

## Studi Komparatif Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Menggunakan Campuran *Fly Ash* dan *Silica Fume*

Rabiyatul Uzda<sup>1\*</sup>, Billy Hatuhely<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pattimura, Indonesia, [sihombing.octaviani@gmail.com](mailto:sihombing.octaviani@gmail.com)

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pattimura, Indonesia, [billy@gmail.com](mailto:billy@gmail.com)

\*Penulis korespondensi, email: [sihombing.octaviani@gmail.com](mailto:sihombing.octaviani@gmail.com)

**Abstrak**— Beton mutu tinggi (*high-performance concrete*) merupakan inovasi dalam teknologi beton yang bertujuan meningkatkan kekuatan tekan, durabilitas, dan ketahanan terhadap lingkungan ekstrem. Untuk mencapai karakteristik tersebut, penggunaan bahan tambahan (*admixture*) seperti *Fly Ash* dan *Silica Fume* telah menjadi praktik umum dalam campuran beton modern. *Fly Ash*, sebagai limbah pembakaran batu bara, memiliki sifat pozzolan yang mampu meningkatkan kekuatan jangka panjang dan mengurangi panas hidrasi. Sementara itu, *Silica Fume*, sebagai produk samping industri silikon, memiliki ukuran partikel ultrahalus yang sangat reaktif dan mampu memperbaiki mikrostruktur beton secara signifikan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh penggunaan *Fly Ash* dan *Silica Fume* terhadap kuat tekan beton mutu tinggi melalui uji laboratorium dengan variasi kadar substitusi semen sebesar 0%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi campuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Silica Fume* memberikan peningkatan kuat tekan yang lebih tinggi pada umur awal, sedangkan *Fly Ash* cenderung meningkatkan kekuatan secara progresif pada umur 28 hari. Penggunaan kombinasi optimal dari kedua bahan tambahan ini dapat menghasilkan beton dengan performa tinggi yang efisien dan ramah lingkungan. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi terhadap pengembangan beton berkelanjutan di sektor konstruksi Indonesia.

Kata kunci: beton mutu tinggi, *Fly Ash*, *Silica Fume*, kuat tekan, bahan tambahan.

*This article is licensed under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.*

### 1. Pendahuluan

Beton merupakan bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia karena kemudahan dalam pembentukannya, ketersediaan bahan baku, serta karakteristik mekanis yang baik [1]. Seiring dengan perkembangan teknologi konstruksi dan tuntutan terhadap struktur yang lebih kuat, tahan lama, dan efisien, muncul kebutuhan untuk mengembangkan beton mutu tinggi (*high-performance concrete*, HPC) yang memiliki kuat tekan di atas 60 MPa [2], [3]. Beton mutu tinggi dirancang tidak hanya untuk meningkatkan kekuatan awal dan akhir, tetapi juga untuk memperbaiki durabilitas dan kinerja jangka panjang dalam kondisi lingkungan ekstrem [4]. Salah satu pendekatan penting dalam pengembangan beton mutu tinggi adalah dengan memanfaatkan bahan tambah mineral (*mineral admixtures*) seperti *Fly Ash* dan *Silica Fume*, yang berfungsi sebagai bahan pozzolan. Pozzolan adalah material yang secara kimia bereaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) yang dihasilkan dari proses hidrasi semen dan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memberikan kekuatan dan ketahanan pada beton [5]. Pemanfaatan pozzolan juga memberikan keuntungan dalam hal efisiensi penggunaan semen,

pengurangan biaya, dan peningkatan kinerja lingkungan karena mengurangi emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dari produksi semen [6].

*Fly Ash* merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan mengandung silika, alumina, serta mineral reaktif lainnya [7]. *Fly Ash* memiliki sifat pozzolan kelas F dan C sesuai klasifikasi ASTM C618 [8], dan penggunaannya dalam campuran beton telah terbukti dapat meningkatkan workability, mengurangi panas hidrasi, serta meningkatkan kekuatan tekan jangka panjang [9], [10]. Namun, *Fly Ash* memiliki reaktivitas awal yang rendah, sehingga kekuatan awal beton cenderung lebih rendah dibandingkan beton normal tanpa campuran [11]. Sementara itu, *Silica Fume* adalah produk samping dari industri ferrosilicon dan silikon metalik yang memiliki ukuran partikel sangat halus, sekitar 0,1 µm, atau 100 kali lebih kecil dari partikel semen [12]. Kandungan silika aktifnya sangat tinggi (lebih dari 90%), sehingga sangat reaktif dan efektif dalam memperkuat mikrostruktur beton melalui pengisian rongga kapiler serta pembentukan C-S-H [13]. Penggunaan *Silica Fume* mampu meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan bahkan pada umur awal seperti 7 hari [14], dan juga memberikan peningkatan ketahanan terhadap permeabilitas air, serangan kimia, serta abrasi [15].

Penelitian terdahulu telah banyak mengkaji pemanfaatan *Fly Ash* dan *Silica Fume* secara terpisah dalam beton mutu tinggi. Misalnya, studi oleh Mehta dan Monteiro [16] menunjukkan bahwa *Fly Ash* meningkatkan kinerja jangka panjang beton, sementara *Silica Fume* memberikan kekuatan tinggi dalam waktu singkat. Penelitian oleh Siddique [17] juga mengungkap bahwa kombinasi keduanya dapat memberikan performa beton yang optimal, baik dari segi kekuatan maupun durabilitas. Namun, belum banyak studi yang secara komprehensif membandingkan efek masing-masing bahan tambah tersebut terhadap kuat tekan beton pada berbagai umur (7, 14, dan 28 hari) dengan variasi komposisi yang sistematis. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi komparatif pengaruh penggunaan *Fly Ash* dan *Silica Fume* terhadap kuat tekan beton mutu tinggi, dengan fokus pada tiga hal utama: (1) mengetahui performa kuat tekan beton dengan campuran *Fly Ash* dan *Silica Fume* pada umur 7, 14, dan 28 hari; (2) menganalisis tren peningkatan kekuatan akibat masing-masing bahan tambah pozzolan; dan (3) menentukan komposisi campuran optimal yang memberikan keseimbangan antara kekuatan, efisiensi biaya, dan keberlanjutan lingkungan. Metode yang digunakan adalah eksperimental laboratorium dengan pengujian kuat tekan menggunakan benda uji silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm sesuai standar SNI 03-1974-1990 [18].

Signifikansi dari penelitian ini adalah untuk menjawab kebutuhan konstruksi masa depan yang tidak hanya menuntut kekuatan struktural tinggi, tetapi juga efisiensi dan keberlanjutan. Dalam era pembangunan berwawasan lingkungan, penggunaan limbah industri seperti *Fly Ash* dan *Silica Fume* dalam beton tidak hanya dapat meningkatkan performa teknis, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari sektor konstruksi [19], [20]. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan teknologi beton hijau (green concrete) yang dapat diaplikasikan di Indonesia dan negara berkembang lainnya [21]. Struktur penulisan artikel ini dibagi menjadi lima bagian utama. Bagian pertama membahas latar belakang dan urgensi studi, bagian kedua menjelaskan metodologi eksperimen yang digunakan, bagian ketiga menyajikan hasil dan analisis data kuat tekan, bagian keempat memberikan pembahasan dan interpretasi hasil, dan bagian kelima menyimpulkan temuan utama serta memberikan rekomendasi teknis untuk penerapan di lapangan.

## 2. Metode

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental di laboratorium untuk mengevaluasi dan membandingkan kuat tekan beton mutu tinggi yang menggunakan campuran *Fly Ash* dan *Silica Fume* sebagai bahan pengganti sebagian semen. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk memperoleh data numerik yang valid dan terukur dari hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari. Penelitian dilakukan dengan cara memproduksi beberapa campuran beton dengan variasi kadar penggantian *Fly Ash* dan *Silica Fume*, kemudian mengujinya dengan prosedur standar untuk melihat

pengaruh masing-masing bahan tambah terhadap karakteristik mekanik beton, khususnya kuat tekan. Metode ini dipilih karena mampu memberikan gambaran empiris yang akurat mengenai kinerja beton dengan campuran pozzolan, serta memungkinkan adanya analisis perbandingan antarvariabel yang terkontrol. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas semen Portland tipe I (OPC), agregat halus berupa pasir alami yang telah disaring dan terbebas dari kandungan lumpur, agregat kasar berupa kerikil pecah bergradasi 10–20 mm, air bersih yang layak minum, *Fly Ash* tipe F yang diperoleh dari limbah PLTU, serta *Silica Fume* komersial dengan kemurnian silika aktif lebih dari 90%. Proporsi campuran beton dirancang untuk menghasilkan mutu beton di atas 60 MPa, sesuai klasifikasi beton mutu tinggi. Dalam penelitian ini, digunakan variasi penggantian semen dengan *Fly Ash* dan *Silica Fume* secara terpisah, yaitu sebesar 0% (kontrol), 10%, 15%, dan 20% dari total berat semen. Dengan demikian, terdapat dua kelompok besar beton, yaitu beton dengan campuran *Fly Ash* (FA series) dan beton dengan campuran *Silica Fume* (SF series), masing-masing dengan empat variasi kadar.

Proses pencampuran dilakukan menggunakan mixer beton skala laboratorium. Semua bahan ditimbang terlebih dahulu dengan ketelitian 0,1 kg, kemudian dimasukkan secara bertahap ke dalam mixer. Agregat kasar dan halus dicampur terlebih dahulu selama 30 detik, kemudian diikuti oleh penambahan semen dan bahan pozzolan yang telah diaduk kering. Setelah bahan kering tercampur merata, air ditambahkan secara perlahan sambil proses pencampuran dilanjutkan selama 3 menit hingga tercapai homogenitas campuran. Untuk menjaga konsistensi kerja (*workability*), semua campuran beton dirancang memiliki nilai slump antara 10–15 cm, sesuai dengan batasan kerja beton mutu tinggi berdasarkan SNI 7656:2012. Benda uji yang digunakan adalah silinder beton berukuran 150 mm × 300 mm, dicetak menggunakan cetakan baja standar. Setiap variasi campuran dibuat minimal 9 benda uji, masing-masing 3 untuk pengujian umur 7 hari, 3 untuk 14 hari, dan 3 untuk 28 hari, sehingga total benda uji yang dibuat adalah 72 silinder beton. Setelah proses pengecoran, benda uji dibiarkan selama 24 jam dalam cetakan dan ditutup dengan plastik untuk menghindari penguapan air. Selanjutnya, benda uji direndam dalam bak perawatan berisi air bersih pada suhu ruang selama periode perawatan sampai waktu pengujian.

Pengujian kuat tekan dilakukan di laboratorium struktur menggunakan mesin uji tekan beton (*compression testing machine*) dengan kapasitas 2000 kN. Pengujian dilakukan sesuai prosedur dalam SNI 1974:2011 tentang “Metode Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder”. Benda uji dikeluarkan dari perawatan pada hari ke-7, 14, dan 28, dikeringkan dari permukaan air, kemudian ditempatkan pada plat uji mesin tekan secara vertikal dengan posisi tegak lurus terhadap sumbu panjang silinder. Beban diterapkan secara bertahap dan kontinu hingga benda uji mengalami keruntuhan, dan catatan beban maksimum digunakan untuk menghitung kuat tekan ( $f'c$ ) dalam satuan MPa. Nilai kuat tekan dihitung berdasarkan rumus  $f'c = P/A$ , di mana P adalah beban maksimum (N) dan A adalah luas penampang silinder ( $mm^2$ ).

Data hasil pengujian dicatat dan dianalisis secara statistik menggunakan bantuan perangkat lunak Microsoft Excel. Rata-rata kuat tekan dari masing-masing kelompok campuran pada setiap umur dihitung, dan dilakukan analisis perbandingan antara beton dengan *Fly Ash* dan *Silica Fume*. Analisis data mencakup perhitungan nilai rata-rata, simpangan baku, persentase peningkatan atau penurunan kuat tekan terhadap beton kontrol, serta representasi grafis untuk mempermudah interpretasi hasil. Perbandingan antara performa *Fly Ash* dan *Silica Fume* tidak hanya dilihat dari nilai kuat tekan absolut, tetapi juga dari pola pertumbuhan kekuatan beton antarumur. Dengan metode ini, diperoleh pemahaman menyeluruh mengenai peran masing-masing bahan tambah dalam meningkatkan karakteristik mekanik beton mutu tinggi.

Keseluruhan prosedur dilakukan di bawah pengawasan laboratorium teknik sipil dan menggunakan alat yang telah dikalibrasi untuk memastikan validitas hasil. Variabel-variabel lain seperti suhu perawatan, waktu pencampuran, dan proses pengecoran dijaga tetap konstan untuk meminimalkan pengaruh luar terhadap hasil penelitian. Dengan pendekatan eksperimental yang ketat dan pengendalian variabel yang cermat, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang dapat dipercaya dan aplikatif

mengenai pemanfaatan *Fly Ash* dan *Silica Fume* dalam beton mutu tinggi, sebagai kontribusi terhadap pengembangan material konstruksi ramah lingkungan dan berdaya guna tinggi di masa mendatang.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian kuat tekan beton mutu tinggi dengan variasi campuran *Fly Ash* dan *Silica Fume* menunjukkan bahwa penggunaan bahan tambah pozzolan tersebut memberikan pengaruh signifikan terhadap perkembangan kekuatan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari. Setiap jenis bahan tambah memberikan karakteristik peningkatan kekuatan yang berbeda, baik secara tren waktu maupun nilai absolut kekuatan tekan.

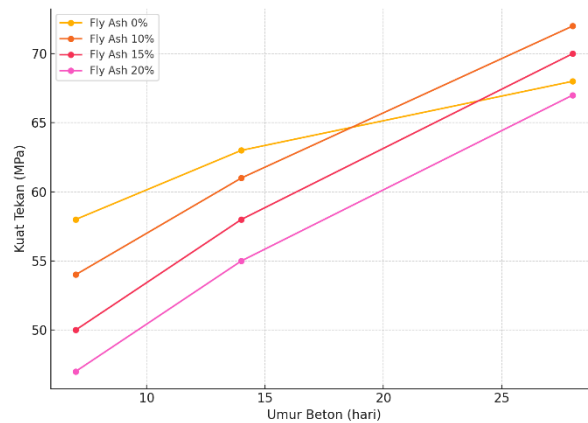
Berdasarkan Tabel 1, beton tanpa *Fly Ash* (0%) menunjukkan kuat tekan awal sebesar 58 MPa pada umur 7 hari dan meningkat menjadi 68 MPa pada umur 28 hari. Ketika *Fly Ash* digunakan dengan kadar 10%, terjadi penurunan kuat tekan awal menjadi 54 MPa pada umur 7 hari, namun justru mengalami peningkatan signifikan menjadi 72 MPa pada umur 28 hari. Ini menunjukkan bahwa *Fly Ash* membutuhkan waktu reaksi yang lebih panjang karena sifat pozzolannya yang lambat berinteraksi dengan produk hidrasi semen, namun memberikan kontribusi kekuatan jangka panjang yang optimal. Pada kadar 15% dan 20%, kuat tekan juga menunjukkan tren yang sama, di mana kekuatan awal lebih rendah dibandingkan beton normal, tetapi mengalami pertumbuhan kekuatan yang stabil hingga hari ke-28. Pada kadar 15%, kuat tekan mencapai 70 MPa, dan pada 20% menurun sedikit menjadi 67 MPa. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa *Fly Ash* pada kadar 10–15% memberikan hasil optimal dalam hal peningkatan kekuatan tekan jangka panjang, sementara kadar lebih tinggi cenderung menurunkan kekuatan awal secara signifikan.

Tabel 1. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Campuran *Fly Ash* (MPa)

Umur Beton	0%	10%	15%	20%
7 Hari	58	54	50	47
14 Hari	63	61	58	55
28 Hari	68	72	70	67

Gambar 1 mendukung temuan tersebut, di mana kurva perkembangan kekuatan beton dengan *Fly Ash* menunjukkan peningkatan yang tajam antara hari ke-14 dan ke-28, terutama pada kadar 10% dan 15%. Hal ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *Fly Ash* meningkatkan densifikasi mikrostruktur beton seiring waktu, terutama setelah reaksi pozzolanik mulai aktif pada hari ke-7 hingga ke-28.

Sementara itu, penggunaan *Silica Fume* memberikan hasil yang berbeda. Seperti ditunjukkan dalam Tabel 2, penambahan *Silica Fume* mulai dari kadar 10% hingga 20% memberikan peningkatan kuat tekan secara signifikan bahkan pada umur 7 hari. Beton dengan 10% *Silica Fume* menunjukkan kuat tekan sebesar 62 MPa, meningkat dari 58 MPa pada beton normal. Pada kadar 15%, kuat tekan awal meningkat menjadi 65 MPa, dan pada kadar 20% menjadi 67 MPa. Perkembangan kekuatan pada umur 14 dan 28 hari juga terus meningkat, dengan nilai tertinggi tercapai pada beton dengan kadar *Silica Fume* 15% yaitu 76 MPa pada hari ke-28. Menariknya, pada kadar 20% terjadi sedikit penurunan kuat tekan pada umur 28 hari dibandingkan kadar 15%, dari 76 MPa menjadi 75 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *Silica Fume* yang berlebihan tidak selalu meningkatkan kekuatan beton secara linier, dan dapat menyebabkan pengaruh negatif terhadap workability beton jika tidak diimbangi dengan penggunaan superplasticizer yang tepat.

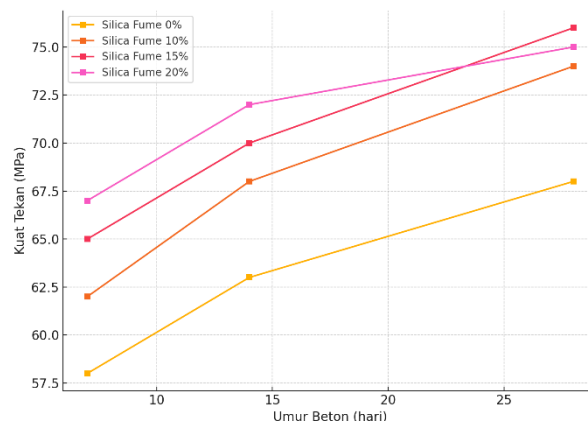


Gambar 1. Kuat Tekan Beton dengan *Fly Ash*

Tabel 2. Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Campuran *Silica Fume* (MPa)

Umur Beton	0%	10%	15%	20%
7 Hari	58	62	65	67
14 Hari	63	68	70	72
28 Hari	68	74	76	75

Gambar 2 menunjukkan bahwa grafik peningkatan kekuatan beton dengan *Silica Fume* lebih linier dan konsisten dibandingkan dengan *Fly Ash*. Seluruh kadar *Silica Fume* memberikan peningkatan kekuatan baik pada umur awal maupun jangka panjang, yang disebabkan oleh reaktivitas tinggi *Silica Fume* dan kemampuannya mengisi pori-pori mikro dalam pasta semen. Selain itu, *Silica Fume* mempercepat pembentukan C-S-H (calcium silicate hydrate), sehingga peningkatan kekuatan terjadi lebih cepat dibandingkan *Fly Ash*.



Gambar 2. Kuat Tekan Beton dengan *Silica Fume*

Dari kedua grafik dan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa *Silica Fume* unggul dalam menghasilkan kekuatan tinggi pada umur awal (early strength), yang sangat berguna untuk proyek konstruksi cepat (fast-track construction) atau elemen pracetak. Sebaliknya, *Fly Ash* lebih cocok digunakan untuk aplikasi beton yang membutuhkan kekuatan jangka panjang dan pengurangan panas hidrasi, seperti pada struktur masif dan pengecoran volume besar. Kombinasi keduanya juga dapat dipertimbangkan dalam penelitian lanjutan untuk memperoleh sinergi kekuatan dan durabilitas yang lebih baik, seperti yang ditunjukkan dalam studi oleh Siddique (2008) dan Mehta (1999) yang menyarankan pemanfaatan hybrid pozzolan dalam desain beton berperforma tinggi.

Secara umum, baik *Fly Ash* maupun *Silica Fume* mampu meningkatkan kuat tekan beton mutu tinggi, namun dengan mekanisme dan waktu reaksi yang berbeda. *Silica Fume* memberikan efek langsung pada umur muda karena ukurannya yang sangat halus dan kandungan silika reaktif yang tinggi. Di sisi lain, *Fly Ash* memerlukan waktu lebih lama untuk bereaksi, namun memberikan keuntungan dari segi peningkatan kekuatan jangka panjang dan efisiensi biaya. Temuan ini mendukung arah pengembangan material beton berkelanjutan yang memanfaatkan limbah industri sebagai bahan konstruksi tanpa mengorbankan kualitas teknisnya.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penggunaan *Fly Ash* dan *Silica Fume* sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam beton mutu tinggi memberikan pengaruh yang berbeda terhadap perkembangan kuat tekan beton. *Silica Fume* terbukti mampu meningkatkan kuat tekan secara signifikan pada umur awal (7 dan 14 hari), di mana kadar optimalnya terdapat pada 15%, dengan kuat tekan mencapai 76 MPa pada umur 28 hari. Keunggulan ini dikarenakan ukuran partikel *Silica Fume* yang sangat halus dan tingkat reaktivitas kimia yang tinggi terhadap kalsium hidroksida. Sebaliknya, penggunaan *Fly Ash* menunjukkan peningkatan kekuatan tekan yang lebih signifikan pada umur 28 hari, khususnya pada kadar 10–15%, dengan nilai kuat tekan mencapai 70–72 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa *Fly Ash* memerlukan waktu hidrasi yang lebih lama karena reaktivitas awalnya lebih rendah dibandingkan *Silica Fume*.

Dari segi efisiensi dan keberlanjutan, penggunaan *Fly Ash* lebih unggul karena berasal dari limbah industri dan memberikan dampak positif dalam mengurangi penggunaan semen, sementara *Silica Fume* lebih efektif untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan awal tinggi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan kedua bahan tambah ini dapat meningkatkan kinerja beton mutu tinggi baik dari sisi teknis maupun lingkungan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi kombinasi antara *Fly Ash* dan *Silica Fume* secara bersamaan untuk mengetahui potensi sinergis keduanya terhadap kekuatan dan durabilitas beton dalam jangka panjang.

#### Daftar Pustaka

- [1] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed., McGraw-Hill Education, 2014.
- [2] M. S. Shetty, *Concrete Technology: Theory and Practice*, New Delhi: S. Chand, 2005.
- [3] ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete," *American Concrete Institute*, ACI 363R-92, 1992.
- [4] S. Mindess, J. F. Young, and D. Darwin, *Concrete*, 2nd ed., Prentice Hall, 2003.
- [5] ASTM C618-19, *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, ASTM International, 2019.
- [6] B. H. Ahmad, "Influence of *Fly Ash* on Strength of Concrete," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 97–102, 2013.
- [7] T. Siddique, *Waste Materials and By-Products in Concrete*, Springer, 2008.
- [8] R. Siddique, "Effect of *Silica Fume* on the Properties of Concrete: A Review," *Materials and Structures*, vol. 39, pp. 209–226, 2006.
- [9] H. M. Jennings, "The Use of *Silica Fume* in Concrete," *Cement and Concrete Research*, vol. 17, no. 4, pp. 709–720, 1987.
- [10] M. A. Ghafoori and S. M. Najjar, "High-performance concrete Incorporating *Silica Fume*," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 286–293, 1999.
- [11] SNI 1974:2011, *Metode Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

- [12] SNI 7656:2012, *Spesifikasi Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [13] J. Newman and B. S. Choo, *Advanced Concrete Technology*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003.
- [14] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed., Pearson Education Limited, 2011.
- [15] B. V. Venkatarama Reddy and P. R. Jagadish, “Embodied Energy of Common and Alternative Building Materials and Technologies,” *Energy and Buildings*, vol. 35, no. 2, pp. 129–137, 2003.
- [16] V. M. Malhotra and P. K. Mehta, *Pozzolan and Cementitious Materials*, Gordon and Breach Science Publishers, 1996.
- [17] R. N. Swamy, *High-Strength Concrete: Materials, Mix Design, and Applications*, London: Thomas Telford, 1994.
- [18] A. O. Shashiprakash and M. S. Ravikumar, “Experimental Studies on *Silica Fume* and *Fly Ash* Based High Performance Concrete,” *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 1150–1156, 2013.
- [19] H. K. Lee and Y. M. Kim, “Effect of *Fly Ash* and *Silica Fume* on Compressive Strength of *High-performance concrete*,” *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1656–1663, 2008.
- [20] K. Obla, “Specifying *Silica Fume* Concrete,” *Concrete in Focus*, vol. 6, pp. 20–25, 2005.
- [21] R. Kumar and P. Rai, “Experimental Study on High Strength Concrete using *Fly Ash* and *Silica Fume*,” *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 739–743, 2015.