

## PEMANFAATAN FLY ASH DALAM BETON SCC: ANALISIS EMISI KARBON DAN KINERJA MEKANIK

Tiorivaldi<sup>1\*</sup>, Adji Putra Abriantoro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Prodi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera

<sup>2</sup>Prodi Pendidikan Teknik Bangunan, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta

\*Email: tiorivaldi@ta.itera.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi karbon beton *self-compacting concrete* (SCC) yang menggunakan fly ash dari limbah batu bara sebagai substitusi semen dalam jumlah tinggi. Substitusi dilakukan dalam variasi kadar 0%, 50%, 55%, 60% dan 65% fly ash, dengan tambahan 5% silica fume. Estimasi emisi CO<sub>2</sub> dihitung berdasarkan proporsi semen aktif dalam campuran, sedangkan efisiensi karbon didefinisikan sebagai rasio kuat tekan terhadap emisi CO<sub>2</sub> (MPa/ton). Hasil menunjukkan bahwa emisi beton menurun seiring peningkatan kadar fly ash, dengan pengurangan mencapai 68% pada kadar 65%. Efisiensi karbon tertinggi tercapai pada kadar fly ash 50%, sebesar 240,49 MPa/ton CO<sub>2</sub>. Analisis korelasi Pearson menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara kadar fly ash dan efisiensi ( $r = 0,879$ ;  $p = 0,050$ ), sementara regresi kuadratik menunjukkan bahwa kadar optimum berada pada rentang 41–50%. Temuan ini menunjukkan bahwa fly ash dari limbah batu bara dapat secara signifikan menurunkan emisi karbon tanpa mengorbankan kekuatan mekanik beton, sehingga mendukung arah pembangunan konstruksi berkelanjutan.

**Kata kunci:** beton memadat sendiri, efisiensi karbon, emisi CO<sub>2</sub>, limbah batu bara

### Abstract

This study aims to evaluate the carbon efficiency of *self-compacting concrete* (SCC) incorporating high-volume fly ash derived from coal combustion waste as a partial cement replacement. The substitution levels were varied at 0%, 50%, 55%, 60% and 65% fly ash, along with a constant addition of 5% silica fume. CO<sub>2</sub> emissions were estimated based on the active cement content, while carbon efficiency was defined as the ratio of compressive strength to CO<sub>2</sub> emissions (MPa/ton). The results show that emissions decreased with higher fly ash content, with up to a 68% reduction at 65% substitution. The highest carbon efficiency was achieved at 50% fly ash, reaching 240.49 MPa/ton CO<sub>2</sub>. Pearson correlation analysis indicated a very strong positive relationship between fly ash content and carbon efficiency ( $r = 0.879$ ;  $p = 0.050$ ), while the quadratic regression model suggested that the optimal fly ash content lies in the range of 41–50%. These findings demonstrate that coal fly ash can significantly reduce carbon emissions without compromising mechanical performance, thus supporting the development of more sustainable concrete materials.

**Keywords:** *self-compacting concrete*, carbon efficiency, CO<sub>2</sub> emissions, coal waste

## 1. PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Menteri PUPR No. 9 Tahun 2021 tentang Pedoman Penyelenggaraan Konstruksi Berkelanjutan, aspek lingkungan menjadi salah satu dari tiga pilar utama yang mendasari praktik konstruksi berkelanjutan di Indonesia, selain pilar ekonomi dan sosial (Marpaung et al., 2023). Pemanfaatan limbah industri seperti *fly ash* dalam material bangunan merupakan bentuk implementasi nyata dari pilar lingkungan tersebut.

Permintaan beton global diperkirakan akan mencapai hampir 18 miliar ton per tahun pada 2050, sejalan dengan pertumbuhan sektor konstruksi yang pesat (Arshad et al., 2021; Kelechi et al., 2022). Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan, namun produksi semen Portland yang dibutuhkan berkontribusi secara signifikan terhadap emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) global, berkisar antara 5 hingga 8% dari total emisi antropogenik dunia (Kelechi et al., 2022; Mehdi & Hosseini, 2024). Oleh karena itu, upaya untuk menggantikan sebagian semen dengan material alternatif yang berasal dari limbah industri menjadi fokus penelitian intensif untuk menekan dampak lingkungan konstruksi beton (Aulia & Siregar, 2022; Kumar et al., 2024).

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

*Fly ash* merupakan limbah hasil pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang memiliki sifat *pozzolan*, mampu bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen dan menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan beton (Kumar et al., 2024; Mustapha et al., 2020). Selain mengurangi konsumsi semen, pemanfaatan *fly ash* juga meningkatkan durabilitas beton melalui pengurangan porositas mikro dan permeabilitas, sehingga memperpanjang umur struktur beton (Alaloul et al., 2021; Khataei et al., 2024; Zhang et al., 2019).

Teknologi beton jenis *Self-Compacting Concrete* (SCC) menjadi penting dalam industri konstruksi modern karena kemampuannya mengalir dan mengisi *bekisting* tanpa memerlukan pemadatan mekanis tambahan, sehingga meningkatkan efisiensi pengerjaan, kualitas permukaan beton, serta menurunkan biaya tenaga kerja (Sobuz et al., 2024; Verma et al., 2024). Namun, pembuatan SCC secara konvensional masih menggunakan jumlah semen yang besar, yang berdampak pada tingginya emisi karbon (Kelechi et al., 2022; Verma et al., 2024).

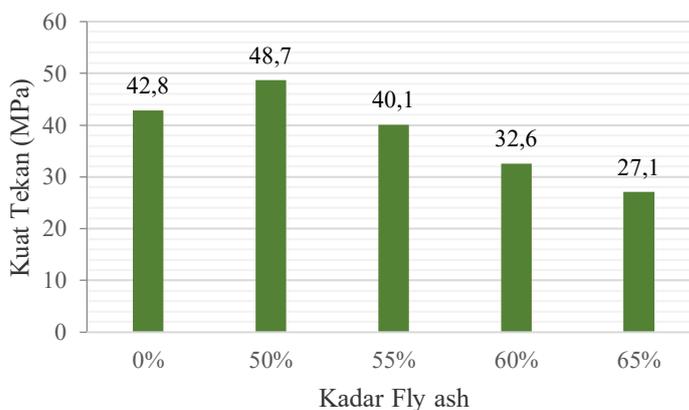
Studi sebelumnya oleh Tiorivaldi dan Abriantoro (2024) mengeksplorasi penggunaan *fly ash* dalam proporsi tinggi (*High Volume Fly Ash* atau HVFA) dengan penambahan 5% *silica fume* dalam beton SCC. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan 50% *fly ash* memberikan keseimbangan optimal antara kuat tekan (48,7 MPa), *flowability* (750 mm), dan permeabilitas (58,7 mm), menunjukkan bahwa *fly ash* memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan performa beton sekaligus menurunkan konsumsi semen Portland. (Tiorivaldi & Abriantoro, 2024).

Data eksperimental dalam penelitian ini diadopsi dari penelitian sebelumnya oleh penulis mengenai HVFA SCC (Tiorivaldi & Abriantoro, 2024), dengan penekanan baru pada analisis aspek keberlanjutan dan efisiensi CO<sub>2</sub>. Meski demikian, evaluasi mendalam mengenai kontribusi HVFA SCC terhadap pengurangan emisi karbon secara eksperimental dan analisis siklus hidup (*Life Cycle Analysis/LCA*) masih terbatas (Khataei et al., 2024; Saini & Singh, 2024). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi secara spesifik penggunaan HVFA dalam SCC, dengan fokus pada kuat tekan, permeabilitas, serta estimasi emisi karbon berdasarkan konsumsi semen dalam campuran beton. Diharapkan, hasil penelitian ini dapat memberikan pedoman pengembangan beton ramah lingkungan serta mendukung agenda pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi (Akbulut et al., 2024; Priya et al., 2020).

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini bersifat kuantitatif-deskriptif dengan pendekatan analisis sekunder terhadap data eksperimental yang telah diperoleh dari studi terdahulu (Tiorivaldi & Abriantoro, 2024). Penelitian tersebut menguji karakteristik beton *Self Compacting Concrete* (SCC) dengan variasi kadar *fly ash* sebesar 0%, 50%, 55%, 60%, dan 65%, serta penambahan *silica fume* sebesar 5% dari total binder. Data yang digunakan meliputi nilai kuat tekan (*compressive strength*) dan permeabilitas beton pada umur 28 hari.



Sumber: Hasil Penelitian (2024)

Gambar 1. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Kuat Tekan Umur 28 Hari

Gambar 1 menunjukkan pengaruh variasi kadar fly ash pada beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) terhadap kuat tekan umur 28 hari. Terlihat bahwa penambahan *fly ash* hingga kadar 50% mampu meningkatkan kuat tekan beton dari 42,8 MPa (0% *fly ash*) menjadi 48,7 MPa. Namun, pada kadar fly ash di atas 50% (55%, 60%, dan 65%), kuat tekan mengalami penurunan berturut-turut menjadi 40,1 MPa, 32,6 MPa, dan 27,1 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dalam proporsi tinggi dapat meningkatkan performa beton hingga titik optimum, tetapi kelebihan kadar *fly ash* justru menurunkan kekuatan beton akibat berkurangnya jumlah semen sebagai sumber utama kalsium hidroksida untuk reaksi pozzolanik.

Dalam penelitian ini, data tersebut dianalisis ulang untuk mengevaluasi efisiensi lingkungan campuran beton, dengan menghitung jumlah emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan berdasarkan kadar semen aktif, serta menilai efisiensi kuat tekan per ton emisi CO<sub>2</sub>.

### 3.2 Estimasi Emisi CO<sub>2</sub>

Analisis emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dalam beton sangat penting untuk menilai sejauh mana suatu campuran beton dapat berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan. Dalam penelitian ini, emisi CO<sub>2</sub> dihitung berdasarkan jumlah semen aktif yang digunakan pada setiap variasi kadar fly ash dalam campuran beton *Self-Compacting Concrete* (SCC).

Perhitungan emisi karbon dilakukan dengan mengacu pada pendekatan umum *Life Cycle Assessment* (LCA) tahap *cradle to gate*, khususnya emisi yang dihasilkan dari proses produksi semen. Berdasarkan literatur, produksi 1 ton semen portland menghasilkan rata-rata 0,90 ton CO<sub>2</sub> (Damtoft et al., 2008). *Fly ash* dan *silica fume* dalam penelitian ini dianggap tidak menghasilkan emisi langsung, karena dikategorikan sebagai limbah industri yang tidak memerlukan proses produksi tambahan (Benhelal et al., 2013).

Emisi total dihitung berdasarkan jumlah semen (dalam kg/m<sup>3</sup> beton) yang digunakan pada tiap campuran:

$$Emisi\ CO_2\ (ton/m^3) = \left( \frac{berat\ semen\ (kg/m^3)}{1000} \times 0,90 \right)$$

### 3.3 Efisiensi Kuat Tekan terhadap Emisi

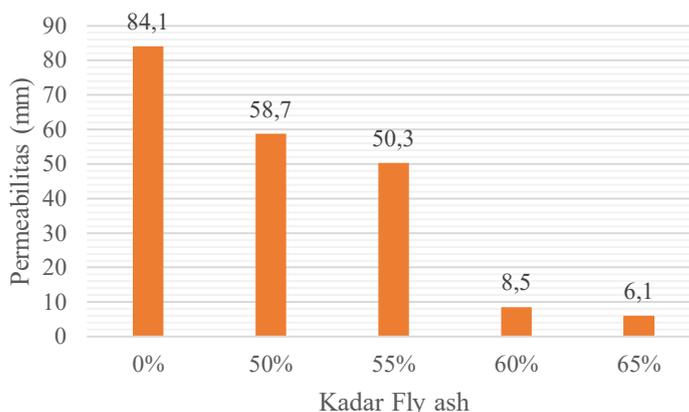
Efisiensi kuat tekan terhadap emisi CO<sub>2</sub> merupakan indikator kinerja keberlanjutan beton yang mengukur kemampuan campuran beton dalam menghasilkan kekuatan struktural per satuan emisi karbon yang ditimbulkan. Semakin tinggi nilai efisiensi ini, maka semakin efisien suatu campuran beton dalam menghasilkan kekuatan tanpa membebani lingkungan. Rasio efisiensi kekuatan tekan (*compressive strength efficiency*) dihitung dengan rumus:

$$Efisiensi\ (MPa/ton\ CO_2) = \frac{kuat\ tekan\ (MPa)}{emisi\ CO_2\ (ton/m^3)}$$

Nilai efisiensi ini digunakan sebagai indikator performa lingkungan dari masing-masing campuran, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan penggunaan semen yang lebih efektif secara karbon.

### 3.4 Kriteria Evaluasi

Selain kuat tekan, parameter permeabilitas juga digunakan untuk menilai ketahanan beton terhadap penetrasi air, sebagai bagian dari aspek durabilitas. Kombinasi antara kuat tekan tinggi, permeabilitas rendah, dan emisi CO<sub>2</sub> yang rendah menjadi dasar untuk menentukan komposisi campuran beton paling berkelanjutan.



Sumber: Hasil Penelitian (2024)

**Gambar 2. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Permeabilitas Umur 28 Hari**

Gambar 2 menunjukkan pengaruh variasi kadar *fly ash* pada beton *Self- Compacting Concrete* (SCC) terhadap permeabilitas pada umur 28 hari. Permeabilitas tertinggi terjadi pada beton tanpa *fly ash* (0%) yaitu 84,1 mm. Dengan penambahan *fly ash* 50% dan 55%, permeabilitas menurun signifikan menjadi 58,7 mm dan 50,3 mm. Penurunan lebih tajam terjadi pada kadar *fly ash* 60% dan 65%, masing-masing sebesar 8,5 mm dan 6,1 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* secara umum mampu mengurangi permeabilitas beton, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi air dan mendukung peningkatan durabilitas beton.

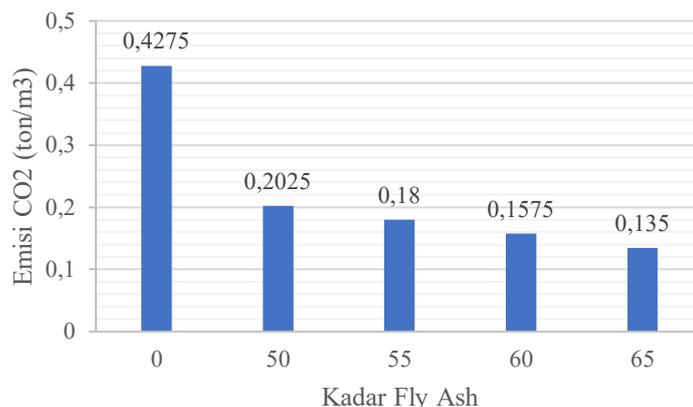
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Emisi CO<sub>2</sub>

Dalam analisis ini, berat total binder yang digunakan diasumsikan sebesar 500 kg/m<sup>3</sup>, mengacu pada rekomendasi standar EFNARC yang menyebutkan bahwa total bahan pengikat dalam beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) berkisar antara 380–600 kg/m<sup>3</sup> (EFNARC, 2005). Angka 500 kg/m<sup>3</sup> dipilih sebagai nilai representatif di tengah rentang tersebut untuk menjamin konsistensi pengujian pada setiap variasi kadar *fly ash*. Dengan asumsi kadar *silica fume* tetap sebesar 5% dari total binder, maka porsi semen portland aktif ditentukan berdasarkan pengurangan *fly ash* dan *silica fume*.

**Tabel 1. Emisi CO<sub>2</sub> Beton SCC dengan Variasi Kadar Fly Ash**

Kadar <i>Fly Ash</i> (%)	Kadar <i>Silica Fume</i> (%)	Semen Aktif (kg/m <sup>3</sup> )	Emisi CO <sub>2</sub> (ton/m <sup>3</sup> )
0	5	475	0,4275
50	5	225	0,2025
55	5	200	0,18
60	5	175	0,1575
65	5	150	0,135



Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

**Gambar 3. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Emisi CO<sub>2</sub>**

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa seiring meningkatnya kadar *fly ash*, jumlah semen aktif yang digunakan dalam campuran beton menurun secara linear, yang berdampak langsung pada penurunan emisi CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> beton. Pada kadar *fly ash* 0% (tanpa *fly ash*), beton mengandung 475 kg semen, menghasilkan emisi CO<sub>2</sub> sebesar 0,4275 ton/m<sup>3</sup>. Ketika *fly ash* ditingkatkan menjadi 50%, emisi menurun drastis menjadi 0,2025 ton/m<sup>3</sup>, atau setara dengan penurunan sebesar 52,65%. Pada kadar *fly ash* tertinggi yang diuji (65%), emisi bahkan hanya sebesar 0,135 ton/m<sup>3</sup>, mencerminkan reduksi hingga 68% dibanding beton konvensional.

Penurunan ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sangat efektif dalam mengurangi emisi karbon, khususnya pada kadar penggantian ≥50%. Hal ini diperkuat oleh penelitian Benhelal et al. (2013) yang menyatakan bahwa penggantian semen dengan *fly ash* sebesar 50–70% dapat menurunkan emisi CO<sub>2</sub> hingga 60% (Benhelal et al., 2013), sejalan dengan hasil penelitian ini. Selain itu, hasil ini konsisten dengan studi lain, yang menyatakan bahwa kontribusi terbesar terhadap jejak karbon beton berasal dari semen portland, dan bahwa substitusi SCM (*supplementary cementitious materials*) seperti *fly ash* sangat efektif dalam menekan emisi (Flower & Sanjayan, 2007).

Lebih lanjut, penelitian lain menunjukkan bahwa substitusi semen dengan *fly ash* dalam jumlah tinggi (sekitar 50-60%) berpotensi menurunkan emisi beton hingga kurang dari 0,20 ton CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, tergantung pada jenis semen dan sumber material pengganti yang digunakan. (Habert et al., 2011). Dengan demikian, hasil estimasi emisi pada penelitian ini yang berada dalam kisaran 0,18–0,36 ton CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> tetap berada dalam rentang yang kompetitif secara lingkungan dan sesuai dengan tren beton berkelanjutan.

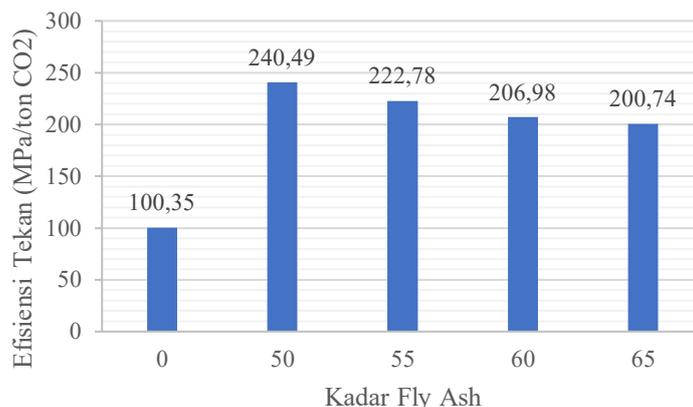
Namun, perlu dicatat bahwa meskipun emisi karbon terus menurun pada kadar *fly ash* yang tinggi, penurunan performa mekanik (yang dibahas pada bagian selanjutnya) dapat menjadi kendala dalam penerapannya untuk beton struktural berperforma tinggi. Dengan demikian, keseimbangan antara pengurangan emisi dan pemenuhan syarat teknis menjadi isu penting dalam aplikasi nyata HVFA SCC.

#### 4.2 Efisiensi Kuat Tekan terhadap Emisi CO<sub>2</sub>

Kuat tekan pada umur 28 hari diambil dari hasil eksperimen sebelumnya (Tiorivaldi & Abriantoro, 2024), sementara emisi CO<sub>2</sub> diambil dari hasil perhitungan pada Tabel 1 di bagian sebelumnya.

**Tabel 2. Efisiensi Kuat Tekan terhadap Emisi CO<sub>2</sub>**

Kadar Fly Ash (%)	Kuat Tekan (MPa)	Emisi CO <sub>2</sub> (ton/m <sup>3</sup> )	Efisiensi Tekan (MPa/ton CO <sub>2</sub> )
0	42,9	0,4275	100,35
50	48,7	0,2025	240,49
55	40,1	0,18	222,78
60	32,6	0,1575	206,98
65	27,1	0,135	200,74



Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

**Gambar 4. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Efisiensi Kuat Tekan**

Hasil pada Tabel 2 dan Gambar 4 menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* secara signifikan meningkatkan efisiensi karbon beton. Campuran dengan 50% *fly ash* mencapai efisiensi tertinggi, yaitu 240,49 MPa/ton CO<sub>2</sub>, artinya setiap ton CO<sub>2</sub> yang dilepaskan dari produksi semen mampu menghasilkan 240,49 MPa kekuatan tekan dalam satu meter kubik beton.

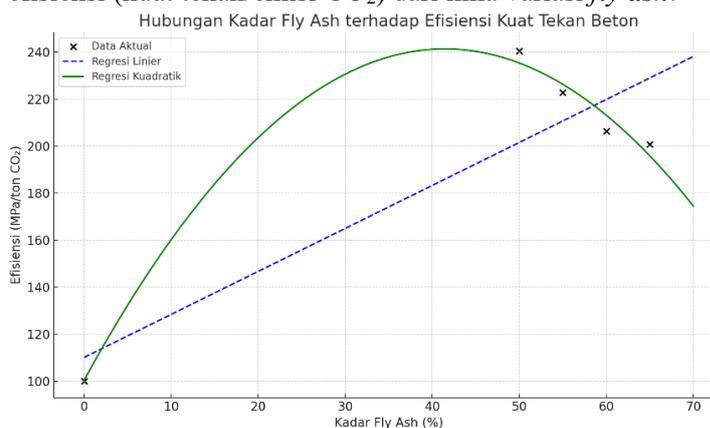
Sebaliknya, beton tanpa *fly ash* (0%) hanya mencapai efisiensi sebesar 100,35 MPa/ton CO<sub>2</sub>. Ini berarti bahwa penggunaan *fly ash* mampu meningkatkan efisiensi karbon lebih dari dua kali lipat, terutama pada kadar penggantian 50%.

Nilai efisiensi mulai menurun ketika kadar *fly ash* melebihi 55%, karena meskipun emisi CO<sub>2</sub> menurun, penurunan kuat tekan terjadi lebih cepat. Hal ini mengindikasikan adanya titik optimum antara efisiensi karbon dan performa struktural pada kadar *fly ash* sekitar 50–55%.

Temuan ini sejalan dengan hasil studi Habert et al. (2011), yang menunjukkan bahwa efisiensi karbon beton (rasio kekuatan terhadap emisi) mencapai nilai optimum pada tingkat substitusi *fly ash* antara 40–60%, tergantung pada kondisi *curing* dan mutu bahan baku yang digunakan. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan keberlanjutan pada beton tidak hanya ditentukan oleh kadar *fly ash* semata, tetapi juga oleh sistem produksi dan pengendalian mutu beton secara menyeluruh. (Habert et al., 2011). Studi lain oleh Faraj et al. (2019) juga menunjukkan penggunaan *fly ash* dalam proporsi tinggi mampu menurunkan emisi karbon beton secara signifikan, tanpa mengorbankan kekuatan tekan. Hasil efisiensi karbon dalam penelitian ini, dengan nilai maksimum mencapai 240,49 MPa/ton CO<sub>2</sub>, menunjukkan potensi kompetitif secara internasional meskipun belum tersedia banyak standar global kuantitatif yang mematok rentang efisiensi tersebut. (Faraj et al., 2019).

### 4.3 Hubungan Kadar Fly Ash terhadap Efisiensi Kuat Tekan Beton

Untuk mengevaluasi pengaruh kadar *fly ash* terhadap efisiensi karbon beton, dilakukan analisis statistik menggunakan *software* SPSS meliputi korelasi Pearson, regresi linier, dan regresi kuadratik menggunakan data efisiensi (kuat tekan/emisi CO<sub>2</sub>) dari lima variasi *fly ash*.



Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

**Gambar 5. Hubungan Kadar HVFA-SCC terhadap Efisiensi Kuat Tekan**

Gambar 5 menunjukkan hubungan kadar *fly ash* terhadap efisiensi kuat tekan beton (kuat tekan per emisi CO<sub>2</sub>) beserta hasil analisis regresi linier dan kuadrat. Data aktual memperlihatkan bahwa efisiensi meningkat seiring penambahan *fly ash* hingga mencapai puncak pada kadar sekitar 50%, dengan nilai tertinggi mendekati 240 MPa/ton CO<sub>2</sub>. Setelah melewati kadar tersebut, efisiensi mengalami penurunan meskipun tetap lebih tinggi dibandingkan beton tanpa *fly ash*. Kurva regresi kuadrat memberikan kecocokan (fit) yang lebih baik dibandingkan regresi linier, menunjukkan adanya titik optimum penggunaan *fly ash* untuk mencapai efisiensi karbon maksimum.

**a. Korelasi Pearson**

Analisis korelasi Pearson menghasilkan koefisien sebesar  $r = 0.879$  dengan nilai signifikansi  $p = 0.050$ , menunjukkan hubungan positif yang sangat kuat dan signifikan secara statistik antara kadar *fly ash* dan efisiensi kuat tekan beton.

Hasil ini mendukung hipotesis bahwa penggunaan *fly ash* dalam campuran beton SCC dapat meningkatkan efisiensi kuat tekan terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Korelasi positif yang kuat memperkuat temuan pada bagian sebelumnya, di mana *fly ash* sebanyak 50% menghasilkan efisiensi tertinggi, dan selanjutnya mulai menurun meskipun tetap tinggi.

Namun demikian, nilai  $p = 0.050$  juga menunjukkan bahwa hasil ini berada di batas ambang signifikansi. Dengan kata lain, jika data bertambah ( $N > 5$ ), maka validitas statistik akan lebih kuat, dan kesimpulan akan lebih meyakinkan.

**b. Regresi Linier**

Untuk memahami sejauh mana kadar *fly ash* (%) dapat memprediksi efisiensi karbon beton, dilakukan analisis regresi linier sederhana. Dalam hal ini kadar *fly ash* sebagai variabel bebas dan efisiensi kuat tekan sebagai variabel terikat. Model regresi linier diperoleh:

$$Efisiensi = 100,195 + 1,828 \cdot Fly\ Ash$$

Hasil regresi memperkuat analisis korelasi sebelumnya bahwa terdapat hubungan positif signifikan antara kadar *fly ash* dengan efisiensi karbon. Nilai R<sup>2</sup> sebesar 0.773 menunjukkan bahwa *fly ash* menjadi faktor dominan dalam meningkatkan efisiensi kuat tekan terhadap emisi CO<sub>2</sub>.

Model ini juga memperkuat bahwa penggunaan *fly ash* dalam rentang 50–60% tidak hanya mengurangi emisi, tetapi juga menghasilkan rasio kekuatan terhadap emisi yang tinggi. Hal ini mendukung hasil studi terdahulu yang menyatakan bahwa beton HVFA sangat berpotensi meningkatkan performa lingkungan dengan tetap mempertahankan kekuatan mekanik (Marinković et al., 2010; Mehta, 2004).

Namun demikian, karena nilai signifikansi berada tepat pada batas (0.050), serta jumlah data masih terbatas (N=5), disarankan untuk melakukan penambahan data eksperimen pada rentang *fly ash* lebih luas agar model menjadi lebih kuat dan generalisasi menjadi lebih valid.

**c. Regresi Linier Berganda**

Untuk mendapatkan pemodelan yang lebih akurat, dilakukan regresi linier berganda dengan memasukkan variabel kuadrat dari *fly ash*. Persamaan regresinya adalah:

$$Efisiensi = 100,5 + 6,798 \cdot Fly\ Ash - 0,082 \cdot Fly\ Ash^2$$

Model ini menghasilkan R<sup>2</sup> = 0.992 dan  $p = 0.008$ , menunjukkan fit yang sangat baik dan signifikan secara statistik. Nilai negatif pada koefisien *fly ash* menandakan adanya titik optimum, di mana efisiensi meningkat hingga kadar tertentu dan kemudian menurun.

Untuk mendapatkan kadar *fly ash* yang memberikan efisiensi maksimum, digunakan rumus turunan dari fungsi kuadrat:

$$Fly\ Ash_{optimum} = -\frac{B1}{2 \cdot B2} = -\frac{6,798}{2 \cdot (-0,082)} \approx 41,45\%$$

Namun karena data penelitian hanya dari 0–65%, dan nilai efisiensi tertinggi secara aktual terjadi pada 50%, maka model ini secara empiris cocok digunakan dalam rentang 0–65% saja. Angka 41.45% mungkin menunjukkan bahwa titik puncak sejati berada sedikit di bawah data eksperimen yang tersedia, atau model cenderung *overshoot* karena keterbatasan data.

#### 4.4 Keterbatasan Teknis Penggunaan *Fly Ash* Tinggi

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dalam proporsi tinggi mampu menurunkan emisi karbon secara signifikan, terdapat beberapa keterbatasan teknis yang perlu diperhatikan. Penggunaan *fly ash* di atas 60% cenderung menyebabkan perkembangan kuat tekan yang lebih lambat pada umur awal, sehingga berpotensi membatasi aplikasinya pada proyek yang membutuhkan kekuatan awal cepat. Selain itu, meskipun permeabilitas menurun, aspek durabilitas jangka panjang seperti ketahanan terhadap karbonasi, serangan sulfat, dan siklus beku-cair masih memerlukan kajian lanjutan. Dengan demikian, penerapan HVFA-SCC pada konstruksi nyata harus mempertimbangkan keseimbangan antara manfaat lingkungan dan pemenuhan standar teknis jangka panjang.

#### 4.5 Implikasi Praktis Penggunaan HVFA-SCC

Selain aspek teknis laboratorium, penerapan HVFA-SCC di lapangan juga dipengaruhi oleh ketersediaan material dan faktor ekonomi. Di Indonesia, ketersediaan *fly ash* relatif tinggi karena sebagian besar pembangkit listrik masih menggunakan batu bara, sehingga potensi pemanfaatannya sebagai bahan pengganti semen cukup besar (Aulia & Siregar, 2022). Dari sisi biaya, penggunaan *fly ash* umumnya lebih ekonomis dibandingkan semen Portland karena merupakan limbah industri yang banyak tersedia, sehingga dapat menurunkan harga produksi beton apabila sistem rantai pasok dan distribusinya dikelola dengan baik (Mehta, 2004).

Namun, terdapat pula beberapa keterbatasan. Tidak semua daerah memiliki akses langsung ke sumber *fly ash*, sehingga biaya transportasi dapat memengaruhi keekonomian campuran beton ramah lingkungan ini (Habert et al., 2011). Selain itu, penggunaan *fly ash* dalam kadar tinggi sering memerlukan penambahan aditif kimia seperti superplasticizer atau silika fume untuk menjaga *workability* dan durabilitas, yang dapat meningkatkan biaya campuran secara keseluruhan (Mustapha et al., 2021). Dengan demikian, keberhasilan implementasi HVFA-SCC di lapangan tidak hanya ditentukan oleh hasil teknis laboratorium, tetapi juga oleh aspek ketersediaan material, efisiensi biaya, serta strategi pengendalian mutu dalam praktik konstruksi nyata.

### 5. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon sekaligus peningkatan efisiensi kuat tekan. Berdasarkan perhitungan estimasi emisi CO<sub>2</sub>, peningkatan kadar *fly ash* sebanding dengan penurunan emisi karbon yang dihasilkan akibat penurunan proporsi semen aktif, dengan reduksi emisi mencapai 68% pada penggunaan 65% *fly ash* dibandingkan beton normal. Efisiensi karbon, yang dinyatakan sebagai rasio kuat tekan terhadap emisi CO<sub>2</sub>, menunjukkan peningkatan signifikan pada kadar *fly ash* 50%, dengan nilai tertinggi sebesar 240,49 MPa/ton CO<sub>2</sub>. Setelah kadar tersebut, efisiensi mulai menurun seiring bertambahnya *fly ash*, meskipun tetap lebih tinggi dibanding beton normal. Analisis statistik memperkuat temuan tersebut, dengan uji korelasi Pearson ( $r = 0,879$ ;  $p = 0,050$ ), model regresi linier ( $R^2 = 0,773$ ), dan regresi kuadrat ( $R^2 = 0,992$ ) yang menunjukkan titik efisiensi optimum pada kadar *fly ash* sekitar 41–50%. Dengan demikian, komposisi campuran yang optimal berada pada kadar *fly ash* sekitar 50% dengan tambahan 5% silika fume, karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara kuat tekan, permeabilitas rendah, serta efisiensi emisi karbon, sehingga berpotensi diaplikasikan pada elemen beton non-struktural, jalan dengan beban ringan, serta panel pracetak. Untuk memperkuat hasil ini, penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan fokus pada umur beton di atas 28 hari untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan mekanik dan durabilitas jangka panjang, termasuk ketahanan terhadap karbonasi, serangan sulfat, maupun kondisi lingkungan agresif lainnya agar implementasi HVFA-SCC semakin dapat diandalkan pada konstruksi nyata.

### DAFTAR PUSTAKA

Akbulut, Z. F., Yavuz, D., Tawfik, T. A., Smarzewski, P., & Guler, S. (2024). Enhancing Concrete Performance through Sustainable Utilization of Class-C and Class-F Fly Ash: A Comprehensive Review. *Sustainability*, 16(12), 4905. <https://doi.org/10.3390/su16124905>

- Alaloul, W. S., Musarat, M. A., Haruna, S., Law, K., Tayeh, B. A., Rafiq, W., & Ayub, S. (2021). Mechanical Properties of Silica Fume Modified High-Volume Fly Ash Rubberized Self-Compacting Concrete. *Sustainability*, 13(10), 5571. <https://doi.org/10.3390/su13105571>
- Arshad, M. T., Ahmad, S., Khitab, A., & Hanif, A. (2021). Synergistic use of fly ash and silica fume to produce high-strength self-compacting cementitious composites. *Crystals*, 11(8), 915. <https://doi.org/10.3390/cryst11080915>
- Aulia, M. R., & Siregar, M. J. (2022). A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Journal of Cleaner Materials*, 3, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.jclemat.2022.100034>
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- EFNARC. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*, May, 63. <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- Faraj, R. H., Sherwani, A. F. H., & Daraei, A. (2019). Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *Journal of Building Engineering*, 25, 100808. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100808>
- Flower, D. J. M., & Sanjayan, J. G. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5), 282–288. <https://doi.org/10.1065/lca2007.05.327>
- Habert, G., d'Espinose de Lacaillerie, J. B., Roussel, N., & Al., E. (2011). An environmental evaluation of geopolimer based concrete production: reviewing current research trends. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 1229–1238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.03.012>
- Kelechi, S. E., Adamu, M., Mohammed, A., Obianyo, I. I., Ibrahim, Y. E., & Alanazi, H. (2022). Equivalent CO<sub>2</sub> emission and cost analysis of green self-compacting rubberized concrete. *Sustainability*, 14(1), 137. <https://doi.org/10.3390/su14010137>
- Khataei, M., Mohammadhosseini, H., Ghasemi, M., & Tayeh, B. A. (2024). Environmental assessment of fiber-reinforced self-compacting concrete containing class-F fly ash. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 237, pp. 412–423). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-69626-8_32)
- Kumar, S., Kumar, R., Rai, B., & Samui, P. (2024). Prediction of compressive strength of high-volume fly ash self-compacting concrete with silica fume using machine learning techniques. *Construction and Building Materials*, 438, 136933. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136933>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30(11), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Marpaung, B., Tiorivaldi, T., Abriantoro, A. P., Widyaningrum, T., & Susilowati, S. E. (2023). Pengenalan Pilar Konstruksi Berkelanjutan Guna Meningkatkan Pemahaman akan Lingkungan dan Disparitas Sosial & Konsep Perencanaan Renovasi Kantor RW. *KAMI MENGABDI*, 3(2), 6–10. <https://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/km/article/view/7162>
- Mehdi, M., & Hosseini, S. (2024). Enhancing sustainability in self-compacting concrete by optimizing SCM integration. *Scientific Reports*, 14, 2456. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62499-w>
- Mehta, P. K. (2004). High-performance, high-volume fly ash concrete for sustainable development. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, 3–14.
- Mustapha, F. A., Sulaiman, A., Mohamed, R. N., & Umara, S. A. (2020). The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121403. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121403>
- Mustapha, F. A., Sulaiman, A., Mohamed, R. N., & Umara, S. A. (2021). The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete. *Materials Today: Proceedings*, 39,

- 965–969. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.493>
- Priya, C. C., Rao, M. V. S., Reddy, V. S., & Shrihari, S. (2020). High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete with Lime and Silica Fume as Additives. *E3S Web of Conferences*, 184, 01109. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401109>
- Saini, B., & Singh, M. (2024). The influence of fiber and fly ash additions on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 92, 106985. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.106985>
- Sobuz, M. H. R., Aditto, F. S., Datta, S. D., Kabbo, M. K. I., Jabin, J. A., Hasan, N. M. S., Khan, M. M. H., Rahman, S. M. A., Raazi, M., & Zaman, A. A. U. (2024). High-Strength Self-Compacting Concrete Production Incorporating Supplementary Cementitious Materials: Experimental Evaluations and Machine Learning Modelling. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1), 67. <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00707-7>
- Tiorivaldi, T., & Abriantoro, A. P. (2024). Studi eksperimental High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC) dengan penambahan 5% silica fume terhadap sifat reologi dan mekanik. *Jurnal Teknologi Dan Konstruksi Berkelanjutan*, 9(1), 25–35.
- Verma, P., Kumar, R., Mukherjee, S., & Sharma, M. (2024). Sustainable self-Compacting concrete with marble slurry and fly ash: Statistical modeling, microstructural investigations, and rheological characterization. *Journal of Building Engineering*, 94(1), 109785. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109785>
- Zhang, Y., Liu, M., Xie, H., & Wang, Y. (2019). Mechanical properties of self-compacting high-performance concrete with fly ash and silica fume. *SN Applied Sciences*, 1(33). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1746-z>