



PENGARUH KADAR *SILICA FUME* TERHADAP KUAT TEKAN PASTA SEMEN UHSCP DENGAN DAN TANPA SINTERING

David Prasetyo^{1,*}, Taufiq Rocman², Armin Naibaho³

Mahasiswa Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan & Jembatan¹, Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Malang², Dosen Jurusan Teknik Sipil Politeknik Malang³

Email: prasetyo.david.070304@gmail.com¹, taufiq.rochman@polinema.ac.id², ar_naibaho@yahoo.co.id³

ABSTRAK

Perkembangan infrastruktur modern mendorong pemanfaatan Ultra-High Strength Cement Paste (UHSCP) sebagai material berkekuatan tinggi dengan dimensi yang lebih efisien. Silica fume (SF) berperan meningkatkan kuat tekan melalui efek pengisian mikrostruktur dan reaksi pozzolanik yang menghasilkan gel C-S-H tambahan. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi kadar SF terhadap kuat tekan UHSCP pada empat metode perawatan yang mengombinasikan sintering dan curing. Campuran dibuat menggunakan Semen Portland Komposit, silica fume, dan superplasticizer dengan rasio air-pengikat rendah yang konstan. Kuat tekan dievaluasi pada beberapa umur pengujian untuk menilai perkembangan sifat mekanis. Hasil menunjukkan bahwa kadar SF optimum dipengaruhi oleh metode perawatan, dengan curing menghasilkan perkembangan mikrostruktur dan kuat tekan yang lebih stabil. Sebaliknya, sintering mempercepat hidrasi awal tetapi berpotensi menurunkan kinerja jangka panjang akibat terbentuknya cacat mikrostruktural permanen.

Kata kunci : pasta semen UHSCP, silica fume, sintering, kuat tekan

ABSTRACT

The growing demand for advanced infrastructure has encouraged the development of Ultra-High Strength Cement Paste (UHSCP) as a high-performance material capable of achieving superior compressive strength while maintaining efficient structural dimensions. Silica fume (SF) enhances mechanical performance through microstructural densification and pozzolanic reactions that generate additional calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. This study investigates the effect of varying SF contents on the compressive strength of UHSCP under four curing regimes combining sintering and conventional curing. Mixtures were prepared using Portland Composite Cement, silica fume, and a superplasticizer at a constant low water-to-binder ratio.

Article History

Received: September 2026

Reviewed: September 2026

Published: September 2026

Plagiarism Checker No
237.u873247.fh8374

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under
a [Creative Commons
Attribution-NonCommercial
4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Compressive strength was evaluated at different testing ages to assess the development of mechanical properties over time. The results indicate that the optimum SF content is highly dependent on the curing method employed. Conventional curing provided a more favorable environment for stable microstructural development and strength gain, whereas sintering accelerated early-age hydration but may adversely affect long-term performance due to the formation of permanent microstructural defects.

Keywords: UHSCP cement paste, silica fume, sintering, compressive strength

1. PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur modern mendorong kebutuhan akan material konstruksi berkinerja tinggi yang memiliki kuat tekan dan durabilitas yang unggul. Salah satu material yang banyak dikembangkan adalah *Ultra-High Strength Cement Paste* (UHSCP), yang mampu menghasilkan kekuatan tinggi dengan dimensi struktur yang lebih ramping dan efisien [1].

Silica fume (SF) merupakan salah satu bahan pozzolanik yang banyak digunakan untuk meningkatkan kinerja material berbasis semen[2]. Ukuran partikelnya yang sangat halus serta kandungan silika amorf yang tinggi memungkinkan SF meningkatkan kuat tekan melalui efek pengisian (*filler effect*) dan reaksi pozzolanik yang menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan [3]. Pembentukan C-S-H tersebut berkontribusi terhadap penurunan

porositas, peningkatan densitas matriks, serta perbaikan sifat mekanik pasta semen[4]. Namun, penggunaan SF yang berlebihan dapat menurunkan kelecakan campuran, meningkatkan aglomerasi partikel, dan menyebabkan penurunan kinerja mekanik akibat meningkatnya kegetasan material [5]. Beberapa penelitian melaporkan bahwa kadar SF optimum umumnya berada pada rentang 10-15%.

Selain komposisi campuran, metode perawatan juga berpengaruh terhadap perkembangan kuat tekan pasta semen. Perlakuan panas (*sintering*) diketahui dapat mempercepat proses hidrasi dan meningkatkan densifikasi matriks sehingga menghasilkan kuat tekan awal yang lebih tinggi[6]. Akan tetapi, paparan suhu tinggi juga berpotensi menimbulkan tegangan termal dan cacat mikrostruktur yang dapat menurunkan kinerja jangka panjang material. Meskipun penelitian mengenai



pengaruh silica fume dan perlakuan termal telah banyak dilakukan, kajian mengenai interaksi keduanya pada sistem UHSCP masih relatif terbatas [7].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi kadar *silica fume* (SF) terhadap kuat tekan *Ultra-High Strength Cement Paste* (UHSCP) melalui dua metode perawatan yang berbeda, yaitu perlakuan panas (*sintering*) dan perawatan standar (*curing*). Melalui pengujian eksperimental ini, batasan optimal substitusi semen oleh partikel ultra-halus SF dipetakan secara terukur untuk menghindari aglomerasi partikel serta penurunan kekuatan mekanis akibat kelebihan dosis bahan pengikat aktif.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjelaskan korelasi antara optimasi desain campuran mineral dan rekayasa termal pada metode perawatan terhadap performa mekanis pasta semen. Dengan menganalisis parameter mikrostruktur—terutama pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) sekunder serta mitigasi risiko retak mikro akibat perbedaan ekspansi termal (*thermal expansion mismatch*)—studi ini diharapkan memberikan kontribusi teoritis baru dalam perancangan material semen berkinerja ekstrem untuk aplikasi infrastruktur modern.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Ultra-High Strength Cement Pastes (UHSCP)

Ultra-High Strength Cement Pastes (UHSCP) merupakan material berbasis semen canggih yang dirancang untuk performa mekanis ekstrem melalui optimasi densitas pengepakan partikel pada skala mikroskopis [5]. Berbeda dengan beton konvensional, UHSCP hanya berfokus pada fase pasta semen tanpa agregat kasar untuk mengeliminasi kelemahan struktural pada *interfacial transition zone* (ITZ), sehingga membentuk struktur yang lebih homogen dan meminimalisir jalur permeabilitas serta retak mikro awal (Dargahi & Sorelli, 2025; Alharthai et al., 2024). Kunci utama pencapaian kepadatan ekstrem ini terletak pada pemanfaatan *silica fume* (SF) ultra-halus, yang secara fisik berfungsi sebagai pengisi (*filler effect*) untuk mengurangi porositas makro, dan secara kimiawi bereaksi dengan Ca(OH)_2 membentuk gel C-S-H tambahan yang lebih padat dan kokoh [8].

UHSCP dicirikan oleh rasio air-binder (w/b) yang sangat rendah (<0,30) untuk memastikan keterikatan antar-partikel maksimal, dengan kuat tekan mencapai di atas 120-140 MPa [4]. Namun, keseimbangan campuran sangat krusial karena penggunaan SF berlebihan tanpa penyesuaian air atau *superplasticizer* dapat menyebabkan aglomerasi partikel yang menurunkan



kekuatan target [5]. Kombinasi mineral tambahan yang tepat dan perlakuan termal seperti *sintering* dapat mempercepat polimerisasi gel C-S-H, menghasilkan material yang tidak hanya kuat tetapi juga tahan terhadap degradasi lingkungan seperti serangan sulfat [9].

Heat Curing/ Sintering

Mekanisme Perlakuan Panas (*Heat Curing*) dan Sintering pada pasta semen mutu tinggi berfungsi sebagai katalisator termal yang secara drastis mempercepat reaksi hidrasi awal dan polimerisasi gel Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H). Pemberian energi termal pada rentang suhu ini memfasilitasi transformasi fase mikroskopis ke arah struktur yang lebih stabil dan meningkatkan derajat hidrasi semen secara signifikan, yang dalam kondisi normal membutuhkan waktu jauh lebih lama. Melalui proses ini, interaksi antara semen dan material pozzolanik seperti *silica fume* dioptimalkan untuk menghasilkan matriks yang lebih kompak dengan densitas pengepakan yang tinggi [4].

Metode Taghuchi

Metode Taguchi merupakan teknik desain eksperimen (*Design of Experiments* - DoE) yang dirancang secara sistematis untuk mengoptimalkan produk atau proses dengan efisiensi tinggi, berfokus pada peningkatan kualitas melalui pendekatan statistik yang meminimalkan variasi hasil. Karakteristik

uniknya terletak pada penggunaan *Orthogonal Array* (OA), yaitu matriks desain seimbang yang memungkinkan pengujian berbagai faktor dan level dengan jumlah percobaan jauh lebih sedikit dibandingkan metode faktorial penuh. Tahapan metode ini meliputi penentuan faktor dan level, pemilihan OA yang sesuai, pelaksanaan eksperimen, analisis rasio *Signal-to-Noise* (S/N) dan ANOVA, serta diakhiri dengan eksperimen konfirmasi untuk memvalidasi kombinasi parameter optimal yang diprediksi [7].

3. METODE

Penelitian ini dilakukan hanya pada Laboratorium Bahan Politeknik Negeri Malang. Bahan utama yang peneliti adalah *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai bahan pengikat utama, *silica fume* (SF) sebagai material pozzolanik, air sebagai media hidrasi, serta superplasticizer berbasis Polycarboxylate Ether (PCE) untuk meningkatkan *workability* pada rasio air-pengikat yang rendah. Variasi kadar SF yang digunakan dalam penelitian ini adalah 10%, 11%, 12%, 13%, 14%, dan 15% terhadap berat semen, dengan rasio air-pengikat (*water-to-binder ratio*) yang dijaga konstan sebesar 0,30 pada seluruh campuran untuk menjaga keseimbangan kebutuhan air dengan menghasilkan kuat tekan yang tinggi sesuai

yang direncanakan. Berikut merupakan bahan utama yang digunakan oleh peneliti:



Gambar 1. Material Komposisi Benda Uji, (a) Semen, (b) Silica Fume (c) Superplasticizer
Sumber: Hasil Pengujian

Pasta semen diproduksi melalui pencampuran kering PCC dan SF hingga diperoleh campuran yang homogen dan terdistribusi secara merata. Secara terpisah, air dicampurkan dengan superplasticizer untuk membentuk larutan yang kemudian ditambahkan secara bertahap ke dalam campuran PCC-SF sambil dilakukan pengadukan secara kontinu hingga seluruh material tercampur secara merata. Pasta yang telah homogen selanjutnya dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran $50 \times 50 \times 50$ mm dan dipadatkan menggunakan getaran mekanis untuk mengurangi terbentuknya rongga udara serta menghasilkan matriks pasta semen yang lebih padat dan seragam. Proses pemadatan dilakukan secara hati-hati untuk memastikan pasta mengisi seluruh bagian cetakan secara optimal dan meminimalkan kemungkinan terbentuknya cacat pada benda uji. Dokumentasi tahapan pembuatan dan pencetakan benda uji selama penelitian disajikan pada bagian berikut:



Gambar 2. Hasil Cetak Benda Uji
Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 3. Benda Uji setelah Lepas Cetakan
Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 4. Proses Curing Benda Uji
Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 5. Proses Sintering Benda Uji
Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 6. Benda Uji setelah Proses Perawatan

Sumber: Hasil Pengujian

Setelah proses pencetakan selesai, benda uji diberikan empat metode perawatan yang berbeda untuk mengevaluasi pengaruh kondisi termal dan kelembapan terhadap perkembangan sifat mekanis pasta semen, yaitu sintering dengan curing (A), sintering tanpa curing (B), non-sintering dengan curing (C), dan non-sintering tanpa curing (D). Perlakuan sintering dilakukan menggunakan oven laboratorium pada suhu $80 \pm 5^\circ\text{C}$ selama 24 jam untuk mempercepat proses hidrasi dan perkembangan awal produk hidrasi dalam matriks semen. Sementara itu, benda uji pada kondisi curing direndam dalam air selama 24 jam setelah proses pelepasan cetakan (*demolding*) untuk mempertahankan ketersediaan air yang diperlukan selama proses hidrasi. Pada metode A, benda uji terlebih dahulu memperoleh perlakuan sintering dan kemudian dilanjutkan dengan proses curing, sedangkan metode B hanya diberikan perlakuan sintering tanpa perendaman lanjutan. Metode C

menggunakan curing tanpa perlakuan sintering, sementara metode D tidak memperoleh perlakuan sintering maupun curing. Perbedaan kondisi perawatan tersebut diterapkan untuk membandingkan pengaruh kombinasi perlakuan termal dan ketersediaan kelembapan terhadap perkembangan kuat tekan serta respons mekanis pasta semen UHSCP pada berbagai kadar silica fume.



Gambar 7. Pengujian Benda Uji

Sumber: Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 21 hari menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan pasta semen pada setiap kondisi perawatan dan variasi kadar silica fume. Nilai kuat tekan ditentukan berdasarkan perbandingan antara beban maksimum yang mampu ditahan oleh benda uji dan luas penampang pembebanan. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban secara bertahap hingga benda uji mengalami keruntuhan dan diperoleh nilai beban maksimum. Data hasil pengujian



selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan metode regresi untuk mengevaluasi hubungan antara variasi komposisi campuran dan kuat tekan, mengidentifikasi kecenderungan perkembangan kekuatan, serta menentukan kadar silica fume yang menghasilkan kuat tekan optimum pada masing-masing metode perawatan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancangan campuran untuk pembuatan *Ultra-High Strength Cement Paste* (UHSCP) dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. yang mencakup detail berat semen, kadar *silica fume* (SF) dengan variasi substitusidari 10%-15%, FAS, serta dosis *superplasticizer* untuk menjaga kelecakannya.

Tabel.1 Mix Design UHSCP

Nama Variasi	PCC (%)	SF (%)	W (%)	SP (%)
RUN 1	79	10	22	0,6
RUN 2	71	11	20	0,8
RUN 3	64	12	18	0,9
RUN 4	78	13	24	1,2
RUN 5	78	14	24	1
RUN 6	78	15	24	1,5

Sumber: Hasil Pengujian

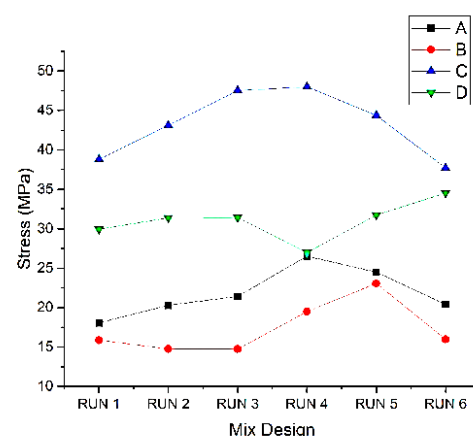
Dari tabel mix design diatas, pada setiap variasi campuran dibagi ke dalam empat kondisi perawatan, yaitu A (*sintering + curing*), B (*sintering + non-curing*), C (*non-sintering + curing*), dan D (*non-sintering + non-curing*). Pembagian ini dilakukan untuk

melihat pengaruh kadar SF sekaligus membandingkan respons pasta semen terhadap kondisi perawatan yang berbeda. Berdasarkan hasil pengujian, urutan performa kuat tekan secara umum adalah perawatan C (*non-sintering + curing*), diikuti perawatan A (*sintering + curing*), D (*non-sintering + non-curing*), dan B (*sintering + non-curing*). Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketersediaan kelembapan selama curing memberikan kontribusi penting terhadap perkembangan kuat tekan, sedangkan sintering tanpa curing belum mampu memberikan hasil yang optimal.

Tabel.1 Mix Design UHSCP

PCC	A	B	C	D
RUN 1	18,07	15,88	38,79	29,94
RUN 2	20,28	14,75	43,11	31,37
RUN 3	21,43	14,74	47,52	31,43
RUN 4	26,51	19,49	48,00	26,96
RUN 5	24,51	23,07	44,35	31,75
RUN 6	20,40	15,97	37,69	34,54

Sumber: Hasil Pengujian



Gambar 8. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Benda Uji

Sumber: Hasil Pengujian



Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi kadar *silica fume* (SF) dan metode perawatan memberikan pengaruh terhadap kuat tekan UHSCP. Pada perawatan A (*sintering* + *curing*), kuat tekan meningkat dari 18,07 MPa pada SF 10% menjadi 20,28 MPa pada SF 11%, 21,43 MPa pada SF 12%, dan mencapai nilai maksimum 26,51 MPa pada SF 13%. Setelah itu, kuat tekan menurun menjadi 24,51 MPa pada SF 14% dan 20,40 MPa pada SF 15%. Pola tersebut menunjukkan bahwa kadar SF 13% memberikan komposisi yang paling sesuai pada metode ini.. Penurunan pada kadar SF yang lebih tinggi diduga berkaitan dengan meningkatnya jumlah partikel SF yang tidak terdispersi secara optimal serta berkurangnya proporsi semen sebagai sumber utama produk hidrasi.

Pada perawatan B (*sintering* + *non-curing*), kuat tekan yang diperoleh relatif lebih rendah dibandingkan metode lainnya. Nilai kuat tekan tercatat sebesar 15,88 MPa pada SF 10%, 14,75 MPa pada SF 11%, 14,74 MPa pada SF 12%, kemudian meningkat menjadi 19,49 MPa pada SF 13%, 23,07 MPa pada SF 14%, dan kembali menurun menjadi 15,97 MPa pada SF 15%. Nilai tertinggi sebesar 23,07 MPa diperoleh pada SF 14%. Kondisi ini menunjukkan bahwa *sintering* tanpa *curing* belum memberikan kondisi yang cukup untuk mempertahankan proses hidrasi setelah perlakuan panas. Pemanasan pada 80

± 5°C dapat mempercepat perkembangan kekuatan pada tahap awal, tetapi tanpa suplai air tambahan, ketersediaan air untuk hidrasi lanjutan menjadi terbatas. Oleh karena itu, peningkatan kadar SF tidak secara konsisten menghasilkan peningkatan kuat tekan pada metode perawatan ini.

Performa tertinggi diperoleh pada perawatan C (*non-sintering* + *curing*). Kuat tekan meningkat dari 42,02 MPa pada SF 10% menjadi 47,52 MPa pada SF 12%, dengan nilai maksimum 47,52 MPa, kemudian menurun menjadi 36,00 MPa pada SF 13%, sebelum meningkat kembali menjadi 44,35 MPa pada SF 14% dan menurun menjadi 37,69 MPa pada SF 15%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kondisi *curing* tanpa *sintering* mampu menghasilkan perkembangan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan metode lainnya. Ketersediaan air selama *curing* memberikan kondisi yang lebih mendukung bagi berlangsungnya hidrasi semen dan reaksi pozzolanik SF. Selain itu, tidak adanya perlakuan termal mengurangi kemungkinan terjadinya perubahan volume dan tegangan internal akibat pemanasan. Dengan demikian, pada penelitian ini kombinasi *non-sintering* + *curing* memberikan kondisi perawatan paling menguntungkan, dengan kuat tekan maksimum 47,52 MPa pada kadar SF 12%.

Pada perawatan D (*non-sintering* + *non-curing*), kuat tekan menunjukkan

kecenderungan meningkat seiring bertambahnya kadar SF. Nilai yang diperoleh adalah 29,94 MPa pada SF 10%, 31,37 MPa pada SF 11%, 31,43 MPa pada SF 12%, 26,96 MPa pada SF 13%, 31,75 MPa pada SF 14%, dan mencapai nilai tertinggi 34,54 MPa pada SF 15%. Berbeda dengan perawatan A dan C yang menunjukkan penurunan pada kadar SF tertentu, metode D tidak memperlihatkan pola optimum yang sama. Meskipun tidak memperoleh suplai air dari proses curing, kondisi tanpa sintering memungkinkan campuran terhindar dari pengaruh termal sehingga perkembangan struktur pasta berlangsung secara lebih bertahap. Peningkatan kuat tekan pada SF 15% menunjukkan bahwa pada kondisi perawatan ini kontribusi pengisian partikel halus SF masih dapat memberikan pengaruh terhadap kepadatan matriks.



Gambar 9. Retakan banda uji setelah pengujian kuat tekan

Sumber: Hasil Pengujian

Secara keseluruhan, hasil pengujian memperlihatkan bahwa perawatan C (*non-sintering* + *curing*) menghasilkan performa tertinggi, dengan kuat tekan maksimum 47,52 MPa pada SF 12%, diikuti perawatan A dengan 26,51 MPa pada SF 13%, perawatan D dengan 34,54 MPa pada SF 15%, dan perawatan B dengan 23,07 MPa pada SF 14%. Jika dibandingkan berdasarkan nilai maksimum, perawatan C menghasilkan kuat tekan sekitar 79,3% lebih tinggi dibandingkan A, 106,0% lebih tinggi dibandingkan D, dan 106,0% lebih tinggi dibandingkan B. Hasil ini memperlihatkan bahwa pengaruh metode perawatan cukup dominan terhadap perkembangan kuat tekan UHSCP. Curing memberikan kondisi kelembapan yang mendukung keberlanjutan hidrasi, sedangkan sintering tanpa curing cenderung membatasi perkembangan hidrasi setelah perlakuan panas. Dengan demikian, kadar SF optimum tidak bersifat mutlak untuk seluruh metode perawatan, tetapi dipengaruhi oleh kondisi perawatan yang diterapkan pada pasta semen.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, variasi kadar *silica fume* (SF) dan metode perawatan memberikan pengaruh terhadap kuat tekan UHSCP. Penambahan SF meningkatkan kuat tekan melalui *filler effect* dan reaksi



pozzolanik yang menghasilkan tambahan gel C-S-H. Kinerja optimum berbeda pada setiap metode perawatan, yaitu SF 13% pada Perawatan A (26,51 MPa), SF 14% pada Perawatan B (23,07 MPa), SF 13% pada Perawatan C (48,00 MPa), dan SF 15% pada Perawatan D (34,54 MPa).

Perawatan C (*non-sintering* + *curing*) menunjukkan kinerja terbaik dengan kuat tekan maksimum 48,00 MPa pada SF 13% pada umur 28 hari. Kondisi curing mendukung keberlanjutan hidrasi dan reaksi pozzolanik sehingga menghasilkan matriks pasta yang lebih stabil. Sebaliknya, sintering pada $80 \pm 5^\circ\text{C}$ dapat mempercepat perkembangan kekuatan awal, tetapi berpotensi menyebabkan perubahan mikrostruktur dan penurunan kuat tekan pada umur lanjut.

Secara keseluruhan, SF 13% dengan Perawatan C merupakan kombinasi paling optimal dalam penelitian ini. Kondisi

tersebut menghasilkan kuat tekan lebih dari 45 MPa dengan regangan puncak sebesar 0,02066. Penggunaan SF pada kadar yang lebih tinggi tidak selalu meningkatkan kuat tekan karena kelebihan SF dapat menyebabkan aglomerasi dan mengurangi efektivitas hidrasi semen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Jiang, Y. Xie, J. Wu, and G. Long, "Influence of age on the detection of defects at the bonding interface in the CRTS III slab ballastless track structure via the impact-echo method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, p. 120787, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120787.
- [2] F. Nugroho and H. F. Azman, "PENGARUH PENAMBAHAN SILIKA FUME TERHADAP KUAT," vol. 2, no. 1, pp. 9-16, 2024.
- [3] I. Ahmed *et al.*, "Developments in the Built Environment Optimisation of mechanical properties and impact resistance of basalt fibre reinforced concrete containing silica fume: Experimental and response surface assessment," *Dev. Built Environ.*, vol. 17, no. November 2023, p. 100368, 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100368.
- [4] M. Dargahi and L. Sorelli, "Experimental investigation of hygro-thermo-fracture couplings in cement paste with mineral fillers via micro-scale splitting tests," *Constr. Build. Mater.*, vol. 502, no. October, p. 144362, 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144362.
- [5] T. Luo *et al.*, "Case Studies in Construction Materials The effect of micro silica fume (MSF) content on pore fractal dimension (PFD) and mechanical properties of self-consolidating concrete," vol. 21, no.



- December, pp. 1-20, 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e04065.
- [6] T. Lange, D. Axthammer, D. Jansen, and T. Gädt, “Thermochimica Acta In-situ isothermal calorimetry of cement pastes – Unraveling mixer effects , viscous heat dissipation , and heat of hydration,” *Thermochim. Acta*, vol. 754, no. July, p. 180089, 2025, doi: 10.1016/j.tca.2025.180089.
- [7] R. F. Hilmi, “Optimasi Desain Cmpuran Beton Berkinerja Tinggi (HPC),” 2025.
- [8] N. Binte, R. Mutsuddy, and S. Rakibul, “Case Studies in Construction Materials Synergistic impact of supplementary cementitious materials (silica fume and fly ash) and nylon fiber on properties of recycled brick aggregate concrete,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, no. January, p. e04484, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04484.
- [9] R. Wang, Y. Liu, Y. Li, and X. Zhuang, “Case Studies in Construction Materials Performance degradation mechanism and strength prediction of silica fume concrete under sulfate dry - wet cycles,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 23, no. June, p. e05163, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05163.