

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penyajian Data

Penyajian data ini memuat hasil pengujian dari penelitian *artificial aggregate* yang diperkuat *silika fume*, yang dilakukan menyesuaikan terhadap standar yang sudah ditetapkan.

4.1.1 Pengujian Matrial Penyusun Artificial Aggregate

Artificial aggregate memiliki matrial penyusun dari *fly ash*, *silika fume*, dan pasir yang akan di reaksikan dengan alkali aktivator secara bertahap dalam kondisi jenuh sehingga terbentuk bulir bulir atau granular (*pelletized*). Reaksi geopolimer yang menghasilkan satuan yang keras tercipta dari reaksi alumina serta silikat yang ada pada matrial *fly ash*, serta *silika fume* yang di bantu oleh alkali aktivator.

4.1.1.1 Hasil Pengujian XRF (X-Ray Fluorescence)

Pengujian XRF (X-Ray Fluorescence) dilaksanakan di BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional), berlokasi di Kawasan Puspitek (KST BJ Habibie) Gedung Geotech 820, Pusat Riset Teknologi Pertambangan (PRPTB), menggunakan alat XRF tipe Rigaku NexCG. Uji XRF ini bertujuan untuk menentukan kandungan silikat dan alumina dalam *fly ash* dan *silika fume*, sehingga perhitungan campuran *artificial aggregate* sesuai dengan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_3$ yang telah ditetapkan dalam penelitian sebelumnya pada reaksi geopolimer, dengan rasio batas antara $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_3$ sebesar 2.6 – 3.6 (Al Rasyid, The Content Ratio of SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O and H_2O in Geopolymer Concrete, 2015).

Tabel 4. 1 xrf fly ash kelas f (penjelasannya & standar kelas)

Name	Value	Name	Value
SiO₂	41,40%	Si	19,30%
Al₂O₃	22,70%	Fe	12,40%
Fe₂O₃	17,70%	Al	12,00%
CaO	8,70%	Ca	6,20%
MgO	4,50%	Mg	2,70%
Na₂O	1,10%	Na	0,80%
SO₃	1,00%	K	0,60%
TiO₂	1,00%	Ti	0,60%
K₂O	0,70%	S	0,40%
P₂O₃	0,40%	Mn	0,20%
MnO	0,30%	P	0,20%
Cl	0,10%	Cl	0,10%
SrO	0,10%	Sr	0,10%

Hasil pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang dilakukan di BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) di Puspittek Serpong menunjukkan bahwa fly ash dari PLTU Lontar mengandung 81,8% dari total SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Ini sesuai dengan standar ASTM C 618, yang mengkategorikan fly ash tersebut sebagai kelas F karena jumlah SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ melebihi 70%.

Tabel 4. 2 Penjelasan xrf silica fume

Name	Value	Name	Value
SiO₂	85%	Si	80,1%
Al₂O₃	0,5%	Fe	0,823%
Fe₂O₃	1,4%	Al	0,264%
CaO	4,5%	Ca	4,414%
MgO	0,3%	Mg	0,21%
Na₂O	0,75%	Na	0,53%
SO₃	1,43%	K	5,31%
TiO₂	0,235%	Ti	0,015%

KO₂	0,7%	Zn	0,919%
P₂O₃	0,421%	Mn	0,353%
MnO	0,052%	P	0,259%
Cl	0,087%	Cl	0,087%

Hasil pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) yang dilakukan di BRIN (Badan Riset dan Inovasi Nasional) di Puspitek Serpong menunjukkan bahwa *silica fume* memiliki total kandungan SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ sebesar 86,9%.

4.1.1.2 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Pengujian kadar lumpur pada agregat halus dilaksanakan pada sampel dari Gunung Holcim. Hasil pengujian laboratorium di PT. Jaya Beton dilakukan pada suhu ruang 29°C dengan kondisi cuaca cerah. Tabel berikut menunjukkan hasil pengukuran berat jenis agregat halus:

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

No.	Percobaan	Satuan	1	2
1.	Berat kering material sebelum dicuci (A)	gr	1000.00	1000.00
2.	Berat kering material sesudah dicuci (B)	gr	965.60	970.10
3.	Material lolos ayakan 0.074 mm ($C = ((A-B)/A) \times 100\%$)	%	3.44	2.99
4.	Selisih		0.45	
5.	Rata – rata		3.22	

Keterangan:

Persentase material yang melewati ayakan 0,074 mm adalah sama dengan persentase kandungan lumpur.

4.1.1.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

Pengujian berat jenis agregat halus menggunakan sampel dari Gunung Holcim dilakukan di laboratorium PT. Jaya Beton pada suhu ruangan 29°C dengan kondisi cuaca cerah. Berikut adalah hasil pengujian berat jenis agregat halus:

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

No.	Percobaan	Satuan	1	2
1.	Nomor flash		1	2
2.	Berat flash (A)	gr	141.00	224.00
3.	Berat sample dan flask (B)	gr	641.00	724.00
4.	Berat sample (C=B-A)	gr	500.00	500.00
5.	Berat flask, sample, dan air (D)	gr	944.60	1025.70
6.	Berat air (E=D-B)	gr	303.60	301.70
7.	Berat Jenis (F=C/(C-E))		2.55	2.52
8.	Selisih		0.02	
9.	Rata-rata		2.53	

Jika ada perbedaan lebih besar dari 0,02. maka percobaan harus diulangi.

4.1.1.4 Hasil Pengujian Slump

Tujuan pengujian slump pada mortar pembuat agregat kasar buatan adalah untuk menentukan konsistensi atau kekentalan mortar segar. Pengujian ini membantu memastikan bahwa mortar memiliki tingkat plastisitas dan kohesi yang tepat, yang diperlukan untuk memastikan bahwa agregat kasar buatan dapat dicetak dan dibentuk dengan baik. Nilai slump digunakan sebagai indikator kemudahan pengerjaan mortar dan kemampuannya untuk mengisi cetakan secara merata, sehingga dapat menghasilkan agregat kasar buatan dengan kualitas dan karakteristik yang konsisten. Pengujian ini juga membantu dalam mengontrol proporsi campuran dan memastikan

kesesuaian dengan spesifikasi yang telah ditetapkan. Berikut adalah table hasil pengujian slump:

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Slump

No	Variabel	Nilai Slump
1.	0%	5
2.	5%	6
3.	10%	11



Gambar 4. 1 Hasil Pengujian Slump

4.2 Analisa Data

Pada sub bab 4.2 mengenai analisis data mencakup perancangan, proses pembuatan, serta pengujian yang dilaksanakan dalam penelitian ini, yaitu membandingkan berat isi, uji berat jenis, dan uji abrasi *artificial aggregate*.

4.2.1 Perancangan Campuran Artificial Aggregate

Perancangan campuran *artificial aggregate* pada penelitian ini dilakukan dengan meraksikan *fly ash* yang di substitusikan dengan *silica fume* dilarutkan dengan alkali aktivator campuran NaOH dan Na₂SiO₃ dengan nilai 8 M.

Tabel 4. 6 Table of molar NaOH

No	Material	NaOH 2Mol	NaOH 4Mol	NaOH 6Mol	NaOH 8Mol	NaOH 10Mol	NaOH 12Mol	NaOH 16Mol
1	NaOH (Kg)	9,5	18,5	27,8	37,1	48,1	55,1	73,5
2	water (Kg)	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65

Percampuran yang digunakan untuk membuat *artificial aggregate* dilakukan dengan perbandingan 1:4 antara fly ash dan alkali aktivator. Proses pembuatan ini menghasilkan 10 kg *artificial aggregate* dengan 8M alkali aktivator, menggunakan mixer dengan kemiringan 40°.

Tabel 4. 7 Perhitungan campuran fly ash, silica fume, pasir, dan alkali aktivator

Fly ash Kelas F		
SiO ₂	41.40%	0.414
Al ₂ O ₃	22.70%	0.227
Fe ₂ O ₃	17.70%	0.177
Total	81.80%	0.818

Silica fume		
SiO ₂	85,00%	0,85
Al ₂ O ₃	0,50%	0,005

12 M Larutan NaOH		
NaOH	320	gr Flake
Air	480	gr

Waterglass (Na₂SiO₃) (BE58)		
Na ₂ O	18.50%	0.185
SiO ₂	36.40%	0.364
H ₂ O	45.10%	0.451

NaOH (Sodium Hidroksida)		
Na ₂ O	98%	0.98
H ₂ O	2%	0.02

Untuk mencapai molaritas 8M pada larutan alkali, perlu diketahui kandungan H₂O dan nilai Mr dari senyawa yang akan dilarutkan. Rumus untuk menghitung molaritas baru melibatkan penambahan Waterglass pada

molaritas awal NaOH.

$$M1.V1 = M2 . V2$$

$$12 M \times 480 \text{ gr} = M2 \times 720$$

$$\frac{12 M1 \times 480 \text{ gr}}{720 \text{ gr}} = 8 M2$$

Untuk mendapatkan larutan 8M dihitung menggunakan perhitungan di atas, dimana dibutuhkan molaritas awal 12M dengan memasukan (NaOH) = 320 gr NaOH *flake* yang dilarutkan dengan 480 ml air. Setelah di campur dengan *waterglass* menjadi 8M.

Karena *silica fume* disubstitusikan kedalam *fly ash* dalam campuran *artificial aggregate*, perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{SiO}_3$ dapat dihitung dengan mengekstraksi senyawa kimia yang terlibat dalam proses pembuatannya, seperti Na_2O , SiO_3 , dan H_2O . Nilai Mr dari senyawa SiO_3 dan Al_2O_3 yang terdapat dalam *fly ash*, *silica fume*, dan alkali aktivator diperoleh dari hasil uji XRF yang tercantum dalam tabel 4.1 dan table 4.2, sehingga menghasilkan perhitungan sebagai berikut.

Tabel 4. 8 Tabel langkah pembuatan Alkali aktivator

Langkah	Kandungan dan Persentase			Keterangan
Langkah	Fly ash Kelas F			Menyiapkan dan menentukan proporsi abu sekam padi serta fly ash yang akan dipakai dalam membuat sampel <i>artificial aggregate</i> sekali pembuatan,
1	SiO2	41.40%	0.414	
	Al2O3	22.70%	0.227	
	Fe2O3	17.70%	0.177	
	Total	81.80%	0.818	
	Silica fume			
	SiO2	85,00%	0,85	
	Al2O3	0,50%	0,005	

**Waterglass (Na₂SiO₃)
(BE58)**

Na ₂ O	18.50%	0.185
SiO ₂	36.40%	0.364
H ₂ O	45.10%	0.451

NaOH (Sodium Hidroksida)

Na ₂ O	98%	0.98
H ₂ O	2%	0.02

Mr

SiO ₂	60	gr/mol
Na ₂ O	62	gr/mol
H ₂ O	18	gr/mol

Al₂O₃ 102 gr/mol

**Flyash : AA (4 :
1)**

4800 1200

NaOH : Na₂SiO₃

(10% : 15%) dari

total fly ash

480 720

Langkah

Na₂O dalam Na₂SiO₃

2

massa Na₂O 133.2 gr

Mol of Na₂O 3.33 mol

Na₂O dalam Na₂SiO₃ 3.33 mol

dengan tujuan
membandingkan

kandungan

senyawa SiO₃ dan

Al₂O₃.. Alkali

aktivator yang

diperlukan adalah

NaOH dan

Na₂SiO₃, yang

berfungsi untuk

mengolah

kandungan Na₂O,

SiO₃, dan H₂O.

Hal ini akan

menghasilkan

perbandingan

antara SiO₃

/Al₂O₃.

Kandungan fly

ash dan alkali

aktivator diubah

menjadi mol

dengan

membaginya

SiO₂ dalam Na₂SiO₃		<p>dengan Mr dari senyawa yang dihitung. Pada langkah 2, senyawa yang dikonversi menjadi mol adalah Na₂O, SiO₂, dan H₂O. Hasil perbandingan total SiO₂/Al₂O₃ kemudian dapat dihitung dan harus berada dalam rentang yang ditetapkan, yaitu 2,6 – 3,6 untuk SiO₂/Al₂O₃.</p>
massa SiO ₂	262.08 gr	
Mol of SiO ₂	0.060667 mol	
SiO ₂ dalam Na ₂ SiO ₃	0.060667 mol	
H₂O dalam Na₂SiO₃		
massa H ₂ O	324.72 gr	
Mol of H ₂ O	18.04 mol	
H ₂ O dalam Na ₂ SiO ₃	18.04 Mol	
Total H₂O dari NaOH & Na₂SiO₃		
Tanpa silica fume		
H ₂ O	37.90667 mol	
	682.32 ml	
Total SiO₂ & Al₂O₃ NaOH & Na₂SiO₃		
Tanpa silica fume		
SiO ₂	33.18067 mol	
Al ₂ O ₃	10.68235 mol	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.106119677	
range best = 2.6 – 3.6		
Langkah		
3	Flyash : AA (4 : 1)	
	4800 1200	
	NaOH : Na₂SiO₃ (10% : 15%) dari total fly ash	
	480 720	
95% FA + Silica fume 5%		




240			<i>fume</i> padi serta <i>fly ash</i> sejumlah 5%.
4560			Hasil
SiO₂ dalam Na₂SiO₃			perbandingan
massa SiO ₂	262.08	gr	total SiO ₂ / Al ₂ O ₃
Mol of SiO ₂	4.368	mol	yang diperoleh
SiO ₂ dalam Na ₂ SiO ₃	4.368	mol	adalah 3,84, yang
H₂O dalam Na₂SiO₃			masih berada
massa H ₂ O	324.72	gr	dalam rentang
Mol of H ₂ O	18.04	mol	yang ditetapkan,
H ₂ O dalam Na ₂ SiO ₃	18.04	mol	yaitu 2,6 – 3,6
SiO₂ dalam <i>Silica fume</i> 5%			untuk SiO ₂
massa SiO ₂	91.56	gr	/Al ₂ O ₃ .
Mol of SiO ₂	1.526	mol	
SiO ₂ dalam Abu sekam	1.526	mol	
Total SiO₂ & Al₂O₃ NaOH & Na₂SiO₃			
<i>Silica fume</i> 5%			
SiO ₂	39.014	mol	
Al ₂ O ₃	10.14824	mol	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.844412242		

Langkah 4	90% FA + Abu sekam 10%		Ulangi langkah 1 dan langkah 2 untuk menghitung campuran dalam pembuatan <i>artificial aggregate</i> menggunakan <i>fly ash</i> dan 10% <i>silica fume</i> . Hasil perbandingan total $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ yang diperoleh adalah 4,2, yang seharusnya berada dalam rentang yang ditetapkan, yaitu 2,6 – 3,6 untuk $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$.
	480	4320	
SiO₂ dalam Na₂SiO₃			
massa SiO ₂	262.08	gr	
Mol of SiO ₂	4.368	mol	
SiO ₂ dalam Na ₂ SiO ₃	4.368	mol	
H₂O dalam Na₂SiO₃			
massa H ₂ O	324.72	gr	
Mol of H ₂ O	18.04	mol	
H ₂ O dalam Na ₂ SiO ₃	18.04	mol	
SiO₂ dalam <i>Silica fume</i> 10%			
massa SiO ₂	183.12	gr	
Mol of SiO ₂	3.052	mol	
SiO ₂ dalam <i>silica fume</i>	3.052	mol	
Total SiO₂ & Al₂O₃ NaOH & Na₂SiO₃ <i>Silica fume</i> 10%			
SiO ₂	40.54	mol	
Al ₂ O ₃	9.6141176	mol	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.216715614		

4.2.2 Alat dan Bahan Pembuatan Artificial Aggregate

Dalam membuat *artificial aggregate* terlebih dahulusiapkan alat dan bahan yang perlu di gunakan, berikut bahan serta alat yang dipakai:

Tabel 4. 9 Tabel Alat dan Bahan

No	Nama Alat	Keterangan
1.		<p>Mixer merk Kuda dengan kapasitas 200 L digunakan untuk membuat <i>artiifical aggregate</i> menggunakan metode <i>pelletized</i>. Mixer ini dipilih karena kemiringannya dapat diatur. Saat dalam kondisi jenuh, sampel yang digiling di dalam mixer dapat membentuk granular. Namun, granular yang terbentuk tidak seragam karena menggunakan mixer, berbeda dengan penggunaan granulator yang memiliki pisau pembatas ukuran sehingga menghasilkan granular yang seragam.</p>
2.		<p>Peralatan untuk pengujian berat jenis dan berat isi mencakup keranjang dengan volume 7,6 L, wadah air berkapasitas 57 L, serta timbangan dengan ketelitian 5 gram.</p>
3.		<p>Oven merk Mermert yang memiliki kapasitas 6 loyang berukuran 0,016 m³ digunakan. Oven ini dapat mencapai suhu maksimal 110°C. Oven ini di guanakan untuk curing.</p>

4.



Timbangan yang digunakan adalah merek CAS dengan ketelitian hingga 0,5 gram.

5.



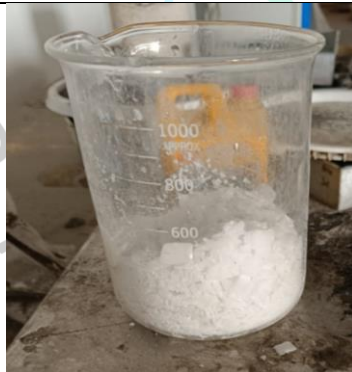
Saringan yang digunakan untuk analisis terdiri dari ukuran 1 inci, $\frac{3}{4}$ inci, $\frac{1}{2}$ inci, dan $\frac{3}{8}$ inci, sesuai dengan gradasi A yang dipilih untuk pengujian abrasi menggunakan mesin Los Angeles.

6.



Mesin Los Angeles abrasion yang dipakai memiliki kapasitas perputaran hingga 4 angka. Pengujian abrasi dilakukan dengan 500 putaran dan menggunakan 12 bola baja pada sampel *artificial aggregate*.

7.



Gelas ukur berkapasitas 1 liter dengan merek Pyrex.

8.



Gelas ukur air dengan kapasitas 1L.

9.



Loyang berbentuk persegi sebagai wadah.

10.



Wadah penuang untuk alkali aktivator yang di modifikasi dengan 6 lubang di sisi samping atas yang berkapasitas 1L.

11.



Corong dengan merek pyrex dengan ukuran 100m.

12.



Mesin *steam curing* yang di gunakan untuk curing uap dengan suhu maksimum 100°.

13.



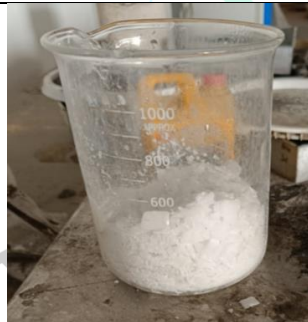
Alat Slump untuk menguji slump mortar

NO

Nama Bahan

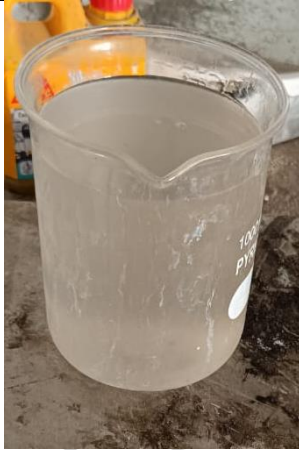
Keterangan

1.



NaOH flake yang digunakan adalah merk Thailand dengan kandungan murni 98%.

2.



Waterglass yang digunakan adalah Tipe BE 58.

3.



Silica fume SIF 94.

4.



Pasir yang bersumber dari PT.Jaya Beton Indonesia.

5.



Abu terbang (*fly ash*) limbah batu bara.

6.



Air Sebagai campuran yang akan mereaksikan NaOH dan untuk merendam pada saat Pengujian berat jenis.

4.2.3 Proses Pembuatan Artificial Aggregate

Proses yang dilakukan dalam pembuatan *Artificial Aggregate* geopolimer dengan campuran *fly ash* yang di substitusikan dengan *silica fume* sebagai berikut:

1. **Menghitung proporsi kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 terhadap *fly ash*, *silica fume*, dan alkali aktivator.**

Pada sub bab 4.1.1.1 menunjukkan hasil pengujian XRF untuk SiO_2 dan Al_2O_3 pada *fly ash* dan abu sekam padi. Kandungan Na_2O dan SiO_3 dalam alkali aktivator tercatat dalam kemasan yang dibeli dari Toko Karawaci Kimia yang terletak di jalan Imam Bonjol, Sukajadi, Kota Tangerang,. NaOH memiliki kemurnian 98%, sementara waterglass adalah tipe BE58.

2. **Menentukan rasio *fly ash*, *silica fume*, pasir, dan alkali activator**

Rasio perbandingan antara *fly ash*, *silica fume*, pasir, dan alkali aktivator sebagai berikut di jelaskan pada perhitungan di bawah ini:

Tabel 4. 10 Rasio *fly ash*, *silica fume* (0%, 5%, 10%) pasir, dan alkali activator dalam Kg/m^3

Rekapitulasi Perbandingan Alkali Aktivator terhadap *Fly Ash*, *Silica Fume*, dan Pasir

Variabel Campuran Silica Fume	<i>Fly Ash</i> (Kg)	<i>Silica fume</i> (Kg)	Alkali Aktivator (Kg)	Agregat Halus (Kg)	Berat total
0%	1146,48	0	286,62	764,32	2197,42
5%	1089,15	57,324	286,62	764,32	2197,42
10%	1031,83	114,65	286,62	764,32	2197,42



Gambar 4. 2 Rasio fly ash, silica fume 0%, pasir, dan alkali activator



Gambar 4. 3 Rasio fly ash, silica fume 5%, pasir, dan alkali activator



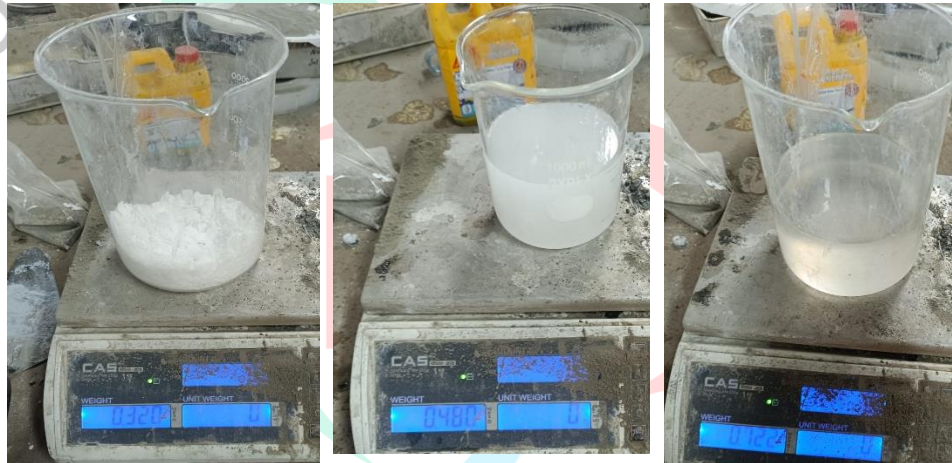
Gambar 4. 4 Rasio fly ash, silica fume 10%, pasir, dan alkali activator

3. Rasio Sodium Silikat (*Waterglass*) dan Sodium Hidroksida adalah 4 : 1

Setelah menentukan rasio aktivator alkali, langkah selanjutnya adalah membagi rasio tersebut menjadi 1 : 4, di mana 4 bagian untuk sodium silikat dan 1 bagian untuk sodium hidroksida. Berikut hasil perhitungan Rasio Sodium Silikat adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 11 Rasio Alkali Aktivator terhadap *fly ash*, *silica fume*, dan pasir.

Rekapitulasi Perbandingan Alkali Aktivator terhadap <i>Fly Ash</i>, <i>Silica Fume</i>, dan Pasir						
Variabel	<i>Fly Ash</i>	<i>Silica</i>	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Agregat	Berat
Campuran	(Kg)	<i>Fume</i>	(10%	(15%	Halus	total
Silica Fume		(Kg)	terhadap	terhadap	(Kg)	(Kg/m ³)
			<i>fly ash</i>)	<i>fly ash</i>)		
0%	1146,48	0	114,65	171,97	764,32	2197,42
5%	1089,15	57,324	114,65	171,97	764,32	2197,42
10%	1031,83	114,65	114,65	171,97	764,32	2197,42

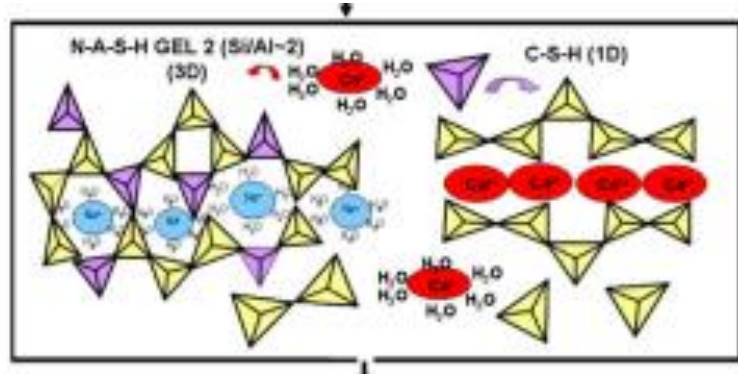


Gambar 4. 5 Rasio NaOH, Air, dan *Waterglass*

Rasio 1:4 Na₂SiO₃ terhadap NaOH adalah titik awal, dan penyesuaian mungkin diperlukan berdasarkan aplikasi dan sifat yang diinginkan. Misalnya, rasio Na₂SiO₃ yang lebih tinggi dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan, sedangkan rasio yang lebih rendah dapat digunakan untuk meningkatkan workability atau memperpanjang waktu setting (Malkawi et al., 2016).

Campuran agregat buatan yang berasal dari abu terbang dengan penggantian *Silica fume* terbentuk melalui reaksi antara material aluminosilikat dan larutan aktivator alkali, menghasilkan komposisi Na₂O. Proses ini menghasilkan geopolimer dengan komposisi akhir Na₂O – Al₂O₃ – SiO₂ – H₂O, yang dikenal sebagai N-A-S-H (Palomo,

Lodeiro, & Jimenez, 2015). Pembentukan gel N-A-S-H merupakan hasil dari proses geopolimerisasi yang mengaktivasi larutan alkali, yang menghasilkan sifat pengikat. Model pembentukan gel dari reaksi geopolimer N-A-S-H disajikan berikut ini.



Gambar 4. 6 Gambar pembentukan gel dari reaksi Geopolimer N-A-S-H

4. Membuat Larutan Campuran NaOH dan Na₂SiO₃

Dalam penelitian ini, menggunakan larutan NaOH dengan molaritas 8 molar dengan memperhitungkan kebutuhan NaOH dan gram air. Untuk mencapai hasil desain tersebut, perlu menghitung menggunakan rumus berikut.

$$M1 \cdot V1 = M2 \cdot V2 \quad (4.1)$$

Keterangan:

M1 = molaritas permulaan

V1 = Volume permulaan larutan

M2 = molaritas akhir

V2 = volume akhir larutan

Tabel 4. 12 Komposisi Larutan NaOH dan Na₂SiO₃
Molarity For Preparation 1 kg of SHS

	SH Solids	Water	SHS
	(Gram)	(Gram)	(Gram)
4	140	860	1000
6	200	800	1000
8	225	745	1000
12	354	646	1000

16	443	557	1000
18	350	480	1000

Berikut ini merupakan ilustrasi perhitungan rasio antara air dan NaOH untuk molaritas 8M.

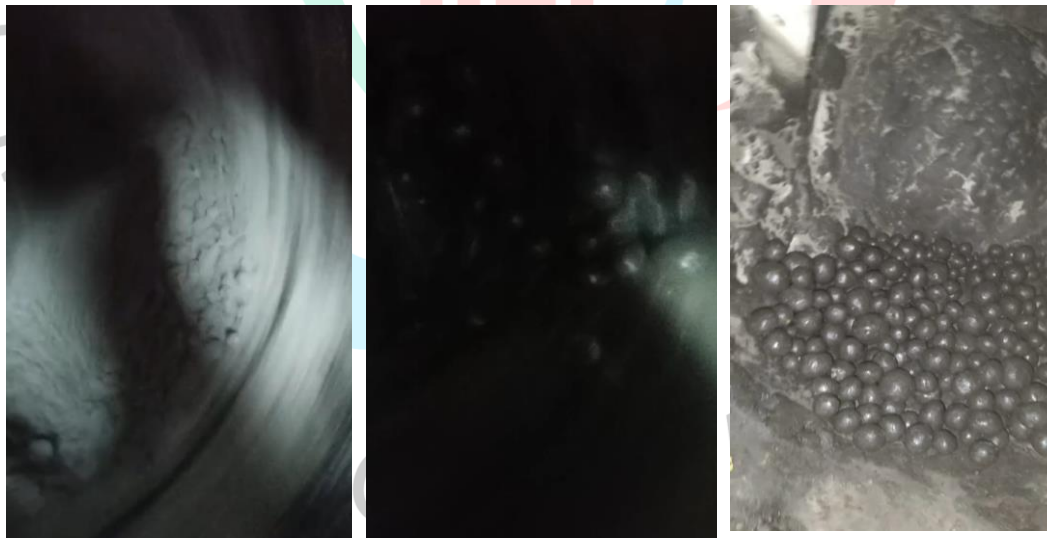
$$12M (\text{NaOH}) \times 114,65 (\text{NaOH dan Air}) = M2 \times 171,97 (\text{waterglass})$$

$$\frac{12 \times 114,65}{171,97} = M2$$

$$M2 = 8 \text{ mol}$$

5. Membuat *Artificial Aggregate* Menggunakan Metode *Pelletized*

Pembuatan *artificial aggregate* dengan metode *pelletized* dilakukan menggunakan mixer yang dimiringkan 40° dan dibantu oleh sekop, sehingga mekanismenya menyerupai alat granulator. Alkali aktivator ditambahkan secara bertahap dengan interval waktu setiap 20 menit sampai berbentuk granular.



Gambar 4. 7 Proses *Pelletized* Hingga Membentuk Granular

4. Melakukan Curing Oven atau Steam Curing dan Curing Suhu Ruang

Sampel yang terbentuk dari proses *pelletized* didiamkan selama 1 samapi 2 hari sebelum dilakukan curing di oven pada suhu 60°C

selam 4 jam atau *steam curing* selama 1 jam pada suhu 80°C, Setelah itu curing dalam suhu ruang selama 28 hari, lalu dapat dilaksanakan pengujian abrasi, berat jenis, dan berat isi.



Gambar 4. 8 Proses Curing Steam, Curing Oven, dan Curing Suhu Ruangan

4.2.4 Hasil Pengujian Artificial Aggregate

4.2.4.1 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Daya Serap Air

Pengujian berat jenis pada *artificial aggregate* serta agregat kasar alami sebagai pembandingnya mengikuti standar SNI 03-1969-2008. Hasil pengujian berat jenis adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 13 Hasil uji berat jenis 0% silica fume yang di substitusikan pada fly ash kelas F

Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kering oven	A	2000	2000	2000	gram
Berat benda uji jenuh kering permukaan di udara	B	2100	2150	2100	gram
Berat benda uji dalam air	C	1050	1150	1000	gram

Tabel 4. 14 Hasil uji berat jenis 0% silica fume yang di substitusikan pada fly ash kelas F

Perhitungan	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat jenis curah kering (S _d)	$\frac{A}{(B - C)}$	1,904	2	1.81	gram

Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss)	$\frac{B}{(B - C)}$	2	2.15	1.90	gram
Berat jenis semu (Sa)	$\frac{A}{(A - C)}$	2.105	2.353	2	gram
Penyerapan (Sw)	$\left[\frac{B - A}{(A)} \right] \times 100\%$	5	7,5	5	persen
Penyerapan rata-rata		5,833%			

Tabel 4. 15 Hasil uji berat jenis 5% silica fume yang di substitusikan pada fly ash kelas F

Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kering oven	A	2000	2000	1950	gram
Berat benda uji jenuh kering permukaan di udara	B	2150	2100	2150	gram
Berat benda uji dalam air	C	1100	1100	1200	gram

Perhitungan	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat jenis curah kering (Sd)	$\frac{A}{(B - C)}$	1,905	2	2,053	gram
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss)	$\frac{B}{(B - C)}$	2,048	2,1	2,263	gram
Berat jenis semu (Sa)	$\frac{A}{(A - C)}$	2,223	2,2	2,6	gram
Penyerapan (Sw)	$\left[\frac{B - A}{(A)} \right] \times 100\%$	7,5	5	10,256	persen
Penyerapan rata-rata		7,585%			

Tabel 4. 16 Hasil uji berat jenis 10% silica fume yang di substitusikan pada fly ash kelas F

Pengujian	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat benda uji kering oven	A	2000	2000	2000	gram
Berat benda uji jenuh kering permukaan di udara	B	2250	2150	2200	gram
Berat benda uji dalam air	C	1100	1250	1100	gram

Perhitungan	Notasi	I	II	III	Satuan
Berat jenis curah kering (S _d)	$\frac{A}{(B - C)}$	1.739	2,22	1.81	gram
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (S _s)	$\frac{B}{(B - C)}$	1,957	2,39	2	gram
Berat jenis semu (S _a)	$\frac{A}{(A - C)}$	2.2	2,667	2.2	gram
Penyerapan (S _w)	$\left[\frac{B - A}{(A)} \right] \times 100\%$	12,5	7,5	10	persen
Penyerapan rata-rata			10%		

Tabel 4. 17 Hasil Uji Berat Jenis Agregat Kasar Natural

No.	Percobaan	Satuan	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527.00	527.00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527.00	2527.00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000.00	2000.00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	365.00	365.00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1575.50	1583.00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1210.50	1218.00

7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)	2.53	2.56
8.	Selisih	0.02	
9.	Rata-rata	2.55	

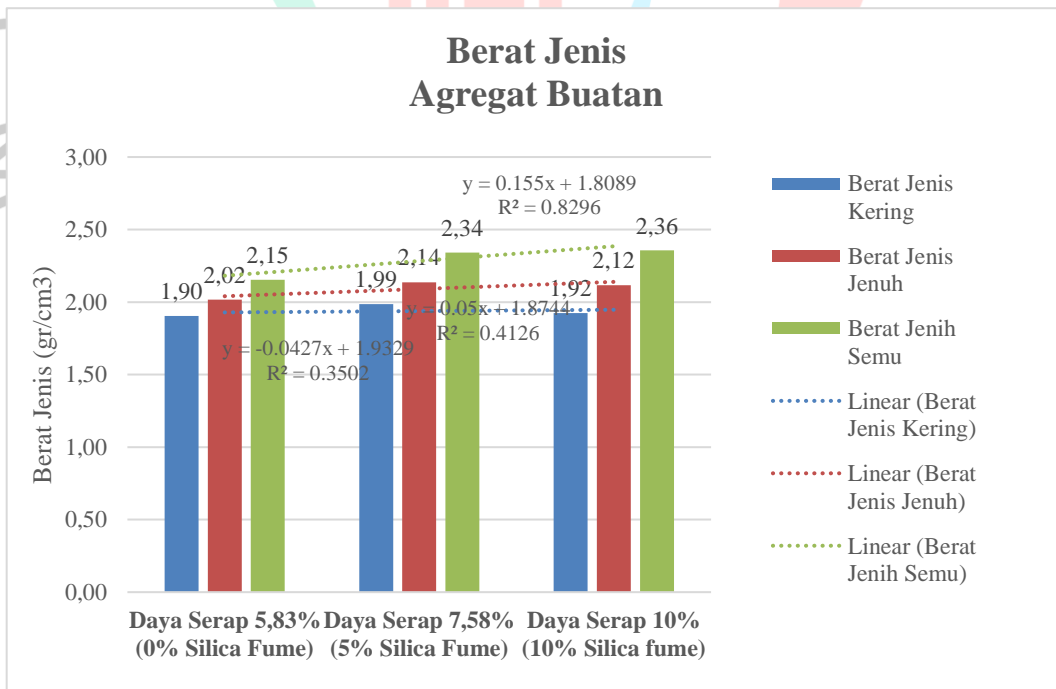
Penelitian ini menemukan bahwa berat jenis curah kering (Sd) agregat geopolimer berkisar antara 1.923 g/cm³ hingga 1.986 g/cm³, lebih rendah daripada standar ASTM C33 yang menyebutkan berat jenis curah kering agregat alami antara 2.3 g/cm³ hingga 2.8 g/cm³. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menemukan berat jenis curah kering agregat geopolimer fly ash berkisar antara 1.95 g/cm³ hingga 2.10 g/cm³ (Malkawi et al., 2016), serta penelitian lainnya melaporkan berat jenis curah kering agregat geopolimer fly ash dan silica fume berkisar antara 2.00 g/cm³ hingga 2.20 g/cm³ (Rajani et al., 2017). Hal ini menunjukkan bahwa agregat geopolimer secara umum mempunyai berat jenis curah kering yang lebih rendah dibandingkan agregat alami.

Berat jenis curah jenuh kering permukaan (Ss) dalam penelitian ini menunjukkan nilai antara 2.016 g/cm³ hingga 2.137 g/cm³, yang juga lebih rendah daripada agregat alami yang berkisar antara 2.4 g/cm³ hingga 2.9 g/cm³. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menemukan bahwa berat jenis curah jenuh kering permukaan agregat geopolimer fly ash berkisar antara 2.05 g/cm³ hingga 2.25 g/cm³ (Malkawi et al., 2016), serta penelitian lainnya melaporkan kisaran antara 2.15 g/cm³ hingga 2.35 g/cm³ (Rajani et al., 2017). Temuan ini menunjukkan bahwa agregat geopolimer memiliki berat jenis curah jenuh kering permukaan yang lebih rendah dibandingkan agregat alami.

Dalam hal berat jenis semu (Sa), penelitian ini menemukan bahwa agregat geopolimer memiliki nilai antara 2.153 g/cm³ hingga 2.356 g/cm³. Meskipun mendekati nilai agregat alami yang berkisar antara 2.5 g/cm³ hingga 3.0 g/cm³, agregat geopolimer tetap memiliki berat jenis semu yang lebih rendah. Penelitian terdahulu menemukan berat jenis semu agregat geopolimer fly ash berkisar antara 2.20 g/cm³ hingga 2.40 g/cm³

(Malkawi et al., 2016), sementara penelitian lainya melaporkan kisaran antara 2.30 g/cm³ hingga 2.50 g/cm³ (Rajani et al., 2017). Hasil ini menunjukkan konsistensi bahwa agregat geopolimer memiliki berat jenis semu yang mendekati agregat alami, namun tetap lebih rendah.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa agregat geopolimer memiliki penyerapan air yang lebih tinggi, dengan rata-rata berkisar antara 5.833% hingga 10%, dibandingkan agregat alami yang berkisar antara 1% hingga 5%. Hal ini menunjukkan bahwa porositas agregat geopolimer lebih tinggi daripada agregat alami. Penelitian terdahulu menemukan bahwa penyerapan air agregat geopolimer fly ash berkisar antara 6.5% hingga 8.5% (Malkawi et al., 2016), sementara penelitian lainnya melaporkan kisaran antara 7.0% hingga 9.0% (Rajani et al., 2017). Temuan ini sesuai terhadap penelitian sebelumnya, menjelaskan yakni agregat geopolimer cenderung memiliki lebih tingginya penyerapan air dibandingkan agregat alami, yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan material.



Gambar 4. 9 Grafik Pengaruh Daya Serap Air Terhadap Berat Jenis Agregat Buatan

Grafik di atas menggambarkan pengaruh daya serap air pada berat jenis agregat buatan dengan variasi kandungan silika fume (0%, 5%, dan 10%), menampilkan tiga jenis berat jenis: kering (biru), jenuh (merah), dan semu (hijau). Hasil menunjukkan bahwa penambahan silika fume cenderung meningkatkan berat jenis semu dari 2,15 gr/cm³ pada 0% menjadi 2,36 gr/cm³ pada 10%. Berat jenis kering juga menunjukkan peningkatan dari 1,90 gr/cm³ menjadi 1,92 gr/cm³, sedangkan berat jenis jenuh sedikit menurun dari 2,02 gr/cm³ menjadi 2,12 gr/cm³. Garis tren linear menunjukkan korelasi positif antara kandungan silika fume dengan berat jenis kering ($R^2 = 0,8296$) dan berat jenis semu ($R^2 = 0,4126$), namun korelasi negatif dengan berat jenis jenuh ($R^2 = 0,3502$), menunjukkan bahwa penambahan silika fume mempengaruhi ketiga jenis berat jenis dengan cara yang berbeda.

4.2.4.2 Hasil Pengujian Berat isi

Pengujian densitas *artificial aggregate* dan agregat kasar alami dilakukan mengacu pada SNI 03-4804-1992 mengenai pengujian rongga udara serta berat isi pada agregat.

Tabel 4. 18 Berat isi *artificial aggregate*

No	Percobaan	Satuan	1	2	3
1.	Volume container (A)	cm ³	2838	2838	2838
2.	Berat container (B)	gr	450	450	450
3.	Berat sampel dan container (C)	gr	3606	3816	3645
4.	Berat sampel (D=C-B)	gr	3156	3366	3195
5.	Berat isi (E=D/A)	cm ³ /gr	1,112	1,18	1,12
				6	6
6.	Rata-rata (F)		1,141		
7.	Berat Jenis (G)		2.705		
9.	Persentase volume padat ($H=(F/G) \times 100\%$)		42,18		

Tabel 4. 19 Berat isi Agregat Natural

No.	Percobaan	Satuan	1	2
1.	Volume container (A)	cm ³	2002	2002
2.	Berat container (B)	gr	787	787
3.	Berat sampel dan container (C)	gr	3732	3639
4.	Berat sampel (D=C-B)	gr	2945	2852
5.	Berat isi (E=D/A)	cm ³ /gr	1,47	1,42
6.	Selisih			0,05
7.	Rata-rata (F)			1,45
8.	Berat Jenis (G)			2,53
9.	Persentase volume padat (H=(F/G)x100%)			57,24

Penelitian ini menemukan bahwa persentase volume padatan agregat buatan adalah 42,18%, lebih rendah dibandingkan dengan agregat alami yang memiliki persentase volume padatan sebesar 57,24%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat buatan memiliki lebih banyak ruang kosong atau porositas yang lebih tinggi sebesar 15,06% dibandingkan agregat alami. Temuan ini selaras dengan penelitian terdahulu yang menemukan bahwa persentase volume padatan agregat geopolimer *fly ash* berkisar antara 45% hingga 50% (Malkawi et al., 2016), serta penelitian lainnya melaporkan persentase volume padatan agregat geopolimer *fly ash* dan *silica fume* berkisar antara 48% hingga 52% (Rajani et al., 2017). Hasil penelitian ini konsisten terhadap penelitian sebelumnya, menunjukkan bahwa agregat geopolimer memiliki persentase volume padatan yang lebih rendah daripada agregat alami.

4.2.4.3 Hasil Pengujian Analisis Saringan

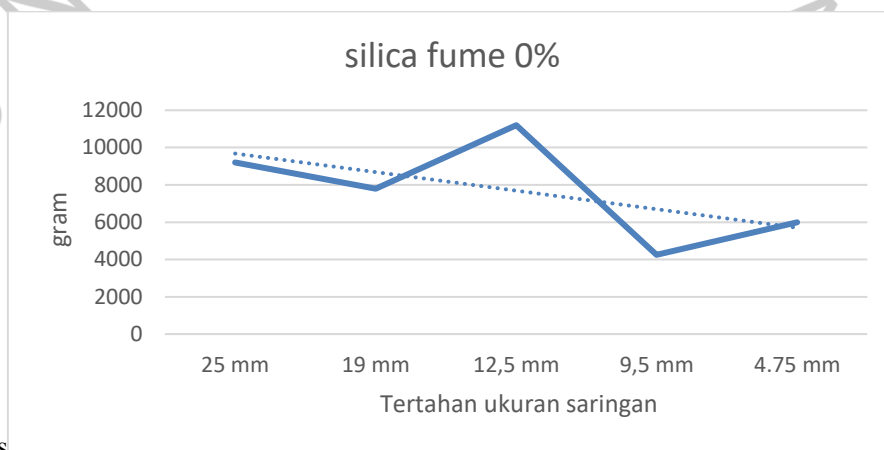
Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengklasifikasikan *artificial aggregate* yang dibuat menggunakan metode *pelletized*, meskipun ukuran agregat yang dihasilkan tidak seragam. Oleh karena itu, analisis saringan dilakukan untuk mengelompokkan ukuran agregat kasar tersebut sesuai dengan gradasi untuk pengeujian *los*

angeles dengan jenis gradasi A. Gradasi A dipilih karena mayoritas ukuran agregat kasar yang dibuat, yaitu sebesar 90 kg, memenuhi syarat untuk tiga kali uji *los angeles* dalam ukuran gradasi A. Ini memaksimalkan jumlah agregat kasar yang digunakan dalam pengujian. Syarat gradasi A adalah tertahan di saringan yang berukuran 37.5 mm, 12.5 mm, 25 mm, serta 19 mm.

Tabel 4. 20 Hasil Pengujian Analisis saringan

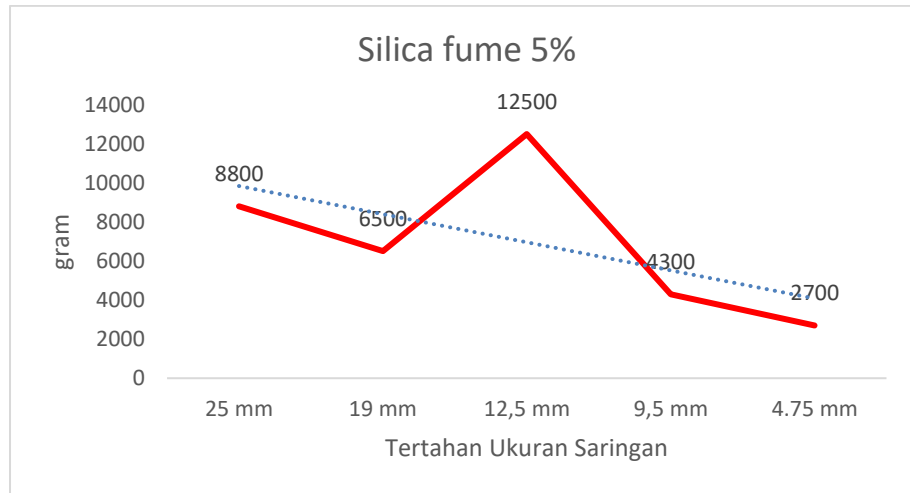
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)						
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	B	C	D	E	F	G
mm	inch	mm	inch							
75	3.0	63	2 ½	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	2 ½	50	2.0	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	2.0	37.5	1 ½	-	-	-	-	2500 ± 50	5000 ± 50	-
37.5	1 1/2	25	1	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 10
25	1	19	¾	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 10
19	¾	12.5	½	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12.5	½	9.5	¾	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
9.5	¾	6.3	¼	-	-	2500 ± 10	-	-	-	-
6.3	¼	4.75	No. 4	-	-	2500 ± 10	2500 ± 10	-	-	-
4.75	No. 4	2.36	No. 8	-	-	-	2500 ± 10	-	-	-
Total				5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	10000 ± 10	10000 ± 10	10000 ± 10
Jumlah bola				12	11	8	6	12	12	12
Berat bola (gram)				5000 ± 25	4584 ± 25	3330 ± 20	5000 ± 25	5000 ± 25	5000 ± 25	5000 ± 25

Ukuran Saringan				Berat Benda Uji (gram)		
Lolos Saringan		Tertahan Saringan		Silica fume 0%	Silica fume 5%	Abu Sekam Padi 10%
mm	inch	mm	inch			
37,5	1 1/2	25	1	9200 gr	8800 gr	4600 gr
25	1	19	3/4	7800 gr	6500 gr	8850 gr
19	3/4	12,5	1/2	11200 gr	12500 gr	14500 gr
12,5	1/2	9,5	3/8	4250 gr	4300 gr	7500 gr
9,5	3/8	4.75	No.4	6000 gr	2700 gr	9350 gr



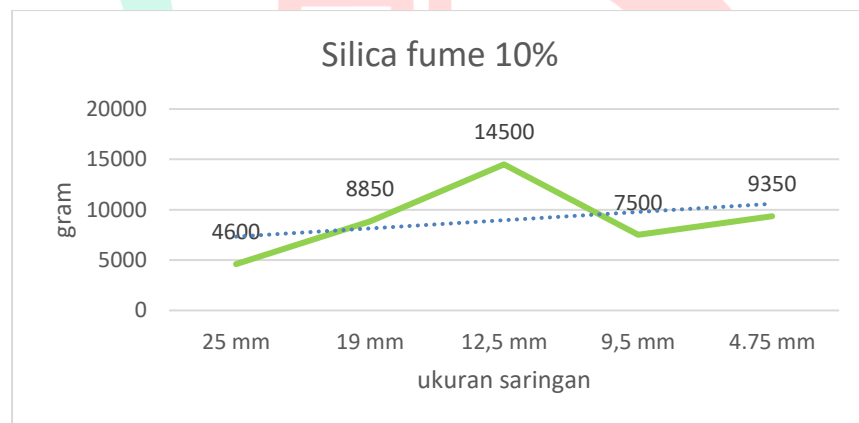
Gambar 4. 10 Grafik Analisis Saringan Variable 0%

Dari grafik di atas dapat dilihat produksi paling banyak tertahan pada ukuran 12,5 mm atau saringan nomor 1/2 sebanyak 11,2 kg dan paling sedikit tertahan pada ukuran 9,5 mm atau tertahan pada saringan nomor 3/8 sebanyak 4,25 kg.



Gambar 4. 11 Grafik Analisis Saringan Variable 5%

Dari grafik di atas dapat dilihat produksi paling banyak tertahan pada ukuran 12,5 mm atau saringan nomor 1/2 sebanyak 12,5 kg dan paling sedikit tertahan pada ukuran 4,75 mm sebanyak 2,7 kg.

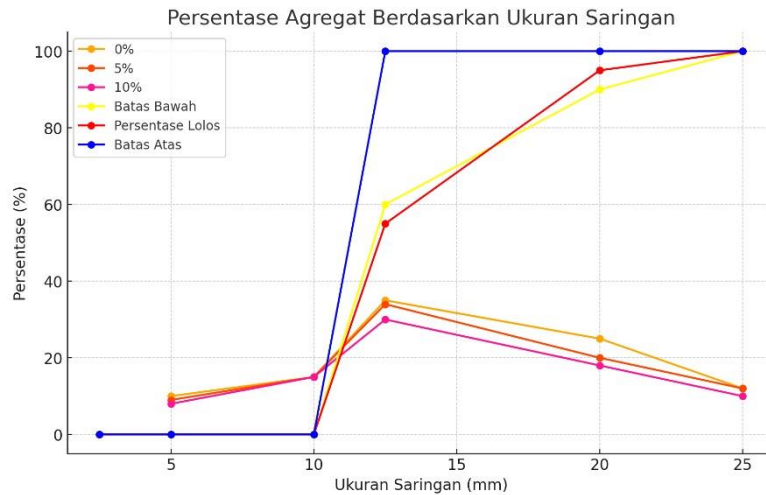


Gambar 4. 12 Grafik Analisis Saringan Variable 10%

Dari grafik di atas dapat dilihat produksi paling banyak tertahan pada ukuran 12,5 mm atau saringan nomor 1/2 sebanyak 14,5 kg dan paling sedikit tertahan pada ukuran 25 mm atau tertahan pada saringan nomor 1 sebanyak 4,6 kg.

Pengujian analisis saringan pada artificial aggregate menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir agregat yang dihasilkan menggunakan metode pelletized tidak seragam, sehingga perlu dilakukan pengelompokan sesuai dengan gradasi untuk pengujian

Los Angeles dengan jenis gradasi A. Berdasarkan hasil analisis saringan, produksi agregat buatan yang paling banyak tertahan adalah pada saringan nomor ½ (12,5 mm).



Gambar 4.13 Hasil Pengujian saringan agregat kasar buatan dan natural

Pada grafik tersebut, dapat dilihat bahwa pada ukuran saringan kecil (0-5 mm), persentase agregat yang lolos cenderung sangat rendah, berada dalam kisaran 0-20%. Ketika ukuran saringan mencapai sekitar 10 mm, terjadi peningkatan tajam pada batas atas (ditunjukkan dengan garis biru) yang mencapai 100%, sementara batas bawah, serta campuran 0%, 5%, dan 10% juga mengalami peningkatan, meskipun dengan laju yang lebih lambat. Selanjutnya, pada ukuran saringan sekitar 15-25 mm, persentase agregat yang lolos mulai menurun pada campuran 0%, 5%, dan 10%, sementara batas atas tetap konstan di angka 100%. Kesimpulannya, grafik ini menunjukkan bagaimana ukuran saringan mempengaruhi persentase agregat yang lolos pada berbagai campuran. Ukuran saringan yang lebih besar cenderung mengizinkan lebih banyak agregat untuk lolos hingga mencapai ukuran tertentu (10 mm), setelah itu jumlah agregat yang lolos mulai berkurang pada campuran yang berbeda. Batas atas yang tetap konstan pada ukuran tertentu menunjukkan adanya batas maksimum agregat yang bisa lolos pada ukuran saringan tertentu.

4.2.4.4 Hasil Pengujian Los Angeles

Uji *los angeles* bertujuan untuk mengetahui tingkat kehancuran *artificial aggregate* dengan mengadukan bola baja dalam wadah yang berputar pada kecepatan 45 – 55 rpm selama 500 putaran dengan gradasi A. Uji *Los Angeles* ini mengukur kekuatan abrasi untuk menentukan kelayakan agregat kasar sesuai pedoman SNI 2147-2008. Standar ini membantu mengklasifikasikan apakah *artificial aggregate* dianggap baik atau buruk untuk digunakan dalam konstruksi.

Pengujian *Los Angeles* yang dilakukan pada *artificial aggregate* yang terbuat dari fly ash, pasir, dan tanpa tambahan silica fume 0% menghasilkan rata-rata keausan sebesar 26,85% dari total 3 sampel menggunakan ukuran gradasi A pada analisis saringan. Berikut adalah tabel hasil pengujian *Los Angeles* untuk *artificial aggregate* dengan variabel silica fume 0%.

Tabel 4. 21 Hasil uji los angeles alwa 0% *silica fume fly ash* kelas F (penjelasan)
 Ukuran saringan Gradasi dan berat benda uji (gram)

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)			
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	Sample I	Sample II	Sample III
mm	inch	mm	inch				
75	3.0	63	2 ½	-	-	-	-
63	2 ½	50	2.0	-	-	-	-
50	2.0	37.5	1 ½	-	-	-	-
37.5	1 1/2	25	1	1250 ± 25	1250 ± 8	1250 ± 11	1250 ± 0
25	1	19	¾	1250 ± 25	1250 ± 7	1250 ± 9	1250 ± 4
19	¾	12.5	½	1250 ± 10	1250 ± 6	1250 ± 10	1250 ± 6
12.5	½	9.5	3/8	1250 ± 10	1250 ± 3	1250 ± 8	1250 ± 2
9.5	3/8	6.3	¼	-	-	-	-
6.3	¼	4.75	No. 4	-	-	-	-
4.75	No. 4	2.36	No. 8	-	-	-	-
Total				5000 ± 70	5000 ± 24	5000 ± 38	5000 ± 12
Jumlah bola				12	12	12	12
Berat bola (gram)				5000 ± 25	5000 ± 25	5000 ± 25	5000 ± 25
Jumlah tertahan saringan no.12					3908	3528	3590
Keausan = $\frac{a-b}{a} \times 100\%$					22,21%	29,97%	28,37%
Rata-rata keausan (%)						26,85%	

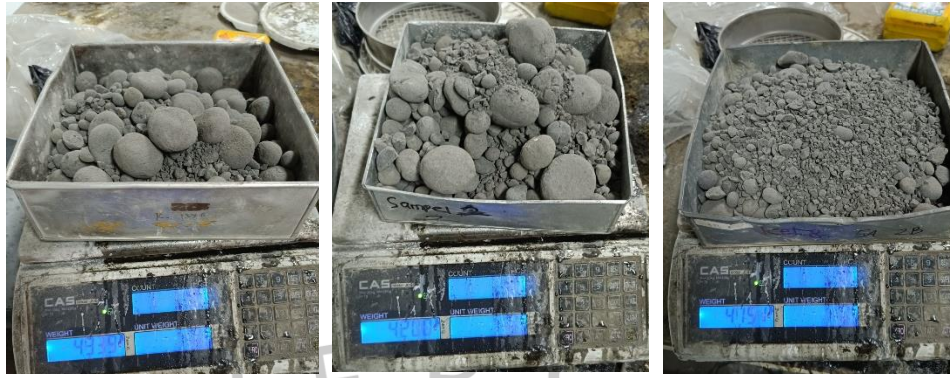


Gambar 4. 14 Hasil Pengujian Los Angeles variable 0%

Pengujian *Los Angeles* yang dilakukan pada *artificial aggregate* yang terbuat dari fly ash, pasir, dan tanpa tambahan silica fume 5% menghasilkan rata-rata keausan sebesar 15,94% dari total 3 sampel menggunakan ukuran gradasi A pada analisis saringan. Berikut adalah tabel hasil pengujian *Los Angeles* untuk *artificial aggregate* dengan variabel silica fume 5%.

Tabel 4. 22 Hasil uji los angeles alwa 5% *silica fume fly ash* kelas F (penjelasan)

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)			
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	Sample I	Sample II	Sample III
mm	inch	mm	inch				
75	3.0	63	2 ½	-	-	-	-
63	2 ½	50	2.0	-	-	-	-
50	2.0	37.5	1 ½	-	-	-	-
37.5	1 1/2	25	1	1250	1250	1250	1250
				± 25	± 19	± 12	± 15
25	1	19	¾	1250	1250	1250	1250
				± 25	± 7	± 3	± 8
19	¾	12.5	½	1250	1250	1250	1250
				± 10	± 4	± 5	± 3
12.5	½	9.5	3/8	1250	1250	1250	1250
				± 10	± 8	± 7	± 6
9.5	3/8	6.3	¼	-	-	-	-
6.3	¼	4.75	No. 4	-	-	-	-
4.75	No. 4	2.36	No. 8	-	-	-	-
Total				5000	5000 ± 38	5000	5000
				± 70	± 25	± 27	± 32
Jumlah bola				12	12	12	12
Berat bola (gram)				5000	5000	5000	5000
				± 25	± 25	± 25	± 25
Jumlah tertahan saringan no.12				4339	4200	4151	
Keausan = $\frac{a - b}{a} \times 100\%$					13,87%	16,45%	17,51%
Rata-rata keausan (%)					15,94%		



Gambar 4. 15 Hasil Pengujian Los Angeles variable 5%

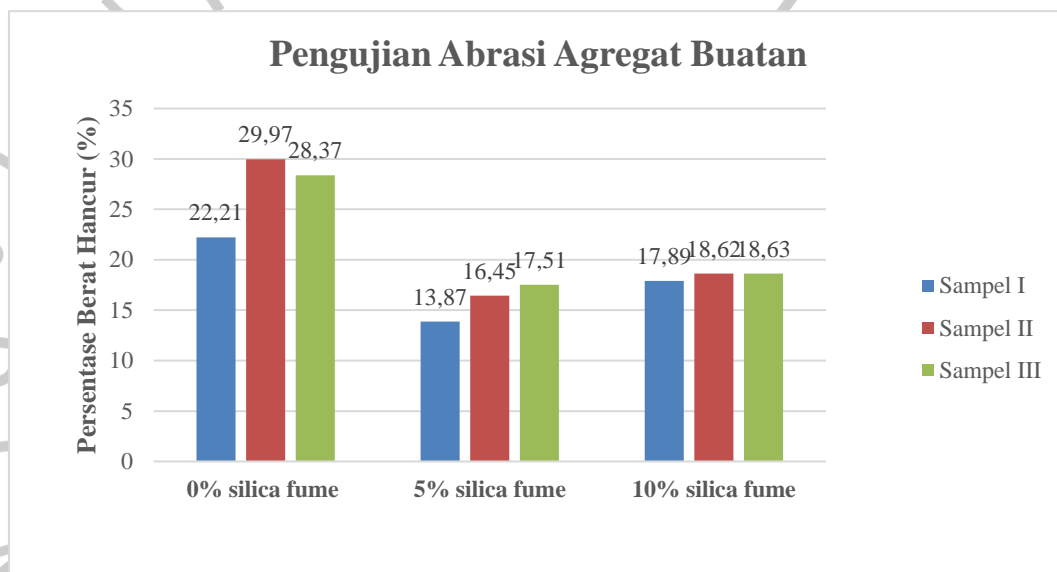
Pengujian *Los Angeles* yang dilakukan pada *artificial aggregate* yang terbuat dari fly ash, pasir, dan tanpa tambahan silica fume 10% menghasilkan rata-rata keausan sebesar 18,38% dari total 3 sampel menggunakan ukuran gradasi A pada analisis saringan. Berikut adalah tabel hasil pengujian *Los Angeles* untuk *artificial aggregate* dengan variabel silica fume 10%.

Tabel 4. 23 Hasil uji los angeles alwa 10% *silica fume fly ash* kelas F (penjelasan)

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)			
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	Sample	Sample	Sample
mm	inch	mm	inch		I	II	III
75	3.0	63	2 ½	-	-	-	-
63	2 ½	50	2.0	-	-	-	-
50	2.0	37.5	1 ½	-	-	-	-
37.5	1	25	1	1250	1250	1250	1250
	1/2			± 25	± 0	± 3	± 6
25	1	19	¾	1250	1250	1250	1250
				± 25	± 7	± 5	± 1
19	¾	12.5	½	1250	1250	1250	1250
				± 10	± 10	± 2	± 0
12.5	½	9.5	3/8	1250	1250	1250	1250
				± 10	± 7	± 0	± 7
9.5	3/8	6.3	¼	-	-	-	-
6.3	¼	4.75	No. 4	-	-	-	-
4.75	No. 4	2.36	No. 8	-	-	-	-
Total				5000	5000 ±	5000	5000
				± 70	24	± 10	± 14
Jumlah bola				12	12	12	12
Berat bola (gram)				5000	5000	5000	5000
				± 25	± 25	± 25	± 25
Jumlah tertahan saringan no.12				4125	4077	4080	
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				17,89%	18,62%	18,63%	
Rata-rata keausan (%)				18,38%			



Gambar 4. 16 Hasil Pengujian Los Angeles variable 10%



Gambar 4. 17 Grafik Pengujian Abrasi Agregat Buatan

Grafik di atas menunjukkan hasil pengujian abrasi agregat buatan dengan variasi kandungan silica fume (0%, 5%, dan 10%) untuk tiga sampel berbeda (Sampel I, II, dan III). Persentase berat hancur setelah abrasi tertera pada sumbu Y, dengan Sampel I, II, dan III ditampilkan masing-masing dalam warna biru, oranye, dan abu-abu. Hasil menunjukkan bahwa penambahan silica fume mengurangi persentase berat hancur, menunjukkan peningkatan ketahanan abrasi agregat. Sampel II mengalami penurunan paling signifikan dalam berat hancur, diikuti oleh Sampel I dan Sampel III.

Tabel 4. 24 Hasil Pengujian Agregat Kasar

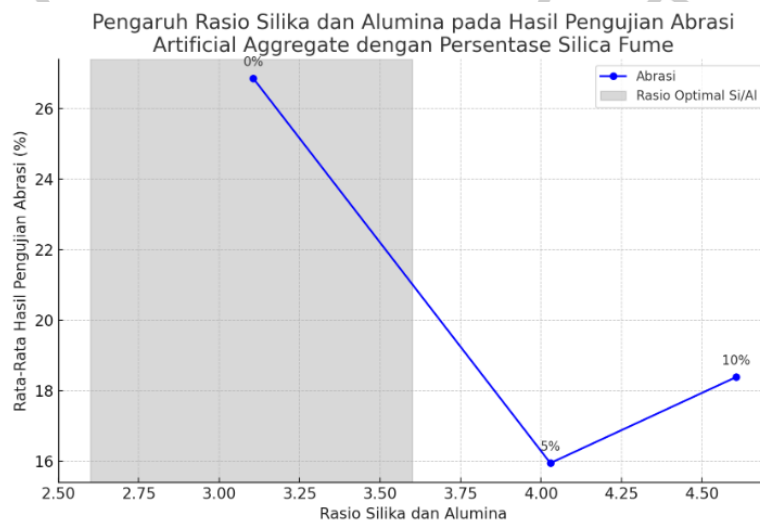
Ukuran saringan (mm)		Sampel I	Sampel II
Lolos	Tertahan	Berat (gr)	Berat (gr)
76,2	63,5	0	0
63,5	50,8	0	0
50,8	36,1	0	0
36,1	25,4	0	0
25,4	19,1	0	0
19,1	12,7	2500	2500
12,7	9,52	2500	2500
9,52	6,35	0	0
6,35	4,75	0	0
4,75	2,36	0	0
Jumlah Putaran		500	500
Jumlah Bola Baja		11	11
Jumlah Berat (gram) (a)		5000	5000
Berat tertahan saringan no 12 sesudah percobaan (gram) (b)		3985	4123
Keausan (%) = $\frac{a-b}{a} \times 100 \%$		20,3	17,54
Selisih sampel I & II		2,76	
Rata-rata Keausan (%)		18,92	

Penelitian ini meneliti keausan *artificial aggregate* yang terbuat dari *fly ash*, pasir, dan *silica fume* dengan variasi kandungan *silica fume* (0%, 5%, dan 10%). Hasil penelitian ini menunjukkan rata-rata keausan *artificial aggregate* dengan 0% *silica fume* adalah 26,85%, 5% *silica fume* adalah 15,94%, dan 10% *silica fume* adalah 18,38%. Rata-rata keseluruhan keausan agregat adalah 18,92%.

Hasil penelitian ini sesuai terhadap penelitian sebelumnya yang menjelaskan bahwa keausan agregat geopolimer berkisar antara 12% hingga 22% (Malkawi et al, 2016 dan Rajani et al., 2017). Temuan ini menunjukkan bahwa *artificial aggregate* memiliki keausan yang sebanding dengan agregat alami. Penambahan *silica fume* pada *artificial aggregate* menunjukkan efek positif dalam menurunkan keausan agregat. *Artificial aggregate* dengan kandungan *silica fume* 5% memiliki keausan

terendah (15,94%). Hal ini menunjukkan bahwa *silica fume* dapat meningkatkan ketahanan agregat terhadap keausan.

Berdasarkan hasil penelitian ini, *artificial aggregate* yang terbuat dari *fly ash*, pasir, dan *silica fume* dapat dijadikan alternatif agregat alami yang menjanjikan dalam konstruksi. Penambahan *silica fume* dapat meningkatkan ketahanan agregat terhadap keausan dan memenuhi standar mutu yang ditetapkan.



Gambar 4. 18 Grafik rasio silika dan alumina pada hasil pengujian abrasi artificial aggregate dengan tambahan persentase silica fume

Pada pengujian kali ini diketahui bahwa semua jenis artificial aggregate yang diuji memenuhi ketentuan SNI 2417-2008 dengan batas keausan agregat di bawah 40%, sehingga layak digunakan untuk konstruksi. Dari segi ketahanan keausan, artificial aggregate dengan 5% silica fume menunjukkan performa terbaik, bahkan lebih baik daripada agregat alami.

Grafik di atas menunjukkan pengaruh rasio silika dan alumina pada hasil pengujian abrasi artificial aggregate dengan penambahan persentase silica fume. Dari grafik, terlihat bahwa rasio silika dan alumina yang optimal berada dalam rentang 2,6 hingga 3,6, yang diwakili oleh area berbayang. Pada variabel tanpa penambahan *silica fume* (0%), rasio silika

dan alumina adalah 3,106, dengan hasil abrasi sebesar 26,85%. Penambahan 5% silica fume menurunkan rasio menjadi 4,029 dan hasil abrasi menurun signifikan menjadi 15,94%, yang merupakan hasil terbaik dalam uji ini. Namun, penambahan 10% silica fume meningkatkan rasio menjadi 4,607 dengan hasil abrasi meningkat menjadi 18,38%.

Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan silica fume hingga 5% memberikan hasil abrasi terbaik dengan rasio silika dan alumina mendekati rentang optimal. Penambahan silica fume lebih dari 5% meningkatkan rasio silika dan alumina, yang pada gilirannya meningkatkan keausan agregat.

Tabel 4. 26 Uji Reliabilitas

Reliability Statistics	
Cronbach's Alpha	N of Items
.713	3

Tabel 4. 27 Uji Validitas

Item-Total Statistics				
	Scale Mean if Item Deleted	Scale Variance if Item Deleted	Corrected Item-Total Correlation	Cronbach's Alpha if Item Deleted
VARIABEL0%	34.6933	7.641	.824	.473
VARIABEL5%	45.2300	20.370	.796	.334
VARIABEL10%	43.1633	37.711	.999	.810

Uji reliabilitas dilakukan untuk memastikan konsistensi internal instrumen yang dipakai pada penelitian ini, yang memakai Cronbach's Alpha sebagai ukuran reliabilitas. Dalam tabel "Reliability Statistics", nilai Cronbach's Alpha tercatat sejumlah 0,713, yang menunjukkan bahwa instrumen tersebut memiliki reliabilitas yang baik. Biasanya, nilai Cronbach's Alpha di atas 0.7 dikatakan bisa diterima, sehingga nilai ini menunjukkan konsistensi yang memadai dalam instrumen yang digunakan.

Selanjutnya, uji validitas dilaksanakan guna melakukan pengukuran seberapa jauh item-item dalam instrumen tersebut mengukur konstruk yang dimaksud. Dalam tabel "Item-Total Statistics", kolom "Corrected Item-Total Correlation" menjelaskan korelasi dari masing-masing item dengan

total skala. Nilai ini menunjukkan seberapa baik setiap item berkorelasi dengan skor total skala. Untuk VARIABEL0%, nilai korelasi adalah 0.824; untuk VARIABEL5% adalah 0.796; dan untuk VARIABEL10% adalah 0.999. Semua nilai ini cukup tinggi, menunjukkan bahwa setiap item memiliki validitas yang baik dalam mengukur konstruk yang dimaksud.

Hasil uji reliabilitas dan validitas menunjukkan bahwa geopolymer yang digunakan dalam penelitian ini valid dan dapat diandalkan. Meskipun terdapat indikasi bahwa VARIABEL10% memiliki dampak yang cukup besar terhadap reliabilitas total skala, nilai reliabilitas awal sudah cukup baik dan dapat diterima untuk penelitian lebih lanjut.

Uji abrasi agregat kasar merupakan tahapan penting dalam evaluasi mutu beton, menunjukkan ketahanan agregat terhadap keausan dan gesekan, yang mempengaruhi kekuatan dan ketahanan beton. Penelitian terdahulu menunjukkan hubungan positif antara hasil abrasi dan kuat tekan beton, namun tidak selalu linier dan dipengaruhi faktor lain seperti gradasi agregat, rasio air-semen, metode curing, dan jenis semen (Haryadi, 2017). Agregat kasar dengan hasil abrasi rendah umumnya menghasilkan beton dengan kuat tekan yang lebih tinggi.

Tabel 4. 28 Analisis ANOVA

ANOVA ^a					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1. Regression	50.000	2	25.000	.	. ^b
Residual	.000	0	.		
Total	50.000	2			
a. Dependent Variable: Kandungan					
b. Predictors: (Constant), Sampel3, Sampel1					

Tabel 4. 29 Analisis Regresi

Coefficients ^a						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	12.323	.000		.	.
	Sampel1	.017	.000	1.456	.	.
	Sampel3	-.018	.000	-2.151	.	.

a. Dependent Variable: Kandungan

Tabel di atas menunjukkan hasil regresi linier untuk variabel "Kandungan". Model ini memiliki nilai intercept 12.323, yang berarti nilai "Kandungan" ketika semua variabel independen bernilai nol. Koefisien "Sampel1" sebesar 0.017 menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu unit pada "Sampel1" akan meningkatkan "Kandungan" sebesar 0.017 unit. Sebaliknya, koefisien "Sampel3" sebesar -0.018 menunjukkan bahwa setiap peningkatan satu unit pada "Sampel3" akan menurunkan "Kandungan" sebesar 0.018 unit. Standard Error menunjukkan variabilitas dari koefisien, dengan nilai lebih kecil menunjukkan estimasi yang lebih akurat. Koefisien standar (Beta) menunjukkan pengaruh variabel independen yang telah di-standardisasi, di mana "Sampel1" memiliki pengaruh positif (Beta 1.456) dan "Sampel3" memiliki pengaruh negatif (Beta -2.151) terhadap "Kandungan". Namun, karena nilai t dan signifikansi tidak diberikan, kita tidak dapat menilai apakah pengaruh ini signifikan secara statistik.