STUDI PENELITIAN PENGARUH PENAMBAHAN SERAT ALUMINIUM PADA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH BERDASARKAN SIFAT KARAKTERISTIK MEKANIS BETON

Efrandy Umbu Pati Mbiliyora[1], Mohammad Erfan[2], dan I Nyoman Sudiasa[3]

[1]*Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Perum Bukit Cemara Tidar Blok. D1. No.8B Malang*
Email: 2121104@scholar.itn.ac.id
[2] *Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Perum Joyo Grand Kav. A-22 Malang*
Email: Mohammaderfan@gmail.com
[3]*Prodi Teknik Sipil, ITN Malang, Jl. ikan Tombro Tengah Sawah No. 28, Malang*
Email: nyomansudiasa@yahoo.co.id

ABSTRACT

This research aims to investigate the effect of aluminum fiber addition on the mechanical properties of fly ash–based geopolymer concrete. Geopolymer concrete is an eco-friendly material innovation that uses fly ash as a binder, thereby reducing dependency on conventional Portland cement. The study was conducted experimentally with aluminum fiber variations of 0%, 0.050%, 0.075%, and 1% of the total concrete volume. Each variation was tested for compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength at the ages of 7 days. The results indicate that the addition of aluminum fibers enhances the mechanical performance of geopolymer concrete compared to mixes without fibers. The optimum performance was achieved at 0.050% fiber content, which produced the most significant increase in compressive, splitting tensile, and flexural strength. However, adding more than 0.050% fibers tended to reduce strength due to uneven fiber distribution and the formation of air voids within the mixture. In conclusion, the use of aluminum fibers as an additive in fly ash–based geopolymer concrete effectively improves mechanical strength up to a certain optimum level. These findings are expected to provide an alternative solution for the development of sustainable and environmentally friendly construction materials with reliable structural performance.
Keywords: geopolymer concrete, fly ash, aluminum fiber

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan serat aluminium terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash*. Beton geopolimer merupakan inovasi material ramah lingkungan yang menggunakan *fly ash* sebagai bahan pengikat, sehingga mampu mengurangi ketergantungan terhadap semen portland konvensional. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi persentase serat aluminium sebesar 0%, 0,050%, 0,075%, dan 1% dari volume campuran. Setiap variasi diuji untuk mengetahui kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur pada umur 7 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat aluminium mampu meningkatkan performa mekanik beton geopolimer dibandingkan dengan campuran tanpa serat. Nilai optimum diperoleh pada penambahan serat aluminium sebesar 0,050%, yang menghasilkan peningkatan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur paling signifikan. Namun, penambahan serat lebih dari 0,050% cenderung menurunkan kekuatan beton akibat distribusi serat yang tidak merata dan terbentuknya rongga udara pada campuran. Dengan demikian, penggunaan serat aluminium sebagai bahan tambahan pada beton geopolimer berbasis *fly ash* efektif meningkatkan kekuatan mekanik hingga batas optimum tertentu. Temuan ini diharapkan dapat menjadi alternatif solusi dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang ramah lingkungan sekaligus memiliki performa struktural yang baik.
Kata kunci: beton geopolimer, *fly ash*, serat aluminium

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material penting dalam konstruksi, namun penggunaan semen sebagai pengikat utama menghasilkan emisi CO_2 yang tinggi dan berdampak pada pemanasan global [(Cahyaningrum, 2024)]. Salah satu alternatif ramah lingkungan adalah beton geopolimer yang menggunakan *fly ash*, limbah hasil pembakaran batubara di PLTU. *Fly ash* mengandung silika (SiO_3) dan alumina (Al_2O_3) yang bersifat pozzolanik, sehingga dapat bereaksi dengan larutan alkali seperti NaOH dan Na_2SiO_3 untuk membentuk

ikatan polimer yang kuat [(Yakobus Managi et al., 2023)]. Dengan demikian, pemanfaatan *fly ash* tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen, tetapi juga membantu menekan jumlah limbah industri.

Untuk meningkatkan performa mekanis beton geopolimer, serat aluminium dari limbah kaleng dapat ditambahkan sebagai bahan penguat. Aluminium dipilih karena tahan korosi dan mampu meningkatkan kekuatan tekan, tarik, serta lentur beton. Penelitian sebelumnya menunjukkan variasi persentase serat aluminium berpengaruh signifikan, dengan komposisi optimal 0,065% menghasilkan kuat tekan 21,17 MPa, kuat tarik belah 2,45 MPa, dan kuat tarik lentur 5,88 MPa [(Moch Nagas Maulana, 2023)]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji lebih lanjut pengaruh penambahan serat aluminium pada beton geopolimer berbasis *fly ash* terhadap karakteristik mekanis beton.

2. DASAR TEORI

Teori Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah bahan ramah lingkungan yang dibuat sebagai pengganti beton semen di masa depan. Beton ini tidak memakai semen portland, tapi diganti dengan bahan yang punya aluminium dan silika, seperti *fly ash*, abu bekatul, atau abu vulkanik. (Davidovits, 1997)

Semen geopolimer mengeras cepat pada suhu kamar dan memberikan nilai kuat tekan dalam kisaran 15 - 20 MPa, setelah hanya 4 jam pada suhu 20^{o}C, saat diuji sesuai dengan standar yang diterapkan pada mortar pengikat hidrolik. kekuatan kompresi 28 hari terakhir berada dikisaran 70 - 100 MPa. (Davidovits, 1994)

Beton Serat

Beton serat adalah beton biasa yang dicampur dengan serat buatan atau alami untuk memperbaiki sifat mekanisnya. Penambahan serat berfungsi mencegah retak, meningkatkan kekuatan tarik, lentur, serta ketahanan terhadap kelelahan, susut, abrasi, pecahan, dan pengelupasan (ACI). Beton serat tersusun dari semen, agregat halus, agregat kasar, dan serat yang tersebar acak, serta dapat ditambah bahan aditif.

Tujuan utama penambahan serat adalah meningkatkan kekuatan tarik beton yang secara alami rendah, sehingga beton lebih tahan retak. Meski serat tidak banyak meningkatkan kuat tekan, keberadaannya membuat beton lebih lentur dan memiliki ketahanan yang lebih baik. [(Tjokrodimulyo, 1996)]

Fly Ash sebagai Material Geopolimer

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batubara di PLTU. Berdasarkan kandungan kimianya, *fly ash* terbagi menjadi tipe F (low calcium) dan tipe C (high calcium). *Fly ash* tipe C yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kandungan CaO tinggi yang mempercepat reaksi ikatan dalam beton geopolimer. Dengan kandungan silika dan alumina, *fly ash* mampu berperan sebagai pengikat setelah diaktivasi dengan larutan alkali.

Alkali Aktivator

Alkali aktivator berfungsi mengaktifkan kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) pada *fly ash*. Kombinasi natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) mempercepat proses polimerisasi dan berpengaruh langsung pada kuat tekan beton. Variasi molaritas dan rasio campuran keduanya menentukan kualitas mekanik beton geopolimer

Pengelolaan Data

Untuk menjamin validitas hasil penelitian, dilakukan analisis statistik, meliputi:

1. Interval Kepercayaan (95%): digunakan untuk memastikan data hasil pengujian berada pada rentang yang reliabel.
2. Analisis Regresi: digunakan untuk mengetahui hubungan antara variasi serat aluminium dan sifat mekanik beton (kuat tekan, tarik belah, dan lentur)
3. Uji Hipotesis: dilakukan untuk menilai signifikansi pengaruh penambahan serat aluminium terhadap beton geopolimer berbasis *fly ash*.

Hipotesis Penelitian

Hipotesis merupakan jawaban sementara atas permasalahan penelitian, yang akan diuji kebenarannya berdasarkan data empiris. Hipotesis dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:.

1. Hipotesis Nol (H_0): Penambahan serat aluminium tidak berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash.*
2. Hipotesis Alternatif (H_a): Penambahan serat aluminium berpengaruh signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash.*

3. GAMBAR DAN TABEL

Rancangan Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang. Benda uji yang dipakai berupa beton geopolimer bentuk silinder dan balok, dicampur dengan serat kaleng aluminium. Serat ditambahkan dengan variasi 0,05%, 0,075%, dan 0,1% dari total volume beton. Panjang serat aluminium 20 mm dan lebar 2 mm. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kuat tekan, tarik belah, dan lentur, setelah beton berumur 7 hari.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Program Studi Teknik Sipil, Institut

Teknologi Nasional Malang. Analisis komposisi kimia *fly ash* dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Waktu penelitian berlangsung dari Maret 2025 hingga Juli 2025, mencakup tahap persiapan material, pembuatan benda uji, perawatan, pengujian, dan analisis data.

Tabel 1. Waktu Penelitian

No	Nama Kegiatan	Waktu																													
		2025																													
		Bulan Ke-3				Bulan Ke-4				Bulan Ke-5				Bulan Ke-6				Bulan Ke-7				Bulan Ke-8									
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4						
1	Studi literatur																														
2	Penyusunan Proposal penelitian																														
3	Seminar Proposal																														
4	Pemilihan Alat & Material																														
5	Pengujian Material																														
6	Pembuatan Mix Design																														
7	Pengecoran Benda Uji																														
8	Perawatan (Curing)																														
9	Pengujian Benda Uji																														
10	Pengolahan Data Hasil Pengujian																														
11	Pembahasan Hasil Pengujian (BAB IV &																														

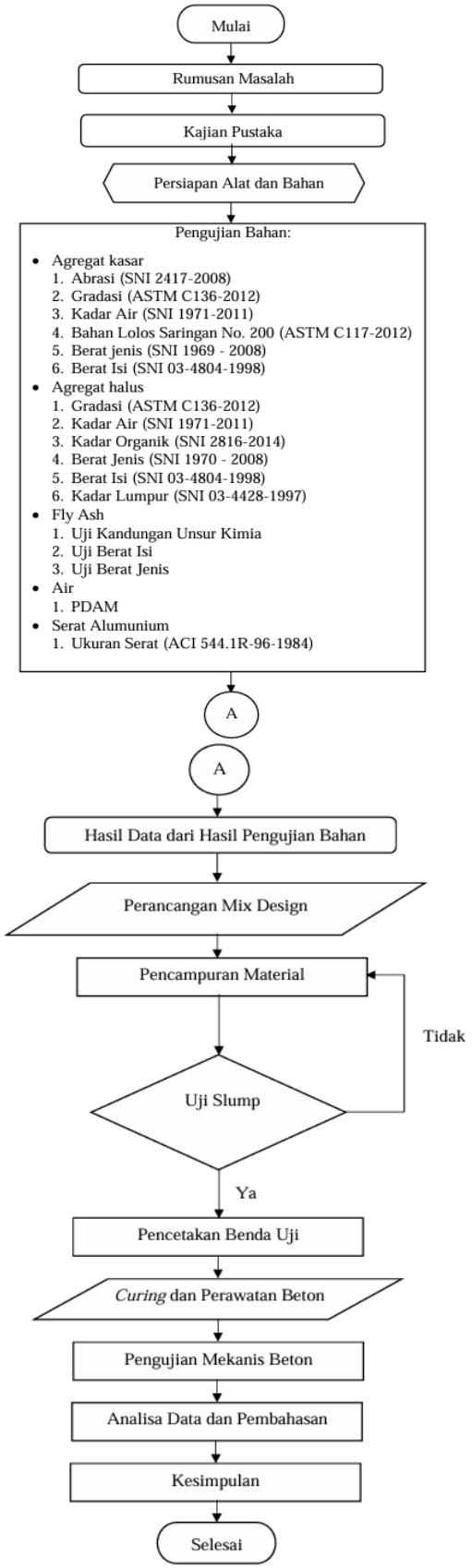
Populasi dan Sampel

Dalam penelitian ini, keseluruhan objek yang diuji dapat dianggap sebagai populasi, sementara objek yang mewakili sebagian anggota populasi disebut sampel. Variasi campuran dan jumlah sampel (objek uji) ditentukan sebagai berikut:

Tabel 2. Variasi Pengujian Beton

Jenis Pengujian	Variasi Serat	Umur (hari)	Ukuran Sampel (cm)	Jumlah Sampel (buah)
Kuat Tekan	0,050%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Tekan	0,075%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Tekan	0,1%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Tarik Belah	0,050%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Tarik Belah	0,075%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Tarik Belah	0,1%	7	Silinder 15 x 30	2
Kuat Lentur	0,050%	7	Balok 60 x 15 x15	2
Kuat Lentur	0,075%	7	Balok 60 x 15 x15	2
Kuat Lentur	0,1%	7	Balok 60 x 15 x15	2
Total				18

Diagram Alir Penelitian



4. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Material Campuran Beton

Seluruh pengujian material yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Bangunan, Kampus 1, ITN Malang bertujuan untuk mengetahui mutu dan karakteristik agregat maupun semen sebagai bahan penyusun beton. Pemeriksaan meliputi berat isi, gradasi butiran, kadar lumpur, kadar air, berat jenis dan penyerapan agregat, serta konsistensi normal dan waktu ikat semen. Hasil dari pengujian ini menjadi dasar penting dalam menentukan proporsi campuran beton yang tepat agar diperoleh beton dengan sifat mekanis sesuai standar dan berkualitas baik.

Tabel 3. Rangkuman Hasil Pengujian Material

No.	Pengujian	Standar Acuan	Spesifkasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Isi Agregat Kasar (g/cm³)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,391	-
	• Padat		-	1,476	-
2	Berat Isi Agregat Halus (g/cm³)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,658	-
	• Padat		-	1,759	-
3	Berat Isi *Fly Ash* (g/cm3)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,186	-
	• Padat		-	1,294	-
4	Analisis Saringan Agregat Kasar	SNI 03-1968-1990	-	Maks. 25mm	-
5	Analisis Saringan Agregat Halus	SNI 03-1968-1990	-	Zona 2	-
6	Bahan Lolos Saringan No.200 Agregat Halus (%)	SNI 03-4142-1996	Maks. 5	1,03	Memenuhi
7	Kadar Lumpur Agregat Halus (%)	SNI 03-4428-1997	Maks. 5	0,20	Memenuhi
8	Kadar Zat Organik Agregat Halus	SNI 2816:2014	-	Warna Cairan Bening	-
9	Kadar Air Agregat Kasar (%) • Asli • SSD	SNI 03-1971-1990		1,38 1,87	- -
10	Kadar Air Agregat Halus (%) • Asli • SSD	SNI 03-1971-1990	-	4,28 0,46	- -
11	BJ dan Penyerapan Agregat Kasar • Berat Jenis Bulk • Berat Jenis Ssd • Berat Jenis Apparent • Penyerapan (Absorbsi)	SNI 1970:2008	-	2,65 2,70 2,79 1,87	-
12	BJ dan Penyerapan Agregat Halus • Berat Jenis Bulk • Berat Jenis Ssd • Berat Jenis Apparent • Penyerapan (Absorbsi)	SNI 1969:2008	-	2,70 2,72 2,74 0,46	-
13	BJ *Fly Ash*	SNI 03-2531-1991	-	2,56	-
14	Abrasi *(los angeles)* %	SNI 2417 - 2008	Maks. 40	13,43	Memenuhi
15	Konsistensi dan Waktu ikat *Fly Ash* • Waktu Ikat Awal (menit) • Waktu Ikat Akhir (menit)	SNI 15-2049-2004	Min. 23 Maks. 36		

Sumber: *Hasil Analisis*

Tabel 3. merangkum hasil pengujian karakteristik material beton yang meliputi agregat kasar, agregat halus, dan semen. Seluruh parameter memenuhi standar SNI, termasuk kadar lumpur, abrasi, dan waktu

ikat. Material dinyatakan layak untuk digunakan dalam campuran beton.

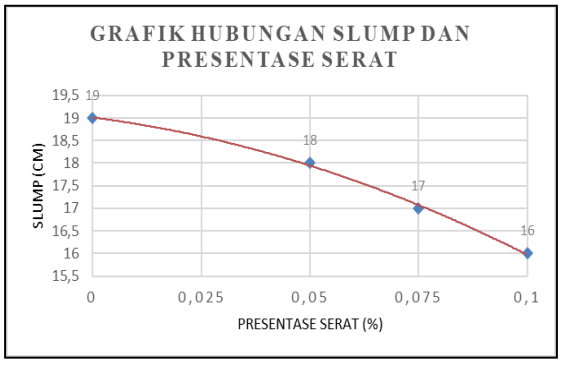
Perencanaan Campuran (*Mix Design*)

Metode desain campuran beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah SNI 03-2834-2000 (tata cara rencana campuran beton normal) dan SNI 2847-2013/2019 untuk menyesuaikan parameter geopolimer agar hasil campurannya dapat memenuhi kriteria SNI yang relevan terkait Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Sebelum memulai tahap perhitungan untuk mendapatkan jumlah komposisi campuran, ada beberapa hal yang harus diperhatikan saat merancang campuran beton. Salah satunya adalah bahwa campuran harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan.

Tabel 4. Kebutuhan Campuran Beton Benda Uji Silinder Dan Balok

Bahan	Variasi Serat Aluminium (%)			
	0	0,050	0,075	0,100
Fly Ash (Kg)	24,65	24,65	24,65	24,65
Serat Aluminium (g)	0,00	0,074	0,110	0,147
Agregat Halus (Kg)	47,89	47,89	47,89	47,89
Agregat Kasar (Kg)	64,04	64,04	64,04	64,04
KOH (Kg/L)	2,69	2,69	2,69	2,69
Na_2SiO_3 (Kg/L)	8,07	8,07	8,07	8,07

Sumber: *Hasil Analisis*



Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Persiapan Material dan Bekisting

Persiapan *fly ash*, agregat halus, agregat kasar, dan larutan alkali dilakukan dengan menimbang sesuai kebutuhan masing-masing variasi presentase serat.

Persiapan pembuatan larutan KOH 8 (M) dilakukan sehari seblum pengecoran dikarenakan KOH membutuhkan waktu 24 jam untuk larut sempurna dan mencapai keseimbangan konsentrasi atau molaritas.

Persiapan bekisting dilakukan dengan dibersihkan menggunakan sikat baja agar tidak ada sisa dari pengecoran sebelumnya dan dioleskan pelumas ke seluruh bekisting.

Pencampuran dan Pencetakan Benda Uji

Pencampuran beton geopolimer dilakukan manual karena cepat mengeras. Larutan KOH dan Na_2SiO_3 dicampur terlebih dahulu, lalu agregat (batu kecil, batu besar, abu terbang, dan serat aluminium) diaduk terpisah. Larutan aktivator ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga homogen, kemudian dilakukan uji slump untuk mengetahui kekentalan. Campuran dituang ke bekisting yang sudah dilapisi oli bekas, lalu dipadatkan dengan penusukan besi 25 kali tiap lapisan agar udara hilang. Setelah pengecoran, benda uji diberi tanda, dibuka bekistingnya setelah ±24 jam, lalu dirawat pada suhu ruang selama 7 hari sesuai kebutuhan uji.

Perawatan Benda Uji

Setelah ±24 jam, benda uji dikeluarkan dari bekisting dan didiamkan di suhu ruang selama 7 hari, sesuai kebutuhan uji. Lalu benda uji diuji kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat tarik lentur.

Pengujian Slump Beton Serat Aluminium

Pengujian slump beton digunakan untuk mengetahui ukuran derajat kemudahan dalam pengecoran adukan beton segar, berikut merupakan hasil pengujian slump yang dilakukan pada masing-masing variasi campuran beton serat.

Tabel 5. Slump Tiap variasi Campuran Beton Serat Aluminium

Kode	*Slump* (cm)
NP 0%	19
NP 0,050%	18
NP 0,075%	17
NP 0,100%	16

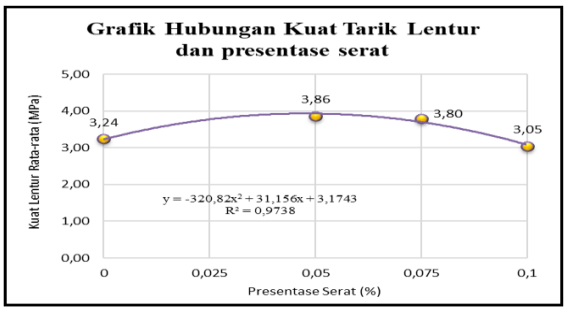
Sumber: *Hasil Analisis*

Dari data diatas kemudian diolah menggunakan program bantu MS Excel sehingga menghasilkan grafik seperti dibawah ini:

Gambar Grafik 1. Hubungan Nilai Slump Dengan Presentase Serat
Sumber: *Hasil Penelitian*

Analisis Data Kuat Tekan

Hasil uji kuat tekan silinder diperoleh dari hasil sampel uji dengan masing-masing variasi persentase serat 0%, 0,050%, 0,075%, dan 0,100%.



Tabel 6. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Silinder Umur 7 Hari

No.	Kode	Tanggal Buat	Tanggal Test	Mutu (f'c) (MPa)	Berat (kg)	Tekanan hancur (kN)	Tekan hancur 7 hari (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1	NP 0%	02/07/2025	09/07/2025	25	13,31	381	21,38	20,02
2	NP 0%	02/07/2025	09/07/2025	25	13,31	368	20,65	
1	NP 0,050%	02/07/2025	09/07/2025	25	13,13	268	14,83	14,19
2	NP 0,050%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,87	241	13,56	
1	NP 0,075%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,81	232	20,21	12,75
2	NP 0,075%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,85	228	19,82	
1	NP 0,100%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,59	172	19,19	9,27
2	NP 0,100%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,69		19,65	

Sumber: *Hasil Analisis*

Gambar Grafik 2. Hubungan Kuat Tekan dan Presentase Serat
Sumber: *Hasil Penelitian*

Analisis Data Tarik Belah

Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton Silinder Umur 7 Hari

No.	Kode	Tanggal Buat	Tanggal Test	Mutu (f'c) (MPa	Berat (kg)	Beban maks (kN)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Tarik Rata-Rata (MPa)
1	NP 0%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,97	125,00	1,773	1,780
2	NP 0%	02/07/2025	09/07/2025	25	13,97	126,00	1,787	
1	NP 0,050%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,96	110,00	1,544	1,629
2	NP 0,050%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,84	122,00	1,715	
1	NP 0,075%	02/07/2025	09/07/2025	25	13,09	118,00	1,654	1,572
2	NP 0,075%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,93	106,00	1,491	
1	NP 0,100%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,90	93,00	1,310	1,382
2	NP 0,100%	02/07/2025	09/07/2025	25	12,90	104,00	1,456	

Sumber: *Hasil Penelitian*

Gambar Grafik 3. Hubungan Kuat Tarik Belah dan Presentase Serat
Sumber: *Hasil Penelitian*

Analisis Data Tarik Lentur

Tabel 8 Hasil Uji Kuat Tarik Lentur Beton Silinder Umur 7 Hari

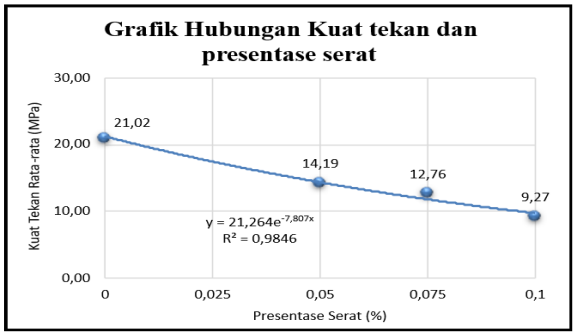
No.	Kode	Tanggal Buat	Tanggal Test	Mutu (f'c) (MPa)	Berat (kg)	Beban maks (kN)	Kuat Tarik Lentur (MPa)	Kuat Tarik Lentur Rata-Rata (MPa)
1	NP 0%	02/07/2025	09/07/2025	25	37,54	19	3,19	3,241
2	NP 0%	03/07/2025	10/07/2025	25	38,54	20	3,30	
1	NP 0,050%	02/07/2025	09/07/2025	25	37,30	22	3,63	3,863
2	NP 0,050%	03/07/2025	10/07/2025	25	37,51	26,5	4,10	
1	NP 0,075%	02/07/2025	09/07/2025	25	37,54	25	3,82	3,795
2	NP 0,075%	03/07/2025	10/07/2025	25	36,57	23	3,77	
1	NP 0,100%	03/07/2025	10/07/2025	25	36,43	19	3,02	3,048
2	NP 0,100%	04/07/2025	11/07/2025	25	36,75	21	3,30	

Sumber: *Hasil Penelitian*

Gambar Grafik 4. Hubungan Kuat Tarik Lentur dan Presentase Serat
Sumber: *Hasil Penelitian*

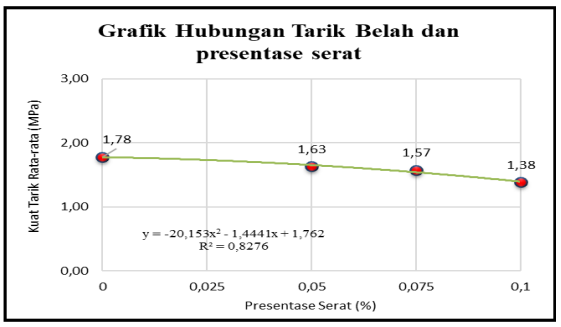
Analisis Regresi

Uji interval kepercayaan telah digunakan untuk memilah data kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat tarik lentur beton. Selanjutnya, dilakukan penelitian terhadap hubungan antara parameter dan penambahan variasi serat aluminium dalam campuran beton. Untuk mengetahui korelasi tersebut, digunakan metode regresi fungsi kuadratik. Persamaannya adalah $\hat{Y} = a + bX + cX^2$.



Berikut ini perhitungan regresi dilakukan pada data kekuatan tekan, kuat tarik belah, dan kuat tarik lentur beton setelah 7 hari. Nilai X yang digunakan dalam penelitian ini adalah tingkat variasi serat aluminium (%).

Tabel 9. Data Variasi Serat Aluminium dan Rata –



Rata Kuat Tekan Beton Pada Umur 7 Hari

Variasi Serat (%)	Kuat Tekan Rata – Rata (MPa)
0	21,02
0,050	14,20
0,075	12,76
0,100	9,28

Sumber: *Hasil Penelitian*

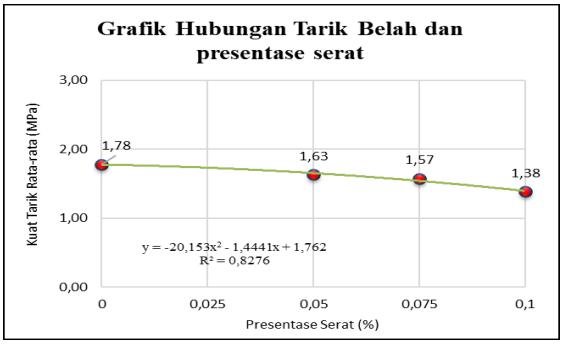
Tabel 10. Data Regresi Kuat Tekan Beton Pada Umur 7 Hari
Sumber: *Hasil Penelitian*

Tabel 11. Perhitungan Koefisien Determinasi Kuat Tekan Beton
Sumber: *Hasil Penelitian*
Gambar Grafik 5. Hubungan Kuat Tarik Lentur dan Presentase Serat
Sumber: *Hasil Penelitian*

Tabel 12. Data Variasi Serat Aluminium dan Rata – rata Kuat Tarik Belah Beton Pada Umur 7 Hari

Variasi Serat (%)	Kuat Tarik Rata – Rata (MPa)
0	1,78
0,050	1,63
0,075	1,57
0,100	1,39

Sumber: *Hasil Penelitian*
Tabel 13. Data Regresi Kuat Tarik Belah Beton Pada Umur 7 Hari



Sumber: *Hasil Penelitian*
Gambar Grafik 6. Analisis Regresi Menunjukkan Korelasi Kuat Tarik Belah Beton Umur 7 Hari Dan Penambahan Serat Aluminium
Sumber: *Hasil Analisis*

Tabel 14. Data Variasi Serat Aluminium dan Rata – Rata Kuat Tarik Lentur Beton Pada Umur 7 Hari

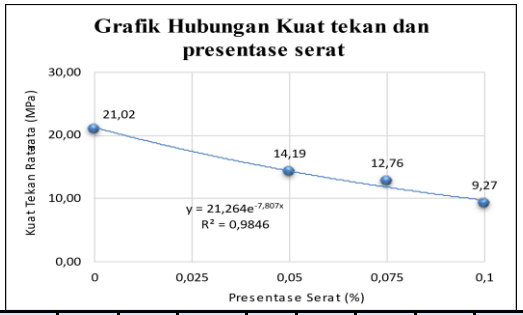
Variasi Serat (%)	Kuat Tarik Lentur Rata - Rata (MPa)
0	3,25
0,05	3,87
0,75	3,80
0,1	3,05

Sumber: *Hasil Analisis*

Tabel 15. Data Regresi Kuat Tarik Lentur Beton Pada Umur 7 Hari

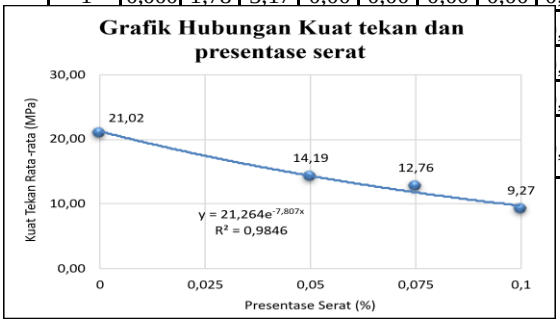
NO	X	Y	InY	X.In(Y)	X²
1	0	21,02	3,045	0,000	0,000
2	0,05	14,2	2,653	0,133	0,003
3	0,075	12,76	2,546	0,191	0,006
4	0,1	9,28	2,228	0,223	0,010
Total (∑)	0,225	57,26	10,473	0,546	0,019

NO	X	Y	Ŷ (Estimasi) 21.264·e^(-7,807X)	(Y - Ŷ)²
1	0	21,02	21,27	0,06
2	0,05	14,2	14,40	0,04
3	0,075	12,76	11,84	0,84
4	0,1	9,28	9,75	0,22
Total (∑)	0,23	57,26	57,25	1,15

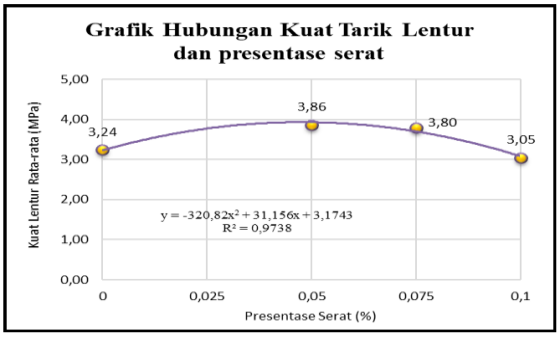


No	X	Y	Y^2	X^2	X^3	X^4	XY	X^2Y
1	0,000	3,25	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,050	3,87	14,94	0,00	0,00	0,00	0,19	0,01
3	0,075	3,80	14,40	0,01	0,00	0,00	0,28	0,02
4	0,100	3,05	9,27	0,01	0,00	0,00	0,30	0,03
Total (∑)	0,225	13,95	49,14	0,02	0,00	0,00	0,78	0,06

No	X	Y	Y^2	X^2	X^3	X^4	XY	X^2Y
1	0,000	1,78	3,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Sumber: *Hasil Analisis*



Gambar Grafik 7. Analisis Regresi Menunjukkan Korelasi Kuat Tarik Lentur Beton Umur 7 Hari Dan Penambahan Serat Aluminium
Sumber: *Hasil Analisis*

Nilai Optimum Penambahan Serat Aluminium Pada Campuran Beton

Dari hasil analisis dengan analisis regresi dapat dilihat pada grafik yang dihasilkan titik-titik yang telah terhubung untuk melihat nilai optimal penambahan serat pada beton.

Gambar Grafik 8. Analisis Regresi Hubungan Penambahan Serat Aluminium Optimum Terhadap Kuat Tekan Beton Umur 7 Hari
Sumber: *Hasil Analisis*

Gambar Grafik 9. Analisis Regresi Hubungan Penambahan Serat Aluminium Optimum Terhadap Kuat Tarik Belah Beton Umur 7 Hari
Sumber: *Hasil Analisis*

Gambar Grafik 10. Analisis Regresi Hubungan Penambahan Serat Aluminium Optimum Terhadap Kuat Tarik Lentur Beton Umur 7 Hari
Sumber: *Hasil Analisis*

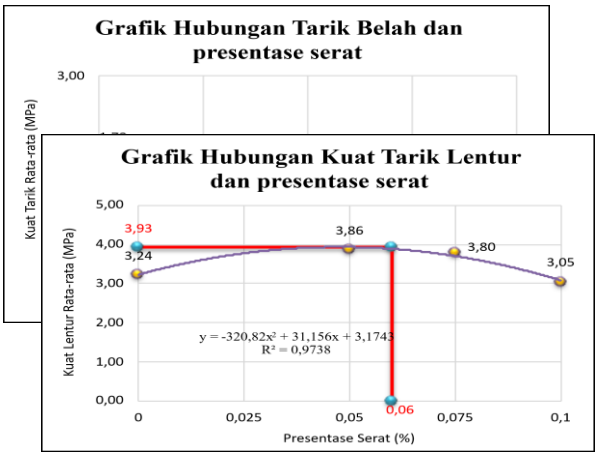
5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis terhadap beton geopolimer dengan variasi penambahan serat aluminium pada umur 7 hari, dapat disimpulkan beberapa hal berikut.

1. Penambahan serat aluminium memberikan pengaruh yang bervariasi terhadap sifat mekanik beton.
   a. Kuat Tekan: Hasil pengujian kuat tekan beton umur 7 hari menunjukkan bahwa nilai tertinggi diperoleh pada campuran tanpa serat aluminium (0%) sebesar 21,02 MPa. Penambahan serat aluminium cenderung menurunkan kuat tekan beton, khususnya pada variasi 0,1% yang hanya menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 9,27 Mpa
   b. Kuat Tarik Belah: Nilai tertinggi diperoleh pada variasi serat 0% sebesar 1,78 MPa. Namun variasi 0,050% dan 0,075% masih memberikan hasil mendekati kuat tarik belah tanpa serat
   c. Kuat Tarik Lentur: Nilai tertinggi justru diperoleh pada variasi 0,050% serat aluminium, yaitu sebesar 3,87 MPa, yang meningkat dibandingkan nilai awal 3,25 MPa tanpa serat. Ini menunjukkan bahwa serat aluminium memberikan kontribusi positif terhadap daya tahan lentur
2. Berdasarkan analisis seluruh pengujian (kuat tekan, tarik belah, dan lentur), variasi serat aluminium sebesar 0,050% merupakan yang paling optimal, karena:
   a. Tidak menurunkan kekuatan tekan secara signifikan (14,19 MPa masih dalam batas wajar pada umur 7 hari),
   b. Meningkatkan kuat tarik lentur beton secara signifikan,
   c. Memberikan nilai kuat tarik belah yang stabil dan relatif tinggi

Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan variasi pengujian dengan melakukan pengujian lanjutan pada umur 14, 21, dan 28 hari untuk mendapatkan gambaran perkembangan kekuatan sehingga dapat diketahui secara menyeluruh



2. Uji Variasi dan Ukuran Serat Dianjurkan dilakukan pengujian dengan bentuk dan dimensi serat yang berbeda (misalnya bentuk bergelombang, panjang pendek yang bervariasi) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap homogenitas campuran dan hasil mekanik beton

DAFTAR PUSTAKA

Anonim. (1984). ACI 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced. American Concrete International, 6(12).

Anonim SNI 1974 -2011. (1974). Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.

Anonim SNI 2460 - 2014. (2014). SNI 2460:2014 Spesifikasi abu terbang batubara dan pozolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton. Badan Standardisasi Nasional, 16.

Anonim SNI 2493-2011. (2011). Standarisasi Nasional Indonesia 03 - 4431 - 2011: Cara uji kuat lentur kuat lentur beton normal dengan dua dengan dua titik pembebanan. www.bsn.go.id

Anonim SNI 2493:2011. (2011). SNI 2493:2011 Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. Badan Standar Nasional Indonesia, 23. www.bsn.go.id

Anonim PUBI -1982. (1982). PUBI-1982 Persyaratan Umum Bahan Bangunan di Indonesia. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum, 2(1), 1–344.

Anonim SNI 03 - 2847 - 2002. (2002). Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. SNI 03-2847-2002. Bandung: Badan Standardisasi Nasional, 251.

Anonim SNI 1969 - 2008. (2008). SNI 1969:2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. Badan Standar Nasional Indonesia, 20.

Anonim SNI 1970 - 2008. (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Badan Standar Nasional Indonesia, 7–18.

Anonim SNI 1971 - 2011. (2011). “Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.” Badan Standarisasi Nasional, 1–11.

Anonim SNI 2417 - 2008. (2008). Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta. Badan Standardisasi Nasional, 1– 20.

Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. First International 31 Conference on Alkaline Cements and Concretes, 131–149.

Walpole, R. E. 1988. Pengantar Statistika. Cetakan ke-3. Diterjemahkan oleh: B. Sumantri. Penerbit PT. Gramedia, Jakarta

Anonim SNI 1969 - 2008. (2008). SNI 1969:2008 Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. Badan Standar Nasional Indonesia, 20.

Anonim SNI 1970 - 2008. (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus. Badan Standar Nasional Indonesia, 7–18.

Anonim SNI 1971 - 2011. (2011). “Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.” Badan Standarisasi Nasional, 1–11.

Anonim SNI 2417 - 2008. (2008). Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta. Badan Standardisasi Nasional, 1–20.

Baziak, A., Pławecka, K., Hager, I., Castel, A., & Korniejenko, K. (2021). Development and characterization of lightweight geopolymer composite reinforced with hybrid carbon and steel. Materials, 14(19). https://doi.org/10.3390/ma14195741

Cahyaningrum Dwi Nanda Suwarjo. (2024). STUDI PENELITIAN FAKTOR AIR CEMENTITIOUS (W / C) 0 , 35 – 0 , 65 PADA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH (BATU BARA) BERDASARKAN. X(X), 1–10.

Li, Q., Zhang, P., Wang, J., Wan, J., & Ling, Y. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiberreinforced geopolymer concrete. Science and Engineering of Composite Materials, 28(1), 299–313. https://doi.org/10.1515/secm-2021-0030

Mathofani, A., Priskasari, I. E., & Aditama, V. (2019). Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu Dan Silica Fume Terhadap Kekuatan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash. Student Journal GELAGAR, X(X), 1–8.

Moch Nagas Maulana. (2023). 1 , 2 , 3. X(X), 1–8.

Yakobus Managi, Indra, I. S., & Puspitasari, I. E. (2023). Studi Eksperimental Beton Geopolimer Mutu Tinggi Dengan Memanfaatkan Abu Cangkang Sawit Dan Fly Ash. Program Studi Teknik Sipil S1, ITN MALANG STUDI, 1–5.