

Pengaruh Karakteristik Material *Fly Ash* PLTU Bolok Dan *Fly Ash* PLTU Timor-1 Terhadap Nilai Kuat Tekan Beton

Marthinus Alexander Bastian^{1*}, Anastasia Henderina Muda², Lodia Semaya Amnifu³, Melkias Petrus Lily⁴

^{1,2,4}Program Studi D3 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang, Indonesia

³Program Studi Teknik Perancangan Irigasi dan Penanganan Pantai, Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Kupang, Indonesia

Email: alexsandrobastian@gmail.com

ABSTRAK

Limbah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) seperti fly ash sebagai material pengganti semen merupakan inovasi yang berdampak positif pada lingkungan sebab dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari produksi semen. Fly ash sendiri merupakan material pozzolan yang tidak memiliki sifat seperti semen namun dengan ukuran yang halus dan mengandung silika (Si) serta alumina (Al) mampu bereaksi dengan kapur dan air sehingga menghasilkan suatu massa yang padat. Selain itu pemanfaatan limbah fly ash menjadi pilihan yang baik guna mengurangi biaya produksi beton karena ketergantungan pada semen portland yang cenderung lebih mahal. Kupang memiliki dua PLTU aktif yakni PLTU Bolok dan PLTU Timor-1. Penelitian ini bertujuan untuk pemeriksaan kualitas fly ash di daerah Kupang yang bersumber dari kedua PLTU tersebut. Pemeriksaan kualitas fly ash meliputi pengujian fisik yakni kehalusan, konsistensi normal, dan pengujian berat jenis. Pemeriksaan terhadap kekentalan dilakukan dengan pengujian slump untuk setiap variasi campuran fly ash Bolok dan Timor-1 dalam beton sebesar 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Hasil pengujian slump untuk spesimen kontrol adalah 8.83 cm dan penggunaan fly ash Bolok sebagai pengganti semen didapatkan nilai slump untuk setiap variasi yakni 6.5 cm, 4.63 cm, 4.57 cm, 4.53 cm, dan 3.90 cm. Sedangkan hasil pengujian nilai slump fly ash Timor-1 sebagai bahan pengganti semen untuk setiap variasi didapatkan 8.5 cm, 7.83 cm, 6.5 cm, 5.5 cm, dan 5 cm. Hasil ini menunjukkan nilai slump semakin menurun seiring dengan penambahan variasi fly ash dalam beton. Pemeriksaan terhadap kuat tekan beton untuk spesimen kontrol adalah 27.35 MPa dan penggunaan fly ash Bolok sebagai pengganti semen untuk setiap variasi mendapatkan 26.75 MPa, 25.68 MPa, 24.41 MPa, 22.9 MPa, 21.9 MPa. Sedangkan hasil pengujian kuat tekan beton untuk penggunaan fly ash Timor-1 sebagai pengganti semen untuk setiap variasi mendapatkan 26.33 MPa, 25.78 MPa, 25.47 MPa, 24.99 MPa, 22.19 MPa. Hasil ini menunjukkan peningkatan kadar fly ash Bolok dan Timor-1 dalam beton dapat menurunkan kuat tekan beton.

Kata Kunci : Fly Ash Bolok, Fly Ash Timor-1, Kuat Tekan Beton

ABSTRACT

Steam Power Plant (PLTU) waste, such as fly ash, as a cement substitute, is an innovation that positively impacts the environment because it can reduce carbon dioxide emissions resulting from cement production. Fly ash is a pozzolan material that does not have properties like cement. Still, it is fine-sized and contains silica (Si) and alumina (Al), capable of reacting with lime and water to produce a solid mass. In addition, fly ash waste is a good choice to reduce concrete production costs due to dependence on Portland cement, which tends to be more expensive. Kupang has two active PLTUs, namely PLTU Bolok and PLTU Timor-1. This study examines the quality of fly ash in the Kupang area sourced from both PLTUs. Fly ash quality inspection includes physical testing, namely fineness, normal consistency, and specific gravity testing. Viscosity inspection is carried out by slump testing for each variation of the Bolok and Timor-1 fly ash mixture in concrete of 3%, 6%, 9%, 12%, and 15%. The slump test results for the control specimen were 8.83 cm, and using Bolok fly ash as a substitute for cement, obtained slump values for each variation, namely 6.5 cm, 4.63 cm, 4.57 cm, 4.53 cm, and 3.90 cm. In contrast, the test results of the slump value of Timor-1 fly ash as a substitute for cement for each variation were obtained at 8.5 cm, 7.83 cm, 6.5 cm, 5.5 cm, and 5 cm. These results indicate that the slump value decreases with the addition of fly ash variations in concrete. Examination of the concrete compressive strength for the control specimen was 27.35 MPa, and the use of Bolok fly ash as a substitute for cement for each variation obtained 26.75 MPa, 25.68 MPa, 24.41 MPa, 22.9 MPa, and 21.9 MPa. Meanwhile, concrete compressive strength tests using Timor-1 fly ash as a cement substitute yielded 26.33 MPa, 25.78 MPa, 25.47 MPa, 24.99 MPa, and 22.19 MPa for each variation. These results indicate that increasing the content of Bolok and Timor-1 fly ash in concrete can reduce its compressive strength.

Keywords: Bolok Fly Ash, Timor-1 Fly Ash, Concrete Compressive Strength

Pendahuluan

Perkemabangan ilmu pengetahuan dalam material bahan konstruksi telah berkembang pesat. Salah satunya adalah pemanfaatan limbah sisa produksi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) seperti *bottom ash* dan *fly ash* (FABA). Penggunaan limbah Pembangkit PLTU seperti *fly ash* sebagai material pengganti semen merupakan inovasi yang berdampak positif pada lingkungan sebab dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari produksi semen [1], [2], [3]. *Fly ash* sendiri merupakan material pozzolan yang tidak memiliki sifat seperti semen namun dengan ukuran yang halus dan mengandung silika (Si) serta alumina (Al) mampu bereaksi dengan kapur dan air sehingga menghasilkan suatu masa yang padat. Karakteristik *fly ash* dalam beton mampu menghasilkan penyusutan yang kecil dan tahan terhadap sulfat sehingga cocok diterapkan untuk bangunan sekitar pantai [4], [5]. Pemanfaatan limbah *fly ash* menjadi pilihan yang baik guna mengurangi biaya produksi beton karena ketergantungan pada semen portland yang cenderung lebih mahal [6], [7]. Karakteristik unik dari *fly ash* ini menjadi dorongan para peneliti untuk menggunakan *fly ash* bahan pengganti semen secara parsial dan didapatkan sifat mekanik baik dan durabilitas yang lebih baik [8], [9], [10].

Penelitian ini bertujuan untuk pemeriksaan kualitas *fly ash* di daerah Kupang yang bersumber dari PLTU Bolok dan PLTU Timor-1. Pemeriksaan kualitas *fly ash* meliputi uji fisik dan uji mekanik. Pengujian fisik meliputi berat jenis dan kehalusan *fly ash*. Pengujian mekanik diukur dengan pengujian kuat tekan beton dngan variasi *fly ash* sebagai pengganti semen sebesar 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Hasil pengujian kuat tekan dari setiap variasi dengan menggunakan *fly ash* PLTU Bolok dan Timor-1 kemudian dibandingkan dengan spesimen kontrol atau beton normal dan dianalisa. Selain itu dilakukan pemeriksaan slump beton untuk mengetahui tingkat kekentalan dari setiap variasi.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode experimental yang dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan Politeknik Negeri Kupang. Material yang digunakan yakni agregat halus dan agregat kasar dari Takari, semen PPC Tipe 1, *viscocrete* 3115N, *fly ash* berasal dari PLTU Bolok dan PLTU Timor-1. Langkah awal penelitian yakni analisa karakteristik material yang digunakan dalam campuran beton. Analisa karakteristik material dapat menunjukkan material layak digunakan atau tidak berdasarkan ketentuan yang berlaku. Data analisa karakteristik material selanjutnya dilakukan perhitungan perancangan *mix design* beton berdasarkan SNI 03-2834:2000 dengan mutu rencana sebesar 28 MPa.

Proporsi *mix design* beton normal yang telah didapatkan selanjutnya dilakukan variasi penggantian *fly ash* terhadap semen secara parsial dengan kadar 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Tahapan selanjutnya pencetakan benda uji silinder ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk setiap variasi berdasarkan SNI 2493:2011. Jumlah benda dari setiap variasi dapat dilihat pada Tabel 1. Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui kekentalan beton yang dilakukan sebelum campuran dimasukkan ke dalam cetakan silinder. Uji slump dilakukan mengacu pada SNI 03-1972:2008.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji

Nama Benda Uji	Jumlah Benda Uji
Beton Normal	3
FA Bolok 3%	3
FA Bolok 6%	3
FA Bolok 9%	3
FA Bolok 12%	3
FA Bolok 15%	3
FA Timor-1 3%	3
FA Timor-1 6%	3
FA Timor-1 9%	3
FA Timor-1 12%	3
FA Timor-1 15%	3
Total	33

Cetakan silinder dibuka 24 jam setelah pengecoran benda uji. Tahapan berikutnya dilakukan perawatan benda uji (*curing*) dengan metode perendaman sampai umur beton 28 hari dengan mengacu pada SNI 2493:2011. Pengujian kuat tekan beton dilakukan saat umur beton mencapai umur 28 hari. Pengujian ini dilakukan guna mengetahui mutu kuat beton dari setiap variasi. Pengujian dilakukan mengacu pada SNI 1974:2011. Perhitungan kuat tekan beton dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

Kuat tekan beton=PA

Keterangan:

P = Beban (N)

A = Area permukaan silinder (mm²).

Hasil Dan Pembahasan

Analisa Material

Analisa material dilakukan berdasarkan standar yang berlaku untuk setiap material yang digunakan seperti agregat halus, agregat kasar, semen, dan *fly ash*. Hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 2, Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5.

Tabel 2. Analisis Material Agregat Halus

Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Kadar air	0.22 %	2-8%
Berat jenis (SSD)	2.58	> 2.5
Penyerapan	2.55 %	< 5%
Kadar lumpur	4.55 %	< 5%
Berat isi	1.37 gr/cm ³	
Gradasi	No.2	No.1-4

Tabel 3. Analisa Material Agregat Kasar

Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Kadar air	4.50 %	2-8%
Berat Jenis (SSD)	2.66	> 2.5
Penyerapan	0.69 %	< 5%
Kadar lumpur	1.18 %	< 5%
Berat isi	1.37 gr/cm ³	
Gradasi	20 mm	10,20,40mm
Keausan	23.99 %	40%

Tabel 4. Analisa Material Semen

Pengujian	Hasil	Spesifikasi
Berat jenis	3.06	3.00-3.20
Konsistensi normal	26 %	26%-33%
Kehalusan	10.4 %	22 %

Tabel 2, 3, dan 4 menunjukkan material yang digunakan untuk campuran beton normal telah memenuhi spesifikasi. Dengan demikian hasil analisa material tersebut dapat selanjutnya digunakan untuk perhitungan *mix design* beton normal. Pengujian analisa material terhadap material *fly ash* Bolok dan *fly ash* Timor-1 berupa pengujian berat jenis dan pengujian kehalusan. Bentuk fisik dan hasil analisa material dari kedua material dapat dilihat pada Gambar 1 dan Tabel 3.



Gambar 1. Fly ash Bolok dan Fly ash Timor-1

Tabel 5. Analisa Material Fly Ash Bolok dan Fly Ash Timor-1

Pengujian	Hasil
	<i>Fly ash</i> Bolok
Berat jenis	2.58

Kehalusan	24.4 %
<i>Fly ash</i> Timor-1	
Berat jenis	2.69
Kehalusan	19.8 %

Gambar 1 menunjukkan perbedaan warna dari *fly ash* Bolok dan *fly ash* Timor-1. Warna *fly ash* Bolok berwarna abu-abu sedangkan *fly ash* Timor-1 berwarna coklat. Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian berat jenis dan kehalusan dari *fly ash* Bolok dan *fly ash* Timor-1. *Fly ash* Timor-1 memiliki nilai berat jenis lebih tinggi yakni sebesar 2.69 dibandingkan dengan *fly ash* Bolok sebesar 2.58. Hasil pengujian berat jenis ini tentunya akan berpengaruh pada nilai kuat tekan beton. Semakin tinggi berat jenis *fly ash* maka semakin tinggi nilai kuat tekan beton yang dihasilkan [11], [12]. Diperlihatkan juga pada Tabel 5 bahwa tingkat kehalusan *fly ash* Timor-1 lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* Bolok. Hal ini ditunjukkan dengan persentasi *fly ash* tertahan saringan nomor 325 *fly ash* Timor-1 lebih rendah yakni sebesar 19,8% sedangkan *fly ash* Bolok sebesar 24,4%. Hasil analisa kehalusan kehalusan ini akan berpengaruh terhadap kuat tekan beton. Semakin halus butiran *fly ash* semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan [13], [14], [15].

Mix Design Beton Normal Dan Perencanaan Campuran Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Secara Parsial

Perhitungan proporsi *mix design* hanya dilakukan terhadap beton normal yang mana selanjutnya digunakan sebagai spesimen kontrol. Berdasarkan proporsi dari perhitungan *mix design* beton normal tersebut kemudian selanjutnya dilakukan variasi penggantian semen dengan *fly ash* dalam beton normal sebesar 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15%. Proporsi tiap variasi untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 6. Tabel 6 diperlihatkan bahwa jumlah air, agregat halus, agregat kasar dan *superplasticizer* digunakan setiap variasi adalah dengan jumlah yang sama. Tujuannya agar untuk mengetahui pengaruh penggantian jumlah semen dengan *fly ash* dalam beton sebesar 3%, 6%, 9%, 12%, dan 15% yang diukur dengan uji slump dan uji kuat tekan beton.

Tabel 6. Proporsi Setiap Variasi

Material	Variasi					
	Beton Normal (kg)	FA 3% (kg)	FA 6% (kg)	FA 9% (kg)	FA 12% (kg)	FA 15% (kg)
Air	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49	5.49
Semen	10.63	10.31	9.99	9.67	9.36	9.04
Agregat halus	13.63	13.63	13.63	13.63	13.63	13.63
Agregat kasar	28.14	28.14	28.14	28.14	28.14	28.14
<i>Fly ash</i>	-	0.32	0.64	0.96	1.28	1.59
<i>Superplasticizer</i>	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238	0.0238

Hasil Pengujian Slump Beton

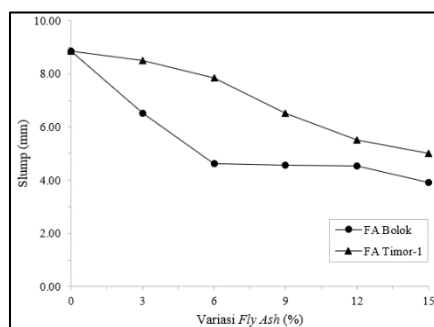
Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat kekentalan dari setiap variasi yang ada pada Tabel 6. Hasil pengujian slump beton dari setiap variasi dapat dilihat Gambar 2, Gambar 3, dan rekapan hasil pengujian ditunjukkan pada Grafik 1.



Gambar 2. Pengujian slump beton dengan *fly ash* Bolok sebagai pengganti semen



Gambar 3. Pengujian slump beton dengan fly ash Timor-1 sebagai pengganti semen

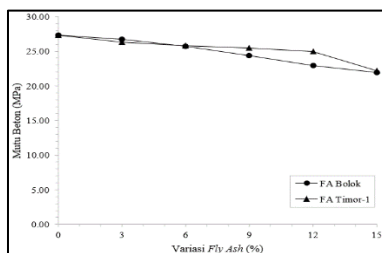


Gambar 4. Grafik Slump Beton Setiap Variasi Fly Ash Bolok dan Fly Ash Timor-1

Grafik 1 memperlihatkan nilai slump tertinggi terjadi pada beton normal (spesimen kontrol) yakni sebesar 8,83 cm. Penambahan presentasi *fly ash* Bolok sebagai pengganti semen sebesar 3%, 6%, 9%, 12% dan 15% menghasilkan penurunan nilai slump beton yakni untuk masing-masing sebesar 6,5 cm, 4,63 cm, 4,57 cm, 4,53 cm, dan 3,90 cm. Hasil serupa ditunjukan dengan penggantian *fly ash* Timor-1 sebagai pengganti semen sebesar 3%, 6%, 9%, 12% dan 15% menghasilkan penurunan nilai slump beton yakni untuk masing-masing sebesar 8,5 cm, 7,83 cm, 6,5 cm, 5,5 cm, dan 5 cm. Kedua hasil tersebut menunjukan peningkatan presentasi *fly ash* Bolok dan Timor-1 terhadap semen dapat menurunkan nilai slump. Hal ini disebabkan *fly ash* memiliki daya serap air lebih tinggi dibandingkan dengan semen sehingga semakin tinggi kadar *fly ash* dalam beton semakin tinggi pula tingkat kekentalannya [16], [17], [18].

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton dari setiap variasi dapat dilihat pada Grafik 2.



Gambar 5. Pengujian Kuat Tekan Beton Setiap Variasi Fly Ash Bolok dan Fly Ash Timor-1

Grafik 2 menunjukkan semua variasi dari Beton dengan campuran *fly ash* Bolok dan *fly ash* Timor-1 menunjukkan perilaku yang sama, yakni terjadi penurunan kuat tekan beton seiring dengan penambahan proporsi *fly ash* dalam beton. Penelitian ini dilakukan tanpa dilakukan pengujian kandungan kimia dalam *fly ash* namun disinyalir tipe *fly ash* menjadi penyebab penurunan kuat tekan beton dari kedua *fly ash* PLTU tersebut. Hal ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh [19], [20], [21], dan juga penelitian oleh [22], [23], [24]. Dalam kedua penelitian tersebut hasil uji *X-ray Fluorescence* (XRF) *fly ash* yang digunakan memiliki kandungan CaO lebih dari 10% sehingga *fly ash* tersebut dikategorikan sebagai *fly ash* tipe C. Semakin tinggi kadar CaO di dalam *fly ash* tidak baik untuk perkembangan kuat tekan sehingga disarankan kadar CaO yang baik berkisar 5%-10% atau yang dikategorikan tipe F [25], [26]. Hasil pengujian kuat tekan berbanding lurus dengan hasil yang didapatkan dalam analisa material *fly ash* yang ada pada Tabel 5. Dalam hasil analisa material tersebut didapatkan berat jenis dan kehalusan *fly ash* Timo-1 lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* Bolok. Hasil analisa berat jenis dan kehalusan ini menjadi faktor penyebab nilai kuat tekan beton dengan campuran *fly ash* Timor-1 sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan beton dengan campuran *fly ash* Bolok. Hasil ini didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh [27], [28], [29].

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan mengenai variasi penggantian *fly ash* Bolok dan *fly ash* Timor-1 dalam beton, dapat disimpulkan bahwa *fly ash* Timor-1 memiliki kualitas sedikit lebih baik dibandingkan *fly ash* Bolok, yang ditunjukkan oleh nilai berat jenis lebih tinggi sebesar 2,69 dibandingkan 2,58 serta tingkat kehalusan yang lebih baik dengan persentase tertahan saringan nomor 325 lebih kecil yaitu 19,8% dibandingkan 24,4%. Selain itu, nilai slump beton pada variasi penggunaan *fly ash* Bolok maupun Timor-1 sebagai pengganti semen menunjukkan perilaku serupa, yakni mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kadar *fly ash* dalam campuran beton.

Hasil pengujian kuat tekan dari variasi *fly ash* Timor-1 sebagai pengganti semen menunjukkan hasil sedikit lebih baik bila dibandingkan dengan variasi *fly ash* Bolok sebagai pengganti semen. Hal ini berbanding lurus dengan nilai berat jenis dan tingkat kehalusan *fly ash* Timor-1 yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan *fly ash* Bolok. Secara keseluruhan hasil pengujian kuat tekan dengan menggunakan *fly ash* Bolok dan Timor-1 sebagai pengganti semen tidak berbeda yakni cenderung menurun seiring dengan penambahan kadar *fly ash* dalam campuran beton.

Daftar Pustaka

- [1] R.Bajpai, "Environmental impact assessment of fly ash and silica fume-based geopolymer concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 254, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120147.
- [2] Y.Zhang, "Treatment of municipal solid waste incineration fly ash: State-of-the-art technologies and future perspectives," 2021. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125132.
- [3] M.Amran, "Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties," 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121857.
- [4] P.Zhang, "Properties of fresh and hardened fly ash/slag-based geopolymer concrete: A review," 2020. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122389.
- [5] Y.Wang, "Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash-based geopolymer," *J. Clean. Prod.*, vol. 244, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118852.
- [6] H.Song, "Predicting the compressive strength of concrete with fly ash admixture using machine learning algorithms," *Constr. Build. Mater.*, vol. 308, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125021.
- [7] P.Nuaklong, "Influence of rice husk ash on mechanical properties and fire resistance of recycled aggregate high-calcium fly ash geopolymer concrete," *J. Clean. Prod.*, vol. 252, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119797.
- [8] M.Shariati, "Prediction of concrete strength in the presence of furnace slag and fly ash using Hybrid ANN-GA (Artificial Neural Network-Genetic Algorithm)," *Smart Struct. Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 183–195, 2020, doi: 10.12989/sss.2020.25.2.183.
- [9] D. K. I.Jaf, "Machine learning techniques and multi-scale models to evaluate the impact of silicon dioxide (SiO₂) and calcium oxide (CaO) in fly ash on the compressive strength of green concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 400, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132604.
- [10] A.Ahmad, "Compressive strength prediction of fly ash-based geopolymer concrete via advanced machine learning techniques," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00840.
- [11] N.Wang, "Leachability and adverse effects of coal fly ash: A review," 2020. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122725.

- [12] J.Liu, "Utilisation of municipal solid waste incinerator (MSWI) fly ash with metakaolin for preparation of alkali-activated cementitious material," *J. Hazard. Mater.*, vol. 402, 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123451.
- [13] Z.Zhang, "Eco-friendly high-strength, high-ductility engineered cementitious composites (ECC) with fly ash substitution by rice husk ash," *Cem. Concr. Res.*, vol. 137, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106200.
- [14] B.Bai, "A high-strength red mud-fly ash geopolymer and the implications of curing temperature," *Powder Technol.*, vol. 416, 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118242.
- [15] S. K.Behera, "Utilisation of mill tailings, fly ash, and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective," 2021. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125120.
- [16] B.Sun, "A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials," 2022. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126843.
- [17] Y.Xue, "Detoxification, solidification and recycling of municipal solid waste incineration fly ash: A review," 2021. doi: 10.1016/j.cej.2021.130349.
- [18] Z.Guo, "Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117115.
- [19] I.VJoseph, "Simultaneous removal of Cd(II), Co(II), Cu(II), Pb(II), and Zn(II) ions from aqueous solutions via adsorption on FAU-type zeolites prepared from coal fly ash," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 4, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103895.
- [20] S. K.John, "Effect of source materials, additives on the mechanical properties and durability of fly ash and fly ash-slag geopolymer mortar: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 280, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122443.
- [21] L. A.Qureshi, "Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fibre on the hardened properties of recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 263, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120636.
- [22] K. T.Nguyen, "Analysing the compressive strength of green fly ash-based geopolymer concrete using experiment and machine learning approaches," *Constr. Build. Mater.*, vol. 247, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118581.
- [23] A.Ahmad, "Prediction of compressive strength of fly ash-based concrete using individual and ensemble algorithms," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 4, pp. 1–21, 2021, doi: 10.3390/ma14040794.
- [24] U. O.Aigbe, "Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: a review," 2021. doi: 10.1016/j.jmrt.2021.07.140.
- [25] S. S. Alterary, "Fly ash properties, characterisation, and applications: A review," 2021. doi: 10.1016/j.jksus.2021.101536.
- [26] C.Fan, "A comparative study on solidification/stabilisation characteristics of coal fly ash-based geopolymer and Portland cement on heavy metals in MSWI fly ash," *J. Clean. Prod.*, vol. 319, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128790.
- [27] A.Noushini, "Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 105, 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2019.04.006.
- [28] D. K.Nayak, "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies," 2022. doi: 10.1016/j.clema.2022.100143.
- [29] X. X.Jiang, "A laboratory investigation of steel to fly ash-based geopolymer paste bonding behaviour after exposure to elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 254, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119267.