

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS PENELITIAN

4.1 Hasil Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui karakteristik bahan material yang digunakan dalam penelitian pembuatan mortar geopolimer. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan material yang akan digunakan telah memenuhi standar persyaratan yang berlaku sehingga dapat menghasilkan mortar yang optimal. Pengujian material ini mengacu pada beberapa standar Standar Nasional Indonesia (SNI) yaitu:

1. SNI 03-1968-1990 tentang analisis saringan agregat halus
2. SNI 03-4142-1996 tentang kadar lumpur agregat halus
3. SNI 03-1970-2008 tentang berat jenis dan penyerapan agregat halus
4. SNI 03-1971-1990 tentang kadar air agregat

Hasil pengujian ini menjadi dasar penentuan kelayakan material serta sebagai acuan dalam perencanaan campuran (*job mix design*).

4.1.1 Fly ash

Fly ash merupakan bahan utama dalam penelitian ini yang berfungsi sebagai sumber aluminosilikat dalam pembentukan matriks geopolimer. Material ini berasal dari limbah pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dan termasuk *fly ash* Tipe F sesuai SNI 2460:2014. Sebelum digunakan dalam pembuatan mortar geopolimer, *fly ash* perlu di uji karakteristik fisiknya untuk memastikan kesesuaiannya dengan persyaratan teknis yang berlaku.

Pengujian yang dilakukan meliputi kadar air dan berat jenis, karena kedua parameter tersebut berpengaruh terhadap perancangan campuran (*mix design*) serta proses geopolimerisasi. Hasil pengujian ini digunakan untuk menilai kelayakan *fly ash* sebagai bahan penyusun mortar geopolimer pada penelitian ini.

Tabel 4.1. Hasil Uji Berat Jenis *Fly ash*

No.	Uraian	Simbol	Hasil	Satuan
1.	Berat piknometer kosong	W1	49,3	gram
2.	Berat piknometer + <i>fly ash</i>	W2	59,3	gram
3.	Berat piknometer + <i>fly ash</i> + air	W3	83,4	gram
4.	Berat piknometer + air	W4	77,6	gram

Berdasarkan pengujian menggunakan rumus pada Bab III Subbab 3.4.1 nilai berat jenis yang didapatkan dalam perhitungan ini yaitu 2,38 gram. Berdasarkan laporan dari ACI Committee 226, partikel abu terbang tergolong sangat halus, dengan sekitar 5–27% lolos saringan No. 325 (45 μ m), memiliki berat jenis berkisar antara 2,15 hingga 2,6, serta berwarna abu-abu gelap hingga kehitaman.

Nilai berat jenis yang diperoleh dalam penelitian ini telah memenuhi standar spesifikasi teknis untuk campuran beton dan mortar. Nilai ini juga menunjukkan bahwa material ini memiliki kerapatan yang baik dan pori yang tidak berlebihan dan layak digunakan.

4.1.2 Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan yaitu pasir berfungsi sebagai bahan pengisi (*filler*) dalam campuran mortar geopolimer. Kualitas pasir sangat berpengaruh terhadap kemudahan pengerjaan, daya lekat, serta kinerja mortar yang dihasilkan. Oleh karena itu, sebelum digunakan dilakukan pengujian karakteristik fisik yang meliputi gradasi butiran, kadar air, kadar lumpur, dan berat jenis sesuai standar SNI yang berlaku.

Hasil pengujian ini digunakan untuk memastikan bahwa pasir memenuhi persyaratan teknis dan layak digunakan sebagai agregat halus dalam campuran mortar geopolimer.

1. Ukuran Butir

Dalam pengujian saringan adalah pengujian yang menggunakan alat *sieve shaker* yang bertujuan untuk mengetahui distribusi ukuran agregat halus serta mengetahui persentase butiran agregat yang tertahan maupun lolos pada setiap ukuran saringan. Pengujian ini mengacu pada SNI 03-1968-1990, dimana agregat yang digunakan harus dalam kondisi kering oven sebelum dilakukan pengayakan menggunakan susunan saringan standar.

Dari hasil pengujian ini diperoleh data berupa persentase berat agregat yang tertahan dan lolos pada masing-masing saringan, yang kemudian digunakan untuk menentukan gradasi agregat halus serta mengetahui apakah agregat yang digunakan telah memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran mortar.

Tabel 4.2. Hasil Analisis Gradasi Agregat Halus

Saringan		Berat Tertahan di Saringan	Persen Tertahan di Saringan	Persen Tertahan Kumulatif	Persen Lolos Kumulatif
No.	Ukuran (mm)	Gram (1)	% (2)	% (3)	% (4)
3/8	9,25	0	0	0	100
4	4,80	0	0	0	100
8	2,40	85,8	17,16	17,16	82,84
16	1,20	100,2	20,04	37,20	62,80
30	0,60	95,6	19,12	56,32	43,68
50	0,30	99,6	19,92	76,24	23,76
100	0,15	84,9	16,98	93,22	6,78
200	0,075	19,4	3,88	97,10	2,90
PAN		8	1,60	98,70	1,30
Total		493,5		280,14	

Berdasarkan SNI 03-1968-1990, nilai modulus kehalusan (FM) dihitung dari jumlah persen tertahan kumulatif pada saringan standar dibagi 100. Nilai FM digunakan untuk menentukan tingkat kehalusan agregat, dimana agregat halus yang baik memiliki nilai FM berkisar antara 2,3 hingga 3,1. Berdasarkan pengujian saringan dan menggunakan rumus pada Bab III Subbab 3.4.2 nilai FM pada bahan penelitian uji saringan ini memiliki nilai 2,8 yang termasuk dalam kategori memenuhi standar.

2. Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur bertujuan untuk mengetahui kandungan lumpur pada agregat halus. Kandungan lumpur yang tinggi dapat mempengaruhi kualitas mortar. Berdasarkan SNI 03-4142-1996, kadar lumpur pada agregat halus tidak boleh melebihi 5%. Hasil pengujian kadar lumpur dapat dilihat pada tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Hasil Uji Kadar Lumpur Agregat Halus

No.	Uraian	Hasil	Satuan
1.	Tinggi pasir	130	cc
2.	Tinggi lumpur	6	cc
3.	Tinggi pasir + lumpur	136	cc

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan rumus pada Bab III Subbab 3.4.2 diperoleh nilai kadar lumpur sebesar 4,412%, dimana nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum yang disyaratkan dalam SNI 03-4142-1996, yaitu sebesar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan dan layak digunakan sebagai bahan campuran mortar geopolimer.

3. Berat Jenis

Pengujian berat jenis agregat halus bertujuan untuk mengetahui sifat fisik pasir, meliputi berat jenis bulk, SSD, semu, serta penyerapan air, yang berpengaruh terhadap perencanaan campuran dan kualitas mortar geopolimer. Pengujian mengacu pada SNI 03-1970-2008 menggunakan piknometer. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.4. berikut.

Tabel 4.4. Hasil Uji Berat Jenis Pasir

No.	Uraian	Simbol	Hasil	Satuan
1.	Berat benda uji kering permukaan jenuh	SSD	500	gram
2.	Berat kering oven	BK	492,8	gram
3.	Berat piknometer + air	B	658,4	gram
4.	Berat piknometer + agregat + air	BT	964,6	gram

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan rumus pada Bab III Subbab 3.4.2 diperoleh adalah $2,580 \text{ g/cm}^3$. Nilai tersebut berada dalam rentang agregat normal (2,5 – 2,7), sehingga agregat halus dapat dinyatakan memenuhi standar SNI 03-1970-2008 dan layak digunakan.

4.1.3 Serat Selulosa Limbah Kertas

Pengujian berat jenis serat selulosa limbah kertas dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik serat yang digunakan sebagai bahan tambah pada mortar geopolimer. Hasil pengujian berat jenis serat selulosa limbah kertas disajikan pada Tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4.5. Hasil Uji Berat Jenis Serat Selulosa Limbah Kertas

No.	Uraian	Simbol	Hasil	Satuan
1.	Berat kering serat	Wa	2,0	gram
2.	Berat basah	Wf	0,6	gram
3.	Berat jenis alkohol	pf	0,87	g/mL

Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan rumus pada Bab III Subbab 3.4.3 nilai berat jenis serat selulosa limbah kertas sebesar $1,242 \text{ gram/cm}^3$. Nilai ini berada dalam rentang kerapatan yang khas untuk material serat selulosa alami dan layak digunakan.

4.2 Hasil Uji Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

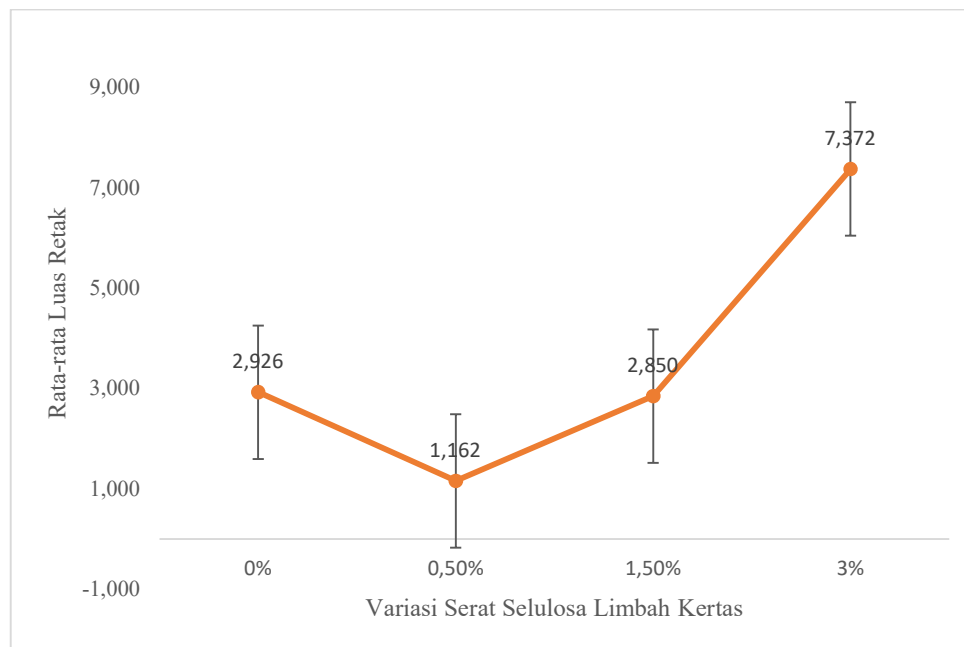
Mortar geopolimer berbasis *fly ash* untuk plesteran didng dengan bahan tambah serat selulosa limbah kertas ini memiliki total volume 2974 cm^3 dilakukan dalam tiga bentuk variasi, yaitu kubus (5 x 5 x 5 cm) untuk uji kuat tekan, prisma (4 x 4 x 16 cm) untuk uji susut dan penyerapan air, dan pelat tipis (20 x 20 x 1,5 cm) untuk uji retak rambut. Bahan konvensional yang digunakan akan dihitung dan ditambahkan dengan bahan tambah.

4.2.1 Pengujian Retak pada Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Pengujian retak dilakukan menggunakan pelat tipis ($20 \times 20 \times 1,5$ cm) untuk menganalisis pengaruh penambahan serat selulosa limbah kertas terhadap pengendalian retak rambut pada umur awal. Pengamatan dilakukan secara visual dan menggunakan analisis citra digital untuk mengukur panjang, lebar, serta luas retak pada hari ke 7 *curing solid*.

Tabel 4.6. Hasil Luas Retak Plat Mortar Geopolimer

No	Variasi Serat	Luas Plat (cm ²)	Plat 1 (cm ²)	Plat 2 (cm ²)	Rata-rata Luas Retak (cm ²)
1	S0	400	1,349	4,504	2,926
2	S0.5	400	0,890	1,434	1,162
3	S1.5	400	3,213	2,487	2,850
4	S3	400	6,753	7,991	7,372




Gambar 4.1. Grafik Luas Retak Plat Mortar Geopolimer


Pengujian retak pada umur 7 hari menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa limbah kertas memengaruhi luas retak mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Variasi S0.5 dengan kadar serat 0,5% menghasilkan luas retak rata-rata terendah sebesar 1,162 cm². Nilai tersebut menurun sebesar 60,3% dibandingkan mortar kontrol S0 yang memiliki luas retak rata-rata sebesar 2,926 cm². Hasil ini

menunjukkan bahwa kadar serat 0,5% mampu mengoptimalkan mekanisme *crack bridging*. Serat menghubungkan kedua sisi retak dan membantu mentransfer tegangan tarik akibat penyusutan. Mekanisme tersebut mengurangi konsentrasi tegangan pada ujung retak sehingga menghambat pembukaan dan perkembangan retak.. Temuan ini sejalan dengan penelitian Alcan, (2025) yang melaporkan bahwa serat pada mortar geopolimer mampu membatasi pembentukan retak mikro dan retak makro melalui efek *bridging*, sehingga meningkatkan ketahanan retak, kapasitas deformasi, dan stabilitas struktur material (Alcan, 2025).

Peningkatan kadar serat menjadi 1,5% tidak memberikan pengendalian retak yang lebih baik. Variasi S1.5 menghasilkan luas retak rata-rata sebesar 2,850 cm², hanya 2,6% lebih rendah dibandingkan S0 dan lebih tinggi daripada S0.5. Pada kadar serat 3%, luas retak meningkat menjadi 7,372 cm² atau sekitar 152,0% lebih tinggi dibandingkan S0. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan serat yang melampaui kadar optimum dapat menurunkan efektivitas pengendalian retak. Serat dalam jumlah berlebihan berpotensi mengalami aglomerasi, menurunkan *workability*, meningkatkan rongga udara, dan menghambat proses pepadatan. Kondisi tersebut menghasilkan matriks yang kurang homogen dan berpotensi membentuk zona lemah yang memudahkan retak berkembang. Lv et al. (2022) menjelaskan bahwa pada sebagian besar geopolimer yang diperkuat serat alami pendek, kadar serat di atas sekitar 1% berdasarkan massa atau volume cenderung menurunkan densitas matriks, meningkatkan porositas, dan menyebabkan agregasi serat sehingga kinerja mekanik komposit menurun (Lv et al., 2022).

Tabel 4.7. Dokumentasi Luas Retak Plat Mortar Geopolimer

No	Variasi Serat	Dokumentasi
1	S0	
2	S0.5	

No	Variasi Serat	Dokumentasi
3	S1.5	
4	S3	

Berdasarkan hasil pengamatan visual dan analisis luas retak, menunjukkan perbedaan pola dan luas retak pada setiap variasi kadar serat selulosa limbah kertas. Variasi S0.5 memperlihatkan jumlah dan luas retak yang lebih kecil dibandingkan variasi lainnya, sedangkan variasi S3 menunjukkan retak yang lebih banyak dan lebih luas. Hasil pengamatan visual ini sejalan dengan hasil analisis citra digital yang menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa sebesar 0,5% memberikan kemampuan pengendalian retak yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Sebaliknya, penambahan serat dalam jumlah berlebihan menyebabkan distribusi serat kurang merata sehingga meningkatkan potensi terbentuknya retak pada mortar geopolimer.

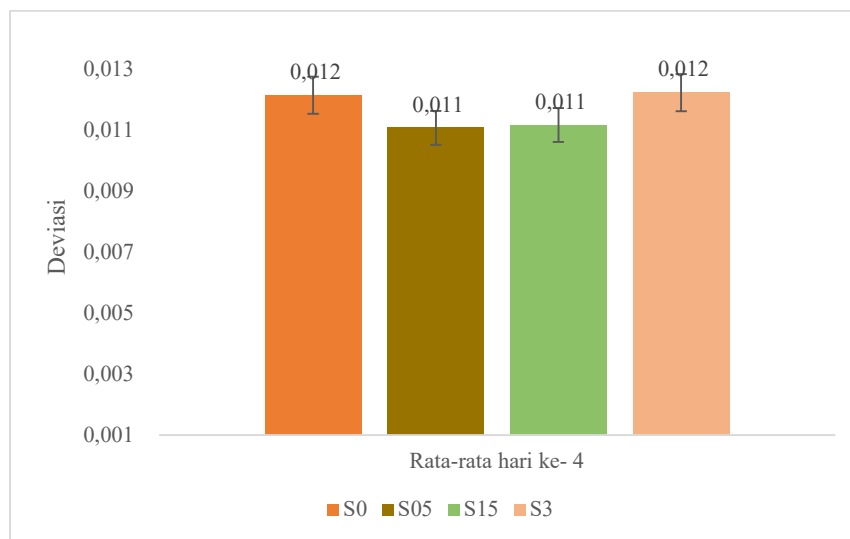
4.2.2 Pengujian Susut pada Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Pengujian susut bertujuan untuk mengukur perubahan dimensi mortar geopolimer berbasis *fly ash* akibat proses pengeringan (*drying shrinkage*). Penyusutan merupakan salah satu parameter kritis dalam mortar plesteran karena perubahan volume yang berlebihan dapat menyebabkan munculnya retak rambut pada permukaan plesteran dinding.

Pengujian ini dilakukan berdasarkan pada penelitian Stevulova et al., (2021) dengan benda uji berbentuk prisma berukuran 4 x 4 x 16 cm dengan pengamatan pada umur hari ke- 4, ke-11, ke-18, dan ke-25. Variasi serat selulosa terdiri dari campuran serat selulosa limbah kertas 0% (S0), 0.5% (S0.5), 1.5% (S1.5), dan 3% (S3). Perubahan dimensi diukur berdasarkan panjang dan lebar benda uji, kemudian dihitung luas penampang serta deviasi susutnya.

Tabel 4.8. Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash* Hari ke-4

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Panjang	Lebar	Luas	Deviasi	Rata-rata
1	S0	S0.1	15,950	3,967	63,274	0,011	0,012
2		S0.2	15,966	3,956	63,161	0,013	
3		S0.3	15,999	3,965	63,436	0,009	
4		S0.4	15,951	3,951	63,022	0,015	
5	S0.5	S0.5.1	15,910	3,975	63,242	0,012	0,011
6		S0.5.2	15,939	3,967	63,230	0,012	
7		S0.5.3	15,931	3,981	63,421	0,009	
8		S0.5.4	15,938	3,970	63,274	0,011	
9	S1.5	S1.5.1	15,892	3,978	63,218	0,012	0,011
10		S1.5.2	15,874	3,998	63,464	0,008	
11		S1.5.3	15,890	3,981	63,258	0,012	
12		S1.5.4	15,880	3,980	63,202	0,012	
13	S3	S3.1	15,938	3,968	63,242	0,012	0,012
14		S3.2	15,945	3,963	63,190	0,013	
15		S3.3	15,932	3,969	63,234	0,012	
16		S3.4	15,941	3,965	63,206	0,012	

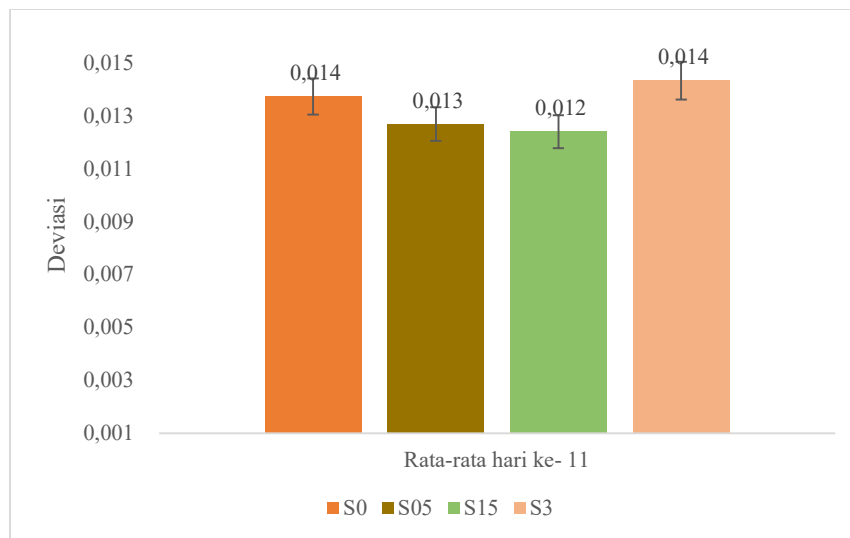


Gambar 4.2 Diagram Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Hari ke-4

Tabel 4.9. Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash* Hari ke-11

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Panjang	Lebar	Luas	Deviasi	Rata-rata
1	S0	S0.1	15,933	3,962	63,127	0,014	0,014
2		S0.2	15,950	3,950	63,003	0,016	
3		S0.3	15,999	3,961	63,372	0,010	
4		S0.4	15,933	3,953	62,983	0,016	
5	S0.5	S0.5.1	15,900	3,970	63,123	0,014	0,013
6		S0.5.2	15,924	3,963	63,107	0,014	
7		S0.5.3	15,922	3,977	63,322	0,011	

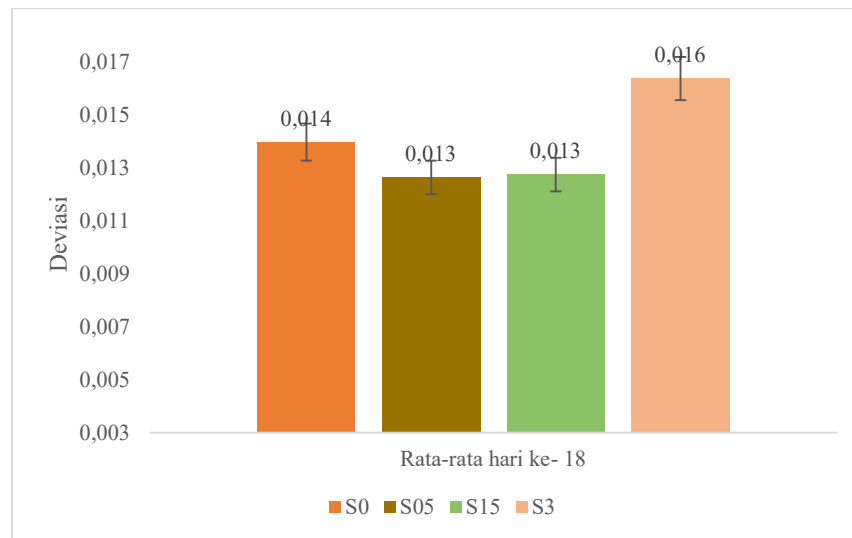
No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Panjang	Lebar	Luas	Deviasi	Rata-rata
8	S1.5	S0.5.4	15,939	3,965	63,198	0,013	0,012
9		S1.5.1	15,875	3,972	63,056	0,015	
10		S1.5.2	15,859	3,997	63,388	0,010	
11		S1.5.3	15,873	3,985	63,254	0,012	
12	S3	S1.5.4	15,861	3,980	63,127	0,014	0,014
13		S3.1	15,921	3,962	63,079	0,014	
14		S3.2	15,932	3,959	63,075	0,014	
15		S3.3	15,918	3,964	63,099	0,014	
16		S3.4	15,925	3,961	63,079	0,014	



Gambar 4.3. Diagram Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Hari ke-11

Tabel 4.10. Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash* Hari ke-18

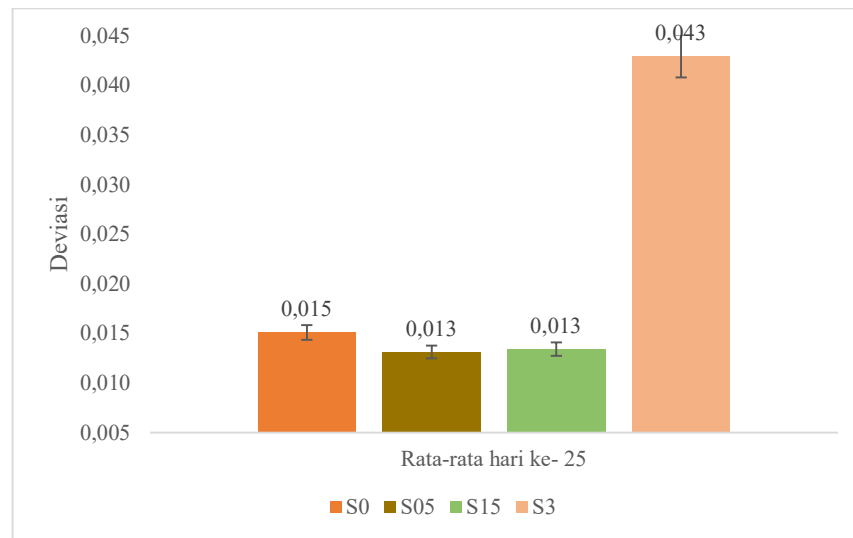
No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Panjang	Lebar	Luas	Deviasi	Rata-rata
1	S0	S0.1	15,929	3,957	63,031	0,015	0,014
2		S0.2	15,910	3,962	63,035	0,015	
3		S0.3	15,970	3,970	63,401	0,009	
4		S0.4	15,929	3,952	62,951	0,016	
5	S0.5	S0.5.1	15,899	3,966	63,055	0,015	0,013
6		S0.5.2	15,908	3,963	63,043	0,015	
7		S0.5.3	15,922	3,978	63,338	0,010	
8		S0.5.4	15,939	3,973	63,326	0,011	
9	S1.5	S1.5.1	15,870	3,962	62,877	0,018	0,013
10		S1.5.2	15,869	3,997	63,428	0,009	
11		S1.5.3	15,881	3,985	63,286	0,011	
12		S1.5.4	15,865	3,980	63,143	0,013	
13	S3	S3.1	15,900	3,954	62,869	0,018	0,016
14		S3.2	15,892	3,959	62,916	0,017	
15		S3.3	15,908	3,964	63,059	0,015	
16		S3.4	15,907	3,958	62,960	0,016	



Gambar 4.4. Diagram Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Hari ke-18

Tabel 4.11. Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash* Hari ke-25

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Panjang	Lebar	Luas	Deviasi	Rata-rata
1	S0	S0.1	15,939	3,945	62,840	0,018	0,015
2		S0.2	15,910	3,962	63,035	0,015	
3		S0.3	15,969	3,969	63,385	0,010	
4		S0.4	15,909	3,947	62,872	0,018	
5	S0.5	S0.5.1	15,893	3,966	63,055	0,015	0,013
6		S0.5.2	15,879	3,955	62,916	0,017	
7		S0.5.3	15,856	3,978	63,338	0,010	
8		S0.5.4	15,873	3,973	63,326	0,011	
9	S1.5	S1.5.1	15,971	3,959	62,829	0,018	0,013
10		S1.5.2	15,869	3,995	63,397	0,009	
11		S1.5.3	15,889	3,981	63,222	0,012	
12		S1.5.4	15,858	3,978	63,111	0,014	
13	S3	S3.1	15,896	3,851	61,231	0,043	0,043
14		S3.2	15,839	3,823	60,755	0,051	
15		S3.3	15,912	3,865	61,484	0,039	
16		S3.4	15,895	3,868	61,528	0,039	



Gambar 4.5. Diagram Hasil Uji Susut Mortar Geopolimer Hari ke-25

Secara keseluruhan, pengujian susut pada hari ke-4, ke-11, ke-18, dan ke-25 menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa limbah kertas memengaruhi perilaku susut mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Variasi S0.5 (0,5%) dan S1.5 (1,5%) menunjukkan performa terbaik dengan nilai deviasi susut yang relatif stabil dan rendah sepanjang periode pengujian, yaitu berkisar pada rentang 0,011–0,013 dari hari ke-4 hingga hari ke-25. Kestabilan ini mengindikasikan bahwa pada kadar serat rendah hingga menengah, serat selulosa mampu berperan sebagai *agen solid curing* yang melepaskan air secara bertahap ke dalam matriks geopolimer, sehingga mengurangi laju kehilangan air dan menekan deformasi susut. Kemampuan reduksi ini sejalan dengan temuan Patrisia et al. (2025) yang membuktikan bahwa serat selulosa limbah kertas mampu mengurangi *drying shrinkage* sebesar 14,4–22,4% dibandingkan kontrol tanpa serat.

Variasi S0 (0%) menunjukkan nilai deviasi yang lebih tinggi dibanding S0.5 dan S1.5 pada seluruh periode pengujian, dengan nilai meningkat bertahap dari 0,012 pada hari ke-4 menjadi 0,015 pada hari ke-25. Hal ini mengindikasikan bahwa mortar tanpa serat memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam mengendalikan deformasi susut karena tidak adanya mekanisme *solid curing* dari serat.

Variasi S3 (3%) menunjukkan pola yang berbeda secara signifikan. Pada hari ke-4 hingga ke-18, nilai deviasi S3 berada dalam rentang yang sebanding dengan variasi lain (0,012–0,016). Namun pada hari ke-25, terjadi lonjakan drastis nilai deviasi S3 menjadi 0,043 hampir tiga kali lipat nilai variasi lainnya. Lonjakan ini mengindikasikan terjadinya degradasi matriks yang dipercepat pada tahap akhir pengujian akibat penambahan serat yang melebihi kadar optimum. Kandungan serat yang melebihi batas optimal tersebut, yaitu pada variasi 3% menyebabkan penggumpalan serat, distribusi serat yang kurang homogen, serta peningkatan porositas matriks. Kondisi tersebut dapat mempercepat proses kehilangan air dari dalam mortar dan meningkatkan deformasi penyusutan pada umur lanjut. Penelitian sebelumnya juga menjelaskan bahwa peningkatan kadar serat selulosa yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas mikrostruktur akibat terbentuknya rongga dan peningkatan porositas material (Kiamahalleh et al., 2024).

Dalam hal ini menunjukkan bahwa hubungan antara susut dan retak pada mortar geopolimer berserat selulosa tidak hanya ditentukan oleh besarnya nilai susut, tetapi juga diduga dipengaruhi oleh homogenitas distribusi serat dan efektivitas mekanisme *fiber bridging* dalam matriks. Pada kadar serat optimum, serat mampu mengurangi deformasi susut sekaligus menghambat inisiasi dan propagasi retak melalui mekanisme transfer tegangan antarbidang retak. Sebaliknya, pada kadar serat yang terlalu tinggi seperti variasi S3, peningkatan susut yang signifikan disertai dengan bertambahnya luas retak mengindikasikan kemungkinan terjadinya penurunan kualitas mikrostruktur yang diduga berkaitan dengan aglomerasi serat, peningkatan porositas, dan distribusi serat yang kurang merata. Oleh karena itu, penentuan kadar optimum serat selulosa limbah kertas menjadi faktor penting untuk memperoleh keseimbangan antara pengendalian susut, ketahanan retak, dan kualitas mortar geopolimer secara keseluruhan.

4.2.3 Pengujian Kuat Tekan pada Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Pengujian kuat tekan bertujuan untuk melihat kemampuan mortar geopolimer *fly ash* dalam menahan beban tekan yang diberikan. Kuat tekan merupakan parameter

penting untuk menentukan kualitas mortar plesteran dinding dan kemampuannya untuk menerima beban dari tekanan cuaca, perubahan suhu, dan tekanan angin. Pengujian kuat tekan mengacu pada Mohammed & Fawzi, (2024), dengan target kuat tekan minimum mortar Tipe M sebesar 17,2 MPa pada umur 28 hari sesuai SNI 6882:2014.

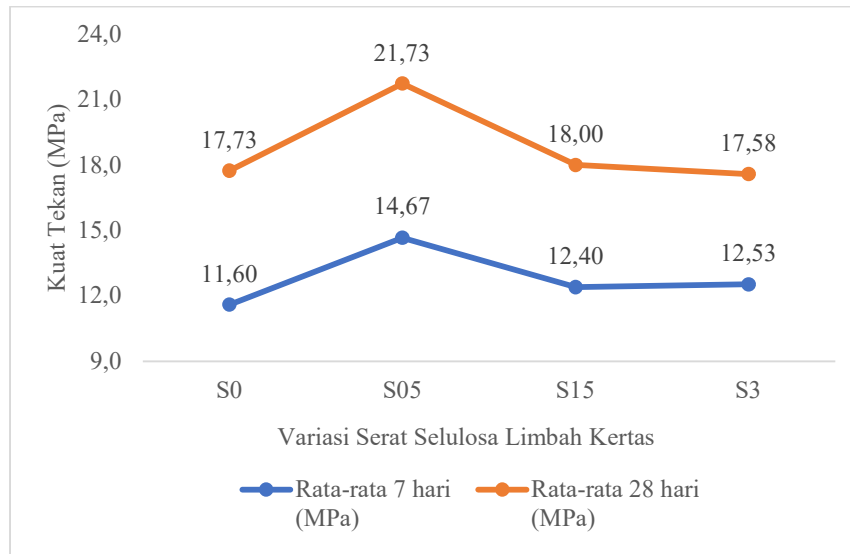
Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji kubus berukuran 5 x 5 x 5 cm dengan pengamatan pada umur 7 hari dan 28 hari. Variasi serat selulosa terdiri dari campuran serat selulosa limbah kertas 0% (S0), 0,5% (S0.5), 1,5% (S1.5), dan 3% (S3). Pengujian dilakukan menggunakan mesin *compression testing machine* (CTM). Perubahan kuat tekan diukur berdasarkan beban maksimum (P) dan luas penampang tekan (A), kemudian dihitung rata-rata kuat tekan per variasi.

Tabel 4.12. Hasil Uji Kuat Tekan Hari ke-7

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Hasil Kuat Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa) 7 hari	Rata-rata 7 hari (MPa)
1	S0	S0.1	31,00	12,40	11,60
2		S0.2	30,00	12,00	
3		S0.3	26,00	10,40	
4	S0.5	S0.5.1	37,00	14,80	14,67
5		S0.5.2	33,00	13,20	
6		S0.5.3	40,00	16,00	
7	S1.5	S1.5.1	33,00	13,20	12,40
8		S1.5.2	27,00	10,80	
9		S1.5.3	33,00	13,20	
10	S3	S3.1	34,00	13,60	12,53
11		S3.2	30,00	12,00	
12		S3.3	30,00	12,00	

Tabel 4.13. Hasil Uji Kuat Tekan Hari ke-28

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Hasil Kuat Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa) 28 hari	Rata-rata 28 hari (MPa)
1	S0	S0.1	47,00	18,80	17,73
2		S0.2	47,00	18,80	
3		S0.3	39,00	15,60	
4	S0.5	S0.5.1	56,00	22,40	21,73
5		S0.5.2	49,00	19,60	
6		S0.5.3	58,00	23,20	
7	S1.5	S1.5.1	45,00	18,00	18,00
8		S1.5.2	42,00	16,80	
9		S1.5.3	48,00	19,20	
10	S3	S3.1	44,00	17,60	17,58
11		S3.2	45,00	18,00	
12		S3.3	42,86	17,14	



Gambar 4.6. Diagram Hasil Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dalam menahan beban tekan. Parameter ini digunakan untuk menilai kualitas mortar sebagai material plesteran dinding terhadap pengaruh mekanis dan perubahan kondisi lingkungan. Pelaksanaan pengujian mengacu pada Mohammed & Fawzi, (2024), sedangkan target kuat tekan minimum mortar Tipe M sebesar 17,2 MPa pada umur 28 hari mengacu pada SNI 6882:2014.

Berdasarkan hasil pengujian pada umur 7 hari dan 28 hari, terlihat adanya pengaruh yang signifikan dari variasi penambahan serat selulosa limbah kertas terhadap performa mekanis mortar. Pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa limbah kertas memberikan pengaruh yang bersifat optimal terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Nilai kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada variasi S0.5 (0,5% serat) yaitu sebesar 21,73 MPa. Nilai ini merepresentasikan kenaikan sebesar 22,56% jika dibandingkan dengan mortar kontrol S0 (17,73 MPa), serta berhasil melampaui standar persyaratan SNI 6882:2014 Tipe M (17,2 MPa). Namun, peningkatan kadar serat yang lebih tinggi pada variasi S1.5 (1,5% serat) dan S3 (3% serat) secara berturut-turut menurunkan kuat tekan rata-rata menjadi 18,00 MPa dan 17,58 MPa. Meskipun mengalami penurunan, seluruh variasi pengujian pada

umur 28 hari masih memenuhi standar minimum mortar Tipe M karena berada di atas 17,2 MPa.

Peningkatan kuat tekan yang signifikan pada variasi S0.5 (0,5%) terjadi karena serat selulosa limbah kertas pada dosis rendah mampu terdispersi secara homogen di dalam matriks geopolimer *fly ash*. Homogenitas ini memungkinkan serat berfungsi efektif sebagai *fiber bridging* yang mengikat retak rambut (*micro cracks*) saat benda uji menerima beban eksternal. Mekanisme tersebut membantu redistribusi tegangan *solid* secara lebih merata ke seluruh volume mortar. Karakteristik mikrostruktur yang bagus akan berpengaruh terhadap berkurangnya porositas, pembentukan struktur pori yang lebih halus, serta pembatasan penyebaran retakan mikro di dalam matriks pada kondisi kandungan serat yang optimal.

Pada variasi S1.5 dan S3, kuat tekan menurun menjadi masing-masing 18,00 MPa dan 17,58 MPa. Meskipun masih memenuhi persyaratan mortar Tipe M, hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar serat di atas 0,5% tidak memberikan peningkatan kuat tekan yang sebanding. Kondisi ini berkaitan dengan berkurangnya homogenitas distribusi serat, meningkatnya porositas, serta menurunnya kepadatan matriks sehingga efektivitas penguatan menjadi berkurang. Penelitian sebelumnya menyatakan bahwa kandungan serat yang lebih tinggi menyebabkan terbentuknya pori dan void antarmuka yang lebih besar, dan sifat hidrofilik serat limbah kertas menyebabkan lemahnya adhesi pada antarmuka matriks serat sehingga mengakibatkan penurunan kuat tekan material (Stevulova et al., 2021). Oleh karena itu, kadar serat 0,5% direkomendasikan sebagai kadar optimum di antara variasi yang di uji karena menghasilkan performa mekanis terbaik dan memenuhi persyaratan standar untuk aplikasi mortar plesteran dinding.

4.2.4 Pengujian Daya Serap pada Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

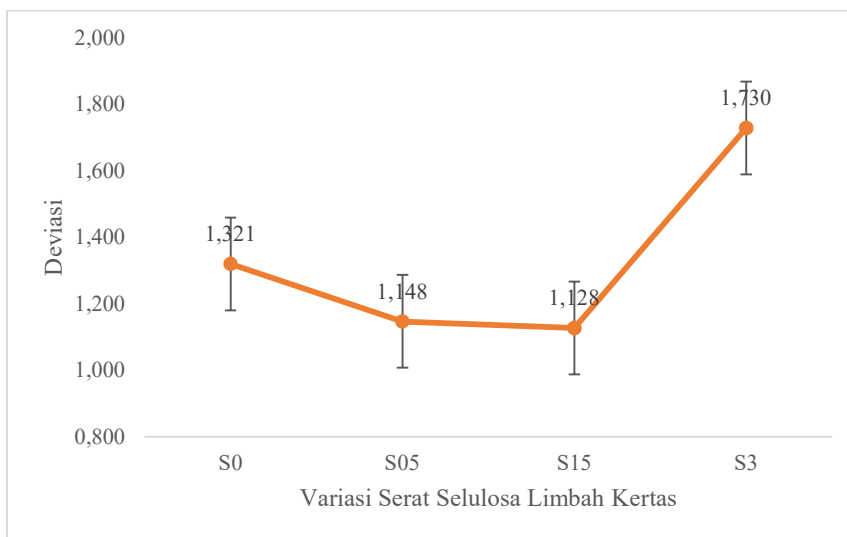
Pengujian penyerapan air (*absorption*) bertujuan untuk mengetahui kemampuan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dalam menyerap air setelah dilakukan perendaman selama 24 jam. Penyerapan air merupakan salah satu indikator

penting dalam menilai durabilitas mortar, karena nilai penyerapan air yang tinggi berarti porositas matriks nya besar dan dapat menyebabkan risiko tinggi kerusakan material akibat penetrasi zat agresif dari lingkungan. Sifat hidrofilik serat selulosa menyebabkan penyerapan air yang tinggi akibat struktur mikropori serat itu sendiri, sehingga penambahan serat selulosa pada mortar perlu dioptimalkan agar tidak meningkatkan porositas secara berlebihan.

Pengujian penyerapan air menggunakan benda uji prisma berukuran 4 x 4 x 16 cm dengan 2 sampel setiap variasi nya. Variasi yang di uji meliputi 0% (S0), 0.5% (S0.5), 1.5% (S1.5), dan 3% (S3).

Tabel 4.14. Hasil Uji Penyerapan Air Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

No	Variasi Serat (%)	Kode Sampel	Berat Kering (g)	Berat Basah (g)	Deviasi (g)	Penyerapan air (%)	Rata-rata (%)
1	S0	S0.1	513,00	520,00	7,00	1,36	1,32
2		S0.2	509,10	515,60	6,50	1,28	
3	S0.5	S0.5.1	535,10	543,70	8,60	1,61	1,15
4		S0.5.2	537,60	541,30	3,70	0,69	
5	S1.5	S1.5.1	531,30	539,40	8,10	1,52	1,13
6		S1.5.2	533,50	537,40	3,90	0,73	
7	S3	S3.1	519,00	527,90	8,90	1,71	1,73
8		S3.2	538,70	548,10	9,40	1,74	



Gambar 4.7. Diagram Hasil Uji Daya Serap Air

Berdasarkan seluruh hasil pengujian penyerapan air, terdapat pola yang jelas bahwa kadar serat selulosa memiliki hubungan yang tidak linier terhadap nilai penyerapan air mortar geopolimer. Pada variasi 0,5% dan 1,5% penambahan serat

selulosa justru menurunkan penyerapan air dibandingkan kontrol, yang mengindikasikan bahwa serat berperan dalam memadatkan matriks dan menutup pori kapiler. Hal ini diperkuat oleh hasil penelitian Kiamahalleh et al. (2024) yang mengonfirmasi bahwa penurunan penyerapan air pada campuran yang mengandung serat limbah kertas dikaitkan dengan kemampuan serat dalam membatasi pembentukan dan perambatan retakan mikro, yang berkontribusi pada terbentuknya mikrostruktur yang lebih padat serta berkurangnya void yang dapat dilalui air di dalam matriks (Kiamahalleh et al., 2024).

Namun demikian, peningkatan kadar serat hingga 3% menyebabkan nilai penyerapan air meningkat menjadi 1,73%, bahkan lebih tinggi dibandingkan variasi kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa kadar serat yang berlebihan dapat menurunkan kualitas mikrostruktur mortar akibat sifat hidrofilik serat selulosa yang tinggi serta kemungkinan terbentuknya pori dan rongga tambahan di dalam matriks. Peningkatan kadar serat limbah kertas cenderung meningkatkan absorpsi air dan koefisien penyerapan kapiler akibat bertambahnya jumlah dan ukuran pori pada material (Stevulova et al., 2021).

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar serat selulosa limbah kertas sebesar 1,5% merupakan kadar optimum di antara variasi yang diuji dalam mengendalikan penyerapan air mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Variasi ini menghasilkan nilai absorpsi terendah dibandingkan seluruh variasi lainnya, sehingga menunjukkan tingkat porositas yang lebih rendah dan potensi durabilitas yang lebih baik. Nilai penyerapan air yang diperoleh juga memenuhi persyaratan SNI 03-2914-1992, yaitu tidak melebihi batas maksimum 6,5% dari berat mortar kering.

4.3 Perhitungan Biaya

Biaya material bahan merupakan faktor penting dalam penelitian. Pada penelitian ini memperoleh harga material melalui survey langsung ke salah satu supplier di Kota Semarang serta pembelian melalui *e-commerce*. Analisis perhitungan biaya bertujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan serat selulosa limbah kertas

sebagai bahan tambah pada mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Berikut adalah rincian biaya material bahan yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4.15. Analisis Harga Material Mortar Variasi 0%

Material	Harga Satuan	Satuan	Volume (Kg)	Harga Total
Pasir	Rp270	Kg	4,484	Rp1.210,74
<i>Fly ash</i>	Rp5.000	Kg	1,495	Rp7.473,69
Na ₂ SiO ₃	Rp11.000	Kg	1,196	Rp13.153,70
NaOH	Rp10.835	Kg	0,598	Rp6.477,96
Total				Rp28.316,09

Tabel 4.16. Analisis Harga Material Mortar Variasi 0,5%

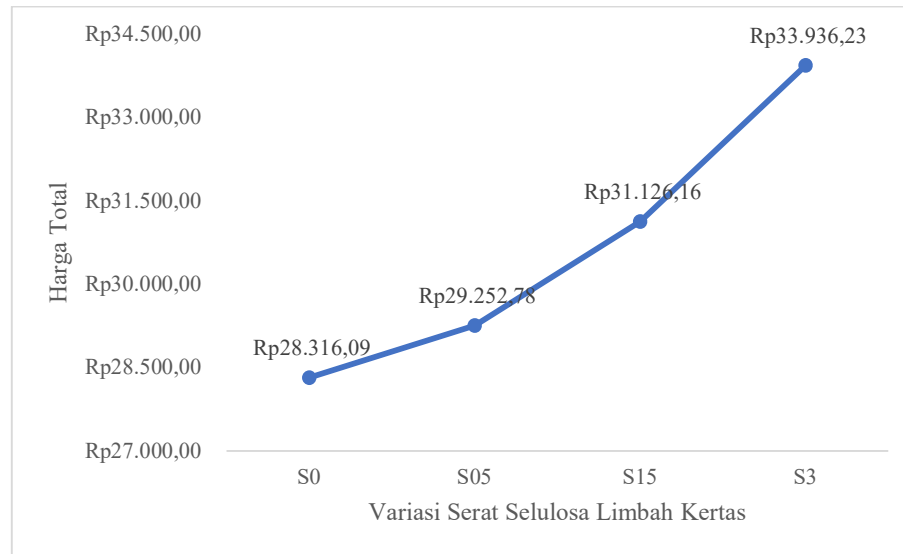
Material	Harga Satuan	Satuan	Volume (Kg)	Harga Total
Pasir	Rp270	Kg	4,484	Rp1.210,74
<i>Fly ash</i>	Rp5.000	Kg	1,495	Rp7.473,69
Serat selulosa limbah kertas	Rp125.332	Kg	0,007	Rp936,69
Na ₂ SiO ₃	Rp11.000	Kg	1,196	Rp13.153,70
NaOH	Rp10.835	Kg	0,598	Rp6.477,96
Total				Rp29.252,78

Tabel 4.17. Analisis Harga Material Mortar Variasi 1,5%

Material	Harga Satuan	Satuan	Volume (Kg)	Harga Total
Pasir	Rp270	Kg	4,484	Rp1.210,74
<i>Fly ash</i>	Rp5.000	Kg	1,495	Rp7.473,69
Serat selulosa limbah kertas	Rp125.332	Kg	0,022	Rp2.810,07
Na ₂ SiO ₃	Rp11.000	Kg	1,196	Rp13.153,70
NaOH	Rp10.835	Kg	0,598	Rp6.477,96
Total				Rp31.126,16

Tabel 4.18. Analisis Harga Material Mortar Variasi 3%

Material	Harga Satuan	Satuan	Volume (Kg)	Harga Total
Pasir	Rp270	Kg	4,484	Rp1.210,74
<i>Fly ash</i>	Rp5.000	Kg	1,495	Rp7.473,69
Serat selulosa limbah kertas	Rp125.332	Kg	0,045	Rp5.620,14
Na ₂ SiO ₃	Rp11.000	Kg	1,196	Rp13.153,70
NaOH	Rp10.835	Kg	0,598	Rp6.477,96
Total				Rp33.936,23



Gambar 4.8. Diagram Analisis Harga Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Berdasarkan hasil analisis biaya produksi yang dikaitkan dengan karakteristik mortar geopolimer berbasis *fly ash*, diketahui bahwa penambahan serat selulosa limbah kertas menyebabkan peningkatan biaya material secara bertahap seiring bertambahnya kadar serat yang digunakan. Biaya material mortar kontrol (S0) sebesar Rp28.316,09 meningkat menjadi Rp29.252,78 pada variasi S0.5, sehingga terdapat tambahan biaya sebesar Rp936,69 atau sebesar 3,31%. Pada variasi S1.5, biaya material meningkat menjadi Rp31.126,16 dengan selisih Rp2.810,07 dibandingkan variasi kontrol atau meningkat sebesar 9,92%. Sementara itu, variasi S3 menghasilkan biaya material tertinggi yaitu Rp33.936,23 dengan tambahan biaya sebesar Rp5.620,14 atau meningkat sebesar 19,85% dibandingkan mortar kontrol. Peningkatan biaya tersebut terutama disebabkan oleh bertambahnya kebutuhan serat selulosa limbah kertas sebagai bahan tambah mortar.

Apabila ditinjau berdasarkan hubungan antara biaya dan peningkatan kinerja material (cost benefit ratio), variasi S0.5 dengan kadar serat 0,5% menunjukkan efisiensi terbaik. Dengan tambahan biaya hanya Rp936,69, variasi ini mampu menghasilkan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan mortar kontrol. Variasi S0.5 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 21,73 MPa

atau meningkat 4,00 MPa dibandingkan S0, menurunkan luas retak sebesar 1,764 cm² (60,3%), menurunkan nilai daya serap air sebesar 0,17%, serta menghasilkan nilai susut yang rendah dan stabil sebesar 0,013. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tambahan biaya yang relatif kecil mampu memberikan peningkatan kualitas mortar yang paling optimal dibandingkan variasi lainnya.

Pada variasi S1.5, tambahan biaya sebesar Rp2.810,07 tidak diikuti oleh peningkatan kinerja yang sebanding. Meskipun variasi ini masih menunjukkan nilai susut dan daya serap yang baik, kuat tekan yang dihasilkan lebih rendah sebesar 3,73 MPa dibandingkan variasi S0.5 dan luas retaknya mendekati mortar kontrol. Sementara itu, variasi S3 memerlukan tambahan biaya terbesar yaitu Rp5.620,14, namun menghasilkan performa yang kurang optimal karena memiliki luas retak tertinggi, nilai susut terbesar pada umur 25 hari, daya serap air tertinggi, serta kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan variasi S0.5.

Berdasarkan hasil analisis teknis dan ekonomis, variasi S0.5 dengan kadar serat selulosa limbah kertas sebesar 0,5% dapat direkomendasikan sebagai komposisi optimum di antara variasi yang diuji pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* untuk aplikasi plesteran dinding. Variasi ini memberikan keseimbangan terbaik antara biaya produksi, kuat tekan, ketahanan retak, pengendalian susut, dan durabilitas material, sehingga menghasilkan nilai manfaat yang paling tinggi terhadap tambahan biaya yang dikeluarkan.

4.4 Pembahasan

Pengujian mortar geopolimer berbasis *fly ash* dengan bahan tambah serat selulosa limbah kertas sebagai material plesteran dinding meliputi uji retak rambut, susut, kuat tekan, dan daya serap air pada variasi kadar serat 0% (S0), 0,5% (S0.5), 1,5% (S1.5), dan 3% (S3). Selain pembahasan masing-masing parameter, dilakukan pula analisis keterkaitan antar parameter untuk memahami mekanisme kerja serat selulosa dalam matriks geopolimer serta mengevaluasi pengaruh peningkatan kadar serat terhadap kinerja mortar secara menyeluruh. Analisis tersebut digunakan untuk menentukan variasi kadar serat yang memberikan keseimbangan kinerja terbaik berdasarkan hasil seluruh pengujian yang dilakukan.

4.4.1 Hubungan Antar Parameter Pengujian pada Setiap Variasi Mortar Geopolimer Berbasis *Fly ash*

Hasil pengujian yang telah dipaparkan pada subbab sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa limbah kertas memberikan pengaruh yang tidak linier terhadap seluruh parameter kinerja mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Oleh karena itu, hal ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antar parameter retak rambut, susut, kuat tekan, dan daya serap air secara keseluruhan pada setiap variasi campuran, sehingga dapat diperoleh gambaran menyeluruh mengenai mekanisme kerja serat selulosa dalam matriks geopolimer dan dasar penentuan kadar optimumnya.

1. Variasi S0 (0%)

Mortar geopolimer tanpa penambahan serat (S0) digunakan sebagai acuan untuk membandingkan seluruh variasi campuran. Pada variasi ini, seluruh parameter menunjukkan kinerja yang cukup baik dan relatif stabil. Kuat tekan pada umur 28 hari mencapai 17,73 MPa sehingga telah memenuhi persyaratan minimum mortar Tipe M menurut SNI 6882:2014 sebesar 17,2 MPa. Luas retak rata-rata sebesar 2,926 cm², sedangkan nilai susut meningkat secara bertahap dari 0,012 pada hari ke-4 menjadi 0,015 pada hari ke-25. Daya serap air sebesar 1,32% menunjukkan bahwa matriks mortar masih memiliki pori yang cukup banyak. Kondisi ini menunjukkan bahwa tanpa adanya serat, kehilangan air selama proses pengeringan berlangsung lebih cepat sehingga meningkatkan tegangan tarik dalam mortar dan memicu terbentuknya retak rambut pada permukaan plesteran.

2. Variasi S0.5 (0,5%)

Variasi S0.5 menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan variasi lainnya. Kuat tekan pada umur 28 hari mencapai 21,73 MPa atau meningkat sebesar 22,56% dibandingkan variasi kontrol. Luas retak rata-rata menjadi yang paling kecil yaitu 1,162 cm² atau berkurang sebesar 60,3% dibandingkan S0. Nilai susut berada pada rentang 0,011 hingga 0,013 selama masa pengujian, sedangkan daya serap air sebesar 1,15% lebih rendah

dibandingkan variasi kontrol. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan serat selulosa sebesar 0,5% mampu bekerja dengan baik di dalam matriks geopolimer. Serat membantu menahan terbentuknya retak, mengurangi laju penyusutan, serta memperbaiki struktur *solid* mortar sehingga porositas menjadi lebih rendah. Kombinasi dari mekanisme tersebut menghasilkan kinerja mortar yang paling baik di antara seluruh variasi yang diuji.

3. Variasi S1.5 (1,5%)

Variasi S1.5 masih menunjukkan kinerja yang cukup baik terutama pada parameter susut dan daya serap air. Nilai susut relatif stabil pada angka 0,013 dan daya serap air menjadi yang paling rendah yaitu 1,13%. Namun, kuat tekan menurun menjadi 18,00 MPa dan luas retak meningkat menjadi 2,850 cm² sehingga mendekati nilai pada variasi kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan serat sebesar 1,5% masih mampu membantu mengendalikan penyusutan dan penyerapan air, tetapi penyebaran serat dalam campuran mulai kurang merata. Kondisi tersebut menyebabkan terbentuknya bagian-bagian yang lebih lemah di dalam matriks sehingga kemampuan serat dalam menghambat perkembangan retak menjadi berkurang. Selain itu, adanya rongga udara di sekitar kumpulan serat juga menyebabkan kepadatan mortar menurun sehingga kuat tekan menjadi lebih rendah.

4. Variasi S3 (3%)

Variasi S3 menunjukkan penurunan kinerja yang paling besar dibandingkan seluruh variasi lainnya. Meskipun kuat tekan pada umur 28 hari masih memenuhi persyaratan minimum SNI dengan nilai 17,58 MPa, parameter lainnya mengalami penurunan yang cukup signifikan. Luas retak rata-rata mencapai 7,372 cm² atau meningkat sebesar 152% dibandingkan variasi kontrol. Nilai susut yang pada awal pengujian masih mendekati variasi lain kemudian meningkat tajam hingga mencapai 0,043 pada hari ke-25. Daya serap air juga meningkat menjadi 1,73%, lebih tinggi dibandingkan seluruh variasi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah serat yang terlalu

banyak menyebabkan serat menggumpal dan tidak tersebar secara merata dalam matriks mortar. Akibatnya terbentuk lebih banyak rongga dan pori yang mempercepat kehilangan air selama proses pengeringan. Peningkatan penyusutan tersebut menghasilkan tegangan tarik yang lebih besar sehingga retak yang terbentuk menjadi lebih luas. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan serat dalam jumlah berlebihan tidak memberikan peningkatan kinerja, melainkan dapat menurunkan kualitas mortar secara keseluruhan.

4.4.2 Hubungan Antar Keseluruhan Variasi

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang saling terkait erat antara susut, retak rambut, daya serap air, dan kuat tekan mortar geopolimer berbasis *fly ash* dengan serat selulosa limbah kertas. Serat selulosa bekerja efektif dalam mengontrol susut melalui mekanisme *solid curing* pada kadar rendah hingga menengah, yang secara langsung berdampak pada penurunan luas retak rambut. Penurunan retak rambut pada gilirannya berkontribusi pada densitas matriks yang lebih baik, yang tercermin dari nilai daya serap air yang lebih rendah dan kuat tekan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada kadar serat yang berlebihan, aglomerasi serat memutus rantai mekanisme dan distribusi serat yang tidak merata meningkatkan porositas, memperparah susut pada umur lanjut, memperlemah mekanisme *crack bridging*, dan akhirnya menurunkan seluruh parameter kinerja secara bersamaan. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, variasi S0.5 dengan kadar serat selulosa limbah kertas 0,5% merupakan variasi yang memberikan kinerja terbaik di antara seluruh variasi yang diuji, ditinjau dari aspek kuat tekan, ketahanan retak, pengendalian susut, dan daya serap air mortar geopolimer sebagai material plesteran dinding.