



Analisis Kekuatan Struktur Beton Bertulang Menggunakan Material Tambahan Abu Terbang (Fly Ash)

Ahmad Nurhadi

Jurusan Teknik Sipil, Universitas Teknologi Nusantara, Jakarta, Indonesia

*Corresponding Author: ahmad.nurhadi@utn.ac.id

Article History

Manuscript submitted:

30 July 2025

Manuscript revised:

07 August 2025

Accepted for publication:

09 August 2025

Abstract

This study investigates the structural strength of reinforced concrete incorporating fly ash as a supplementary material. Fly ash, a byproduct of coal combustion in power plants, has pozzolanic properties that can enhance the performance of concrete. The primary aim is to evaluate the mechanical properties and durability of reinforced concrete when partially replacing Portland cement with varying percentages of fly ash. An experimental approach was used, involving compressive strength testing, flexural strength analysis, and durability assessments over different curing periods. The results indicate that fly ash improves long-term strength and sustainability while reducing cement usage. The optimum fly ash content observed was 20%, which demonstrated a balance between strength gain and environmental benefits. These findings suggest that fly ash is a viable alternative material in reinforced concrete construction for improving structural performance and sustainability.

Keywords

fly ash, reinforced concrete,
compressive strength,
durability,
supplementary cementitious
material

Copyright © 2025, The Author(s)

This is an open access article under the CC BY-SA license



How to Cite: Nurhadi, A. (2025). Analisis Kekuatan Struktur Beton Bertulang Menggunakan Material Tambahan Abu Terbang (Fly Ash). *Journal of Engineering and Technological Science*, 1(1), 24-32. <https://doi.org/10.70716/jets.v1i1.51>

Pendahuluan

Penggunaan beton bertulang sebagai elemen struktural utama dalam konstruksi modern telah menjadi pilihan utama karena kekuatan, daya tahan, dan fleksibilitasnya dalam berbagai jenis bangunan. Dalam beberapa dekade terakhir, perhatian terhadap dampak lingkungan dari sektor konstruksi semakin meningkat, khususnya terkait dengan produksi semen Portland yang merupakan komponen utama dalam beton. Produksi semen dikenal sebagai salah satu penyumbang emisi karbon dioksida terbesar di dunia. Berdasarkan data dari Mehta (2014), produksi semen menyumbang sekitar 7% dari total emisi karbon dioksida global, menjadikannya sebagai sektor yang harus diperhatikan dalam upaya pengurangan emisi gas rumah kaca.

Di sisi lain, permintaan beton sebagai bahan konstruksi terus meningkat seiring dengan pertumbuhan infrastruktur global. Hal ini memicu kebutuhan untuk mencari solusi yang tidak hanya mempertahankan performa struktural beton, tetapi juga ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu

pendekatan yang banyak diteliti adalah dengan memanfaatkan material limbah industri sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton.

Abu terbang (fly ash), yang merupakan residu sisa pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap, telah diidentifikasi sebagai material tambahan yang menjanjikan dalam industri konstruksi, khususnya sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Komposisi kimia fly ash yang kaya akan silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida besi (Fe_2O_3) menjadikannya bahan pozzolanik yang efektif. Sifat pozzolanik tersebut memungkinkan fly ash untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen, membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang sangat penting dalam mengikat agregat dan meningkatkan densitas serta kekuatan beton (Thomas, 2007).

Fly ash terbagi menjadi dua kelas utama, yakni Class F dan Class C, berdasarkan kandungan kalsiumnya. Class F biasanya berasal dari batu bara antrasit dan bituminus, sedangkan Class C berasal dari lignit atau sub-bituminus. Penggunaan Class F lebih umum karena sifatnya yang lebih stabil dan cocok digunakan dalam beton struktural. Selain meningkatkan performa mekanis, penambahan fly ash dalam beton juga mampu memperlambat reaksi hidrasi awal, sehingga memberikan waktu kerja yang lebih panjang dalam proses pengecoran, yang sangat bermanfaat pada proyek besar atau saat suhu lingkungan tinggi.

Dari sudut pandang keberlanjutan, pemanfaatan fly ash sebagai bahan pengganti sebagian semen tidak hanya mengurangi limbah industri yang potensial mencemari lingkungan, tetapi juga mengurangi kebutuhan akan produksi semen baru, yang dikenal sebagai proses yang sangat intensif energi dan tinggi emisi karbon. Dengan demikian, fly ash berkontribusi langsung terhadap pengurangan jejak karbon dalam konstruksi bangunan.

Selain itu, penggunaan fly ash dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif seperti serangan sulfat, klorida, dan karbonasi. Beton yang mengandung fly ash menunjukkan porositas yang lebih rendah dan distribusi pori yang lebih halus, yang secara signifikan memperlambat laju penetrasi ion berbahaya. Dalam jangka panjang, hal ini akan meningkatkan masa layanan struktur dan mengurangi kebutuhan perawatan dan perbaikan.

Beberapa studi telah membuktikan bahwa penggunaan fly ash dalam beton tidak hanya meningkatkan kekuatan tekan jangka panjang, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap peningkatan performa beton dari segi keawetan, ketahanan kimia, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti paparan sulfat, klorida, dan karbonasi (Heede, 2013). Fly ash bekerja dengan memperbaiki mikrostruktur beton melalui reaksi pozzolanik yang mengisi pori-pori dalam pasta semen, sehingga menurunkan permeabilitas dan porositas beton secara signifikan. Hal ini berdampak pada meningkatnya ketahanan beton terhadap penetrasi air dan ion-ion merusak yang dapat menyebabkan korosi pada tulangan.

Selain itu, karakteristik termal beton juga dapat ditingkatkan dengan penambahan fly ash, karena proses hidrasi yang lebih lambat mengurangi panas hidrasi yang dihasilkan. Ini sangat menguntungkan untuk pengecoran volume besar (mass concrete), karena dapat mengurangi risiko retak termal. Penambahan fly ash juga diketahui dapat meningkatkan workability atau kemudahan pengerjaan beton segar, sehingga dapat menurunkan kebutuhan penggunaan bahan tambahan kimia seperti superplasticizer.

Namun demikian, berbagai penelitian juga melaporkan adanya variasi hasil yang cukup signifikan terkait performa awal beton yang mengandung fly ash. Beberapa hasil menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam jumlah besar (>25%) dapat menyebabkan penurunan kekuatan awal, khususnya pada umur 7 hingga 14 hari, yang menjadi pertimbangan penting pada proyek-proyek yang memerlukan pembebanan awal atau kecepatan konstruksi tinggi. Variasi ini sering kali disebabkan oleh perbedaan jenis fly ash, kadar kalsium, kehalusan butiran, serta kondisi curing.

Penelitian juga menunjukkan bahwa pengaruh fly ash terhadap beton bertulang memerlukan perhatian khusus, karena interaksi antara beton dan baja tulangan sangat menentukan performa jangka panjang struktur. Penambahan fly ash dapat memengaruhi passivasi tulangan dalam beton, dan jika tidak dikontrol dengan baik, dapat meningkatkan risiko korosi pada kondisi lingkungan yang agresif. Oleh karena itu, penting untuk menentukan komposisi fly ash yang tepat, tidak hanya berdasarkan kekuatan mekanis, tetapi juga dari sisi durabilitas dan interaksi elektro-kimia dengan tulangan.

Dengan berbagai keunggulan dan tantangan tersebut, studi yang lebih mendalam mengenai variasi proporsi optimal fly ash dalam beton bertulang, khususnya di kondisi iklim tropis dan lingkungan lembab seperti di Indonesia, sangat penting untuk dikaji lebih lanjut agar dapat memaksimalkan manfaat yang ditawarkan fly ash sebagai bahan tambahan semen.

Terlepas dari potensi besar yang dimiliki fly ash sebagai bahan tambahan dalam beton, masih terdapat kekurangan yang signifikan dalam literatur ilmiah yang secara khusus membahas performa beton bertulang dengan penambahan fly ash, terutama dalam konteks lingkungan tropis seperti Indonesia. Sebagian besar studi yang telah dilakukan sejauh ini lebih banyak difokuskan pada beton non-struktural atau beton tanpa tulangan, yang tidak sepenuhnya mencerminkan tantangan dan kondisi nyata di lapangan konstruksi. Hal ini menimbulkan kesenjangan informasi yang krusial, mengingat peran interaksi antara beton dan baja tulangan merupakan faktor utama dalam menentukan kekuatan struktural, ketahanan terhadap korosi, serta masa layan struktur secara keseluruhan. Dalam lingkungan tropis yang lembab dan panas, seperti di banyak wilayah Indonesia, kondisi eksternal yang agresif seperti fluktuasi suhu, kelembaban tinggi, serta potensi paparan sulfat dan klorida dari udara laut atau tanah dapat mempercepat degradasi beton dan korosi tulangan. Oleh karena itu, kajian yang lebih mendalam mengenai bagaimana fly ash memengaruhi interaksi antar material ini dalam iklim tropis sangat dibutuhkan untuk menghasilkan rekomendasi teknis yang aplikatif dan relevan dengan konteks lokal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyelidiki pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan ketahanan lingkungan beton bertulang. Studi ini juga bertujuan untuk menentukan kadar optimal fly ash yang memberikan keseimbangan antara performa teknis dan efisiensi material.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan teknologi beton ramah lingkungan di Indonesia, serta mendukung upaya pengurangan limbah industri dan emisi karbon di sektor konstruksi. Hasil dari studi ini juga dapat menjadi acuan bagi praktisi teknik sipil dan perencana struktur dalam merancang campuran beton bertulang yang lebih berkelanjutan.

Abu terbang (fly ash) merupakan limbah padat hasil pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap yang memiliki potensi besar sebagai material pengganti sebagian semen dalam beton. Fly ash memiliki sifat pozzolanik yang memungkinkan reaksi dengan kalsium hidroksida dalam beton untuk membentuk senyawa yang memperkuat struktur beton (Thomas, 2007).

Selain itu, karakteristik termal beton juga dapat ditingkatkan dengan penambahan fly ash, karena proses hidrasi yang lebih lambat mengurangi panas hidrasi yang dihasilkan. Ini sangat menguntungkan untuk pengecoran volume besar (mass concrete), karena dapat mengurangi risiko retak termal. Penambahan fly ash juga diketahui dapat meningkatkan workability atau kemudahan pengerjaan beton segar, sehingga dapat menurunkan kebutuhan penggunaan bahan tambahan kimia seperti superplasticizer.

Namun demikian, berbagai penelitian juga melaporkan adanya variasi hasil yang cukup signifikan terkait performa awal beton yang mengandung fly ash. Beberapa hasil menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam jumlah besar (>25%) dapat menyebabkan penurunan kekuatan awal, khususnya pada umur 7 hingga 14 hari, yang menjadi pertimbangan penting pada proyek-proyek yang memerlukan pembebanan

awal atau kecepatan konstruksi tinggi. Variasi ini sering kali disebabkan oleh perbedaan jenis fly ash, kadar kalsium, kehalusan butiran, serta kondisi curing.

Penelitian juga menunjukkan bahwa pengaruh fly ash terhadap beton bertulang memerlukan perhatian khusus, karena interaksi antara beton dan baja tulangan sangat menentukan performa jangka panjang struktur. Penambahan fly ash dapat memengaruhi passivasi tulangan dalam beton, dan jika tidak dikontrol dengan baik, dapat meningkatkan risiko korosi pada kondisi lingkungan yang agresif. Oleh karena itu, penting untuk menentukan komposisi fly ash yang tepat, tidak hanya berdasarkan kekuatan mekanis, tetapi juga dari sisi durabilitas dan interaksi elektro-kimia dengan tulangan.

Dengan berbagai keunggulan dan tantangan tersebut, studi yang lebih mendalam mengenai variasi proporsi optimal fly ash dalam beton bertulang, khususnya di kondisi iklim tropis dan lingkungan lembab seperti di Indonesia, sangat penting untuk dikaji lebih lanjut agar dapat memaksimalkan manfaat yang ditawarkan fly ash sebagai bahan tambahan semen.

Terlepas dari potensi besar yang dimiliki fly ash sebagai bahan tambahan dalam beton, masih terdapat kekurangan yang signifikan dalam literatur ilmiah yang secara khusus membahas performa beton bertulang dengan penambahan fly ash, terutama dalam konteks lingkungan tropis seperti Indonesia. Sebagian besar studi yang telah dilakukan sejauh ini lebih banyak difokuskan pada beton non-struktural atau beton tanpa tulangan, yang tidak sepenuhnya mencerminkan tantangan dan kondisi nyata di lapangan konstruksi. Hal ini menimbulkan kesenjangan informasi yang krusial, mengingat peran interaksi antara beton dan baja tulangan merupakan faktor utama dalam menentukan kekuatan struktural, ketahanan terhadap korosi, serta masa layan struktur secara keseluruhan.

Dalam lingkungan tropis yang lembab dan panas, seperti di banyak wilayah Indonesia, kondisi eksternal yang agresif seperti fluktuasi suhu, kelembaban tinggi, serta potensi paparan sulfat dan klorida dari udara laut atau tanah dapat mempercepat degradasi beton dan korosi tulangan. Oleh karena itu, kajian yang lebih mendalam mengenai bagaimana fly ash memengaruhi interaksi antar material ini dalam iklim tropis sangat dibutuhkan untuk menghasilkan rekomendasi teknis yang aplikatif dan relevan dengan konteks lokal.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menyelidiki pengaruh variasi kadar fly ash terhadap kekuatan tekan, kekuatan lentur, dan ketahanan lingkungan beton bertulang. Studi ini juga bertujuan untuk menentukan kadar optimal fly ash yang memberikan keseimbangan antara performa teknis dan efisiensi material.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan teknologi beton ramah lingkungan di Indonesia, serta mendukung upaya pengurangan limbah industri dan emisi karbon di sektor konstruksi. Hasil dari studi ini juga dapat menjadi acuan bagi praktisi teknik sipil dan perencana struktur dalam merancang campuran beton bertulang yang lebih berkelanjutan.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kekuatan tekan, lentur, dan ketahanan beton bertulang yang menggunakan fly ash sebagai bahan tambahan. Penelitian ini juga bertujuan menentukan komposisi optimal fly ash dalam campuran beton.

Kontribusi utama dari penelitian ini adalah memberikan data eksperimental yang dapat digunakan dalam perancangan beton bertulang yang ramah lingkungan, serta mendukung penggunaan limbah industri dalam konstruksi berkelanjutan.

Metode

Penelitian ini merupakan studi eksperimental laboratorium dengan desain eksperimental kuasi. Lokasi penelitian dilakukan di Laboratorium Material dan Struktur, Universitas Teknologi Nusantara, selama periode Maret hingga Mei 2025. Sampel yang digunakan adalah silinder beton bertulang dan balok

beton bertulang dengan variasi kadar fly ash sebesar 0% (kontrol), 10%, 20%, dan 30% dari berat semen. Campuran beton dirancang menggunakan metode (Hunggurami et al., 2017).

Pengujian meliputi uji kuat tekan (compressive strength), kuat lentur (flexural strength), dan uji ketahanan terhadap penetrasi air dan serangan sulfat. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, 28, dan 56 hari. Data dianalisis secara statistik menggunakan ANOVA untuk melihat signifikansi pengaruh fly ash terhadap kekuatan dan ketahanan beton. Instrumen utama yang digunakan adalah Universal Testing Machine (UTM) dan chamber uji ketahanan lingkungan.

Hasil dan Pembahasan

Hasil uji kuat tekan menunjukkan tren yang signifikan antara variasi kadar fly ash dengan kekuatan beton seiring bertambahnya umur. Beton yang mengandung 20% fly ash mencatat kekuatan tekan tertinggi pada umur 56 hari sebesar 45,6 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton konvensional (tanpa fly ash) yang hanya mencapai 41,2 MPa pada usia yang sama. Peningkatan ini menunjukkan bahwa fly ash berperan penting dalam proses pembentukan struktur mikro beton yang lebih padat dan tahan lama, terutama melalui kontribusi reaksi pozzolanik yang memperlambat namun memperkuat perkembangan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) secara berkelanjutan.

Lebih lanjut, hasil ini juga menegaskan bahwa fly ash secara signifikan mempengaruhi perkembangan kekuatan beton dalam jangka panjang, memberikan keunggulan pada struktur yang mengedepankan umur layan panjang dan ketahanan terhadap degradasi lingkungan. Karakteristik fly ash yang memperlambat reaksi hidrasi awal menyebabkan kekuatan awal beton, khususnya pada umur 7 hari, berada di bawah beton normal, yang merupakan konsekuensi dari substitusi sebagian semen dengan material mineral yang bereaksi lambat. Namun, meskipun demikian, laju peningkatan kekuatan antara umur 7 hingga 56 hari pada beton fly ash jauh lebih besar.

Sebagai contoh, peningkatan kekuatan dari umur 7 ke 28 hari pada beton fly ash 20% mencapai lebih dari 50%, sementara beton normal hanya meningkat sekitar 30% pada rentang umur yang sama. Hal ini mengindikasikan bahwa fly ash berfungsi sebagai bahan pengisi dan pemicu reaksi sekunder yang meningkatkan kekuatan struktural jangka panjang. Pengaruh ini menjadi sangat penting dalam konteks konstruksi modern yang membutuhkan keseimbangan antara efisiensi ekonomi, performa struktural, dan keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, penggunaan fly ash pada kadar tertentu dapat dijadikan strategi optimal untuk mencapai beton berkinerja tinggi (high-performance concrete) yang efisien dari segi biaya dan ramah lingkungan.

Pada pengujian kuat lentur yang dilakukan terhadap balok beton bertulang, pola yang diamati serupa dengan pengujian tekan. Campuran beton dengan fly ash 20% menghasilkan momen patah terbesar dibandingkan dengan campuran lainnya, menunjukkan bahwa fly ash tidak hanya memberikan kontribusi terhadap kekuatan tekan, tetapi juga memperbaiki kinerja struktural secara keseluruhan. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan ikatan antara pasta semen dan agregat halus serta interaksi yang lebih baik antara beton dan tulangan baja. Keberadaan fly ash dalam campuran dipercaya meningkatkan kerapatan mikrostruktur beton, yang pada gilirannya memperkuat penyaluran tegangan antara beton dan tulangan saat menerima beban lentur.

Secara mikrostruktur, kehadiran fly ash membantu membentuk pasta semen yang lebih rapat dan homogen melalui pengurangan porositas dan peningkatan jumlah produk hidrasi sekunder. Kondisi ini menciptakan permukaan antarmuka yang lebih kuat antara beton dan baja tulangan, yang dikenal sebagai ITZ (interfacial transition zone). Penguatan pada zona transisi ini mengoptimalkan penyaluran gaya dari beton ke tulangan, sehingga meningkatkan kapasitas lentur dan mengurangi risiko retak awal.

Selain itu, fly ash juga berfungsi sebagai filler yang mampu mengisi celah-celah mikroskopik dalam campuran beton, memperbaiki tekstur dan kepadatan. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa balok

beton dengan fly ash memiliki pola retak yang lebih sempit dan lebih lambat berkembang dibandingkan dengan beton tanpa fly ash, yang mencerminkan peningkatan keuletan dan deformabilitas material. Hal ini menjadi aspek penting dalam mendesain struktur tahan gempa atau struktur yang menerima beban dinamis tinggi, karena mampu menyerap energi lebih baik sebelum terjadi keruntuhan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan fly ash pada kadar yang tepat, seperti 20%, mampu meningkatkan performa lentur beton bertulang secara menyeluruh—baik dari sisi kekuatan, durabilitas, maupun perilaku deformasi. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan pemanfaatan fly ash dalam desain struktural modern sebagai langkah menuju efisiensi material, performa tinggi, dan keberlanjutan lingkungan.

Lebih lanjut, hasil pengujian ketahanan terhadap penetrasi air menunjukkan bahwa fly ash memiliki peran penting dalam meningkatkan durabilitas beton. Campuran beton dengan 30% fly ash memperlihatkan performa tertinggi dalam menahan penetrasi air, ditandai dengan tingkat porositas yang paling rendah di antara seluruh sampel. Meskipun demikian, campuran dengan kadar fly ash sebesar 30% juga mengalami penurunan kekuatan tekan dan lentur dibandingkan dengan campuran 20%. Ini menunjukkan adanya trade-off antara durabilitas dan kekuatan struktural. Dalam praktik konstruksi, pemilihan kadar fly ash perlu mempertimbangkan jenis struktur yang dibangun, eksposur lingkungan, serta kebutuhan kekuatan awal dan jangka panjang.

Temuan dalam penelitian ini juga diperkuat oleh literatur terdahulu, seperti yang dikemukakan oleh Malhotra dan Mehta (2010), yang menyatakan bahwa fly ash berkontribusi terhadap peningkatan performa jangka panjang beton melalui mekanisme pengisian pori dan reaksi pozzolanik sekunder yang menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan. Proses ini tidak hanya meningkatkan kekuatan akhir beton, tetapi juga menurunkan permeabilitas dan memperbaiki ketahanan terhadap serangan kimia, seperti sulfat dan klorida, yang umum dijumpai pada lingkungan laut dan kawasan industri.

Penelitian lain seperti oleh Siddique (2011) dan Paya et al. (2013) juga mendukung klaim bahwa pemanfaatan fly ash dalam beton berdampak positif terhadap aspek durabilitas jangka panjang, khususnya dalam pengurangan retak akibat susut kering dan ekspansi akibat reaksi alkali-agregat. Dengan demikian, konsistensi antara hasil penelitian ini dengan referensi sebelumnya memperkuat validitas temuan bahwa fly ash adalah salah satu bahan tambahan yang paling menjanjikan dalam pengembangan beton modern berperforma tinggi.

Namun, perlu dicatat bahwa manfaat tersebut sangat tergantung pada beberapa variabel penting, termasuk proporsi penggunaan fly ash dalam campuran, jenis fly ash berdasarkan asal dan komposisinya (kelas F atau C), ukuran partikel, serta kondisi curing yang diterapkan. Sebagai contoh, curing yang buruk dapat menghambat perkembangan reaksi pozzolanik dan berujung pada hasil yang kurang optimal. Oleh karena itu, penggunaan fly ash memerlukan pemahaman yang komprehensif tentang karakteristik material dan parameter desain campuran yang tepat.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan praktik teknologi beton ramah lingkungan. Dengan mengacu pada literatur terdahulu dan hasil empiris terkini, pemanfaatan fly ash dapat dilihat sebagai strategi praktis dalam menjawab tantangan global terkait pengurangan emisi karbon dari industri konstruksi, sekaligus meningkatkan kualitas dan umur layanan infrastruktur yang dibangun.

Implikasi dari hasil ini cukup signifikan dalam konteks praktik konstruksi modern yang semakin mengarah pada efisiensi sumber daya, keberlanjutan, dan pengurangan jejak karbon. Penerapan fly ash sebagai bahan tambahan dalam beton bertulang bukan hanya memberikan keuntungan teknis berupa peningkatan kekuatan tekan dan lentur jangka panjang, tetapi juga menawarkan solusi material yang lebih ramah lingkungan dibandingkan semen Portland konvensional. Penurunan konsumsi semen melalui substitusi sebagian dengan fly ash berkontribusi langsung terhadap pengurangan emisi karbon dioksida, yang menjadi isu krusial dalam industri konstruksi global.

Penggunaan fly ash juga berdampak pada perpanjangan umur layanan struktur, dengan memperbaiki ikatan beton dengan tulangan, meningkatkan densitas mikrostruktur, dan memperkuat ketahanan terhadap lingkungan agresif seperti paparan sulfat, karbonasi, dan siklus pembekuan-pencairan. Efek ini sangat relevan untuk struktur infrastruktur jangka panjang seperti jalan raya, jembatan, terowongan, dan bangunan tinggi yang menghadapi kondisi beban dan lingkungan yang ekstrem.

Namun demikian, penggunaan fly ash secara berlebihan dapat membawa risiko negatif, terutama pada fase awal pengerasan. Penurunan kekuatan awal beton dapat menjadi kendala dalam proyek konstruksi yang mengandalkan kecepatan progres struktural, seperti gedung bertingkat tinggi, struktur pracetak, atau proyek dengan jadwal padat. Dalam kasus seperti ini, diperlukan pendekatan desain campuran yang lebih presisi, termasuk pemilihan jenis fly ash yang reaktif dan penyesuaian waktu curing.

Optimalisasi proporsi fly ash menjadi langkah penting agar dapat menyeimbangkan aspek mekanis, durabilitas, dan keberlanjutan. Penelitian ini mengidentifikasi kadar optimal fly ash sebesar 20% dari total berat semen sebagai kompromi terbaik, di mana kombinasi antara peningkatan kekuatan jangka panjang dan ketahanan lingkungan tercapai tanpa mengorbankan kekuatan awal secara signifikan. Komposisi ini juga sejalan dengan standar teknis yang direkomendasikan dalam berbagai literatur internasional mengenai beton berperforma tinggi.

Lebih jauh, adopsi fly ash dalam industri konstruksi juga mendukung inisiatif ekonomi sirkular, karena memanfaatkan limbah industri (hasil samping pembakaran batu bara) menjadi produk bernilai tambah. Hal ini menjadikan fly ash bukan sekadar bahan aditif, tetapi juga elemen penting dalam strategi berkelanjutan sektor konstruksi. Dengan meningkatnya regulasi lingkungan dan target net-zero carbon di berbagai negara, pemanfaatan material seperti fly ash akan menjadi kunci dalam mendesain infrastruktur masa depan yang tangguh, efisien, dan rendah emisi.

Dengan demikian, temuan dari penelitian ini memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan beton bertulang yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga mendukung visi global menuju pembangunan berkelanjutan. Implementasi fly ash yang terukur dan berbasis bukti ilmiah dapat menjadi standar baru dalam praktik konstruksi yang bertanggung jawab secara ekologis dan ekonomis.

Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa abu terbang (fly ash) dapat digunakan secara efektif sebagai material tambahan dalam beton bertulang untuk meningkatkan kekuatan mekanis dan ketahanan terhadap lingkungan. Berdasarkan hasil uji laboratorium yang dilakukan, persentase fly ash sebesar 20% dari total berat semen menunjukkan performa paling optimal, baik dalam hal kekuatan tekan maupun kuat lentur, serta ketahanan terhadap penetrasi air. Pada umur 56 hari, beton dengan 20% fly ash menunjukkan kekuatan tekan sebesar 45,6 MPa, yang lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, serta memberikan momen lentur tertinggi pada pengujian balok beton bertulang. Ini membuktikan bahwa fly ash berkontribusi pada pembentukan mikrostruktur beton yang lebih rapat dan homogen, yang pada akhirnya meningkatkan interaksi antara pasta semen dan baja tulangan.

Dari aspek durabilitas, penggunaan fly ash secara signifikan menurunkan porositas beton dan meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air, serangan kimia, serta kondisi lingkungan agresif lainnya. Meskipun komposisi fly ash sebesar 30% menunjukkan daya tahan tertinggi terhadap penetrasi air, kekuatan mekanisnya mengalami penurunan yang cukup berarti, sehingga tidak direkomendasikan untuk struktur yang menuntut kekuatan awal tinggi. Oleh karena itu, pemilihan komposisi fly ash perlu mempertimbangkan kebutuhan spesifik dari proyek konstruksi, termasuk jadwal pelaksanaan, eksposur lingkungan, dan beban struktural yang diterima.

Selain kontribusinya dalam aspek teknis, penggunaan fly ash juga membawa manfaat lingkungan yang substansial. Dengan menggantikan sebagian semen Portland, fly ash membantu menurunkan emisi

karbon dioksida yang dihasilkan dari proses produksi semen, serta mendukung pengurangan limbah industri melalui pemanfaatan hasil samping pembakaran batu bara. Ini menjadikan fly ash sebagai salah satu solusi paling praktis dalam upaya transisi menuju material konstruksi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Temuan ini selaras dengan berbagai penelitian terdahulu yang menekankan pentingnya reaksi pozzolanik dan peran fly ash dalam meningkatkan kualitas jangka panjang beton. Namun demikian, diperlukan kehati-hatian dalam aplikasinya, terutama pada proyek yang memerlukan kekuatan awal tinggi, karena sifat fly ash yang memperlambat proses hidrasi dapat menjadi kendala dalam jadwal konstruksi yang ketat.

Sebagai tindak lanjut, penelitian ini merekomendasikan studi lanjutan yang lebih mendalam untuk menganalisis pengaruh fly ash terhadap parameter lain seperti susut plastis dan kering, perubahan mikrostruktur beton secara waktu nyata (time-lapse SEM/XRD), serta pengaruhnya terhadap performa struktural dalam skala penuh dan pada berbagai tipe struktur seperti pelat, kolom, atau struktur modular pracetak. Penelitian numerik dan simulasi berbasis model mikrostruktur juga dapat membantu memprediksi performa jangka panjang beton dengan fly ash dalam berbagai kondisi operasional.

Dengan mempertimbangkan seluruh aspek teknis dan keberlanjutan yang telah dibahas, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan fly ash pada kadar yang tepat berpotensi menjadi standar baru dalam desain beton bertulang modern—yang tidak hanya unggul dalam performa, tetapi juga selaras dengan tuntutan global terhadap pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan dan bertanggung jawab.

Daftar Pustaka

- Atmaca, N., Abbas, M. L., & Atmaca, A. (2017). Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 147, 17–26.
- Barger, G. S., Hansen, E. R., Wood, M. R., Neary, T., Beech, D. J., & Jaquier, D. (2001). Production and use of calcined natural pozzolans in concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 23(2), 73–80.
- Boğa, A. R., & Topçu, İ. B. (2012). Influence of fly ash on corrosion resistance and chloride ion permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 31, 258–264.
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2005). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 27(4), 425–428. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.003
- Hossain, K. M. A. (2004). Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283–291. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00127-3
- Hunggurami, E., Bolla, M. E., & Messakh, P. (2017). Perbandingan Desain Campuran Beton Normal Menggunakan SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 165–172.
- Malhotra, V. M. (2002). High-performance high-volume fly ash concrete. *Concrete International*, 24(7), 30–34.
- Mehta, P. K. (2014 [sic]). “Reducing the Environmental Impact of Concrete.” *Concrete International*, 36(2), 61–66. Tanggal asli publikasi ditemukan sebagai tahun 2001, volume 23(10), pp. 61–66.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete* (Vol. 4). London: Longman.
- Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*, 32(3), 1501–1507.
- Shukla, B. K., Gupta, A., Gowda, S., & Srivastav, Y. (2023). Constructing a greener future: A comprehensive review on the sustainable use of fly ash in the construction industry and beyond. *Materials Today: Proceedings*, 93, 257–264.
- Thomas, M. (2007). *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete*. Portland Cement Association.

-
- Van den Heede, P., Fourniere, J., & De Belie, N. (2013). Influence of air entraining agents on deicing salt scaling resistance and transport properties of high-volume fly ash concrete. *Cement and Concrete Composites*, 37, 293–303. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.01.005
- Zhang, M. H., & Malhotra, V. M. (1996). High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *ACI Materials Journal*, 93, 629–636.