

KAJIAN PEMANFAATAN *FLY ASH* SEBAGAI *SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL* UNTUK *GREEN CONCRETE DEVELOPMENT*

Clara Sinta Pramesti Dewi¹, Grezfio Rahmatulloh Setiawan¹, Nur Annisa¹, Syahda Ekayaniputri Anwarawati¹, Yenny Nurchasanah^{1*}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

*Email: yn205@ums.ac.id

Abstrak

Perkembangan pesat di sektor konstruksi meningkatkan permintaan terhadap semen Portland sebagai elemen utama beton, yang menyebabkan lonjakan emisi karbon dioksida (CO₂). Oleh karena itu, sangat krusial untuk mengembangkan inovasi material konstruksi yang lebih berkelanjutan dengan menggunakan *fly ash* sebagai Bahan Pengganti Semen (SCM) dalam pembuatan beton hijau. Studi ini bertujuan untuk menyelidiki pemanfaatan *fly ash* sebagai solusi bagi konstruksi yang ramah lingkungan dan rendah emisi dengan memperhatikan aspek pembangunan, ekonomi, serta lingkungan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian pustaka, melalui analisis berbagai jurnal nasional yang membahas penggunaan *fly ash* dalam beton. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen dapat meningkatkan kekuatan tekan, memperbaiki mikrostruktur beton, mengurangi porositas, serta meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif seperti sulfat dan klorida melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H). Di samping itu, penggunaan *fly ash* dapat mengurangi penggunaan semen Portland, sehingga menekan emisi CO₂ dan mendukung prinsip konstruksi yang ramah lingkungan. Dari perspektif ekonomi, penggunaan *fly ash* dinilai lebih efisien karena dapat mengurangi biaya pembuatan beton dan menjadikan limbah industri PLTU sebagai bahan yang bernilai lebih. Dengan cara ini, *fly ash* memperlihatkan potensi besar sebagai alternatif material dalam pembuatan beton yang lebih ramah lingkungan (*green concrete*), berkualitas tinggi, ekonomis, dan rendah emisi karbon.

Kata kunci: beton ramah lingkungan, *Fly Ash*, *green concrete*, konstruksi berkelanjutan

Abstract

The swift progress in the construction sector heightens the demand for Portland cement as the primary element of concrete, resulting in a surge of carbon dioxide (CO₂) emissions. It is essential to develop more sustainable construction material innovations by incorporating fly ash as a Cement Substitute Material (SCM) in the production of green concrete. This research seeks to examine the application of fly ash as a solution for sustainable, low-emission construction by analyzing construction, economic, and environmental factors. The approach taken in this research is a literature review, involving the examination of several national journals that explore the use of fly ash in concrete. The findings indicate that incorporating fly ash as a partial substitute for cement can enhance compressive strength, refine concrete microstructure, decrease porosity, and boost concrete durability against harsh environments like sulfate and chloride through a pozzolanic reaction generating Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) compounds. Furthermore, employing fly ash can decrease Portland cement usage, which in turn lowers CO₂ emissions and aligns with sustainable construction principles. From an economic viewpoint, utilizing fly ash is seen as more efficient since it can lower the expenses of concrete production and convert industrial waste from PLTU into a valuable material. Consequently, fly ash demonstrates substantial promise as a substitute material in creating more eco-friendly concrete (green concrete) that is of high quality, cost-effective, and produces low carbon emissions.

Keywords: *eco-friendly concrete, Fly Ash, green concrete, sustainable construction*

1. PENDAHULUAN

Peningkatan infrastruktur di Indonesia terus terlihat dalam beberapa tahun terakhir, terutama pada proyek jalan, jembatan, dan fasilitas umum lainnya. Beton merupakan salah satu bahan yang kerap dimanfaatkan sepanjang sejarah dan masih menjadi pilihan utama di berbagai penjuru dunia. Beton, selaku bahan bangunan, adalah komposit yang dihasilkan melalui penggabungan semen Portland, air, dan agregat seperti pasir serta kerikil, dan bisa ditambahkan dengan beragam bahan tambahan seperti aditif mineral, kimia,

dan serat (Bara, 2025). Industri semen terus menghadapi isu sosial yang terkait dengan meningkatnya jumlah limbah dan tantangan dalam pengolahan. Selain itu, kerusakan lingkungan yang ditimbulkan oleh *pen depletion* sumber daya dan pencemaran global akibat gas rumah kaca yang dihasilkan oleh pembuatan semen. Produksi semen yang sangat tergantung pada sumber daya alam akan sejalan dengan kerusakan lingkungan di masa depan, khususnya emisi gas dan partikel debu akibat proses pembuatan semen (Olii dkk., 2022). Keadaan itu mendorong inovasi material bangunan yang ramah lingkungan melalui pengembangan beton hijau yang menekankan pengurangan emisi karbon, efisiensi penggunaan sumber daya, serta pemanfaatan limbah industri sebagai alternatif bahan konstruksi.

Salah satu taktik yang telah banyak diteliti adalah penggunaan Material Semen Suplemen (SCM) sebagai substitusi sebagian semen. SCM merupakan material *pozzolan* atau *cementitious* yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen, sehingga menghasilkan senyawa pengikat tambahan yang dikenal sebagai *calcium silicate hydrate* (C-S-H). Penerapan SCM berperan dalam mengurangi jumlah semen yang dipakai, serta meningkatkan durabilitas, struktur mikro, dan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang keras. Pemanfaatan bahan limbah industri seperti *fly ash* dalam beton dapat meningkatkan daya tahan dan kinerja mekanik tanpa merugikan keberlanjutan lingkungan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki kemampuan signifikan dalam meningkatkan daya tekan dan ketahanan beton. Purnamasari dan lainnya. Dalam tulisan yang ditelaah oleh Amran dan rekan-rekan. Menemukan bahwa bahan ini tidak hanya memperkuat daya tahan jangka panjang beton, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dari pembuatan semen. Selain itu, penggunaan *fly ash* dalam jumlah besar pada beton dapat meningkatkan modulus elastisitas serta kekuatan tekan, menjadikannya pilihan yang tepat untuk aplikasi struktural yang lebih kuat dan tahan lama (Purnamasari dkk., 2025).

Berdasarkan penjelasan tersebut, studi mengenai pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan tambahan *cementitious* dalam pengembangan beton yang ramah lingkungan sangat penting untuk dilakukan. Artikel ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai ciri-ciri *fly ash*, mekanisme reaksi pozzolanik, pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan ketahanan beton, serta kontribusinya dalam mendukung pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon.

2. METODOLOGI

Kajian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan deskriptif kualitatif. Metode ini dilakukan dengan mengumpulkan, menganalisis, dan membandingkan berbagai sumber ilmiah yang berkaitan dengan pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen (SCM) dalam pengembangan beton yang ramah lingkungan. Metode studi literatur dipilih karena kemampuannya dalam menyajikan pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik, manfaat, dan pengaruh penggunaan *fly ash* terhadap sifat-sifat beton serta aspek keberlanjutan dalam pembangunan.

Menurut Metode Penelitian, studi deskriptif bertujuan untuk memaparkan fenomena dengan teratur menggunakan data dan informasi yang didapat dari berbagai sumber ilmiah. Selain itu, metode studi pustaka membantu peneliti dalam memperoleh data sekunder yang relevan tanpa harus melakukan eksperimen laboratorium secara langsung.

3. KONTRIBUSI *FLY ASH* SEBAGAI *SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL* TERHADAP PEMBANGUNAN KONSTRUKSI RENDAH EMISI

Sektor industri konstruksi merupakan salah satu area yang memberikan sumbangan besar terhadap emisi karbon global, terutama disebabkan oleh tingginya konsumsi semen Portland dalam produksi beton. Proses produksi semen menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan melalui pembakaran klinker serta pemanfaatan energi yang berasal dari bahan bakar fosil. Oleh karena itu, inovasi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan sangat diperlukan untuk mendukung pembangunan berkelanjutan dan konsep pembangunan dengan emisi rendah. Salah satu inovasi yang terkenal adalah penggunaan *fly ash* sebagai material semen tambahan (SCM) dalam adukan beton (Syahrul & Amir, 2024).

fly ash merupakan produk sampingan dari pembakaran batubara dalam PLTU yang memiliki kandungan silika dan alumina yang cukup tinggi, sehingga memiliki sifat pozzolanik. Sifat ini memungkinkan *fly ash* digunakan sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Pemanfaatan *fly ash* sebagai material SCM memiliki peran krusial dalam menurunkan kebutuhan akan klinker semen, yang dapat mengurangi emisi

karbon saat proses pembuatan beton. Selain itu, penggunaan limbah industri sebagai material konstruksi juga membantu mengurangi penumpukan limbah padat yang dapat mencemari lingkungan (Rommel dkk., 2014).

Penggunaan *fly ash* juga berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi energi pada beton berskala besar. Sebuah penelitian dalam proyek jembatan menunjukkan bahwa substitusi semen dengan *fly ash* hingga 24,4% mampu menurunkan suhu hidrasi beton dari 84,4°C menjadi 71,3°C. Penurunan suhu hidrasi ini sangat penting untuk mengurangi kemungkinan terjadinya retak termal pada struktur beton yang besar. Dengan berkurangnya kerusakan pada bangunan, kebutuhan untuk reparasi dan pemakaian material tambahan bisa dikurangi, sehingga mendukung efisiensi penggunaan sumber daya serta prinsip pembangunan berkelanjutan (Zakariya dkk., 2021).

Dari sudut pandang performa mekanis, penggunaan *fly ash* dalam beton dapat meningkatkan kemampuan kerja, memperbaiki mikrostruktur, dan meningkatkan kekuatan tekan pada waktu tertentu yang disajikan dalam Tabel 1. Studi mengenai penggunaan *Fly Ash* sebagai substitusi semen menunjukkan bahwa variasi penggunaan *Fly Ash* yang sesuai dapat memperkuat kekuatan tekan beton dibandingkan beton konvensional. Penemuan ini menunjukkan bahwa pengurangan emisi karbon melalui substitusi semen tidak selalu berpengaruh buruk pada kualitas beton, bahkan dalam beberapa kondisi dapat memperbaiki kinerja beton karena reaksi pozzolanik yang berlangsung secara bertahap (Muharram & Walujodjati, 2021)

Tabel 1. Hasil Uji Tekan Beton (Muharram & Walujodjati, 2021)

Campuran	Kuat tekan rata-rata (<i>Fly Ash</i>)
Dasar	10,37 MPa
1	10,57 MPa
2	11,61 MPa
3	10,28 MPa
4	9,53 MPa

5. KARAKTERISTIK DAN MANFAAT MATERIAL *FLY ASH* SEBAGAI BAHAN PENYUSUN BETON

Fly ash merupakan hasil sampingan dari proses pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang memiliki partikel kecil serta sifat pozzolanik. Material ini kerap dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian semen dalam campuran beton karena memiliki kandungan senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan kalsium oksida (CaO) yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida dari hidrasi semen, menciptakan senyawa pengikat tambahan dalam beton (Rommel dkk., 2014).

Fly Ash atau abu terbang merupakan bahan tambahan (additive) yang memiliki karakteristik pozzolan. Berdasarkan konsentrasi atau komposisi senyawa kimia, *fly ash* dapat dibedakan menjadi dua kategori, yaitu (1) Tipe F dengan kadar silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) di atas 70%, sementara kadar CaO hanya 5% dan (2) Tipe C dengan kadar silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3) di bawah 50%, sedangkan kadar CaO dapat mencapai 10%. Dengan kandungan CaO , *fly ash* tipe C berpotensi memiliki sifat pengikat ketika dicampurkan dengan air, seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Abu terbang batu bara dapat bereaksi atau menjalani proses hidrasi dengan kalsium hidroksida, sehingga menghasilkan ikatan kalsium silika hidrat. (Dewi & Gunasti, 2025).

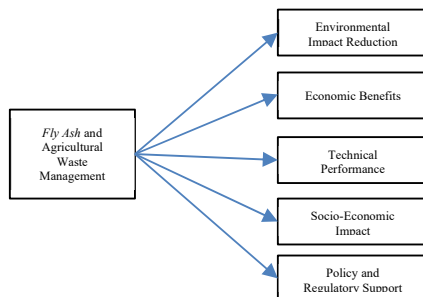
Tabel 2. Persyaratan Kimia Abu Terbang atau *fly ash* (SNI 2460-2014)

Uraian	Kelas F	Kelas C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ min, %	70	50
SO_3 , maks, %	5	5
Kadar air, maks, %	3	3
Hilang pijat, maks, %	6	0

Desain campuran beton yang mengandung 50% FA menunjukkan dampak yang lebih rendah terhadap ekotoksitas, toksisitas untuk manusia, serta penggunaan bahan bakar fosil jika dibandingkan dengan beton dengan 25% FA dan 35% FA. Peningkatan proporsi penggantian semen dengan material tambahan seperti *fly ash* merupakan salah satu alternatif paling efektif untuk mengurangi dampak emisi CO_2 dalam produksi semen. Hal ini disebabkan oleh *fly ash* dalam campuran semen Portland memerlukan proses pengolahan yang lebih singkat, sehingga memungkinkan pengurangan emisi CO_2 yang lebih signifikan. Campuran beton yang

memiliki kandungan klinker lebih sedikit menghasilkan dampak lingkungan lebih rendah dibandingkan dengan campuran beton konvensional karena emisi CO₂ yang lebih rendah dan penggunaan energi yang lebih sedikit (Muttaqien dkk., 2023).

Dari aspek keuntungan, pemanfaatan *fly ash* tidak hanya memperbaiki mutu teknis beton, tetapi juga menawarkan manfaat ekonomi dan lingkungan. *fly ash* dapat mengurangi penggunaan semen, sehingga menekan biaya produksi dan mengurangi emisi karbon dari sektor semen. Di samping itu, penggunaan *fly ash* berkontribusi dalam mengurangi limbah industri yang dapat mencemari lingkungan. Dengan cara ini, *fly ash* menjadi bahan alternatif yang efisien, ramah lingkungan, dan mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan.



Gambar 1. Pengelolaan *Fly Ash* (Irwanda dkk., 2024)

5. ANALISIS PERFORMA BETON BERBASIS *FLY ASH* TERHADAP KUAT TEKAN DAN KETAHANAN LINGKUNGAN

Beton yang terpapar lingkungan asam atau terpengaruh oleh asam bisa mengakibatkan penurunan performa beton, seperti berkurangnya kekuatan tekan beton. Sehingga, beberapa peneliti memanfaatkan *fly ash* atau abu terbang sebagai bahan tambahan atau substitusi semen untuk mengurangi dampak asam. Penambahan abu terbang ke dalam campuran beton dengan persentase 10% hingga 50% setiap kenaikan 10% menunjukkan bahwa beton yang dicampur dengan abu terbang memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan beton tanpa abu terbang terhadap pengaruh asam sulfat (Ahmad, 2011). Kuat tekan beton dan daya kerja meningkat dengan penambahan *fly ash* dari 2% hingga 20%. Penyerapan air terendah terjadi pada penambahan *fly ash* sebanyak 13% (Ginting dkk., 2025).

Kuat tekan atau compressive strength merupakan besaran yang diukur per satuan luas, yang membuat benda uji pecah saat diberikan gaya tekan tertentu dari mesin tekan (Apriyanti, 2024). Penghitungan tekanan kompresi dilakukan dengan rumus berikut ini.

$$P = \frac{F}{A} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

dengan:

P = Kuat tekan beton (kg/cm²)

F = gaya tekan aksial maksimum (kg)

A = Luas penampang melintang (cm²)

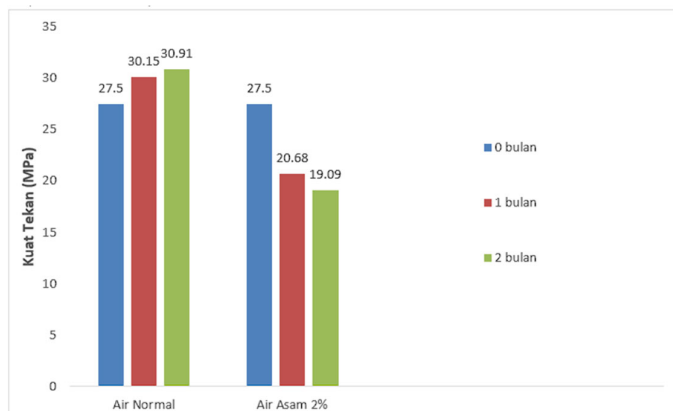
Kekuatan tekan beton yang memanfaatkan *fly ash* sebagai pengganti semen adalah 0%, 15%, 25%, dan 35%. Semakin tinggi persentase *fly ash*, semakin menurun kuat tekan beton. Penggunaan *fly ash* 25% memberikan hasil kuat tekan yang optimal, dapat dilihat pada Tabel 3 (Ginting dkk., 2025)

Tabel 3. Hasil kuat tekan beton umur 28 hari (Anggraini dkk., 2022)

No	Vasiasi <i>Fly Ash</i>	Kuat tekan <i>fc'</i> 28 hari (MPa)
1	0%	9,483
2	15%	8,776
3	25%	10,333
4	30%	9,766

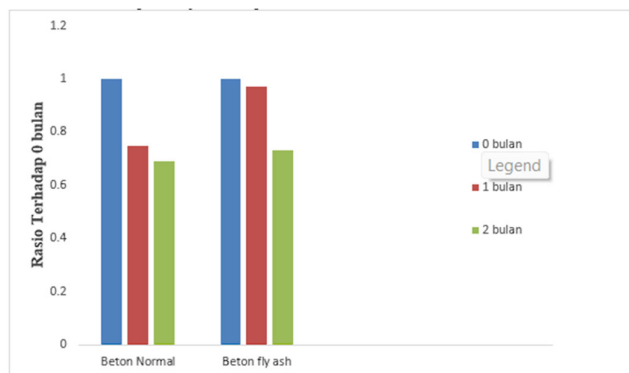
Penurunan tingkat porositas beton yang disebabkan oleh penggunaan *fly ash* juga berkontribusi pada peningkatan daya tahan beton dalam jangka panjang. Beton yang mengandung *fly ash* biasanya menunjukkan tingkat permeabilitas yang lebih rendah dibandingkan dengan beton konvensional, sehingga lebih mampu

mengatasi retak, korosi pada tulangan, dan kerusakan akibat kondisi lingkungan yang keras. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa beton yang menggunakan *fly ash* memiliki ketahanan yang lebih baik saat terpapar asam sulfat dibandingkan dengan beton tanpa tambahan *fly ash*. Di samping itu, penggunaan *fly ash* pada tingkat yang tepat dapat meningkatkan kemudahan dalam pengolahan campuran beton, berkat bentuk partikel *fly ash* yang halus dan menyerupai bola kecil, sehingga proses pencampuran menjadi lebih praktis (Sultan dkk., 2021).



Gambar 2. Kuat tekan beton normal dengan waktu perendaman berupa *file png*. (Sultan dkk, 2021)

Pada perlakuan perendaman dengan asam sulfat 2% menunjukkan penurunan kuat tekan pada waktu 1 bulan sebesar 24,79% dan 30,58% setelah direndam selama 2 bulan dan perawatan 28 hari. Dari uraian tersebut terlihat bahwa air asam dapat menyebabkan penurunan kuat tekan.



Gambar 3. Rasio penurunan kuat tekan terhadap beton 0 bulan pada perendaman larutan asam sulfat 20% berupa *file png*. (Sultan dkk., 2021)

Rasio penurunan kuat tekan pada beton normal dan beton *fly ash* terhadap lama perendaman larutan asam sulfat 2%. Beton normal maupun beton dengan bahan tambah *fly ash* akan mengalami degradasi kekuatan tekan seiring dengan lama perendaman pada air asam, namun dapat dilihat bahwa degradasi kekuatan tekan pada sampel mempunyai kecenderungan rasio penurunan pada beton dengan penambahan *fly ash* lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa *fly ash* terhadap waktu perendaman. Ini mengindikasikan bahwa dengan penambahan *fly ash* dapat membantu untuk mempertahankan kuat tekan beton akibat pengaruh larutan asam.

6. INOVASI FLY ASH SEBAGAI BETON RAMAH LINGKUNGAN PENGGANTI SEMEN UNTUK GREEN CONCRETE DEVELOPMENT

Percepatan yang signifikan dalam sektor konstruksi telah menyebabkan peningkatan permintaan semen Portland yang berfungsi sebagai komponen utama dalam beton. Namun, diketahui bahwa produksi semen menghasilkan angka emisi karbon dioksida (CO₂) yang sangat tinggi, yang berdampak buruk pada lingkungan. Oleh sebab itu, berbagai inovasi diciptakan untuk menghasilkan material konstruksi yang lebih berkelanjutan, salah satunya dengan memanfaatkan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dalam komposisi beton. *Fly ash* adalah limbah yang dihasilkan dari pembakaran batu bara di PLTU yang kaya akan silika dan alumina,

sehingga memiliki sifat pozzolanik dan dapat dimanfaatkan sebagai *Supplementary Cementitious Material* (SCM) (Olii dkk., 2023).

Pemanfaatan abu terbang dalam beton merupakan salah satu terobosan yang krusial dalam menciptakan beton ramah lingkungan karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland tanpa berdampak negatif pada kinerja beton secara signifikan. Penelitian telah membuktikan bahwa penambahan abu terbang dalam campuran beton dapat meningkatkan kekuatan tekan beton pada usia tertentu melalui reaksi pozzolanik yang membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H). Senyawa ini memainkan peranan penting dalam memperbaiki struktur mikro beton sehingga beton menjadi lebih padat, memiliki tingkat porositas yang rendah, dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang agresif seperti serangan sulfat atau klorida (Morib dkk., 2024).

Pengaplikasian *fly ash* sebagai bahan konstruksi semen tambahan (SCM) juga memiliki peran penting dalam mendukung perkembangan konsep beton ramah lingkungan. Dengan mengurangi penggunaan semen *Portland*, kita dapat menurunkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan selama tahap produksi semen. Sektor semen dikenal sebagai salah satu penyumbang emisi karbon terbesar secara global karena proses pembakaran klinker memerlukan energi yang sangat besar. Oleh karena itu, penggantian sebagian semen dengan *fly ash* menjadi alternatif yang efektif untuk menghasilkan material konstruksi yang lebih *eco-friendly* dan berkelanjutan (Olii dkk., 2023).



Gambar 4. *Fly ash* (Sulistyorini dkk, 2023)

Di sisi lain, penggunaan *fly ash* mendukung konsep ekonomi sirkular karena limbah dari pembakaran batubara yang sebelumnya terbuang bisa dimanfaatkan kembali sebagai bahan konstruksi yang memiliki nilai tambah. Inovasi ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan polusi akibat akumulasi limbah yang dihasilkan oleh industri PLTU, tetapi juga dapat meningkatkan efisiensi ekonomi dalam sektor konstruksi mengingat harga *fly ash* yang lebih terjangkau dibandingkan dengan semen Portland. Karenanya, penerapan *fly ash* dalam beton tidak hanya membantu meningkatkan kualitas material, tetapi juga merupakan langkah strategis untuk mendorong pembangunan infrastruktur yang ramah lingkungan, lebih hemat biaya, tahan lama, dan memiliki emisi karbon yang rendah.

7. FLY ASH SEBAGAI SOLUSI KONSTRUKSI BERKELANJUTAN DAN RENDAH EMISI

Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen (SCM) memberikan manfaat ekonomi yang signifikan dalam industri konstruksi. Fly ash, yang merupakan hasil limbah dari proses pembakaran batubara, memiliki biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan semen Portland, sehingga dapat mengurangi pengeluaran dalam pembuatan beton, paving block, dan berbagai material konstruksi lainnya. Selain itu, pemakaian *fly ash* juga berkontribusi pada pengurangan biaya pengelolaan limbah industri pembangkit listrik tenaga uap karena limbah yang tidak terpakai sebelumnya dapat diproses menjadi material yang memiliki nilai ekonomi. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen pada paving block dapat menghasilkan kekuatan tekan yang sesuai dengan standar kualitas, sambil juga meningkatkan efisiensi biaya produksi (Sari & Sutrisno, 2024).

7.1 Aspek Ekonomi

Dari aspek ekonomi, pemanfaatan abu terbang juga mendukung prinsip ekonomi sirkular karena limbah dari industri dapat dialihkan kembali menjadi produk pembangunan yang memiliki nilai lebih. Dalam proses pengembangan infrastruktur yang berkelanjutan, penerapan bahan yang berbasis abu terbang dianggap dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya alam serta menurunkan ketergantungan pada bahan baku semen yang memerlukan energi besar dalam tahap produksinya. Dengan cara ini, abu terbang tidak hanya

memberikan keuntungan secara teknis tetapi juga turut serta dalam penguatan ekonomi ramah lingkungan di bidang konstruksi (Ayuningtyas dkk., 2023).

7.2 Aspek Kesehatan

Pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi berkelanjutan juga memiliki hubungan yang erat dengan faktor kesehatan lingkungan. Akumulasi limbah *fly ash* yang tidak tertangani dengan baik dapat berpotensi menimbulkan pencemaran udara, terutama melalui partikel debu halus yang dapat merugikan kesehatan publik, khususnya pada sistem pernapasan. Oleh sebab itu, penggunaan *fly ash* sebagai bahan bangunan menjadi solusi efektif untuk mengurangi efek buruk limbah industri terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Inovasi dalam pengolahan *fly ash* menjadi beton, blok paving, serta material infrastruktur lainnya berkontribusi dalam mengurangi penyebaran debu limbah yang dihasilkan dari pembakaran batu bara ke lingkungan sekitarnya (Mak'sudah dkk., 2023)

Selain itu, penggunaan *fly ash* dalam beton yang lebih ramah lingkungan juga memainkan peranan penting dalam mereduksi emisi karbon dari sektor semen. Diketahui bahwa pembuatan semen Portland menghasilkan sejumlah besar emisi CO₂ yang berpengaruh pada peningkatan pemanasan global serta penurunan kualitas lingkungan. Lingkungan yang lebih bersih dan emisi yang lebih rendah secara tidak langsung membawa dampak positif bagi kesehatan masyarakat dengan mengurangi risiko pencemaran udara serta perubahan iklim yang ekstrem. Oleh karena itu, inovasi beton berbasis *fly ash* menjadi elemen krusial dalam mendukung pembangunan yang rendah emisi dan penciptaan lingkungan yang lebih sehat (Anggara dkk., 2023).

7.3 Aspek Konstruksi

Dalam industri konstruksi, *fly ash* menunjukkan kemungkinan besar sebagai bahan pengganti untuk menghasilkan beton yang lingkungan. Tingginya kandungan silika dan alumina dalam *fly ash* memberikan karakteristik pozzolanik, yang memungkinkan bahan ini bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dihasilkan dari hidrasi semen, sehingga terbentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H). Senyawa ini berfungsi untuk meningkatkan daya tekan, memperbaiki struktur mikro beton, dan meningkatkan daya tahan beton terhadap lingkungan yang bersifat agresif seperti serangan sulfat dan klorida (Febriansyah dkk., 2024).

Pemanfaatan *fly ash* dapat juga meningkatkan ketahanan beton, karena butiran *fly ash* yang sangat kecil dapat menurunkan tingkat porositas dan permeabilitas beton. Beton yang menggunakan *fly ash* memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap retakan akibat suhu dan memiliki durabilitas yang lebih lama dibandingkan dengan beton tradisional. Di samping itu, penerapan beton dengan volume *fly ash* tinggi menjadi salah satu terobosan penting dalam evolusi konstruksi beremisi rendah, karena dapat menurunkan penggunaan semen Portland dalam jumlah besar tanpa mengurangi kinerja mekanis beton secara signifikan (Anggara dkk., 2023).

Pemanfaatan *fly ash* dalam konstruksi juga berkontribusi pada ide pembangunan berkelanjutan karena membantu mengurangi limbah industri serta penambangan sumber daya alam. Inovasi ini menjadi langkah penting untuk membangun infrastruktur hijau yang lebih awet, terjangkau, dan ramah lingkungan (Mukti dkk., 2026).

8. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, *fly ash* memiliki potensi yang signifikan sebagai bahan tambahan semen (SCM) dalam perancangan beton ramah lingkungan. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dapat meningkatkan kekakuan, memperbaiki struktur mikro beton, serta meningkatkan daya tahan terhadap kondisi lingkungan yang agresif seperti sulfat dan klorida melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H).

Penggunaan *fly ash* juga berkontribusi pada konstruksi berkelanjutan dan emisi rendah karena dapat mengurangi kebutuhan akan semen portland yang merupakan penyebab utama emisi CO₂. Selain itu, penggunaan *fly ash* juga memfasilitasi pengubahan limbah PLTU menjadi material konstruksi yang memiliki nilai tambah sehingga lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Namun penelitian ini tetap terbatas pada studi literatur serta hasil pengujian laboratorium, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kinerja jangka panjang dari beton yang mengandung *fly ash* dalam kondisi nyata. Untuk itu, diharapkan pemerintah, sektor konstruksi, dan pengelola PLTU dapat memaksimalkan penggunaan *fly ash* melalui pengembangan teknologi dan penerapan material konstruksi yang berkelanjutan untuk mendukung pembangunan infrastruktur yang hijau dan rendah karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, I. (2011). Analisis Perbedaan Kuat Tekan Beton Tambahan Abu Terbang dengan Beton Normal yang Direndam Dalam Asam Sulfat untuk Beton Mutu Rendah. *Jurnal konstruksi*, 2(2), 23-30. <https://doi.org/10.24853/jk.2.2.%25p>
- Anggara, F., dkk. (2023). Pengaruh Penambahan *Fly Ash* PLTU Cirebon dan Temperatur Pengeringan Terhadap kuat Tekan Material Konstruksi Beton *High Volume Fly Ash (HFVA)*. *Jurnal Rekayasa Proses*, 17(2), 1-7. <https://doi.org/10.22146/jrekpros.77825>
- Anggraini, dkk. (2022). Penggunaan *Fly Ash* terhadap Kuat Tekan dan Porositas Beton Porous. *Jurnal Rekayasa*, 12(1), 11-25. <https://doi.org/10.37037/jrftsp.v12i1.124>
- Apriyanti, E., Chasanah, U., & Subekti, S. (2024). Pemanfaatan Material Kompositif *Fly Ash* Sebagai Bahan Substitusi pada Pembuatan Beton Ditinjau dari Uji Tekan dan Uji Porositas. *Jurnal Teknik Sipil Unpand*, 1(2), 144-151. <https://doi.org/10.69796/tbzmd16>
- Ayuningtyas, U., Rosmeika, R., & Firdaus, A. (2023). *Fly Ash* dan Bottom Ash Sebagai Material Infrastruktur Untuk Mendukung Pembangunan yang Berkelanjutan. *Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, 7, 45-52. <https://doi.org/10.33019/snppm.v7i0.4828>
- Badan Standardisasi Nasional. (2019) SNI 2460:2014. Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan *Pozzolan* Alam Mentah atau yang telah Dikalsinasi untuk Digunakan Dalam Beton. <https://share.google/NEXopalDYyIuAQAnM>
- Bara, A, A. (2025). Systematic Literatur Review: Peranan *Fly Ash*, Silika, dan Slag Sebagai Bahan Tambahan dalam Meningkatkan Kekuatan tekan Dini Beton. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 7(1), 563-571. <https://doi.org/10.53863/kst.v7i01.1729>
- Dewi, N., & Gunasti, A. (2025). Analisis Pengaruh Proporsi *Fly Ash* batu Bara Sebagai Bahan *Pozzolan* Terhadap *Workability* Beton Normal. *Journal of Engineering and Sustainable Technology*, 12(1), 10299-10305. <https://doi.org/10.31949/j-ensitec.v12i01.16145>
- Febriansyah, B., dkk. (2024). Pengaruh Penggunaan *Fly Ash* sebagai Pengganti Sebagian Semen terhadap Porositas, Laju Perkolasi, dan Kuat Tekan (*Porous Concrete*). *Journal of Civil Engineering and Sustainable Infrastructure (center)*, 1(2), 82-88. <https://doi.org/10.21831/center.v1i2.1944>
- Ginting, dkk. (2025). Perbandingan Penggunaan *Fly Ash* Dengan Kalsium Karbonat Sebagai bahan Tambah Semen. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (proteksi)*, 7(2), 119-124. <https://doi.org/10.26740/proteksi.v7n2.p119-124>
- Irwanda, dkk. (2014). *Evaluating the Socio-Economic Effect of Fly Ash and Agricultural Waste on the Construction Sector*. *Journal Integration on Management Studies*, 2(2), 196-204. <https://doi.org/10.58229/jims.v2i2.232>
- Mak'sudah, A., Saputro, Y., & Rochmanto, D. (2023). Stabilisasi Campuran *Fly Ash*, *Bottom Ash*, dan Semen Terhadap Pengaruh Nilai Kuat Tekan Bebas (*Unconfined Compression test*). *Jurnal Konstruksi & Infrastruktur*, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.33603/jki.v11i1.8614>
- Morib, M., dkk. (2024). Mix Desain dan Karakteristik teknik SCC Menggunakan *High Volume Fly Ash* Sebagai Pengganti Semen. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 20(3), 167-181. <https://doi.org/10.25077/jrs.20.3.167-181.2024>
- Muharram, M., & Walujodjati, E. (2021). Pengaruh Penggunaan *Fly Ash* Sebagai Substitusi Semen dan Limbah Kaca Sebagai Substitusi Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Konstruksi*, 19(2), 410-417. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.19-2.917>
- Mukti, H., dkk. (2026). Hybrid Interlock Brick: Integrasi *Fly Ash*-Abu Sekam Padi dan *Cyanobacteria* untuk Konstruksi Berkelanjutan Tahan Bencana di Wilayah Tropis Lembab. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 4(1), 33-46. <https://doi.org/10.61132/globe.v4i1.1312>
- Muttaqien, A., Martono, D., & Gusdini, N. (2023). Analisis Daur hidup Produksi beton *Fly Ash* sebagai Upaya Mengurangi Dampak Emisi CO₂. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(1), 68-75. <https://doi.org/10.14710/jil.21.1.68-75>
- Olii, M, R., dkk. (2022). Beton Hijau Menggunakan *Fly Ash* sebagai Substitusi Parsial Semen. *SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 11-20. <https://doi.org/10.31849/siklus.v9i1.11101>

- Punamasari, E., Antonius., & Setiyawan, P. (2025). Analisis Penggunaan *Fly Ash* Tipe F pada Beton Non Pasir sebagai *Green Concrete*. *Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 11(1), 93-102. <https://doi.org/10.30738/st.vol11.no1.a19194>
- Rommel, E., Kurniawati, D., & Pradibta, A. (2014). Perbaikan Sifat Fisik dan Reaktifitas *Fly Ash* Sebagai *Cementitious* Pada Beton. *Media Teknik Sipil*, 12(2), 111-118. <https://doi.org/10.22219/jmts.v12i2.2282>
- Sari, R., & Sutrisno, R. (2024). Analisis Pengaruh Penggunaan Limbah Pembakaran Batu Bara sebagai Substitusi Semen pada Penggunaan Campuran Paving Block. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 1(2), 10-19. <https://doi.org/10.30587/jtsl.v1i02.9518>
- Sulistyorini, D., dkk. (2023). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 dan 2,5. *Jurnal Polines*, 9(1), 106-114. <https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v9i1.4603>
- Sultan, M., Imran, I., & Faujan, M. (2021). Pengaruh Rendaman Asam Terhadap Kuat Tekan Beton Dengan Penambahan *Fly Ash*. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), 61-68. <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v11i1.367>
- Syahrul, S., & Amir. (2024). Efektifitas Pemanfaatan Material Terbuang *Fly Ash* komposisi Bahan Tambah Pengikat Bata Beton. *SEBATIK*, 28(1), 41-48. <https://doi.org/10.46984/sebatik.v28i1.2440>
- Zakariya, A., Giri, Y., & Sasri, R. (2021). Kajian Temperatur Beton Saat Proses Pengerasan Menggunakan *Fly Ash* Sebagai Bahan Tambah Semen. *Jurnal Jalan Jembatan*, 38 (2), 108-17. <https://binamarga.pu.go.id/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/issue/view/jurnal/index.php/jurnaljalanjembatan/article/view/1025>.