

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pengujian Material

Tahap pengujian terhadap material merupakan langkah awal yang paling krusial sebelum melakukan perancangan proporsi campuran beton (*Job Mix Design*). Seluruh material pembentuk beton, meliputi agregat halus (pasir) dan agregat kasar (batu pecah/kerikil), harus diuji terlebih dahulu karakteristik fisik dan mekanisnya di laboratorium. Pengujian ini dilakukan secara ketat dengan mengacu pada standar nasional dan internasional yang berlaku guna menjamin beton yang dihasilkan nantinya mampu mencapai kuat tekan target, memiliki durabilitas tinggi, serta mudah dikerjakan di lapangan.

4.1.1. Analisa Saringan

Pengujian analisa saringan berfungsi untuk mengevaluasi distribusi dimensi butiran pada agregat halus maupun agregat kasar. Berdasarkan spesifikasi SNI ASTM C136:2012, penentuan gradasi ini sangat krusial untuk memastikan material pengisi memiliki tingkat kemampatan yang tinggi, sehingga rongga antar-partikel dapat diminimalkan guna menghasilkan efisiensi penggunaan pasta semen pada campuran beton.

a. Agregat Halus

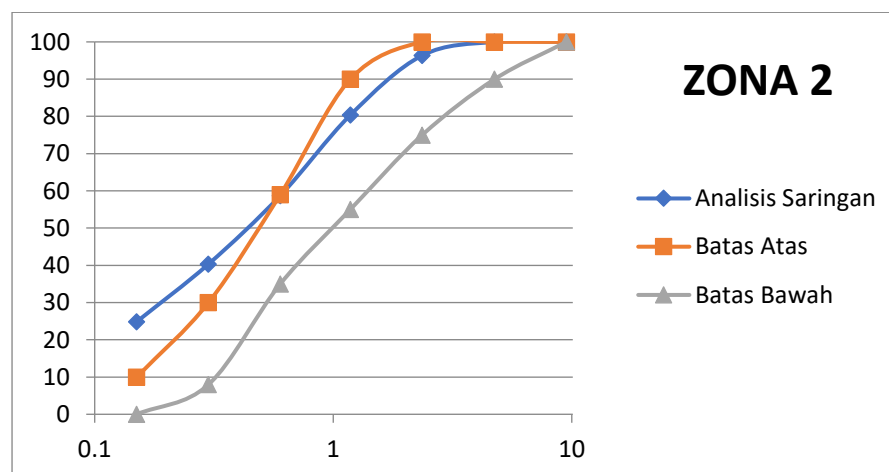
Sebelum pengujian dilakukan, sampel pasir dikeringkan terlebih dahulu dalam oven untuk menghilangkan kadar air bebasnya. Berikut adalah data awal dan hasil penimbangan agregat halus setelah melalui proses pengayakan:

Berat Sampel (W) : 500 gr

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Anilisa Saringan Agregat Halus

Ayakan	Berat tertahan (g)	Persentase		
		% Berat tertahan	% Kumulatif tertahan	% Lolos saringan
	(1)	(2) $= (1)/W_x \times 100\%$	(3)	(4)
4.75	6.00	1.20	1.20	
2.40	24.10	4.82	6.02	93.98
1.20	85.40	17.08	23.10	76.90
0.60	113.70	22.74	45.84	54.16
0.30	96.60	19.32	65.16	34.84
0.15	87.00	17.40	82.56	17.44
0.08	75.20	15.04	97.60	2.40
PAN	11.30	2.26	99.86	0.14
TOTAL (W1)	499.30	98.66		

Data hasil penimbangan material yang tertahan pada setiap tingkatan lubang ayakan standar dapat dilihat secara mendetail pada Tabel 4.1. Pada Gambar 4.1. juga menunjukkan grafik zona gradasi pasir yang tergolong dalam zona 2 yaitu pasir agak kasar.



Gambar 4.1. Grafik Zona Gradasi Agregat Halus

Dilakukan kontrol terhadap massa material yang hilang atau tercecer selama proses guncangan agregat halus selama pengujian analisa saringan, menggunakan Persamaan 3.1.

$$\text{Kontrol} = \frac{(W - W_{\text{awal}})}{W} \times 100\% < 2\%$$

$$\text{Kontrol} = \frac{(500,00 - 499,30)}{500,00} \times 100\% = 0,14\% < 2\% \text{ (memenuhi)}$$

b. Agregat Kasar

Pengujian sampel agregat kasar menggunakan volume contoh uji yang lebih besar guna mewakili perbedaan ukuran batuan pecah di lapangan. Karakteristik berat awal sampel kering dan hasil distribusinya setelah diayak tercantum pada Tabel 4.2.

Berat Sampel (W) : 5000 gr

Tabel 4.2. Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

Ayakan	Berat tertahan (g)	Persentase		
		% Berat tertahan	% Kumulatif tertahan	% Lolos saringan
	(1)	(2) = (1)/Wx100%	(3)	(4)
38.00	0.00	0.00	0.00	100.00
19.00	118.50	2.37	2.37	97.63
9.60	752.20	15.04	17.41	82.59
4.80	4090.50	81.81	99.22	0.78
2.40	2.90	0.06	99.28	0.72
1.20	0.80	0.02	99.30	0.70
0.60	0.90	0.02	99.32	0.68
0.30	0.80	0.02	99.33	0.67
0.15	1.10	0.02	99.35	0.65
0.08	6.70	0.13	99.49	0.51
PAN	24.60	0.49	99.98	0.02
TOTAL (W1)	4999.00	99.98		

Dilakukan kontrol terhadap massa material yang hilang atau tercecer selama proses guncangan agregat halus selama pengujian analisa saringan, menggunakan Persamaan 3.1.

$$\text{Kontrol} = \frac{(W - W_{\text{awal}})}{W} \times 100\% < 2\%$$

$$\text{Kontrol} = \frac{(5000,00 - 4999,00)}{5000,00} \times 100\% = 0,02\% < 3\% \text{ (memenuhi)}$$

c. Hasil analisis ayak/gradasi agregat

Untuk menentukan apakah karakteristik sebaran butiran dari kedua agregat di atas layak digunakan dalam rancangan adukan beton, persentase lolos kumulatif dari hasil uji laboratorium harus disandingkan langsung dengan batas standar teoritis SNI 03-2834-2000. Zona gradasi ini dirangkum secara sistematis pada Tabel 4.3. di bawah ini:

Tabel 4.3. Gradasi Agregat

Ayakan (mm)	Persen lewat kumulatif		Persen tinggal kumulatif		Batas gradasi	
	AH	AK	AH	AK	Pasir zona 2	Kerikil 4.8-19 mm
38.00		100.00		0.00		95 - 100
19.00		97.63		2.37		37 - 70
9.60		82.59		17.41	100.00	10 - 40
4.80	98.80	0.78	1.20	99.22	90 - 100	0 - 5
2.40	93.98	0.72	6.02	99.28	75 - 100	
1.20	76.90	0.70	23.10	99.30	55 - 90	
0.60	54.16	0.68	45.84	99.32	35 - 59	
0.30	34.84	0.67	65.16	99.33	8 - 30	
0.15	17.44	0.65	82.56	99.35	0 - 10	
Jumlah kumulatif tinggal			223.88	615.59		

Sebagaimana pada Persamaan 3.2:

$$\text{Fineness Modulus (FM)} = \frac{\Sigma(\% \text{ kumulatif tertahan})}{100}$$

- Agregat Halus

$$\frac{223,88}{100} = 2,24$$

Syarat FM agregat halus berada pada rentang 1,50 – 3,80, maka agregat halus pada pengujian analisa saringan ini, yaitu 2,24, memenuhi syarat.

- Agregat Kasar

$$\frac{615,59}{100} = 6,16$$

Syarat FM agregat kasar berada pada rentang 6,00 – 7,10, maka agregat kasar pada pengujian analisa saringan ini, yaitu 6,16, memenuhi syarat.

d. Analisa dan Simpulan

- Agregat Halus

Nilai FM agregat halus diperoleh sebesar 2,24. Nilai tersebut memenuhi persyaratan mutu agregat halus dengan rentang $1,50 \leq FM \leq 3,80$, sehingga pasir yang digunakan dapat dikategorikan sebagai pasir halus menuju sedang. Berdasarkan kurva gradasi pada Tabel IV.3, distribusi butiran agregat halus berada pada Zona 2, yaitu kategori pasir agak kasar atau sedang yang umum digunakan pada campuran beton struktural.

- Agregat Kasar

Nilai modulus kehalusan agregat kasar diperoleh sebesar 6,16. Hasil tersebut telah memenuhi ketentuan standar dengan rentang $6,00 \leq FM \leq 7,10$, yang menunjukkan bahwa distribusi ukuran butiran agregat kasar relatif seragam dengan ukuran nominal maksimum sebesar 19 mm.

- Kesesuaian Spesifikasi

Persentase kehilangan material selama proses pengayakan pada agregat halus maupun agregat kasar berada di bawah batas toleransi maksimum sebesar 0,3%. Dengan demikian, hasil pengujian analisa saringan dinyatakan valid dan dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan proporsi campuran beton pada tahap *Job Mix Design*.

4.1.2. Kadar Lumpur

Dilakukannya uji kadar lumpur berfungsi untuk mengetahui jumlah material halus yang terkandung pada agregat sebelum digunakan sebagai bahan penyusun beton. Agregat yang memiliki kandungan lumpur berlebih dapat memengaruhi kualitas

beton karena dapat mengurangi kemampuan ikat antara pasta semen dan agregat. Hasil pengujian kadar lumpur diperoleh berdasarkan perbandingan berat agregat sebelum dan setelah proses pencucian. Hasil pengujian dihitung menggunakan persamaan 3.3.

a. Agregat Halus

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{W - W_1}{W} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{500 - 425,7}{500} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Lumpur} = 14,86\% > 5\% \text{ (tidak memenuhi)}$$

b. Agregat Kasar

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{W - W_1}{W} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{2500 - 2485}{2500} \times 100\%$$

$$\text{Kadar Lumpur} = 0,6\% < 1\% \text{ (memenuhi)}$$

c. Analisa dan Simpulan

- Pada pengujian analisa saringan juga dilakukan pengamatan terhadap material halus yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm). Namun, material halus yang melekat pada permukaan agregat belum seluruhnya dapat terpisahkan hanya melalui proses pengayakan. Oleh karena itu, dilakukan pengujian kadar lumpur dengan metode pencucian berdasarkan SNI ASTM C117:2012 untuk mengetahui jumlah material halus yang menempel pada agregat secara lebih spesifik. Pada metode ini, proses pencucian membantu melepaskan partikel halus yang melekat sehingga kadar lumpur dapat dihitung berdasarkan kehilangan berat agregat sebelum dan setelah pencucian.
- Pada pengujian agregat halus, didapat kadar lumpur sebesar 14,86% yang melebihi batas maksimum sebesar 5%, oleh karena itu pada tahap pembuatan benda uji, agregat halus terlebih dahulu melalui tahap pencucian hingga air hasil pencucian terlihat bersih.

- Hasil pengujian pada agregat kasar menunjukkan kadar lumpur sebesar 0,5%. Nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum kadar lumpur agregat kasar yaitu 1%, sehingga agregat kasar telah memenuhi persyaratan dan dapat digunakan sebagai material penyusun beton tanpa terlebih dahulu melalui proses pencucian.
- Tingginya kadar lumpur pada tumpukan pasir umumnya dipicu oleh kombinasi faktor cuaca ekstrem dan sistem penyimpanan yang kurang terencana, hujan deras di lokasi penambangan sering kali membawa limpasan lumpur dari perbukitan yang mencemari pasir saat pengambilan material, diperparah oleh kondisi penempatan bahan di laboratorium yang diletakkan langsung di atas tanah terbuka tanpa alas kedap air serta tidak diberi penutup terpal, sehingga saat hujan turun, air yang membawa endapan debu dan tanah dari lingkungan sekitar dengan mudah mengalir dan mengendap di dasar tumpukan pasir. Oleh karena itu, sebelum digunakan dalam pembuatan benda uji, agregat halus terlebih dahulu melalui proses pencucian secara berulang hingga air bilasan tampak jernih demi memastikan kadar lumpur memenuhi batas persyaratan.

4.1.3. Berat Jenis dan Absorpsi

Pengujian berat jenis dan penyerapan dilakukan untuk mengidentifikasi kerapatan massa padat dari partikel agregat serta mengukur volume pori internal yang dapat dijangkau oleh air. Dalam sistem perencanaan campuran beton, data Berat Jenis SSD berperan sebagai faktor konversi volume absolut, sedangkan nilai Absorpsi digunakan untuk melakukan koreksi kadar air bebas pada campuran beton segar agar nilai *water-cement ratio* (w/c) aktual di lapangan tidak bergeser.

a. Agregat Kasar

Pengujian agregat kasar ini dilakukan dengan metode penimbangan berat di udara bebas dan penimbangan berat semu di dalam air menggunakan bantuan alat keranjang kawat. Data pencatatan berat massa material dari hasil pengujian adalah sebagai berikut:

- Berat benda uji kering oven (Bk) : 2.960 gr
- Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD) : 3.010 gr
- Berat benda uji kering permukaan jenuh di dalam air (B) : 1.875 gr

Melalui substitusi nilai-nilai massa tersebut ke dalam rumus, diperoleh:

- Berat jenis curah (*Bulk Specific Gravity*) (Persamaan 3.4)

$$B_k = \frac{B_k}{SSD - B}$$

$$B_k = \frac{2.960}{3.010 - 1.875}$$

$$B_k = 2,61 \text{ gr}$$

- Berat jenis kering permukaan jenuh (Persamaan 3.5)

$$B_j = \frac{SSD}{SSD - B}$$

$$B_j = \frac{3.010}{3.010 - 1.875}$$

$$B_j = 2,65 \text{ gr}$$

- Berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*) (Persamaan 3.6)

$$B_a = \frac{B_k}{B_k - B}$$

$$B_a = \frac{2.960}{2.960 - 1.875}$$

$$B_a = 2,73 \text{ gr}$$

- Penyerapan (*Absorption*) (Persamaan 3.10)

$$\text{Penyerapan} = \frac{B_k - SSD}{SSD} \times 100\%$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{3.010 - 2.960}{2.960} \times 100\%$$

$$\text{Penyerapan} = 1,69\%$$

b. Agregat Halus

Aktivitas pengujian untuk agregat halus memanfaatkan media tabung piknometer guna menghitung volume perpindahan air oleh butiran pasir halus. Nilai berat yang didapatkan dari hasil pembacaan timbangan laboratorium meliputi:

- Berat benda uji kering oven (A) : 485 gr
- Berat piknometer + air (B) : 660 gr
- Berat piknometer + benda uji + air (C) : 960 gr

- Berat benda uji dalam keadaan kering permukaan jenuh (S) : 500 gr

Berdasarkan pengujian piknometer, didapatkan nilai berat jenis dan penyerapan agregat halus sebagai berikut:

- Berat jenis curah (*Bulk Specific Gravity*) (Persamaan 3.7)

$$B_k = \frac{A}{(B + 500 - C)}$$

$$B_k = \frac{485}{(660 + 500 - 960)}$$

$$B_k = 2,43 \text{ gr}$$

- Berat jenis kering permukaan jenuh (Persamaan 3.8)

$$B_j = \frac{500}{(B + 500 - C)}$$

$$B_j = \frac{500}{(660 + 500 - 960)}$$

$$B_j = 2,50 \text{ gr}$$

- Berat jenis semu (*Apparent Specific Gravity*) (Persamaan 3.9)

$$B_a = \frac{A}{(B + A - C)}$$

$$B_a = \frac{485}{(660 + 485 - 960)}$$

$$B_a = 2,62 \text{ gr}$$

- Penyerapan (*Absorption*) (Persamaan 11)

$$\text{Penyerapan} = \frac{S-A}{A} \times 100\%$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{500-485}{485} \times 100\%$$

$$\text{Penyerapan} = 3,09\%$$

c. Analisa dan Simpulan

- Hasil berat jenis SSD agregat kasar sebesar 2,64 dan agregat halus sebesar 2,50 masih berada dalam rentang normal agregat alami untuk beton struktural, yaitu antara 2,4–2,9. Nilai berat jenis SSD tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam perhitungan kebutuhan material pada *Job Mix Design* beton.
- Hasil pengujian penyerapan agregat kasar diperoleh sebesar 1,69%, sehingga masih memenuhi persyaratan agregat untuk campuran beton karena berada di bawah batas maksimum 4,0%. Sementara itu, hasil

penyerapan agregat halus sebesar 3,09% menunjukkan bahwa pasir memiliki tingkat porositas yang relatif lebih tinggi, namun masih berada dalam batas yang diperbolehkan untuk penggunaan beton normal.

- Besarnya nilai absorpsi agregat halus menunjukkan bahwa pasir mampu menyerap sebagian air pencampur selama proses pengadukan beton. Oleh karena itu, pada perencanaan campuran beton perlu dilakukan koreksi terhadap kebutuhan air agar jumlah air bebas dalam campuran tetap sesuai dengan nilai yang direncanakan, sehingga workability beton dapat terjaga saat proses pencampuran dan pengecoran dilakukan.

4.1.4. Berat Isi

Pengujian berat isi (*bulk density*) difungsikan untuk mengukur massa agregat kering yang menempati suatu ruang wadah tertentu dengan memperhitungkan persentase rongga udara antar-partikel. Data kekuatan densitas tumpukan ini memegang peranan vital pada Langkah ke-6 perhitungan Job Mix Design, di mana nilai berat isi ini menjadi parameter pengali utama untuk mengubah volume fsaksi agregat kasar kering menjadi kuantitas massa berat nyata (kg) per satuan meter kubik beton.

a. Agregat Kasar

Pengujian dilakukan dengan menggunakan bejana baja silinder standar. Dihitung menggunakan persamaan 3.12.

Berat wadah kosong (W1) : 5,890 kg

Berat wadah + agegrat (W2) : 21,635 kg

Volume wadah (V)

$$= \pi \times r^2 \times t$$

$$= \pi \times 12^2 \times 24$$

$$= 10851,84 \text{ cm}^3 = 0,01085 \text{ m}^3$$

Berat isi agregat

$$= \frac{W2-W1}{V}$$

$$= \frac{21,64-5,89}{0,01085}$$

$$= 1451 \text{ kg/m}^3$$

b. Analisa dan Simpulan

- Nilai berat isi kering padat agregat kasar diperoleh sebesar 1451 kg/m³. Nilai ini masih berada dalam rentang standar berat isi agregat untuk beton normal, yaitu sekitar 1400–1700 kg/m³, sehingga agregat kasar yang digunakan dinyatakan memenuhi syarat untuk campuran beton struktural.
- Nilai berat isi hasil pengujian laboratorium selanjutnya digunakan dalam perhitungan Job Mix Design, khususnya pada penentuan kebutuhan agregat kasar dalam campuran beton. Berdasarkan hasil perhitungan, dengan menggunakan estimasi volume agregat kasar sebesar 0,66 m³, diperoleh kebutuhan agregat kasar sebesar 957,60 kg untuk setiap 1 m³ campuran beton.

4.1.5. Rekapitulasi Hasil Pengujian Material

Rekapitulasi hasil uji material yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 4.4. Rekapitulasi ini memuat hasil pengujian karakteristik agregat halus dan agregat kasar yang menjadi dasar dalam penyusunan campuran beton pada penelitian ini.

Tabel 4.4. Rekapitulasi Hasil Uji Agregat

No.	Jenis Pengujian	Standar Uji	Hasil	Keterangan
Agregat Halus				
1	Berat jenis SSD	2,4 - 2,9 gr	2.50 gr	Memenuhi
	Berat jenis kering (bulk)	2,4 - 2,9 gr	2.43 gr	
	Berat jenis semu (apparent)	> SSD	2.62 gr	
	Absorpsi	≤ 5%	3.09%	
	Analisa saringan			
	Ukuran saringan (mm)			
	4.75	90 - 100	98.80%	
	2.36	75 - 100	93.98%	
	1.18	55 - 90	76.90%	

No.	Jenis Pengujian	Standar Uji	Hasil	Keterangan
	0.60	35 - 59	54.16%	
	0.30	8 - 30	34.84%	
	0.15	0 - 10	17.44%	
	Kadar Lumpur	$\leq 5\%$ ASTM C117:2012	14,86%	Tidak Memenuhi
	Agregat Kasar			
	Berat jenis SSD	2,4 - 2,9 gr	2.64 gr	
	Berat jenis kering (bulk)	2,4 - 2,9 gr	2.60 gr	
	Berat jenis semu (apparent)	$> \text{SSD}$	2.72 gr	
	Absorpsi	$\leq 3\%$	1.69%	
	Berat isi	SNI 03-4804-1998 dan ASTM C29/C29M	1451 kg/m ³	
2	Analisa saringan			Memenuhi
	Ukuran saringan (mm)			
	38.00	95 - 100	100%%	
	19.00	37 - 70	97.63%	
	9.60	10 - 40	82.59%	
	4.75	0 - 5	0.78%	
	Kadar Lumpur	$\leq 1\%$ ASTM C117:2012	0.60%	

Sebagian besar agregat halus dan agregat kasar telah memenuhi persyaratan standar yang digunakan sebagai acuan. Namun, pada pengujian kadar lumpur agregat halus diperoleh nilai sebesar 14,86% sehingga belum memenuhi batas maksimum 5%. Oleh karena itu, agregat halus harus melalui proses pencucian terlebih dahulu sebelum digunakan dalam campuran beton.

4.2. Perhitungan *Mix Design*

Perencanaan proporsi material beton per meter kubik dilakukan melalui prosedur *Job Mix Design*. Seluruh perhitungan yang digunakan mengacu pada ketentuan SNI 7656:2012 sebagai acuan baku dalam merancang campuran beton normal. Perencanaan ini juga mempertimbangkan Surat Edaran Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat mengenai penggunaan semen non-OPC sebagaimana tercantum pada Tabel 4.5 dan rekapitulasi pada Tabel 4.6.

Tabel 4.5. Perhitungan *Mix Design*

No	URAIAN	TABEL/GRAFIK/PERHITUNGAN	NILAI/HASIL	
A. Perhitungan per 1 m3 beton				
1	Kuat tekan yang disyaratkan (fc')	Ditetapkan 28 hari =	30,00	Mpa
2	Nilai koefisien (k)	Tabel 3.7. =	1,34	
3	Deviasi standar	Tabel 3.8. =	4.20	Mpa
4	Nilai tambah atau margin	$k * deviasi\ standar =$	5,63	Mpa
5	Kuat rata-rata yang ditargetkan (fcr)	$fc' + nilai\ tambah\ atau\ margin =$	35,63	Mpa
6	Jenis semen	Ditetapkan =	PCC	
7	Jenis agregat	halus =	alami	
		kasar =	Pecah	
8	Rasio air semen	Beton tanpa udara =	Berdasarkan fcr	
		kekuatan beton min (Tabel 3.9.) =	26,00	Mpa
		Kekuatan beton maks (Tabel 3.9.) =	36,00	MPa
		Rasio air semen min (Tabel 3.9.) =	0,50	
		Rasio air semen maks (Tabel 3.9.) =	0,60	
		Interpolasi (Persamaan 3.13.) =	0.50	
9	Target slump	Tabel 3.6. =	150-175	mm
10	Ukuran agregat maks	Data agregat =	19,00	mm
11	Kadar air bebas	Tabel 3.6., Beton tanpa udara =	216,00	kg
12	Jumlah semen	$Kadar\ air\ bebas / rasio\ air\ semen =$	428,83	kg
Dengan volume absolute				
	Berat jenis semen	$BJ\ semen =$	2960,00	kg/m3
13	Vol. semen	$Jumlah\ semen / BJ\ semen =$	0,14	m3
14	Vol. air	$Kadar\ air\ bebas / BJ\ air =$	0,22	m3
16	Kadar udara	Ditetapkan 2% =	0,02	m3
	Total		0,38	
17	Vol. agregat	$1 - (Vol.\ semen + Vol\ air + Kadar\ air) =$	0,62	m3
	Perhitungan agregat gabungan	% agregat halus =	0,39	
		% agregat kasar =	0,61	
18	Vol. agregat halus	$\% agregat\ halus * Vol.\ agregat =$	0,24	m3
19	Vol. agregat kasar	$\% agregat\ kasar * Vol.\ agregat =$	0,38	m3
	Berat jenis agregat halus	$BJ\ agregat\ halus =$	2500,00	kg/m3
	Berat jenis agregat kasar	$BJ\ agregat\ kasar =$	2650,00	kg/m3
20	Berat agregat halus	$Vol.\ agregat\ halus * BJ\ agregat\ halus =$	603,56	kg
21	Berat agregat kasar	$Vol.\ agregat\ kasar * BJ\ agregat\ kasar =$	1000,91	kg

Tabel 4.6. Rekapitulas *Mix Design* Beton

Material	Satuan	Beton Normal		Variasi 1		Variasi 2		Variasi 3	
		1 m ³	Benda Uji	1 m ³	Benda Uji	1 m ³	Benda Uji	1 m ³	Benda Uji
Semen	kg	428,83	11,97	407,39	11,37	385,95	10,77	364,51	10,17
Agregat Halus	kg	603,56	16,83	599,92	16,74	599,92	16,74	599,92	16,74
Agregat Kasar	kg	1.000,91	27,90	1.000,91	27,90	1.000,91	27,90	1.000,91	27,90
Air	kg	216,00	6,00	216,00	6,00	216,00	6,00	216,00	6,00
<i>Polypropylene fiber</i>	kg	-	-	3,64	0,09	3,64	0,09	3,64	0,09
<i>Calcined clay</i>	kg	-	-	21,44	0,06	42,88	1,20	64,32	1,80
Perbandingan proporsi komposisi		1 : 1,41 : 2,33 : 0,50		1 : 1,47 : 2,46 : 0,53 : 0,009 : 0,053		1 : 1,56 : 2,59 : 0,56 : 0,009 : 0,111		1 : 1,66 : 2,75 : 0,59 : 0,009 : 0,176	

Keterangan: Benda uji berupa silinder berukuran 15 x 30 cm sejumlah 3 buah dan balok 10 x 10 x 40 cm sejumlah 3 buah

Berdasarkan Tabel 4.5. tentang *Mix Design* Beton ditetapkan Nilai Koefisien (k) 1,34, angka tersebut didasari oleh SNI 2847:2019 untuk mengunci resiko kegagalan. Nilai koefisien sebesar 1,34 memastikan bahwa kemungkinan adanya hasil beton yang memiliki kekuatan dibawah dari mutu rencana dengan maksimal 10%. Sedangkan Nilai Standar Deviasi sebesar 4,20 juga merujuk pada SNI 2834:2019 yang dimana standar deviasi dengan rentang 3,5 – 4,5 dikategorikan sebagai kualitas lapangan yang baik. Nilai deviasi standar yang kecil tidak digunakan karena kualitas material dan keandalan alat belum terjamin sempurna. Kemudian, penyimpanan agregat (pasir dan kerikil) dilakukan di ruangan terbuka, sehingga kadar air dan kebersihan material sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sekitar. Untuk mengantisipasi ketidakpastian tersebut, ditetapkan nilai deviasi standar yang realistis agar menghasilkan nilai tambah (margin) yang aman dalam perencanaan campuran.

Penentuan nilai rasio air semen diperoleh berdasarkan hasil interpolasi dari hubungan yang terjadi antara kekuatan beton (minimum dan maksimum) dengan rasio air semen (minimum dan maksimum) pada Tabel 4.6. *Mix Design* Beton. Langkah interpolasi ini dilakukan untuk mendapatkan nilai fas yang paling akurat sesuai dengan target kuat tekan (f_{cr}).

Berikut adalah rincian perhitungan interpolasi (Persamaan 3.13) tersebut:

$$\text{Kuat tekan beton minimum } (x_1) = 36 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat tekan beton maksimum } (x_2) = 36 \text{ MPa}$$

$$\text{Rasio air semen minimum } (y_1) = 0,50$$

$$\text{Rasio air semen maksimum } (y_2) = 0,60$$

$$\text{Target kuat tekan beton } (x) = 35,63 \text{ Mpa}$$

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \times (y_2 - y_1)$$

$$y = 0,50 + \frac{35,63 - 36}{26 - 36} \times (0,60 - 0,50)$$

$$y = 0,50$$

4.3. Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari dilakukan untuk mengukur kemampuan beton dalam menahan beban tekan. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menganalisis pengaruh penambahan *polypropylene fiber* dan substitusi *calcined clay* terhadap kuat tekan beton dengan membandingkannya dengan beton normal.

4.3.1. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada benda uji berumur 28 hari di Laboratorium Bahan Bangunan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro menggunakan alat *compression testing machine*. Data hasil pengujian kemudian disajikan secara rinci pada Tabel 4.7. dan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.2. sebagai dasar analisis kuat tekan beton.

Tabel 4.7. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

No	Kode Benda Uji	Kuat Tekan Rencana (MPa)	Gaya Tekan (N)	Kuat Tekan Realisasi (MPa)	Rata-Rata Kuat Tekan (MPa)
1.	P0%C0%	30	588.000,00	33,16	32,36
2.	P0%C0%	30	497.000,00	28,21	
3.	P0%C0%	30	634.000,00	35,72	
4.	P0,4%C5%	30	532.000,00	29,76	30,03
5.	P0,4%C5%	30	538.000,00	30,15	
6.	P0,4%C5%	30	543.000,00	30,20	
7.	P0,4%C10%	30	713.000,00	40,09	36,76
8.	P0,4%C10%	30	604.000,00	33,67	
9.	P0,4%C10%	30	652.000,00	36,54	
10.	P0,4%C15%	30	622.000,00	34,81	23,49
11.	P0,4%C15%	30	638.000,00	35,67	
12.	P0,4%C15%	30	604.000,00	34,07	

Untuk mengetahui nilai kuat tekan realisasi dari masing-masing benda uji, dilakukan analisis perhitungan berdasarkan data gaya tekan maksimum dan luas

penampang dari silinder beton. Berikut adalah langkah-langkah perhitungan kuat tekan beton yang dicontohkan pada benda uji No. 1 (kode benda uji: P0%C0%):

Diketahui:

Diameter silinder (d) = 150,26 mm

Tinggi silinder (h) = 303,00 mm

Gaya Tekan Maksimum (P) = 588.000,00 N

Luas penampang lingkaran yang menerima beban tekan dihitung dengan Persamaan 3.15.

$$A = \frac{1}{4} \times \pi \times d^2$$

$$A = \frac{1}{4} \times 3,14 \times (150,26)^2$$

$$A = 17.732,18 \text{ mm}^2$$

Kuat tekan beton diperoleh dengan membagi gaya tekan maksimum dengan luas penampang aktual (Persamaan 3.14):

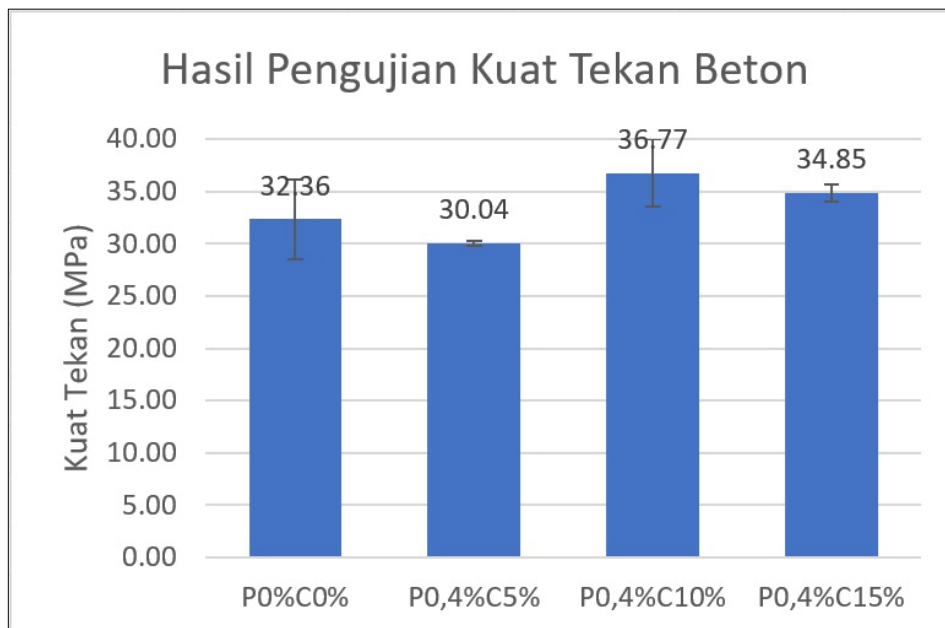
$$f'_c = \frac{P}{A}$$

$$f'_c = \frac{588.000,00 \text{ N}}{17.732,18}$$

$$f'_c = 33,16 \text{ N/mm}^2$$

$$f'_c = 33,16 \text{ MPa}$$

Sebelum pengujian tekan dilakukan, dimensi dari setiap sampel harus diukur kembali. Hal ini dilakukan karena terdapat perbedaan antara dimensi cetakan awal (150 mm × 300 mm) dengan dimensi benda uji beton setelah melalui masa perawatan (*curing*) dikarenakan adanya reaksi semen dan air. Saat semen bercampur dengan air, terjadi reaksi kimia yang menghasilkan panas. Panas ini membuat adonan beton sedikit memuai di awal proses pengerasan. Ditambah proses merendam beton di dalam air (*curing*) membuat beton terus menyerap air dan mencegahnya menyusut akibat kering.



Gambar 4.2. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton normal pada umur 28 hari menghasilkan nilai 33,16 MPa, 28,21 MPa, dan 35,72 MPa dengan rata-rata sebesar 32,36 MPa. Pada campuran beton yang mengandung 0,4% *polypropylene fiber* dan substitusi *calcined clay* 5%, diperoleh kuat tekan rata-rata 30,03 MPa atau turun 7,20% dibandingkan beton normal. Penurunan pada masing-masing benda uji berada pada kisaran 6,68% hingga 8,03%.

Sementara itu, penggunaan 0,4% *polypropylene fiber* dengan substitusi *calcined clay* sebesar 10% memberikan hasil terbaik, yaitu kuat tekan rata-rata 36,76 MPa atau meningkat 13,60% terhadap beton normal, dengan kenaikan tiap benda uji berkisar antara 4,05% hingga 23,89%. Pada variasi substitusi *calcined clay* sebesar 15%, kuat tekan rata-rata mencapai 34,85 MPa, sehingga masih menunjukkan peningkatan sebesar 7,69% dibandingkan beton normal.

4.3.2. Pembahasan Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton normal pada umur 28 hari menunjukkan nilai sebesar 33,16 MPa, 28,21 MPa, dan 35,72 MPa dengan rata-rata mencapai 32,36 MPa. Jika dibandingkan dengan nilai rata-rata tersebut, benda uji pertama memiliki

kuat tekan 2,47% lebih tinggi, benda uji kedua 12,82% lebih rendah, sedangkan benda uji ketiga mengalami peningkatan sebesar 10,38%. Variasi tersebut mengindikasikan bahwa meskipun seluruh benda uji dibuat menggunakan komposisi campuran yang identik, hasil kuat tekan yang diperoleh masih menunjukkan perbedaan. Kondisi ini kemungkinan dipengaruhi oleh proses pencampuran yang dilakukan secara terpisah sehingga tingkat homogenitas setiap adukan tidak sepenuhnya sama. Perbedaan distribusi semen, agregat, air, maupun bahan tambah selama proses pengadukan dapat menyebabkan karakteristik masing-masing benda uji menjadi berbeda. Selain itu, kualitas dan durasi pemadatan turut menentukan jumlah rongga udara yang tertinggal di dalam beton. Semakin banyak rongga yang terbentuk, semakin rendah tingkat kepadatan beton sehingga kuat tekannya cenderung menurun. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Hasan et al. (2019), yang menjelaskan bahwa kualitas pencampuran dan proses pemadatan berperan penting dalam menghasilkan kuat tekan beton yang konsisten.

Pada variasi campuran yang mengandung *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dengan substitusi *calcined clay* sebesar 5%, diperoleh kuat tekan berturut-turut sebesar 29,76 MPa, 30,15 MPa, dan 30,20 MPa dengan nilai rata-rata 30,03 MPa. Dibandingkan beton normal, masing-masing benda uji mengalami penurunan sebesar 8,03%, 6,83%, dan 6,68%, sedangkan rata-ratanya turun sebesar 7,20%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *calcined clay* sebesar 5% belum mampu meningkatkan kuat tekan beton. Kondisi ini disebabkan oleh reaksi pozzolanik yang belum berlangsung secara optimal sehingga pembentukan gel C-S-H tambahan masih terbatas. Temuan tersebut diperkuat oleh Zunino et al. (2022) yang menyatakan bahwa kontribusi *calcined clay* terhadap peningkatan kuat tekan umumnya terjadi setelah proses hidrasi dan reaksi pozzolanik berkembang lebih lanjut, sehingga efeknya tidak selalu langsung terlihat pada setiap kadar substitusi. Selain itu, *polypropylene fiber* yang tidak terdistribusi secara merata dapat membentuk rongga mikro (*microvoids*) dan memperlemah ikatan antara serat dengan matriks semen, sehingga menurunkan kepadatan beton dan berdampak pada kuat tekan (T. W. Ahmed et al., 2020).

Berbeda dengan variasi sebelumnya, campuran yang menggunakan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan substitusi *calcined clay* sebesar 10% menghasilkan kuat tekan sebesar 33,67 MPa, 36,54 MPa, dan 40,09 MPa dengan nilai rata-rata 36,76 MPa. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan beton normal, dengan peningkatan masing-masing sebesar 4,05%, 12,92%, dan 23,89%, sedangkan rata-ratanya meningkat sebesar 13,60%. Hasil ini menunjukkan bahwa substitusi *calcined clay* sebesar 10% merupakan komposisi yang paling efektif dalam penelitian ini untuk meningkatkan kuat tekan beton.

Zunino et al. (2022) menjelaskan bahwa penggunaan *calcined clay* pada kadar optimum mampu meningkatkan densifikasi mikrostruktur melalui kombinasi efek filler dan reaksi pozzolanik, sehingga menghasilkan peningkatan kuat tekan yang signifikan. Hasil tersebut juga sejalan dengan penelitian Avet (2017) yang menunjukkan bahwa substitusi semen dengan *calcined clay* sekitar 10–15% memberikan peningkatan kuat tekan karena terbentuknya produk hidrasi tambahan yang memperbaiki ikatan antarpartikel dalam pasta semen. Di samping itu, *polypropylene fiber* yang terdistribusi secara merata membantu menghambat perkembangan retak mikro (*microcrack*), sehingga beton mampu menahan beban lebih besar sebelum mengalami keruntuhan (T. W. Ahmed et al., 2020).

Temuan tersebut memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian Afsheen et al. (2026), yang melaporkan peningkatan kuat tekan dari 32,00 MPa menjadi 37,20 MPa atau sekitar 16,25% pada substitusi *calcined clay* sebesar 10%. Hasil serupa juga disampaikan oleh Hasan et al. (2019), yang memperoleh peningkatan kuat tekan sebesar 17,95% pada penggunaan *polypropylene fiber* sebesar 0,36%. Walaupun persentase peningkatan pada penelitian ini sedikit lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu, kecenderungan yang diperoleh tetap sama, yaitu kombinasi *polypropylene fiber* sekitar 0,4% dengan substitusi *calcined clay* sebesar 10% mampu memberikan peningkatan kuat tekan beton secara signifikan.

Pada variasi dengan substitusi *calcined clay* sebesar 15% dan penambahan *polypropylene fiber* sebesar 0,4%, kuat tekan yang diperoleh masing-masing mencapai 34,81 MPa, 35,67 MPa, dan 34,07 MPa dengan rata-rata sebesar 34,85

MPa. Dibandingkan beton normal, peningkatan kuat tekan pada setiap benda uji berturut-turut sebesar 7,57%, 10,23%, dan 5,28%, sedangkan nilai rata-ratanya meningkat sebesar 7,69%. Meskipun masih memberikan hasil yang lebih baik daripada beton normal, peningkatan tersebut belum mampu melampaui variasi substitusi 10%. Hal ini menunjukkan bahwa kadar substitusi 10% merupakan kadar optimum dalam penelitian ini. Penurunan kuat tekan pada kadar 15% diduga terjadi karena sebagian semen Portland yang digantikan menjadi lebih banyak, sehingga jumlah senyawa utama semen, terutama tricalcium silicate (C_3S) dan *dicalcium silicate* (C_2S), yang berperan dalam pembentukan gel *calcium silicate hydrate* (C-S-H) hasil hidrasi primer menjadi berkurang. Meskipun *calcined clay* memiliki sifat pozzolanik, jumlah kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang tersedia sebagai hasil hidrasi semen menjadi lebih sedikit sehingga reaksi pozzolanik tidak dapat berlangsung secara maksimal. Akibatnya, pembentukan C-S-H tambahan tidak mampu sepenuhnya mengimbangi berkurangnya produk hidrasi akibat pengurangan kadar semen (*dilution effect*) (Zunino et al., 2022).

Hasil ini sejalan dengan penelitian Afsheen et al. (2026), yang menyatakan bahwa kuat tekan optimum dicapai pada kadar substitusi *calcined clay* sebesar 10%, sedangkan peningkatan menjadi 15% justru menurunkan kuat tekan dari 37,20 MPa menjadi 28,00 MPa atau sekitar 24,73%. Sementara itu, Nguyen et al. (2018) menyampaikan bahwa penggunaan sistem pengikat LC3 (*Limestone Calcined clay Cement*) menghasilkan kenaikan kuat tekan dari sekitar 55,00 MPa menjadi 58,00 MPa atau sekitar 5,45%. Walaupun penelitian tersebut menggunakan komposisi material dan sistem pengikat yang berbeda, hasilnya menunjukkan bahwa kadar substitusi sekitar 15% masih dapat meningkatkan kuat tekan pada kondisi tertentu. Dalam penelitian ini, peningkatan sebesar 7,69% membuktikan bahwa substitusi 15% masih memberikan pengaruh positif terhadap kuat tekan beton, namun efektivitasnya tetap berada di bawah variasi 10%. Perbedaan hasil dengan penelitian terdahulu diduga dipengaruhi oleh perbedaan mutu beton, jenis bahan penyusun, komposisi campuran, serta penggunaan *polypropylene fiber* sebagai material tambahan.

Berdasarkan data pada Tabel 4.8 yang menunjukkan hubungan antara berat benda uji dan kuat tekan beton, secara umum terlihat bahwa benda uji dengan berat yang lebih besar cenderung memiliki kuat tekan yang lebih tinggi, meskipun hubungan tersebut tidak selalu bersifat linier. Sebagai contoh, benda uji beton normal dengan berat 12,99 kg menghasilkan kuat tekan sebesar 35,72 MPa, sedangkan benda uji seberat 12,64 kg hanya mencapai 28,21 MPa. Dengan demikian, kenaikan berat sekitar 2,77% diikuti oleh peningkatan kuat tekan sebesar 26,62%, yang mengindikasikan bahwa berat benda uji dapat menjadi salah satu indikator tingkat kepadatan beton, meskipun bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi kuat tekan. Namun, pada beberapa variasi masih ditemukan benda uji dengan berat yang relatif sama tetapi menghasilkan kuat tekan yang berbeda.

Tabel 4.8. Berat Benda Uji dan Hasil Kuat Tekan

Variasi	Berat (kg)	Kuat Tekan (MPa)
P0%C0%	12,80	33,16
P0%C0%	12,64	28,21
P0%C0%	12,99	35,72
P0,4%C5%	12,59	29,76
P0,4%C5%	12,54	30,15
P0,4%C5%	12,80	30,20
P0,4%C10%	12,70	40,09
P0,4%C10%	12,53	33,67
P0,4%C10%	12,62	36,54
P0,4%C15%	12,77	34,81
P0,4%C15%	12,65	35,67
P0,4%C15%	12,62	34,07

Menurut Iffat (2015), kuat tekan beton berkaitan erat dengan tingkat densitasnya. Beton yang memiliki densitas lebih tinggi umumnya menunjukkan kuat tekan yang lebih besar karena kandungan rongga dan porositas di dalam strukturnya lebih rendah. Dalam penelitiannya, beton yang menggunakan agregat batu pecah (*stone concrete*) memiliki densitas sekitar 2.400 kg/m³ dengan kuat tekan mencapai sekitar 43 MPa, sedangkan beton yang memanfaatkan agregat bata

pecah (*brick concrete*) hanya memiliki densitas sekitar 1.950 kg/m^3 dan kuat tekan sekitar 31 MPa.

Temuan tersebut diperkuat oleh Al-Lami & Al-saadi (2021) yang juga menemukan adanya hubungan positif antara densitas dan kuat tekan beton. Pada salah satu variasi campuran yang diteliti, beton dengan *dry density* sebesar 1.472 kg/m^3 mampu mencapai kuat tekan 4,95 MPa, sedangkan penurunan *dry density* menjadi 792 kg/m^3 menyebabkan kuat tekannya ikut menurun menjadi 0,58 MPa. Walaupun demikian, besarnya kuat tekan tidak hanya ditentukan oleh densitas, tetapi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor lain, seperti komposisi campuran, rasio air terhadap semen, kualitas proses pencampuran, pemerataan bahan tambah, serta efektivitas pemadatan. Oleh sebab itu, perbedaan berat benda uji dalam penelitian ini tidak dapat dijadikan satu-satunya acuan untuk menilai kuat tekan beton, melainkan perlu dipertimbangkan bersama faktor-faktor lain yang memengaruhi kualitas struktur internal beton.

4.4. Kuat Lentur Beton

Pengujian kuat lentur beton dilakukan untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya lentur pada umur 28 hari. Hasil pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *polypropylene fiber* dan substitusi *calcined clay* terhadap kuat lentur beton dibandingkan dengan beton normal.

4.4.1. Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilaksanakan pada benda uji beton berumur 28 hari di Laboratorium Material, Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro menggunakan alat *flexural testing machine* dengan metode pembebanan satu titik di tengah bentang (*center-point loading* atau *three-point bending*). Data hasil pengujian selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.3. dan secara rinci ditampilkan pada Tabel 4.9. sebagai dasar analisis kuat lentur beton.

Tabel 4.9. Hasil Uji Kuat Lentur Beton

No	Kode Benda Uji	Kuat Lentur Rencana (MPa)	Beban Maksimum (N)	Kuat Tekan Realisasi (MPa)	Rata-Rata Kuat Lentur (MPa)
1.	P0%C0%	3,4	7.760,00	3,46	3,48
2.	P0%C0%	3,4	7.950,00	3,51	
3.	P0%C0%	3,4	7.740,00	3,48	
4.	P0,4%C5%	3,4	8.020,00	3,54	3,69
5.	P0,4%C5%	3,4	8.440,00	3,65	
6.	P0,4%C5%	3,4	8.640,00	3,89	
7.	P0,4%C10%	3,4	8.600,00	3,79	3,72
8.	P0,4%C10%	3,4	8.920,00	3,93	
9.	P0,4%C10%	3,4	7.770,00	3,43	
10.	P0,4%C15%	3,4	6.810,00	3,03	2,93
11.	P0,4%C15%	3,4	6.810,00	2,95	
12.	P0,4%C15%	3,4	6.530,00	2,82	

Berdasarkan SNI 2847:2019, mutu kuat lentur beton normal (*modulus of rupture*) dapat diperkirakan dari nilai kuat tekan beton menggunakan persamaan 3.16.

$$f_s = 0,62\sqrt{f'_c}$$

$$f_s = 0,62\sqrt{30}$$

$$f_s = 3,40 \text{ MPa}$$

Untuk mengevaluasi nilai kuat lentur realisasi dari masing-masing benda uji balok, dilakukan analisis perhitungan berdasarkan beban maksimum (P) yang mampu ditahan oleh benda uji sebelum mengalami patah. Dimensi aktual dari setiap balok beton juga diukur kembali secara presisi sebelum pengujian dilakukan. Pada benda uji nomor 1, dimensi aktual balok yang diperoleh memiliki ukuran Panjang (L) = 400 mm, Lebar (b) = 101 mm, dan Tinggi (h) = 100 mm.

Diketahui:

$$\text{Beban maksimum (P)} = 7.760,00 \text{ N}$$

$$\text{Jarak bentang (L)} = 300 \text{ mm}$$

$$\text{Lebar penampang balok (b)} = 101 \text{ mm}$$

Tinggi penampang balok (h) = 100 mm

Berdasarkan standar ASTM C293/C293M dengan prinsip pembebanan satu titik tengah (*center-point loading*), rumus kuat lentur dihitung menggunakan Persamaan 3.17.

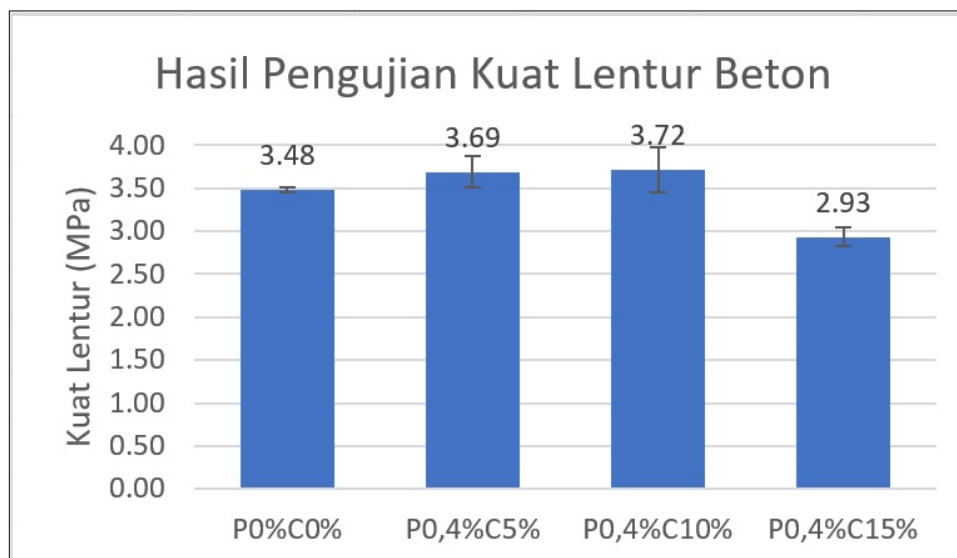
$$f_s = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2}$$

$$f_s = \frac{3 \times 7.760,00 \times 300}{2 \times 101 \times (100)^2}$$

$$f_s = 3,46 \text{ N/mm}^2$$

$$f_s = 3,46 \text{ MPa}$$

Langkah-langkah perhitungan detail pada benda uji nomor 2 sampai dengan nomor 12 menggunakan prinsip dan rumus yang sama, di mana data selengkapnya dapat dilihat pada bagian Lampiran.



Gambar 4.3. Grafik Hasil Uji Kuat Lentur

Hasil pengujian kuat lentur beton normal pada umur 28 hari menunjukkan nilai 3,46 MPa, 3,51 MPa, dan 3,48 MPa dengan rata-rata 3,48 MPa. Penambahan 0,4% *polypropylene fiber* yang dikombinasikan dengan substitusi *calcined clay* sebesar 5% menghasilkan kuat lentur 3,54 MPa, 3,65 MPa, dan 3,89 MPa, sehingga diperoleh rata-rata 3,69 MPa. Dibandingkan beton normal, masing-masing benda

uji mengalami peningkatan sebesar 1,72%, 4,89%, dan 11,78%, sedangkan nilai rata-ratanya meningkat 6,03%. Pada variasi substitusi *calcined clay* sebesar 10%, kuat lentur yang diperoleh berturut-turut mencapai 3,79 MPa, 3,93 MPa, dan 3,43 MPa dengan rata-rata 3,72 MPa atau meningkat 6,90% dibandingkan beton normal.

Berbeda dengan dua variasi sebelumnya, penggunaan *calcined clay* sebesar 15% bersama 0,4% *polypropylene fiber* menghasilkan kuat lentur sebesar 3,03 MPa, 2,95 MPa, dan 2,82 MPa dengan rata-rata 2,93 MPa. Nilai tersebut menunjukkan penurunan dibandingkan beton normal, yaitu masing-masing sebesar 12,93%, 15,23%, dan 18,97%, sedangkan penurunan rata-ratanya mencapai 15,80%. Hasil ini menunjukkan bahwa substitusi *calcined clay* sebesar 5% dan 10% masih mampu meningkatkan kuat lentur beton, sedangkan peningkatan kadar menjadi 15% justru menurunkan kinerja lentur campuran.

4.4.2. Pembahasan Hasil Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur beton normal pada umur 28 hari menghasilkan nilai sebesar 3,46 MPa, 3,51 MPa, dan 3,48 MPa dengan rata-rata 3,48 MPa. Meskipun seluruh benda uji dibuat menggunakan komposisi campuran yang sama, masih terdapat sedikit perbedaan nilai kuat lentur. Variasi tersebut diduga disebabkan oleh proses pencampuran yang dilakukan secara terpisah sehingga tingkat homogenitas adukan, penyebaran material, dan kualitas pemadatan pada setiap benda uji tidak sepenuhnya seragam. Perbedaan kondisi tersebut dapat memengaruhi kemampuan beton dalam menahan beban lentur.

Pada variasi campuran dengan penambahan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan substitusi *calcined clay* sebesar 5%, diperoleh kuat lentur sebesar 3,54 MPa, 3,65 MPa, dan 3,89 MPa dengan rata-rata 3,69 MPa. Nilai tersebut menunjukkan peningkatan sebesar 1,72%, 4,89%, dan 11,78% pada masing-masing benda uji, sedangkan rata-ratanya meningkat 6,03% dibandingkan beton normal. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua material tersebut mampu meningkatkan kuat lentur, meskipun belum mencapai kondisi optimum. Temuan ini memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian Hasan et al. (2019) yang menyampaikan peningkatan kuat lentur dari 4,50 MPa menjadi 5,10 MPa atau

sekitar 13,33% pada penggunaan *polypropylene fiber* sebesar 0,36%. Hasil serupa juga disampaikan oleh T. A. H. Ahmed & Daoud (2016), yang memperoleh kenaikan kuat lentur sekitar 10,45% pada penggunaan serat sebesar 0,5%, serta Khairizal et al. (2015) yang mencatat peningkatan sekitar 16,70% pada penambahan serat 0,4 kg/m³. Persentase peningkatan pada penelitian ini lebih rendah dibandingkan ketiga penelitian tersebut, yang diduga karena substitusi *calcined clay* sebesar 5% belum mampu memberikan hasil optimal dengan *polypropylene fiber*.

Campuran beton yang menggunakan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan substitusi *calcined clay* sebesar 10% menghasilkan kuat lentur sebesar 3,79 MPa, 3,93 MPa, dan 3,43 MPa dengan nilai rata-rata 3,72 MPa. Dibandingkan beton normal, rata-rata kuat lentur meningkat sebesar 6,90%, sehingga variasi ini menjadi yang terbaik dalam penelitian ini. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan *calcined clay* sebesar 10% merupakan komposisi paling efektif untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap beban lentur. Temuan ini sejalan dengan Afsheen et al. (2026), yang menyatakan bahwa substitusi *calcined clay* sebesar 10% memberikan kuat tekan optimum sebesar 37,20 MPa pada beton mutu rencana 30 MPa. Selain itu, kecenderungan peningkatan sifat lentur juga sesuai dengan hasil penelitian Hasan et al. (2019) dan Khairizal et al. (2015) meskipun persentase peningkatan yang diperoleh dalam penelitian ini lebih rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa kombinasi *polypropylene fiber* sekitar 0,4% dengan substitusi *calcined clay* sebesar 10% tetap efektif dalam meningkatkan performa lentur beton.

Berbeda dengan variasi sebelumnya, penggunaan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan substitusi *calcined clay* sebesar 15% menghasilkan kuat lentur masing-masing sebesar 3,03 MPa, 2,95 MPa, dan 2,82 MPa dengan rata-rata 2,93 MPa. Nilai tersebut mengalami penurunan sebesar 12,93%, 15,23%, dan 18,97% pada setiap benda uji, sedangkan rata-ratanya turun sebesar 15,80% dibandingkan beton normal. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar *calcined clay* hingga 15% belum mampu mempertahankan peningkatan kuat lentur yang diperoleh pada variasi 10%. Kondisi tersebut sejalan dengan Afsheen et al. (2026), yang menyampaikan bahwa kuat tekan optimum dicapai pada substitusi *calcined clay*

sebesar 10%, sedangkan peningkatan kadar menjadi 15% menyebabkan kuat tekan menurun sekitar 24,73%. Di sisi lain, Nguyen et al. (2018) menunjukkan bahwa penggunaan *calcined clay* sebesar 15% masih dapat meningkatkan kuat tekan pada campuran beton tertentu. Perbedaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa efektivitas *calcined clay* dipengaruhi oleh mutu beton, rancangan campuran, serta kombinasi bahan tambah yang digunakan. Pada penelitian ini, perpaduan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dengan substitusi *calcined clay* sebesar 15% belum menghasilkan interaksi yang optimal sehingga kuat lentur beton justru lebih rendah dibandingkan beton normal.

Perbedaan hasil antara kuat tekan dan kuat lentur pada penelitian ini menunjukkan bahwa kedua sifat mekanik tersebut dipengaruhi oleh mekanisme yang berbeda. Kuat tekan lebih dipengaruhi oleh kualitas kepadatan beton, sedangkan kuat lentur lebih dipengaruhi oleh kemampuan *polypropylene fiber* dalam menghambat perkembangan retak. Oleh karena itu, pada substitusi *calcined clay* sebesar 5%, kuat tekan masih mengalami penurunan karena reaksi pozzolanik belum optimal, tetapi kuat lentur sudah meningkat karena *polypropylene fiber* telah mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap retak. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa pola perubahan kuat tekan dan kuat lentur pada penelitian ini tidak selalu berbanding lurus, dan hasil serupa juga telah dilaporkan pada penelitian Hasan et al. (2019) dan T. A. H. Ahmed & Daoud (2016).

4.5. Analisis Biaya

Setelah dilakukan pengujian terhadap sifat mekanik dan karakteristik beton yang menggunakan penambahan *polypropylene fiber* serta substitusi *calcined clay*, tahapan berikutnya adalah melaksanakan analisis biaya. Analisis ini bertujuan untuk membandingkan biaya produksi beton normal dengan beton inovasi per meter kubik (m^3) sehingga dapat diketahui perbedaan biaya yang dihasilkan dari masing-masing variasi campuran.

Perhitungan biaya campuran beton disusun berdasarkan harga satuan masing-masing material penyusun. Harga semen, agregat halus, agregat kasar, dan air

mengacu pada Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) Kota Semarang Tahun 2025. Adapun harga *polypropylene fiber* dan *calcined clay* diperoleh dari survei harga pasar melalui beberapa platform *e-commerce* dan situs web resmi penjual material konstruksi, kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis biaya penelitian.

Tabel 4.10. Rekapitulasi Biaya

No.	Material	Harga Satuan/kg	Kebutuhan Material (kg/m ³)	Harga
P0%C0% (Beton Normal 30 MPa)				
1	Semen	Rp1,400.00	428.83	Rp600,357.36
2	Pasir	Rp274.86	603.56	Rp165,895.42
3	Batu Pecah	Rp266.07	1,000.91	Rp266,311.35
Total Harga				Rp1,032,564.12
P0,4%C5% (<i>Polypropylene fiber</i> 0.4% + <i>Calcined clay</i> 5%)				
1	Semen	Rp1,400.00	407.39	Rp570,339.49
2	Pasir	Rp274.86	593.56	Rp163,146.82
3	Batu Pecah	Rp266.07	1,000.91	Rp266,311.35
4	<i>Polypropylene fiber</i>	Rp54,321.00	3.64	Rp197,728.44
5	<i>Calcined clay</i>	Rp3,310.00	21.44	Rp70,970.82
Total Harga				Rp1,268,496.91
P0,4%C10% (<i>Polypropylene fiber</i> 0.4% + <i>Calcined clay</i> 10%)				
1	Semen	Rp1,400.00	385.94	Rp540,321.62
2	Pasir	Rp274.86	593.56	Rp163,146.82
3	Batu Pecah	Rp266.07	1,000.91	Rp266,311.35
4	<i>Polypropylene fiber</i>	Rp54,321.00	3.64	Rp197,728.44
5	<i>Calcined clay</i>	Rp3,310.00	42.88	Rp141,941.63
Total Harga				Rp1,309,449.86
P0,4%C15% (<i>Polypropylene fiber</i> 0.4% + <i>Calcined clay</i> 15%)				
1	Semen	Rp1,400.00	364.50	Rp510,303.75
2	Pasir	Rp274.86	593.56	Rp163,146.82
3	Batu Pecah	Rp266.07	1,000.91	Rp266,311.35
4	<i>Polypropylene fiber</i>	Rp54,321.00	3.64	Rp197,728.44
5	<i>Calcined clay</i>	Rp3,310.00	64.32	Rp212,912.45
Total Harga				Rp1,350,402.81

Berdasarkan hasil analisis biaya pada Tabel 4.10, penggunaan *polypropylene fiber* dan substitusi *calcined clay* menyebabkan biaya produksi beton per meter

kubik (m^3) meningkat seiring bertambahnya kadar *calcined clay*. Dibandingkan beton normal yang memiliki biaya produksi sebesar $\text{Rp}1.032.564,12/\text{m}^3$, variasi dengan substitusi *calcined clay* 5% memerlukan biaya $\text{Rp}1.268.496,91/\text{m}^3$ atau meningkat sebesar 22,85%. Kenaikan tersebut terus bertambah pada variasi 10% dengan biaya $\text{Rp}1.309.449,86/\text{m}^3$ (26,81%), sedangkan substitusi 15% menghasilkan biaya tertinggi, yaitu $\text{Rp}1.350.402,81/\text{m}^3$ atau meningkat 30,78% dibandingkan beton normal.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, campuran yang mengandung *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan *calcined clay* 10% memberikan performa terbaik dengan kuat tekan rata-rata 36,76 MPa. Oleh karena itu, dilakukan perbandingan biaya dengan beton normal yang memiliki mutu tekan setara agar evaluasi lebih objektif. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beton normal berkekuatan 36,76 MPa memerlukan biaya sebesar $\text{Rp}1.119.491,60/\text{m}^3$ (Tabel 4.9), sedangkan beton inovasi membutuhkan $\text{Rp}1.309.449,86/\text{m}^3$. Dengan demikian, penggunaan beton inovasi meningkatkan biaya produksi sebesar $\text{Rp}189.958,25/\text{m}^3$ atau sekitar 16,97% dibandingkan beton normal dengan mutu yang sama. Peningkatan biaya tersebut terutama disebabkan oleh penggunaan *polypropylene fiber* dan *calcined clay* sebagai material tambahan.

Tabel 4.11. Perbandingan Biaya

Jenis Beton	Harga/ m^3
Beton Normal 36,76 MPa	$\text{Rp}1,119,491.61$
Beton Variasi 36,76 MPa (P0,4%C10%)	$\text{Rp}1,309,449.86$

Walaupun beton inovasi yang menggunakan *polypropylene fiber* sebesar 0,4% dan substitusi *calcined clay* 10% memiliki biaya produksi lebih tinggi dibandingkan beton normal dengan mutu yang sama (Tabel 4.11.), peningkatan biaya tersebut diiringi oleh perbaikan sifat mekanis beton, terutama pada nilai kuat lentur. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kedua material tersebut mampu memberikan

peningkatan kinerja beton meskipun membutuhkan investasi biaya yang lebih besar.

Dari sisi ekonomi, campuran tersebut belum dapat dikategorikan sebagai alternatif yang ekonomis karena biaya produksinya meningkat sekitar 16,97% dibandingkan beton normal. Meskipun demikian, peningkatan mutu yang dihasilkan menunjukkan bahwa beton inovasi ini masih layak untuk dikembangkan lebih lanjut. Upaya optimasi komposisi *polypropylene fiber* dan *calcined clay* berpotensi menghasilkan campuran yang mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan performa beton dan efisiensi biaya produksi.