

## **Inovasi Material dalam Beton Berkelanjutan: Studi Literatur tentang Pemanfaatan *Fly Ash* dengan Peningkatan Kekuatan Beton**

*Innovation in Sustainable Concrete Materials: A Literature Review on the Utilization of Fly Ash for Enhanced Concrete Strength*

Fetty Febriasti Bahar<sup>1</sup>, Septo Wiranto<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

<sup>2</sup>Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

Email: [1fetty.febriasti@unja.ac.id](mailto:fetty.febriasti@unja.ac.id), [2septo.wiranto@gmail.com](mailto:septo.wiranto@gmail.com)

*Article history: Received 12-11-2023, Accepted 23-02-2024, Published 29-02-2024*

### **Abstrak**

Peningkatan jumlah penduduk berdampak langsung pada kebutuhan infrastruktur yang mendorong inovasi dalam teknologi beton guna meningkatkan kualitas, efisiensi, dan keberlanjutan. Produksi beton, khususnya penggunaan semen Portland, berkontribusi besar terhadap emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) serta eksploitasi sumber daya alam, sehingga diperlukan alternatif material yang lebih ramah lingkungan. Salah satu inovasi yang berkembang adalah pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan substitusi maupun tambahan dalam campuran beton. *Fly ash* merupakan limbah industri dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batubara yang memiliki sifat pozzolanik, sehingga dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton dalam jangka panjang. Penelitian ini menggunakan metode *literature review* untuk mengkaji berbagai inovasi material beton yang mendukung keberlanjutan lingkungan. Berdasarkan hasil penelitian, *fly ash* memiliki potensi besar sebagai material tambahan dalam campuran beton guna meningkatkan kekuatan serta mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Kombinasi *fly ash* dengan material lain juga dapat dilakukan. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan komposisi optimal yang dapat memastikan kualitas beton tetap terjaga tanpa mengorbankan aspek keberlanjutan.

**Kata kunci:** Inovasi; material pengganti semen; kuat tekan beton.

### **Abstract :**

*The increase in population directly impacts the demand for infrastructure, driving innovations in concrete technology to enhance quality, efficiency, and sustainability. Concrete production, particularly the use of Portland cement, significantly contributes to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions and the exploitation of natural resources, necessitating more environmentally friendly material alternatives. One emerging innovation is the utilisation of fly ash as a substitute or supplementary material in concrete mixtures. Fly ash is an industrial byproduct from coal-fired power plants that possesses pozzolanic properties, enabling it to improve the strength and durability of concrete over time. This study employs a literature review method to examine various concrete material innovations that support environmental sustainability. Based on the findings, fly ash demonstrates great potential as an additive in concrete mixtures to enhance strength while reducing the environmental impact of the construction industry. The combination of fly ash with other materials is also possible. However, further research is required to determine the optimal composition that ensures concrete quality without compromising sustainability aspects.*

**Keywords:** Innovation; cement replacement materials; concrete compressive strength.

## 1. Pendahuluan

Indonesia, sebagai salah satu negara dengan populasi terbesar di dunia, terus mengalami peningkatan jumlah penduduk setiap tahunnya. Dengan pertumbuhan penduduk yang meningkat setiap tahun, kebutuhan akan fasilitas publik seperti jalan, jembatan, gedung pemerintahan, sekolah, dan infrastruktur lainnya semakin meningkat untuk mendukung serta mengembangkan kualitas sumber daya manusia di negara ini. Ketidakseimbangan antara pertumbuhan penduduk dan kapasitas infrastruktur dapat berakibat pada berbagai permasalahan, seperti kemacetan dan keterbatasan akses layanan publik [1].

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan pesat dalam dunia konstruksi telah meningkatkan permintaan terhadap material bangunan yang lebih kuat, tahan lama, dan ramah lingkungan. Beton, sebagai salah satu material utama dalam industri konstruksi, terus mengalami inovasi untuk menyesuaikan dengan tantangan modern, seperti efisiensi energi, keberlanjutan, dan pengurangan emisi karbon. Namun, ketergantungan yang tinggi terhadap bahan baku konvensional seperti semen Portland dan agregat menimbulkan berbagai permasalahan, termasuk eksploitasi sumber daya alam dan dampak lingkungan yang signifikan [2]. Oleh karena itu, diperlukan pencarian alternatif baru dalam teknologi beton, seperti penggunaan bahan tambahan inovatif, beton ramah lingkungan, serta teknik produksi yang lebih efisien guna memastikan pembangunan yang berkelanjutan dan berdaya saing tinggi di masa depan.

Sebagai respons terhadap tantangan ini, berbagai inovasi material dan teknologi telah dikembangkan untuk meningkatkan kekuatan beton sekaligus mengurangi dampak ekologisnya. Salah satu pendekatan utama adalah pemanfaatan material pengganti semen seperti *fly ash*, *slag*, *silica fume*, dan bahan pozzolan lainnya yang berperan sebagai substitusi parsial semen guna menekan emisi karbon serta meningkatkan ketahanan beton dalam jangka panjang [3]. Selain itu, inovasi dalam penggunaan agregat alternatif seperti agregat daur ulang dari limbah konstruksi, plastik daur ulang, dan abu vulkanik telah menunjukkan potensi dalam menciptakan beton yang lebih ramah lingkungan tanpa mengorbankan kualitas strukturalnya. Tak hanya itu, berbagai bahan tambahan seperti serat alami (serat kelapa, serat bambu), nanomaterial (nano-silika, graphene), serta bahan berbasis biopolimer juga telah dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan mekanis, ketahanan terhadap retak, serta fleksibilitas beton dalam menghadapi beban dinamis.

Dalam konteks ini, kajian literatur ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai inovasi material dalam beton berkelanjutan serta menganalisis pengaruhnya terhadap peningkatan kekuatan beton. Fokus utama dalam studi ini adalah meninjau peran *fly ash* sebagai bahan campuran beton. *Fly ash* cukup populer menjadi bahan campuran beton dikarenakan memiliki beberapa sifat kimiawi yang serupa dengan semen, sehingga dianggap dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen [4]. Penggunaan *fly ash* dalam beton memberikan manfaat positif bagi lingkungan karena membantu mengurangi dampak limbah industri batu bara. Saat ini, pengelolaan *fly ash* masih terbatas pada penimbunan di lahan kosong, yang menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih efektif dan ramah lingkungan dalam pengelolaannya [5]. Dengan demikian, substitusi semen dengan material alternatif seperti *fly ash* tidak hanya mengurangi ketergantungan pada material primer, tetapi juga meminimalkan limbah konstruksi yang berakhir di tempat pembuangan akhir. Penelitian-penelitian ini menegaskan bahwa inovasi dalam penggunaan material pengganti semen memiliki potensi besar dalam menciptakan sistem konstruksi yang lebih efisien, berkelanjutan, serta mampu meningkatkan performa teknis beton.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan studi literatur yang bertujuan untuk menganalisis dan mengevaluasi efektivitas *fly ash* sebagai material pengganti semen maupun bahan tambahan beton dalam meningkatkan kekuatan beton berkelanjutan. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan, seleksi, analisis, dan sintesis data dari berbagai penelitian terdahulu yang membahas inovasi material pengganti semen serta dampaknya terhadap sifat mekanis beton, khususnya kuat tekan.

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif dengan metode studi kepustakaan (*literature review*). Kajian ini dilakukan dengan mengumpulkan data sekunder dari penelitian-penelitian terdahulu untuk memahami efektivitas dan dampak penggunaan material *fly ash* sebagai pengganti semen maupun bahan tambah dalam tujuan meningkatkan kuat tekan beton serta keberlanjutannya dalam industri konstruksi.

Langkah-langkah dalam desain penelitian ini mencakup:

1. Eksplorasi teori dan konsep terkait inovasi material dalam beton berkelanjutan.
2. Evaluasi hasil penelitian sebelumnya mengenai pengaruh material pengganti semen terhadap kuat tekan dan ketahanan beton.
3. Analisis perbandingan berbagai jenis material pozzolan serta efektivitasnya dalam meningkatkan performa beton.
4. Identifikasi tantangan dan peluang penerapan material pengganti semen dalam industri konstruksi.

### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

#### Pemanfaatan Fly Ash sebagai Material Pozzolan Pengganti Semen

Beton merupakan material yang terbentuk dari campuran semen hidraulik, air, agregat kasar, serta agregat halus, dengan atau tanpa tambahan zat aditif, yang menghasilkan massa padat yang stabil dan memiliki kekerasan tinggi [6]. Dalam teknik sipil, keberlanjutan adalah usaha untuk membangun infrastruktur dengan memperhitungkan dampak lingkungan yang ditimbulkan. Sebagai bahan konstruksi yang sering digunakan dalam pembangunan, produksi beton berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), terutama dalam produksi semen. Semen sebagai bahan perekat utama dalam beton memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama akibat proses industrinya yang dapat menyebabkan degradasi lingkungan dan emisi karbon yang tinggi. Industri semen merupakan penyumbang besar masalah lingkungan global, terutama akibat emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang mempercepat pemanasan global. Selain CO<sub>2</sub>, industri ini juga melepaskan polutan berbahaya lainnya, seperti debu, karbon monoksida (CO), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>s), sulfur oksida (SO<sub>x</sub>s), serta zat beracun seperti dioksin, furan, logam berat, hidrogen klorida (HCl), dan hidrogen fluorida (HF) [7].

*Fly ash* merupakan salah satu material yang semakin populer sebagai bahan pencampur beton karena ketersediaannya yang melimpah. Abu terbang atau *fly ash* adalah produk sampingan dari industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar. Material ini berbentuk butiran halus, ringan, bundar, tidak porous, dan memiliki sifat pozzolanik. Penambahan *fly ash* dalam campuran beton memberikan sifat pozzolan, sehingga dapat berfungsi sebagai *additive* mineral yang meningkatkan kualitas beton. Pozzolan sendiri adalah material yang mengandung silika atau kombinasi silika dan aluminium, yang bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida pada suhu normal untuk membentuk senyawa dengan sifat *cementitious* [8].

Sebuah penelitian dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi *fly ash* sebesar 10%, 12,5%, 15%, 20%, dan 25% dari total volume semen terhadap kuat tekan beton. Setelah variasi 10%, kuat tekan tertinggi berturut-turut ditemukan pada variasi 12,5%, 15%, 20%, dan 25%, menunjukkan bahwa jumlah *fly ash* yang digunakan berpengaruh terhadap perkembangan kuat tekan beton. Beton tanpa *fly ash* memiliki kuat tekan awal yang lebih tinggi dibandingkan beton dengan campuran *fly ash*, yang cenderung lebih rendah pada tahap awal. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* dalam campuran beton memiliki daya ikat awal yang rendah. Namun, seiring waktu, kuat tekan beton normal mengalami perlambatan, sedangkan beton dengan *fly ash* justru mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan [8].

Tabel 1. Hasil Penelitian Beton dengan *Fly Ash* sebagai Substitusi Semen [8]

Jenis Benda Uji	%Kadar Fly Ash	Rata rata Kuat Tekan Berdasarkan Umur Benda Uji	
		7 hari	28 hari
Beton Normal	0 %	24,421	28,134
BMT 1	10 %	19,996	30,77
BMT 2	12,5 %	18,226	28,94
MBT 3	15 %	17,35	25,83
BMT 4	20 %	15,602	24,04
BMT 5	25 %	15,042	20,60

Peningkatan kuat tekan yang terjadi pada persentase 10% ini terjadi karena aktivitas pozzolan yang terus berlangsung, sehingga meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton dalam jangka panjang. Meskipun demikian, penambahan *fly ash* perlu dikontrol dengan baik, karena jika jumlahnya berlebihan justru dapat menurunkan kuat tekan beton. Oleh karena itu, proporsi yang tepat sangat diperlukan agar manfaat *fly ash* dalam meningkatkan kinerja beton tetap optimal tanpa mengorbankan kekuatannya.

Sebagai pembandingan, terdapat inovasi penggunaan *fly ash* dengan volume yang lebih besar dan disebut sebagai beton *High Volume Fly Ash* (HVFA). HVFA merupakan jenis beton yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti minimal 50% dari total semen sebagai bahan pengikat [9]. Penelitian yang dilaksanakan oleh [10] menguji kuat tekan beton dengan campuran tinggi *fly ash* pada umur 7 hari, 14 hari, 21 hari dan 28 hari. Penambahan persentase *fly ash* sebesar 30%, 40%, 50%, 60%, 70% memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada presentase *fly ash* 30% yaitu sebesar 24,18 MPa untuk umur beton 28 hari. Dan nilai kuat tekan terendah pada presentase 70% yaitu sebesar 3,645 MPa untuk umur beton 7 hari. Meskipun menghadapi tantangan dalam mencapai kuat tekan beton yang tinggi, HVFA terus berkembang dan semakin banyak digunakan dalam konstruksi berkelanjutan, seperti bangunan, jalan raya, dan proyek infrastruktur besar. Dengan kombinasi material tambahan yang tepat, HVFA dapat menjadi solusi inovatif dalam industri beton modern.

Tabel 2. Hasil Penelitian Beton HVFA [10]

Persentase <i>Fly Ash</i>	Kuat Tekan Beton (MPa)			
	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari
0 %	15,07	16,85	19,01	24,83
30 %	14,18	14,2	16,41	24,18
40 %	9,02	11,09	12,45	15,3
50 %	7,09	7,64	9,13	12,28
60 %	5,26	6,62	6,74	8,02
70 %	3,65	4,39	4,66	4,79

Berdasarkan pada kedua riset tersebut, peningkatan kuat tekan beton dengan material pengganti semen/ pozzolan sangat bergantung pada komposisi campuran, kadar substitusi, dan tingkat reaktivitas material pozzolan. Jika jumlah pozzolan yang ditambahkan terlalu tinggi tanpa perbandingan yang seimbang dengan air dan semen, maka dapat menyebabkan pengurangan *workability* atau kemudahan dalam pengecoran. Selain itu, penggunaan pozzolan dalam kadar yang terlalu tinggi juga dapat memperpanjang waktu hidrasi dan pengerasan beton, yang dapat berdampak negatif pada kecepatan konstruksi. Oleh karena itu, penggunaan pozzolan dalam beton harus dirancang secara optimal, dengan mempertimbangkan faktor seperti jenis material pozzolan, persentase substitusi, dan kondisi lingkungan tempat beton akan digunakan. Dengan pendekatan yang tepat, penggunaan pozzolan dapat menjadi solusi efektif dalam menghasilkan beton berkualitas tinggi yang lebih kuat, lebih tahan lama, serta lebih ramah lingkungan.

### **Inovasi Pemanfaatan Kombinasi Fly Ash dan Material Lain sebagai Bahan Tambah Campuran Beton**

Tidak hanya terbatas pada penggunaan *fly ash*, saat ini telah berkembang berbagai inovasi dalam pencampuran beton dengan mengombinasikan *fly ash* bersama material lain, seperti serbuk kaca, slag nikel, abu sekam padi, serta limbah industri lainnya. Kombinasi ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas dan keberlanjutan beton dalam konstruksi.

Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh [2] mengeksplorasi lebih lanjut mengenai kombinasi *fly ash*. Penelitian yang dilakukan dilakukan untuk memperoleh nilai kuat tekan beton campuran limbah berupa *fly ash* sebagai substitusi semen dan cangkang kerang sebagai substitusi agregat halus. 3 Variasi benda uji dibuat dengan mensubstitusikan semen sebanyak 10% dengan *fly ash* pada setiap benda uji dan mensubstitusi agregat halus berturut-turut 5%, 10%, dan 15% agregat halus dengan cangkang kerang. Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan pada hari ke-7, ke-14 dan ke-28 dan menghasilkan hasil bahwa semakin banyak campuran cangkang kerang maka kuat tekan beton semakin menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun *fly ash* memberikan kontribusi positif terhadap kekuatan beton [8], pemilihan dan proporsi material substitusi lainnya juga perlu diperhatikan untuk memastikan kualitas beton yang optimal.

Tabel 3. Hasil Penelitian Beton dengan Fly Ash dan Cangkang Kerang [2]

Kode Benda Uji	% Campuran Benda Uji dan Bahan Substitusi Semen	% Campuran Benda Uji dan Bahan Substitusi Agregat halus	Hasil Uji Kuat Tekan Beton (MPa)		
			Hari - 7	Hari - 14	Hari - 28
BUFC 2-1	10% Fly Ash	5% Cangkang Kerang	18,6	22,1	23,9
BUFC 2-2	10% Fly Ash	10% Cangkang Kerang	17,9	21,1	23,3
BUFC 2-3	10% Fly Ash	15% Cangkang Kerang	17	20,1	22,5

Berbeda dengan penelitian sebelumnya, [11] melakukan studi dengan memanfaatkan material bukan sebagai substitusi unsur penyusun beton, melainkan sebagai bahan tambahan. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan limbah industri, dengan *fly ash* dan serbuk kaca sebagai bahan tambah. Beton yang diteliti memiliki mutu karakteristik K-300, dengan 45 benda uji yang terdiri dari lima variasi campuran dan diuji pada usia 3, 7, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan fly ash sebesar 5% dan serbuk kaca 18% menghasilkan kuat tekan optimal sebesar 312,81 Kg/cm<sup>2</sup> pada usia 28 hari. Namun, peningkatan kadar serbuk kaca hingga 21% menyebabkan penurunan kuat tekan. Dengan demikian, penambahan *fly ash* dan serbuk kaca dapat meningkatkan kuat tekan beton karakteristik, tetapi jika kadar serbuk kaca terlalu tinggi, justru dapat menurunkan kekuatannya. Selain itu, semakin tinggi kandungan *fly ash* dan serbuk kaca dalam campuran beton, nilai *slump* cenderung mengalami penurunan.

Tabel 4. Hasil Penelitian Beton dengan Fly Ash dan Serbuk Kaca [11]

No.	Variasi Campuran	Kuat Tekan Beton Karakteristik		
		3 Hari	7 Hari	28 Hari
1	Beton Normal	139,26	202,17	307,01
2	Beton Normal + Fly Ash (5%) + Serbuk Kaca 1 (18%)	151,13	211,75	312,81
3	Beton Normal + Fly Ash (5%) + Serbuk Kaca 2 (21%)	146,42	199,97	306,00
4	Beton Normal + Fly Ash (5%) + Serbuk Kaca 3 (24%)	107,18	180,71	236,21
5	Beton Normal + Fly Ash (5%) + Serbuk Kaca 4 (27%)	102,76	146,82	256,52

Setiap material tambahan dalam beton memberikan efek yang berbeda-beda terhadap sifat mekanis dan keberlanjutan beton. Fly ash, misalnya, dapat meningkatkan kuat tekan dalam jangka panjang karena sifat pozzolaniknya, namun memiliki daya ikat awal yang lebih rendah dibandingkan semen Portland. Serbuk kaca, seperti yang diteliti oleh [11] mampu meningkatkan kekuatan beton hingga kadar tertentu, tetapi jika digunakan secara berlebihan dapat menurunkan performa beton. Cangkang kerang, sebagaimana diteliti oleh [2] memiliki potensi sebagai substitusi agregat halus, namun persentase yang terlalu tinggi justru menyebabkan penurunan kuat tekan beton.

Perbedaan ini menunjukkan bahwa setiap material memiliki karakteristik unik yang harus diperhitungkan dalam proporsi yang tepat agar dapat memberikan manfaat optimal. Oleh karena itu, pemilihan dan kombinasi material tambahan dalam beton harus dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara peningkatan performa mekanis dan keberlanjutan, sehingga beton yang dihasilkan tetap memiliki kualitas yang baik dan ramah lingkungan.

## Kesimpulan

*Fly ash* memiliki potensi besar sebagai bahan tambahan dalam campuran beton untuk meningkatkan kuat tekan dalam jangka panjang dan mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan semen maupun limbah batubara. Namun, penggunaannya perlu dikontrol dengan baik, karena jumlah yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan kuat tekan. Selain itu, kombinasi *fly ash* dengan material lain, seperti serbuk kaca atau agregat alternatif, memerlukan penelitian lebih lanjut untuk menemukan proporsi yang optimal agar beton tetap memiliki kualitas yang baik. Oleh karena itu, inovasi dalam campuran beton terus dikembangkan untuk menemukan komposisi terbaik yang tidak hanya meningkatkan performa beton tetapi juga mendukung keberlanjutan dalam industri konstruksi.

## Daftar Pustaka

- [1] A. S. Arsadi, W. R. Dimas, Ismiyati, and Ferry Dermawan, “Dampak Pertumbuhan Penduduk Terhadap Infrastruktur Di Kota Semarang,” *J. Karya Tek. Sipil*, vol. 6, no. 4, pp. 1–14, 2020.
- [2] A. P. Putri and A. K. Tobing, “Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Substitusi Bahan Ramah Lingkungan,” *J. Kaji. Tek. Sipil*, vol. 3, no. 2, pp. 105–109, 2019, doi: 10.52447/jkts.v3i2.1353.
- [3] M. Solikin and A. Ariska, “Pengaruh Penggunaan Silica fume Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi High Volume Fly Ash (HVFA),” *JRST (Jurnal Ris. Sains dan Teknol.*, vol. 7, no. 2, p. 151, 2023, doi: 10.30595/jrst.v7i2.16582.
- [4] Rini Rahmayanti, F. F. Bahar, and M. Nuklirullah, “Pemanfaatan dan Pengaruh Fly Ash Batu Bara Sebagai Substitusi Sebagian Semen Terhadap Nilai Kuat Tekan Bata Ringan Jenis Cellular Lightweight Concrete (CLC),” *Siklus J. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 2, pp. 218–228, 2023, doi: 10.31849/siklus.v9i2.11438.
- [5] M. Setiawati, “Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton,” *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2018*, pp. 1–8, 2018.
- [6] M. Farhan, M. Nuklirullah, and F. F. Bahar, “Pengaruh Penggunaan Abu-Sekam Padi sebagai Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tekan Beton,” *J. Tek.*, vol. 21, no. 1, pp. 58–67, 2023, doi: 10.37031/jt.v21i1.351.
- [7] S. P. Dunuweera and R. M. G. Rajapakse, “Cement Types, Composition, Uses and Advantages of Nanocement, Environmental Impact on Cement Production, and Possible Solutions,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4158682.
- [8] F. Adibroto, E. Suhelmidawati, and A. A. M. Zade, “Eksperimen Beton Mutu Tinggi Berbahan Fly Ash Sebagai Pengganti Sebagian Semen,” *J. Ilm. Rekayasa Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 11–16, 2018, doi: 10.30630/jirs.15.1.85.
- [9] M. E. Rozani, A. S. Budi, and S. Sangadji, “Kajian Tegangan-Regangan Dan Kuat Tekan HvfA Kadar 50% Memadat Sendiri Terhadap Beton Normal Dengan Kekangan Teflon,” *Matriks Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 22–27, 2020, doi: 10.20961/mateksi.v8i1.41515.
- [10] P. Pemanfaatan *et al.*, “Pengaruh pemanfaatan abu terbang ( fly ash ) dari pltu ii sulawesi utara sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton,” vol. 2, no. 7, pp. 352–358, 2014.
- [11] M. A Rivai, S. Kimi, and R. Revisdah, “Inovasi Beton Ramah Lingkungan,” *Bear. J. Penelit. dan Kaji. Tek. Sipil*, vol. 6, no. 2, 2020, doi: 10.32502/jbearing.2829201962.