



OPTIMASI KOMPOSISI *SILICA FUME* DALAM MENINGKATKAN MUTU BETON AGREGAT DAUR ULANG

Midia Rahma^{1*}, Mahdika Putra Nanda², Arif Afrianto³ dan Mega Kurniawati⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Kota Serang

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Wiralodra, Indramayu

³Program Studi Teknik Sipil, Universitas Merdeka Madiun, Kota Madiun

⁴Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Palangka Raya, Kota Palangka Raya

*midia91@gmail.com

ABSTRACT

The use of recycled aggregates and silica fumes in concrete production has received significant attention in recent years due to their potential to reduce waste and improve the sustainability of construction materials. This study aims to investigate the effect of recycled aggregates and silica fume on the compressive strength of concrete at different ages. This study used a combination of recycled aggregate and silica fume in the production of concrete. The compressive strength of concrete was tested at 7, 14, 21, and 28 days of age. The results were compared to determine the effect of additives on the compressive strength of concrete. The results showed that the compressive strength of concrete with recycled aggregate increased with age, with values of 11.32 MPa, 17.55 MPa, 19.25 MPa, and 21.70 MPa at 7, 14, 21, and 28 days of age, respectively. The addition of silica fume also increased the compressive strength of the concrete, with the highest strength achieved at 12% silica fume content. The compressive strength values at 7, 14, 21, and 28 days of age were 15.66 MPa, 20.19 MPa, 22.65 MPa, and 23.97 MPa, respectively, based on which the use of recycled aggregate and silica fume can increase the compressive strength of concrete, making it suitable for use in construction projects.

Keywords: Recycled aggregate, silica fume, compressive strength, concrete

ABSTRAK

Penggunaan agregat daur ulang dan silica fume dalam produksi beton telah menjadi perhatian signifikan dalam beberapa tahun terakhir karena potensi mereka untuk mengurangi limbah dan meningkatkan keberlanjutan bahan konstruksi. Studi ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh agregat daur ulang dan silica fume terhadap kekuatan tekan beton pada usia yang berbeda. Studi ini menggunakan kombinasi agregat daur ulang dan silica fume dalam produksi beton. Kekuatan tekan beton diuji pada usia 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasilnya dibandingkan untuk menentukan pengaruh aditif terhadap kekuatan tekan beton. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan tekan beton dengan agregat daur ulang meningkat dengan usia, dengan nilai 11,32 MPa, 17,55 MPa, 19,25 MPa, dan 21,70 MPa pada usia 7, 14, 21, dan 28 hari, respectively. Penambahan silica fume juga meningkatkan kekuatan tekan beton, dengan kekuatan tertinggi dicapai pada kandungan silica fume 12%. Nilai kekuatan tekan pada usia 7, 14, 21, dan 28 hari adalah 15,66 MPa, 20,19 MPa, 22,65 MPa, dan 23,97 MPa, berdasarkan hal itu penggunaan agregat daur ulang dan silica fume dapat meningkatkan kekuatan tekan beton, membuatnya sesuai untuk digunakan dalam proyek konstruksi.

Kata kunci: Agregat daur ulang, *silica fume*, kekuatan tekan, beton

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri konstruksi yang pesat telah mengakibatkan peningkatan permintaan beton sebagai material utama dalam pembangunan infrastruktur. Namun, produksi beton konvensional memiliki dampak lingkungan yang signifikan, terutama dalam hal ekstraksi agregat alami dan

pembuangan limbah konstruksi. Sebagai respon terhadap masalah ini, penggunaan agregat daur ulang dalam produksi beton telah menjadi fokus penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Agregat daur ulang, yang berasal dari pemrosesan limbah beton, menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengurangi eksploitasi sumber daya alam dan meminimalkan pembuangan limbah konstruksi ke tempat pembuangan akhir [1, 2]. Beton yang berasal dari bahan daur ulang (*Recycle*) akan mengalami penurunan kualitas. Hal ini disebabkan oleh kandungan mortar yang mengakibatkan porositas lebih besar. Semakin besar porositasnya maka kuat tekannya semakin kecil, sebaliknya semakin kecil porositas maka kuat tekannya semakin besar. Porositas sendiri dipengaruhi oleh faktor air semen (FAS) semakin tinggi faktor air semen maka porositasnya juga semakin besar. Tetapi faktor air semen semakin kecil maka porositasnya juga semakin kecil

Meskipun penggunaan agregat daur ulang dalam beton memiliki potensi besar, terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi. Salah satu masalah utama adalah kualitas beton yang dihasilkan, terutama dalam hal kekuatan tekan dan durabilitas. Agregat daur ulang cenderung memiliki porositas yang lebih tinggi dan kekuatan yang lebih rendah dibandingkan dengan agregat alami, yang dapat berdampak negatif pada performa beton[3], Untuk mengurangi porositas semen dapat digunakan bahan tambah (additive) yang bersifat mineral yang lebih banyak bersifat penyemenan dan banyak digunakan untuk memperbaiki kinerja kekuatan beton. Salah satu additive tersebut adalah Silica Fume. Penambahan silica fume pada beton agregat daur ulang dapat meningkatkan kekuatan tekan hingga 25% dibandingkan dengan beton agregat daur ulang tanpa silica fume. Namun, efektivitas silica fume dalam meningkatkan mutu beton agregat daur ulang sangat bergantung pada komposisi dan proporsi yang tepat [4]. Optimasi komposisi silica fume menjadi kunci untuk memaksimalkan manfaatnya dalam meningkatkan performa beton agregat daur ulang. Sejalan dengan hal itu bahwasanya penambahan silica fume dapat meningkatkan durabilitas beton agregat daur ulang dengan persentase 15% dapat meningkatkan resistensi beton agregat daur ulang terhadap serangan sulfat sebesar 50% [5]. Namun, masih banyak lagi penelitian yang diperlukan untuk mengetahui optimalisasi komposisi silica fume dalam meningkatkan mutu beton agregat daur ulang. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hasil daur ulang limbah beton menjadi pengganti agregat kasar dan agregat halus dengan bahan tambah *Silica Fume*.

2. METODE PENELITIAN

Benda uji dengan bahan agregat daur ulang beton memiliki rencana mutu beton $f'c$ 25 MPa. Pada pelaksanaan pembuatan beton daur ulang, campuran antara agregat halus, agregat kasar dan semen yang ditambahkan dengan beberapa variasi penambahan Silica Fume yaitu 0%, 3%, 6%, 9%, 12% dari berat semen. Dengan penambahan Silica Fume diharapkan dapat meningkatkan kembali hasil mutu beton daur ulang, karena Silica Fume berfungsi mengecilkan porositas yang tidak bisa dijangkau oleh air semen. Adapun pembuatan beton normal tidak ditambahkan dengan Silica Fume. Pada masa perawatan (*Curing*) benda uji direndam menggunakan air bersih (PDAM) selama 7, 14, 21 dan 28 hari. Pada hari ke 7, 14, 21 dan 28 benda uji tersebut dilakukan pengujian diruang laboratoriaum untuk mengetahui kuat tekan beton tersebut. Setelah mengetahui hasil uji kuat tekan dari kedua jenis benda uji tersebut, maka benda uji dengan agregat daur ulang beton yang ditambahkan dengan beberapa variasi Silica Fume dibandingkan dengan hasil uji beton normal tanpa penambahan *Silica Fume*.

Jumlah Benda Uji Penelitian

benda uji yang dibuat berbentuk silinder dengan diameter 15 x 30 cm beton daur ulang dengan masa perawatan 7, 14, 21 dan 28 hari. Penyusun benda uji beton yaitu :

- SF 0% = Agregat kasar dari daur ulang beton + Agregat halus dari daur ulang beton + semen + Silica Fume 0 %
- SF 3% = Agregat kasar dari daur ulang beton + Agregat halus dari daur ulang beton + semen + Silica Fume 3 %
- SF 6% = Agregat kasar dari daur ulang beton + Agregat halus dari daur ulang beton + semen + Silica Fume 6 %
- SF 9% = Agregat kasar dari daur ulang beton + Agregat halus dari daur ulang beton + semen + Silica Fume 9 %
- SF 12% = Agregat kasar dari daur ulang beton + Agregat halus dari daur ulang beton + semen + Silica Fume 12 %

Tabel 1. Sampel benda uji

Waktu (hari)	Sampel Benda Uji				
	SF 0%	SF 3%	SF 6%	SF 9%	SF 12%
7	3	3	3	3	3
14	3	3	3	3	3
21	3	3	3	3	3
28	3	3	3	3	3
Jumlah	= 60				

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian saringan agregat halus

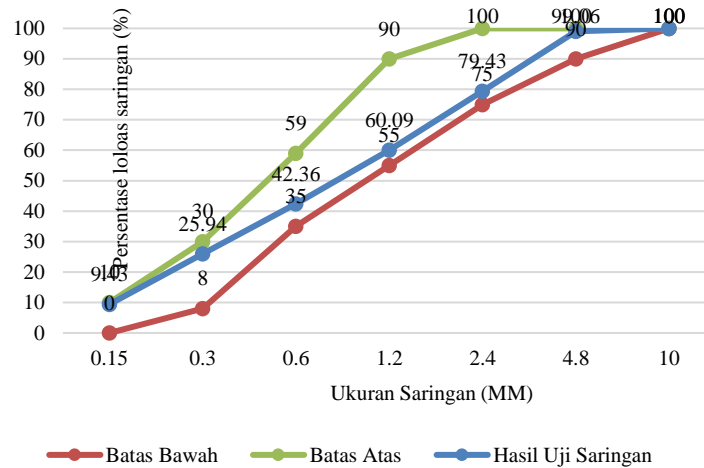
Sebelum proses penyaringan agregat halus, dilakukan pemecahan beton bekas limbah jalan raya pantura secara manual. Limbah beton tersebut ditumbuk hingga halus agar masuk sebagai agregat halus. Sebelum dilakukan proses penyaringan menggunakan mesin, agregat tersebut di ayak terlebih dahulu secara manual untuk memisahkan antara agregat halus dan agregat kasar. Dari pengujian saringan agregat halus dari daur ulang beton didapatkan hasil sebagai berikut.

Tabel 2. Hasil pengujian saringan agregat halus

Saringan	Berat tertahan	Jumlah berat	Jumlah persen (%)
Inc	Mm	(gram)	Tertahan (gram) Tertahan Lewat
(3/8")	10	0	0 0.00 100.00
No.4	4.8	10	10 0.94 99.06
No.8	2.4	208	218 20.57 79.43
No.16	1.2	205	423 39.91 60.09
No.30	0.6	188	611 57.64 42.36
No.50	0.3	174	785 74.06 25.94
No.100	0.15	175	960 90.57 9.43
No.200	0.075	79	1039 98.02 1.98
Pan		21	

Berdasarkan hasil analisis ayakan, distribusi ukuran butiran material yang diuji menunjukkan variasi yang signifikan. Sebagian besar material tertahan pada ayakan dengan ukuran lebih besar, dan semakin sedikit material yang lolos ke ukuran ayakan yang lebih kecil. Pada ayakan no. 4 (4.8 mm), hanya 0.94% dari total berat material yang tertahan, menunjukkan bahwa hanya sebagian kecil material yang lebih besar dari 4.8 mm. Material yang tertahan pada ayakan no. 8 (2.4 mm) meningkat signifikan menjadi 20.57%, mengindikasikan jumlah material yang cukup besar dengan ukuran antara 2.4 mm dan 4.8 mm. Pada ayakan no. 16 (1.2 mm), sebanyak 39.91% dari total berat material tertahan, menunjukkan bahwa sebagian besar material memiliki ukuran antara 1.2 mm dan 2.4 mm. Jumlah material yang tertahan terus meningkat pada ayakan no. 30

(0.6 mm) dengan 57.64%, menunjukkan konsentrasi material dengan ukuran antara 0.6 mm dan 1.2 mm. Pada ayakan no. 50 (0.3 mm), 74.06% dari total berat material tertahan, mengindikasikan mayoritas material berukuran antara 0.3 mm dan 0.6 mm. Sebanyak 90.57% material tertahan pada ayakan no. 100 (0.15 mm), menunjukkan bahwa sebagian besar material yang diuji memiliki ukuran antara 0.15 mm dan 0.3 mm. Pada ayakan no. 200 (0.075 mm), 98.02% dari total berat material tertahan, menunjukkan adanya konsentrasi material yang sangat halus dengan ukuran antara 0.075 mm dan 0.15 mm. Sebanyak 21 gram material lolos dari semua ayakan, menunjukkan bahwa material yang sangat halus berjumlah kecil. Secara keseluruhan, distribusi ukuran butiran menunjukkan bahwa material yang diuji terdiri dari berbagai ukuran partikel, dengan sebagian besar material berada pada kisaran ukuran yang lebih kecil. Berikut adalah grafik persentase lulus saraingannya.



Gambar 1. Grafik analisa saringan agregat halus (daerah II)

Selanjutnya adalah mengetahui modulus halus butir (finnes modulus) agregat halus. Berikut perhitungan untuk mhb agregat halus daur ulang beton.

Tabel 3. Hasil modulus halus butir agregat halus

Aayakan		Berat tertinggal		
Inc	Mm	Agregat halus (gram)	Persen (%)	Kumulatif
No. 4	4.8	10.00	0.94	0.94
No. 8	2.4	208.00	19.62	20.57
No. 16	1.2	205.00	19.34	39.91
No. 30	0.6	188.00	17.74	57.64
No. 50	0.3	174.00	16.42	74.06
No. 100	0.15	175.00	16.51	90.57
Sisa		100	9.43	
Jumlah		1060.00	100.00	283.68
Modulus Halus Butir (MHB)				2.84

Berdasarkan hasil analisis ayakan terhadap agregat halus, distribusi ukuran butiran material menunjukkan variasi yang signifikan. Pada ayakan no. 4 (4.8 mm), terdapat 10 gram agregat halus atau 0.94% dari total berat, yang juga merupakan persentase kumulatif yang sama. Pada ayakan no. 8 (2.4 mm), berat agregat halus yang tertahan mencapai 208 gram atau 19.62%, dengan persentase kumulatif 20.57%. Ayakan no. 16 (1.2 mm) menahan 205 gram agregat halus atau 19.34%, menghasilkan persentase kumulatif 39.91%. Pada ayakan no. 30 (0.6 mm), berat tertahan adalah 188 gram atau 17.74%, dengan persentase kumulatif 57.64%. Ayakan no. 50 (0.3 mm) menahan 174 gram agregat halus atau 16.42%, sehingga persentase kumulatif mencapai 74.06%. Ayakan no. 100 (0.15 mm) menahan 175 gram atau 16.51% agregat halus, dengan persentase

kumulatif 90.57%. Sisa agregat halus sebesar 100 gram atau 9.43% menunjukkan bahwa sejumlah kecil material tertahan dalam ayakan terkecil. Total berat agregat halus yang dianalisis adalah 1060 gram dengan modulus halus butir (mhb) sebesar 2.84.

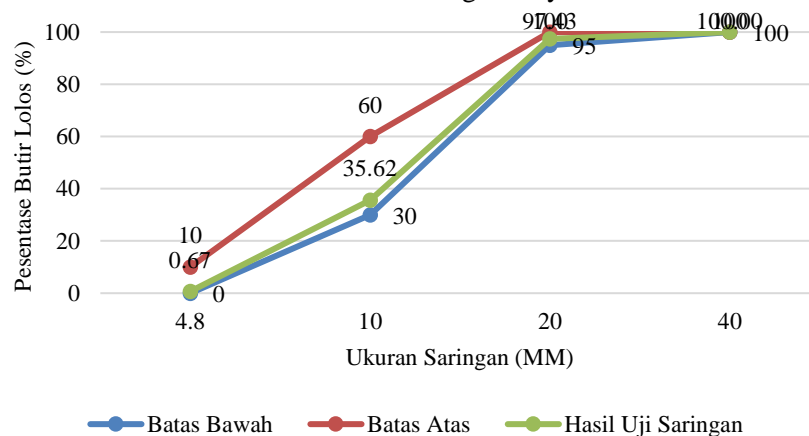
Pengujian saringan agregat kasar

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh distribusi besaran atau jumlah persentase butiran agregat kasar. Butiran agregat kasar yang digunakan pada pengujian ini berasal dari daur ulang beton dan menggunakan butiran maksimum 20 mm. Berikut ini hasil pengujian gradasi agregat kasar.

Tabel 4. Hasil pengujian saringan agregat kasar

Saringan		Berat	Jumlah berat	Jumlah persen (%)	
Inc	Mm	Tertahan (gram)	Tertahan (gram)	Tertahan	Lewat
1 1/2"	38	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19	27.00	27.00	2.57	97.43
3/8"	10	649	676.00	64.38	35.62
No.4	4.8	367	1043.00	99.33	0.67
Pan		7			

Hasil pengujian saringan terhadap agregat kasar menunjukkan distribusi ukuran butiran yang signifikan. Pada saringan dengan ukuran 1 1/2" (38 mm), tidak ada agregat yang tertahan, sehingga 100% agregat lolos. Pada saringan ukuran 3/4" (19 mm), terdapat 27 gram agregat tertahan atau 2.57% dari total berat, dengan 97.43% agregat lolos. Saringan ukuran 3/8" (10 mm) menahan 649 gram agregat, yang merupakan 64.38% dari total berat, dan 35.62% agregat lolos. Pada saringan no. 4 (4.8 mm), berat agregat yang tertahan adalah 367 gram, atau 99.33% dari total berat, meninggalkan hanya 0.67% agregat yang lolos. Sebanyak 7 gram agregat tertahan dalam panci. Secara keseluruhan, distribusi ukuran butiran ini menunjukkan bahwa sebagian besar agregat kasar berada pada kisaran ukuran yang lebih kecil, dengan konsentrasi tertinggi pada saringan ukuran 3/8" dan no. 4. Berikut adalah grafiknya.



Gambar 2. Grafik analisa saringan agregat kasar

Selanjutnya adalah mengetahui modulus halus butir (finnes modulus) agregat kasar daur ulang beton. Berikut perhitungan untuk mhb agregat kasar dari daur ulang beton

Tabel 5. Analisa modulus halus butir agregat kasar

Aayakan		Berat tertinggal		
Inc	Mm	Agregat kasar	Persen	Kumulatif
1 1/2"	38	0.00	0.00	0.00
3/4"	19	27.00	2.59	2.59
3/8"	10	649.00	62.22	64.81

Ayakan		Berat tertinggal		
No. 4	4.8	367.00	35.19	100.00
No. 8	2.4	0.00	0.00	100.00
No. 16	1.2	0.00	0.00	100.00
No. 30	0.6	0.00	0.00	100.00
No. 50	0.3	0.00	0.00	100.00
No. 100	0.15	0.00	0.00	100.00
Sisa		0.00	0.00	-
Jumlah		1043	100	667.40
Modulus halus butir (mhb)				6.7

Pengujian kadar air agregat

hasil pengujian kadar air untuk agregat halus dan kasar daur ulang beton dapat diketahui pada tabel dibawah ini :

Tabel 6. hasil pengujian kadar air agregat halus dan kasar

Nomor contoh dan kedalaman Nomor talam yang dipakai	Pasir beton		Batu pecah	
	A1	A2	B1	B2
1. Berat talam + contoh basah (gr)	80.00	78.00	172.00	169.00
2. Berat talam + contoh kering (gr)	63.00	61.00	162.00	158.00
3. Berat air = 1 - 2 (gr)	17.00	17.00	10.00	11.00
4. berat talam (gr)	9.00	11.00	16.00	16.00
5. Berat contoh kering = 2 - 4 (gr)	54.00	50.00	146.00	142.00
6. Kadar air = 3 : 5 (%)	31.48	34.00	6.85	7.75
Rata-rata (%)	32.74		7.30	

dari tabel diatas diketahui bahwa kadar air rata-rata agregat halus daur ulang beton dari pengujian 2 buah sampel sebesar 32,74%. Sedangkan, kadar air rata-rata agregat kasar daur ulang beton dari pengujian 2 buah sampel sebesar 7,30%.

Pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus

dari pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus daur ulang beton, didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 7. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus

Perhitungan	Notasi	I	Rata-rata
Berat jenis curah dalam air (sd)	$\frac{A}{b + s + c}$	1.79	1.79
Berat jenis curah jenuh kering permukaan (ss)	$\frac{S}{b + s + c}$	2.07	2.07
Berat jenis semu (sa)	$\frac{A}{b + a + c}$	2.51	2.51
Penyerapan air (sw)	$\frac{S - a}{c} \times 100\%$	16.01	16.01

Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus menunjukkan karakteristik fisik material yang diuji. Berdasarkan perhitungan, berat jenis curah dalam air (sd) adalah 1.79, dan nilai rata-ratanya juga 1.79. Berat jenis curah jenuh kering permukaan (ss) tercatat sebesar 2.07, dengan nilai rata-rata yang sama. Berat jenis semu (sa) memiliki nilai 2.51, dengan rata-rata 2.51. Tingkat penyerapan air (sw) untuk agregat halus adalah 16.01%, dengan rata-rata yang juga 16.01%.

Pengujian kehausan agregat kasar

dari pengujian berat jenis dan penyerapan kasar halus daur ulang beton, didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil pengujian berat jenis dan penyerapan agregat kasar

Gradasi pemeriksaan		Jumlah putaran = 500 putaran	
Ukuran saringan		I	II
Lolos	Tertahan	Berat (a)	Berat (a)
76,2 (3")	63,5 (2 1/2")		
63,5 (2 1/2")	50,8 (2")		
50,8 (2")	36,1 (1 1/2")		
36,1 (1 1/2")	25,4 (1")		1250
25,4 (1")	19,1 (3/4")		1250
19,1 (3/4")	12,7 (1/2")	2504	1250
12,7 (1/2")	9,52 (3/8")	2500	1250
9,52 (3/8")	6,35 (1/4")		
6,35 (1/4")	4,75 (no.4)		
4,75 (no.4)	2,36 (no.8)		
Jumlah berat (gram)		5004	5000
Berat tertahan saringan no. 12 sesudah percobaan (b)		3526	3452

Hasil pemeriksaan gradasi dengan 500 putaran menunjukkan distribusi ukuran butiran material yang diuji. Pada dua percobaan yang dilakukan (i dan ii), berat total material yang lolos dan tertahan pada setiap ukuran saringan telah dicatat. Pada ukuran saringan 36,1 mm (1 1/2"), terdapat 1250 gram material yang tertahan pada percobaan i, sedangkan pada percobaan ii, jumlahnya sama. Pada ukuran saringan 19,1 mm (3/4"), tercatat 2504 gram material tertahan pada percobaan i, sedangkan pada percobaan ii, jumlahnya 1250 gram. Pengujian tersebut dapat dicari rata-rata keausan agregat kasar daur ulang beton, yaitu :

$$\text{sampel i} = \frac{a - b}{a} \times 100\% = (5004 - 3526) / 5004 \times 100\% = 29,54 \%$$

$$\text{sampel ii} = \frac{a - b}{a} \times 100\% = (5000 - 3452) / 5000 \times 100\% = 30,96 \%$$

$$\text{rata-rata} = \frac{\text{Sampel I} + \text{Sampel II}}{2} = 30,25\%$$

Jadi, rata-rata keausan agregat kasar daur ulang beton sebesar 30,25%

Perhitungan campuran beton daur ulang (beton normal)

dalam penelitian beton ini tahapan awal yang harus dilakukan yaitu perhitungan campuran bahan-bahan penyusun beton, dalam penelitian direncanakan akan membuat beton daur ulang dengan mutu beton $f'c = 25$ mpa, dan perawatan beton selama 7, 14, 21 dan 28 hari dengan cara direndam di bak penampungan. Dalam perhitungan campuran ini deviasi standar ditetapkan sebesar 7 mp. Air yang digunakan adalah air dari pdam serta menggunakan semen portland tipe i. Agregat halus dan kasar menggunakan material daur ulang beton dengan susunan agregat halus pada daerah ii serta ukuran maksimum agregat kasar 20 mm. Faktor air semen (fas) ditetapkan 0,52 serta nilai slump 75 – 100 mm. Dari perhitungan campuran beton normal pada lampiran 2 didapatkan hasil kebutuhan material per 1 m³ sebagai berikut :

Tabel 9. Kebutuhan material beton per 1 m³

No.	Material beton	Kebutuhan per 1 m ³ (kg)
1.	Pasir daur ulang	914,18
2.	Split daur ulang	965,22
3.	Semen	416,67
4.	Air	83,94

Pengujian kuat tekan digunakan benda uji silinder, maka selanjutnya adalah menghitung kebutuhan bahan untuk 1 benda uji sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{volume} &= \frac{1}{4} \times \pi \times d^2 \times t \\ &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 0,15^2 \times 0,3 \\ \text{volume} &= 0,0053 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Dari perhitungan kebutuhan dan volume diatas, dapat diketahui kebutuhan material beton normal untuk umur beton 7, 14, 21 dan 28 hari, sebagai berikut :

Tabel 10 kebutuhan material penyusun beton daur ulang (beton normal)

No.	Umur beton (hari)	Sampel	Variasi 0% silica fume (kg)				
			Pasir	Split	Semen	Sf	Air
A.	7	3	13.69	13.98	6.63	0.00	1.97
B.	14	3	13.69	13.98	6.63	0.00	1.97
C.	21	3	13.69	13.98	6.63	0.00	1.97
D.	28	3	13.69	13.98	6.63	0.00	1.97
Total		12	54.77	55.94	26.52	0.00	7.88

Hasil perhitungan kebutuhan material untuk penyusunan beton daur ulang (beton normal) menunjukkan bahwa untuk setiap umur beton (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari), komposisi bahan yang dibutuhkan telah dihitung dengan rinci. Total kebutuhan material untuk keseluruhan proyek adalah 54.77 kg pasir, 55.94 kg split, 26.52 kg semen, 0.00 kg silica fume (sf), dan 7.88 liter air. Data ini memberikan gambaran yang jelas tentang jumlah bahan yang diperlukan untuk menghasilkan beton yang memenuhi standar kualitas yang diinginkan pada berbagai tahapan umur beton. jumlah benda uji masing-masing umur beton (7, 14, 21 dan 28 hari) sebanyak 3 benda uji. Kebutuhan material beton adalah perkalian dari kebutuhan material beton (pasir, split, air dan semen) per 1 m³ dikali volume benda uji dikali jumlah benda uji masing-masing umur beton. Jadi, jumlah keseluruhan kebutuhan material beton normal untuk umur beton 7, 14, 21 dan 28 hari yaitu pasir sebanyak 54,77 kg, split 55,94 kg, semen 26,52 kg dan air 7,88 kg.

dari perhitungan kebutuhan material beton keseluruhan, maka untuk mengetahui kebutuhan agregat kasar dan agregat halus dari masing-masing ayakan yaitu seperti pada tabel berikut ini :

Tabel 11. Kebutuhan material agregat halus

Saringan	Persentase	Pasir yang dibutuhkan	Kebutuhan 12 sampel (kg)
No.4	4.8	0.52	6.20
No.8	2.4	10.75	128.97
No.16	1.2	10.59	127.11
No.30	0.6	9.71	116.57
No.50	0.3	8.99	107.89
No.100	0.15	9.04	108.51
No.200	0.075	4.08	48.98
Jumlah		53.69	644.23

sedangkan untuk kebutuhan agregat kasar dari masing-masing ayakan yaitu sebagai berikut:

Tabel 12. Kebutuhan material agregat kasar

Saringan	Persentase	Split yang dibutuhkan	Kebutuhan 12 sampel (kg)
3/4"	19	1.44	17.26
3/8"	10	34.57	414.90
No.4	4.8	19.55	234.62
Jumlah		55.56	666.78

Hasil perhitungan kebutuhan material untuk agregat kasar menunjukkan bahwa total kebutuhan split untuk 12 sampel adalah 666.78 kg. Distribusi berat split pada saringan yang digunakan menunjukkan kontribusi terbesar berasal dari saringan 3/8" (10 mm) dengan persentase 61.81%,

diikuti oleh saringan no. 4 (4.8 mm) dengan 34.95%. Saringan 3/4" (19 mm) memberikan kontribusi yang lebih kecil namun tetap signifikan dengan 2.57%

Perhitungan campuran beton daur ulang dengan *silica fume*

dari perhitungan campuran beton daur ulang dengan variasi penambahan *silica fume* berdasarkan lampiran 3, didapatkan hasil kebutuhan material beton daur ulang campuran *silica fume* sebagai berikut :

Campuran beton daur ulang dengan 3% *silica fume*

dibawah ini merupakan perhitungan campuran beton daur ulang dengan 3% *silica fume*, sebagai berikut:

Tabel 13. Kebutuhan material beton dengan variasi campuran 3% *silica fume*

Umur beton (hari)	Sampel	Variasi 3% <i>silica fume</i> (kg)				
		Pasir	Split	Semen	Sf	Air
7	3	13.49	13.98	6.63	0.199	1.97
14	3	13.49	13.98	6.63	0.199	1.97
21	3	13.49	13.98	6.63	0.199	1.97
28	3	13.49	13.98	6.63	0.199	1.97
Total	12	53.98	55.94	26.52	0.80	7.88

hasil perhitungan kebutuhan material untuk penyusunan beton dengan penambahan 3% *silica fume* menunjukkan bahwa untuk setiap umur beton (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari), komposisi bahan yang dibutuhkan telah dihitung dengan rinci. Total kebutuhan material untuk keseluruhan proyek adalah 53.98 kg pasir, 55.94 kg split, 26.52 kg semen, 0.80 kg *silica fume* (sf), dan 7.88 liter air. Penambahan *silica fume* memiliki efek signifikan terhadap komposisi material, yang mempengaruhi karakteristik fisik dan mekanis beton, seperti kekuatan tekan dan ketahanan terhadap permeabilitas.

Campuran beton daur ulang dengan 6% *silica fume*

dibawah ini merupakan perhitungan campuran beton daur ulang dengan 6% *silica fume*, sebagai berikut:

Tabel 14. Kebutuhan material beton dengan variasi campuran 6% *silica fume*

Umur beton (hari)	Sampel	Variasi 6% <i>silica fume</i> (kg)				
		Pasir	Split	Semen	Sf	Air
7	3	13.30	13.98	6.63	0.398	1.97
14	3	13.30	13.98	6.63	0.398	1.97
21	3	13.30	13.98	6.63	0.398	1.97
28	3	13.30	13.98	6.63	0.398	1.97
Total	12	53.18	55.94	26.52	1.59	7.88

Hasil perhitungan kebutuhan material untuk penyusunan beton dengan penambahan 6% *silica fume* menunjukkan bahwa untuk setiap umur beton (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari), komposisi bahan yang dibutuhkan telah dihitung dengan rinci. Total kebutuhan material untuk keseluruhan proyek adalah 53.18 kg pasir, 55.94 kg split, 26.52 kg semen, 1.59 kg *silica fume* (sf), dan 7.88 liter air. Penambahan *silica fume* dalam proporsi ini dapat meningkatkan sifat-sifat beton, seperti kekuatan tekan dan ketahanan terhadap permeabilitas, serta mengurangi risiko retak mikro

Campuran beton daur ulang dengan 9% *silica fume*

dibawah ini merupakan perhitungan campuran beton daur ulang dengan 9% *silica fume*, sebagai berikut:

Tabel 15. Kebutuhan material beton dengan variasi campuran 9% *silica fume*

No.	Umur Beton (Hari)	Sampel	Variasi 9% Silica Fume (Kg)				
			Pasir	Split	Semen	SF	Air
a.	7	3	13.10	13.98	6.63	0.60	1.97

No.	Umur Beton (Hari)	Sampel	Variasi 9% Silica Fume (Kg)				
			Pasir	Split	Semen	SF	Air
b.	14	3	13.10	13.98	6.63	0.60	1.97
c.	21	3	13.10	13.98	6.63	0.60	1.97
d.	28	3	13.10	13.98	6.63	0.60	1.97
TOTAL		12	52.38	55.94	26.52	2.39	7.88

Hasil perhitungan kebutuhan material untuk penyusunan beton dengan penambahan 9% silica fume menunjukkan bahwa untuk setiap umur beton (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari), komposisi bahan yang dibutuhkan telah dihitung dengan rinci. Total kebutuhan material untuk keseluruhan proyek adalah 52.38 kg pasir, 55.94 kg split, 26.52 kg semen, 2.39 kg silica fume (SF), dan 7.88 liter air.

Campuran beton daur ulang dengan 12% silica fume

Dibawah ini merupakan perhitungan campuran beton daur ulang dengan 12% Silica Fume, sebagai berikut :

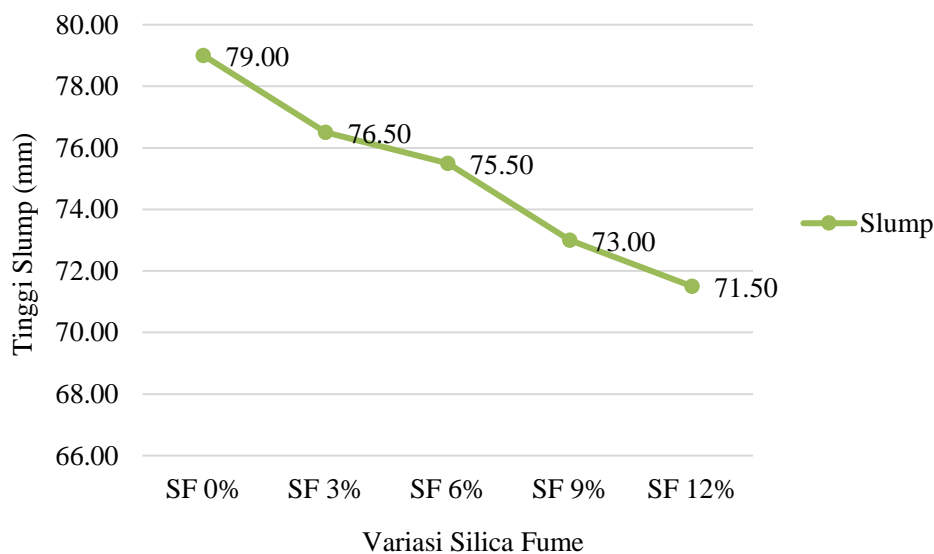
Tabel 16. Kebutuhan material beton dengan variasi campuran 12% silica fume

No.	Umur Beton (Hari)	Sampel	Variasi 12% Silica Fume (Kg)				
			Pasir	Split	Semen	SF	Air
a.	7	3	12.90	13.98	6.63	0.80	1.97
b.	14	3	12.90	13.98	6.63	0.80	1.97
c.	21	3	12.90	13.98	6.63	0.80	1.97
d.	28	3	12.90	13.98	6.63	0.80	1.97
TOTAL		12	51.59	55.94	26.52	3.18	7.88

Hasil perhitungan kebutuhan material untuk penyusunan beton dengan penambahan 12% silica fume menunjukkan bahwa untuk setiap umur beton (7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari), komposisi bahan yang dibutuhkan telah dihitung dengan rinci. Total kebutuhan material untuk keseluruhan proyek adalah 51.59 kg pasir, 55.94 kg split, 26.52 kg semen, 3.18 kg silica fume (SF), dan 7.88 liter air

Hasil uji slump

Pengujian *slump* dilakukan untuk menguji atau menentukan konsistensi atau kekentalan adukan beton. Berikut ini hasil pengujian slump untuk beton daur ulang dan penambahan Silica Fume. Adapun grafik hasil uji *slump* sebagai berikut :

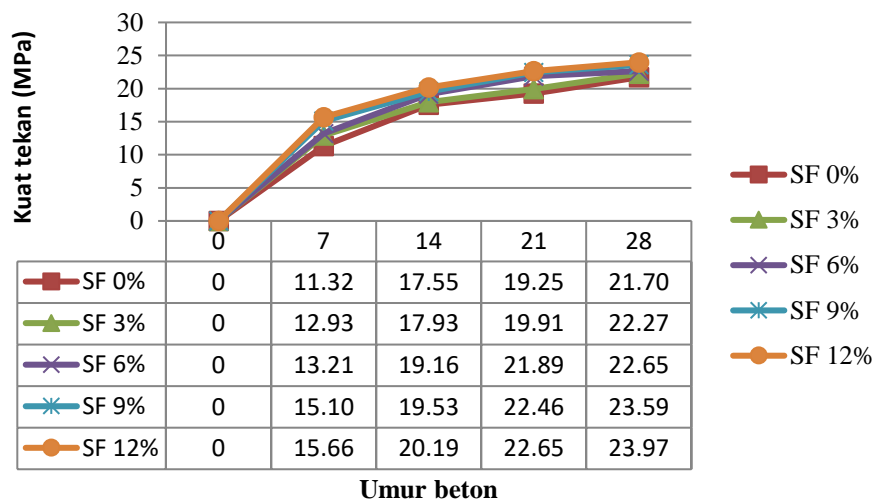


Gambar 3. Grafik Pengujian Slump

Dari grafik diatas diketahui bahwa nilai uji *slump* untuk campuran *silica fume* 0% memiliki nilai *slump* yang lebih besar sebesar 79.00 mm. Adapun untuk campuran *silica fume* 12% memiliki nilai *slump* yang lebih kecil sebesar 71.50 mm. Secara keseluruhan nilai *slump* menurun seiring penambahan *Silica Fume* dan dapat disimpulkan memenuhi atau sesuai dengan perencanaan beton yaitu 70 -100 mm. Semakin banyaknya penambahan *Silica Fume* maka akan semakin turun nilai *slump*nya. Menurut Rizal Imansyah (2000) Hal ini disebabkan kadar air semakin berkurang dan proses pengentalan pasta akan semakin meningkat.

Pengujian Kuat Tekan Beton

Berikut merupakan hasil dan perbandingan grafik pengujian kuat tekan beton pada umur 7 hari, 14, 21 dan 28 hari

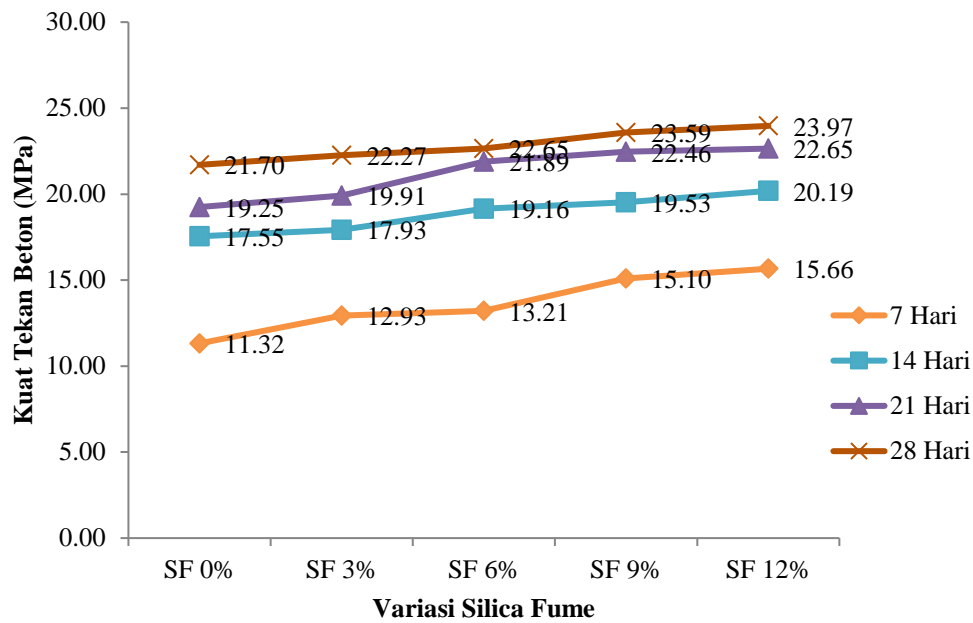


Gambar 4. Kenaikan kekuatan beton pada umur 7 sampai 28 hari

Hasil analisis menunjukkan perkembangan kuat tekan beton daur ulang dengan variasi penambahan Silica Fume dari umur 7 hingga 28 hari. Untuk beton tanpa Silica Fume (SF 0%), kuat tekan meningkat dari 11,32 MPa pada usia 7 hari menjadi 21,70 MPa pada usia 28 hari, menunjukkan peningkatan sebesar 10,38 MPa. Dengan penambahan 3% Silica Fume (SF 3%), kuat tekan awal pada usia 7 hari adalah 12,93 MPa dan meningkat menjadi 22,27 MPa pada usia 28 hari, menghasilkan peningkatan 9,34 MPa. Untuk campuran dengan 6% Silica Fume (SF 6%), kuat tekan meningkat dari 13,21 MPa pada usia 7 hari menjadi 22,65 MPa pada usia 28 hari, dengan peningkatan 9,44 MPa. Pada penambahan 9% Silica Fume (SF 9%), kuat tekan awal 15,10 MPa pada usia 7 hari meningkat menjadi 23,59 MPa pada usia 28 hari, menunjukkan peningkatan 8,49 MPa. Sementara itu, untuk campuran dengan 12% Silica Fume (SF 12%), kuat tekan meningkat dari 15,66 MPa pada usia 7 hari menjadi 23,97 MPa pada usia 28 hari, dengan peningkatan 8,30 MPa. Secara keseluruhan, data menunjukkan tren peningkatan kuat tekan beton daur ulang seiring dengan penambahan Silica Fume. Semakin tinggi persentase Silica Fume yang ditambahkan, semakin tinggi pula kuat tekan beton yang dihasilkan. Namun, perlu dicatat bahwa meskipun terjadi peningkatan, semua variasi campuran tidak mampu mencapai kekuatan target 100% atau 25 MPa pada usia 28 hari.

Analisis Peningkatan Kuat Tekan Beton Daur Ulang Dengan Penambahan Silica Fume

Dari hasil pengujian kuat tekan beton daur ulang, maka dapat dibuat grafik perbandingan kuat tekan beton daur ulang, sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik perbandingan uji kuat tekan beton daur ulang

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kuat tekan beton daur ulang seiring dengan penambahan Silica Fume dan bertambahnya umur beton. Pada usia 7 hari, kuat tekan beton tanpa Silica Fume adalah 11,32 MPa. Penambahan Silica Fume sebesar 3%, 6%, 9%, dan 12% meningkatkan kuat tekan menjadi 12,93 MPa, 13,21 MPa, 15,10 MPa, dan 15,66 MPa secara berurutan. Peningkatan tertinggi terjadi pada penambahan 12% Silica Fume, dengan kenaikan rata-rata 8,60%. Namun, semua sampel belum mencapai target 65% kekuatan (16,25 MPa) pada usia 7 hari. Pada usia 14 hari, kuat tekan beton tanpa Silica Fume meningkat menjadi 17,55 MPa. Penambahan Silica Fume 3%, 6%, 9%, dan 12% menghasilkan kuat tekan 17,93 MPa, 19,16 MPa, 19,53 MPa, dan 20,19 MPa. Kenaikan tertinggi terjadi pada 12% Silica Fume dengan peningkatan rata-rata 3,59%. Meski demikian, semua sampel belum mencapai target 88% kekuatan (22 MPa) pada usia 14 hari. Untuk beton berumur 21 hari, kuat tekan tanpa Silica Fume mencapai 19,25 MPa. Dengan penambahan Silica Fume 3%, 6%, 9%, dan 12%, kuat tekan meningkat menjadi 19,91 MPa, 21,89 MPa, 22,46 MPa, dan 22,65 MPa. Peningkatan tertinggi terjadi pada 12% Silica Fume dengan kenaikan rata-rata 4,20%. Namun, semua sampel masih belum mencapai target 95% kekuatan (23,75 MPa) pada usia 21 hari. Pada usia 28 hari, kuat tekan beton tanpa Silica Fume mencapai 21,70 MPa. Penambahan Silica Fume 3%, 6%, 9%, dan 12% meningkatkan kuat tekan menjadi 22,27 MPa, 22,65 MPa, 23,59 MPa, dan 23,97 MPa. Peningkatan tertinggi terjadi pada 12% Silica Fume dengan kenaikan rata-rata 2,52%. Meskipun demikian, semua sampel belum mencapai target kekuatan 100% (25 MPa) pada usia 28 hari. Secara keseluruhan, penambahan Silica Fume konsisten meningkatkan kuat tekan beton daur ulang pada berbagai usia, dengan peningkatan tertinggi umumnya terjadi pada penambahan 12% Silica Fume. Penggunaan beton agregat daur ulang dapat mengurangi dampak lingkungan dari kegiatan konstruksi dengan menghemat sumber daya alam dan mengurangi limbah. Namun, beton agregat daur ulang seringkali menunjukkan kekuatan tekan dan durabilitas yang lebih rendah daripada beton agregat alami. Penambahan silika fume telah terbukti dapat meningkatkan sifat-sifat beton dengan mengisi pori-pori dan mengurangi permeabilitas beton [6,7,8]

4. KESIMPULAN

Kuat tekan beton dengan agregat daur ulang pada umur beton 7, 14, 21 dan 28 hari didapatkan hasil berturut-turut sebesar 11,32 MPa, 17,55 MPa, 19,25 MPa dan 21,70 MPa. Hasil kuat tekan beton dengan penambahan Silica Fume sebesar 3%, 6%, 9% dan 12% pada umur beton 7 hari didapatkan hasil kuat tekan yaitu 12,93 MPa, 13,21 MPa, 15,10 MPa, dan 15,66 MPa. pada umur

beton 14 hari didapatkan hasil kuat tekan yaitu 17,93 MPa, 19,16 MPa, 19,53 MPa, dan 20,19 MPa. pada umur beton 21 hari didapatkan hasil kuat tekan yaitu 19,91 MPa, 21,89 MPa, 22,46 MPa, dan 22,65 Mpa. pada umur beton 28 hari didapatkan hasil kuat tekan yaitu 22,27 Mpa, 22,65 MPa, 23,59 Mpa, dan 23,97 Mpa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Triasiwi, A. Budiono, and A. Basid, "Analisis Kuat Tekan Beton dengan Penambahan Campuran Silica Fume untuk Mutu Beton K-300 dalam Penggunaan Jalan Rigid Pavement," *JIMTEK : Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik*, vol. 2, no. 1, pp. 22–30, 2021.
- [2] M. Solikin and A. Ariska, "Pengaruh Penggunaan Silica fume Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi High Volume Fly Ash (HVFA)," *Jurnal Riset Sains dan Teknologi*, vol. 7, no. 2, pp. 151–159, 2023.
- [3] H. Sasanipour, F. Aslani, and J. Taherinezhad, "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 227, p. 116598, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324.
- [4] H. Sasanipour and F. Aslani, "Effect of specimen shape, silica fume, and curing age on durability properties of self-compacting concrete incorporating coarse recycled concrete aggregates," *Constr Build Mater*, vol. 228, p. 117054, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117054.
- [5] A. Habibi, A. M. Ramezaniapour, M. Mahdikhani, and O. Bamshad, "RSM-based evaluation of mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete containing GGBFS and silica fume," *Constr Build Mater*, vol. 270, p. 121431, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121431.
- [6] M. Jalal, A. Pouladkhan, O. F. Harandi, and D. Jafari, "RETRACTED: Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete," *Constr Build Mater*, vol. 94, pp. 90–104, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001.
- [7] D. Qin, C. Dong, Z. Zong, Z. Guo, Y. Xiong, and T. Jiang, "Shrinkage and Creep of Sustainable Self-Compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregates, Fly Ash, Slag, and Silica Fume," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, no. 9, Sep. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004393.
- [8] A. Katz, "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete," *Cem Concr Res*, vol. 33, no. 5, pp. 703–711, May 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01033-5.