

## **Systematic Literature Review: Peranan *Fly ash*, Silika, dan Slag Sebagai Bahan Tambahan dalam Meningkatkan Kekuatan Tekan Dini Beton**

Alvin Alfredo Bara\*

Universitas Nusa Cendana, Kupang, Indonesia

[alvin\\_bara@staf.undana.ac.id](mailto:alvin_bara@staf.undana.ac.id)\*

| Received: 24/06/2025 | Revised: 27/06/2025 | Accepted: 28/06/2025 |

Copyright©2025 by authors, all rights reserved. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

### **Abstrak**

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara sistematis peranan bahan tambahan mineral berupa *Fly ash*, silika (*silica fume* dan *nano-silika*), serta Slag (GGBFS) dalam meningkatkan kekuatan tekan dini beton pada umur 1 hingga 7 hari. Untuk mencapai tujuan tersebut, studi ini menerapkan metode *Systematic Literature Review* (SLR) terhadap tujuh artikel ilmiah internasional terpilih yang diterbitkan antara tahun 2023 hingga 2025. Analisis dilakukan terhadap jenis bahan tambahan, proporsi campuran, ukuran partikel, jenis aktivator, metode curing, serta hasil uji kuat tekan pada umur awal. Hasil kajian menunjukkan bahwa *Fly ash* memiliki potensi sebagai bahan tambahan ramah lingkungan, namun reaktivitas awalnya rendah dan membutuhkan aktivator atau kombinasi bahan lain untuk menghasilkan kekuatan tekan yang memadai. Silika fume terbukti efektif dalam mempercepat hidrasi dan meningkatkan pembentukan gel C-S-H, yang memperkuat struktur mikro beton pada usia dini. Slag memberikan kontribusi sinergis melalui pembentukan gel C-A-S-H, dan hasil terbaik dicapai ketika Slag dikombinasikan dengan *Fly ash* dan silika. Kombinasi optimal ketiga bahan tersebut mampu menghasilkan kekuatan tekan lebih dari 20 MPa dalam 1 hari dan di atas 40 MPa dalam 7 hari tanpa perlakuan panas. Studi ini menyimpulkan bahwa formulasi bahan tambahan mineral secara terstruktur dapat meningkatkan efisiensi waktu pelaksanaan, mempercepat pengerasan beton, dan mendukung praktik konstruksi berkelanjutan. Penelitian lanjutan disarankan dilakukan pada skala industri nyata serta eksplorasi bahan lokal alternatif dan pengembangan model prediktif berbasis data eksperimental.

Kata kunci: beton, *Fly ash*, silika, Slag, kekuatan tekan dini

### **Abstract**

*This study aims to systematically evaluate the role of mineral admixtures—Fly ash, silica (silica fume and nano-silica), and Slag (GGBFS)—in enhancing the early compressive strength of concrete within 1 to 7 days of curing. To achieve this objective, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted by analyzing seven selected international research articles published between 2023 and 2025. The review focused on admixture types, mix proportions, particle sizes, types of*

*activators, curing methods, and early-age compressive strength results. The findings reveal that while Fly ash is an environmentally friendly pozzolanic material, it exhibits low early reactivity and requires activation or combination with more reactive components to be effective. Silica fume, particularly in ultra-fine form, significantly accelerates hydration and enhances C-S-H gel formation, improving the early microstructure of concrete. Slag contributes synergistically by forming C-A-S-H gel, and the best early-strength results are obtained when it is combined with Fly ash and silica. The optimal blend of these three materials can achieve compressive strength above 20 MPa in 1 day and over 40 MPa in 7 days without thermal curing. The study concludes that structured use of mineral admixtures can accelerate concrete hardening, improve construction efficiency, and support sustainable building practices. Further research is recommended at industrial scale, including exploration of locally sourced alternatives and development of data-driven predictive models*

*Keywords: concrete, Fly ash, silica, Slag, early compressive strength*

## 1. Pendahuluan

Beton adalah salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan sepanjang sejarah dan tetap menjadi pilihan utama di berbagai belahan dunia. Beton, sebagai material konstruksi, merupakan komposit yang terbentuk dari pencampuran semen Portland, air, dan agregat seperti pasir dan kerikil, serta dapat diperkaya dengan berbagai bahan tambahan seperti aditif mineral, kimia, dan serat (Shi et al., 2024). Komposisi bahan penyusunnya memberikan berbagai keunggulan, antara lain kemudahan dalam memperoleh material utama, fleksibilitas tinggi pada kondisi segar yang memungkinkan pembentukan sesuai cetakan, serta kekuatan tekan yang sangat tinggi hingga mencapai 300 MPa. Selain itu, sifat tarik dan lentur beton dapat meningkat secara signifikan apabila dikombinasikan dengan tulangan baja dan serat logam (Janamian & Aguiar, 2023). Diperkirakan, konsumsi beton mencapai sekitar 25 miliar ton setiap tahunnya di seluruh dunia (Klee, 2009).

Seiring dengan perkembangan dunia konstruksi yang berkembang pesat, kebutuhan beton tidak hanya merujuk pada kuantitas dan kualitas namun juga pada waktu. Pada masa sekarang, kebutuhan akan kecepatan pelaksanaan dan pembongkaran bekisting meningkat tajam karena berdampak pada biaya produksi seperti pada industri konstruksi pracetak dan proyek perbaikan struktur. Hal ini mengharuskan kemampuan beton untuk mencapai kekuatan tekan tinggi dalam waktu singkat karena sangat menentukan efisiensi waktu dan biaya pembangunan (Jiang et al., 2023). Oleh karena itu, upaya untuk mempercepat pengembangan kekuatan tekan dini menjadi fokus penting dalam inovasi material beton.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan kekuatan tekan dini beton, antara lain curing termal, penggunaan semen khusus seperti sulfoaluminat, dan penambahan akselerator kimia. Namun, pendekatan-pendekatan ini sering kali tidak ramah lingkungan atau membutuhkan biaya tinggi. Sebagai alternatif, penggunaan bahan tambahan mineral seperti *Fly ash*, silika (baik silika fume maupun nano-silika), dan *Slag (Ground Granulated Blast Furnace Slag/GGBFS)* menjadi strategi yang menarik. Bahan-bahan ini tidak hanya berpotensi meningkatkan kekuatan tekan dini, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan karena

sebagian besar berasal dari limbah industri atau pertanian, sehingga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular (Das et al., 2023).

*Fly ash*, silika fume, dan *Slag* merupakan tiga bahan tambahan mineral yang memainkan peranan penting dalam meningkatkan kekuatan tekan dini beton. *Fly ash*, sebagai bahan pozolan hasil samping pembakaran batu bara, umumnya memiliki reaktivitas rendah pada awal umur beton, namun performanya dapat ditingkatkan melalui penggilingan halus, aktivator kimia, atau kombinasi dengan bahan reaktif lain. Silika fume dan nano-silika, yang terdiri dari partikel amorf berukuran ultra-halus, sangat efektif dalam mempercepat hidrasi, memperkuat pembentukan gel C-S-H, serta mengisi rongga mikro pada pasta semen, yang secara signifikan meningkatkan kekuatan dini beton. Sementara itu, *Slag* atau GGBFS berperan dalam memperkuat sistem reaksi kimia dan memberikan kontribusi sinergis terhadap penguatan dini ketika dikombinasikan dengan *Fly ash* dan silika. Ketiga bahan ini, apabila diformulasikan dengan tepat, tidak hanya mempercepat pengerasan dan penguatan beton pada usia muda, tetapi juga mendukung keberlanjutan konstruksi melalui pemanfaatan limbah industri sebagai sumber daya yang bernilai.

Meski potensinya besar, masih terdapat tantangan dan celah penelitian dalam menentukan kombinasi dan proporsi optimal dari bahan tambahan tersebut. Hal ini menjadi semakin kompleks karena karakteristik bahan yang bervariasi, serta interaksi kimia yang berbeda-beda tergantung pada kondisi pencampuran dan aktivasi. Selain itu, sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga masih minim data terkait efektivitas bahan-bahan ini dalam skala industri nyata. Terdapat pula keterbatasan pemahaman mengenai interaksi kimia multikomponen antara *Fly ash*, silika, *Slag*, dan semen, terutama dalam sistem berbasis aktivasi alkali.

Untuk menjawab tantangan tersebut, penelitian ini dilakukan melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), dengan tujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara sistematis hasil-hasil penelitian ilmiah terkini mengenai penggunaan *Fly ash*, silika, dan *Slag* dalam meningkatkan kekuatan tekan dini beton. SLR dipilih karena memiliki keunggulan dalam menyusun peta pengetahuan yang komprehensif dan objektif, serta mampu meminimalkan bias subjektif dalam penilaian literatur.

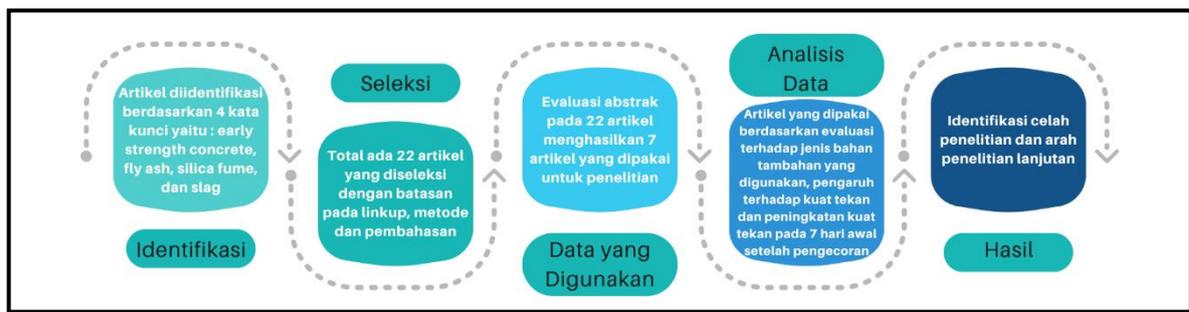
## **2. Metodologi Penelitian**

Penelitian ini menerapkan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan fokus pada pertanyaan: “Bagaimana kontribusi *Fly ash*, silika fume, dan *Slag* terhadap kekuatan tekan dini beton dalam 1 hingga 7 hari pertama?”. Untuk menjawabnya, literatur ilmiah dicari melalui database Scopus dengan kata kunci “early strength concrete” yang dipadukan dengan “*Fly ash*”, “silica fume”, dan “*Slag*”, serta dibatasi pada publikasi berbahasa Inggris dari tahun 2023 hingga 2025.

Kriteria inklusi menetapkan bahwa artikel harus memuat informasi tentang penggunaan salah satu atau lebih bahan tambahan tersebut dan menyajikan data eksperimen mengenai kekuatan tekan dini beton minimal pada usia 1–7 hari. Setelah penyaringan awal berdasarkan judul dan abstrak, analisis konten penuh dilakukan untuk menilai kesesuaian metodologi dan hasil penelitian.

Proses ekstraksi data dilakukan untuk mengumpulkan informasi mengenai jenis bahan tambahan, ukuran partikel, proporsi dalam campuran, jenis aktivator, metode perawatan, umur pengujian, dan nilai kekuatan tekan yang dicapai. Data dianalisis secara tematik dengan mengelompokkan studi berdasarkan jenis bahan dan performa kekuatan pada umur tertentu. Perbandingan kuantitatif dilakukan secara deskriptif melalui tabulasi untuk menunjukkan tren efektivitas setiap bahan dan kombinasi dalam meningkatkan kekuatan dini beton.

Melalui pendekatan SLR ini, diharapkan dapat diperoleh pemahaman menyeluruh tentang peran dan efektivitas *Fly ash*, silika fume, dan *Slag* dalam meningkatkan kekuatan tekan dini beton, serta membuka peluang untuk pengembangan material beton yang lebih efisien dan berkelanjutan. Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian, yaitu identifikasi, seleksi, analisis data, dan hasil.



Gambar 1. Proses SLR

### 3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis sistematis terhadap tujuh jurnal yang relevan, diperoleh informasi mengenai kekuatan tekan beton pada umur 1, 3, dan 7 hari yang dihasilkan dari penggunaan berbagai bahan tambahan seperti *Fly ash*, silika fume, dan *Slag*, baik secara terpisah maupun dalam kombinasi. Tabel 1 menunjukkan bahwa penggunaan *Fly ash*, silika fume, dan *Slag* secara signifikan dapat mempercepat pengembangan kekuatan tekan dini beton, baik secara individual maupun dalam kombinasi yang sinergis. Kajian ini juga mengungkapkan mekanisme reaksi, konfigurasi mikrostruktur, serta hasil kekuatan tekan aktual dalam rentang umur beton 1 hingga 7 hari, yang sangat penting untuk aplikasi beton pracetak dan perbaikan cepat.

#### 3.1. *Fly ash*

*Fly ash* (FA), terutama kelas F dan C, merupakan bahan pozolan yang umum digunakan dalam campuran beton untuk tujuan keberlanjutan. Namun, FA secara alami memiliki tingkat reaktivitas awal yang rendah karena kandungan kalsiumnya yang terbatas. Hal ini menyebabkan keterlambatan dalam perkembangan kekuatan tekan dini beton. Studi oleh Ordillas et al., (2025) menunjukkan bahwa beton dengan 40% *Fly ash* memerlukan intervensi aditif seperti gypsum dan akselerator berbasis komersial untuk mencapai kekuatan lebih dari 24 MPa dalam 24 jam, yang menjadi syarat minimum untuk pelepasan bekisting pada pracetak ringan.

Lebih lanjut, Das et al., (2023) memperkenalkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan melalui penggunaan C-S-H seed dari abu bagasse, yang secara signifikan menurunkan waktu ikat awal dan mempercepat pembentukan mikrostruktur semen-*Fly ash*.

Pendekatan ini tidak hanya mempercepat reaksi pozolan, tetapi juga meningkatkan densitas gel C-S-H di umur 1–3 hari. Namun, seperti ditunjukkan dalam penelitian Ordillas et al., (2025), ketika FA digunakan dalam volume sangat tinggi ( $\geq 50\%$ ), kekuatan tekan 1 hari bisa sangat terbatas ( $< 10$  MPa) tanpa modifikasi formulasi yang tepat.

Studi Lin et al., (2025) juga mempertegas bahwa pemilihan rasio massa *Slag/Fly ash* serta dosis aktivator sangat menentukan performa awal geopolymer berbasis *Fly ash*. Mereka mencatat bahwa beton dengan rasio *Slag/Fly ash* sebesar 4:1 mampu mencapai  $> 20$  MPa dalam 3 hari, khususnya ketika dikombinasikan dengan aktivator berbasis silika fume dan suhu curing yang dikontrol.

### 3. 2. Silika Fume

Silika fume (SF), baik dalam bentuk biasa maupun *ultra-fine*, memainkan peran ganda dalam meningkatkan kekuatan dini melalui efek *filler* dan efek *seeding*. Ukurannya yang sangat halus ( $< 1 \mu\text{m}$ ) memungkinkan pengisian pori mikro pada pasta semen dan pembentukan pusat nukleasi bagi gel C-S-H dan N-A-S-H. Studi oleh Wang et al., (2024) menemukan bahwa penambahan silika fume sebanyak 20% dalam mortar geopolymer menghasilkan kekuatan tekan 3 hari sebesar 36 MPa dan 7 hari sebesar 45 MPa, yang secara signifikan melebihi campuran tanpa SF. Efek ini diperkuat oleh hasil SEM dan XRD yang menunjukkan pembentukan fasa gel kompleks, seperti C-A-S-H dan N-A-S-H, yang memperkuat mikrostruktur beton.

Kandungan silika tinggi juga meningkatkan rasio  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  dalam sistem geopolymer, mempercepat reaksi polikondensasi dan meningkatkan ketahanan struktur gel. Temuan Das et al., (2023) mengonfirmasi bahwa partikel silika sangat reaktif dan dapat mempercepat hidrasi pada pasta semen-*Fly ash*, menghasilkan beton yang cepat mengeras dan memiliki *setting time* yang lebih pendek dari standar konvensional. Selain itu, kombinasi antara silika fume dan *Slag* menunjukkan efek sinergis. Penelitian Shamanth Gowda & Ranganath (2023) menunjukkan bahwa beton dengan kombinasi *ultra-fine silica* dan *ultra-fine Slag* mampu mencapai hampir 40% dari kekuatan akhir hanya dalam 1 hari, menjadikannya ideal untuk konstruksi instan seperti jalur cepat atau bangunan modular.

### 3. 3. Slag (GGBFS)

*Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) memiliki potensi hidrolis dan pozolan yang tinggi. Keunggulannya utamanya adalah kemampuannya bereaksi cepat bahkan pada suhu ruang, khususnya bila dikombinasikan dengan *Fly ash* atau silika. Singh et al., (2023) menunjukkan bahwa beton geopolymer berbasis 35% *Fly ash*, 50% *Slag*, dan 15% silika fume mampu mencapai kekuatan tekan 7 hari hingga 33,3 MPa, yang ideal untuk pelepasan awal elemen pracetak berat.

Di sisi lain, Wang et al., (2024) menunjukkan bahwa *Slag* memperkaya fase reaksi dengan membentuk gel C-A-S-H padat dalam sistem *Fly ash*-silika. Efek ini memperkecil ukuran pori, mengurangi porositas total, dan meningkatkan kohesi internal, sebagaimana dibuktikan melalui analisis SEM dan MIP. Kombinasi *Slag* dan silika juga meningkatkan pengikatan partikel semen dan distribusi reaksi yang lebih merata.

Dalam konteks optimasi formulasi, Lin et al., (2025) menemukan bahwa *Slag* berperan dominan dalam memperbaiki waktu ikat dan mempercepat kekuatan dini beton, khususnya bila

dikombinasikan dengan dosis aktivator silika yang proporsional. Beton berbasis *Fly ash* dan *Slag* dengan aktivator berbasis SF mampu mencapai kekuatan tekan di atas 25 MPa dalam 3 hari tanpa perlakuan panas, menunjukkan potensi aplikatif tinggi di lapangan.

### 3. 4. Sinergi Tiga Komponen

Penggunaan gabungan *Fly ash*, silika fume, dan *Slag* terbukti memberikan hasil terbaik dalam penguatan dini beton. Elhag et al., (2025) menunjukkan bahwa penggantian 20% silika fume dengan MFA (*municipal solid waste Fly ash*) dalam sistem *self-compacting geopolymer concrete* menghasilkan kekuatan tekan 39 MPa dalam 7 hari, sekaligus memperbaiki workabilitas dan kemas partikel beton. Strategi pencampuran yang menggabungkan sifat filler silika, reaktivitas kimia *Slag*, dan kontribusi pozolan *Fly ash* memungkinkan pembentukan gel kompleks sejak jam-jam awal, mempercepat pengikatan dan pengembangan kekuatan. Hal ini juga sesuai dengan prinsip teori C-S-H dan geopolymerisasi, di mana ion kalsium, silikat, dan aluminat bekerja dalam satu sistem untuk mempercepat pembentukan jalinan gel berstruktur padat dan tahan beban.

## 4. Kesimpulan

Hasil *Systematic Literature Review* ini menunjukkan bahwa bahan tambahan mineral seperti *Fly ash*, silika fume, dan *Slag* berperan penting dalam mempercepat pengembangan kekuatan tekan dini beton. Ketiga bahan ini tidak hanya meningkatkan performa mekanik beton dalam 1 hingga 7 hari pertama, tetapi juga mendukung keberlanjutan konstruksi dengan memanfaatkan limbah industri dan mengurangi penggunaan semen Portland. *Fly ash*, meskipun reaktivitasnya rendah di awal, dapat menunjukkan kekuatan tekan yang baik jika dipadukan dengan akselerator atau bahan reaktif lainnya. Silika fume, terutama dalam bentuk ultra-halus, berfungsi sebagai pusat nukleasi hidrasi yang efektif dan memperkuat struktur mikro beton. *Slag* memperkaya reaksi awal melalui pembentukan gel C-A-S-H yang padat, meningkatkan kekuatan dan kepadatan beton sejak hari pertama.

Kombinasi ketiga bahan ini menghasilkan efek sinergis yang kuat. Beberapa studi dalam kajian ini melaporkan bahwa formulasi beton dengan *Fly ash*, silika, dan *Slag* dapat mencapai kekuatan tekan lebih dari 20 MPa dalam satu hari, dan lebih dari 40 MPa dalam tujuh hari tanpa perlakuan panas. Hal ini menjadikannya sangat potensial untuk aplikasi beton pracetak dan pekerjaan pemeliharaan infrastruktur. Selain performa teknis, kombinasi ini juga memberikan manfaat lingkungan yang signifikan, terutama dalam mengurangi emisi karbon dan mendaur ulang limbah industri.

Meskipun banyak studi telah membuktikan efektivitas ketiga bahan ini, masih terdapat celah penelitian yang perlu dieksplorasi lebih lanjut, terutama pengujian di lapangan. Sebagian besar penelitian masih berbasis laboratorium, yang tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi proyek nyata. Penelitian tentang pengaruh penggunaan *Fly ash*, *Slag*, dan silika dari sumber lokal terhadap kekuatan awal beton juga masih minim. Selain itu, interaksi antara ketiga bahan dalam sistem geopolymerisasi yang kompleks juga belum banyak diteliti.

Aspek lain yang kurang diteliti adalah pemanfaatan aktivator alternatif yang lebih ramah lingkungan dan biaya rendah. Aktivator berbasis silika fume menunjukkan potensi untuk menggantikan sodium silikat konvensional, namun belum banyak dikembangkan. Pengaruh

kondisi lingkungan eksternal terhadap performa beton dengan kombinasi ini juga belum diteliti secara mendalam.

Berdasarkan temuan tersebut, disarankan agar penelitian lanjutan dilakukan untuk menguji formulasi *Fly ash*-silika-Slag dalam skala proyek nyata. Eksplorasi bahan tambahan dari limbah lokal juga perlu diperluas untuk mendukung ekonomi sirkular. Pengembangan model prediktif berbasis data eksperimen dapat membantu memetakan hubungan antara komposisi campuran dan kekuatan tekan. Terakhir, pengembangan standar teknis atau panduan praktis mengenai proporsi optimal ketiga bahan ini untuk beton pengerasan cepat perlu didorong agar hasil riset dapat diadopsi secara luas dalam praktik konstruksi. Tabel 1. Ringkasan Hasil Analisa Penelitian tentang Peningkatan Kuat Tekan Dini Beton dengan Bahan Tambahan *Fly ash*, Silica fume, dan Slag

Ref	Jenis Bahan Tambahan	Jenis Sampel	Uji Yang Dilakukan	Waktu Pengujian yang Ditinjau	Kesimpulan
(Elhag et al., 2025)	Municipal solid waste incineration <i>Fly ash</i> (MFA)	Beton	Uji Kuat Tekan	7 hari	Penggantian 20% MFA mencapai kekuatan tekan 39 MPa dan kekuatan tarik sebesar 3,4 MPa setelah 7 hari, dengan peningkatan workabilitas yang ditunjukkan oleh perbaikan hasil aliran slump, V-funnel, dan L-box.
(Das et al., 2023)	<i>Fly ash</i> , Bagasse ash	Pasta <i>Fly ash</i> -semen	<i>Setting time</i>	240 menit	Kehadiran partikel kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang terdispersi secara eksternal memiliki efek percepatan yang signifikan terhadap setting time dan pengerasan campuran <i>Fly ash</i> -semen. Hal ini dibuktikan dengan berkurangnya <i>setting time</i> awal dan akhir, yang menunjukkan peningkatan kekuatan yang lebih awal pada beton.
(Shamanth Gowda & Ranganath, 2023)	Ultra-fine Slag, Ultra-fine Silica	Beton	Uji Kuat Tekan	7 hari	Peningkatan kekuatan dengan peningkatan kekuatan jangka panjang. Perbaikan dalam sifat mekanik yang diukur, terutama parameter kekuatan awal dalam waktu 7 hari, meningkat secara signifikan dengan adanya tambahan Ultra-fine Silica dalam kehadiran Ultra-fine Slag mengingat interaksi sinergis keduanya pada jumlah yang optimal, mencapai hampir 40% dari target kuat tekan dalam satu hari.

(Lin et al., 2025)	<i>Fly ash, Slag, Aktivator</i>	Beton	Uji Kuat Tekan	3 hari	Parameter yang memiliki dampak terbesar terhadap kekuatan tekan dan <i>setting time</i> geopolymer adalah rasio massa antara terak dan abu terbang serta dosis aktivator, diikuti oleh modulus aktivator dan suhu persiapan aktivator dengan kondisi optimal pada 3 hari di atas 20 MPa.
(Singh et al., 2023)	<i>Fly ash Kelas-F, Silica Fume, GGBFS</i>	Beton	Uji Kuat Tekan	7 hari	Kuat Tekan pada umur 7 hari telah mencapai 20,7-33,3 MPa dengan variasi bahan tambahan.
(Wang et al., 2024)	<i>Fly ash, Silica fume, Slag</i>	Mortar	Uji Kuat Tekan	3 hari	Kuat Tekan pada umur 3 hari telah mencapai 35 MPa dengan variasi bahan tambahan optimum.
(Ordillas et al., 2025)	<i>Fly ash</i>	Beton	Uji Kuat Tekan	1 hari	Kuat Tekan pada umur 1 hari telah mencapai lebih dari 21 MPa dengan variasi bahan tambahan.

### Daftar Pustaka

- Das, S., Ray, S., & Sarkar, S. (2023). Novel agricultural waste based hardening accelerator for early strength development of *Fly ash*-based concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.099>
- Elhag, A. B., Selmi, A., Ahmad, Z., & Ghazouani, N. (2025). Enhancing mechanical properties and microstructural integrity of silica fume-based self-compacting geopolymer concrete through municipal solid waste incineration *Fly ash* incorporation. *Materials Letters*, 392, 138541. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.138541>
- Janamian, K., & Aguiar, J. (2023). *Concrete materials and technology*. In *Concrete Materials and Technology*. <https://doi.org/10.1201/9781003384243>
- Jiang, B., Qian, Z., Gu, D., & Pan, J. (2023). Repair concrete structures with high-early-strength engineered cementitious composites (HES-ECC): Material design and interfacial behavior. *Journal of Building Engineering*, 68, 106060. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106060>
- Lin, M., Chen, G., Chen, Y., Han, D., Su, R., & Wu, J. (2025). Mechanical properties and microstructure of *Fly ash* and *Slag*-based geopolymer prepared by silica fume-based activator. *Journal of Cleaner Production*, 498, 145214. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145214>
- Ordillas, K. A., Gombeda, M. J., Mendonca, F., & Lallas, Z. N. (2025). Reassessing early-age strength development of high-volume *Fly ash* concretes for precast buildings. *Journal of Building Engineering*, 100, 111630. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111630>

- Shamanth Gowda, T., & Ranganath, R. V. (2023). High early strength–high performance concrete produced with combination of ultra-fine *Slag* and ultra-fine silica: Influence on fresh, mechanical, shrinkage and durability properties with microstructural investigation. *Construction and Building Materials*, 385, 131462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131462>
- Shi, C., Mo, Y. L., & Dhonde, H. B. (2024). Ultra-high performance concrete. In *High-Performance Construction Materials: Science and Applications*. [https://doi.org/10.1142/9789812797360\\_0002](https://doi.org/10.1142/9789812797360_0002)
- Singh, R. P., Vanapalli, K. R., Cheela, V. R. S., Peddireddy, S. R., Sharma, H. B., & Mohanty, B. (2023). *Fly ash*, GGBS, and silica fume based geopolymer concrete with recycled aggregates: Properties and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 378, 131168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131168>
- Wang, T., Fan, X., & Gao, C. (2024). Strength, pore characteristics, and characterization of *Fly ash–Slag*-based geopolymer mortar modified with silica fume. *Structures*, 69, 107525. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107525>