

Studi Literatur Analisis Perkembangan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Kekuatan dan Durabilitas Beton

Henry Jonathan^[1], Anang Kristianto^{[1]*}

^[1] Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 40164, Indonesia

Email: anang.kristianto@eng.maranatha.edu,*

*) Correspondent Author

Received: 17 July 2024; Revised: 01 December 2024; Accepted: 17 February 2025

How to cited this article:

Jonatha, H., Kristianto, A., (2025). Studi Literatur Analisis Perkembangan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Kekuatan dan Durabilitas Beton. Jurnal Teknik Sipil, 21(2), 291–305. <https://doi.org/10.28932/jts.v21i2.9462>

ABSTRAK

Beton geopolimer merupakan beton yang memanfaatkan limbah sebagai material pengganti semen *portland*. Salah satu limbah yang populer digunakan pada beton geopolimer adalah *fly ash* kelas F. Berdasarkan penelitian eksperimental, *fly ash* kelas F memiliki potensi sebagai material pengikat pada campuran beton geopolimer. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa terdapat signifikansi antara *fly ash* kelas F dengan kekuatan dan durabilitas beton geopolimer. Namun di sisi lain juga terdapat penelitian yang tidak mengakui pernyataan tersebut. Oleh karena itu dilakukan penelitian dengan teknik studi literatur tentang beton geopolimer berbasis *fly ash* terhadap kekuatan dan durabilitas. Data yang diambil merupakan olahan hasil penelitian dari 25 jurnal, dengan total 126 spesimen. Spesimen terbagi menjadi beberapa data hasil pengujian kekuatan dan durabilitas beton geopolimer. Kekuatan ditilik melalui kuat tekan, sedangkan durabilitas ditilik melalui penyerapan air, paparan *elevated temperature*, dan paparan bahan kimia. Penelitian didasarkan pada analisis pengaruh persentase *fly ash* terhadap kekuatan dan durabilitas beton geopolimer. Analisis yang diterapkan pada penelitian ini adalah visual grafik dan statistik regresi. Berdasarkan analisis dari temuan data yang telah dikumpulkan, didapat bahwa *fly ash* sebagai prekursor tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan maupun durabilitas beton geopolimer.

Kata kunci: Beton Geopolimer, Durabilitas, Komposisi, Kekuatan, Metode Perawatan.

ABSTRACT. *Literature Study Analysis of the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete on Strenght and Durability.* Geopolymer concrete is a type of concrete that utilizes waste materials as a substitute for Portland cement. One of the most commonly used waste materials in geopolymer concrete is class F fly ash. Based on experimental research, class F fly ash has the potential to act as a binding material in geopolymer concrete mixtures. Several studies have indicated a significant relationship between class F fly ash and the strength and durability of geopolymer concrete. However, other studies have not supported this statement. To address this issue, a literature review was conducted to examine the performance of fly ash-based geopolymer concrete in terms of strength and durability. The data used in this study were derived from 25 research journals, comprising a total of 126 specimens. These specimens were categorized based on the results of strength and durability tests. Strength was evaluated using compressive strength tests, while durability was assessed through water absorption, exposure to elevated temperatures, and exposure to chemical substances. The study focused on analyzing the effect of fly ash percentages on the strength and durability of geopolymer concrete. The analysis methods applied in this study included visual graphics and regression statistics. Based on the findings of the collected data, it was concluded that fly ash, as a precursor, does not have a significant effect on either the strength or durability of geopolymer concrete.

Keywords: Geopolymer Concrete, Durability, Composition, Strength, Curing.

1. PENDAHULUAN

Geopolimer pertama kali diusulkan oleh Joseph Davidovits pada tahun 1978. Usulan yang diajukan adalah memodifikasi bahan pengikat dengan berbagai limbah untuk mengubah karakteristik dari beton normal. Salah satu limbah yang berpotensi adalah *fly ash*, khususnya kelas F yang memiliki kandungan CaO dibawah 10%. *Fly ash* tipe tersebut mampu bereaksi dengan *alkaline activator*, sehingga membentuk gel geopolimer. Kemudian gel geopolimer tersebut dijadikan bahan pengikat di dalam beton, sehingga terciptanya beton geopolimer berbasis *fly ash*.

Beton geopolimer berbasis *fly ash* memiliki dua jenis pengujian, yaitu kekuatan dan durabilitas. Pada umumnya kekuatan diuji melalui kuat tekan, sedangkan durabilitas diuji melalui penyerapan air, paparan *elevated temperature* dan paparan bahan kimia. Beberapa beton geopolimer berbasis *fly ash* menunjukkan hasil kuat tekan yang tinggi (Ramujee, 2018) dan durabilitas yang baik (Mazumder & Mlv, 2023) dibandingkan beton konvensional. Namun di sisi lain, terdapat penelitian yang menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash* tidak unggul dibandingkan beton konvensional (Kurtoğlu et al., 2018), serta penurunan durabilitas akibat pengaruh *fly ash* (Badrawi et al., 2022).

Dengan demikian, studi literatur ini bermaksud untuk mengkaji keilmuan dan perkembangan beton geopolimer berbasis *fly ash* berdasarkan kekuatan dan durabilitas. Kekuatan dan durabilitas dianalisis melalui pengaruh *fly ash* menggunakan visual grafik dan statistik regresi. Analisis tersebut bertujuan untuk melihat signifikansi pengaruh *fly ash*, baik terhadap kekuatan maupun durabilitas beton geopolimer.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode penelitian studi literatur (*literature study*), memuat serangkaian kegiatan yang bersinggungan dengan pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelola data penelitian secara objektif, sistematis, analitis, dan kritis (Aditya Putri et al., 2020). Penelitian ini membahas tentang pengaruh *fly ash* terhadap kekuatan dan durabilitas beton geopolimer. Persiapan pada penelitian ini melalui langkah pengambilan data di pustaka, membaca, mencatat, dan mengolah bahan melalui artikel penelitian terkait. Data yang dikumpulkan merupakan data sekunder yang dibatasi pada hasil beberapa penelitian dalam bentuk jurnal, artikel, dan situs internet berkaitan dengan penelitian ini.

Data diadopsi dari penelitian yang relevan (Aditya Putri et al., 2020) dengan beton geopolimer berbasis *fly ash* terhadap kekuatan dan durabilitas. Secara spesifik, basis material yang digunakan sebagai variabel penelitian ini memuat *fly ash* kelas F ($\text{CaO} < 10\%$), *sodium silicate* (Na_2SiO_3), *sodium hydroxide* (NaOH), agregat kasar, agregat halus, serta bahan opsional

seperti *superplasticizier* dan air, yang dirawat dengan tipe metode perawatan (*curing*) *heating-ambient*. Basis material dari berbagai kumpulan literatur membentuk variasi *mix design* dan perawatan (*curing*), yang menciptakan hasil data pengujian kekuatan dan durabilitas beton geopolimer. Kekuatan ditilik melalui kuat tekan, sedangkan durabilitas melalui penyerapan air, paparan *elevated temperature*, dan paparan bahan kimia. Tinjauan khusus untuk paparan *elevated temperature* dan paparan bahan kimia adalah menganalisis data perubahan massa dan perubahan kuat tekan beton geopolimer. Kemudian analisis yang digunakan adalah visual grafik dan statistik regresi. Fokus analisis ini adalah menilai signifikansi dan korelasi pengaruh persentase *fly ash* kelas F terhadap kuat tekan, penyerapan air, perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*, serta perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan bahan kimia.

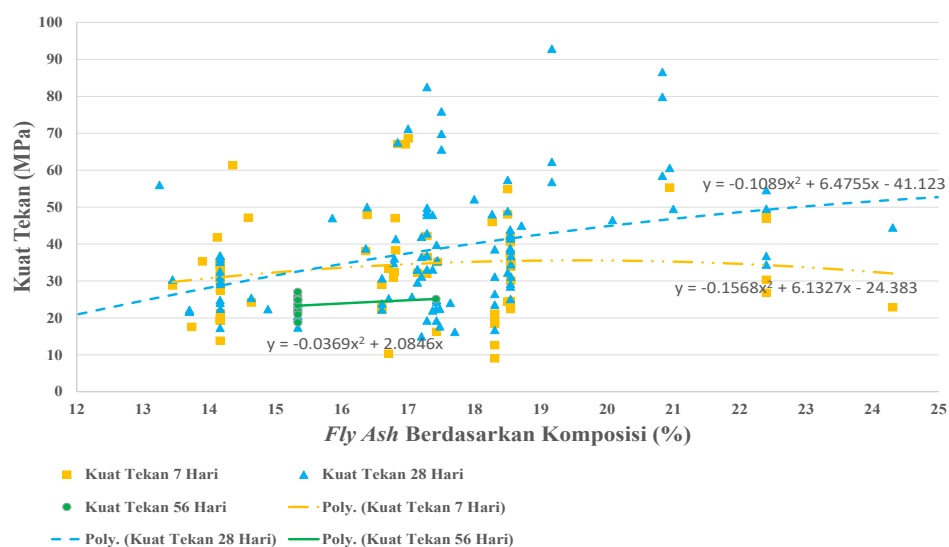
3. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 1 merupakan total kajian data spesimen beton geopolimer berbasis *fly ash*. Terdapat 126 spesimen dari 25 jurnal, yang membahas kuat tekan, penyerapan air, perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*, serta perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan bahan kimia. Masing-masing spesimen memuat komposisi, yaitu *fly ash* kelas F, Na_2SiO_3 , NaOH, agregat kasar, agregat halus, *superplasticizier*, dan air, yang dirawat pada *curing heating-ambient*.

Tabel 1. Total Kajian Data Spesimen Beton Geopolimer Berbasis *Fly Ash*

Peneliti	Jumlah Spesimen	Peneliti	Jumlah Spesimen
(Mazumder & Mlv, 2023)	5	(Wallah, 2010)	2
(Ashfaq et al., 2024)	9	(Ojha & Aggarwal, 2023)	3
(Law et al., 2023)	5	(Law dkk., 2015)	20
(Kurtoğlu et al., 2018)	1	(Mahmoud dkk., 2017)	4
(Nagalia et al., 2016)	2	(Ramujee, 2018)	3
(Bheel et al., 2021)	1	(Sarker et al., 2008)	8
(Patankar et al., 2012)	5	(Mohamed et al., 2015)	24
(Ashraful et al., 2022)	1	(Niş dan Altundal, 2019)	1
(Wardhono & Law, 2014)	1	(Poloju et al., 2023)	3
(Mathew, 2013)	4	(Luan et al., 2021)	9
(Dissanayake et al., 2022)	3	(Devi et al., 2018)	3
(Rihan et al., 2024)	1	(Bawono & Muin, 2024)	4
(Gunasekara, et., 2016)	4		
Total Spesimen		126	

Berdasarkan spesimen dari data yang terkumpul, *fly ash* merupakan salah satu material di dalam komposisi beton geopolimer yang diindikasikan mempunyai pengaruh terhadap kuat tekan, penyerapan air, perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*, serta perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan bahan kimia. Oleh karena itu, muncul hipotesis nol yang menyatakan bahwa *fly ash* mempengaruhi secara signifikan terhadap kuat tekan, penyerapan air, perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*, serta perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan bahan kimia melalui asam dan garam. Hipotesis nol tersebut akan diuji melalui analisis statistik regresi. Lalu bukan hanya dilihat melalui analisis statistik regresi, pengaruh *fly ash* juga akan dianalisis melalui visual grafik.



Gambar 1. Pengaruh persentase *fly ash* terhadap kuat tekan beton geopolimer

Gambar 1 menunjukkan persentase *fly ash* terhadap kuat tekan 7 hari memiliki titik maksimum pada 18%. Terlihat kuat tekan 7 hari cenderung naik dari persentase 13% sampai 18% dan menurun setelah melewati persentase 18%. Lalu untuk persentase *fly ash* terhadap kuat tekan 28 hari, belum menunjukkan titik maksimum. Se jauh persentase *fly ash* yang ditilik, kuat tekan 28 hari memiliki kecenderungan yang terus meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash*. Kemudian untuk persentase *fly ash* terhadap kuat tekan 56 hari, juga tidak memiliki titik maksimum dan kuat tekan cenderung meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash*. Jika ditilik lebih lanjut, berdasarkan penelitian Shaikh et al., (2014), kuat tekan beton geopolimer 28 hari mengalami penurunan setelah persentase *fly ash* menyentuh 40%. Artinya bahwa persentase *fly ash* memiliki titik maksimum dan pernyataan bahwa kuat tekan akan meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash* dapat ditolak.

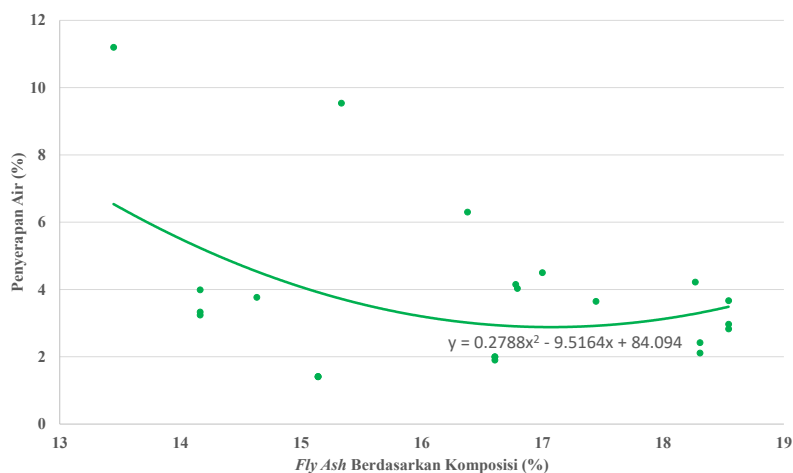
Tabel 2. Statistik Regresi *Fly Ash* terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer

Statistik Regresi	7D KT	28D KT	56D KT
<i>Multiple R</i>	0,098	0,24	0,23
<i>Adjusted R Square</i>	0,6%	5%	7%
<i>Significance F</i>	0,43	0,01	0,53
<i>Coef. Intercept</i>	24,52	21,44	9,85
<i>Coef. %Fly Ash</i>	0,54	0,91	0,88

Keterangan:

7D KT = Kuat Tekan 7 Hari 28D KT = Kuat Tekan 28 Hari 56D KT = Kuat Tekan 56 Hari

Tabel 2 menunjukkan korelasi *fly ash* terhadap kuat tekan 7 hari hanya sebesar 0,098, kuat tekan 28 hari hanya sebesar 0,24, dan kuat tekan 56 hari hanya sebesar 0,23, artinya memiliki korelasi lemah. Sementara itu untuk data *Significance F* menunjukkan bahwa hanya data kuat tekan 28 hari yang memiliki signifikansi (*Significance F* < 0,05) akibat pengaruh *fly ash*. Dengan demikian hipotesis nol hanya dapat dibuktikan pada data kuat tekan 28 hari, sedangkan untuk data kuat tekan 7 dan 56 hari, menciptakan hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan. Hal ini didukung oleh penelitian Kearsley & Wainwright (2001), yang menyatakan bahwa penggantian proporsi semen yang tinggi dengan *fly ash* tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan.



Gambar 2. Pengaruh persentase *fly ash* terhadap penyerapan air

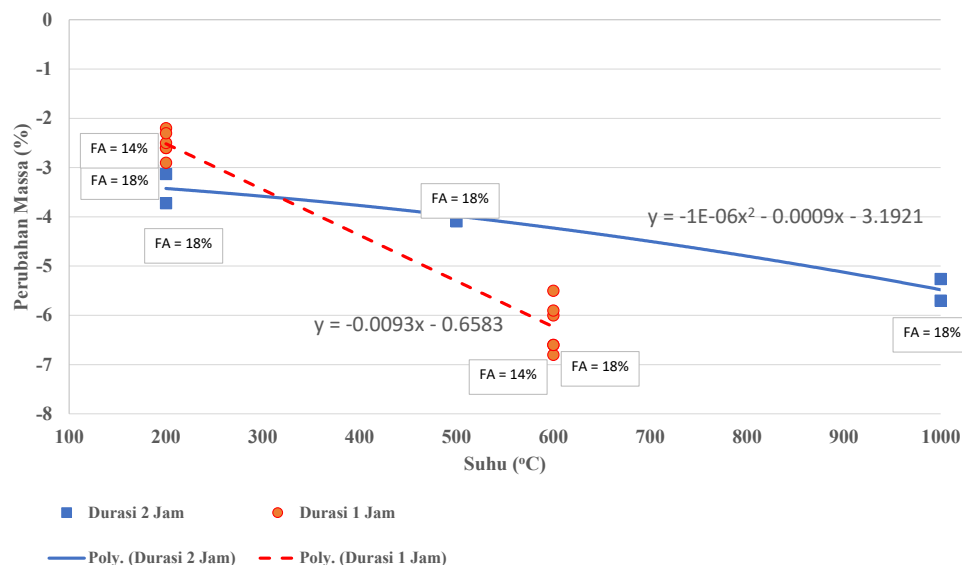
Gambar 2 menunjukkan persentase *fly ash* 13% – 16% cenderung memberikan dampak penurunan persentase penyerapan air. Sedangkan kenaikan persentase penyerapan air muncul setelah persentase *fly ash* 17% dan terus meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash*. Merujuk pada nilai minimum persentase penyerapan air, garis tren menyentuh nilai penyerapan air sebesar 3%, yang artinya beton geopolimer berbasis *fly ash* berpotensi masuk ke dalam kategori mutu tinggi.

Tabel 3. Statistik Regresi *Fly Ash* terhadap Penyerapan Air Beton Geopolimer

Statistik Regresi	PA
<i>Multiple R</i>	0,31
<i>Adjusted R Square</i>	5%
<i>Significance F</i>	0,15
<i>Coef. Intercept</i>	11,21
<i>Coef. %Fly Ash</i>	-0,46

Keterangan: PA = Penyerapan Air

Tabel 3 menunjukkan korelasi yang lemah antara *fly ash* terhadap penyerapan air dengan nilai 0,31. Sementara itu, nilai *significance F* menunjukkan bahwa tidak adanya signifikansi (*Significance F* > 0,05) antara *fly ash* dengan penyerapan air. Dengan demikian, hipotesis nol tidak dapat dibuktikan, sehingga muncul hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap penyerapan air. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*.



Gambar 3. Pengaruh Persentase *Fly Ash* terhadap Perubahan Massa Akibat Paparan *Elevated Temperature*

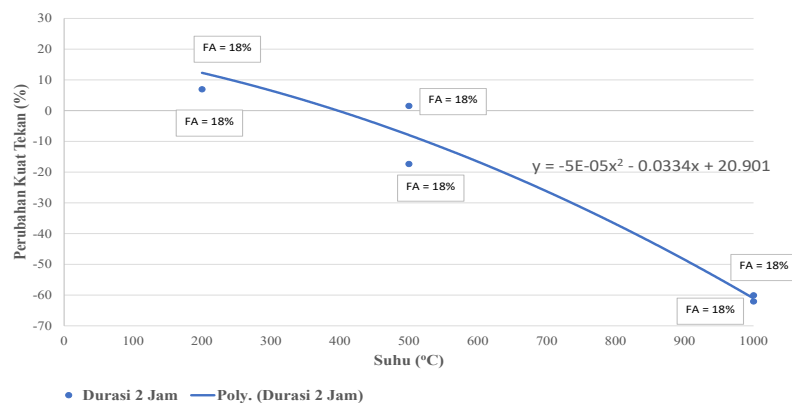
Gambar 3 menunjukkan bahwa paparan *elevated temperature* cenderung memberikan pengurangan massa pada beton geopolimer. Pengurangan massa diakibatkan oleh paparan suhu dan durasi paparan *elevated temperature*. Sementara itu, persentase *fly ash* belum terlihat mempengaruhi perubahan massa pada uji ini. Sejauh terkumpulnya data, pengurangan massa tidak melebihi 7% dari massa awal beton geopolimer.

Tabel 4. Statistik Regresi Durasi, Suhu Paparan, dan Fly Ash Akibat Elevated Temperature terhadap Perubahan Massa Beton Geopolimer

Statistik Regresi	PM
<i>Multiple R</i>	0,84
<i>Adjusted R Square</i>	64%
<i>Significance F</i>	0,0005
<i>Coef. Intercept</i>	-4,01
<i>Coef. DP</i>	0,87
<i>Coef. SuP</i>	-0,01
<i>Coef. Fly Ash</i>	0,06
<i>P-Value DP</i>	0,15
<i>P-Value SuP</i>	$4,85 \times 10^{-5}$
<i>P-Value Fly Ash</i>	0,67

Keterangan: PM = Perubahan Massa Akibat Paparan *Elevated Temperature*

Tabel 4 menunjukkan bahwa tidak adanya signifikansi ($P\text{-Value Fly Ash} > 0,05$) antara *fly ash* dengan perubahan massa akibat paparan *elevated temperature*. Dengan demikian, hipotesis nol tidak dapat dibuktikan, sehingga muncul hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan massa beton geopolimer akibat paparan *elevated temperature*. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*.



Gambar 3. Pengaruh persentase *fly ash* terhadap perubahan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*

Gambar 3 menunjukkan paparan *elevated temperature* cenderung memberikan pengurangan kuat tekan pada beton geopolimer. Pengurangan kuat tekan diakibatkan oleh paparan suhu dengan durasi 2 jam. Sementara itu, persentase *fly ash* belum terlihat mempengaruhi perubahan kuat tekan pada uji ini, karena *fly ash* yang digunakan pada setiap data adalah sama.

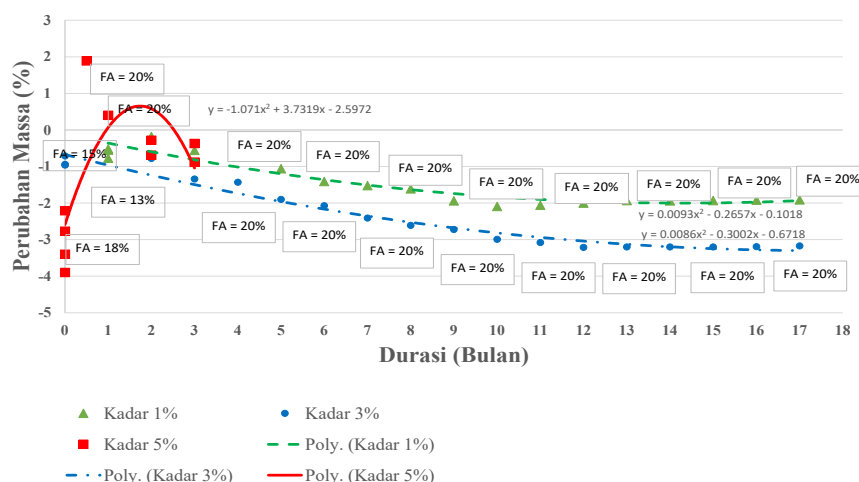
Sejauh terkumpulnya data, pengurangan kuat tekan tidak melebihi 70% dari kuat tekan awal beton geopolimer.

Tabel 5. Statistik Regresi Durasi, Suhu Paparan, dan *Fly Ash* Akibat *Elevated Temperature* terhadap Perubahan Kuat Tekan Beton Geopolimer

Statistik Regresi	PKT
<i>Multiple R</i>	0,97
<i>Adjusted R Square</i>	44%
<i>Significance F</i>	0,01
<i>Coef. Intercept</i>	33.90
<i>Coef. DP</i>	-
<i>Coef. SuP</i>	- 0,09
<i>Coef. Fly Ash</i>	-
<i>P-Value DP</i>	-
<i>P-Value SuP</i>	-
<i>P-Value Fly Ash</i>	-

Keterangan: PKT = Perubahan Kuat Tekan Akibat Paparan *Elevated Temperature*

Tabel 5 menunjukkan bahwa tidak adanya signifikansi ($P\text{-Value Fly Ash} > 0,05$) antara *fly ash* dengan perubahan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*. Dengan demikian hipotesis nol tidak dapat dibuktikan, sehingga muncul hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan kuat tekan beton geopolimer akibat paparan *elevated temperature*. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*. Kemudian untuk koefisien pembentuk persamaan regresi tidak dapat digunakan karena tidak ada signifikansi antara *fly ash* dan perubahan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*.



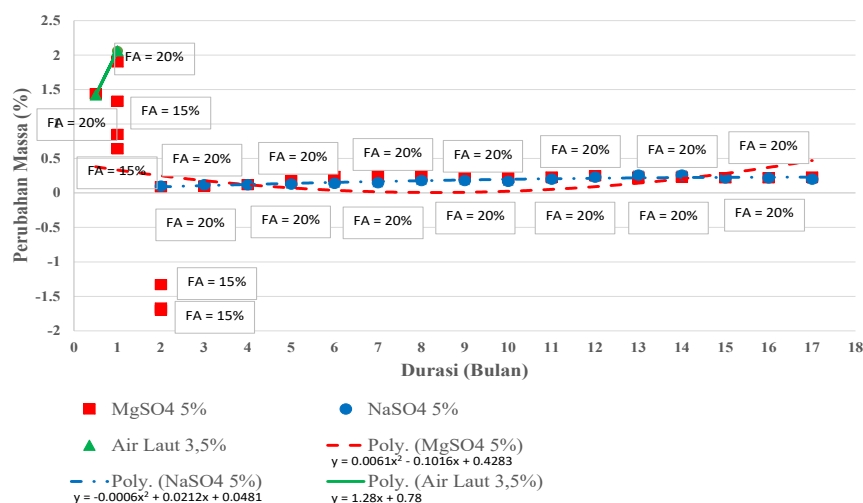
Gambar 4. Perubahan massa akibat paparan asam

Gambar 4 menunjukkan paparan asam melalui H_2SO_4 cenderung memberikan pengurangan massa pada beton geopolimer. Pengurangan massa diakibatkan oleh kadar dan durasi paparan. Sementara itu, persentase *fly ash* belum terlihat mempengaruhi perubahan massa pada uji ini. Sejauh terkumpulnya data, pengurangan massa tidak melebihi 4% dari massa awal beton geopolimer.

Tabel 6. Statistik Regresi *Fly Ash*, Kadar, dan Durasi Paparan Akibat Asam terhadap Perubahan Massa Beton Geopolimer

Statistik Regresi	H_2SO_4
<i>Multiple R</i>	0,62
<i>Adjusted R Square</i>	35%
<i>Significance F</i>	$6,74 \times 10^{-5}$
<i>Coef. Intercept</i>	0,28
<i>Coef. KH</i>	-0,24
<i>Coef. DP</i>	-0,14
<i>Coef. Fly Ash</i>	-0,002
<i>P-Value KH</i>	0,02
<i>P-Value DP</i>	$7,64 \times 10^{-5}$
<i>P-Value Fly Ash</i>	0,74

Tabel 6 menunjukkan bahwa tidak adanya signifikansi ($P\text{-Value Fly Ash} > 0,05$) antara *fly ash* dengan perubahan massa akibat paparan asam. Dengan demikian, hipotesis nol tidak dapat dibuktikan, sehingga muncul hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan massa beton geopolimer akibat paparan asam. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*.



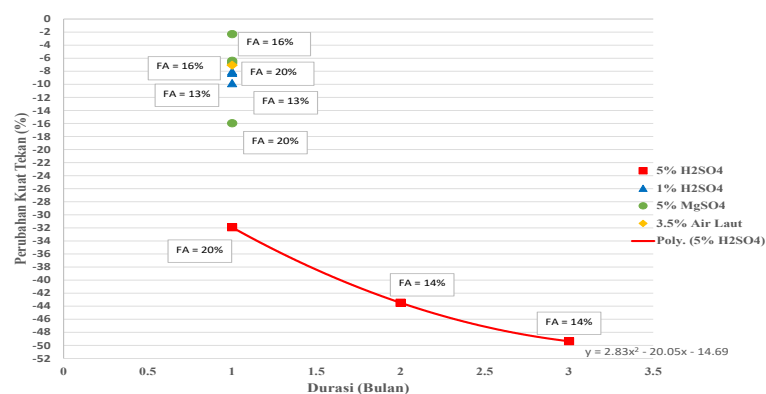
Gambar 5. Perubahan massa akibat paparan garam

Gambar 5 menunjukkan paparan garam melalui MgSO_4 , NaSO_4 , dan air laut cenderung memberikan penambahan massa pada beton geopolimer. Penambahan massa diakibatkan oleh jenis garam, kadar dan durasi paparan. Sementara itu, persentase *fly ash* belum terlihat mempengaruhi perubahan massa pada uji ini. Se jauh terkumpulnya data, pengurangan massa tidak melebihi 2% dan penambahan massa tidak lebih dari 2,5% dari massa awal beton geopolimer.

Tabel 7. Statistik Regresi Kadar, Durasi Paparan, dan *Fly Ash* Akibat Garam terhadap Perubahan Massa Beton Geopolimer

Statistik Regresi	MgSO_4	NaSO_4	Air Laut
<i>Multiple R</i>	0,67	0,89	1
<i>Adjusted R Square</i>	37%	73%	100%
<i>Significance F</i>	0,01	$2,57 \times 10^{-4}$	-
<i>Coef. Intercept</i>	-5,48	$8,73 \times 10^{12}$	0,78
<i>Coef. KMg/KNa/KAL</i>	-	-	-
<i>Coef. DP</i>	-0,06	0,01	1,28
<i>Coef. Fly Ash</i>	-0,32	$-4,35 \times 10^{11}$	-
<i>P-Value KMg/KNa/KAL</i>	-	-	-
<i>P-Value DP</i>	-	-	-
<i>P-Value Fly Ash</i>	$7,65 \times 10^{-4}$	0,75	-

Tabel 7 menunjukkan terdapat signifikansi ($P\text{-Value Fly Ash} < 0,05$) antara *fly ash* dengan perubahan massa akibat paparan garam, yaitu MgSO_4 . Namun pada paparan garam yang lain, seperti NaSO_4 dan air laut, *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan. Dengan demikian hipotesis nol hanya dapat dibuktikan antara *fly ash* dan paparan MgSO_4 , sedangkan signifikansi antara *fly ash* dengan NaSO_4 dan air laut, memunculkan hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan massa beton geopolimer akibat paparan NaSO_4 dan air laut. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*.



Gambar 6. Perubahan kuat tekan akibat paparan asam dan garam

Gambar 6 menunjukkan baik paparan asam maupun garam cenderung memberikan pengurangan kuat tekan pada beton geopolimer. Pengurangan kuat tekan diakibatkan oleh kadar dan durasi paparan. Sementara itu, persentase *fly ash* yang memiliki kecenderungan hanya terlihat pada H_2SO_4 kadar 5%, yaitu semakin kecil persentase *fly ash*, maka semakin berkurang kuat tekan. Sejauh terkumpulnya data, pengurangan tidak melebihi 50% dari kuat tekan awal beton geopolimer.

Tabel 8. Statistik Regresi Kadar, Durasi Paparan, dan *Fly Ash* Akibat Asam dan Garam terhadap Perubahan Kuat Tekan Beton Geopolimer

Statistik Regresi	H_2SO_4	$MgSO_4$	Air Laut
<i>Multiple R</i>	0,99	1	1
<i>Adjusted R Square</i>	99%	100%	100%
<i>Significance F</i>	0,002	-	-
<i>Coef. Intercept</i>	-7,99	35,72	-7,07
<i>Coef. KH/KMg/KAL</i>	-7,49	-	-
<i>Coef. DP</i>	-5,9	-	-
<i>Coef. Fly Ash</i>	0,93	-2,46	-
<i>P-Value KH/KMg/KAL</i>	0,01	-	-
<i>P-Value DP</i>	0,05	-	-
<i>P-Value Fly Ash</i>	0,14	-	-

Tabel 8 menunjukkan bahwa tidak adanya signifikansi ($P\text{-Value Fly Ash} > 0,05$) antara *fly ash* dengan perubahan massa akibat paparan asam dan garam. Dengan demikian, hipotesis nol tidak dapat dibuktikan, sehingga muncul hipotesis alternatif, yaitu *fly ash* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan kuat tekan beton geopolimer akibat paparan asam dan garam. Hal ini didukung oleh penelitian Tarun R. Naik et al. (2003), yang menyatakan bahwa kepadatan beton tidak dipengaruhi secara signifikan oleh jenis dan jumlah proporsi *fly ash*.

4. KESIMPULAN

Garis besar hasil dan diskusi tentang pengaruh *fly ash* terhadap kuat tekan, penyerapan air, perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan *elevated temperature*, serta perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan bahan kimia melalui asam dan garam, telah dirangkum sebagai berikut:

1. *Fly ash* memiliki korelasi lemah dan tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan beton geopolimer. Secara visual grafik, grafik dengan batas maksimum persentase *fly ash* 25%, dapat dilihat bahwa potensi kuat tekan akan terus meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash*, namun menurut penelitian Shaikh dkk. (2014), kuat tekan beton geopolimer 28 hari mengalami penurunan setelah persentase *fly ash* menyentuh 40%. Artinya bahwa persentase *fly ash* memiliki titik maksimum dan

pernyataan bahwa kuat tekan akan meningkat seiring bertambahnya persentase *fly ash* dapat ditolak.. Analisis persentase *fly ash* terhadap data kuat tekan 7 dan 56 hari, tidak dapat dijadikan acuan karena belum menunjukkan signifikansi dan memiliki korelasi yang lemah.

2. *Fly ash* memiliki korelasi lemah dan tidak signifikan terhadap penyerapan air beton geopolimer. Secara visual grafik, titik maksimum dengan penyerapan air terendah adalah *fly ash* dengan persentase 17%.
3. *Fly ash* memiliki korelasi lemah dan tidak signifikan terhadap perubahan massa dan kuat tekan beton geopolimer akibat paparan *elevcated temperature*. Secara visual grafik, *fly ash* tidak terlihat mempengaruhi perubahan massa dan kuat tekan beton geopolimer.
4. *Fly ash* memiliki signifikansi terhadap perubahan massa akibat paparan garam, yaitu $MgSO_4$. Selain itu, *fly ash* tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan massa dan kuat tekan akibat paparan asam dan garam. Secara visual grafik, *fly ash* tidak terlihat mempengaruhi secara signifikan terhadap perubahan massa dan kuat tekan beton geopolimer.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aditya Putri F., Bramasta D., & Hawanti, S. (2020). Pembelajaran The Power Of Two Di SD, *Jurnal Educatio FKIP UNMA*, 6 (2), 605–10. doi:10.31949/educatio.v6i2.561
- Ashfaq, M. H., Sharif, M. B., Irfan-ul-Hassan, M., Sahar, U. us, Akmal, U., & Mohamed, A. (2024). Up-Scaling Of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete To Investigate The Binary Effect Of Locally Available Metakaolin With Fly Ash. *Heliyon*, 10 (4). Elsevier Ltd, doi:10.1016/j.heliyon.2024.e26331
- Ashraful Habib, M., Ahnaf Abid Basunia Hajee Mohammad, M., Rakibul Islam Hajee Mohammad, M., Ahammad Hajee Mohammad, J., Ahnaf Abid Basunia, M., Rakibul Islam, M., Ahammad, J., & Ibrahim Mostazid, M. (2022). Effect of Rice Straw Ash on mechanical properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete Cured at Elevated Temperature, iCSER 2022, <https://www.researchgate.net/publication/365873333>
- Badrawi, H. A., Makahleh, H. Y., & Haweileh, R. A. (2022). Compressive Strength and Durability of Geopolymer Concrete in 2022 *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences*, ASET 2022. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., doi:10.1109/ASET53988.2022.9734934
- Bawono, D. & Muin, R. B. (2024). Efek Molaritas Aktivator (NaOH) pada Beton Geopolymer dengan Bahan Pengikat Limbah Fly Ash PLTU Lontar. *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 12 (2), 111–20. Universitas Sriwijaya (Relawan). doi:10.35139/cantilever.v12i2.253
- Bheel, N., Awoyera, P., Tafsirojjaman, T., Hamah Sor, N., & sohu, S. (2021). Synergic Effect Of Metakaolin And Groundnut Shell Ash On The Behavior Of Fly Ash-Based Self-Compacting Geopolymer Concrete, *Construction and Building Materials*, 311 (Desember). Elsevier Ltd, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125327
- Devi, S. C., Khan, R. A., & Rautela, B. S. (2018). Influence of Metakaolin on Chemical Resistance of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete in IOP Conference Series: Materials Science and Engineerin, 431. Institute of Physics Publishing. doi:10.1088/1757-899X/431/9/092008
- Dissanayake, D. M. H., Dissanayake, D. M. A. K., & Pathirana, C. K. (2022). Strength properties of Fly Ash based Geopolymer Concrete cured at different temperatures. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22.
- Gunasekara, C., Law, D. W., & Setunge, S. (2016). Long Term Engineering Properties Of Fly Ash Geopolymer Concrete in Sustainable Construction Materials and Technologies. Vol. 2016-August. International Committee of the SCMT conferences, doi:10.18552/2016/scmt4s109
- Kearsley, E. P. & Wainwright, P. J. (2001). The Effect of High Fly Ash Content on The Compressive Strength of Foamed Concrete. *Cement and Concrete Research*.
- Kurtoğlu, A. E., Alzebaree, R., Aljumaili, O., Niş, A., Gülşan, M. E., Humur, G., & Çevik, A. (2018). Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Advances in Concrete Construction*, 6 (4), 345–62. Techno Press. doi:10.12989/acc.2018.6.4.345.
- Law, D., Gunasekara, C., Patrisia, Y., Fernando, S., & Wardhono, A. (2023). Development Of Durable Class F Fly Ash Based Geopolymer Concretes in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 1157. Institute of Physics, doi:10.1088/1755-1315/1157/1/012024
- Law, D. W., Setunge, S., Gunasekara, C., & Gunasekara, M. P. C. M. (2015). A Comparative Study Of Durability Characteristics And Microstructure Of Five Different Fly Ash Based *Geopolymer Concretes*. RMIT University.

- <https://www.researchgate.net/publication/284163660>
- Luan, C., Shi, X., Zhang, K., Utashev, N., Yang, F., Dai, J., & Wang, Q. (2021). A Mix Design Method Of Fly Ash Geopolymer Concrete Based On Factors Analysis. *Construction and Building Materials*, 272 (Februari). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121612
- Mahmoud S., Ganjeena K., & Faten M. (2017). Engineering and Microstructures Characteristics of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Eurasian Journal of Science and Engineering*, 2 (2). Ishik University. doi:10.23918/eajse.v2i2p27
- Mathew, G. (2013). Interface Shear Strength of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Hunedoara Romania, <https://www.researchgate.net/publication/268632434>
- Mazumder, E. A. & Prasad M, L. V. (2023). Performance Enhancement of Fly Ash-Based Self Compacting Geopolymer Concrete Using Pre-heating Technique. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 47 (4), 2073–2085. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi:10.1007/s40996-023-01046-5
- Mohamed, O., Ibrahim, O., Abd, G. D., Heniegal, A., & Mohamadien, H. A. (2015). Effect of Crashed Stone on Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete with Local Alkaline Activator in Egypt, *International Journal of Civil*, <https://www.researchgate.net/publication/325273842>
- Nagalia, G., Park, Y., Abolmaali, A., & Aswath, P. (2016). Compressive Strength and Microstructural Properties of Fly Ash–Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28 (12). American Society of Civil Engineers (ASCE), doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001656
- Niş, A. & Altundal, M. B. (2019). Mechanical Strength Degradation of Slag and Fly Ash Based Geopolymer Specimens Exposed to Sulfuric Acid Attack. *Sigma J Eng & Nat Sci*, 37. <https://www.researchgate.net/publication/336698606>
- Ojha, A., & Aggarwal, P. (2023). Durability Performance Of Low Calcium Flyash-Based Geopolymer Concrete. *Structures*, 54 (Agustus). Elsevier Ltd: 956–63, doi:10.1016/j.istruc.2023.05.115
- Patankar, S. V., Jamkar, S. S., & Ghugal, Y. M. (2012). Effect Of Water-To-Geopolymer Binder Ratio On The Production Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *International Journal of Advanced Technology in Civil Engineering*, Oktober. Institute for Project Management Pvt. Ltd, 296–300, doi:10.47893/ijatce.2012.1048
- Poloju, K. K., Annadurai, S., Manchiryal, R. K., Goriparthi, M. R., Baskar, P., Prabakaran, M., & Kim, J. (2023). Analysis of Rheological Characteristic Studies of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *Buildings*, 13 (3). MDPI, doi:10.3390/buildings13030811
- Ramujee, K. (2018). Engineering properties of fly ash based geopolymer concrete. *Journal of Structural Engineering*. Vol. 385.
- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024). Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete Containing Fly Ash and Sugarcane Bagasse Ash. *Civil Engineering Journal*, 10 (4), 1292–1309. doi:10.28991/CEJ-2024-010-04-018
- Sarker, P. K., Olivia-Phd, M., Nikraz-Professor, H., & Prabir Sarker-Lecturer. (2008). Improvements In The Strength And Water Penetrability Of Low Calcium Fly Ash Based Geopolymer Concrete. ACF/VCA, <https://www.researchgate.net/publication/267820893>
- Wallah E. (2010). Creep Behaviour of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Civil Engineering Dimension*, 12 (2), 73-78. Petra Christian University, doi:10.9744/ced.12.2.
- Shaikh, F. U. A., Supit, S. W. M., & Sarker, P. K. (2014). A Study on The Effect of Nano Silica on Compressive Strength of High Volume Fly Ash Mortars and Concretes. *Materials and Design*, 60, 433-442. Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.matdes.2014.04.025

- Tarun R. Naik, Bruce W. Ramme, Rudolph N. Kraus, & Rafat Siddique. (2003). Long-Term Performance of HVFA Concrete Pavements. *ACI Materials Journal*.
- Wardhono, A. & Law, D. W. (2014). The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer In Long Term Performance. Universitas Negeri Surabaya.
<https://www.researchgate.net/publication/263550921>