi Semen Terhadap Kuat Tekan. 1–4.

Ali, P., Pujiastuti, H., Hidayati, N., Yustissiani, E., Sipil, P. T., Teknik, F., Mataram, U. M., Sipil, P. T., Teknik, F., Mataram, U. M., Sipil, P. T., Teknik, F., Mataram, U. M., Sipil, P. T., Teknik, F., & Mataram, U. M. (2023). Studi Kuat Tekan Beton Mutu Sedang Dengan Campuran Abu Sekam Padi dan Limbah Beton. 3(2), 1–10.

Amelia, R., & Amalia, K. R. (2021). Hubungan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kuat Tekan Beton. 4(2), 225–235. https://doi.org/10.33087/talentasipil.v4i2.79

Amran, M., Murali, G., Fediuk, R., Vatin, N., Vasilev, Y., & Abdelgader, H. (2021). *Palm Oil Fuel Ash-Based Eco-Efficient Concrete : A Critical Review of the Short-Term Properties*. 1–33.

Arman, Mulyati, M., Nugroho, F., Fakhrizal, F., & Fadhil Azman, H. (2023). Pengaruh Penambahan *Silica Fume* Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknologi dan Vokasi*, *2*(1), 9–16. https://doi.org/10.21063/jtv.2024.2.1.9-16

Chaudhary, S. K., & Sinha, A. K. (2020). *Effect of Silica Fume on Permeability and Microstructure of High Strength Concrete*. *6*(9), 1697–1703.

Dasar, A., & Patah, D. (2024). Kekuatan dan Durabilitas Beton Menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Pasir Pantai. *Borneo Engineering :* Jurnal Teknik

Sipil, *8*(1), 83–94. https://doi.org/10.35334/be.v8i1.5090

Davendra, V. (2022). Pengaruh Silica Fume Sebagai Bahan Tambah Terhadap Karakteristik Beton Mutu Tinggi. Jurnal Proyek Teknik Sipil, *5*(2), 1–8. https://doi.org/10.14710/potensi.2022.14864

Devdhe, H. N., Pote, R. K., Nikam, P. A., Kasliwal, S. S., Ansari, U. S., Gaikwad, A. D., & Pagare, S. U. (2025). *Performance of Concrete Using Partial Replacement of Cement by Palm Oil Fuel Ash (POFA): Eco-Friendly Concrete Composite*. *11*(22), 1757–1765.

Djaelani, M., Darmawan, D., & Amri, M. W. (2022). *Study of Concrete : Quality and Economic*. *1*(1), 1–3.

Faisal, M., Abrar, A., & Srihandayani, S. (2024). Analisis Penggunaan *Silica Fume* Terhadap Campuran Komposisi Rancangan Mutu Beton Kuat Tekan Beton. 2(2), 2–9.

Hidayah, M., Syarif, H., & Edison, B. (2025). Analisis Substitusi Sebagian Semen Dengan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) Pada Beton Porous Terhadap Nilai Kuat Tekan Dan Permeabilitas. 4(2), 32–44.

Irawan, I., Martini, S., & Roni, K. A. (2025). *The Effect of Silica Fume Pozzolan Percentage as a Partial Cement Substitution on Concrete Compressive Strength*. *10*(09), 7183–7187. https://doi.org/10.47191/etj/v10i09.31

Irianti, L., Helmi, M., Widyawati, R., & Abdullah, H. I. (2025). Pemanfaatan Limbah Industri Berupa Abu Ketel dan *Silica Fume* Untuk Peningkatan Kuat Tekan Beton. 15(02), 253–264.

Ismail, S., & Khalid, F. S. (2022). *Strength and Durability of Cement Sand Brick Containing Palm Oil Fuel ash (POFA) and Fine Recycled Concrete as Partial Cement Replacement*. *3*(1), 1509–1515.

Kencanawati, Rawiana, S., Rofaida, A., & Febriyanti. (2023). Identifikasi Karakteristik Fisik Berbagai Jenis Agregat Halus dan Korelasinya pada Sifat Beton Segar dan Beton Padat. 109–114.

Kudus, S. A., Mustaffa, N. K., & Shahidan, S. (2022). *Influence of Palm Oil Fuel Ash on Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete*. *4*, 44–53.

Li, X., Grassl, H., Hesse, C., & Dengler, J. (2024). *Unlocking the potential of ordinary Portland cement with hydration control additive enabling low-carbon building materials. Communications Materials, 5*(1), 1–9. https://doi.org/10.1038/s43246-023-00441-9

Maya, Y., Sartika, S. N. R., & Denie, N. (2023). Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton *Fc ' 25 Effect Of Silica Fume Addition On Concrete Compressive Strength Fc ' 25*. *1*, 1–6.

Mulyati, & Arkis, Z. (2020). Pengaruh Metode Perawatan Beton Terhadap Kuat Tekan Beton Normal. 7(2), 78–84. https://doi.org/10.21063/JTS.2020.V702.05

Noorfauzi, A. R., Rona, S., Gaby, P., & Attamimi, T. A. (2025). *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengikat Tambahan Beton : Tinjauan Sistemastis Peningkatan Kinerja Dan Keberlajutan. 4(1), 17–27.

Okumu, V. A., Shitote, S. M., & Oyawa, W. O. (2017). *Influence of Constituent Materials Properties on the Compressive Strength of in Situ Concrete in Kenya*. 63–81. https://doi.org/10.4236/ojce.2017.71004

Olivia, M., Asmanovita, R., Sinuhaji, I., Putri, W., Sitompul, I., Utama, P., & Supit, S. (2025). *Properties Of Blended Palm Oil Fuel Ash (POFA) Concrete Using Additive Micro Silica Exposed To Organic Peat Water Environment* (hal. 1–9).

Olivia, M., Putri, W. R., Supit, S., Wibisono, G., & Utama, S. (2023). *Compressive Strength and Porosity of POFA Blended Concrete Admixed with Micro Silica*. *01034*, 1–8.

Raghav, M., Park, T., Yang, H., Lee, S., Karthick, S., & Lee, H. (2021). *Review of the Effects of Supplementary Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical , Mechanical and Durability Properties of*

Hydraulic Concrete.

Rahmadi, Y., Sarana, D., & Akbar, S. J. (2017). Studi Eksperimental Beton Normal Dalam. 7(2), 284–291.

Ramanda Putri, W., Utama, S., & Olivia, M. (2021). Kuat Tekan Beton Pofa (Palm Oil Fuel Ash) Dengan Bahan Tambah *Silica Fume*. *Jom FTEKNIK*, *8*, 1–8.

Rodrigues, L., Tavares, C., Francisco, J., Junior, T., Costa, L. M., Cesar, A., Cetlin, P. R., Teresa, M., & Aguilar, P. (2020). *Influence of quartz powder and silica fume on the performance of Portland cement. Scientific Reports, 0123456789*, 1–15. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78567-w

Safiuddin, M., Salam, M. A., & Jumaat, M. Z. (2011). *Utilization Of Palm Oil Fuel Ash In Concrete : A Review*. *17*(2), 234–247. https://doi.org/10.3846/13923730.2011.574450

Setiawan, D., & Subhan, A. (2022). Perbandingan Kuat Tekan Beton Antara Penggunaan Agregat Gunung Jebrod Dengan Agregat Sungai Cisokan. 13, 125–134.

Solikin, M., & Ariska, A. (2023). Pengaruh Penggunaan Silica fume Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi High Volume Fly Ash *(HVFA) Effect of Use Silica fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete*. *7*(2), 151–159. https://doi.org/10.30595/jrst.v7i2.16582

Sopa N.R, Y. M., Nisumanti, S., & Chandra, D. (2023). Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton Fc'25. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, *5*(1), 1–6. https://doi.org/10.26740/proteksi.v5n1.p1-6

Sutar, S. N., Patil, P. V., Chavan, R. V., & Maske, M. M. (2021). *Study and Review of Ordinary Portland Cement*. *1*, 153–160.

Talinusa, O. G., Tenda, R., & Tamboto, W. J. (2014). Pengaruh Dimensi Benda Uji Terhadap Kuat Tekan Beton. 2(7), 344–351.

Tanash, A. O., Budiea, A. M. A., Md Jaafar, M. F., Muthusamy, K., & Zulkarnain,

F. (2025). *Experimental study on the mechanical performance of polypropylene fiber-reinforced concrete incorporating palm oil fuel ash as partial cement replacement. Challenge Journal of Concrete Research Letters*, *16*(3), 115. https://doi.org/10.20528/cjcrl.2025.03.001

Tarru, R. O., Arnanto, B., Tarru, H. E., Bandaso, S., Sipil, J. T., Kristen, U., Toraja, I., Makale, N. N., Toraja, T., Makale, N. N., & Toraja, T. (2017). Studi Penggunaan *Silica Fume* Sebagai Bahan Pengisi (Filler) Pada Campuran Beton. 1, 472–485.

Yuari Farandi, R., Olivia, M., & Darmayanti, L. (2021). Kinerja Beton High Volume POFA. 167–186.

Zulkarnain, F., Hasibuan, D. K., & Siregar, Z. (2026). *The Effect of Fly Ash and Silica Fume As Filler Materials on The Tensile Strength and Modulus of Elasticity of Self-Compacting Concrete*. *18*(1).

Zulkarnain, F., Ichwan, M., Siregar, Z., & Muthusamy, K. (2025). *The use of Coconut Shell Fragments and Sikament-NN as a Variation of Concrete Mix Composition on the Compressive Strength of Concrete The use of Coconut Shell Fragments and Sikament- NN as a Variation of Concrete Mix Composition on the Compressive Strengt. Journal of Physics.* https://doi.org/10.1088/1742-6596/2989/1/012019

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA IDENTITAS DIRI		
Nama Lengkap	: Firzatullah	
Tempat, Tanggal Lahir	: Medan, 10 Desember 2004	
Jenis Kelamin	: Laki-laki	
Agama	: Islam	
Alamat	: Jl. Gaperta X B No. K-154	
No. Hp	: +6282162059656	
Nama Ayah	: Almarhum Karseno	
Nama Ibu	: Misriani M	
RIWAYAT PENDIDIKAN		
NPM	: 2207210122	
Program Studi	: Teknik Sipil	
Fakultas	: Teknik	
Perguruan Tinggi	: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara	
Alamat Perguruan Tinggi	: Jl. Kapten Muchtar Basri, No. 3, Medan, 20238	
PENDIDIKAN FORMAL		
Sekolah Dasar	: SD Kartika 1-2	2010-2016
Sekolah Menengah Pertama	: MTs Negeri 3 Medan	2016-2019
Sekolah Menengah Atas	: SMA Negeri 12 Medan	2019-2022