

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Pengujian Material

Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Bangunan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro. Kegiatan penelitian berlangsung selama kurang lebih satu bulan yang mencakup tahap persiapan material, perancangan campuran beton, pembuatan benda uji, proses perawatan, hingga pelaksanaan pengujian. Seluruh tahapan dilakukan secara sistematis untuk memastikan keseragaman prosedur dan keakuratan data yang diperoleh. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental kuantitatif, dengan pengumpulan data berdasarkan hasil pengujian terhadap setiap variasi campuran beton. Data yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh substitusi *fly ash* dan penambahan *crystalline powder waterproofing* terhadap karakteristik beton yang diteliti.

##### 4.1.1 Hasil Analisis Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar

Pengujian analisis saringan bertujuan untuk menentukan gradasi ukuran butiran agregat dengan melakukan penyaringan sesuai standar guna memastikan agregat memiliki susunan butiran yang menerus sehingga mampu menghasilkan beton yang optimal. Adapun acuan yang digunakan berdasarkan SNI ASTM C136:2012.

##### 1. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini yaitu ukuran butiran maksimum 20 mm dari analisis saringan yang didapatkan data dan kemudian dilakukan analisis dengan rumus:

Berat Awal = 1000 gram



Gambar 4.1. Berat Awal Agregat Kasar

$$\text{Berat Sisa} = 999,3 \text{ gram}$$

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan} &= \text{berat awal} - \text{berat sisa} \\ &= 1000 - 999,3 \\ &= 0,7 \text{ Gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presentase} &= \frac{0,7}{1000} \times 100\% \\ &= 0,07 \% < 2\% \text{ (OK)} \end{aligned}$$

a. Perhitungan ayakan No. 1" (25 mm)

$$\begin{aligned} 1) \text{ Berat tertahan (gram)} &= \text{Berat tertahan (gram)} + \text{Berat tertahan} \\ &\text{sebelumnya (gram)} \end{aligned}$$

$$= 0 \text{ gram} + 0 \text{ gram}$$

$$= 0 \text{ gram}$$

$$2) \text{ Berat tertahan (\%)} = \text{Berat tertahan} / \text{berat total} \times 100 \%$$

$$= 0 / 999,3 \times 100 \%$$

$$= 0,12 \%$$

$$3) \text{ Lolos (\%)} = 100 \% - \text{Berat tertahan (\%)}$$

$$= 100 \% - 0 \%$$

$$= 100 \%$$

$$4) \text{ Batas Bawah} = 100$$

$$5) \text{ Batas Atas} = 100$$

b. Perhitungan ayakan No. 3/4" (19 mm)

$$\begin{aligned} 1) \text{ Berat tertahan (gram)} &= \text{Berat tertahan (gram)} + \text{Berat tertahan} \\ &\text{sebelumnya (gram)} \end{aligned}$$

$$= 250,4 \text{ gram} + 0 \text{ gram}$$

$$= 250,4 \text{ gram}$$

- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %  
 = 250,4 / 999,3 x 100 %  
 = 25,06 %
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)  
 = 100 % - 25,06 %  
 = 74,94 %
- 4) Batas Bawah = 70
- 5) Batas Atas = 90



Gambar 4.2. Berat Tertahan 3/4" Agregat Kasar

- c. Perhitungan ayakan No. 1/2" (12,5 mm)
- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)  
 = 608,5 gram + 250,4 gram  
 = 858,9 gram
- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %  
 = 858,9 / 999,3 x 100 %  
 = 85,95 %
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)  
 = 100 % - 85,95 %  
 = 14,05 %
- 4) Batas Bawah = 15
- 5) Batas Atas = 60



Gambar 4.3. Berat Tertahan 1/2" Agregat Kasar

- d. Perhitungan ayakan No. 3/8" (9,5 mm)
- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)
 
$$= 133,5 \text{ gram} + 858,9 \text{ gram}$$

$$= 992,4 \text{ gram}$$
  - 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %
 
$$= 992,4 / 999,3 \times 100 \%$$

$$= 99,31 \%$$
  - 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)
 
$$= 100 \% - 99,31 \%$$

$$= 0,69 \%$$
  - 4) Batas Bawah = 0
  - 5) Batas Atas = 5



Gambar 4.4. Berat Tertahan 3/8" Agregat Kasar

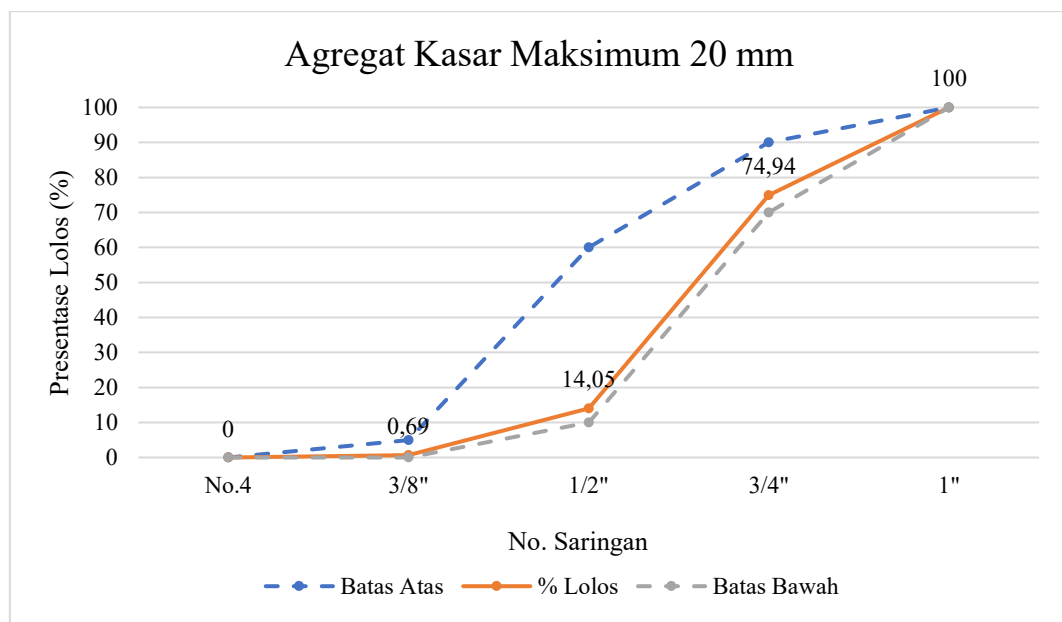
- e. Perhitungan ayakan No. 4 (4,75 mm)
- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)
 
$$= 6,9 \text{ gram} + 992,4 \text{ gram}$$

$$= 999,3 \text{ gram}$$
  - 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %

- $$= 999,3 / 999,3 \times 100 \%$$
- $$= 100 \%$$
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)
- $$= 100 \% - 100 \%$$
- $$= 0 \%$$
- 4) Batas Bawah = 0
- 5) Batas Atas = 0



Gambar 4.5. Berat Tertahan No. 4 Agregat Kasar



Gambar 4.6. Grafik % Lolos Agregat Kasar

Dari hasil perhitungan analisis saringan agregat kasar bisa dijadikan acuan dalam mengetahui ukuran maksimum 20 mm dengan SNI ASTM C136:2012. Dalam penelitian ini didapat nilai yang lolos saringan 3/4" sebesar 74,94 % yang sudah memenuhi standar SNI ASTM C136:2012.

## 2. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini yaitu dengan modulus kehalusan sedang dari analisis saringan yang didapatkan data dan kemudian dilakukan analisis dengan rumus:

$$\text{Berat Awal} = 500 \text{ gram}$$



Gambar 4.7. Berat Sampel Agregat Halus Analisis Saringan

$$\text{Berat Sisa} = 498,7 \text{ gram}$$

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan} &= \text{berat awal} - \text{berat sisa} \\ &= 500 - 498,7 \\ &= 1,3 \text{ Gram} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Presentase} &= \frac{1,3}{500} \times 100\% \\ &= 0,26 \% < 2\% \text{ (OK)} \end{aligned}$$

Kemudian analisis dengan modulus kehalusan:

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

a. Perhitungan ayakan No. 4 (4,8 mm)

$$\begin{aligned} 1) \text{ Berat tertahan (gram)} &= \text{Berat tertahan (gram)} + \text{Berat tertahan} \\ &\text{sebelumnya (gram)} \end{aligned}$$

$$= 0,6 \text{ gram} + 0 \text{ gram}$$

$$= 0,6 \text{ gram}$$

$$2) \text{ Berat tertahan (\%)} = \text{Berat tertahan} / \text{berat total} \times 100 \%$$

$$= 0,6 / 498,7 \times 100 \%$$

$$= 0,12 \%$$

$$3) \text{ Lolos (\%)} = 100 \% - \text{Berat tertahan (\%)}$$

$$= 100 \% - 0,12 \%$$

$$= 99,88 \%$$

$$4) \text{ Batas Bawah} = 90$$

- 5) Batas Atas = 100



Gambar 4.8. Berat Tertahan No. 4 Agregat Halus

- b. Perhitungan ayakan No. 8 (2,4 mm)

- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)

$$= 75,2 \text{ gram} + 0,6 \text{ gram}$$

$$= 75,8 \text{ gram}$$

- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %

$$= 75,8 / 498,7 \times 100 \%$$

$$= 15,2 \%$$

- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)

$$= 100 \% - 15,20 \%$$

$$= 84,80 \%$$

- 4) Batas Bawah = 75

- 5) Batas Atas = 100



Gambar 4.9. Berat Tertahan No. 8 Agregat Halus

- c. Perhitungan ayakan No. 16 (1,2 mm)

- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)

$$= 81,70 \text{ gram} + 75,80 \text{ gram}$$

$$= 157,50 \text{ gram}$$

- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %  
 = 157,50 / 498,7 x 100 %  
 = 31,58 %
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)  
 = 100 % - 31,58 %  
 = 68,42 %
- 4) Batas Bawah = 55
- 5) Batas Atas = 90



Gambar 4.10. Berat Tertahan No. 16 Agregat Halus

- d. Perhitungan ayakan No. 30 (0,6 mm)
- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)  
 = 116,5 gram + 157,5 gram  
 = 274 gram
- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %  
 = 274 / 498,7 x 100 %  
 = 54,94 %
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)  
 = 100 % - 54,94 %  
 = 45,06 %
- 4) Batas Bawah = 35
- 5) Batas Atas = 59



Gambar 4.11. Berat Tertahan No. 30 Agregat Halus

e. Perhitungan ayakan No. 50 (0,3 mm)

$$1) \text{ Berat tertahan (gram)} = \text{Berat tertahan (gram)} + \text{Berat tertahan sebelumnya (gram)}$$

$$= 119,40 \text{ gram} + 274 \text{ gram}$$

$$= 393,4 \text{ gram}$$

$$2) \text{ Berat tertahan (\%)} = \text{Berat tertahan} / \text{berat total} \times 100 \%$$

$$= 393,4 / 498,7 \times 100 \%$$

$$= 78,89 \%$$

$$3) \text{ Lolos (\%)} = 100 \% - \text{Berat tertahan (\%)}$$

$$= 100 \% - 78,89 \%$$

$$= 21,11 \%$$

$$4) \text{ Batas Bawah} = 8$$

$$5) \text{ Batas Atas} = 30$$



Gambar 4.12. Berat Tertahan No. 50 Agregat Halus

f. Perhitungan ayakan No. 100 (4,8 mm)

$$1) \text{ Berat tertahan (gram)} = \text{Berat tertahan (gram)} + \text{Berat tertahan sebelumnya (gram)}$$

$$= 3,4 \text{ gram} + 393,4 \text{ gram}$$

$$= 396,80 \text{ gram}$$

$$2) \text{ Berat tertahan (\%)} = \text{Berat tertahan} / \text{berat total} \times 100 \%$$

- $$= 396,8 / 498,7 \times 100 \%$$
- $$= 79,57 \%$$
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)
- $$= 100 \% - 79,57 \%$$
- $$= 20,43 \%$$
- 4) Batas Bawah = 0
- 5) Batas Atas = 20

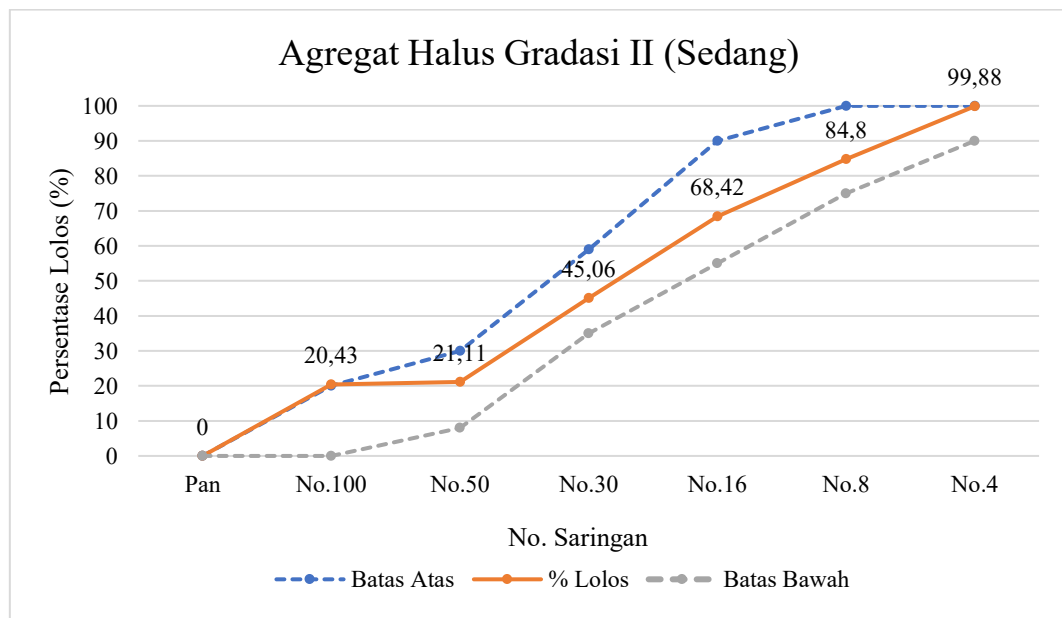


Gambar 4.13. Berat Tertahan No. 100 Agregat Halus

- g. Perhitungan Pan
- 1) Berat tertahan (gram) = Berat tertahan (gram) + Berat tertahan sebelumnya (gram)
- $$= 101,9 \text{ gram} + 396,8 \text{ gram}$$
- $$= 498,7 \text{ gram}$$
- 2) Berat tertahan (%) = Berat tertahan / berat total x 100 %
- $$= 498,7 / 498,7 \times 100 \%$$
- $$= 100 \%$$
- 3) Lolos (%) = 100 % - Berat tertahan (%)
- $$= 100 \% - 100 \%$$
- $$= 0 \%$$
- 4) Batas Bawah = 0
- 5) Batas Atas = 0

Gambar 4.14. Berat Tertahan *Pan* Agregat Halus

$$\begin{aligned}
 \text{MHB} &= \frac{\% \sum \text{Berat tertinggal kumulatif}}{100} \\
 &= \frac{0,12+15,2+31,58+54,94+78,89+79,57}{100} \\
 &= 2,60
 \end{aligned}$$



Gambar 4.15. Grafik % Lolos Agregat Halus

Dari hasil perhitungan analisis saringan agregat halus bisa dijadikan acuan dalam mengetahui modulus kehalusan butiran sesuai dengan SNI ASTM C136:2012 yaitu sebesar 1 - 3 Dalam penelitian ini didapat nilai modulus kehalusan butiran sebesar 2,6 yang sudah memenuhi standar SNI ASTM C136:2012 dan masuk dalam kategori agregat halus sedang.

#### 4.1.2 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

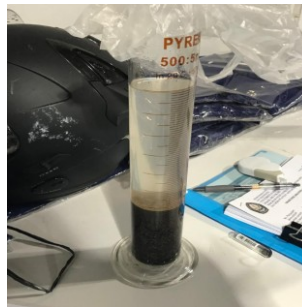
Pengujian ini bertujuan untuk mengukur parameter penurunan puncak beton secara vertikal berdasarkan acuan SNI 03-4142:1996, yang berfungsi untuk mengevaluasi tingkat kemudahan pengerjaan dan konsistensi kadar air dalam campuran beton segar dengan rumus sebagai berikut:

Tanggal Pengujian = Rabu, 22 April 2026

Lokasi Sampel = Pasir Muntilan

##### Sistem Kocokan

1. Tinggi pasir + lumpur = 205 ml
2. Tinggi pasir = 200 ml
3. Tinggi lumpur = 5 ml



Gambar 4.16. Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Berdasarkan data tersebut, selanjutnya melakukan analisis perhitungan sebagai berikut:

$$\% \text{ Kadar Lumpur} = \frac{(A - B)}{A} \times 100 \%$$

Keterangan:

A = Tinggi pasir + lumpur (ml)

B = Tinggi pasir (ml)

$$\begin{aligned} \text{Kadar Lumpur} &= \frac{(A - B)}{A} \times 100 \% \\ &= \frac{(205 - 200)}{205} \times 100 \% \\ &= 2,43 \% \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian, kadar lumpur dari agregat halus yaitu 2,43% yang memenuhi syarat SNI 03-4142:1996, yaitu maksimum 5%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki tingkat kebersihan yang

baik dan tidak mengandung material yang berlebih sehingga tidak mempengaruhi pengikatan antara pasta semen dan agregat. Oleh karena itu, agregat halus tersebut layak digunakan untuk campuran beton integral tanpa mengurangi kualitas maupun kekuatan beton integral yang dihasilkan.

#### 4.1.3 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Pengujian ini dilaksanakan untuk menentukan parameter Berat Jenis dan kapasitas penyerapan air pada agregat kasar sesuai standar SNI 1969:2016, yang berfungsi sebagai konstanta penting dalam mengonversi berat menjadi volume pada perhitungan *mix design* dari analisis perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

Didapat dari pengujian nilai nilai:

$$BK = 993,2 \text{ gram}$$

$$BW = 976,6 \text{ gram}$$

$$BJ = 1000 \text{ gram}$$

$$BA = 660 \text{ gram}$$

Dengan perhitungan berat jenis:

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (Bulk)} &= \frac{BK}{(BJ-BA)} \\ &= \frac{993,2}{(1000-660)} \\ &= 2,92 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{BJ}{(BJ-BA)} \\ &= \frac{1000}{(1000-660)} \\ &= 2,94 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{BK}{(BK-BA)} \\ &= \frac{993,2}{(993,2-660)} \\ &= 2,98 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Penyerapan (Absorption)} &= \left[ \frac{BJ-BK}{BK} \right] \times 100\% \\ &= \left[ \frac{1000-993,2}{993,2} \right] \times 100\% \\ &= 0,68 \% \end{aligned}$$

$$\text{Kadar Air} = \left[ \frac{BJ-BW}{BW} \right] \times 100\%$$

$$= \left[ \frac{1000 - 976,6}{976,6} \right] \times 100\%$$

$$= 2,4 \%$$



Gambar 4.17. Berat Kering Oven Agregat Kasar



Gambar 4.18. Berat Jenuh Kering Permukaan Agregat Kasar



Gambar 4.19. Berat Kering Oven Basah Agregat Kasar



Gambar 4.20. Berat Agregat Kasar + Air

Berdasarkan pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar sesuai SNI 1969:2016, diperoleh nilai berat jenis *bulk* sebesar 2,92, berat jenis SSD

sebesar 2,94, dan berat jenis semu sebesar 2,98. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan termasuk dalam kategori agregat normal dan memenuhi persyaratan untuk campuran beton. Nilai penyerapan air sebesar 0,68% mengindikasikan daya serap yang rendah sehingga agregat memiliki porositas yang relatif kecil. Selain itu, kadar air sebesar 2,4% menunjukkan bahwa agregat berada dalam kondisi lembab sehingga perlu diperhitungkan dalam penyesuaian kebutuhan air pada *mix design*.

#### 4.1.4 Hasil Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh parameter Berat Jenis (*Bulk*, *SSD*, *Apparent*) dan nilai penyerapan air agregat halus berdasarkan SNI 1970:2016, yang digunakan sebagai data dasar untuk menghitung proporsi air yang akurat serta volume absolut agregat dalam perencanaan campuran dari analisis perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

Didapat dari pengujian nilai nilai:

$$S = 200 \text{ gram}$$

$$BK = 197,2 \text{ gram}$$

$$BW = 190,1 \text{ gram}$$

$$B = 708,4 \text{ gram}$$

$$Bt = 831,3 \text{ gram}$$

Dengan perhitungan berat jenis:

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis (Bulk)} &= \frac{BK}{(B+S-Bt)} \\ &= \frac{197,2}{(708,4+200-831,3)} \\ &= 2,56 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis kering permukaan jenuh (SSD)} &= \frac{S}{(B+S-Bt)} \\ &= \frac{200}{(708,4+200-831,3)} \\ &= 2,59 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Berat jenis semu (Apparent)} &= \frac{BK}{(B+BK-Bt)} \\ &= \frac{197,2}{(708,4+197,2-831,3)} \\ &= 2,65 \end{aligned}$$

Penyerapan (*Absorption*)

$$= \left[ \frac{S-BK}{BK} \right] \times 100\%$$

$$= \left[ \frac{200-197,2}{197,2} \right] \times 100\%$$

$$= 1,42 \%$$

Kadar Air

$$= \left[ \frac{S-BW}{BW} \right] \times 100\%$$

$$= \left[ \frac{200-190,1}{190,1} \right] \times 100\%$$

$$= 5,21 \%$$



Gambar 4.21. Berat Jenuh Kering Permukaan Agregat Halus



Gambar 4.22. Berat Kering Oven Agregat Halus



Gambar 4.23. Berat Piknometer + Air



Gambar 4.24. Berat Piknometer + Benda Uji + Air

Berdasarkan hasil pengujian sesuai SNI 1970:2016, diperoleh nilai berat jenis *bulk* sebesar 2,56, SSD sebesar 2,59, dan *apparent* sebesar 2,65, yang menunjukkan bahwa agregat halus memiliki kepadatan yang baik dan masih memenuhi karakteristik agregat normal untuk campuran beton. Nilai penyerapan air sebesar 1,42% menunjukkan daya serap air agregat masih dalam batas wajar, sedangkan kadar air sebesar 5,21% menandakan agregat halus berada dalam kondisi lembab sehingga perlu penyesuaian jumlah air pada perencanaan *mix design*. Dengan demikian, berdasarkan hasil pengujian dan mengacu pada SNI 1970:2016, agregat halus yang digunakan baik sebagai material penyusun campuran beton.

#### 4.1.5 Hasil Pengujian Pengikatan Awal Semen *Portland*

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur waktu pengikatan awal pasta semen menggunakan alat vicat berdasarkan SNI 03-6827:2002, guna memastikan beton memiliki durasi pengerjaan yang cukup sebelum mulai mengeras secara permanen dari analisis perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

Konsistensi awal semen:

$$\begin{aligned} \text{Kadar Air} &= \frac{\text{Berat Air}}{\text{Berat Semen}} \times 100\% \\ &= \frac{75}{300} \times 100\% \\ &= 25\% \end{aligned}$$

Jenis Semen = Semen PCC Tiga Roda

Tanggal Pengujian = Selasa, 21 April 2026

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Pengikatan Awal Semen

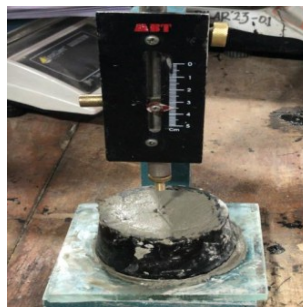
No	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)
1	0	56	25
2	15	38	25
3	30	34	25
4	45	25	25
5	60	16	25



Gambar 4.25. Pengikatan Awal Semen 0 Menit



Gambar 4.26. Pengikatan Awal Semen 15 Menit



Gambar 4.27. Pengikatan Awal Semen 30 Menit



Gambar 4.28. Pengikatan Awal Semen 45 Menit



Gambar 4.29. Pengikatan Awal Semen 60 Menit

Berdasarkan hasil pengujian pengikatan awal semen, terlihat bahwa nilai penurunan jarum mengalami penurunan secara bertahap dari 56 mm pada menit ke-0 menjadi 16 mm pada menit ke-60 dengan suhu konstan 25°C. Hal ini menunjukkan bahwa pasta semen mulai mengalami proses pengerasan seiring bertambahnya waktu. Mengacu pada prinsip pengujian vicat, pengikatan awal ditandai ketika penetrasi jarum mendekati batas tertentu, yang pada data ini terjadi di menit ke-45 dengan nilai penurunan 25 mm. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa waktu pengikatan awal semen PCC Tiga Roda berada di kisaran  $\pm 45$  menit, yang tergolong normal dan memenuhi persyaratan umum, sehingga semen layak digunakan untuk pekerjaan konstruksi.

#### 4.1.6 Hasil Pengujian Berat Jenis *Fly Ash*

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur parameter kerapatan massa *fly ash* menggunakan metode piknometer berdasarkan standar SNI 03-6414:2002, guna menentukan volume absolut material pozzolan dalam campuran beton dan mengevaluasi kualitas fisisnya.

Lokasi Sampel = Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batang

Tanggal Pengujian = Rabu, 22 April 2026

Pengujian = Pemeriksaan Berat Jenis *Fly Ash*



Gambar 4.30. Berat Piknometer Kosong



Gambar 4.31. Berat Pycnometer + Akuades



Gambar 4.32. Berat Pycnometer + *Fly Ash*



Gambar 4.33. Berat Pycnometer + Akuades + *Fly Ash*

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Berat Jenis *Fly Ash*

No.	Pengujian	Satuan	Hasil Perhitungan
1.	Berat Piknometer Kosong (W1)	gr	167,2
2.	Berat Piknometer + Akuades (W2)	gr	659,4
3.	Suhu Piknometer + Akuades (t)	°C	25
4.	Koreksi Suhu Piknometer + Akuades (T1)	°C	0,9989
5.	Harga Air Piknometer (WT) = (W2-W1) x (T1)	gr	491,659
6.	Berat Piknometer + <i>Fly Ash</i> (W3)	gr	367,2
7.	Berat Piknometer + <i>Fly Ash</i> + Akuades (W4)	gr	779,6
8.	Suhu Piknometer + Akuades + <i>Fly Ash</i> (t)	°C	26
9.	Koreksi Suhu Piknometer + Akuades + <i>Fly Ash</i> (T2)	°C	0,9986
10.	Berat Jenis	gr/cm <sup>3</sup>	2,505

$$G_s = \frac{W_3 - W_1}{WT - (W_4 - W_3) \times T_2}$$

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis *fly ash* menggunakan metode piknometer, diperoleh nilai berat jenis ( $G_s$ ) sebesar 2,505 gr/cm<sup>3</sup>. Nilai tersebut berada dalam rentang umum berat jenis *fly ash*, yaitu sekitar 2,1–2,6 gr/cm<sup>3</sup>, sehingga menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki karakteristik fisik yang baik. Dengan demikian, *fly ash* tersebut memenuhi persyaratan sebagai bahan tambah dalam campuran beton dan berpotensi mendukung peningkatan sifat beton, khususnya *workability* dan kekuatan.

#### 4.2 Hasil Pengujian Benda Uji

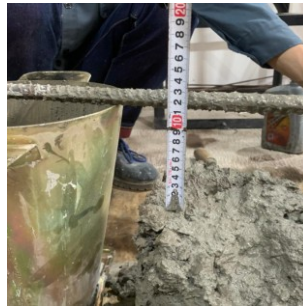
Penelitian ini meliputi empat jenis pengujian, yaitu *slump test*, kuat tekan, kekedapan air dan penyerapan air. Masing-masing pengujian bertujuan untuk mengevaluasi *workability*, mutu, porositas, dan ketahanan beton terhadap penetrasi air sehingga dapat menggambarkan kinerja beton secara menyeluruh.

#### 4.2.1 Hasil Pengujian *Slump Test*

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur parameter penurunan puncak beton secara vertikal berdasarkan acuan SNI 1972:2008, yang berfungsi untuk mengevaluasi tingkat kemudahan pengerjaan dan konsistensi kadar air dalam campuran beton segar dari analisis perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

##### Variasi A; *Fly Ash* 0%; *Crystalline Powder* 0%

Agregat Kasar	= 65,72 Kg
Agregat Halus	= 49,65 Kg
Semen	= 24,18 Kg
<i>Fly Ash</i>	= 0 Kg
<i>Crystalline Powder</i>	= 0 Kg
Air	= 14,75 Liter
Nilai <i>Slump</i>	= 120 mm



Gambar 4.34. Variasi A *Slump Test*

##### Variasi B; *Fly Ash* 10%; *Crystalline Powder* 2%

Agregat Kasar	= 65,72 Kg
Agregat Halus	= 49,65 Kg
Semen	= 21,76 Kg
<i>Fly Ash</i>	= 2,42 Kg
<i>Crystalline Powder</i>	= 0,44 Kg
Air	= 14,75 Liter
Nilai <i>Slump</i>	= 140 mm

Gambar 4.35. Variasi B *Slump Test*Variasi C; *Fly Ash* 20%; *Crystalline Powder* 3%

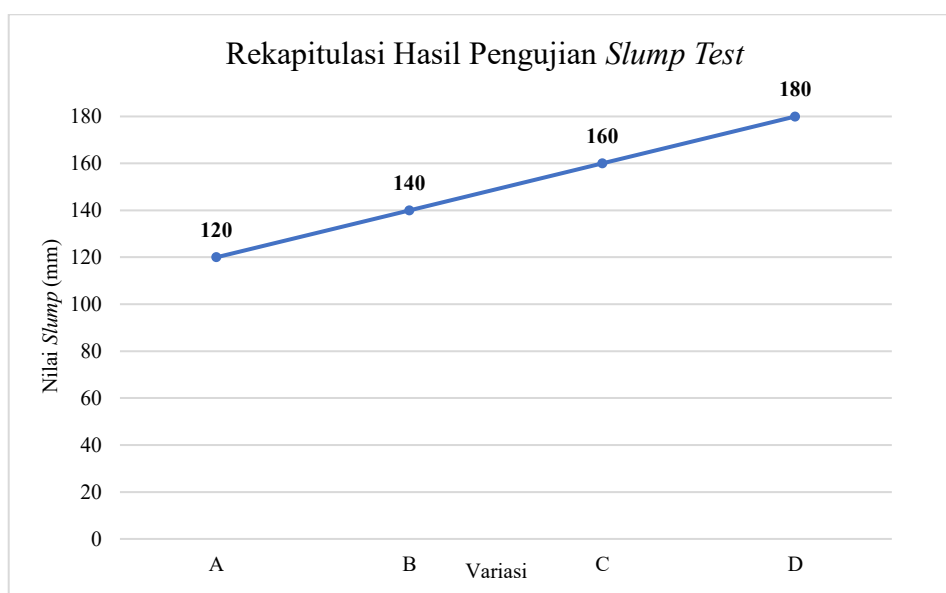
Agregat Kasar	= 65,72 Kg
Agregat Halus	= 49,65 Kg
Semen	= 19,34 Kg
<i>Fly Ash</i>	= 4,84 Kg
<i>Crystalline Powder</i>	= 0,58 Kg
Air	= 14,75 Liter
Nilai <i>Slump</i>	= 160 mm

Gambar 4.36. Variasi C *Slump Test*Variasi D; *Fly Ash* 30%; *Crystalline Powder* 4%

Agregat Kasar	= 65,72 Kg
Agregat Halus	= 49,65 Kg
Semen	= 16,92 Kg
<i>Fly Ash</i>	= 7,25 Kg
<i>Crystalline Powder</i>	= 0,68 Kg
Air	= 14,75 Liter
Nilai <i>Slump</i>	= 180 mm

Gambar 4.37. Variasi D *Slump Test*Tabel 4.3. Hasil Pengujian *Slump Test*

Pengujian <i>Slump</i>	Variasi A	Variasi B	Variasi C	Variasi D
Nilai <i>Slump</i>	120 mm	140 mm	160 mm	180 mm

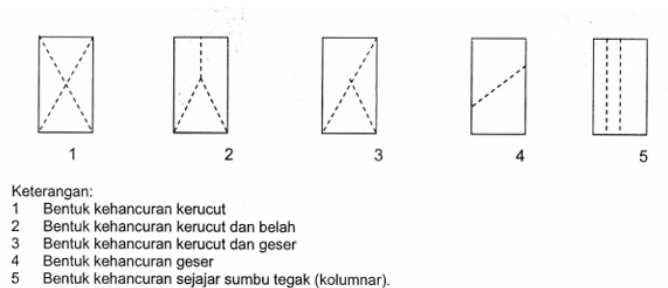
Gambar 4.38. Grafik Hasil Pengujian *Slump Test*

Berdasarkan hasil *slump test* sesuai SNI 1972:2008, diperoleh nilai *slump* sebesar 120 mm pada Variasi A (0%; 0%), 140 mm pada Variasi B (10%; 2%), 160 mm pada Variasi C (20%; 3%), dan 180 mm pada Variasi D (30%; 4%). Peningkatan nilai *slump* menunjukkan bahwa *workability* beton semakin baik seiring bertambahnya variasi campuran. Hal ini dipengaruhi oleh penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* yang mampu meningkatkan kemudahan pengerjaan beton akibat ukuran partikelnya yang halus. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Shelote dkk., 2023) dan (Kushartomo dkk., t.t.) yang menyatakan bahwa *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* dapat meningkatkan

*workability* beton segar. Dengan demikian, seluruh variasi campuran memenuhi persyaratan SNI 1972:2008 dan layak digunakan untuk proses pengecoran.

#### 4.2.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter kekuatan tekan dengan menghitung beban maksimum per satuan luas benda uji silinder sesuai SNI 1974:2011, yang berfungsi untuk kekuatan beton mencapai mutu struktur yang direncanakan dari analisis perhitungan dengan rumus sebagai berikut:



Gambar 4.39. Sketsa Gambar Bentuk Kehancuran Benda Uji

(Sumber: SNI 1974:2011)

L/D	2,00	1,75	1,50	1,25	1,00
Faktor Koreksi	1,00	0,98	0,96	0,93	0,87

Gambar 4.40. Faktor Koreksi Rasio Panjang (L) dan Diameter (D)

(Sumber: SNI 1974:2011)

Dari data diatas diperoleh persamaan:

$$\text{Kuat tekan} = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

P = Beban tekan maksimum (Kgf atau N)

A = Luas bidang tekan (mm<sup>2</sup>)

Perhitungan:

Variasi A; Fly Ash 0%; Crystalline Powder 0%

Diketahui:

Diameter Benda Uji = 150 mm

Panjang Benda Uji = 300 mm

Beban Maksimum 1 = 478000 N

Beban Maksimum 2 = 492000 N

$$\begin{aligned}
 \text{Beban Maksimum 3} &= 455000 \text{ N} \\
 L/D &= 2 \text{ (Faktor Koreksi = 1)} \\
 \text{Luas Penampang} &= \pi \times d^2 \\
 &= 3,1416 \times 150^2 \\
 &= 17671,5 \text{ mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 1} &= \frac{P_1}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{478000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 27,049 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= \frac{P_2}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{492000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 27,842 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= \frac{P_3}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{455000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 25,748 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Rata Rata} &= \frac{f'_{c1} + f'_{c2} + f'_{c3}}{3} \\
 &= \frac{27,049 + 27,842 + 25,748}{3} \\
 &= 26,880 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Kuat tekan beton benda uji silinder tersebut adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat Tekan 1} &= 27,049 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,049 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= 27,842 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,842 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= 25,748 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 25,748 \text{ MPa} \\
 \text{Rata - Rata} &= 26,880 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 26,880 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Variasi B; Fly Ash 10%; Crystalline Powder 2%

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter Benda Uji} &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Panjang Benda Uji} &= 300 \text{ mm} \\
 \text{Beban Maksimum 1} &= 487000 \text{ N} \\
 \text{Beban Maksimum 2} &= 493000 \text{ N} \\
 \text{Beban Maksimum 3} &= 484000 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$L/D = 2 \text{ (Faktor Koreksi = 1)}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas Penampang} &= \pi \times d^2 \\ &= 3,1416 \times 150^2 \\ &= 17671,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat Tekan 1} &= \frac{P_1}{A} \times \text{Faktor L/D} \\ &= \frac{487000}{17671,5} \times 1 \\ &= 27,559 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat Tekan 2} &= \frac{P_2}{A} \times \text{Faktor L/D} \\ &= \frac{493000}{17671,5} \times 1 \\ &= 27,898 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat Tekan 3} &= \frac{P_3}{A} \times \text{Faktor L/D} \\ &= \frac{484000}{17671,5} \times 1 \\ &= 27,389 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rata Rata} &= \frac{f'_{c1} + f'_{c2} + f'_{c3}}{3} \\ &= \frac{27,559 + 27,898 + 27,389}{3} \\ &= 27,615 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Kuat tekan beton benda uji silinder tersebut adalah:

$$\text{Kuat Tekan 1} = 27,559 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,559 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat Tekan 2} = 27,898 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,898 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat Tekan 3} = 27,389 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,389 \text{ MPa}$$

$$\text{Rata - Rata} = 27,615 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 27,615 \text{ MPa}$$

Variasi C; Fly Ash 20%; Crystalline Powder 3%

Diketahui:

$$\text{Diameter Benda Uji} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang Benda Uji} = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Beban Maksimum 1} = 499000 \text{ N}$$

$$\text{Beban Maksimum 2} = 501000 \text{ N}$$

$$\text{Beban Maksimum 3} = 505000 \text{ N}$$

$$L/D = 2 \text{ (Faktor Koreksi = 1)}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas Penampang} &= \pi \times d^2 \\
 &= 3,1416 \times 150^2 \\
 &= 17671,5 \text{ mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 1} &= \frac{P_1}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{499000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 28,238 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= \frac{P_2}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{501000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 28,351 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= \frac{P_3}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{505000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 28,577 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Rata Rata} &= \frac{f'c_1 + f'c_2 + f'c_3}{3} \\
 &= \frac{28,238 + 28,351 + 28,577}{3} \\
 &= 28,389 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Kuat tekan beton benda uji silinder tersebut adalah:

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat Tekan 1} &= 28,238 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 28,238 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= 28,351 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 28,351 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= 28,577 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 28,577 \text{ MPa} \\
 \text{Rata - Rata} &= 28,389 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 28,389 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Variasi D; Fly Ash 30%; Crystalline Powder 4%

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter Benda Uji} &= 150 \text{ mm} \\
 \text{Panjang Benda Uji} &= 300 \text{ mm} \\
 \text{Beban Maksimum 1} &= 470000 \text{ N} \\
 \text{Beban Maksimum 2} &= 466000 \text{ N} \\
 \text{Beban Maksimum 3} &= 451000 \text{ N} \\
 \text{L/D} &= 2 \text{ (Faktor Koreksi = 1)} \\
 \text{Luas Penampang} &= \pi \times d^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= 3,1416 \times 150^2 \\
 &= 17671,5 \text{ mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 1} &= \frac{P_1}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{470000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 26,597 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= \frac{P_2}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{466000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 26,370 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= \frac{P_3}{A} \times \text{Faktor L/D} \\
 &= \frac{451000}{17671,5} \times 1 \\
 &= 25,521 \text{ N/mm}^2 \\
 \text{Rata Rata} &= \frac{f'_{c1} + f'_{c2} + f'_{c3}}{3} \\
 &= \frac{26,597 + 26,370 + 25,521}{3} \\
 &= 26,163 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

Kuat tekan beton benda uji silinder tersebut adalah:

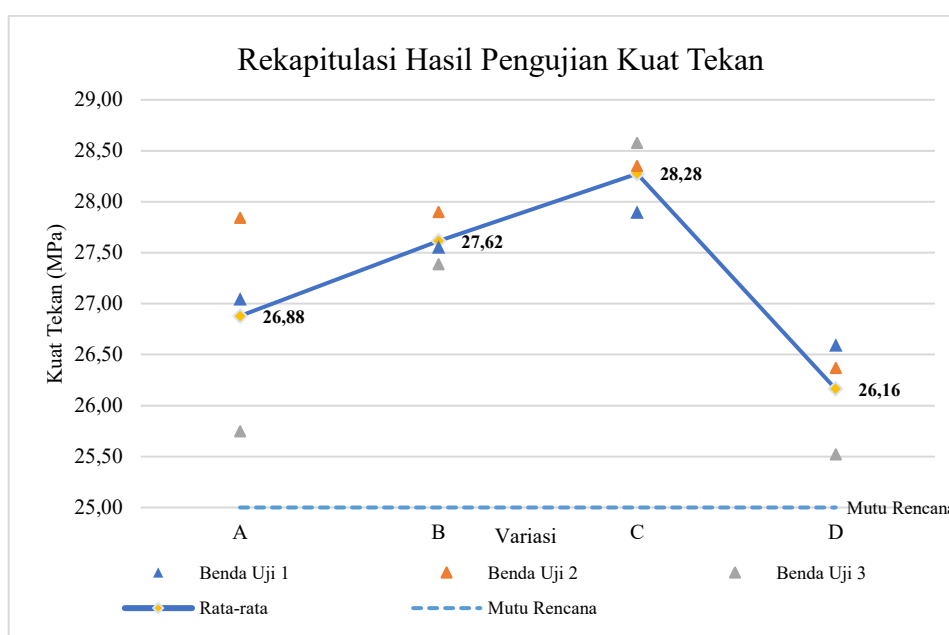
$$\begin{aligned}
 \text{Kuat Tekan 1} &= 26,597 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 26,597 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 2} &= 26,370 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 26,370 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat Tekan 3} &= 25,521 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 25,521 \text{ MPa} \\
 \text{Rata - Rata} &= 26,163 \text{ N/mm}^2 \text{ atau } 26,163 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan beton integral pada Variasi A (0%; 0%) rata – rata sebesar 26,88 MPa dan digunakan sebagai beton kontrol. Variasi B (10%; 2%) meningkatkan kuat tekan rata – rata menjadi 27,615 MPa atau naik 2,73% dibandingkan Variasi A. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Kushartomo dkk., t.t.) yang menyatakan bahwa penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Variasi C (20%; 3%) menghasilkan kuat tekan tertinggi dengan rata – rata sebesar 28,389 MPa atau meningkat 5,61% dibandingkan Variasi A (0%; 0%). Peningkatan ini menunjukkan bahwa variasi C (20%; 3%) merupakan kondisi optimum yang mampu meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi porositas.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Shelote dkk., 2023 dan Suwondo dkk., 2024 yang menyatakan bahwa kadar optimum *fly ash* berada pada 20% dan kadar penambahan *crystalline powder waterproofing*.

Pada Variasi D (30%; 4%), kuat tekan menurun rata – rata menjadi 26,163 MPa atau 2,67% lebih rendah dibandingkan Variasi A (0%; 0%). Penurunan ini diduga disebabkan oleh tingginya kadar *fly ash* yang mengurangi jumlah semen efektif dalam proses hidrasi. Hasil tersebut sesuai dengan Kushartomo dkk., t.t. yang menyatakan bahwa penggunaan *fly ash* melebihi kadar 20% dapat menurunkan kuat tekan beton.



Gambar 4.41. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan

Berdasarkan hasil pengujian, variasi optimum diperoleh pada Variasi C dengan kuat tekan sebesar 28,389 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* pada kadar optimum mampu meningkatkan kepadatan mikrostruktur dan kuat tekan beton integral.

#### 4.2.3 Hasil Pengujian Kecedapan Air

Pengujian kekedapan air dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan masuknya air ke dalam pori-pori beton. Parameter yang diamati pada pengujian ini adalah kedalaman penetrasi air yang terjadi pada benda uji. Semakin kecil kedalaman penetrasi air yang diperoleh, semakin baik tingkat kekedapan beton karena menunjukkan struktur beton yang lebih rapat dan memiliki porositas

yang lebih rendah. Pengujian ini mengacu pada kriteria yang ditetapkan dalam ACI 350.1-10 sebagai acuan evaluasi kekedapan beton yang digunakan pada struktur yang berhubungan langsung dengan air. Dengan rumus sebagai berikut:

$$\text{Kehilangan Air (\%)} = \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100 \%$$

Variasi A; Fly Ash 0%; Crystalline Powder 0%

$$\begin{aligned} \% \text{ Kehilangan} &= \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100\% \\ &= \frac{15 - 9,5}{15} \times 100\% \\ &= 36,667 \% \end{aligned}$$

Variasi B; Fly Ash 10%; Crystalline Powder 2%

$$\begin{aligned} \% \text{ Kehilangan} &= \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100\% \\ &= \frac{15 - 10,6}{15} \times 100\% \\ &= 29,333 \% \end{aligned}$$

Variasi C; Fly Ash 20%; Crystalline Powder 3%

$$\begin{aligned} \% \text{ Kehilangan} &= \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100\% \\ &= \frac{15 - 11}{15} \times 100\% \\ &= 26,667 \% \end{aligned}$$

Variasi D; Fly Ash 30%; Crystalline Powder 4%

$$\begin{aligned} \% \text{ Kehilangan} &= \frac{H_0 - H_t}{H_0} \times 100\% \\ &= \frac{15 - 11,6}{15} \times 100\% \\ &= 22,667 \% \end{aligned}$$

Tabel 4.4. Hasil Pemeriksaan Dimensi Prototipe

Variasi	Panjang	Lebar	Tinggi	Panjang	Lebar	Tinggi	Keterangan	Toleransi (cm)
	Luar (cm)	Luar (cm)	Luar (cm)	Dalam (cm)	Dalam (cm)	Dalam (cm)		
A	19,7	19,8	19,8	12,9	12,8	16,4	Memenuhi	±0,5 (ACI 117-10)
B	19,9	19,7	19,6	12,9	12,7	16,3	Memenuhi	
C	19,7	19,9	19,9	12,7	12,9	16,3	Memenuhi	
D	19,8	19,7	19,9	12,8	12,9	16,2	Memenuhi	

Tabel 4.5. Rekapitulasi Kecedapan Air

Variasi	Persentase Penurunan (%)
Variasi A; <i>Fly Ash</i> 0%; <i>Crystalline Powder</i> 0%	36,67
Variasi B; <i>Fly Ash</i> 10%; <i>Crystalline Powder</i> 2%	29,33
Variasi C; <i>Fly Ash</i> 20%; <i>Crystalline Powder</i> 3%	26,67
Variasi D; <i>Fly Ash</i> 30%; <i>Crystalline Powder</i> 4%	22,67



Gambar 4.42. Tinggi Sisa Muka Air Variasi A



Gambar 4.43. Tinggi Sisa Muka Air Variasi B



Gambar 4.44. Tinggi Sisa Muka Air Variasi C

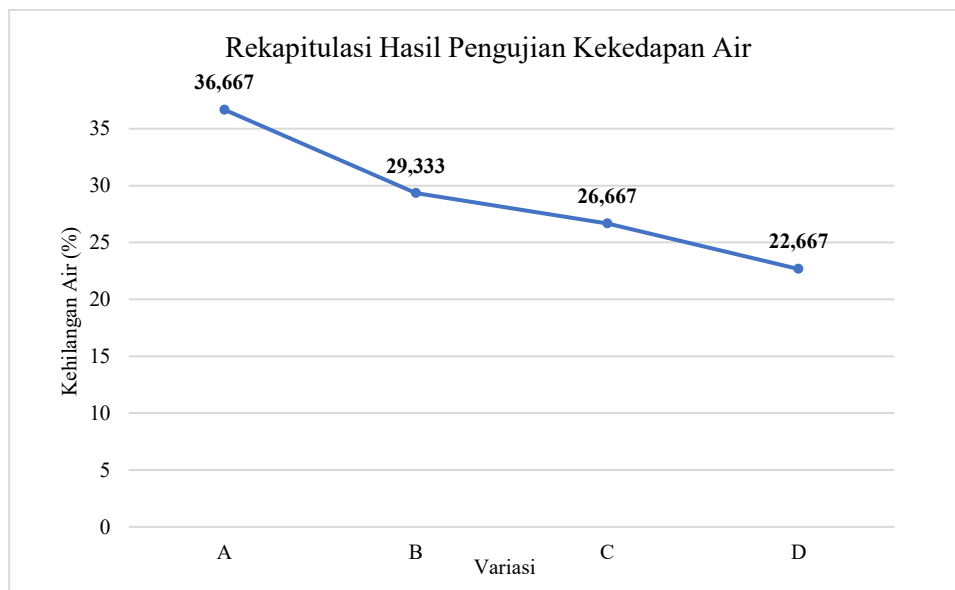


Gambar 4.45. Tinggi Sisa Muka Air Variasi D

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tinggi sisa muka air pada Variasi A (0%; 0%) sebesar 9,5 cm dan digunakan sebagai kontrol. Variasi B (10%; 2%) menghasilkan tinggi sisa muka air sebesar 10,6 cm atau meningkat 20% dibandingkan Variasi A (0%; 0%). Peningkatan ini diduga terjadi akibat kombinasi *fly ash* yang membantu mengurangi porositas dan meningkatkan kepadatan beton serta *crystalline powder waterproofing* yang membentuk kristal aktif pada pori-pori beton sehingga jalur masuk air menjadi lebih terbatas (Kushartomo dkk., t.t.; Pazderka, 2017).

Variasi C (20%; 3%) menghasilkan tinggi sisa muka air sebesar 11 cm atau meningkat 27,27% dibandingkan Variasi A (0%; 0%). Hasil ini menunjukkan bahwa Variasi C (20%; 3%) memberikan ketahanan yang lebih baik terhadap perembesan air. Peningkatan tersebut diduga terjadi akibat kombinasi *fly ash* yang meningkatkan kepadatan struktur beton dan *crystalline powder waterproofing* yang membentuk kristal aktif pada pori-pori beton sehingga jalur penetrasi air menjadi lebih terbatas. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Shelote dkk., 2023; Agustiana dkk., 2022).

Variasi D (30%; 4%) menunjukkan tinggi sisa muka air terbesar, yaitu 11,6 cm atau meningkat 38,18% dibandingkan Variasi A (0%; 0%). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi *fly ash* dan *crystalline powder* mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air melalui peningkatan kepadatan struktur beton dan pembentukan kristal aktif pada pori-pori beton, sehingga jalur perembesan air menjadi lebih terbatas (Shelote dkk., 2023; Pazderka, 2017)



Gambar 4.46. Grafik Hasil Pengujian Kecedapan Air

Berdasarkan hasil pengujian kekedapan air, diketahui bahwa substitusi *fly ash* dan penambahan *crystalline powder waterproofing* berpengaruh terhadap kemampuan beton dalam menahan kehilangan air. Semakin rendah persentase kehilangan air yang terjadi, semakin baik tingkat kekedapan beton terhadap rembesan. Variasi optimum diperoleh pada campuran variasi D (30%; 4%) yang menghasilkan persentase kehilangan air terendah sebesar 22,667%. Peningkatan kekedapan ini dipengaruhi oleh terbentuknya kristal aktif dari *crystalline powder waterproofing* yang mengisi pori-pori beton sehingga jalur penetrasi air menjadi lebih kecil (Pazderka, 2017; Agustiana dkk., 2022). Hasil pengujian juga menunjukkan peningkatan sisa tinggi muka air dari 9,5 cm pada Variasi A (0%; 0%) menjadi 10,6 cm pada Variasi B (10%; 2%), 11,0 cm pada Variasi C (20%; 3%), dan 11,6 cm pada Variasi D (30%; 4%). Sesuai ACI 350.1-10, peningkatan sisa tinggi muka air tersebut menunjukkan bahwa ketahanan beton terhadap perembesan air semakin baik, sehingga dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* berkontribusi dalam meningkatkan kekedapan beton integral (Suwondo dkk., 2023)

#### 4.2.4 Hasil Pengujian Penyerapan Air

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur persentase porositas atau daya serap air pada beton berdasarkan SNI 03-6433:2000, yang berfungsi sebagai indikator

kepadatan material serta ketahanan beton terhadap penetrasi air. Dengan rumus sebagai berikut:

$$\% \text{ Absorpsi} = \frac{B - A}{A} \times 100 \%$$

Variasi A; Fly Ash 0%; Crystalline Powder 0%

$$\begin{aligned} \% \text{ Absorpsi} &= \frac{B-A}{A} \times 100\% \\ &= \frac{12,840-12,750}{12,750} \times 100\% \\ &= 0,706 \%$$

Variasi B; Fly Ash 10%; Crystalline Powder 2%

$$\begin{aligned} \% \text{ Absorpsi} &= \frac{B-A}{A} \times 100\% \\ &= \frac{12,420-12,370}{12,370} \times 100\% \\ &= 0,404\% \end{aligned}$$

Variasi C; Fly Ash 20%; Crystalline Powder 3%

$$\begin{aligned} \% \text{ Absorpsi} &= \frac{B-A}{A} \times 100\% \\ &= \frac{12,090-12,070}{12,070} \times 100\% \\ &= 0,166 \%$$

Variasi D; Fly Ash 30%; Crystalline Powder 4%

$$\begin{aligned} \% \text{ Absorpsi} &= \frac{B-A}{A} \times 100\% \\ &= \frac{12,840-12,825}{12,825} \times 100\% \\ &= 0,117\% \end{aligned}$$

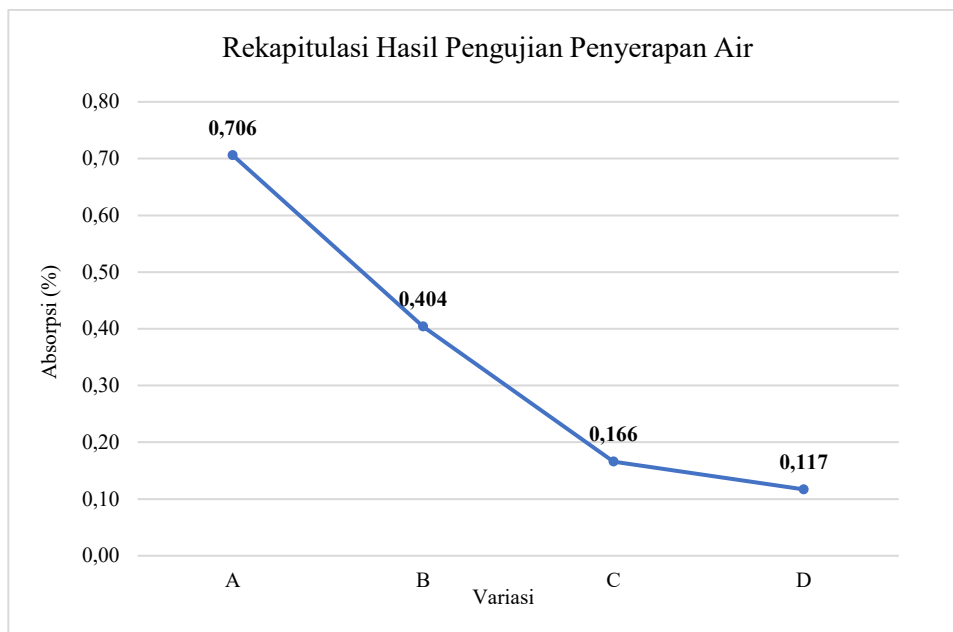
Nilai penyerapan air beton integral pada Variasi A (0%; 0%) sebesar 0,706% dan digunakan sebagai pembanding dalam penelitian ini. Pada Variasi B (10%; 2%), nilai penyerapan air menurun menjadi 0,404%. Penurunan ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan tersebut mampu meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi jumlah pori yang dapat menyerap air (Shelote dkk., 2023; Pazderka, 2017).

Variasi C (20%; 3%) menghasilkan nilai penyerapan air sebesar 0,166%, atau lebih rendah dibandingkan Variasi B (10%; 2%). Hasil ini menunjukkan bahwa pada kadar optimum, *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* mampu

membentuk struktur beton yang lebih rapat sehingga penyerapan air semakin berkurang. Sejalan dengan penelitian (Songkhla dkk., 2024; Pazderka, 2017)

Pada Variasi D (30%; 4%) nilai penyerapan air kembali menurun menjadi 0,117%. Namun, penurunan yang terjadi tidak sebesar pada variasi sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun kombinasi fly ash dan crystalline powder masih mampu meningkatkan kedapatan beton, penggunaan fly ash yang terlalu tinggi mulai mengurangi efektivitas hidrasi semen sehingga perbaikan ketahanan terhadap penyerapan air menjadi kurang optimal (Kushartomo dkk., t.t; Pazderka, 2017.)

Berdasarkan hasil pengujian, diketahui bahwa substitusi *fly ash* dan penambahan *crystalline powder waterproofing* berpengaruh terhadap nilai penyerapan air beton integral. Semakin rendah nilai penyerapan air, semakin padat struktur beton dan semakin baik ketahanannya terhadap penetrasi air. Variasi optimum diperoleh pada variasi D (30%; 4%) yang menghasilkan nilai penyerapan air terendah sebesar 0,117%. Penurunan nilai penyerapan air ini dipengaruhi oleh reaksi pozzolanik *fly ash* yang memperbaiki mikrostruktur pasta semen serta pembentukan kristal aktif dari *crystalline powder waterproofing* yang mengisi pori-pori beton sehingga jalur masuk air menjadi lebih kecil (Shelote dkk., 2023; Pazderka, 2017). Berdasarkan SNI 03-6433-2000, pengujian penyerapan air digunakan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menyerap air melalui pori-porinya. Pada penelitian ini, nilai penyerapan air menurun dari 0,706% pada Variasi A (0%; 0%) menjadi 0,404% pada Variasi B (10%; 2%), 0,166% pada Variasi C (20%; 3%), dan 0,117% pada Variasi D (30%; 4%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* pada kadar optimum mampu meningkatkan kerapatan beton sehingga menghasilkan ketahanan yang lebih baik terhadap penyerapan air dibandingkan beton normal (Agustiana dkk., 2022; Pazderka, 2017).



Gambar 4.47. Grafik Hasil Pengujian Penyerapan Air

### 4.3 Perbandingan Biaya

Anggaran biaya pembuatan beton integral dihitung berdasarkan kebutuhan material yang digunakan pada setiap sampel. Perhitungan tersebut mencakup penggunaan agregat kasar, agregat halus, semen, *fly ash*, *crystalline powder waterproofing*, dan air sebagai bahan penyusun campuran beton. Volume pekerjaan beton integral dalam Rencana Anggaran Biaya dihitung berdasarkan tandon air cor tanam yang digunakan oleh peneliti sebagai sampel.

Data harga material diperoleh melalui survei pada tiga toko bangunan sebagai dasar penyusunan analisis biaya. Survei dilakukan untuk mendapatkan harga aktual setiap material yang digunakan pada masing-masing variasi campuran sehingga perhitungan biaya dapat dilakukan secara lebih akurat. Material yang disurvei meliputi agregat kasar, agregat halus, semen, *fly ash*, *crystalline powder waterproofing*, dan air yang digunakan dalam pembuatan beton integral.

Tabel 4.6. Lokasi Toko Material

No	Nama Toko Bangunan	Alamat	Keterangan
1	TB. Tanjung Jati	Jl. Durian Raya, Pedalangan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah 50268	Material Bangunan

No	Nama Toko Bangunan	Alamat	Keterangan
2	TB. Merapi	Jl. Durian Raya No.54, Srandol Wetan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah 50263	Material Bangunan
3	TB. Lewi	Jl. Banjarsari No.16 B, Pedalangan, Kec. Banyumanik, Kota Semarang, Jawa Tengah 50268	Material Bangunan
4	Pengepul <i>Fly Ash</i>	WFX7+5W5 Mangunharjo, Kota Semarang, Jawa Tengah	<i>Fly Ash</i> PLTU Batang
5	PT. Kanaka Chemical Indonesia	Jalan Raya Perum Korpri, Blok B2 No. 18, Suradita, Cisauk, Banten – Indonesia	<i>Hydromix</i> <i>Crystalline</i> <i>Powder</i>

Kebutuhan banyaknya material yang digunakan dihitung berdasarkan komposisi variasi uji. Sedangkan perhitungan 1 m<sup>3</sup>, didapatkan dari perhitungan *job mix design*:

Tabel 4.7. Kebutuhan Bahan Beton Integral

	A	B	C	D
Variasi (Kg)	0% FA; 0% CP	10% FA; 2% CP	20% FA; 3% CP	30% FA; 4% CP
Agregat Kasar	65,72	65,72	65,72	65,72
Agregat Halus	49,65	49,65	49,65	49,65
Semen	24,18	21,76	19,34	16,92
<i>Fly Ash</i>	0,00	2,42	4,84	7,25
<i>Crystalline Powder</i>	0,00	0,44	0,58	0,68
Air	14,75	14,75	14,75	14,75

\*FA = *Fly Ash*, CP = *Crystalline Powder*

Perhitungan biaya material beton integral menggunakan harga satuan bahan yang diperoleh dari hasil survei dan direkapitulasi pada Lampiran 3. Harga satuan tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis biaya campuran beton integral untuk setiap variasi penelitian. Rekapitulasi harga satuan material yang digunakan disajikan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.8. Harga Satuan Biaya

No	Material	Satuan	Harga Satuan (Rp)			Harga Bahan Digunakan (Rp)
1	Agregat Kasar	1 Kg	383	280	333	332
2	Agregat Halus	1 Kg	313	263	300	292
3	Semen	1 Kg	1.400	1.425	1.400	1.408
4	<i>Fly Ash</i>	1 Kg	500	500	500	500
5	<i>Crystalline Powder</i>	1 Kg	50.000	50.000	50.000	50.000
6	Air	1 Liter	6	6	6	6

1. Beton Integral Variasi A; *Fly Ash* 0%; *Crystalline Powder* 0%

Tabel 4.9. Rancangan Biaya Beton Integral Variasi A

No	Material	Kebutuhan per m <sup>3</sup>	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Agregat Kasar	1028,34	Kg	332	341.637,32
2	Agregat Halus	776,91	Kg	292	226.597,55
3	Semen	378,31	Kg	1.408	532.786
4	<i>Fly Ash</i>	0	Kg	500	0
5	<i>Crystalline Powder</i>	0	Kg	50.000	0
6	Air	230,77	Liter	6	1.384,61
Total Biaya					1.102.405,69

Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh harga beton integral variasi A dengan volume 1 m<sup>3</sup> pada komposisi *fly ash* 0% dan *crystalline powder* 0% sebesar Rp1.102.405,69.

2. Beton Integral Variasi B; *Fly Ash* 10%; *Crystalline Powder* 2%

Tabel 4.10. Rancangan Biaya Beton Integral Variasi B

No	Material	Kebutuhan per m <sup>3</sup>	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Agregat Kasar	1028,34	Kg	332	341.637,32
2	Agregat Halus	776,91	Kg	292	226.597,55
3	Semen	340,48	Kg	1.408	479.507,58

4	<i>Fly Ash</i>	37,83	Kg	500	18.915,49
5	<i>Crystalline Powder</i>	6,81	Kg	50.000	340.478,776
6	Air	230,77	Liter	6	1.384,61
Total Biaya					1.408.521,31

Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh harga beton integral variasi B dengan volume 1 m<sup>3</sup> pada komposisi *fly ash* 10% dan *crystalline powder* 2% sebesar Rp1.408.521,31

### 3. Beton Integral Variasi C; *Fly Ash* 20%; *Crystalline Powder* 3%

Tabel 4.11. Rancangan Biaya Beton Integral Variasi C

No	Material	Kebutuhan per m <sup>3</sup>	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Agregat Kasar	1028,34	Kg	332	341.637,32
2	Agregat Halus	776,91	Kg	292	226.597,55
3	Semen	302,65	Kg	1.408	426.228,96
4	<i>Fly Ash</i>	75,66	Kg	500	37.830,97
5	<i>Crystalline Powder</i>	9,08	Kg	50.000	453.971,68
6	Air	230,77	Liter	6	1.384,61
Total Biaya					1.487.651,10

Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh harga beton integral variasi C dengan volume 1 m<sup>3</sup> pada komposisi *fly ash* 20% dan *crystalline powder waterproofing* 3% sebesar Rp1.487.651,10

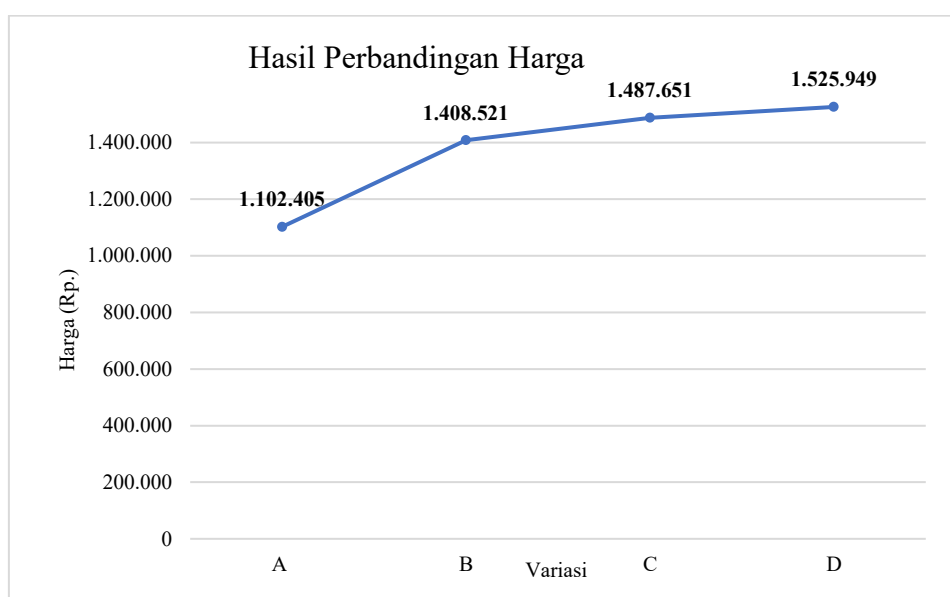
### 4. Beton Integral Variasi D; *Fly Ash* 30%; *Crystalline Powder* 4%

Tabel 4.12. Rancangan Biaya Beton Integral Variasi D

No	Material	Kebutuhan per m <sup>3</sup>	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
1	Agregat Kasar	1028,34	Kg	332	341.637,32
2	Agregat Halus	776,91	Kg	292	226.597,55
3	Semen	264,82	Kg	1.408	372.950,34
4	<i>Fly Ash</i>	113,49	Kg	500	56.663,62

No	Material	Kebutuhan per m <sup>3</sup>	Satuan	Harga Bahan yang Digunakan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
5	<i>Crystalline Powder</i>	10,59	Kg	50.000	529.663,62
6	Air	230,77	Liter	6	1.384,61
Total Biaya					1.528.949,91

Berdasarkan tabel tersebut, diperoleh harga beton integral variasi D dengan volume 1 m<sup>3</sup> pada komposisi *fly ash* 30% dan *crystalline powder* 4% sebesar Rp1.528.949,91



Gambar 4.48. Grafik Hasil Perbandingan Harga

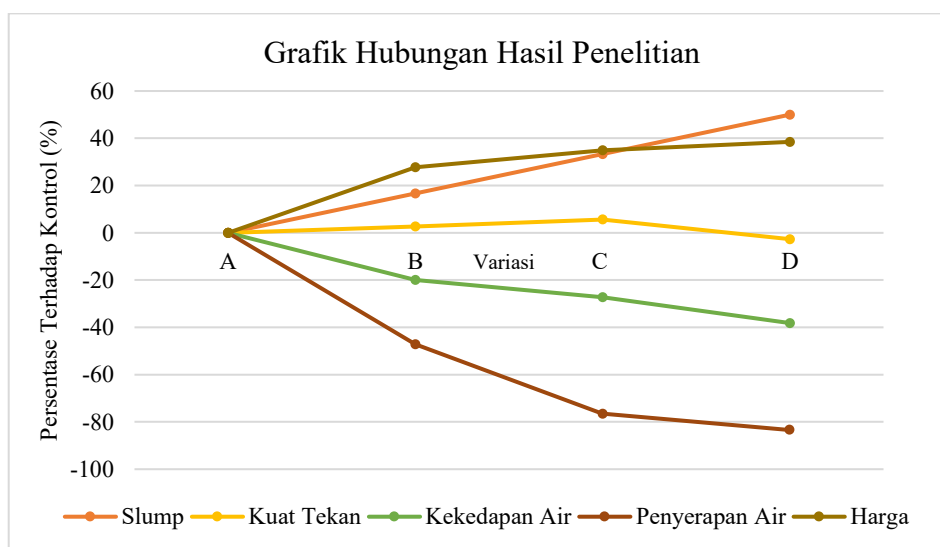
Berdasarkan grafik analisis harga per m<sup>3</sup>, diketahui bahwa variasi A dengan komposisi *fly ash* 0% dan *crystalline powder* 0% memiliki harga sebesar Rp1.102.405, variasi B dengan komposisi *fly ash* 10% dan *crystalline powder* 2% sebesar Rp1.408.521, variasi C dengan komposisi *fly ash* 20% dan *crystalline powder* 3% sebesar Rp1.487.651, dan variasi D dengan komposisi *fly ash* 30% dan *crystalline powder* 4% sebesar Rp1.525.949. Dari data tersebut terlihat bahwa penambahan material *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* berpengaruh terhadap peningkatan harga beton integral per m<sup>3</sup>

#### 4.4 Analisis Keseluruhan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, setiap variasi campuran menunjukkan karakteristik yang terhadap nilai *slump*, kuat tekan, permeabilitas, daya serap air, dan biaya produksi. Oleh karena itu, diperlukan analisis secara menyeluruh untuk membandingkan kinerja masing-masing variasi dan menentukan campuran yang memberikan keseimbangan terbaik antara aspek teknis dan ekonomis.

Tabel 4.13. Persentase Hubungan Hasil Penelitian

Jenis Pengujian	Variasi Beton Integral			
	A (0%; 0%)	B (10%; 2%)	C (20%; 3%)	D (30%; 4%)
<i>Slump</i> (%)	0	+16,67	+33,33	+50,00
Kuat Tekan (%)	0	+2,73	+5,61	-2,67
Kekedapan Air (%)	0	-20,00	-27,27	-38,18
Penyerapan Air (%)	0	-47,22	-76,49	-83,43
Harga (%)	0	+27,77	+34,95	+38,48



Gambar 4.49. Grafik Hasil Penelitian Beton Integral

Berdasarkan rekapitulasi hasil pengujian, penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* memberikan pengaruh terhadap karakteristik beton integral yang meliputi nilai *slump*, kuat tekan, permeabilitas, daya serap air, dan biaya

produksi. Hasil *slump test* menunjukkan adanya peningkatan nilai *slump* pada seluruh variasi campuran dibandingkan beton kontrol. Variasi B (10%; 2%) mengalami peningkatan sebesar 16,67%, Variasi C (20%; 3%) sebesar 33,33%, dan Variasi D (30%; 4%) sebesar 50%. Peningkatan tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* mampu meningkatkan *workability* beton. Pada pengujian kuat tekan, Variasi B (10%; 2%) dan Variasi C (20%; 3%) mengalami peningkatan masing-masing sebesar 2,73% dan 5,61% dibandingkan beton kontrol, sedangkan Variasi D (30%; 4%) mengalami penurunan sebesar 2,67%. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan kedua bahan pada kadar tertentu mampu meningkatkan kuat tekan beton, namun penambahan yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan kekuatan.

Hasil pengujian kekedapan air menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan beton terhadap rembesan air. Dibandingkan dengan beton kontrol, nilai sisa tinggi muka air pada Variasi B (10%; 2%) meningkat sebesar 20%, Variasi C (20%; 3%) sebesar 27,27%, dan Variasi D (30%; 4%) sebesar 38,18%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan mampu mengurangi kehilangan air sehingga beton memiliki tingkat kekedapan yang lebih baik.

Pada pengujian penyerapan air, seluruh variasi campuran menunjukkan penurunan nilai dibandingkan beton kontrol. Variasi B (10%; 2%) mengalami penurunan sebesar 42,74%, Variasi C (20%; 3%) sebesar 76,53%, dan Variasi D (30%; 4%) sebesar 83,43%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dan *crystalline powder waterproofing* mampu meningkatkan kerapatan beton sehingga kemampuan menyerap air menjadi lebih rendah.

Dari aspek ekonomis, biaya produksi beton integral mengalami peningkatan seiring bertambahnya kadar bahan tambah dalam campuran. Dibandingkan beton kontrol, biaya produksi pada Variasi B (10%; 2%) meningkat sebesar 27,77%, Variasi C (20%; 3%) sebesar 34,95%, dan Variasi D (30%; 4%) sebesar 38,48%. Peningkatan biaya tersebut merupakan konsekuensi dari penggunaan material tambahan yang diperlukan dalam pembuatan beton integral.

Peningkatan kuat tekan beton dipengaruhi oleh penggunaan *fly ash* sebagai substitusi sebagian semen yang menghasilkan reaksi pozzolanik sehingga

meningkatkan kepadatan beton (Kushartomo dkk., 2024) Selain itu, *crystalline powder waterproofing* membentuk kristal aktif yang mengisi pori-pori beton sehingga menghambat penetrasi air (Pazderka, 2017). Kombinasi keduanya meningkatkan kuat tekan, kedap air, serta menurunkan penyerapan air dibandingkan beton normal (Agustiana dkk., 2022; Suwondo dkk., 2023).