

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk memastikan semua bahan yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton dan untuk mengetahui karakteristik fisik masing-masing material. Penting untuk dicatat bahwa kekuatan beton dapat dipengaruhi oleh material lain yang dicampurkan. Hasil pengujian akan dilampirkan dalam lembar laporan ini sebagai bukti dari pengujian yang telah dilaksanakan.

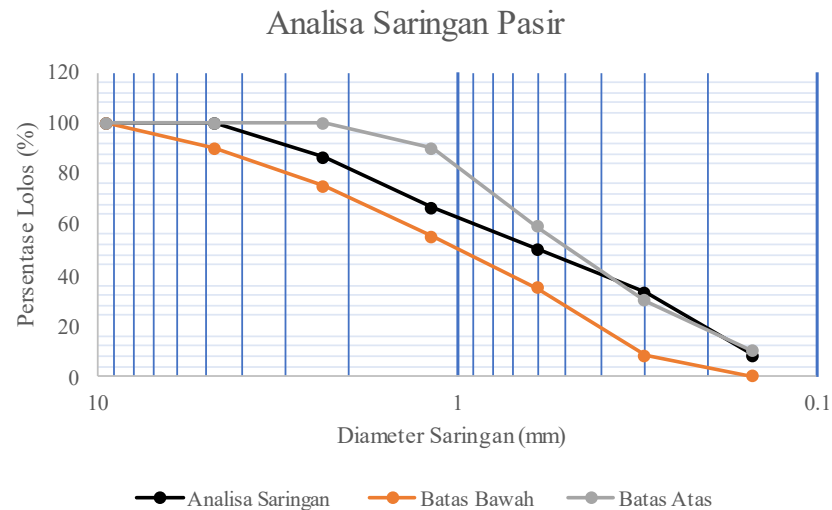
4.1.1 Hasil Pengujian Agregat Halus

a. Analisa Saringan

Pengujian analisis saringan agregat halus dilakukan untuk menentukan sebaran ukuran butiran pasir yang dipakai dalam penelitian ini. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa agregat halus memiliki distribusi butiran yang sesuai dengan rentang gradasi yang dibutuhkan untuk beton normal. Nilai modulus kehalusan yang diperoleh menunjukkan bahwa pasir tersebut memiliki sifat yang layak digunakan sebagai agregat halus dalam campuran beton.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Analisa Saringan Pasir

Saringan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Persentase Berat Tertahan (%)	Persentase Tertahan Kumulatif (%)	Persentase Lolos (%)
	(a)	(b) = (a) / W	(c)	(d) = 100 - c
9,5	0,0	0,00	0,00	100,00
4,75	0,0	0,00	0,00	100,00
2,36	136,3	13,66	13,66	86,34
1,18	197,1	19,75	33,41	66,59
0,60	163,8	16,42	49,83	50,17
0,30	170,9	17,13	66,96	33,04
0,15	248,5	24,90	91,86	8,14
Pan	81,2	8,14	100,00	0,00
Total (W)	997,8	100,00	255,72	



Gambar 4.1. Grafik Zona Analisa Saringan Pasir

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{\% \text{ Berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{255,72}{100} \\
 &= 2,56
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil analisis saringan, agregat halus yang digunakan termasuk ke dalam zona 2 dengan nilai modulus kehalusan (FM) sebesar 2,56. Nilai tersebut diperoleh dari hasil pembagian total persentase berat tertinggal kumulatif sebesar 255,72 dibagi 100. Merujuk pada SNI 03-1750-1990, agregat halus yang memenuhi kriteria kualitas memiliki nilai modulus kehalusan berkisar antara 1,5 hingga 3,8. Nilai FM hasil pengujian pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang dipersyaratkan.

b. Kadar Lumpur

Dalam rangka mengidentifikasi jumlah lumpur yang terdapat pada pasir sebagai agregat halus, dilakukan pengujian kadar lumpur pada material tersebut. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur metrik penurunan puncak beton secara vertikal berdasarkan acuan SNI 1972:2008. Dalam proses memilih agregat halus, kadar lumpur merupakan faktor penting yang harus dipertimbangkan. Ini karena kelebihan lumpur dapat mengurangi lekatan antara pasta semen dan butiran agregat, yang berdampak negatif pada kekuatan tekan dan ketahanan beton yang dihasilkan dalam kasus berikut:

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Kadar Lumpur Pasir

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji		120	ml
Berat air		250	ml
Tinggi pasir + lumpur	A	215	ml
Tinggi pasir	B	210	ml
Tinggi lumpur	C	5	ml

Perhitungan	Notasi	Volume	Satuan
$\frac{C}{A} \times 100\%$		2,326	%

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kadar lumpur pada agregat halus sebesar 2,236%. Nilai tersebut masih memenuhi ketentuan SNI, yang menetapkan bahwa kadar lumpur agregat halus untuk campuran beton tidak diperkenankan melebihi 5%.

c. Kadar Air

Sebelum proses pencampuran beton dilakukan, agregat halus menjalani pengujian kadar air dengan tujuan menentukan tingkat kelembaban material, sehingga penambahan air dalam campuran beton dapat diatur secara tepat. Jumlah air yang terkandung dalam agregat halus memiliki peran penting dalam menentukan *workability*, nilai faktor air semen (fas), serta kualitas beton yang dihasilkan. Untuk pengujian ini, sampel pasir pertama kali ditimbang sebelum dikeringkan sampai beratnya konstan. Selisih berat sebelum pengeringan dan sesudah pengeringan menunjukkan kadar air agregat halus. Hasil pengujian kadar air digunakan untuk menentukan jumlah air yang diperlukan untuk campuran beton agar proporsi campuran tetap sesuai dengan perencanaan dan menghasilkan beton berkualitas tinggi.

Berat benda uji sampel basah (S) = 300,0 gram

Berat benda uji kering oven (BW) = 297,2 gram

$$\begin{aligned} \text{Kadar Air (W basah)} &= \frac{(300 - BW)}{BW} \times 100\% \\ &= 0,942 \% \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian diketahui bahwa agregat halus memiliki kadar air sebesar 0,942%, yang mengindikasikan kondisi lembab ringan dan memungkinkan untuk digunakan dalam campuran beton. Berdasarkan ketentuan SNI 03-1971-1990, pengujian kadar air agregat halus diperlukan untuk penyesuaian air pencampur sehingga faktor air semen (fas) tetap sesuai dengan perencanaan dan kualitas beton tetap terjaga.

d. Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan parameter berat jenis agregat halus yang meliputi *Bulk*, *SSD*, dan *Apparent*, serta nilai penyerapan air dengan mengacu pada ketentuan SNI 1970:2016, yang digunakan sebagai data dasar untuk menghitung proporsi air yang akurat serta volume absolut agregat dalam perencanaan campuran dari analisa perhitungan dengan rumus sebagai berikut :

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji SSD	SSD	300,0	gram
Berat benda uji kering oven	BK	296,1	gram
Berat piknometer + air 25°C	B	666,5	gram
Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	Bt	848.6	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (Bulk)} &= \frac{BK}{B + 300 - Bt} \\ &= 2,512 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis kering permukaan (SSD)} &= \frac{BK}{B + 300 - Bt} \\ &= 2,545 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{BK}{B + 300 - Bt} \\ &= 2,597 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(300 - BK)}{BK} \times 100\% \\ &= 1,310 \% \end{aligned}$$

Untuk menentukan parameter dasar agregat untuk perencanaan campuran beton, pengujian berat jenis dan penyerapan agregat halus menghasilkan nilai berat jenis bulk 2,501, SSD 2,545, dan apparent 2,616, sedangkan nilai penyerapan air 1,76%.pencampur.

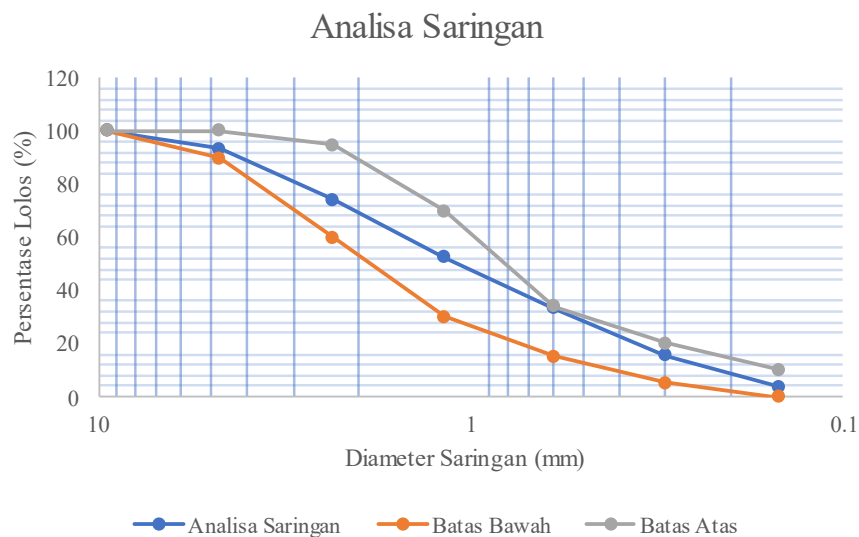
4.1.2 Hasil Pengujian *Bottom Ash*

a. Analisa Saringan *Bottom Ash*

Pengujian analisis saringan *bottom ash* dilakukan untuk mengetahui karakteristik gradasi material sebagai substitusi parsial agregat halus. Analisis saringan dilakukan sebelum penerapan metode perlakuan awal, karena pada prinsipnya perlakuan awal seperti pengeringan udara, pemanasan (sangrai), maupun pengeringan oven tidak mengubah ukuran butiran secara fisik, melainkan hanya memengaruhi kadar air dan kondisi permukaan partikel.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Analisa Saringan *Bottom Ash*

Saringan (mm)	Berat Tertahan (gram)	Persentase Berat Tertahan (%)	Persentase Tertahan Kumulatif (%)	Persentase Lolos (%)
	(a)	(b) = (a) / W	(c)	(d) = 100 - c
9,5	0,0	0,00	0,00	100,00
4,75	64,4	6,45	6,45	93,55
2,36	194,4	19,51	25,69	74,44
1,18	216,3	21,67	47,63	52,37
0,60	190,3	19,07	66,70	33,30
0,30	178,4	17,87	84,57	15,43
0,15	117,0	11,72	96,29	3,71
0,075	35,0	3,51	99,80	0,20
Pan	2,0	0,20	100,00	0,00
Total (W)	998,1	100,00	327,60	



Gambar 4.2. Grafik Zona Analisa Saringan *Bottom Ash*

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{\% \text{ Berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{327,60}{100} = 3,28
 \end{aligned}$$

Perhitungan analisis saringan *bottom ash* masuk dalam zona 1 dan menghasilkan nilai *Fineness Modulus* (FM) sebesar 3,28, yang diperoleh dari jumlah persentase berat tertinggal kumulatif sebesar 327,60 dibagi 100. Nilai FM tersebut menunjukkan bahwa *bottom ash* memiliki gradasi relatif kasar dan berada pada rentang agregat halus kasar. Oleh karena itu, *bottom ash* pada penelitian ini tidak digunakan sebagai pengganti penuh agregat halus, melainkan sebagai substitusi parsial, sehingga keseimbangan gradasi campuran tetap terjaga dan kinerja kuat tekan beton dapat dipertahankan.

b. Kadar Lumpur

Sebelum digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus dalam campuran beton, *bottom ash* dilakukan pengujian kadar lumpur untuk mengetahui kandungan partikel halusnya. Kandungan lumpur yang tinggi dapat mengurangi kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat, sehingga pengujian ini dilakukan untuk memastikan *bottom ash* memenuhi persyaratan penggunaan dalam beton.

Tabel 4.5. Hasil Pengujian Kadar Lumpur *Bottom Ash*

Pengujian	Notasi	Volume				Satuan
		BA-Alami	BA-Udara	BA-Sangrai	BA-Oven	
Berat benda uji		120	120	120	120	ml
Berat air		250	250	250	250	ml
Tinggi <i>bottom ash</i> + Lumpur	A	215	225	220	220	ml
Tinggi <i>bottom ash</i>	B	208	220	218	219	ml
Tinggi lumpur	C	7	5	2	1	ml
Perhitungan	$\frac{C}{A} \times 100\%$	3.256	2.222	0.909	0.455	%

Berdasarkan perhitungan kadar lumpur, *bottom ash* kondisi alami (BA-A) menunjukkan kadar lumpur tertinggi sebesar 3,26%, sedangkan *bottom ash* kondisi udara (BA-U) sebesar 2,22%. Proses perlakuan termal berupa sangrai (BA-S) dan oven (BA-O) menyebabkan penurunan kadar lumpur menjadi masing-masing 0,91% dan 0,45%. Penurunan kadar lumpur ini menunjukkan bahwa perlakuan pemanasan efektif mengurangi partikel halus yang berpotensi mengganggu ikatan pasta semen, sehingga secara teoritis dapat meningkatkan kualitas dan kuat tekan beton.

c. Kadar Air

Pengujian kadar air di *bottom ash* ini dilakukan sebelum material digunakan dalam campuran beton. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi kelembapan material karena tingkat air dapat memengaruhi jumlah air yang dibutuhkan untuk proses pencampuran beton. Apabila kadar air *bottom ash* terlalu tinggi, nilai faktor air semen (fas) dapat mengalami perubahan, yang pada akhirnya memengaruhi workability dan kekuatan beton. Akibatnya, kadar air diuji untuk membuat perhitungan campuran beton lebih akurat dan sesuai dengan perencanaan.

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Kadar Air *Bottom Ash*

Keterangan	BA	BA	BA	BA	
	Alami	Udara	Sangrai	Oven	
Berat benda uji sampel basah (B)	200,0	200,0	200,0	200,0	gr
Berat benda uji kering oven (BW)	195,8	196,6	197,1	198,7	gr
Perhitungan Kadar Air (W_{basah})					
$\frac{(200 - BW)}{BW} \times 100\%$	2,145	1,729	1,471	0,654	%

Dari hasil pengujian diketahui bahwa kadar air *bottom ash* sebesar 2,145% pada kondisi alami, 1,729% pada kondisi kering udara, 1,471% pada kondisi sangrai, dan 0,654% pada kondisi oven. Penurunan kadar air tersebut mengindikasikan bahwa perlakuan awal yang diterapkan efektif dalam mengurangi kandungan air *bottom ash*. Pengujian kadar air ini dilakukan untuk menyesuaikan kebutuhan air pencampur agar nilai faktor air semen (fas) tetap sesuai perencanaan serta kualitas beton yang dihasilkan tetap optimal.

d. Berat Jenis dan Penyerapan

Mengenai karakteristik fisik *bottom ash* yang digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus dalam campuran beton, dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan material tersebut. Pengujian ini dilakukan pada kondisi alami, udara, sangrai, dan oven, dengan hasil yang digunakan sebagai dasar perhitungan dan penentuan parameter perencanaan campuran beton.

1. Pengujian Berat Jenis *Bottom Ash* Alami

Hasil pengujian berat jenis *bottom ash* dalam kondisi alami menghasilkan data dan perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.7. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan *Bottom Ash* Alami

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji kering SSD	S	200,0	gram
Berat benda uji kering oven	A	198,3	gram
Berat piknometer + air 25°C	B	668,6	gram
Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	C	763,5	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Jenis (Bulk)} &= \frac{A}{(B + S - C)} = \frac{198,3}{(668,6 + 200 - 763,5)} \\
 &= 1,887 \\
 \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{S}{(B + S - C)} = \frac{200}{(668,6 + 200 - 763,5)} \\
 &= 1,903 \\
 \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{A}{(B + A - C)} = \frac{198,3}{(668,6 + 198,3 - 763,5)} \\
 &= 1,918 \\
 \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(S - A)}{A} \times 100 \% \\
 &= 0,857 \%
 \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian berat jenis dan penyerapan *bottom ash* kondisi alami, diperoleh nilai berat jenis *bulk* sebesar 1,887, SSD sebesar 1,903, dan *apparent* sebesar 1,918, serta nilai penyerapan sebesar 0,857%. Berdasarkan hasil pengujian, *bottom ash* alami memiliki karakteristik fisik yang memenuhi syarat untuk digunakan sebagai dasar perencanaan campuran beton.

2. Pengujian Berat Jenis *Bottom Ash* Udara

Data dan hasil perhitungan berat jenis *bottom ash* kondisi kering udara diperoleh dari pengujian yang telah dilakukan, sebagaimana disajikan berikut ini:

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan *Bottom Ash* Udara

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji kering SSD	S	200,0	gram
Berat benda uji kering oven	A	199,1	gram
Berat piknometer + air 25°C	B	668,6	gram
Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	C	775,8	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Jenis (Bulk)} &= \frac{A}{(B + S - C)} = \frac{199,1}{(668,6 + 200 - 775,8)} \\
 &= 2,145 \\
 \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{S}{(B + S - C)} = \frac{200}{(668,6 + 200 - 775,8)} \\
 &= 2,155 \\
 \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{A}{(B + A - C)} = \frac{199,1}{(668,6 + 198,3 - 775,8)} \\
 &= 2,166 \\
 \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(S - A)}{A} \times 100 \% \\
 &= 0,452 \%
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa *bottom ash* kondisi kering udara memiliki berat jenis *bulk* 2,145, SSD 2,155, *apparent* 2,166, serta nilai penyerapan sebesar 0,452%. Hasil pengujian ini digunakan sebagai parameter dalam perencanaan campuran beton dengan substitusi *bottom ash*.

3. Pengujian Berat Jenis *Bottom Ash* Sangrai

Dari pengujian berat jenis *bottom ash* dalam kondisi kering sangrai, didapatkan data dan perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan *Bottom Ash* Sangrai

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji kering SSD	S	200,0	gram
Berat benda uji kering oven	A	196,8	gram
Berat piknometer + air 25°C	B	668,6	gram
Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	C	780,3	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Jenis (Bulk)} &= \frac{A}{(B + S - C)} = \frac{196,8}{(668,6 + 200 - 780,3)} \\
 &= 2,307 \\
 \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{S}{(B + S - C)} = \frac{200}{(668,6 + 200 - 780,3)} \\
 &= 2,345
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{A}{(B + A - C)} = \frac{196,8}{(668,6 + 198,3 - 780,3)} \\ &= 2,397 \\ \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(S - A)}{A} \times 100 \% \\ &= 1,626 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis dan penyerapan *bottom ash* sangrai, diperoleh berat jenis *bulk* sebesar 2,307, SSD sebesar 2,345, dan *apparent* sebesar 2,397, serta nilai penyerapan air sebesar 1,626%. Nilai berat jenis SSD digunakan sebagai dasar perhitungan volume absolut agregat pada perencanaan campuran beton.

4. Pengujian Berat Jenis *Bottom Ash* Oven

Dari pengujian berat jenis *bottom ash* dalam kondisi kering oven, diperoleh data hasil pengukuran dan perhitungan yang disajikan sebagai berikut:

Tabel 4.10. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan *Bottom Ash* Oven

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji kering SSD	S	200,0	gram
Berat benda uji kering oven	A	196,0	gram
Berat piknometer + air 25°C	B	668,6	gram
Berat piknometer + benda uji SSD + air 25°C	C	784,9	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned} \text{Berat Jenis (Bulk)} &= \frac{A}{(B + S - C)} = \frac{196,0}{(668,6 + 200 - 784,9)} \\ &= 2,379 \\ \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{S}{(B + S - C)} = \frac{200}{(668,6 + 200 - 784,9)} \\ &= 2,427 \\ \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{A}{(B + A - C)} = \frac{196,0}{(668,6 + 198,3 - 784,9)} \\ &= 2,500 \\ \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(S - A)}{A} \times 100 \% \\ &= 2,041 \% \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian berat jenis dan penyerapan *bottom ash* pada kondisi oven, diperoleh berat jenis *bulk* sebesar 2,379, SSD sebesar 2,427, dan *apparent* sebesar 2,500, serta nilai penyerapan air sebesar 2,041%. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan oven memberikan pengaruh terhadap karakteristik fisik *bottom ash* sebagai bahan campuran beton.

4.1.3 Hasil Pengujian Agregat Kasar

a. Analisa Saringan Agregat Kasar

Mengetahui distribusi ukuran butiran serta karakteristik gradasi agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton, dilakukan pengujian analisis saringan agregat kasar. Berdasarkan standar ASTM C136:2012, pengujian ini bertujuan untuk memastikan agregat kasar memenuhi ketentuan gradasi yang dipersyaratkan, sehingga dapat menunjang tercapainya *workability* dan kuat tekan beton yang memadai. Dalam penelitian ini digunakan agregat kasar dengan ukuran butiran maksimum 19 mm. Dari hasil analisis saringan diperoleh data distribusi ukuran butiran yang kemudian dianalisis menggunakan rumus perhitungan sesuai standar yang berlaku.

Tabel 4.11. Hasil Pengujian Analisa Saringan Kerikil

Saringan (mm)	Berat Tertahan (gram) (a)	Persentase Berat Tertahan (%) (b) = (a) / W	Persentase Tertahan Kumulatif (%) (c)	Persentase Lolos (%) (d) = 100 - c
25	11, 95	11, 95	0, 80	99, 20
19	598, 25	610, 20	40, 74	59, 26
12, 5	680, 00	1290, 20	86, 14	13, 86
9, 5	199, 80	1490, 00	99, 48	0, 52
4,75	6, 80	1497, 80	100, 00	0, 00
Total (W)	1497,8	4900,15	327, 16	

$$FM = \frac{\% \text{ Berat tertinggal kumulatif}}{100}$$

$$= \frac{327,16}{100} = 3,27$$

Berdasarkan hasil analisis saringan diperoleh nilai FM agregat kasar sebesar 3,27. Dari hasil pengujian analisis saringan, diketahui bahwa agregat kasar memiliki ukuran butiran maksimum 19 mm dan dapat digunakan sebagai dasar perencanaan campuran beton.

b. Kadar Air

Mengetahui kondisi kelembapan agregat kasar sebelum digunakan dalam campuran beton, dilakukan pengujian kadar air. Kadar air agregat kasar dapat memengaruhi jumlah air pencampur, nilai faktor air semen (*fas*), *workability*, dan mutu beton yang dihasilkan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan berat agregat sebelum dan sesudah pengeringan, kemudian hasilnya digunakan sebagai dasar penyesuaian kebutuhan air agar komposisi campuran tetap sesuai dengan perencanaan.

$$\begin{aligned} \text{Berat benda uji sampel basah (B)} &= 1000,0 \text{ gram} \\ \text{Berat benda uji kering oven (BW)} &= 997,3 \text{ gram} \\ \text{Kadar Air (W basah)} &= \frac{(BK - BW)}{BW} \times 100 \% \\ &= 0,271 \% \end{aligned}$$

Dari hasil pengujian kadar air agregat kasar diperoleh nilai sebesar 0,271%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar berada pada kondisi relatif kering sehingga layak digunakan dalam campuran beton. Pengujian kadar air ini dilakukan untuk menyesuaikan kebutuhan air pencampur agar faktor air semen (*fas*) tetap sesuai perencanaan serta mutu beton yang dihasilkan tetap terjaga.

c. Berat Jenis dan Penyerapan

Pengujian berat jenis dan nilai penyerapan agregat kasar dilaksanakan untuk mengidentifikasi sifat fisik agregat yang berperan penting dalam proses perencanaan campuran beton. Pengujian ini mengacu pada ketentuan SNI 1969:2016 dengan tujuan memperoleh data berat jenis serta kemampuan agregat dalam menyerap air. Nilai-nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perhitungan volume bahan penyusun beton serta penentuan kebutuhan air pencampur agar campuran beton yang direncanakan dapat memenuhi mutu yang diharapkan. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai-nilai karakteristik agregat kasar sebagaimana tercantum pada hasil pengujian sebagai berikut:

Tabel 4.12. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Kerikil

Pengujian	Notasi	Volume	Satuan
Berat benda uji kering oven	BK	1000,0	gram
Berat benda uji jenuh kering permukaan di udara	SSD	1012,1	gram
Berat benda uji di dalam air	BA	634,5	gram

Dengan perhitungan berat jenis :

$$\begin{aligned}
 \text{Berat Jenis (Bulk)} &= \frac{\text{BK}}{\text{SSD} - \text{BA}} = \frac{1000}{1012,1 - 634,5} \\
 &= 2,648 \\
 \text{Berat jenis kering permukaan} &= \frac{\text{SSD}}{\text{SSD} - \text{BA}} = \frac{1012,1}{1012,1 - 634,5} \\
 \text{jenuh (SSD)} &= 2,680 \\
 \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{\text{BK}}{\text{BK} - \text{BA}} = \frac{1000}{1000 - 634,5} \\
 &= 2,736 \\
 \text{Penyerapan (Absorption)} &= \frac{(\text{SSD} - \text{BK})}{\text{BK}} \times 100 \% \\
 &= 1,21 \%
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki nilai berat jenis bulk sebesar 2,648, berat jenis dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,680, serta berat jenis semu (apparent) sebesar 2,736. Selain itu, nilai penyerapan air agregat kasar yang diperoleh adalah sebesar 1,21%. Pengujian tersebut dilakukan dengan mengacu pada SNI 1969:2016 dan hasilnya dimanfaatkan sebagai parameter teknis agregat kasar dalam proses perencanaan campuran beton. Nilai berat jenis SSD digunakan sebagai dasar perhitungan volume absolut agregat pada perencanaan campuran beton, sedangkan nilai penyerapan digunakan untuk penyesuaian kebutuhan air pencampur.

d. *Los Angeles*

Pengujian keausan agregat kasar dengan metode *los angeles* dilaksanakan untuk mengevaluasi kemampuan agregat dalam menahan pengaruh gesekan, benturan, dan proses abrasi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat mutu agregat kasar yang akan digunakan sebagai bahan penyusun dalam campuran beton, karena agregat dengan nilai keausan yang tinggi cenderung mudah hancur dan dapat mengurangi kekuatan dan durabilitas beton. Bola baja digunakan dalam mesin *los angeles* untuk menguji agregat kasar.

Tabel 4.13. Hasil Pengujian *Los Angeles* Kerikil

Berat Agregat Awal (A)	Berat Agregat Sesudah (B)
5000 gr	4164 gr
Presentase Keausan Agregat (C)	16,72%

$$C = A - B$$

$$= 5000 - 4164$$

$$= 836 \text{ gr}$$

$$\% \text{ Abrasi} = (C/A) \times 100\%$$

$$= (836/5000) \times 100\%$$

$$= 16,72\%$$

Berdasarkan hasil pengujian keausan agregat kasar dengan metode Los Angeles, diperoleh persentase keausan sebesar 16,72%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki ketahanan yang baik terhadap gesekan, tumbukan, dan abrasi. Mengacu pada SNI 2417:2008, persyaratan keausan agregat kasar untuk beton dibatasi dengan nilai maksimum 40%. Dengan demikian, agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini masih memenuhi ketentuan dan dinilai layak.

4.2 Hasil Uji Kelayakan Material

Hasil pengujian karakteristik material terhadap agregat halus, agregat kasar, dan *bottom ash* mencakup parameter gradasi butiran, berat jenis SSD, kadar air, kadar lumpur, serta keausan agregat kasar. Pengujian tersebut bertujuan untuk menjamin kesesuaian material dengan persyaratan teknis yang berlaku dalam perencanaan campuran beton. Hasil pengujian selengkapnya disajikan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14. Data Hasil Seluruh Pengujian Material

Pengujian	Agregat Halus	Agregat Kasar	BA Alami	BA Udara	BA Sangrai	BA Oven
Analisa Saringan	Zona 2	Max 19 mm	Zona 1	Zona 1	Zona 1	Zona 1
Berat Jenis SSD	2,545	2,680	1,903	2,155	2,345	2,427
Kadar Air	0,94 %	0,27 %	2,14 %	1,73 %	1,47 %	0,65 %
Kadar Lumpur	2,33 %	-	3,26 %	2,22 %	0,91 %	0,45 %
Keausan (<i>LAA</i>)	-	16,72 %	-	-	-	-

Tabel 4.15. Hasil Uji Kelayakan Material

No	Jenis Material	Hasil Pengujian	Standar	Keterangan
1	Agregat Halus	Persentase kandungan lumpur pada material sebesar 2,33%. Nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum 5%.	SNI 03-1968-1990: prosedur analisis saringan untuk agregat halus dan agregat kasar.	Memenuhi
2	<i>Bottom ash</i>	Persentase lumpur yang terkandung pada <i>bottom ash</i> sebagai substitusi pasir sebesar 2,22 % < 5%.	SNI 03-1968-1990: prosedur analisis saringan untuk agregat halus dan agregat kasar.	Memenuhi
3	Agregat Kasar	Hasil rata-rata pengujian keausan menunjukkan nilai sebesar 16,72%. Nilai ini memenuhi persyaratan teknis karena tidak melebihi batas 40%.	SNI 03-2417-2008: prosedur pengujian keausan agregat menggunakan alat <i>Los Angeles</i> .	Memenuhi
4	Semen	Semen berada dalam kondisi baik, ditandai dengan tidak ditemukannya gumpalan pada butiran semen saat kemasan dibuka.	SNI 7656-2012: prosedur perencanaan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa.	Memenuhi
5	Air	Air tidak berbau, berwarna jernih, serta bebas dari kandungan minyak, lumpur, garam, maupun zat lain yang berpotensi menurunkan mutu beton.	SNI 03-6861.1-2002 Standar yang dijadikan acuan dalam pemilihan air untuk campuran beton.	Memenuhi

Berdasarkan hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15, seluruh material penelitian memenuhi ketentuan teknis sesuai SNI yang berlaku. Agregat halus berada pada Zona 2 dengan kadar lumpur sebesar 2,33% serta berat jenis SSD 2,545, sehingga dapat digunakan sebagai bahan penyusun campuran beton. Agregat kasar memiliki ukuran maksimum 19 mm dengan nilai keausan *Los Angeles* sebesar 16,72%, yang masih berada di bawah batas maksimum 40%, sehingga memenuhi persyaratan sebagai agregat kasar beton.

Bottom ash yang digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus juga menunjukkan karakteristik yang memenuhi persyaratan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kadar lumpur *bottom ash* kondisi udara sebesar 2,22% masih

berada di bawah batas maksimum 5%, sedangkan perlakuan sangrai dan oven mampu menurunkan kadar lumpur dan kadar air material. Selain itu, semen yang digunakan berada dalam kondisi baik tanpa adanya gumpalan, serta air pencampur memenuhi persyaratan karena jernih, tidak berbau, dan bebas dari kandungan yang dapat memengaruhi kualitas beton.

Berdasarkan hasil uji kelayakan tersebut, seluruh material yang digunakan dalam penelitian dinyatakan layak untuk digunakan pada tahap pembuatan dan pengujian beton. Kesesuaian material terhadap standar yang berlaku diharapkan dapat mendukung proses pencampuran beton dan menghasilkan mutu beton yang sesuai dengan perencanaan penelitian.

4.3 Perhitungan Campuran Beton (*Job Mix Design*)

Perencanaan campuran beton dalam penelitian ini disusun berdasarkan SNI 2834-2000 dengan mutu $f'c$ 20 MPa (K-250) serta rasio air-semen 0,55. Sebanyak tiga puluh sampel silinder disiapkan untuk pengujian kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari dengan jenis campuran berupa beton normal (CTRL), beton dengan substitusi *bottom ash* alami sebesar 10% (BA-A), beton dengan substitusi *bottom ash* kering udara dalam ruangan sebesar 10% (BA-U), beton dengan substitusi *bottom ash* sangrai sebesar 10% (BA-S), beton dengan substitusi *bottom ash* oven sebesar 10% (BA-O). Beton normal digunakan sebagai campuran pembanding terhadap beton dengan substitusi *bottom ash*. Variasi tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan awal *bottom ash* terhadap kuat tekan beton. Persentase substitusi 10% ditetapkan untuk menjaga konsistensi variabel penelitian. Penelitian ini menggunakan rancangan yang telah disusun secara sistematis, dengan rincian jumlah benda uji pada setiap variasi campuran disajikan dalam Tabel 4.16.

Tabel 4.16. Jumlah benda uji semua variasi

Kode	Keterangan	Kuat Tekan	
		7 hari	28 hari
CTRL	Beton Normal	3 benda uji	3 benda uji
BA-A	BA 10% Alami	3 benda uji	3 benda uji
BA-U	BA 10% Angin-Angin (Udara)	3 benda uji	3 benda uji
BA-M	BA 10% Sangrai	3 benda uji	3 benda uji
BA-O	BA 10% Oven	3 benda uji	3 benda uji
		15 benda uji	15 benda uji

Tabel 4.17. Standard *Job mix design* beton f'c 20 MPa

	Semen (kg)	Air (kg)	Halus (kg)	Kasar (kg)
Proporsi campuran teoritis				
Setiap m ³ (i)	354,55	195	712,32	1114,14
	(i) x volume			
Setiap campuran uji m ³ (ii)	5,64	3,10	11,33	17,72
Proporsi campuran dengan angka penyusutan 15%				
	(i) + (15% x i)			
Setiap m ³ (iii)	407,73	224,25	819,16	1281,26
	(iii) x volume			
Setiap campuran uji m ³ (ii)	6,48	3,57	13,03	20,38

Tabel 4.18. Komposisi Bahan Campuran Beton 3 Benda Uji Silinder

Kode	Keterangan	Semen	Pasir	Kerikil	Air	Bottom Ash
CTRL	Beton Normal	6,48	13,03	20,38	3,57	0,00
BA-A	BA 10% Alami	6,48	11,73	20,38	3,57	0,97
BA-U	BA 10% Angin-Angin	6,48	11,73	20,38	3,57	1,10
BA-S	BA 10% Sangrai	6,48	11,73	20,38	3,57	1,20
BA-O	BA 10% Oven	6,48	11,73	20,38	3,57	1,24






Pada Tabel 4.17. menunjukkan perhitungan *job mix design* beton dengan mutu rencana f'c 20 MPa yang disusun berdasarkan proporsi campuran teoritis per 1 m³ beton. Selanjutnya, proporsi tersebut dikonversi ke dalam volume campuran uji dan disesuaikan dengan angka penyusutan sebesar 15% untuk mengantisipasi kehilangan material selama proses pencampuran dan pengecoran. Hasil perhitungan ini digunakan sebagai dasar penentuan kebutuhan bahan pada setiap campuran beton penelitian, seperti pada Tabel 4.18. menjabarkan kebutuhan bahan campuran untuk 3 benda uji.

4.4 Hasil Pengujian Benda Uji Beton

4.4.1 Hasil Pengujian *Slump Test*

Kadar air dalam campuran beton akan berpengaruh pada nilai *slump*. Pada campuran ini, nilai *slump* yang direncanakan adalah 75-100 mm. Pengukuran nilai *slump* dilakukan pada tiap variasi dari campuran untuk menunjukkan konsistensi pada campuran. Adapun nilai *slump* yang didapat ketika pengujian *slump* sebagai berikut:

Tabel 4.19. Hasil Pengujian *Slump Test*

No	Kode	Keterangan	Hasil <i>Slump</i> (mm)	Gambar
1	CTRL	Beton Normal	85	
2	BA-A	BA 10% Alami	80	
3	BA-U	BA 10% Angin-Angin (Udara)	90	
4	BA-S	BA 10% Sangrai	75	
5	BA-O	BA 10% Oven	95	

Berdasarkan Tabel 4.16, nilai *slump* seluruh variasi campuran beton berada pada rentang *slump* rencana sebesar 75–100 mm, sehingga secara umum masih memenuhi kriteria *workability* beton segar sesuai SNI 1972:2008. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* dengan berbagai metode perlakuan awal pada kadar 10% masih menghasilkan beton yang dapat dikerjakan dengan baik pada kondisi pengecoran normal. Nilai *slump* beton normal (CTRL) dan beton dengan *bottom ash* kondisi alami (BA-A) menunjukkan hasil yang relatif berdekatan, yang mengindikasikan bahwa substitusi *bottom ash* tanpa perlakuan awal pada kadar tersebut belum memberikan perubahan yang signifikan terhadap kelecakan beton.






Pada variasi *bottom ash* yang dikeringkan dengan udara (BA-U) dan oven (BA-O), nilai slump terukur lebih tinggi dibandingkan beton normal, yang menunjukkan tingkat kelecakan beton segar yang lebih besar. Namun, peningkatan nilai slump ini tidak secara langsung menunjukkan peningkatan mutu beton, melainkan hanya menggambarkan perbedaan kondisi kelecakan campuran. Pada penelitian Darwis dkk. (2015) menyatakan bahwa pengeringan awal pada material berpori dapat memengaruhi perilaku penyerapan air saat pencampuran, sehingga distribusi air dalam adukan beton menjadi berbeda pada tahap awal pengadukan. Oleh karena itu, variasi nilai slump yang terjadi lebih merefleksikan respons material terhadap kondisi perlakuan awal, bukan sebagai indikator keunggulan kinerja beton.

4.4.2 Pemeriksaan Kondisi Fisik

Pemeriksaan kondisi fisik bertujuan untuk memastikan bahwa benda uji berada dalam kondisi layak uji, memiliki bentuk dan dimensi yang sesuai standar, serta menunjukkan kualitas pemadatan yang relatif seragam. Pemeriksaan ini meliputi pengamatan terhadap kepadatan permukaan beton, keberadaan rongga, retak awal, serta cacat visual lainnya yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Selain itu, dilakukan pengukuran berat benda uji pada umur tertentu untuk memastikan keseragaman volume dan kualitas pemadatan antar variasi campuran beton. Dengan demikian, hasil uji kuat tekan yang diperoleh diharapkan mencerminkan karakteristik material dan campuran beton yang diuji, bukan dipengaruhi oleh cacat fisik benda uji.

Pemeriksaan kondisi fisik benda uji beton silinder pada umur 7 hari dilakukan sebagai tahap awal evaluasi terhadap perkembangan mutu beton setelah proses perawatan (*curing*). Pada tahap ini, beton telah mengalami proses pengerasan awal, pssengamatan meliputi kondisi permukaan beton, keberadaan rongga atau cacat visual, serta penimbangan berat benda uji. Hasil pemeriksaan ini digunakan untuk memastikan bahwa benda uji berada dalam kondisi normal dan layak untuk dilakukan pengujian kuat tekan pada umur rencana berikutnya. Berikut hasil pemeriksaan kondisi fisik benda uji beton silinder pada umur 7 hari:

Tabel 4.20. Hasil Pemeriksaan Kondisi Fisik Benda Uji Hari ke 7






No	Kode	Keterangan	Hasil Kondisi Fisik	Gambar
1	CTRL	Beton Normal	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,845 Kg - Berat benda uji 2 : 12,840 Kg - Berat benda uji 3 : 12,890 Kg 	
2	BA-A	BA 10% Alami	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,680 Kg - Berat benda uji 2 : 12,680 Kg - Berat benda uji 3 : 12,430 Kg 	
3	BA-U	BA 10% Udara	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,550 Kg - Berat benda uji 2 : 12,685 Kg - Berat benda uji 3 : 12,690 Kg 	
4	BA-S	BA 10% Sangrai	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,695 Kg - Berat benda uji 2 : 12,710 Kg - Berat benda uji 3 : 12,850 Kg 	
5	BA-O	BA 10% Oven	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,685 Kg - Berat benda uji 2 : 12,705 Kg - Berat benda uji 3 : 12,845 Kg 	

Pemeriksaan kondisi fisik benda uji beton silinder pada umur 28 hari dilakukan setelah beton mencapai umur rencana pengujian kuat tekan. Pada umur ini, beton diasumsikan telah mengalami proses hidrasi semen secara optimal sehingga sifat mekanisnya telah berkembang mendekati kondisi maksimum.

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mengevaluasi kondisi akhir beton sebelum pengujian kuat tekan, meliputi keseragaman permukaan, tidak adanya kerusakan selama proses perawatan, serta kestabilan berat benda uji. Kondisi fisik pada umur 28 hari sangat penting untuk memastikan bahwa hasil pengujian kuat tekan yang diperoleh benar-benar mencerminkan mutu beton dari masing-masing variasi

campuran. Berikut hasil pemeriksaan kondisi fisik benda uji beton silinder pada umur 28 hari:

Tabel 4.21. Hasil Pemeriksaan Kondisi Fisik Benda Uji Hari ke 28

No	Kode	Keterangan	Hasil Kondisi Fisik	Gambar
1	CTRL	Beton Normal	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,685 Kg - Berat benda uji 2 : 12,615 Kg - Berat benda uji 3 : 12,985 Kg 	
2	BA-A	BA 10% Alami	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 13,015 Kg - Berat benda uji 2 : 12,800 Kg - Berat benda uji 3 : 12,895 Kg 	
3	BA-U	BA 10% Udara	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,725 Kg - Berat benda uji 2 : 12,785 Kg - Berat benda uji 3 : 12,490 Kg 	
4	BA-S	BA 10% Sangrai	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,455 Kg - Berat benda uji 2 : 12,695 Kg - Berat benda uji 3 : 12,775 Kg 	
5	BA-O	BA 10% Oven	<ul style="list-style-type: none"> - Padat tidak berongga - Berat benda uji 1 : 12,775 Kg - Berat benda uji 2 : 12,670 Kg - Berat benda uji 3 : 12,675 Kg 	

Berdasarkan hasil pemeriksaan kondisi fisik benda uji beton silinder pada umur 7 hari yang disajikan pada Tabel 4.17 dan pada umur 28 hari disajikan pada Tabel 4.18, seluruh variasi campuran beton, baik beton normal (CTRL) maupun beton dengan substitusi *bottom ash* 10% (BA-A, BA-U, BA-S, dan BA-O), menunjukkan kondisi fisik yang relatif baik. Seluruh benda uji tampak padat, tidak berongga, dan tidak menunjukkan adanya retak awal maupun cacat permukaan yang signifikan.

4.4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini mengacu pada SNI 1974:2011 tentang metode pengujian kuat tekan beton menggunakan benda uji silinder. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, yang merupakan standar umum untuk pengujian kuat tekan beton normal di laboratorium. Pemilihan bentuk silinder ini bertujuan untuk memperoleh distribusi tegangan yang lebih seragam saat pembebanan, sehingga hasil pengujian dapat merepresentasikan kapasitas tekan beton secara lebih akurat.

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh benda uji terlebih dahulu dikeluarkan dari bak perawatan (curing) pada umur yang telah ditentukan, yaitu 7 hari dan 28 hari. Benda uji kemudian dibersihkan dari air bebas pada permukaannya menggunakan kain lembab agar tidak terjadi pengaruh air permukaan terhadap hasil pembacaan beban awal saat pengujian. Setelah itu, benda uji diletakkan secara sentris pada mesin uji tekan (*compression testing machine*) untuk memastikan distribusi beban merata pada seluruh permukaan beton.

Pembebanan diberikan secara bertahap (*gradual loading*) dengan kecepatan pembebanan yang konstan sesuai ketentuan SNI, hingga benda uji mengalami keruntuhan (*failure*). Beban maksimum yang tercatat pada saat benda uji mengalami retak dan hancur total digunakan sebagai dasar perhitungan kuat tekan beton. Hasil pengujian kemudian dikonversi ke satuan MPa untuk memudahkan interpretasi terhadap mutu rencana beton. Dalam penelitian ini, mutu rencana yang ditargetkan adalah $f'_c = 20$ MPa, sehingga hasil pengujian pada umur 28 hari menjadi acuan utama dalam evaluasi pencapaian mutu beton yang dihasilkan.

Pengujian dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari, di mana umur 7 hari digunakan untuk mengevaluasi perkembangan awal kekuatan beton, sedangkan umur 28 hari dijadikan acuan penilaian mutu rencana sebesar 20 MPa. Hasil pengujian digunakan untuk membandingkan beton normal dan beton dengan substitusi bottom ash serta menganalisis pengaruh variasi perlakuan awal bottom ash terhadap kuat tekan beton. Seluruh data hasil pengujian disajikan dalam Tabel 4.22 dan 4.23 sebagai dasar analisis dan pembahasan.

Berikut disajikan hasil pengujian kuat tekan beton yang telah dilakukan pada umur 7 hari:

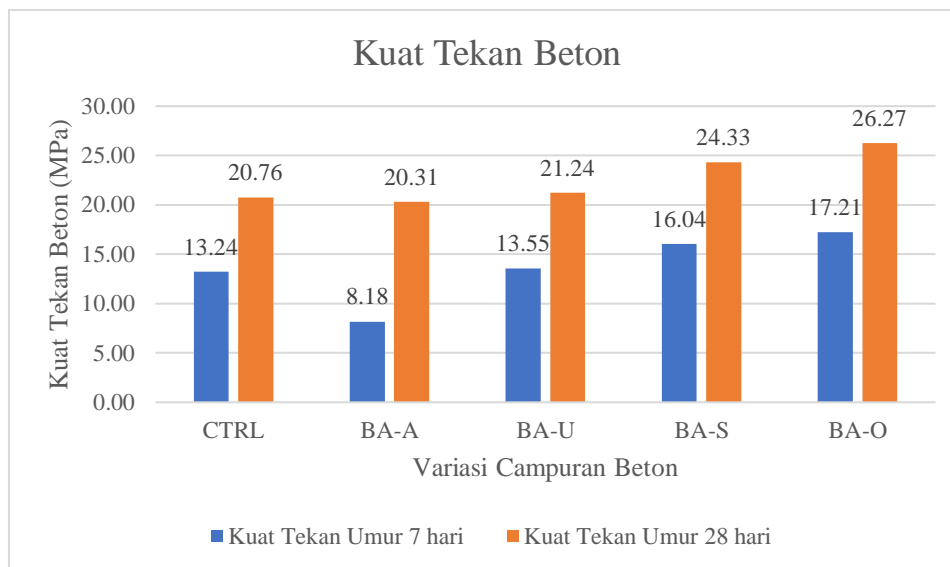
Tabel 4.22. Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Umur 7 hari

Variasi	Kode	Tinggi	Diameter	Tgl. Cor	Berat	Berat Isi	Luas Penampang	Tgl. Pengujian	Kuat Tekan		Kuat Tekan Rerata
		mm	mm		Kg	Kg/cm ³	mm ²		KN	MPa	MPa
CTRL	1	300	150,66	04/05/26	12,845	0,00240	17827,31	11/05/26	233	13,07	13,24
	2	300	150,18	04/05/26	12,840	0,00242	17713,90	11/05/26	235	13,27	
	3	300	151,46	04/05/26	12,890	0,00238	18017,14	11/05/26	241	13,38	
BA-A	1	300	151,10	05/05/26	12,680	0,00235	17931,59	12/05/26	157	8,76	8,18
	2	300	151,46	05/05/26	12,680	0,00235	18017,14	12/05/26	163	9,05	
	3	300	151,29	05/05/26	12,430	0,00230	17976,71	12/05/26	121	6,73	
BA-U	1	300	150,29	06/05/26	12,550	0,00236	17740,64	13/05/26	233	13,13	13,55
	2	300	151,11	06/05/26	12,685	0,00236	17933,96	13/05/26	248	13,83	
	3	300	151,54	06/05/26	12,690	0,00234	18036,18	13/05/26	247	13,69	
BA-S	1	300	151,74	07/05/26	12,695	0,00234	18084,61	14/05/26	271	14,99	16,04
	2	300	150,26	07/05/26	12,710	0,00239	17733,56	14/05/26	252	14,21	
	3	300	150,97	07/05/26	12,850	0,00237	17900,75	14/05/26	339	18,94	
BA-O	1	300	150,08	08/05/26	12,685	0,00239	17689,53	15/05/26	303	17,13	17,21
	2	300	150,86	08/05/26	12,705	0,00237	17874,67	15/05/26	324	18,13	
	3	300	150,12	08/05/26	12,845	0,00242	17698,96	15/05/26	290	16,39	

Berikut disajikan hasil pengujian kuat tekan beton yang telah dilakukan pada umur 28 hari hari:

Tabel 4.23. Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Umur 28 hari

Variasi	Kode	Tinggi	Diameter	Tgl. Cor	Berat	Berat Isi	Luas Penampang	Tgl. Pengujian	Kuat Tekan		Kuat Tekan Rerata
		mm	mm		Kg	Kg/cm ³	mm ²		KN	MPa	MPa
CTRL	1	300	149,55	04/05/26	12,685	0,00241	17566,37	01/06/26	352	20,04	20,76
	2	300	150,07	04/05/26	12,615	0,00238	17688,74	01/06/26	371	20,97	
	3	300	150,67	12/05/26	12,985	0,00243	17830,47	09/06/26	379	21,26	
BA-A	1	300	149,59	11/05/26	13,015	0,00247	17575,77	08/06/26	364	20,71	20,31
	2	300	150,44	11/05/26	12,800	0,00240	17775,28	08/06/26	374	21,04	
	3	300	150,71	11/05/26	12,895	0,00241	17838,36	08/06/26	342	19,17	
BA-U	1	300	151,34	06/05/26	12,725	0,00236	17987,81	03/06/26	392	21,79	21,24
	2	300	151,14	06/05/26	12,785	0,00237	17940,29	03/06/26	371	20,68	
	3	300	151,73	06/05/26	12,490	0,00230	18081,43	03/06/26	384	21,24	
BA-S	1	300	151,82	07/05/26	12,455	0,00229	18102,09	04/06/26	383	21,16	24,33
	2	300	151,47	07/05/26	12,695	0,00235	18018,72	04/06/26	435	24,14	
	3	300	151,35	07/05/26	12,775	0,00237	17990,98	04/06/26	498	27,68	
BA-O	1	300	150,75	09/05/26	12,775	0,00238	17848,62	06/06/26	475	26,61	26,27
	2	300	150,06	09/05/26	12,670	0,00239	17685,60	06/06/26	448	25,33	
	3	300	150,70	09/05/26	12,675	0,00236	17835,99	06/06/26	479	26,86	



Gambar 4. 3 Rekapitulasi Kuat Tekan Beton

Pada variasi beton dengan *Bottom Ash* kondisi Alami (BA-A), diperoleh kuat tekan rata-rata terendah, yaitu sebesar $\pm 8,18$ MPa pada umur 7 hari dan $\pm 20,76$ MPa pada umur 28 hari. Rendahnya kuat tekan pada variasi ini menunjukkan bahwa *bottom ash* tanpa perlakuan awal masih memiliki kadar air internal yang tinggi dan porositas besar, serta kemungkinan mengandung partikel debu sisa pembakaran (Dewi & Prasetyo 2021). Kondisi tersebut menyebabkan terbentuknya *interfacial transition zone* (ITZ) yang kurang padat antara pasta semen dan agregat, sehingga menurunkan kemampuan beton dalam menahan beban tekan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Hardiana dkk. (2019) yang menyatakan bahwa penggunaan *bottom ash* tanpa perlakuan awal cenderung menurunkan kuat tekan akibat tingginya daya serap air dan struktur pori yang belum stabil.

Beton dengan *Bottom Ash* kering Udara (BA-U) menunjukkan peningkatan kuat tekan dibandingkan BA-A, dengan nilai rata-rata sebesar $\pm 13,55$ MPa pada umur 7 hari dan $\pm 21,24$ MPa pada umur 28 hari. Peningkatan ini didukung dengan hasil penelitian Kim dkk. (2020) yang menyatakan bahwa pengurangan kadar air awal pada *bottom ash* melalui proses *air drying* mampu menstabilkan kondisi fisik material dan meningkatkan efisiensi penggunaan air pencampur dalam beton. Dengan kondisi material yang lebih kering, air pencampur lebih efektif digunakan untuk proses hidrasi semen, sehingga ikatan antara pasta semen dan agregat menjadi lebih baik dan kuat tekan beton meningkat.

Kuat tekan beton meningkat lebih signifikan pada variasi *Bottom Ash* kering Sangrai (BA-S), dengan nilai rata-rata sebesar $\pm 16,04$ MPa pada umur 7 hari dan $\pm 24,33$ MPa pada umur 28 hari. Perbedaan ini dapat dihubungkan dengan pengaruh perlakuan sangrai dalam memodifikasi karakteristik fisik *bottom ash*, terutama dalam mengurangi kadar air internal dan menurunkan absorpsi air awal, sehingga rasio air-semen efektif dalam campuran beton lebih optimal dibandingkan material tanpa perlakuan awal (Park dkk., 2021). Pengaruh kondisi permukaan dan densitas agregat terhadap kuat tekan beton juga dilaporkan pada beberapa studi yang menunjukkan bahwa beton dengan agregat yang lebih stabil dan densitas lebih baik cenderung memiliki mekanisme hidrasi yang lebih efisien sehingga kuat tekan akhir meningkat (Kim dkk., 2020). Hasil ini sejalan dengan penelitian Dewi & Prasetyo (2021) yang menyatakan bahwa pengeringan termal pada material limbah pembakaran dapat meningkatkan performa mekanik beton secara signifikan.

Variasi beton dengan *Bottom Ash* kering Oven (BA-O) menghasilkan kuat tekan tertinggi pada seluruh umur pengujian, dengan nilai rata-rata sebesar $\pm 17,21$ MPa pada umur 7 hari dan $\pm 26,27$ MPa pada umur 28 hari. Hasil ini mengindikasikan bahwa perlakuan pengeringan menggunakan oven merupakan metode perlakuan awal yang paling efektif dalam penelitian ini. Pengeringan oven mampu menurunkan kadar air awal dan menstabilkan kondisi fisik *bottom ash*, sehingga air pencampur dalam beton lebih terkendali dan dapat dimanfaatkan secara optimal untuk proses hidrasi semen (Darwis dkk., 2015). Hal tersebut juga didukung pada penelitian Ramesh dkk. (2021) yang menyatakan bahwa pengendalian kadar air dan porositas agregat berkontribusi terhadap terbentuknya sistem pasta semen yang lebih rapat dan ikatan yang lebih baik antara pasta semen dan agregat, yang pada akhirnya tercermin pada peningkatan kuat tekan beton. Meskipun penelitian ini tidak melakukan pengujian mikrostruktur secara langsung, peningkatan kuat tekan pada variasi BA-O menunjukkan kecenderungan terbentuknya beton dengan struktur internal yang lebih kompak, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian Wahyuni dkk. (2024) dan Kim dkk. (2020), yang menyimpulkan bahwa *bottom ash* dengan kadar air awal rendah menghasilkan beton dengan performa mekanik yang lebih baik, terutama pada umur 28 hari.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi metode perlakuan awal *bottom ash* memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton pada umur 7 hari maupun 28 hari. Beton dengan *bottom ash* yang mengalami pengeringan termal, khususnya metode oven, cenderung menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan kondisi alami dan kering udara. Namun, peningkatan kuat tekan tersebut masih berada dalam batas hasil pengujian yang diperoleh dan dipengaruhi oleh karakteristik fisik material serta kondisi campuran beton yang digunakan. Oleh karena itu, metode oven dalam penelitian ini dapat dianggap sebagai perlakuan awal yang paling konsisten memberikan peningkatan kuat tekan, meskipun penerapannya secara praktis tetap memerlukan kajian lanjutan terkait aspek teknis dan efisiensi pelaksanaannya.

4.5 Analisa Biaya

Analisis biaya dalam penelitian ini dilakukan dengan membandingkan estimasi biaya pembuatan beton normal dengan beton modifikasi yang menggunakan *bottom ash* sebagai bahan substitusi sebagian pasir alami. Perhitungan biaya didasarkan pada kebutuhan material aktual yang digunakan dalam pembuatan benda uji di laboratorium. Harga satuan masing-masing material diperoleh dari harga rata-rata pasaran di wilayah Kota Semarang serta estimasi biaya pengadaan material untuk kebutuhan penelitian.

Material utama seperti semen, pasir, kerikil, dan air, harga yang digunakan merupakan harga pasar rata-rata yang berlaku di wilayah Semarang berdasarkan informasi supplier material bangunan. Sementara itu, untuk material *bottom ash*, nilai biaya tidak mengacu pada harga komersial material konstruksi, melainkan diasumsikan sebagai material limbah industri yang diperoleh dengan biaya rendah, di mana biaya yang diperhitungkan hanya berupa biaya pengumpulan dan transportasi (*handling cost*) menuju lokasi penelitian.

Tabel 4.24. Harga Bahan

Nama Barang	Satuan	Harga (Rp)	Sumber
Semen	Kg	1.440,63	Harga rata-rata pasaran Semarang
Pasir	Ltr	470,00	Harga rata-rata pasaran Semarang
Kerikil	Kg	520,00	Harga rata-rata pasaran Semarang
Air	Kg	236,84	Harga rata-rata pasaran Semarang
<i>Bottom ash</i>	Kg	120,00	Limbah industri (rata-rata biaya ongkir)

Berikut adalah *job mix design* berdasarkan volume per 1 m³ (Tabel 4.25) untuk digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan biaya pembuatan beton per 1 m³. Pada beton kontrol (CTRL), seluruh agregat halus menggunakan pasir alami tanpa substitusi. Sedangkan pada variasi BA-A, BA-U, BA-S, dan BA-O, sebagian pasir alami disubstitusi oleh bottom ash sebesar 10% dengan perbedaan perlakuan awal material. Kondisi ini menyebabkan adanya perubahan pada kebutuhan massa pasir dan bottom ash, sementara kebutuhan semen, air, dan kerikil tetap sama pada seluruh variasi.

Tabel 4.25. *Job Mix Design* Beton Per 1 m³

Kode	Semen (kg)	Air (ltr)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Bottom Ash (kg)
CTRL	407,727	224,250	819,165	1281,258	0,000
BA-A	407,727	224,250	737,248	1281,258	61,262
BA-U	407,727	224,250	737,248	1281,258	69,376
BA-S	407,727	224,250	737,248	1281,258	72,982
BA-O	407,727	224,250	737,248	1281,258	79,871

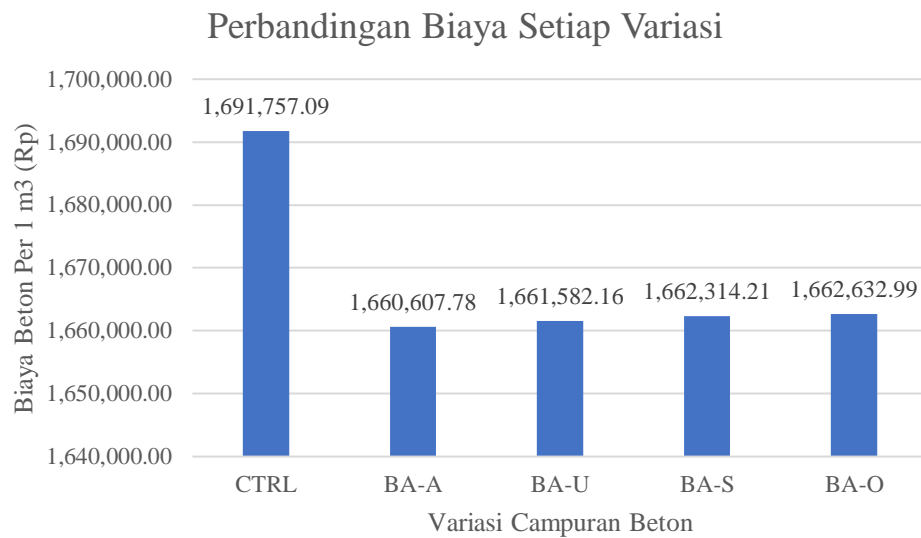
Keterangan:

- CTRL : Beton Normal
 BA-A : Beton + *Bottom Ash* 10% kering Alami
 BA-U : Beton + *Bottom Ash* 10% kering Udara
 BA-S : Beton + *Bottom Ash* 10% kering Sangrai
 BA-O : Beton + *Bottom Ash* 10% kering Oven

Setelah desain *job mix* per 1 m³ diketahui, biaya akan dihitung dengan harga satuan bahan yang telah diketahui. (Tabel 4.17)

Tabel 4.26. Perhitungan Analisa Biaya Beton Per 1m³ (Rp)

Kode	Semen (Rp)	Air (Rp)	Pasir (Rp)	Kerikil (Rp)	Bottom Ash (Rp)	Total (Rp)	Efisiensi (%)
CTRL	587.384,14	53.111,37	385.007,49	666.254,09	0,00	1.691.757,09	0,00
BA-A	587.384,14	53.111,37	346.506,74	666.254,09	7.451,44	1.660.607,78	1,84
BA-U	587.384,14	53.111,37	346.506,74	666.254,09	8.325,82	1.661.582,16	1,78
BA-S	587.384,14	53.111,37	346.506,74	666.254,09	9.057,87	1.662.314,21	1,74
BA-O	587.384,14	53.111,37	346.506,74	666.254,09	9.376,65	1.662.632,99	1,72



Gambar 4. 4 Perbandingan Biaya Setiap Variasi

Dari hasil analisis perhitungan biaya pada kebutuhan volume 1 m³, diperoleh indikasi bahwa Beton Normal (CTRL); Beton dengan penambahan 10% *Bottom Ash* Alami (BA-A); Beton dengan penambahan 10% *Bottom Ash* Udara (BA-U); Beton dengan penambahan 10% *Bottom Ash* Sangrai (BA-S); Beton dengan penambahan 10% *Bottom Ash* Oven (BA-O) adalah sebesar Rp 1.691.757,09; Rp 1.660.607,78; Rp 1.661.582,16; Rp 1.662.314,21; Rp 1.662.632,99. Dapat disimpulkan bahwa biaya produksi beton per 1 m³ pada beton modifikasi lebih efisien sebesar 1,84% dibandingkan dengan beton normal konvensional. Efisiensi ini terjadi karena adanya pengurangan penggunaan pasir melalui substitusi sebagian dengan *bottom ash*, sehingga menurunkan biaya material penyusun campuran beton.