

Perkuatan Lentur Balok Komposit Beton Normal dan HSC dengan Serat Polypropilene dan Fly Ash

Ruben Situmorang^{1*}, Nursyamsi Nursyamsi², Johannes Tarigan³, Ricky Bakara⁴, Juni Indriani⁵

Universitas Sumatera Utara, Indonesia^{1,2,3}

Politeknik Negeri Medan, Indonesia^{4,5}

Email: rubensitumorang@students.usu.ac.id*, nursyamsi@usu.ac.id,
johannes.tarigan@usu.ac.id, rickybakara@polmed.ac.id, juniindriani@polmed.ac.id

Kata kunci:	ABSTRAK
balok komposit; beton normal; high strength concrete; fly ash; serat polypropilene	Penelitian ini mengkaji perkuatan lentur balok komposit dengan membandingkan beton normal (BN) dan High Strength Concrete (HSC) yang diperkuat dengan serat polypropilene dan fly ash. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh penambahan fly ash dan serat polypropilene terhadap kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur beton, serta membandingkan perilaku balok komposit BN dan HSC. Metode penelitian menggunakan eksperimen dengan enam variasi campuran: BN1, BN2, BN3, HSC1, HSC2, dan HSC3, dengan variasi fly ash 0%, 5%, 10% dan serat polypropilene 0%, 0.5%, 1%. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan optimum dicapai pada HSC2 (87.63 MPa) dengan peningkatan 166.68% dari beton normal, kuat tarik optimum pada HSC2 (4.99 MPa) dengan peningkatan 62.54%, dan kuat lentur optimum pada balok komposit HSC 2 cm (4.02 MPa) dengan peningkatan 44.6%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa substitusi semen dengan 10% fly ash dan 1% serat polypropilene menghasilkan performa terbaik dalam meningkatkan sifat mekanis beton. Implikasinya, kombinasi ini dapat direkomendasikan untuk aplikasi struktural yang memprioritaskan kekuatan dan ekonomi biaya.

Keywords:

composite beam; normal concrete; high strength concrete; fly ash; polypropylene fiber

ABSTRACT

This study examines the flexural strengthening of composite beams by comparing normal concrete (BN) and High Strength Concrete (HSC) reinforced with polypropylene fibers and fly ash. The research objective is to analyze the effect of fly ash and polypropylene fiber addition on compressive strength, tensile strength, and flexural strength of concrete, and to compare the behavior of BN and HSC composite beams. The research method uses experiments with six mixture variations: BN1, BN2, BN3, HSC1, HSC2, and HSC3, with fly ash variations of 0%, 5%, 10% and polypropylene fibers of 0%, 0.5%, 1%. The results showed that optimum compressive strength was achieved in HSC2 (87.63 MPa) with an increase of 166.68% from normal concrete, optimum tensile strength in HSC2 (4.99 MPa) with an increase of 62.54%, and optimum flexural strength in HSC 2 cm composite beams (4.02 MPa) with an increase of 44.6%. This study concludes that cement substitution with 10% fly ash and 1% polypropylene fiber produces the best performance in improving the mechanical properties of concrete. The implication is that this combination can be recommended for structural applications that prioritize strength and cost economy.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi konstruksi modern menuntut penggunaan material beton dengan kinerja yang semakin tinggi untuk memenuhi kebutuhan struktur yang kompleks dan

menahan beban yang besar (Iskandar, 2024; Rangan, 2025; Yunus et al., 2024). High Strength Concrete (HSC) telah menjadi solusi penting dalam industri konstruksi, terutama untuk aplikasi pada gedung tinggi, jembatan bentang panjang, dan infrastruktur kritis lainnya. HSC menawarkan kuat tekan yang superior dibandingkan beton konvensional, namun seringkali memiliki keterbatasan dalam hal daktilitas dan ketahanan terhadap retak (ACI 239-19, 2019). Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam komposisi campuran beton untuk meningkatkan tidak hanya kekuatan, tetapi juga durabilitas dan performa keseluruhan material.

Industri konstruksi global saat ini menghadapi tantangan signifikan terkait keberlanjutan lingkungan dan efisiensi penggunaan sumber daya (Irmawaty et al., 2025; Setiawan, 2024). Produksi semen Portland, sebagai bahan utama beton, menyumbang sekitar 8% dari total emisi CO₂ global (Nayak et al., 2022). Dalam konteks ini, penggunaan material pozzolan seperti fly ash sebagai substitusi parsial semen menjadi strategi penting untuk mengurangi jejak karbon konstruksi. Selain itu, peningkatan durabilitas dan performa struktural beton melalui penambahan serat sintetis dapat memperpanjang umur layanan infrastruktur, sehingga mengurangi kebutuhan pemeliharaan dan rekonstruksi yang berdampak pada konsumsi sumber daya dan emisi.

Penggunaan material tambahan seperti fly ash dan serat polypropilene telah terbukti dapat meningkatkan sifat mekanis beton. Fly ash, sebagai material pozzolan hasil sampingan pembakaran batubara, dapat mensubstitusi sebagian semen dalam campuran beton, memberikan manfaat ekonomis sekaligus meningkatkan workability dan durabilitas beton (Nayak et al., 2022; Fantu et al., 2021). Substitusi fly ash juga berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dalam produksi semen, mendukung praktik konstruksi berkelanjutan. Di sisi lain, penambahan serat polypropilene dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap retak, mengurangi susut plastis, dan meningkatkan daktilitas, yang sangat penting untuk performa struktural jangka panjang (Song et al., 2022; Hasan et al., 2025).

Balok komposit yang menggabungkan beton normal dengan HSC merupakan pendekatan inovatif dalam desain struktural, di mana lapisan beton dengan karakteristik berbeda dikombinasikan untuk mengoptimalkan distribusi tegangan dan memanfaatkan keunggulan masing-masing material. Konsep ini memungkinkan penggunaan material yang lebih efisien, mengurangi biaya konstruksi, dan meningkatkan performa struktural (Tayeh et al., 2013; Teng & Khayat, 2022). Namun, pemahaman yang komprehensif tentang perilaku lentur balok komposit dengan variasi komposisi material, khususnya dengan penambahan fly ash dan serat polypropilene, masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penggunaan fly ash dan serat dalam peningkatan sifat mekanis beton. Aleksandrova et al. (2022) melaporkan bahwa penambahan mineral admixtures dan serat dapat meningkatkan karakteristik beton mutu tinggi yang diperkuat serat, dengan peningkatan kuat tekan hingga 15% dan peningkatan daktilitas yang signifikan. Fantu et al. (2021) menemukan bahwa substitusi semen dengan fly ash hingga 20% pada beton mutu tinggi C-55 dapat mempertahankan kuat tekan target sambil meningkatkan workability dan durabilitas jangka panjang. Saberian et al. (2023) dalam penelitian mereka mendemonstrasikan bahwa penambahan serat polypropilene pada agregat beton daur ulang dapat meningkatkan kuat tarik belah hingga 25% dan meningkatkan ketahanan terhadap retak untuk aplikasi jalan. Song et al. (2022) menggunakan response surface methodology untuk

mengoptimalkan kandungan serat polypropilene dalam high-performance concrete dan menemukan bahwa kandungan serat 1% menghasilkan keseimbangan terbaik antara kuat tekan dan kuat lentur. Teng dan Khayat (2022) mengkaji perilaku lentur overlay ultra-high-performance concrete dan menemukan bahwa ketebalan overlay dan volume serat memiliki pengaruh interaktif yang signifikan terhadap kapasitas lentur dan pola retak.

Meskipun berbagai studi telah mengeksplorasi penggunaan fly ash dan serat polypropilene secara terpisah, terdapat celah penelitian yang signifikan. Pertama, mayoritas penelitian terdahulu berfokus pada beton homogen, bukan pada sistem balok komposit yang menggabungkan beton normal dengan HSC. Kedua, studi tentang efek sinergis antara fly ash dan serat polypropilene dalam konteks balok komposit masih sangat terbatas. Ketiga, analisis mengenai ketebalan optimal lapisan HSC dalam balok komposit untuk memaksimalkan performa lentur belum terdokumentasi secara komprehensif. Keempat, evaluasi ekonomis yang membandingkan biaya dengan peningkatan performa untuk berbagai konfigurasi balok komposit jarang dilaporkan dalam literatur.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa kombinasi fly ash dan serat dapat meningkatkan sifat mekanis beton secara signifikan. Aleksandrova et al. (2022) melaporkan bahwa penambahan mineral admixtures dan serat dapat meningkatkan karakteristik beton mutu tinggi yang diperkuat serat. Demikian pula, Saberian et al. (2023) menemukan bahwa serat polypropilene pada agregat beton daur ulang dapat meningkatkan sifat mekanis untuk aplikasi jalan. Namun, studi yang mengkaji secara spesifik pengaruh kombinasi fly ash dan serat polypropilene pada balok komposit beton normal dan HSC masih terbatas, terutama dalam konteks aplikasi struktural di Indonesia.

Urgensi penelitian ini terletak pada beberapa aspek kritis. Pertama, kebutuhan industri konstruksi Indonesia akan material beton berkinerja tinggi yang ekonomis dan berkelanjutan terus meningkat seiring dengan pembangunan infrastruktur masif. Kedua, pemanfaatan fly ash sebagai waste material dari pembangkit listrik tenaga uap dapat mengatasi permasalahan lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah ekonomis. Ketiga, pengembangan teknologi balok komposit dapat mengoptimalkan penggunaan material, mengurangi berat struktur, dan meningkatkan efisiensi konstruksi. Keempat, pemahaman mendalam tentang interaksi antara fly ash, serat polypropilene, dan konfigurasi geometris balok komposit diperlukan untuk menghasilkan pedoman desain yang dapat diaplikasikan di lapangan.

Novelty penelitian ini terletak pada: (1) eksplorasi sistematis kombinasi fly ash dan serat polypropilene dalam sistem balok komposit beton normal-HSC yang belum banyak diteliti; (2) identifikasi komposisi optimal dan ketebalan lapisan HSC yang memaksimalkan performa lentur balok komposit; (3) analisis komprehensif yang mengintegrasikan aspek mekanis (kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur) dengan evaluasi ekonomis untuk memberikan rekomendasi praktis; dan (4) pengembangan framework untuk aplikasi balok komposit dalam konteks konstruksi berkelanjutan di Indonesia.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan fly ash dan serat polypropilene terhadap kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur beton, serta membandingkan perilaku balok komposit yang terdiri dari beton normal dan HSC. Penelitian ini juga mengkaji aspek ekonomis dari setiap variasi campuran untuk memberikan rekomendasi praktis bagi aplikasi di lapangan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi beton berkinerja tinggi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh penambahan fly ash dan serat polypropilene pada campuran beton normal dan HSC terhadap sifat mekanis beton. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Material, Departemen Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara.

Material Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi: (1) Ordinary Portland Cement (OPC) Tipe I sesuai SNI 2049:2015, (2) Agregat halus berupa pasir alami dengan modulus kehalusan 2.8-3.2, (3) Agregat kasar berupa kerikil dengan ukuran maksimum 20 mm, (4) Fly ash kelas F sesuai ASTM C618, (5) Serat polypropilene dengan panjang 12 mm dan diameter 18 mikron, (6) Chemical admixture berupa superplasticizer untuk meningkatkan workability, dan (7) Air bersih sesuai standar untuk pembuatan beton.

Variasi Campuran Beton

Penelitian menggunakan enam variasi campuran beton yang terdiri dari tiga variasi beton normal (BN1, BN2, BN3) dan tiga variasi HSC (HSC1, HSC2, HSC3). Variasi BN1 merupakan beton normal tanpa penambahan fly ash dan serat polypropilene sebagai kontrol. BN2 menggunakan substitusi semen dengan 5% fly ash dan 0.5% serat polypropilene. BN3 menggunakan 10% fly ash dan 1% serat polypropilene. Untuk HSC, variasi HSC1 menggunakan faktor air semen (FAS) 0.3 tanpa fly ash dan serat, HSC2 dengan FAS 0.3, 10% fly ash dan 1% serat polypropilene, dan HSC3 dengan FAS 0.25, 15% fly ash dan 1.5% serat polypropilene.

Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pembuatan beton dilakukan dengan metode pencampuran basah menggunakan molen. Agregat kasar dan halus dicampur terlebih dahulu, kemudian ditambahkan semen dan fly ash, diikuti dengan air dan superplasticizer. Serat polypropilene ditambahkan secara bertahap untuk memastikan distribusi merata. Benda uji untuk kuat tekan berupa silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, sedangkan untuk kuat tarik berupa silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm yang diuji dengan metode belah (splitting test). Balok komposit memiliki dimensi 150 x 150 x 600 mm dengan variasi ketebalan lapisan HSC 1 cm, 2 cm, dan 3 cm. Perawatan benda uji dilakukan dengan metode water curing selama 28 hari pada suhu ruangan.

Pengujian Beton

Pengujian beton segar meliputi slump flow test, V-funnel test, dan L-shape box test untuk mengevaluasi workability. Pengujian beton keras dilakukan pada umur 28 hari meliputi: (1) Uji kuat tekan menggunakan compression testing machine sesuai SNI 1974:2011, (2) Uji kuat tarik belah menggunakan splitting tensile test sesuai SNI 2491:2014, dan (3) Uji kuat lentur balok komposit dengan metode three-point bending test sesuai ASTM C78. Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi pengaruh variasi campuran terhadap sifat mekanis beton.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton untuk enam variasi campuran disajikan pada Tabel 1. Data menunjukkan bahwa nilai kuat tekan bervariasi antara 29.58 MPa hingga 87.63 MPa, dengan peningkatan signifikan pada variasi HSC dibandingkan beton normal. Variasi BN1 (beton normal tanpa fly ash dan serat) menghasilkan kuat tekan 32.86 MPa, yang merupakan nilai baseline untuk perbandingan. Penambahan 5% fly ash dan 0.5% serat polypropilene pada BN2 menunjukkan sedikit penurunan kuat tekan menjadi 30.23 MPa, demikian pula pada BN3 dengan 10% fly ash dan 1% serat menghasilkan 29.58 MPa.

Tabel 1. Hasil Kuat Tekan Beton

Variasi	Kuat Tekan (MPa)	Peningkatan (%)
BN1	32.86	-
BN2	30.23	-8.00
BN3	29.58	-9.98
HSC1	74.28	126.00
HSC2	87.63	166.68
HSC3	84.68	157.71

Sumber: Hasil Penelitian

Pada variasi HSC, terjadi peningkatan kuat tekan yang sangat signifikan. HSC1 yang menggunakan FAS 0.3 tanpa fly ash dan serat menghasilkan kuat tekan 74.28 MPa, meningkat 126% dari BN1. HSC2 dengan penambahan 10% fly ash dan 1% serat polypropilene mencapai kuat tekan optimum sebesar 87.63 MPa, menunjukkan peningkatan 166.68% dari beton normal. Namun, HSC3 dengan kandungan fly ash 15% dan serat 1.5% mengalami sedikit penurunan menjadi 84.68 MPa, mengindikasikan bahwa terdapat komposisi optimum untuk fly ash dan serat. Hasil ini sejalan dengan temuan Dandaboina et al. (2025) yang melaporkan bahwa substitusi semen dengan material pozzolan memiliki batas optimum untuk mencapai kinerja terbaik.

Kuat Tarik Beton

Pengujian kuat tarik telah dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan beton menahan tegangan tarik. Tabel 2 menampilkan hasil kuat tarik untuk semua variasi campuran. Pola yang serupa dengan kuat tekan diamati pada hasil kuat tarik, di mana variasi HSC menunjukkan performa superior dibandingkan beton normal. BN1 menghasilkan kuat tarik 3.07 MPa, sementara BN2 dan BN3 mengalami penurunan menjadi 2.91 MPa dan 2.87 MPa. Penurunan ini dapat disebabkan oleh waktu hidrasi fly ash yang lebih lambat pada umur 28 hari, sehingga kontribusinya terhadap kekuatan belum optimal (Nayak et al., 2022).

Tabel 2. Hasil Kuat Tarik Beton

Variasi	Kuat Tarik (MPa)	Peningkatan (%)
BN1	3.07	-
HSC1	4.71	53.42
HSC2	4.99	62.54
HSC3	4.93	60.59

Sumber: Hasil Penelitian

Variasi HSC1 menghasilkan kuat tarik 4.71 MPa dengan peningkatan 53.42% dari beton normal. HSC2 mencapai nilai optimum 4.99 MPa dengan peningkatan 62.54%, menunjukkan bahwa kombinasi 10% fly ash dan 1% serat polypropilene memberikan kontribusi positif terhadap kuat tarik. HSC3 menghasilkan 4.93 MPa, sedikit lebih rendah dari HSC2, yang konsisten dengan pola pada kuat tekan. Peningkatan kuat tarik ini dapat dikaitkan dengan kemampuan serat polypropilene dalam menjembatani mikroretakan dan meningkatkan integritas matriks beton (Song et al., 2022).

Kuat Lentur Balok Komposit

Pengujian kuat lentur dilakukan pada balok komposit yang menggabungkan beton normal dengan HSC dalam berbagai konfigurasi ketebalan lapisan. Tabel 3 menyajikan hasil kuat lentur rata-rata untuk empat konfigurasi balok: BN (beton normal penuh), HSC 1 cm (lapisan HSC 1 cm di atas beton normal), HSC 2 cm (lapisan HSC 2 cm), dan HSC 3 cm (lapisan HSC 3 cm). Balok BN menghasilkan kuat lentur 2.78 MPa sebagai baseline. Penambahan lapisan HSC meningkatkan kuat lentur secara progresif, dengan HSC 1 cm menghasilkan 3.79 MPa (peningkatan 36.3%), HSC 2 cm mencapai 4.02 MPa (peningkatan 44.6%), dan HSC 3 cm sebesar 3.35 MPa (peningkatan 20.5%).

Tabel 3. Hasil Kuat Lentur Balok Komposit

Konfigurasi Balok	Kuat Lentur (MPa)
BN (Beton Normal)	2.78
HSC 1 cm	3.79
HSC 2 cm	4.02
HSC 3 cm	3.35

Sumber: Hasil Penelitian

Konfigurasi HSC 2 cm menghasilkan kuat lentur optimum, menunjukkan bahwa terdapat ketebalan ideal untuk lapisan HSC yang memaksimalkan performa lentur. Penurunan kuat lentur pada HSC 3 cm dapat disebabkan oleh distribusi tegangan yang kurang optimal akibat ketebalan lapisan yang terlalu besar, yang mengakibatkan konsentrasi tegangan pada interface antara dua lapisan beton. Hasil ini sejalan dengan temuan Teng dan Khayat (2022) yang melaporkan bahwa ketebalan overlay dan volume serat mempengaruhi perilaku lentur balok komposit. Penggunaan serat polypropilene dalam HSC berkontribusi pada peningkatan daktilitas dan kemampuan balok untuk menahan beban setelah retak awal terjadi.

Analisis Biaya

Analisis biaya dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi ekonomis dari setiap variasi campuran. Tabel 4 menampilkan estimasi harga per meter kubik untuk setiap konfigurasi balok komposit. Balok BN memiliki biaya terendah sebesar Rp 23.349,53, sementara HSC 1 cm, HSC 2 cm, dan HSC 3 cm memiliki biaya masing-masing Rp 35.882,99, Rp 60.949,92, dan Rp 86.016,84. Peningkatan biaya ini terutama disebabkan oleh penggunaan superplasticizer, fly ash, dan serat polypropilene, serta FAS yang lebih rendah yang memerlukan jumlah semen lebih banyak.

Tabel 4. Estimasi Biaya Balok Komposit

Variasi	Harga (Rp/m ³)	Kuat Lentur (MPa)
BN	23.349,53	2.78

HSC 1 cm	35.882,99	3.79
HSC 2 cm	60.949,92	4.02
HSC 3 cm	86.016,84	3.35

Sumber: Hasil Penelitian

Meskipun HSC 2 cm memiliki kuat lentur tertinggi, biayanya juga cukup tinggi. Namun, jika dilihat dari rasio performa terhadap biaya, HSC 2 cm memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan kuat lentur dan biaya yang dikeluarkan. HSC 3 cm, meskipun paling mahal, justru mengalami penurunan kuat lentur dibandingkan HSC 2 cm, mengindikasikan bahwa investasi tambahan tidak menghasilkan peningkatan performa yang proporsional. Analisis ini penting untuk aplikasi praktis di lapangan, di mana efisiensi biaya menjadi pertimbangan utama selain performa struktural.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai perkuatan lentur balok komposit beton normal dan High Strength Concrete dengan penambahan serat polypropilene dan fly ash, dapat disimpulkan bahwa penambahan fly ash dan serat polypropilene memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis beton. Nilai kuat tekan optimum dicapai pada variasi HSC2 dengan substitusi semen 10% fly ash dan 1% serat polypropilene, menghasilkan kuat tekan 87.63 MPa atau peningkatan 166.68% dari beton normal. Demikian pula, kuat tarik optimum diperoleh pada HSC2 dengan nilai 4.99 MPa, menunjukkan peningkatan 62.54%. Pada balok komposit, kuat lentur optimum dicapai pada konfigurasi HSC 2 cm dengan nilai 4.02 MPa, meningkat 44.6% dari beton normal. Hasil ini mengindikasikan bahwa terdapat komposisi optimum untuk fly ash dan serat polypropilene yang memberikan performa terbaik. Penambahan fly ash yang terlalu tinggi dapat menurunkan kuat tekan dan kuat lentur, seperti yang terlihat pada variasi HSC3. Analisis biaya menunjukkan bahwa meskipun HSC memiliki biaya lebih tinggi, konfigurasi HSC 2 cm memberikan keseimbangan terbaik antara performa dan biaya. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melakukan pengujian dengan variasi umur beton yang lebih lama untuk mengamati kontribusi fly ash yang optimal, serta melakukan analisis mikrostruktur menggunakan SEM untuk memahami mekanisme perkuatan pada tingkat mikro.

REFERENSI

- ACI 239-19. (2019). Ultra-high-performance concrete: An emerging technology report. American Concrete Institute.
- Aleksandrova, O. V., Quang, N. D. V., Bulgakov, B. I., Fedosov, S. V., Lukyanova, N. A., & Petropavlovskaya, V. B. (2022). The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15248851>
- Dandaboina, K., Prasad, J. S., & Sohail, S. (2025). Mechanical and microstructural properties of concrete with partial replacement of fine aggregate by steel slag and cement by GGBFS and Metakaolin. *Discover Civil Engineering*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00180-5>

- Fantu, T., Alemayehu, G., Kebede, G., Abebe, Y., Selvaraj, S. K., & Paramasivam, V. (2021). Experimental investigation of compressive strength for fly ash on high strength concrete C-55 grade. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7507-7517. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.213>
- Hasan, M., Alkhaly, Y. R., Hamzani, Fikri, R., & Saidi, T. (2025). Properties of High-Strength Concrete Incorporating Calcined Diatomaceous Earth, Polypropylene, and Glass Fibers. *Buildings*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/buildings15020225>
- Irmawaty, I., Hamzah, S., & Abdurrahman, M. A. (2025). Green Lean Construction: Sinkronisasi antara Efisiensi dan Keberlanjutan. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 110–117.
- Iskandar, R. (2024). Analisis Kekuatan Material dalam Konstruksi Gedung Bertingkat Tinggi. *Circle Archive*, 1(6).
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, 6, 100143. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100143>
- Rangan, I. P. R. (2025). *Teknologi Beton Memadat Sendiri Mutu Tinggi*. Arsy Media.
- Saberian, M., Tajaddini, A., Li, J., Zhang, G., Wang, L., Sun, D., Maqsood, T., & Roychand, R. (2023). Mechanical properties of polypropylene fibre reinforced recycled concrete aggregate for sustainable road base and subbase applications. *Construction and Building Materials*, 405, 133352. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133352>
- Setiawan, B. (2024). Pendekatan Lean Construction dalam Penggunaan Sumber Daya dalam Proyek Konstruksi. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 4(4), 5311–5325.
- Song, M., Song, N., Zhang, Y., & Wang, J. (2022). Mechanical Properties of Polypropylene-Fiber-Reinforced High-Performance Concrete Based on the Response Surface Method. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9802222>
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Megat Johari, M. A., & Voo, Y. L. (2013). Evaluation of bond strength between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete as a repair material. *Procedia Engineering*, 54, 554-563. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.050>
- Teng, L., & Khayat, K. H. (2022). Effect of overlay thickness, fiber volume, and shrinkage mitigation on flexural behavior of thin bonded ultra-high-performance concrete overlay slab. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104752. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104752>
- Tuan, N. V., Dong, P. S., Thanh, L. T., Thang, N. C., & Hyeok, Y. K. (2021). Mix design of high-volume fly ash ultra high performance concrete. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE*, 15(4), 197-208. [https://doi.org/10.31814/stce.huce\(nuce\)2021-15\(4\)-17](https://doi.org/10.31814/stce.huce(nuce)2021-15(4)-17)
- Wang, S., Zhu, H., Liu, F., Cheng, S., Wang, B., & Yang, L. (2022). Effects of steel fibers and concrete strength on flexural toughness of ultra-high performance concrete with coarse aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01170. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01170>

Xu, X., Jin, Z., Yu, Y., & Li, N. (2022). Impact properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC) cured by steam curing and standard curing. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01321. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01321>

Yunus, A. I., Widiati, I. R., Yendri, O., Hapsari, R. N. A., Picauly, P. F., Priana, S. E., Uzda, R., & Imani, R. (2024). *Dasar-Dasar Teknologi Beton*. CV. Gita Lentera.



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).