

PEMANFAATAN LIMBAH ABU TERBANG (*FLY ASH*) DALAM OPTIMALISASI MUTU BETON RAMAH LINGKUNGAN

Nurokhman¹, Muhammad Ryan Iskandar¹

Email : nurokhman.jogja@gmail.com, muhammad.ryan01@gmail.com

ABSTRAK: Pemanfaatan limbah industri sebagai material konstruksi menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. *Fly ash* hasil pembakaran batubara PLTU memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga berpotensi digunakan sebagai bahan tambah beton untuk mengurangi konsumsi semen *Portland*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan *fly ash* terhadap karakteristik campuran, perkembangan kuat tekan, dan kuat lentur beton sebagai material alternatif perkerasan kaku. Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Cokroaminoto Yogyakarta menggunakan metode SNI. Variasi campuran terdiri atas beton mutu $f_c'15$ MPa dengan *fly ash* 11,3% dan beton mutu $f_c'35$ MPa dengan *fly ash* 25% terhadap berat semen. Pengujian meliputi karakteristik agregat, slump, kuat tekan umur 7, 14, dan 28 hari serta kuat lentur umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton mutu $f_c'15$ mencapai kuat tekan rata-rata 20,61 MPa pada umur 28 hari, sedangkan beton mutu $f_c'35$ menghasilkan kuat tekan rata-rata 43,39 MPa dengan standar deviasi 3,47 MPa. Pertumbuhan kuat tekan umur 7 hari mencapai 78% dari kuat tekan umur 28 hari sehingga menunjukkan perkembangan kekuatan awal yang lebih baik dibanding beton normal. Hasil pengujian kuat lentur sebesar 4,89 MPa juga memenuhi persyaratan minimum perkerasan kaku. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* mampu meningkatkan kinerja mekanik beton sekaligus mengurangi penggunaan semen *Portland* sehingga berpotensi menjadi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Kata kunci: Beton; *Fly ash*; Kuat lentur; Kuat tekan; Perkerasan kaku

1. PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) menghasilkan limbah padat berupa *fly ash* dalam jumlah besar yang hingga saat ini pemanfaatannya masih relatif rendah. Sebagian besar limbah tersebut masih ditimbun sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran tanah, air, dan udara. Di sisi lain, industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar akibat tingginya konsumsi semen *Portland* sebagai bahan pengikat utama beton. Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* sebagai material alternatif dalam beton menjadi salah satu solusi untuk mendukung pembangunan berkelanjutan.

Beton geopolimer merupakan inovasi material ramah lingkungan yang memanfaatkan material kaya silika dan alumina, seperti *fly ash*, sebagai pengganti sebagian atau seluruh semen *Portland*. Melalui proses polimerisasi menggunakan aktivator alkali, beton geopolimer mampu menghasilkan sifat mekanis yang baik, memiliki ketahanan tinggi terhadap lingkungan agresif, serta menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan beton konvensional. Karakteristik tersebut menjadikan beton geopolimer berpotensi diaplikasikan pada berbagai infrastruktur, termasuk perkerasan kaku (rigid pavement).

¹ Dosen Fakultas Teknik Universitas Cokroaminoto Yogyakarta



Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan keberhasilan penggunaan *fly ash* pada beton geopolimer, masih terdapat beberapa permasalahan yang belum terselesaikan. Karakteristik *fly ash* sangat dipengaruhi oleh jenis batubara dan proses pembakaran sehingga reaktivitas setiap sumber material berbeda-beda. Perbedaan tersebut menyebabkan belum adanya komposisi campuran yang dapat diterapkan secara universal. Selain itu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kuat tekan, sedangkan kajian mengenai perkembangan kekuatan awal, kuat lentur, serta potensi penerapannya pada beton mutu perkerasan jalan masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan penyusun beton berkelanjutan melalui analisis karakteristik campuran, perkembangan kuat tekan pada berbagai umur beton, serta kinerja beton mutu tinggi untuk aplikasi rigid pavement. Penelitian juga mengkaji kontribusi penggunaan *fly ash* terhadap peningkatan performa beton sekaligus pengurangan penggunaan semen *Portland* sebagai upaya mendukung konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan informasi mengenai komposisi campuran yang efektif, perkembangan kekuatan beton pada umur awal maupun umur rencana, serta potensi penerapan beton berbasis *fly ash* sebagai alternatif material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton Geopolimer *Fly Ash*

Fly ash, sebagai limbah hasil pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga sangat potensial dimanfaatkan sebagai bahan pengikat dalam beton geopolimer. Beton jenis ini dinilai ramah lingkungan karena mampu mengurangi penggunaan semen *Portland* dan emisi CO₂. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa *fly ash* mampu menghasilkan beton geopolimer dengan karakteristik mekanik yang baik. Hardjasaputra dan Ekawati (2018) melaporkan kuat tekan sebesar 50,3 MPa dan kuat lentur 7,66 MPa pada campuran *fly ash* dengan variasi molaritas NaOH 8–16 M. Penelitian Budiningrum et al. (2022) menunjukkan kuat tekan 22,99 MPa pada umur 28 hari untuk beton geopolimer berbasis *fly ash* PLTU Tanjung Jati B. Simalango dan Simalango (2019) menggunakan kombinasi *fly ash* dan bottom ash dan memperoleh kuat tekan sebesar 6,6 MPa pada umur 56 hari, dan ada pengaruh yang kuat rasio Na₂SiO₃/NaOH terhadap kekuatan mekanik beton.

Sementara itu, durabilitas dan ketahanan jangka panjang beton geopolimer juga menjadi perhatian penting. Suriyana et al. (2021) mencatat kuat tekan sebesar 29,5 MPa pada umur 28 hari, menunjukkan ketahanan yang layak untuk aplikasi struktural ringan. Penelitian Sutarno et al. (2021) menunjukkan bahwa bata geopolimer dari *fly ash* dan bottom ash tahan terhadap panas dengan kuat tekan 8,2 MPa. Kajian internasional seperti Kato et al. (2022) mengungkap bahwa perlakuan mekanokimia terhadap *fly ash* dapat meningkatkan kelarutan silika-alumina, sehingga mempercepat reaksi geopolymerisasi. Kriven et al. (2024) juga menyatakan bahwa beton geopolimer memiliki potensi sebagai material struktural tahan api dan tahan bahan kimia.

Aspek keberlanjutan juga menjadi keunggulan beton geopolimer. Salas et al. (2018) melaporkan bahwa beton geopolimer mampu mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 64% dibanding beton *Portland*. Studi LCA oleh Bamshad dan Ramezani-pour (2022) memperlihatkan keuntungan ekologis penggunaan *fly ash*, meskipun masih terdapat tantangan pada pemakaian aktivator alkali. Beberapa inovasi terbaru menambahkan nanomaterial seperti graphene dan carbon nanotube (CNT) ke dalam campuran beton



geopolimer, yang terbukti meningkatkan konduktivitas termal dan durabilitas terhadap suhu tinggi (Farooq, J., dkk, 2021)(Jena, K., dkk, 20222).

Meski demikian, perbedaan karakteristik *fly ash* dari berbagai PLTU menyebabkan variasi reaktivitas dan performa produk geopolimer (Mehta, A dan Siddique, R., 2017). Tantangan lainnya adalah ketergantungan terhadap bahan kimia aktivator yang bersifat korosif dan mahal (Shi, X., Zhang, dkk, 2021). Oleh karena itu, banyak penelitian menekankan pentingnya optimasi proporsi campuran (Nurokhman, dkk, 2023) dan metode aktivasi untuk mendapatkan beton geopolimer yang tidak hanya kuat, tetapi juga andal secara lingkungan dan ekonomi (Vora, P.R. dan Dave, U.V., 2021) (Xie, C. dan Ozbakkaloglu, T., 2015).

2.2 Uji Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Kuat tekan adalah ukuran utama kekuatan beton yang menunjukkan kemampuannya menahan beban tekan (Singgih Subagyo, dkk., 2021). Uji dilakukan berdasarkan standar ASTM C39 atau SNI 03-1974-1990.

Rumus:
$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

f_c' : kuat tekan (MPa)

P : beban maksimum saat beton pecah (N)

A : luas penampang benda uji (mm^2)

2.3 Uji Kuat Tarik Belah (*Split Tensile Strength*)

Pengujian ini bertujuan mengetahui ketahanan beton terhadap gaya tarik tidak langsung. Uji dilakukan sesuai ASTM C496.

Rumus:
$$f_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad (2)$$

Keterangan:

f_t : kuat tarik belah (MPa)

P : beban maksimum saat beton retak (N)

d : diameter benda uji silinder i (mm)

l : panjang benda uji silinder i (mm)

2.4 Uji Kuat Lentur Balok (*Flexural Strength*)

Pengujian untuk menentukan kemampuan beton dalam menahan gaya lentur (tekuk) sebelum mengalami patah (Nurokhman, N., 2023). Pengujian ini penting untuk struktur yang mengalami beban tarik lentur, seperti pelat, balok, dan perkerasan kaku (rigid pavement). Beban diberikan: Umumnya metode beban dua titik (third-point loading) mengacu pada SNI 03-4431-1997 dan ASTM C78 (untuk third-point loading)

Rumus :
$$f_l = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (3)$$

Keterangan:

f_l : kuat lentur beton (MPa)

P : beban maksimum saat beton retak (N)

L : panjang bentang antar penumpu (mm)

b : lebar balok benda uji (mm); h = tinggi balok benda uji (mm)

2.5 Densitas dan Penyerapan Air beton



Pengujian densitas untuk menentukan massa jenis beton (dalam kg/m^3), yang menggambarkan kerapatan material beton dan berpengaruh terhadap kekuatan serta durabilitasnya. Densitas beton berpengaruh terhadap kekuatan tekan dan ketahanan. Umumnya, densitas beton geopolimer berkisar antara 2200–2400 kg/m^3 .

$$\text{Rumus :} \quad \rho = \frac{W}{V} = \frac{W}{(\pi r^2 \cdot h)} \quad (4)$$

Keterangan:

ρ : densitas beton (kg/m^3)

W : berat benda uji (kg)

V : volume benda uji (m^3)

Pengujian penyerapan air untuk menentukan seberapa banyak air yang diserap oleh beton, sebagai indikator porositas dan ketahanan terhadap pelapukan, terutama untuk beton geopolimer.

$$\text{Rumus :} \quad \text{Absorpsi (\%)} = \frac{W_{ssd} - W_{dry}}{W_{dry}} \times 100\% \quad (5)$$

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Cokroaminoto Yogyakarta untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *fly ash* terhadap kinerja beton ramah lingkungan. Material yang digunakan meliputi semen *Portland* tipe I, agregat halus dari Sungai Progo, agregat kasar dari Merapi, *fly ash* asal PLTU Banten, air, serta bahan tambah kimia tipe D dan tipe F. Sebelum digunakan, seluruh material diuji karakteristik fisiknya yang meliputi gradasi, berat jenis, penyerapan air, dan keausan agregat sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI). Perancangan campuran beton dilakukan untuk dua mutu beton, yaitu f_c' 15 MPa dan f_c' 35 MPa. Beton mutu f_c' 15 menggunakan *fly ash* sebesar 11,3% dari berat semen dengan *water cement ratio* (w/c) 0,669, sedangkan beton mutu f_c' 35 menggunakan *fly ash* sebesar 25% dari berat semen dengan w/c 0,353 serta penambahan *admixture* tipe D dan tipe F. Benda uji berupa silinder berukuran 150 mm × 300 mm untuk pengujian kuat tekan dan balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm untuk pengujian kuat lentur. Pengujian meliputi *slump test*, kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari sesuai SNI 1974:2011, serta kuat lentur umur 28 hari sesuai SNI 4431. Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan perkembangan kuat tekan setiap umur beton terhadap mutu rencana dan persyaratan beton perkerasan kaku untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan *fly ash* sebagai material beton berkelanjutan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Material Penyusun Beton

Hasil pengujian karakteristik agregat menunjukkan bahwa material penyusun beton memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI) sebagai bahan konstruksi. Analisis gradasi menghasilkan distribusi ukuran butiran yang berada dalam batas gradasi yang dipersyaratkan sehingga memberikan susunan agregat yang relatif rapat. Nilai berat jenis agregat halus sebesar 2,72 dengan penyerapan air 3,58%, sedangkan agregat kasar memiliki berat jenis (bulk) sebesar 2,65 dan penyerapan air 1,78%. Hasil pengujian abrasi Los Angeles sebesar 34,30% juga masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan untuk beton struktural sehingga agregat layak digunakan sebagai bahan penyusun beton. Karakteristik agregat yang memenuhi spesifikasi berpengaruh terhadap kualitas beton yang dihasilkan. Agregat dengan gradasi baik mampu mengurangi rongga antarbutiran sehingga kebutuhan pasta semen menjadi lebih efisien. Selain itu, nilai abrasi yang relatif rendah

menunjukkan ketahanan agregat terhadap keausan sehingga dapat meningkatkan durabilitas beton, terutama pada aplikasi perkerasan kaku yang menerima beban lalu lintas berulang.

4.2 Perancangan Campuran Beton (*Mix Design*)

Perancangan campuran dilakukan untuk menghasilkan beton mutu $fc'15$ MPa dan $fc'35$ MPa dengan memanfaatkan *fly ash* sebagai bahan substitusi sebagian semen. Campuran beton mutu $fc'15$ menggunakan *fly ash* sebesar 11,3% dari berat semen, sedangkan beton mutu $fc'35$ menggunakan *fly ash* sebesar 25% serta tambahan *admixture* tipe D dan tipe F untuk meningkatkan kemudahan pengerjaan dan perkembangan kekuatan awal. Hasil *slump test* menunjukkan nilai slump sebesar 10 cm untuk beton $fc'15$ dan 6 cm untuk beton $fc'35$ sehingga masih berada dalam rentang slump rencana. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* tidak menurunkan tingkat *workability* campuran secara signifikan.

Penggunaan *fly ash* sebagai bahan tambah memberikan efek *filler* yang mampu mengisi rongga antarpartikel semen dan agregat sehingga campuran menjadi lebih homogen. Di samping itu, reaksi pozzolan antara silika aktif pada *fly ash* dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen menghasilkan senyawa tambahan berupa *calcium silicate hydrate* (C-S-H) yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan beton pada umur lanjut.

Tabel 1. Hasil Komposisi Campuran Beton *Fly Ash*

Material	Asal Sumber	Berat Jenis (SSD)	Berat kg/m ³
Rasio w/c			0,353
Water		1,000	150
Cement	Ex. PT. Semen Gresik	3,150	340
Sand	Ex. Progo	2,440	700
Coarse aggregate 19,5 mm	Ex. Merapi	2,690	463
Coarse aggregate 25 mm	Ex. Merapi	2,690	643
Additive Type D		1,170	1,46
Additive Type F		1,150	2,51
Faly Ash	Ex. PLTU Banten	2,10	85
Total			2380

Sumber : Penelitian, 2026

4.3 Kinerja Kuat Tekan Beton *Fly Ash*

Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton mutu $fc'15$ dengan penambahan *fly ash* mencapai kuat tekan rata-rata sebesar 16,10 MPa pada umur 7 hari dan meningkat menjadi 20,61 MPa pada umur 28 hari. Perkembangan kekuatan sebesar 78% pada umur 7 hari dan 86% pada umur 14 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* yang dikombinasikan dengan bahan tambah kimia mampu mempercepat perkembangan kekuatan awal beton. Pada beton mutu $fc'35$, kuat tekan rata-rata umur 28 hari mencapai 43,39 MPa dengan standar deviasi sebesar 3,47 MPa, lebih tinggi dibanding mutu rencana sebesar 35 MPa. Kuat tekan rata-rata pada umur 4 hari mencapai 28,24 MPa (63%), meningkat menjadi 30,59 MPa (72%) pada umur 7 hari, dan mencapai 42,54 MPa pada umur 28 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* hingga 25% masih mampu menghasilkan beton mutu tinggi yang memenuhi bahkan melampaui kuat tekan rencana.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Hardjasaputra dan Ekawati yang melaporkan bahwa pemanfaatan *fly ash* mampu meningkatkan kuat tekan beton melalui



reaksi pozzolan yang berlangsung secara bertahap. Peningkatan kuat tekan pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan *admixture* memberikan kontribusi terhadap pembentukan mikrostruktur beton yang lebih rapat sehingga porositas berkurang dan kemampuan menahan beban tekan meningkat.

Tabel 2. Hasil Kuat Tekan Beton Flay Ash

No.	Umur (hari)	Berat, W (kg)	Luas, A (cm ²)	Beban, P (KN)	Beban, P terkalibrasi (KN)	Kuat tekan, f_c' (MPa)	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Prediksi f_c , 28 Hari (MPa)	Prediksi f_c , 28 Hari (kg/cm ²)
1	4	12,59	176,63	485	483,79	27,39	328,68	42,14	505,66
2	4	12,97	176,63	495	493,77	27,95	335,46	43,01	516,09
3	4	12,96	176,63	520	518,70	29,37	352,40	45,18	542,15
Rata-rata					498,75	28,24	338,85	43,44	521,30
4	7	12,403	176,63	550	548,63	31,06	372,73	44,37	573,43
5	7	12,429	176,63	530	528,68	29,93	359,18	42,76	552,58
6	7	12,365	176,63	545	543,64	30,78	369,34	43,97	568,22
Rata-rata					540,32	30,59	367,08	43,70	564,74
7	28	12,965	176,63	770	768,08	43,49	521,82	43,49	802,80
8	28	12,88	176,63	750	748,13	42,36	508,27	42,36	781,95
9	28	12,84	176,63	740	738,15	41,79	501,49	41,79	771,53
Rata-rata					751,45	42,54	510,53	42,54	785,43
Kuat Tekan (Rata-rata)								43,39	1029,40
Standart Deviasi								3,47	89,93

Sumber : Penelitian, 2026

4.4 Kinerja Kuat Lentur Beton

Pengujian kuat lentur pada beton mutu $f_c'35$ menghasilkan nilai rata-rata sebesar 4,89 MPa, lebih tinggi dibandingkan nilai minimum yang dipersyaratkan sebesar 4,70 MPa untuk beton perkerasan kaku. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beton dengan penambahan *fly ash* memiliki kemampuan menahan tegangan tarik lentur yang memadai sehingga layak diaplikasikan pada konstruksi *rigid pavement*.

Peningkatan kuat lentur dipengaruhi oleh terbentuknya ikatan pasta semen yang lebih padat akibat reaksi pozzolan *fly ash*. Mikrostruktur beton yang lebih homogen mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada zona transisi antara agregat dan pasta semen sehingga retak awal dapat diminimalkan. Kondisi tersebut mendukung peningkatan kapasitas lentur beton dan berpotensi memperpanjang umur layan perkerasan kaku.

Tabel 3. Hasil Kuat Lentur Beton *Fly Ash*

NO	Umur (hari)	Berat (kg)	Jarak 2 titik (L) (mm)	Beban (P) (kN)	Kuat Lentur (ft) (kg/cm ²)	Kuat Lentur (ft) (MPa)
1	28	33,020	450	39,240	53,35	5,23
2	28	32,290	450	39,620	53,87	5,28
3	28	33,100	450	32,670	44,42	4,36
Rata-rata					50,55	4,96

Sumber : Penelitian, 2026

4.5 Implikasi Pemanfaatan *Fly Ash* terhadap Beton Berkelanjutan

Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan substitusi sebagian semen memberikan manfaat teknis sekaligus manfaat lingkungan. Dari aspek teknis, penggunaan *fly ash* mampu menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur yang memenuhi persyaratan beton struktural maupun beton perkerasan kaku. Dari aspek lingkungan, pengurangan penggunaan semen *Portland* berpotensi menurunkan emisi karbon serta meningkatkan pemanfaatan limbah industri yang selama ini sebagian besar masih ditimbun. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash* hingga 25% dapat menjadi alternatif material konstruksi yang

- 6 Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (*Fly Ash*) dalam Optimalisasi Mutu Beton Ramah Lingkungan
(Nurokhman¹, Muhammad Ryan Iskandar¹)



mendukung konsep pembangunan berkelanjutan tanpa mengurangi kualitas beton. Temuan ini memperkuat potensi penerapan *fly ash* sebagai material ramah lingkungan

5. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan substitusi sebagian semen mampu meningkatkan kinerja beton sekaligus mendukung konsep konstruksi berkelanjutan. Karakteristik agregat dan material penyusun memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI), sehingga layak digunakan sebagai bahan penyusun beton ramah lingkungan. Hasil mix design menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebesar 11,3% pada beton mutu $fc'15$ MPa dan 25% pada beton mutu $fc'35$ MPa menghasilkan campuran dengan tingkat workability yang memenuhi nilai slump rencana. Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa beton $fc'15$ mencapai kuat tekan rata-rata sebesar 20,61 MPa pada umur 28 hari, sedangkan beton $fc'35$ menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 43,39 MPa, lebih tinggi dari mutu rencana. Perkembangan kuat tekan pada umur awal juga menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* yang dikombinasikan dengan bahan tambah kimia mampu menghasilkan pertumbuhan kekuatan yang lebih cepat dibandingkan perkembangan beton normal. Selain itu, hasil pengujian kuat lentur sebesar 4,89 MPa telah memenuhi persyaratan minimum beton perkerasan kaku, sehingga material ini berpotensi diterapkan pada konstruksi jalan beton. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa pemanfaatan *fly ash* tidak hanya mampu mengurangi penggunaan semen *Portland* dan memanfaatkan limbah industri secara lebih optimal, tetapi juga menghasilkan beton dengan kinerja mekanik yang memenuhi persyaratan teknis. Temuan ini menunjukkan bahwa beton berbasis *fly ash* memiliki prospek yang baik sebagai material konstruksi ramah lingkungan dan berkelanjutan, khususnya untuk aplikasi perkerasan kaku (*rigid pavement*).

6. DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, H.U., Mohammed, A.S., Mohammed, A.A. dan Faraj, R.H., 2021. Systematic multiscale models to predict the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete at various mixture proportions and curing regimes. *PLoS ONE*, 16(6), e0253006.
- Budiningrum, A., Hapsari, D. dan Susilowati, D., 2022. Pemanfaatan fly ash PLTU sebagai bahan campuran beton geopolimer. *Bangun Rekaprima*, 8(1), 22–30.
- Farooq, J., Zhang, P., Javed, M.F. dan Ali, M., 2021. Recent developments in geopolymer concrete: A review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 10(4), 275–296.
- Hardjasaputra, M. dan Ekawati, D., 2018. Pengaruh molaritas NaOH terhadap kuat tekan dan kuat lentur beton geopolimer fly ash. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 22(1), 15–23.
- Hassan, A., Arif, M. dan Shariq, M., 2020. Effect of curing condition on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, 2(1), 1–9.
- Jena, S., Panigrahi, R. dan Sahu, P., 2016. Compressive and durability properties of fly ash geopolymer concrete with silica fume. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series A*, 97(4), 697–705.
- Kato, K., Xin, Y., Hitomi, T. dan Shirai, T., 2022. Surface modification of fly ash by mechano-chemical treatment. *Materials Science Forum*.
- Kriven, V., Gordon, M., Bell, J. dan Rahier, H., 2024. Geopolymer: synthesis, properties and structural applications. *Materials Today*, 47, 55–70.
- Mehta, A. dan Siddique, R., 2017. Sulfuric acid resistance of fly ash based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 146, 136–143.



- Nurokhman, N., Kristiyanto, H., Iskandar, M. R., Masduqi, E., & Sihotang, Q. (2024). Evaluation of Destructive and Non-Destructive Testing of Existing Hotel Structures for Shopping Centre Conversion. *Asian Journal of Engineering, Social and Health*, 3(7), 1575-1583.
- Nurokhman, N., Kristiyanto, H., Subagyo, S., & Hermanto, H. (2023). Komparasi Agregat Progo Dan Merapi Dan Pengaruhnya Terhadap Mutu Beton FS 45. *CivETech: Civil Engineering and Technology Journal*, 5(2), 31–44. <https://doi.org/10.47200/civetech.v5i2.189>
- Salas, D.A., Ramirez, A.D., Ulloa, N., Baykara, H. dan Boero, A., 2018. Life cycle assessment of geopolymers concrete. *Construction and Building Materials*, 190, 170–177.
- Shi, X., Zhang, C., Liang, Y., Luo, J., Wang, X., Feng, Y., Li, Y., Wang, Q. dan Abomohra, A.E.F., 2021. Life cycle assessment and impact correlation analysis of fly ash geopolymer concrete. *Materials*, 14(23), 7375.
- Singgih Subagyo, Nurokhman Nurokhman, 2021, Pengendalian Pekerjaan Perkerasan Kaku (Rigid Pavement) Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Interchange Bandara Adi Soemarmo Solo, *CivETech: Civil Engineering and Technology Journal*, 3(2), 66–81. <https://doi.org/10.47200/civetech.v3i2.1059>
- Simalango, S. dan Simalango, H., 2019. Pemanfaatan limbah fly ash dan bottom ash sebagai bahan penyusun beton geopolimer. *Tugas Akhir*, Institut Teknologi Kalimantan.
- Suriyana, H., Putra, A., Wibowo, R. dan Nugroho, D., 2021. Eksperimen kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash PLTU Buntai. *Jurnal MITS*, 5(2), 31–37.
- Vora, P.R. dan Dave, U.V., 2013. Parametric studies on compressive strength of geopolymer concrete. *Procedia Engineering*, 51, 210–219.
- Xie, C. dan Ozbakkaloglu, T., 2015. Behavior of low-calcium fly ash and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*, 41(4), 5945–5958.

