

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4. 1 Pemeriksaan Material

4. 1. 1 Hasil Pengujian Agregat Halus

Dalam pemeriksaan bahan yang telah dilakukan, diperoleh nilai atau hasil yang menggambarkan karakteristik serta sifat agregat halus. Hasil pemeriksaan agregat halus yang telah dilakukan disajikan dalam **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Analisa Saringan (Agregat Halus)					
ANALISA SARINGAN					
No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Tertahan Saringan (g)	Tertahan (%)	Tertahan Komulatif (%)	Lolos Saringan (%)
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,5	0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	0	100
#4	4,75	9,61	1,92	1,92	98,08
#8	2,36	49,77	9,95	11,88	88,12
#16	1,18	111,16	22,23	34,11	65,89
#30	0,6	131,21	26,24	60,35	39,65
#50	0,3	109,46	21,89	82,24	17,76
#100	0,15	65,78	13,16	95,40	4,60
#200	0,075	14,35	2,87	98,27	1,73
PAN	-	7,39	1,48	99,75	0,25
Jumlah		498,73	49,87		
				FM	2,86

Dari pengujian agregat halus didapatkan hasil data seperti pada **Tabel 4.1**. dan dilakukan analisis dengan perhitungan:

Kehilangan = berat awal – berat akhir

$$= 500 - 498,73$$

$$= 1,27 \text{ gram}$$

$$\text{Persentase} = \frac{1,27}{500} \times 100\%$$

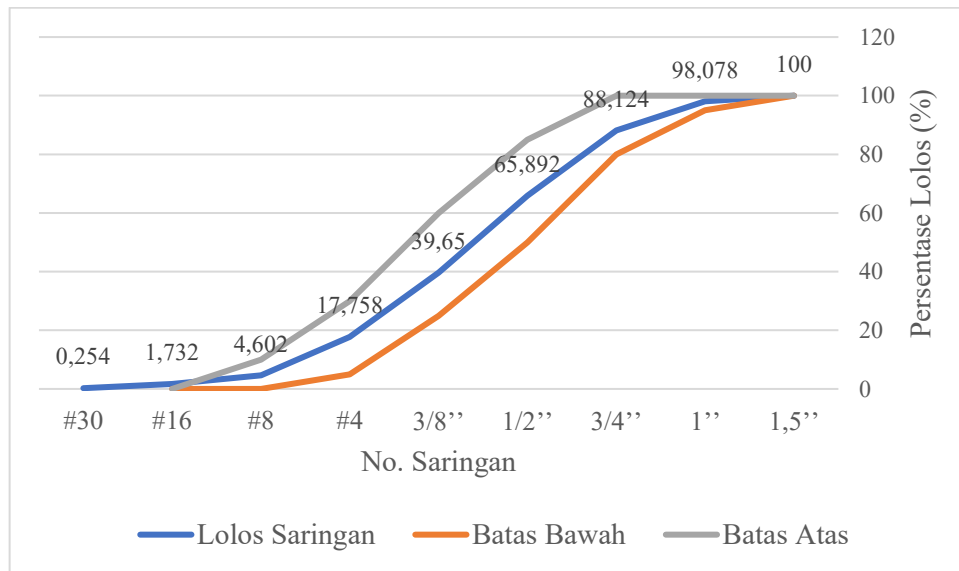
$$= 0,25\% < 0,3\% \text{ (memenuhi standar SNI ASTM C136 - 2012)}$$

Modulus kehalusan (FM)

$$\text{FM} = \frac{\text{jumlah tertahan saringan di atas } 0,105 \text{ mm}}{100}$$

$$\text{FM} = \frac{1,92+11,88+34,11+60,35+82,24+95,40}{100}$$

$$\text{FM} = 2,86$$



Gambar 4. 1 Grafik Gradasi Analisa Saringan Agregat Halus

Berdasarkan hasil analisis saringan agregat kasar yang dilakukan sesuai SNI ASTM C136 – 2012, diperoleh distribusi gradasi agregat zona 2. Berdasarkan **Gambar 4.1.**, kurva gradasi agregat berada di antara batas atas dan batas bawah gradasi agregat halus yang dipersyaratkan dalam SNI ASTM C33M, sehingga gradasi agregat halus yang digunakan memenuhi sebagai agregat untuk beton.

Setelah gradasi agregat memenuhi persyaratan, dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat sesuai SNI 1969:2016, yang berfungsi sebagai konstanta penting dalam mengoversi berat menjadi volume pada perhitungan *mix design* dari analisis perhitungan. Berikut adalah tabel hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada **Tabel 4.2.**

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air (Agregat Halus)

Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Air Halus	Sample (g)
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	500
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	492,1
Berat Piknometer + Air (Bp)	631
Berat Picnometer + Benda Uji (SSD) + Air (Bt)	948,4

Berikut adalah tabel Hasil Pengujian Berat Jenis **Tabel 4.3**.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Berat Jenis (Agregat Halus)

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Halus		Sampel
Berat Jenis (<i>Bulk</i>)	$\frac{Bk}{Bj+Bp-Bt}$	2,69
Berat Jenis Permukaan Jenuh	$\frac{Bj}{Bj+Bp-Bt}$	2,73
Berat Jenis Semu	$\frac{Bk}{Bk+Bp-Bt}$	2,81
Penyerapan	$\frac{Bj-Bk}{Bk} \times 100\%$	1,60

Berikut adalah tabel Hasil Pengujian Kadar Air keadaan SSD pada **Tabel 4.4**.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kadar Air Keadaan SSD (Agregat Halus)

Pengujian Kadar Air Agregat Halus	Satuan	Sampel
Berat Cawan (a)	g	57,6
Berat Cawan + Agregat Basah (A)	g	557,6
Berat Cawan + Agregat Kering (B)	g	544,6
Berat Agregat Basah B1 (A – a)	g	500
Berat Agregat Kering B2 (B – a)	g	487
Berat Air (B1 – B2)	g	13
Kadar Air	$\frac{B1-B2}{B2} \times 100\%$	% 2,67

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh nilai berat jenis curah (*bulk specific gravity*) agregat halus sebesar 2,69, berat jenis kondisi jenuh kering permukaan (*Saturated Surface Dry/SSD*) sebesar 2,73, berat jenis semu (*apparent specific gravity*) sebesar 2,81, dan penyerapan air sebesar 1,60%. Selanjutnya, hasil

pengujian kadar air menunjukkan nilai sebesar 2,67%. Nilai kadar air yang lebih besar daripada nilai penyerapan (2,67% > 1,60%) menunjukkan bahwa agregat halus berada dalam kondisi basah (*wet*) atau mengandung air bebas pada permukaannya. Air bebas tersebut sebesar 1,07% merupakan selisih antara kadar air dan penyerapan, sehingga harus diperhitungkan sebagai pengurang jumlah air pencampur pada perancangan campuran beton (*mix design*) agar faktor air-semen (*water-cement ratio*) tetap sesuai dengan yang direncanakan dan mutu beton yang ditargetkan dapat tercapai.

Dilakukan pengujian kadar lumpur, pengujian ini bertujuan untuk mengukur parameter penurunan puncak beton secara vertikal berdasarkan acuan ASTM C117 2012, yang berfungsi untuk mengevaluasi Tingkat kemudahan pengerjaan dan konsistensi kadar air dalam campuran beton segar. Berikut adalah tabel hasil pengujian Kadar Lumpur Metode Kocok pada **Tabel 4.5**.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Metode Kocok (Agregat Halus)		
Pengujian Kadar Lumpur (Agregat Halus)	Satuan	Sampel
Tinggi Pasir + Lumpur	mm	210
Tinggi Pasir	mm	200
Tinggi Lumpur	mm	10
Kandungan Lumpur $\frac{\text{Tinggi Lumpur}}{\text{Tinggi Pasir + Lumpur}} \times 100\%$	%	4,7

Pada pengujian kadar lumpur agregat halus diperoleh kadar lumpur 4,7% dimana nilai tersebut sesuai dengan ASTM C117 2012 dengan kadar lumpur 5%. Hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada **Tabel 4.5**. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki kualitas yang baik dan layak digunakan sebagai bahan campuran beton, karena masih memnuhi batas maksimum kadar lumpur yang dipersyaratkan. **Tabel 4.6**. berikut ini merupakan tabel rekapitulasi standar pengujian agregat halus

Tabel 4. 6 Rekapitulasi Standar Pengujian (Agregat Halus)				
Pengujian	Standar	Nilai	Persyaratan	Keterangan
Analisa Saringan	SNI ASTM C33	2,86	FM 2,3 – 3,1	Memenuhi
Berat Jenis	SNI 1969:2016	2,69	BJ $\geq$ 2,50	Memenuhi
Daya Serap Air	SNI 1969:2016	1,6 %	$\leq$ 3%	Memenuhi
Kadar Lumpur	ASTM C117 2012	4,7 %	$\leq$ 5%	Memenuhi

4. 1. 2 Hasil Pengujian 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. Berikut adalah tabel hasil Analisa Saringan Agregat Kasar pada **Tabel 4.7**.

Tabel 4.7 Analisa Saringan (Agregat Kasar)					
ANALISA SARINGAN					
No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Tertahan Saringan		Tertahan Komulatif	Lolos Saringan
		(g)	(%)	(%)	(%)
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	180,64	18,06	18,06	81,94
3/4"	19	491,02	49,10	67,17	32,83
1/2"	12,5	300,75	30,075	97,24	2,76
3/8"	9,5	25,89	2,589	99,83	0,17
#4	4,75	0	0	99,83	0,17
#8	2,36				
#16	1,18				
#30	0,6				
#50	0,3				
#100	0,15				
#200	0,075				
PAN	-				
Jumlah		998,3	99,83		
				FM	7,81

Dari pengujian agregat kasar didapatkan hasil data seperti pada **tabel 4.7**. dan dilakukan analisis dengan perhitungan:

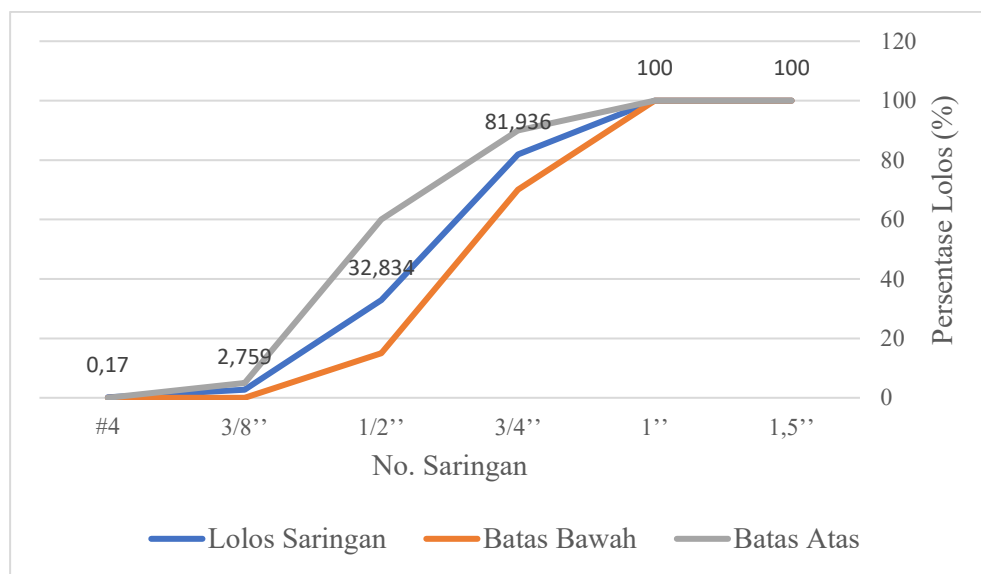
Kehilangan = berat awal – berat akhir

$$= 1000 - 998,3$$

$$= 1,7 \text{ gram}$$

Persentase $= \frac{1,7}{500} \times 100\%$

$$= 0,17\% < 0,3\% \text{ (memenuhi standar ASTM C136-2012)}$$



Gambar 4. 2 Grafik Gradasi Analisa Saringan Agregat Kasar

Berdasarkan hasil analisis saringan agregat kasar yang dilakukan sesuai SNI ASTM C136 – 2012, diperoleh distribusi gradasi agregat dengan ukuran nominal maksimum 20 mm. Berdasarkan **gambar 4.2.**, kurva gradasi agregat berada di antara batas atas dan batas bawah gradasi agregat kasar yang dipersyaratkan dalam SNI ASTM C33M, sehingga gradasi agregat kasar yang digunakan memenuhi sebagai agregat untuk beton.

Setelah gradasi agregat memenuhi persyaratan, dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat sesuai SNI 1969:2016, yang berfungsi sebagai konstanta penting dalam mengoversi berat menjadi volume pada perhitungan *mix design* dari analisis perhitungan. Berikut adalah tabel hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada **Tabel 4.8.**

Tabel 4. 8 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air (Agregat Kasar)	
Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar	Sample (g)
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	1000
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	986,4
Berat Uji Kering Permukaan Jenuh Dalam Air (Ba)	632,5

Berikut adalah tabel Hasil Pengujian Berat Jenis **Tabel 4.9.**

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Berat Jenis (Agregat Kasar)		
Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar		Sampel
Berat Jenis (<i>Bulk</i>)	$\frac{B_k}{B_j - B_a}$	2,68
Berat Jenis Permukaan Jenuh	$\frac{B_j}{B_j - B_a}$	2,72
Berat Jenis Semu	$\frac{B_k}{B_k - B_a}$	2,79
Penyerapan	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$	1,38

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai berat jenis curah (*bulk specific gravity*) agregat kasar sebesar 2,68, berat jenis kondisi jenuh kering permukaan (*Saturated Surface Dry/SSD*) sebesar 2,72, berat jenis semu (*apparent specific gravity*) sebesar 2,79, dan tingkat penyerapan air (*absorption*) sebesar 1,38%. Nilai-nilai berat jenis tersebut telah memenuhi standar kriteria agregat normal (berada pada rentang 2,5–2,7) dan tingkat penyerapan air di bawah batas maksimum 3% sesuai standar SNI/ASTM. Kapasitas penyerapan sebesar 1,38% ini menunjukkan jumlah air yang diserap oleh pori-pori internal agregat kasar saat mencapai kondisi SSD, yang selanjutnya akan diperhitungkan dalam penyesuaian kebutuhan air pencampur pada perancangan campuran beton agar mutu beton yang ditargetkan dapat tercapai secara optimal. Berikut merupakan tabel rekapitulasi standar pengujian agregat kasar.

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Standar Pengujian (Agregat Kasar)				
Pengujian	Standar	Nilai	Persyaratan	Keterangan
Analisa Saringan	SNI ASTM C33	7,81	$FM \geq 6$	Memenuhi
Berat Jenis	SNI 1969-2016	2,68	2,50 – 2,70	Memenuhi
Daya Serap Air	SNI 1969-2016	1,4 %	$\leq 3\%$	Memenuhi

4. 1. 3 Hasil Pengujian Limbah Keramik

Pada proses pengujian beton modifikasi menggunakan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi yang telah divariasikan sebelumnya, telah dilakukan beberapa pengujian. Hasil Analisa saringan pada agregat limbah keramik disajikan dalam **Tabel 4.11.** berikut ini.

Tabel 4.11 Analisa Saringan (Limbah Keramik)

ANALISA SARINGAN					
No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Tertahan Saringan (g)	(%)	Tertahan Kumulatif (%)	Lolos Saringan (%)
1,5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	14,16	1,416	1,416	98,584
3/4"	19	126,47	12,647	14,063	85,937
1/2"	12,5	461,91	46,191	60,254	39,746
3/8"	9,5	349,12	34,912	95,166	4,834
#4	4,75	42,02	4,202	99,368	0,632
#8	2,36	0,13	0,013	99,381	0,619
#16	1,18	0,8	0,08	99,461	0,539
#30	0,6	0,8	0,08	99,541	0,459
#50	0,3	0,5	0,05	99,591	0,409
#100	0,15	0,4	0,04	99,631	0,369
#200	0,075	0,4	0,04	99,671	0,329
PAN		0,37	0,037	99,708	0,292
Jumlah			997,08	99,708	
				FM	7,68

Dari pengujian limbah keramik didapatkan hasil data seperti pada **Tabel 4.11.** dan dilakukan analisis dengan perhitungan:

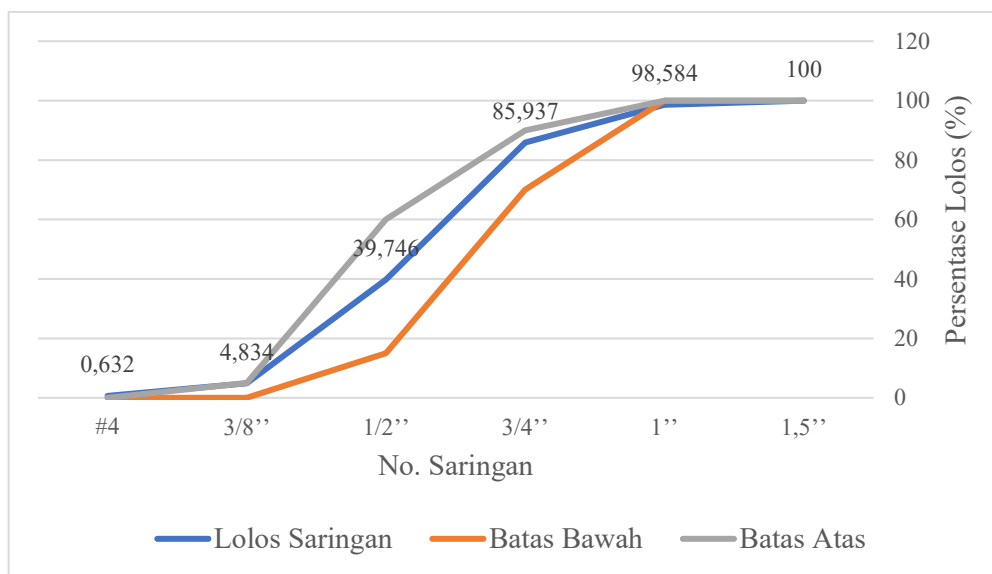
Kehilangan = berat awal – berat akhir

$$= 1000 - 997,08$$

$$= 2,92 \text{ gram}$$

$$\text{Persentase} = \frac{2,92}{500} \times 100\%$$

$$= 0,29\% < 0,3\% \text{ (memenuhi standar ASTM C136-2012)}$$



Gambar 4. 3 Grafik Gradasi Analisa Saringan Limbah Keramik

Berdasarkan hasil analisis saringan agregat kasar limbah keramik yang dilakukan sesuai SNI ASTM C136 – 2012 pada **Gambar 4.3.**, diperoleh distribusi gradasi agregat dengan ukuran nominal 20 mm. berdasarkan grafik gradasi, kurva agregat kasar limbah keramik berada diantara batas bawah dan batas atas gradasi agregat kasar dan memiliki FM 7,68 yang dipersyaratkan dalam SNI ASTM C33, sehingga gradasi limbah keramik memenuhi persyaratan sebagai substitusi Sebagian agregat kasar pada campuran beton. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran butiran limbah keramik telah memenuhi distribusi gradasi yang disyaratkan untuk campuran beton.

Setelah digunakan sebagai bahan substitusi agregat kasar, limbah keramik dilakukan pengujian berat jenis dan penyerapan air sesuai SNI 1969 – 2016. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik limbah keramik, khususnya nilai berat jenis dan kapasitas penyerapan air, yang digunakan sebagai parameter dalam perhitungan *mix design*. Berikut adalah tabel hasil pengujian berat jenis dan penyerapan air pada **Tabel 4.12**

Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air (Limbah Keramik)	
Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar	Sample (g)
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	1000
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)	897,4
Berat Uji Kering Permukaan Jenuh Dalam Air (Ba)	559,2

Berikut adalah tabel Hasil Pengujian Berat Jenis **Tabel 4.13.**

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Berat Jenis Limbah Keramik		
Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar		Sampel
Berat Jenis (<i>Bulk</i>)	$\frac{B_k}{B_j - B_a}$	2,03
Berat Jenis Permukaan Jenuh	$\frac{B_j}{B_j - B_a}$	2,26
Berat Jenis Semu	$\frac{B_k}{B_k - B_a}$	2,65
Penyerapan	$\frac{B_j - B_k}{B_k} \times 100\%$	11,4

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar limbah keramik memiliki berat jenis bulk sebesar 2,03, berat jenis permukaan jenuh sebesar 2,26, dan berat jenis semu sebesar 2,65, dengan nilai penyerapan air sebesar 11,4%. Nilai penyerapan yang cukup tinggi menunjukkan bahwa limbah keramik memiliki porositas yang menyebabkan agregat mampu menyerap air dalam jumlah tertentu. Karakteristik tersebut perlu diperhatikan dalam proses perencanaan dan pencampuran beton karena air yang terserap oleh agregat dapat memengaruhi jumlah air efektif serta *workability* campuran beton. **Tabel 4.14.** berikut merupakan tabel rekapitulasi standar pengujian limbah keramik.

Tabel 4. 14 Rekapitulasi Standar Pengujian Limbah Keramik				
Pengujian	Standar	Nilai	Persyaratan	Keterangan
Analisa Saringan	SNI ASTM C33	7,68	$FM \geq 6$	Memenuhi
Berat Jenis	SNI 1969-2016	2,03	2,50 – 2,70	Tidak Memenuhi
Daya Serap Air	SNI 1969-2016	11,4 %	$\leq 3\%$	Tidak Memenuhi

4. 1. 4 Hasil Pengujian *Biochar* Ampas Kopi

Sebelum memasuki proses pirolisis, ampas kopi terlebih dahulu dikeringkan menggunakan oven hingga mencapai kadar air di bawah 10% guna menjaga efisiensi termal dan kualitas karbonisasi. Pengujian kadar air agregat halus ampas kopi dilakukan untuk memastikan kelayakan bahan Baku sebelum diproses lebih lanjut, dengan hasil yang disajikan pada **Tabel 4.15.** berikut.

Tabel 4. 15 Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air <i>Biochar</i> Ampas Kopi		
Pengujian Kadar Air Agregat Halus Ampas Kopi		Sample (g)
Berat Benda Uji Basah (Bb)		2000
Berat Benda Uji Kering Oven (Bk)		1828,15
Kadar Air (%)	$\frac{Bb-Bk}{Bk} \times 100\%$	9,4

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.15.** di atas, sampel ampas kopi menghasilkan nilai kadar air sebesar 9,4%, sehingga telah memenuhi kriteria di bawah 10% untuk dapat diproses lebih lanjut. Sampel ampas kopi kering oven tersebut kemudian digunakan sebagai umpan (*feedstock*) dalam proses pirolisis, dengan rekapitulasi hasil pengujian yang disajikan pada **Tabel 4.16.** berikut.

Tabel 4. 16 Hasil Pengujian Berat Jenis <i>Biochar</i> Ampas Kopi		
Pengujian Penyerapan Agregat Halus <i>Biochar</i> Ampas Kopi		Sample (g)
Berat Benda Uji Ampas Kopi (B_u)		1500
Berat Benda Uji Hasil Pirolisis (B_p)		477
Kehilangan Massa (m)	$B_u - B_p$	1023
Rendemen <i>Biochar</i> % (Y)	$\frac{B_p}{B_u} \times 100\%$	31,80
Persentase Kehilangan Massa %	$\frac{m}{B_u} \times 100\%$	68,20

Note: Umpan ampas kopi (B_u) yang digunakan pada proses pirolisis merupakan ampas kopi dengan kadar air 9,4%

Berdasarkan hasil pengujian pada **Tabel 4.16.** di atas, pengujian pirolisis dilakukan menggunakan umpan ampas kopi kering oven (B_u) sebanyak 1500 gram dan menghasilkan *biochar* (B_p) sebesar 477 gram. Dari pengujian tersebut, diperoleh nilai rendemen (yield) *biochar* sebesar 31,80% serta kehilangan massa (m) sebesar 1023 gram atau setara dengan persentase kehilangan massa sebesar 68,20%. Nilai rendemen ini sejalan dengan penelitian Roychand et al. yang mencatat estimasi rendemen pirolisis ampas kopi berada pada kisaran 30%.

Pada proses pengujian beton modifikasi menggunakan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi yang telah divariasikan sebelumnya, telah dilakukan beberapa pengujian. Berikut adalah tabel hasil analisa saringan ampas kopi pada **Tabel 4.17.**

Tabel 4.17 Hasil Analisa Saringan *Biochar* Ampas Kopi

ANALISA SARINGAN					
No. Saringan	Diameter Saringan (mm)	Tertahan Saringan (g) (%)		Tertahan Komulatif (%)	Lolos Saringan (%)
1,5"	38,1				
1"	25,4				
3/4"	19				
1/2"	12,5				
3/8"	9,5				
#4	4,75				
#8	2,36				
#16	1,18	0	0	0	100
#30	0,6	10,14	2,03	2,03	97,97
#50	0,3	90,52	18,10	20,13	79,87
#100	0,15	265,64	53,13	73,26	26,74
#200	0,075	114,72	22,94	96,20	3,80
PAN		18,11	3,62	99,83	0,17
Jumlah		499,13	99,83		
				FM	0,95

Dari pengujian ampas kopi didapatkan hasil data seperti pada **Tabel 4.17.** dan dilakukan analisis dengan perhitungan:

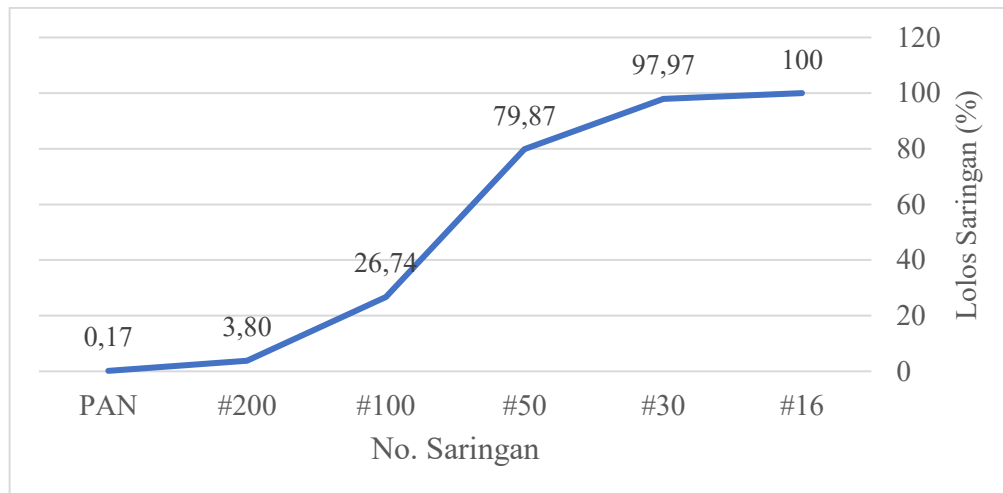
Kehilangan = berat awal – berat akhir

$$= 500 - 498,37$$

$$= 0,87 \text{ gram}$$

Persentase = $\frac{0,87}{500} \times 100\%$

$$= 0,17\% < 0,3\% \text{ (memenuhi standar ASTM C136-2012)}$$



Gambar 4. 4 Grafik Gradasi Analisa Saringan *Biochar* Ampas Kopi

Hasil analisis saringan *biochar* ampas kopi pada **Gambar 4.4.** menunjukkan bahwa material didominasi oleh butiran halus, dengan persentase lolos saringan No. 50 sebesar 72,21%, sehingga sebagian besar partikel *biochar* ampas kopi berada pada rentang ukuran 0,15 – 0,30 mm, sehingga distribusi ukuran butirnya relative seragam dan sesuai untuk digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton. Pengujian analisis saringan menggunakan *biochar* ampas kopi pada **Gambar 4.4** dilakukan karena saat ini belum tersedia acuan standar Baku atau spesifikasi teknis yang mengatur karakteristik material tersebut. Oleh karena itu, penulis melakukan pengujian analisis saringan untuk mengetahui data primer mengenai distribusi ukuran butirannya.

Proses pirolisis pada penelitian ini menggunakan umpan ampas kopi kering oven sebanyak 1500 gram dan menghasilkan *biochar* sebesar 477 gram, dengan nilai rendemen (yield) sebesar 31,80% serta kehilangan massa sebesar 1023 gram atau setara 68,20%. Nilai rendemen ini sejalan dengan penelitian Roychand dkk., (2023) yang mencatat estimasi rendemen pirolisis ampas kopi berada pada kisaran 30%, sehingga menunjukkan bahwa proses pirolisis yang dilakukan telah berjalan secara efektif. Hasil analisis saringan terhadap *biochar* ampas kopi yang dihasilkan menunjukkan bahwa material ini didominasi oleh butiran halus, dengan persentase lolos saringan No. 50 sebesar 72,21%, sehingga sebagian besar partikelnya berada pada rentang ukuran 0,15–0,30 mm dan memiliki distribusi ukuran butir yang relatif seragam. Karakteristik ini menunjukkan bahwa *biochar* ampas kopi sesuai digunakan sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton.

4. 1. 5 Analisis Gradasi Agregat Gabungan

Analisis gradasi agregat gabungan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir pada material penyusun beton serta kesesuaiannya terhadap batas gradasi yang ditentukan. Analisis dilakukan pada agregat kasar gabungan, agregat halus gabungan, dan agregat gabungan berdasarkan masing-masing variasi campuran.

1. Agregat Kasar Gabungan

Agregat kasar gabungan (AKLK) merupakan gabungan antara agregat kasar dan limbah keramik sesuai dengan proporsi yang digunakan dalam penelitian. Analisis gradasi dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat kasar gabungan setelah substitusi limbah keramik sebesar 20%. Dapat dilihat pada **Tabel 4.18.** berikut.

Tabel 4. 18 Hasil Analisa Saringan Agregat Kasar dan 20% Limbah Keramik Gabungan

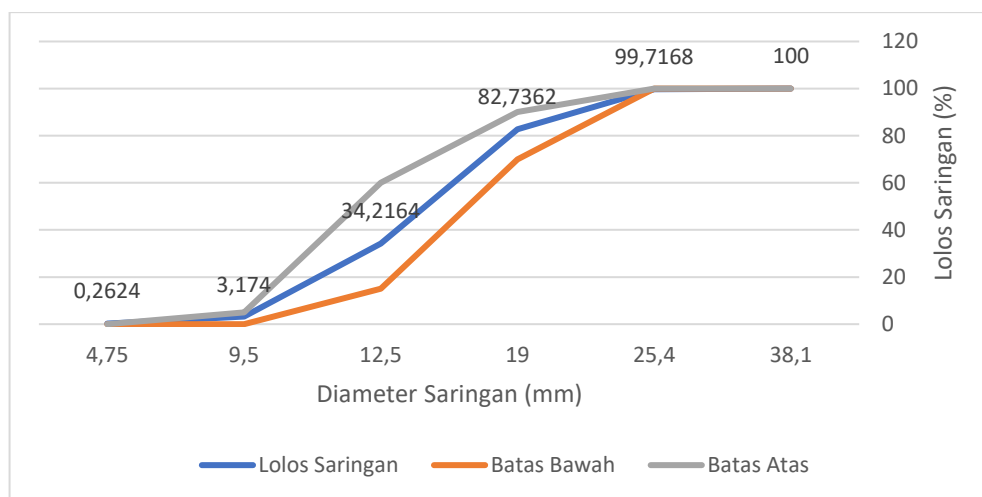
Diameter Saringan	Tertahan Kumulatif Agregat Kasar (%)	Lolos Saringan Agregat Kasar (%)	Tertahan Kumulatif Limbah Keramik (%)	Lolos Saringan Limbah Keramik (%)	Agregat Kasar 80% (%)	Limbah Keramik 20% (%)	Lolos Saringan AK80LK20 (%)	Tertahan Kumulatif AK80LK20 (%)
38,1	0	100	0	100	80	20	100	0
25,4	0	100	1,416	98,584	80	19,7168	99,7168	0,2832
19	18,064	81,936	14,063	85,937	65,5488	17,1874	82,7362	17,2638
12,5	67,166	32,834	60,254	39,746	26,2672	7,9492	34,2164	65,7836
9,5	97,241	2,759	95,166	4,834	2,2072	0,9668	3,174	96,826
4,75	99,83	0,17	99,368	0,632	0,136	0,1264	0,2624	99,7376
2,36	99,83	0,17	99,381	0,619	0,136	0,1238	0,2598	99,7402
1,18	99,83	0,17	99,461	0,539	0,136	0,1078	0,2438	99,7562
0,60	99,83	0,17	99,541	0,46	0,136	0,0918	0,2278	99,7722
0,30	99,83	0,17	99,591	0,41	0,136	0,0818	0,2178	99,7822
0,15	99,83	0,17	99,631	0,37	0,136	0,0738	0,2098	99,7902
0,08	99,83	0,17	99,671	0,33	0,136	0,0658	0,2018	99,7982

Berdasarkan **Tabel 4.18**, diperoleh nilai persentase kumulatif lolos saringan agregat kasar gabungan pada setiap ukuran saringan. Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas bawah dan batas atas gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian. Batas gradasi tersebut disajikan pada **Tabel 4.19.**

Tabel 4. 19 Batas Gradasi Agregat Kasar dan 20% Limbah Keramik Gabungan

Diameter Saringan (mm)	Lolos Saringan (%)	Batas Bawah (%)	Batas Atas (%)
38,1	100	100	100
25,4	99,7168	100	100
19	82,7362	70	90
12,5	34,2164	15	60
9,5	3,174	0	5
4,75	0,2624		
2,36	0,2598		
1,18	0,2438		
0,60	0,23		
0,30	0,22		
0,15	0,21		
0,08	0,20		

Perbandingan antara persentase kumulatif lolos saringan agregat kasar gabungan dengan batas bawah dan batas atas gradasi selanjutnya disajikan dalam bentuk kurva gradasi pada **Gambar 4.5**.



Gambar 4. 5 Grafik Gradasi Analisa Saringan Agregat Kasar Gabungan

Kurva gradasi menunjukkan bahwa persentase lolos agregat kasar gabungan pada setiap ukuran saringan berada di antara batas atas dan batas bawah yang disyaratkan, sehingga gradasi agregat kasar gabungan memenuhi persyaratan SNI ASTM C33/C33M. Hasil ini menjadi dasar bahwa proporsi kombinasi agregat kasar normal dan limbah keramik yang digunakan tidak memerlukan penyesuaian lebih lanjut pada job mix design campuran beton.

2. Agregat Halus Gabungan

Agregat halus gabungan (AHBK) merupakan gabungan antara agregat halus dan *biochar* ampas kopi sesuai dengan proporsi substitusi yang digunakan. Analisis gradasi dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi ukuran butir akibat penggunaan *biochar* ampas kopi sebagai substitusi agregat halus.

Agregat Halus dan 10% *biochar*

Agregat halus gabungan AHBK 10% merupakan gabungan agregat halus dengan *biochar* ampas kopi sebesar 10% sebagai substitusi agregat halus. Analisis gradasi dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir agregat halus gabungan setelah substitusi *biochar* ampas kopi sebesar 10%. Hasil analisis gradasi disajikan pada **Tabel 4.20**. berikut.

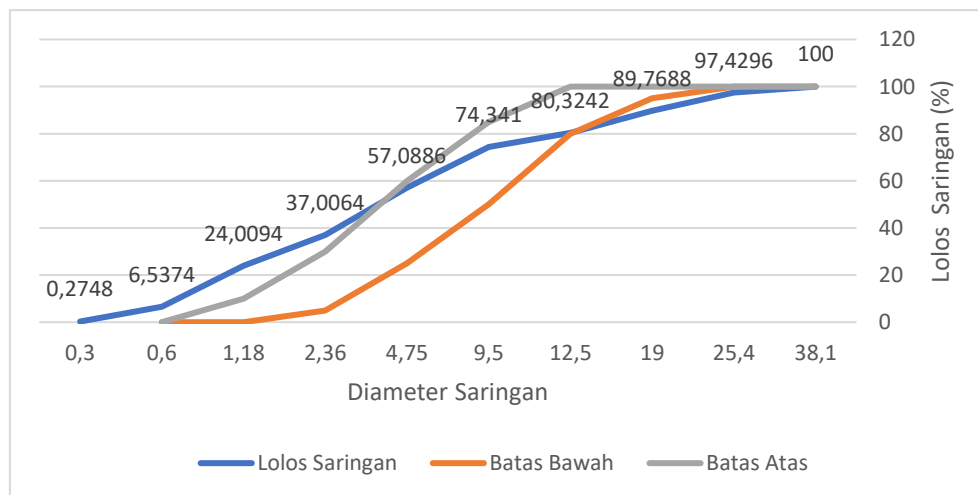
Tabel 4. 20 Hasil Analisis Gradasi Agregat Halus dan 10% *Biochar* Gabungan

Diameter Saringan	Tertahan Kumulatif Agregat Halus (%)	Lolos Saringan Agregat Halus (%)	Tertahan Kumulatif <i>Biochar</i> Kopi (%)	Lolos Saringan <i>Biochar</i> Kopi (%)	Agregat Halus 90% (%)	<i>Biochar</i> Kopi 10% (%)	Lolos Saringan AH90LK10 (%)	Tertahan Kumulatif AH90LK10 (%)
38,1	0	0	100	0	100	90	10	100
25,4	0	0	100	0	100	90	10	100
19	18,064	0	100	0	100	90	10	100
12,5	67,166	0	100	0	100	90	10	100
9,5	97,241	2,856	97,144	0	100	87,4296	10	97,4296
4,75	99,83	11,368	88,632	0	100	79,7688	10	89,7688
2,36	99,83	21,862	78,138	0	100	70,3242	10	80,3242
1,18	99,83	28,51	71,49	0	100	64,341	10	74,341
0,60	99,83	47,454	52,546	2,028	97,97	47,2914	9,7972	57,0886
0,30	99,83	67,756	32,244	20,132	79,87	29,0196	7,9868	37,0064
0,15	99,83	76,294	23,706	73,26	26,74	21,3354	2,674	24,0094
0,08	99,83	93,158	6,842	96,204	3,80	6,1578	0,3796	6,5374

Berdasarkan **Tabel 4.19**, diperoleh nilai persentase kumulatif lolos saringan agregat halus dan 10% *biochar* gabungan pada setiap ukuran saringan. Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas bawah dan batas atas gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian. Batas gradasi tersebut disajikan pada **Tabel 4.21**.

Tabel 4. 21 Batas Gradasi Agregat Halus dan 10% <i>Biochar</i> Gabungan			
Diameter Saringan (mm)	Lolos Saringan (%)	Batas Bawah (%)	Batas Atas (%)
38,1	100	100	100
25,4	100	100	100
19	100	100	100
12,5	100	100	100
9,5	97,4296	100	100
4,75	89,7688	95	100
2,36	80,3242	80	100
1,18	74,341	50	85
0,60	57,09	25	60
0,30	37,01	5	30
0,15	24,01	0	10
0,08	6,54	0	0

Berdasarkan hasil analisis, distribusi ukuran butir agregat halus gabungan disajikan pada **Tabel 4.21**. Kurva gradasi agregat halus gabungan berdasarkan hubungan antara ukuran saringan dan persentase kumulatif lolos ditunjukkan pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4. 6 Grafik Gradasi Analisa Saringan Agregat Halus dan 10% *Biochar*

Agregat Halus dan 15% *biochar*

Agregat halus gabungan AHBK 15% merupakan gabungan agregat halus dengan *biochar* ampas kopi sebesar 15% sebagai substitusi agregat halus. Analisis gradasi dilakukan untuk mengetahui perubahan distribusi ukuran butir akibat peningkatan proporsi *biochar* ampas kopi menjadi 15%. Hasil analisis gradasi disajikan pada **Tabel 4.22**.

Tabel 4. 22 Hasil Analisis Gradasi Agregat Halus dan 15% *Biochar* Gabungan

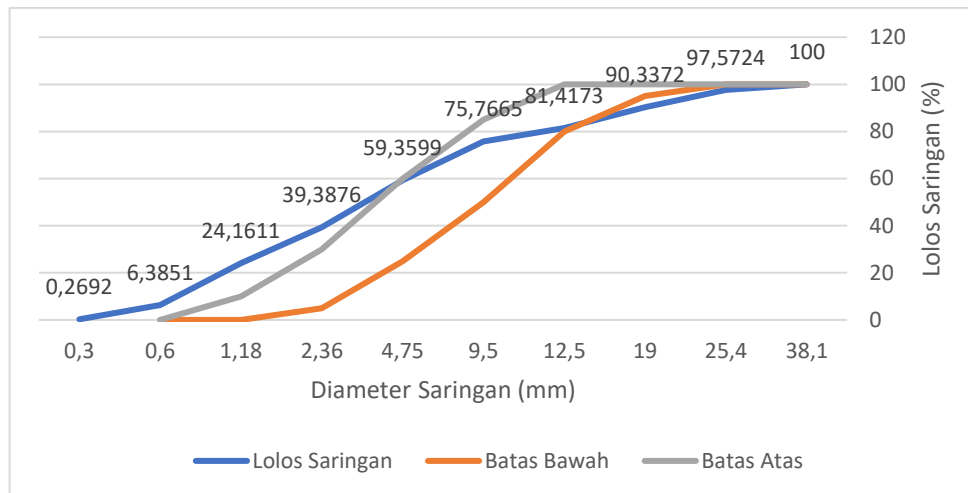
Diameter Saringan	Tertahan Kumulatif Agregat Halus (%)	Lolos Saringan Agregat Halus (%)	Tertahan Kumulatif <i>Biochar</i> Kopi (%)	Lolos Saringan <i>Biochar</i> Kopi (%)	Agregat Halus 90% (%)	<i>Biochar</i> Kopi 10% (%)	Lolos Saringan AH90LK10 (%)	Tertahan Kumulatif AH90LK10 (%)
38,1	0	100	0	100	85	15	100	0
25,4	0	100	0	100	85	15	100	0
19	0	100	0	100	85	15	100	0
12,5	0	100	0	100	85	15	100	0
9,5	2,856	97,144	0	100	82,5724	15	97,5724	2,4276
4,75	11,368	88,632	0	100	75,3372	15	90,3372	9,6628
2,36	21,862	78,138	0	100	66,4173	15	81,4173	18,5827
1,18	28,51	71,49	0	100	60,7665	15	75,7665	24,2335
0,60	47,454	52,546	2,028	97,97	44,6641	14,6958	59,3599	40,6401
0,30	67,756	32,244	20,132	79,87	27,4074	11,9802	39,3876	60,6124
0,15	76,294	23,706	73,26	26,74	20,1501	4,011	24,1611	75,8389
0,08	93,158	6,842	96,204	3,80	5,8157	0,5694	6,3851	93,6149

Berdasarkan **Tabel 4.22**, diperoleh nilai persentase kumulatif lolos saringan agregat halus dan 10% *biochar* gabungan pada setiap ukuran saringan. Nilai tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas bawah dan batas atas gradasi agregat yang digunakan dalam penelitian. Batas gradasi tersebut disajikan pada **Tabel 4.23**.

Tabel 4. 23 Batas Gradasi Agregat Halus dan 15% *Biochar* Gabungan

Diameter Saringan (mm)	Lolos Saringan (%)	Batas Bawah (%)	Batas Atas (%)
38,1	100	100	100
25,4	100	100	100
19	100	100	100
12,5	100	100	100
9,5	97,5724	100	100
4,75	90,3372	95	100
2,36	81,4173	80	100
1,18	75,7665	50	85
0,60	59,36	25	60
0,30	39,39	5	30
0,15	24,16	0	10
0,08	6,39	0	0

Berdasarkan hasil analisis, distribusi ukuran butir agregat halus gabungan disajikan pada **Tabel 4.23**. Kurva gradasi agregat halus dan 15% *biochar* gabungan berdasarkan hubungan antara ukuran saringan dan persentase kumulatif lolos ditunjukkan pada **Gambar 4.7**. berikut.



Gambar 4. 7 Gradasi Analisa Saringan Agregat Halus dan 15% *Biochar*

Kurva gradasi menunjukkan bahwa persentase lolos agregat halus dengan 10% dan 15% *biochar* berada di luar rentang batas atas-bawah pada rentang ukuran saringan 0,6–4,75 mm, di mana kurva lolos saringan melampaui batas atas, sebelum kembali mendekati rentang batas pada ukuran saringan yang lebih besar. Meskipun kurva gradasi agregat halus dengan 10% *biochar* berada di luar batas ASTM C33 pada rentang saringan 0,6–4,75 mm karena dominasi partikel sangat halus ($FM = 0,95$), penggunaan *biochar* sebagai substitusi parsial agregat halus masih dapat dipertimbangkan. Hal ini sejalan dengan temuan Roychand dkk. (2023) yang melaporkan berat jenis *biochar* ampas kopi (350CBC) sebesar 0,3, jauh lebih rendah dibanding pasir (2,62), sehingga substitusi *biochar* menggeser distribusi butiran ke arah ukuran lebih halus dan menyebabkan kurva gradasi melampaui batas atas SNI pada ukuran saringan kecil.

3. Gradasi Analisis Berdasarkan Variasi

Analisis gradasi agregat gabungan selanjutnya dilakukan pada masing-masing variasi campuran untuk mengetahui distribusi ukuran butir gabungan dari agregat kasar dan agregat halus yang digunakan dalam beton. Variasi yang dianalisis meliputi LK0BK0, LK20BK0, LK20BK10, dan LK20BK15.

A. Beton tanpa campuran substitusi

Variasi LK0BK0 merupakan campuran beton normal tanpa bahan substitusi, terdiri dari 100% agregat halus alami dan 100% agregat kasar alami. Hasil perhitungan gradasi gabungan ditunjukkan pada **Tabel 4.24**.

Tabel 4. 24 Hasil Analisis Gradasi Agregat Gabungan LK0BK0

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Pesen Tertahan Kumulatif		Batas Gradari	
	Kerikil	Pasir	Kerikil	Pasir	Kerikil	Pasir
38,1	100	100	0	0	95 - 100	
25,4	100	100	0	0	37 - 70	
19	81,936	100	18,064	0	10 - 40	
12,5	32,834	100	67,166	0	0 - 5	
9,5	2,759	100	97,241	0		100
4,75	0,17	98,078	99,83	1,922		90 - 100
2,36	0,17	88,124	99,83	11,876		75 - 100
1,18	0,17	65,892	99,83	34,108		55 - 90
0,6	0,17	39,65	99,83	60,35		56 - 90
0,3	0,17	17,758	99,83	82,242		8 - 30
0,15	0,17	4,602	99,83	95,398		0 - 10
0,075	0,17	1,732	99,83	98,268		
-	0,04	0,254	99,96	99,746		
Jumlah Kumulatif			781,45	285,90		

Perhitungan gradasi agregat gabungan secara analitis:

Ambil batas ayakan pada ukuran 4,75 mm, didapat nilai ideal:4

$$Y_o = 35$$

$$Y_1 = 98,078$$

$$Y_2 = 0,17$$

$$\begin{aligned}
 Y_o &= \left(Y_1 \times \frac{X}{100} \right) + \left(Y_2 \times \frac{100 - X}{100} \right) \\
 35 &= \left(98,078 \times \frac{35}{100} \right) + \left(0,17 \times \frac{100 - 0,17}{100} \right) \\
 35 &= \frac{(98,078x) - (0,17x)}{100} \\
 35 &= \frac{97,908x}{100} \\
 3500 &= 97,908x
 \end{aligned}$$

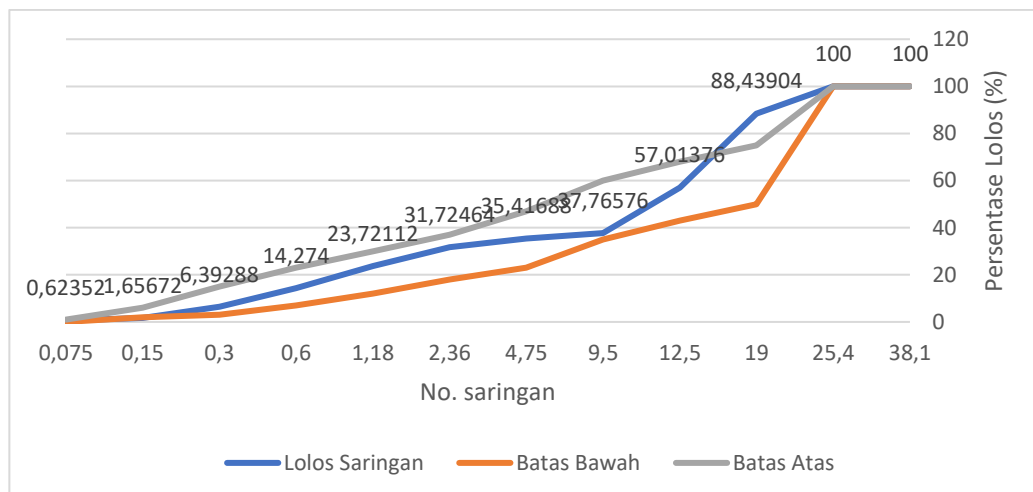
$$\text{Nilai x} = \frac{3500}{97,908} = 36\%$$

$$\text{Nilai y} = 100 - 36 = 64\%$$

Batas gradasi agregat gabungan ditentukan berdasarkan proporsi agregat kasar dan agregat halus pada campuran. Pada variasi LK0BK0, proporsi agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 64% dan 36%. Berdasarkan proporsi tersebut, diperoleh batas gradasi agregat gabungan untuk variasi LK0BK0 disajikan pada **Tabel 4.25.**

Tabel 4. 25 Batas Gradasi Agregat Gabungan LK0BK0						
Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Kerikil	Pasir	Batas Gradasi	
	Kerikil	Pasir	64%	36%	Kerikil	Pasir
38,1	100	100	64	36	100	100
25,4	100	100	64	36	100	50 - 75
19	81,936	100	52,43904	36	88,43904	35 - 60
12,5	32,834	100	21,01376	36	57,01376	23 - 47
9,5	2,759	100	1,76576	36	37,76576	12 - 30
4,75	0,17	98,078	0,1088	35,30808	35,41688	18 - 37
2,36		88,124		31,72464	31,72464	12 - 30
1,18		65,892		23,72112	23,72112	7 - 23
0,6		39,65		14,274	14,274	3 - 15
0,3		17,758		6,39288	6,39288	2 – 6
0,15		4,602		1,65672	1,65672	0 - 1
0,075		1,732		0,62352	0,62352	
Jumlah Kumulatif			781,45	285,90		

Hasil analisis gradasi agregat gabungan pada variasi ini selanjutnya dibandingkan dengan batas gradasi yang dipersyaratkan. Dilihat pada **Gambar 4.8.**



Gambar 4. 8 Gradasi Analisa Saringan Gabungan Variasi LK0BK0

B. Beton dengan agregat kasar substitusi 20% limbah keramik tanpa *biochar*

Variasi LK20BK0 menggunakan substitusi limbah keramik sebesar 20% pada agregat kasar tanpa substitusi *biochar* ampas kopi. Hasil analisis gradasi agregat gabungan pada variasi ini disajikan pada **Tabel 4.26**.

Tabel 4. 26 Hasil Analisis Gradasi Agregat Gabungan LK20BK0

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Pesen Tertahan Kumulatif		Batas Gradari	
	Kerikil (AKLK20)	Pasir	Kerikil (AKLK20)	Pasir	Kerikil	Pasir
38,1	100	100	0	0	95 - 100	
25,4	99,7168	100	0,2832	0	37 - 70	
19	82,7362	100	17,2638	0	10 _ 40	
12,5	34,2164	100	65,7836	0	0 - 5	
9,5	3,174	100	96,826	0		100
4,75	0,2624	98,078	99,7376	1,922		90 - 100
2,36	0,2598	88,124	99,7402	11,876		75 - 100
1,18	0,2438	65,892	99,7562	34,108		55 - 90
0,6	0,2278	39,65	99,7722	60,35		56 - 90
0,3	0,2178	17,758	99,7822	82,242		8 _ 30
0,15	0,2098	4,602	99,7902	95,398		0 - 10
0,075	0,2018	1,732	99,7982	98,268		
-	0	0,254	100	99,746		
Jumlah Kumulatif			778,73	285,90		

Perhitungan gradasi agregat gabungan secara analitis:

Ambil batas ayakan pada ukuran 4,75 mm, didapat nilai ideal:4

$$Y_0 = 35$$

$$Y_1 = 98,078$$

$$Y_2 = 0,262$$

$$Y_0 = (Y_1 \times \frac{X}{100}) + (Y_2 \times \frac{100 - X}{100})$$

$$35 = (98,078 \times \frac{35}{100}) + (0,26 \times \frac{100 - 0,17}{100})$$

$$35 = \frac{(98,078x) - (0,26x)}{100}$$

$$35 = \frac{97,8156x}{100}$$

$$3500 = 97,816x$$

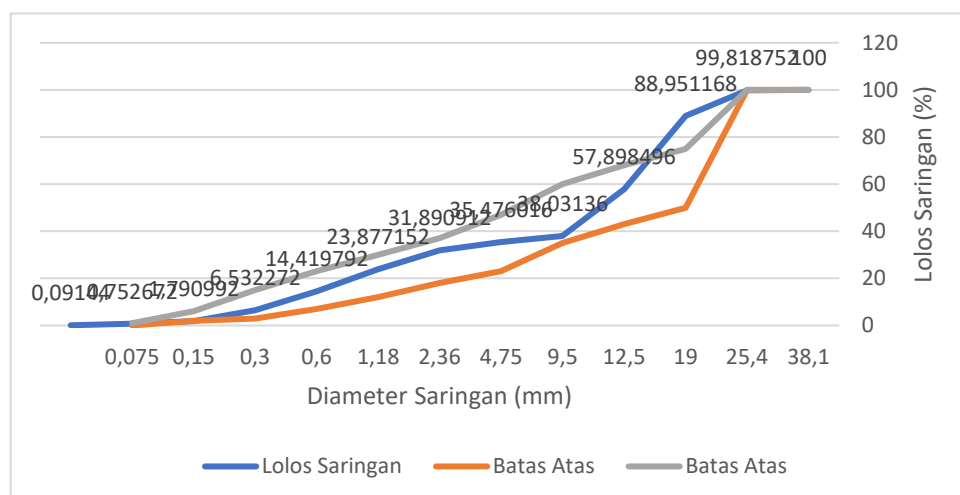
$$\text{Nilai } x = \frac{3500}{97,816} = 36\%$$

$$\text{Nilai } y = 100 - 36 = 64\%$$

Batas gradasi agregat gabungan ditentukan berdasarkan proporsi agregat kasar dan agregat halus pada campuran. Pada variasi LK20BK0, proporsi agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 64% dan 36%. Berdasarkan proporsi tersebut, diperoleh batas gradasi agregat gabungan untuk variasi LK20BK0 disajikan pada **Tabel 4.27**.

Tabel 4. 27 Batas Gradasi Agregat Gabungan LK20BK0						
Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Kerikil	Pasir	Batas Gradari	
	Kerikil	Pasir	64%	36%	Hasil	Pasir
38,1	100	100	64	36	100	100
25,4	99,7168	100	63,818752	36	99,818752	50-75
19	82,7362	100	52,951168	36	88,951168	35-60
12,5	34,2164	100	21,898496	36	57,898496	23-47
9,5	3,174	100	2,03136	36	38,03136	12_30
4,75	0,2624	98,078	0,167936	35,30808	35,476016	18_37
2,36	0,2598	88,124	0,166272	31,72464	31,890912	12_30
1,18	0,2438	65,892	0,156032	23,72112	23,877152	7_23
0,6	0,2278	39,65	0,145792	14,274	14,419792	3_15
0,3	0,2178	17,758	0,139392	6,39288	6,532272	2_6
0,15	0,2098	4,602	0,134272	1,65672	1,790992	1-0
0,075	0,2018	1,732	0,129152	0,62352	0,752672	

Hasil analisis gradasi agregat gabungan pada variasi ini selanjutnya dibandingkan dengan batas gradasi yang dipersyaratkan. Dilihat pada **Gambar 4.9.**



Gambar 4. 9 Gradasi Analisa Saringan Gabungan Variasi LK20BK0

C. Beton dengan substitusi agregat limbah keramik 20% dan *biochar* kopi 10%
 Variasi LK20BK10 menggunakan substitusi limbah keramik sebesar 20%
 pada agregat kasar dan *biochar* ampas kopi sebesar 10% pada agregat halus.
 Hasil analisis gradasi agregat gabungan disajikan pada **Tabel 4.28**.

Tabel 4. 28 Hasil Analisis Gradasi Agregat Gabungan LK20BK10

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos		Pesen Tertahan		Batas Gradasi	
	kumulatif		Kumulatif			
	Kerikil (AKLK20)	Pasir (AHBK10)	Kerikil (AKLK20)	Pasir (AHBK10)	Kerikil	Pasir
38,1	100	100	0	0	95 - 100	
25,4	99,7168	100	0,2832	0	37 - 70	
19	82,7362	100	17,2638	0	10 _ 40	
12,5	34,2164	100	65,7836	0	0 - 5	
9,5	3,174	97,4296	96,826	2,5704		100
4,75	0,2624	89,7688	99,7376	10,2312		90 - 100
2,36	0,2598	80,3242	99,7402	19,6758		75 - 100
1,18	0,2438	74,341	99,7562	25,659		55 - 90
0,6	0,2278	57,0886	99,7722	42,9114		56 - 90
0,3	0,2178	37,0064	99,7822	62,9936		8 _ 30
0,15	0,2098	24,0094	99,7902	75,9906		0 - 10
0,075	0,2018	6,5374	99,7982	93,4626		
-	0	0,2748	100	99,7252		
Jumlah Kumulatif			778,73	240,03		

Perhitungan gradasi agregat gabungan secara analitis:

Ambil batas ayakan pada ukuran 4,75 mm, didapat nilai ideal:4

$$Y_o = 35$$

$$Y_1 = 89,769$$

$$Y_2 = 0,262$$

$$Y_o = \left(Y_1 \times \frac{X}{100} \right) + \left(Y_2 \times \frac{100 - X}{100} \right)$$

$$35 = \left(89,769 \times \frac{35}{100} \right) + \left(0,26 \times \frac{100 - 0,17}{100} \right)$$

$$35 = \frac{(89,769x) - (0,26x)}{100}$$

$$35 = \frac{89,506x}{100}$$

$$3500 = 89,506x$$

$$\text{Nilai } x = \frac{3500}{89,506} = 39\%$$

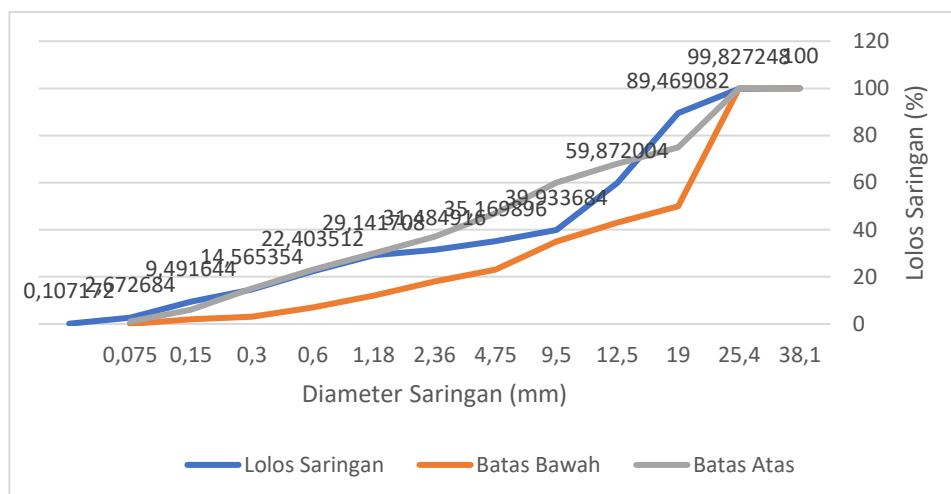
$$\text{Nilai } y = 100 - 39 = 61\%$$

Batas gradasi agregat gabungan ditentukan berdasarkan proporsi agregat kasar dan agregat halus pada campuran. Pada variasi LK20BK10, proporsi agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 61% dan 39%. Berdasarkan proporsi tersebut, diperoleh batas gradasi agregat gabungan untuk variasi LK20BK10 disajikan pada **Tabel 4.29**.

Tabel 4. 29 Batas Gradasi Agregat Gabungan LK20BK10

Diameter	Persen Lolos		Kerikil	Pasir	Batas Gradasi	
Saringan	kumulatif					
(mm)	Kerikil	Pasir	61%	39%	Hasil	Pasir
38,1	100	100	61	39	100	100
25,4	99,7168	100	60,827248	39	99,827248	50-75
19	82,7362	100	50,469082	39	89,469082	35-60
12,5	34,2164	100	20,872004	39	59,872004	23-47
9,5	3,174	97,4296	1,93614	37,99754	39,933684	12-30
4,75	0,2624	89,7688	0,160064	35,00983	35,169896	18-37
2,36	0,2598	80,3242	0,158478	31,32644	31,484916	12-30
1,18	0,2438	74,341	0,148718	28,99299	29,141708	7-23
0,6	0,2278	57,0886	0,138958	22,26455	22,403512	3-15
0,3	0,2178	37,0064	0,132858	14,4325	14,565354	2-6
0,15	0,2098	24,0094	0,127978	9,363666	9,491644	1-0
0,075	0,2018	6,5374	0,123098	2,549586	2,672684	

Hasil analisis gradasi agregat gabungan pada variasi ini selanjutnya dibandingkan dengan batas gradasi yang dipersyaratkan. Dilihat pada **Gambar 4.10**.



Gambar 4. 10 Gradasi Analisa Saringan Gabungan Variasi LK20BK10

D. Beton dengan substitusi agregat limbah keramik 20% dan *biochar* kopi 15% Variasi LK20BK15 menggunakan substitusi limbah keramik sebesar 20% pada agregat kasar dan *biochar* ampas kopi sebesar 15% pada agregat halus. Hasil analisis gradasi agregat gabungan disajikan pada **Tabel 4.30.** berikut.

Tabel 4. 30 Hasil Analisis Gradasi Agregat Gabungan LK20BK15

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Pesen Tertahan Kumulatif		Batas Gradari	
	Kerikil (AKLK20)	Pasir (AHBK15)	Kerikil (AKLK20)	Pasir (AHBK15)	Kerikil	Pasir
38,1	100	100	0	0	95 - 100	
25,4	99,7168	100	0,2832	0	37 - 70	
19	82,7362	100	17,2638	0	10 _ 40	
12,5	34,2164	100	65,7836	0	0 - 5	
9,5	3,174	97,5724	96,826	2,4276	100	
4,75	0,2624	90,3372	99,7376	9,6628	90 - 100	
2,36	0,2598	81,4173	99,7402	18,5827	75 - 100	
1,18	0,2438	75,7665	99,7562	24,2335	55 - 90	
0,6	0,2278	59,3599	99,7722	40,6401	56 - 90	
0,3	0,2178	39,3876	99,7822	60,6124	8 _ 30	
0,15	0,2098	24,1611	99,7902	75,8389	0 - 10	
0,075	0,2018	6,3851	99,7982	93,6149		
-	0	0,2692	100	99,7308		
Jumlah Kumulatif			778,73	232		

Perhitungan gradasi agregat gabungan secara analitis:

Ambil batas ayakan pada ukuran 4,75 mm, didapat nilai ideal:4

$$Y_o = 35$$

$$Y_1 = 90,337$$

$$Y_2 = 0,262$$

$$\begin{aligned} Y_o &= (Y_1 \times \frac{X}{100}) + (Y_2 \times \frac{100 - X}{100}) \\ 35 &= (90,337 \times \frac{35}{100}) + (0,26 \times \frac{100 - 0,17}{100}) \\ 35 &= \frac{(90,337x) - (0,26x)}{100} \\ 35 &= \frac{90,075x}{100} \\ 3500 &= 90,075x \end{aligned}$$

$$\text{Nilai x} = \frac{3500}{90,075} = 39\%$$

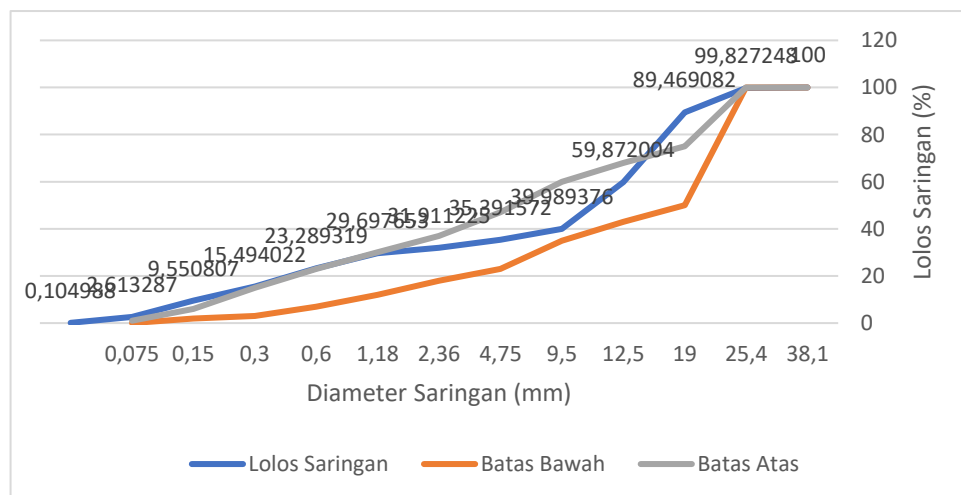
$$\text{Nilai y} = 100 - 39 = 61\%$$

Batas gradasi agregat gabungan ditentukan berdasarkan proporsi agregat kasar dan agregat halus pada campuran. Pada variasi LK20BK15, proporsi agregat kasar dan halus masing-masing sebesar 61% dan 39%. Berdasarkan proporsi tersebut, diperoleh batas gradasi agregat gabungan untuk variasi LK20BK15 disajikan pada **Tabel 4.31**.

Tabel 4. 31 Batas Gradasi Agregat Gabungan LK20BK15

Diameter Saringan (mm)	Persen Lolos kumulatif		Kerikil		Pasir		Batas Gradasi	
	Kerikil	Pasir	61%	39%	Kerikil	Pasir		
38,1	100	100	61	39	100	100		
25,4	99,7168	100	60,827248	39	99,827248	50-75		
19	82,7362	100	50,469082	39	89,469082	35-60		
12,5	34,2164	100	20,872004	39	59,872004	23-47		
9,5	3,174	97,5724	1,93614	38,05324	39,989376	12-30		
4,75	0,2624	90,3372	0,160064	35,23151	35,391572	18-37		
2,36	0,2598	81,4173	0,158478	31,75275	31,911225	12-30		
1,18	0,2438	75,7665	0,148718	29,54894	29,697653	7-23		
0,6	0,2278	59,3599	0,138958	23,15036	23,289319	3-15		
0,3	0,2178	39,3876	0,132858	15,36116	15,494022	2-6		
0,15	0,2098	24,1611	0,127978	9,422829	9,550807	1-0		
0,075	0,2018	6,3851	0,123098	2,490189	2,613287			

Hasil analisis gradasi agregat gabungan pada variasi ini selanjutnya dibandingkan dengan batas gradasi yang dipersyaratkan. Dilihat pada **Gambar 4.11**.



Gambar 4. 11 Gradasi Analisa Saringan Gabungan Variasi LK20BK15

Berdasarkan hasil analisa saringan gabungan pada keempat variasi campuran, variasi kontrol LK0BK0 memiliki distribusi gradasi yang paling ideal karena seluruh titik persentase lolos berada tepat di dalam rentang spesifikasi (di antara batas bawah dan batas atas). Sementara itu, penambahan substitusi limbah keramik dan *biochar* (LK20BK0, LK20BK10, dan LK20BK15) secara nyata meningkatkan persentase lolos saringan pada fraksi agregat halus (saringan No. 0,075 mm hingga No. 0,6 mm). Peningkatan porsi halus ini semakin signifikan seiring bertambahnya kadar *biochar* seperti terlihat pada saringan No. 0,3 mm dengan peningkatan persentase lolos dari 6,39% (LK0BK0) menjadi 6,53% (LK20BK0), 9,49% (LK20BK10), hingga mencapai 15,49% (LK20BK15). Kehadiran partikel *biochar* yang relatif lebih halus bertindak sebagai filler tambahan dalam campuran. Meskipun terjadi peningkatan pada fraksi halus, secara umum kurva gradasi masih mendekati kriteria spesifikasi, dengan catatan terjadi sedikit lonjakan yang melampaui batas atas pada saringan ukuran menengah 19 mm (88,95%–89,47%) pada ketiga variasi campuran modifikasi

Meskipun variasi campuran LK20BK0, LK20BK10, dan LK20BK15 menunjukkan persentase lolos pada fraksi halus (saringan 0,075–0,6 mm) yang sedikit melampaui batas atas spesifikasi, penyimpangan gradasi dalam kisaran terbatas seperti ini umumnya hanya memberikan pengaruh kecil terhadap kuat tekan 28 hari dan modulus elastisitas beton (Rangaraju dkk., 2013). Studi penyimpangan gradasi agregat menunjukkan bahwa deviasi hingga $\pm 12\%$ kumulatif pada saringan tertentu tidak secara signifikan mengubah kuat tekan beton, selama sifat plastis beton (*slump*, kadar udara) tetap dalam batas wajar dan beton dapat dipadatkan dengan baik. Dampak utama dari peningkatan fraksi halus adalah pada workability dan kebutuhan air, di mana beton cenderung lebih mudah dikerjakan namun berpotensi memerlukan penyesuaian w/cm agar kuat tekan tidak turun (ACI Education Bulletin E1-07, 2007); (Aggregate Gradation Optimization-Literature Search, 2005) Dengan demikian, selama kuat tekan, *slump*, dan durabilitas beton modifikasi tetap memenuhi atau melampaui beton kontrol, gradasi yang sedikit keluar dari batas spesifikasi masih dapat diterima dalam konteks penelitian pemanfaatan limbah.

4. 2 Pemeriksaan Beton

4. 2. 1 Hasil Pegujian Kuat Tekan Beton

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. Berikut ini pada **Tabel 4.32.** adalah tabel faktor koreksi terhadap ukuran sampel yang digunakan.

Tabel 4.32 Data Pungukuran Sampel Aktual

Diameter (D)	Tinggi (L)	Faktor Koreksi
mm	mm	
50	100	1,09
75	150	1,06
100	200	1,04
125	250	1,02
150	300	1,00
175	350	0,98
200	400	0,96
250	500	0,93
300	600	0,91

Dari **Tabel 4.18.** estimasi korelasi kuat tekan silinder beton berdasarkan benda uji ($L/D = 2$) didapat faktor koreksi 1,00 dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Maka didapat persamaan:

$$\text{Kuat tekan} = \frac{P}{A} \times \text{Faktor } L/D$$

Keterangan:

P = Beban tekan maksimum (Kgf atau N)

A = Luas bidang tekan (mm^2)

Berikut adalah tabel hasil Gabungan Hasil Uji Kuat Tekan Beton pada **Tabel 4.33**.

Variasi	Kode Sampel	Umur (Hari)	Dimensi		Luas Bidang (mm ²)	Gaya Tekan (Kn)	Kuat Tekan (N/mm ²)	Rata- rata Kuat Tekan (N/mm ²)
LK0BK0	A	28 Hari	300	150	17671,5	62600	36,13	35,67
	B	28 Hari	300	150	17671,5	63300	36,54	
	C	28 Hari	300	150	17671,5	59500	34,34	
LK20BK0	A	28 Hari	300	150	17671,5	51200	29,55	30,34
	B	28 Hari	300	150	17671,5	52100	30,07	
	C	28 Hari	300	150	17671,5	54400	31,40	
LK20BK10	A	28 Hari	300	150	17671,5	68100	39,31	39,04
	B	28 Hari	300	150	17671,5	68300	39,42	
	C	28 Hari	300	150	17671,5	66700	38,38	
LK20BK15	A	28 Hari	300	150	17671,5	53900	31,11	31,59
	B	28 Hari	300	150	17671,5	57900	33,42	
	C	28 Hari	300	150	17671,5	52400	30,25	

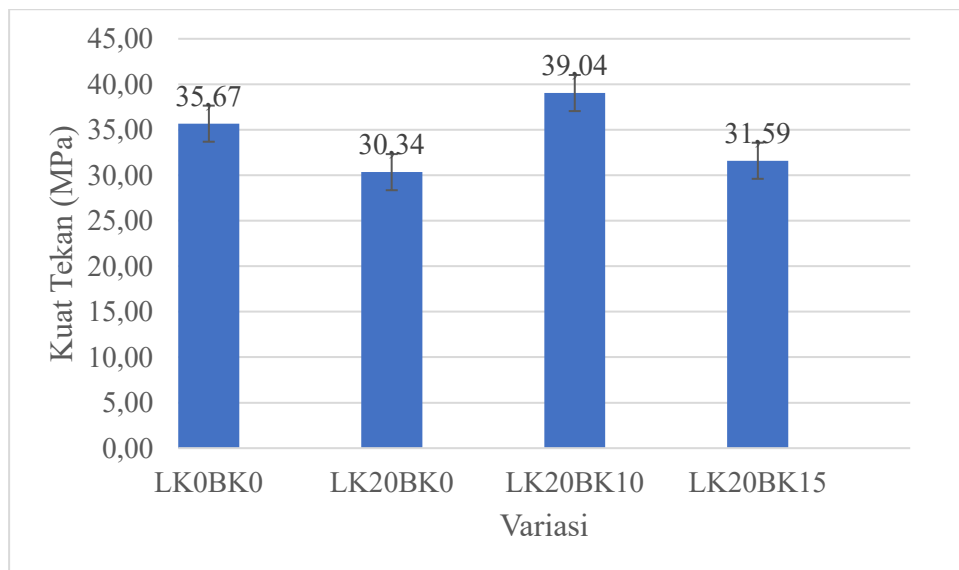
(Sumber: Analisa penulis, 2026)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan beton pada umur 28 hari untuk keempat variasi benda uji memiliki nilai rata-rata yang berbeda. Beton variasi LK0BK0 (0%;0%) sebagai beton kontrol menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 35,67 MPa. Pada variasi LK20BK0 (20%;0%), kuat tekan rata-rata yang diperoleh sebesar 30,34 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 14,9% dibandingkan beton kontrol.

Pada variasi LK20BK10 kuat tekan rata-rata meningkat menjadi 39,04 MPa, atau mengalami peningkatan sebesar 9,4% dibandingkan beton kontrol. Nilai tersebut merupakan kuat tekan rata-rata tertinggi dari seluruh variasi yang diuji. Sementara itu, pada variasi LK20BK15, kuat tekan rata-rata yang diperoleh sebesar 31,59 MPa, atau mengalami penurunan sebesar 11,4% dibandingkan beton kontrol.

Berdasarkan hasil tersebut, seluruh variasi beton yang diuji telah mencapai kuat tekan minimal sebesar 30 MPa yang ditetapkan dalam penelitian, dengan nilai kuat tekan berturut-turut sebesar 35,67 MPa pada LK0BK0, 30,34 MPa pada LK20BK0, 39,04 MPa pada LK20BK10, dan 31,59 MPa pada LK20BK15. Dengan demikian, penggunaan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi pada variasi yang diteliti masih mampu menghasilkan beton yang memenuhi target kuat tekan minimum penelitian, meskipun tidak seluruh variasi mampu menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan beton kontrol. Variasi LK20BK0 dan LK20BK15 menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan beton kontrol, sedangkan variasi LK20BK10 menghasilkan kuat tekan tertinggi dan bahkan melampaui beton kontrol.

Dengan demikian, berdasarkan hasil pengujian kuat tekan umur 28 hari, variasi LK20BK10 merupakan variasi dengan hasil paling optimal, karena menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 39,04 MPa, sekaligus memenuhi target kuat tekan minimum penelitian sebesar 30 MPa.



Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Kuat Tekan Seluruh Variasi Umur 28 Hari

Berdasarkan **Gambar 4.12.** hasil pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari menunjukkan variasi nilai kuat tekan untuk keempat variasi campuran. Beton normal (LK0BK0) sebagai kontrol menghasilkan kuat tekan sebesar 35,67 MPa, kemudian menurun menjadi 30,34 MPa pada variasi substitusi 20% limbah keramik tanpa *biochar* (LK20BK0). Hasil ini tidak sejalan dengan penelitian Pacheco-Torgal & Jalali, (2010), yang justru melaporkan bahwa beton dengan substitusi agregat kasar keramik memiliki kuat tekan lebih tinggi dibandingkan beton kontrol. Ketidaksesuaian ini dapat dijelaskan melalui De Brito dkk., (2005) serta diperkuat oleh temuan Paul dkk., (2023) dan Alshahwany dkk., (2024) pada beton dengan substitusi agregat kasar keramik. Hasil pengujian pada penelitian ini menunjukkan berat jenis limbah keramik sebesar 2,03 dan penyerapan air sebesar 11,4%, nilai yang mendekati temuan De Brito dkk., (2005) sebesar 12% untuk agregat keramik dan konsisten dengan karakteristik agregat keramik pada Alshahwany dkk., (2024), yang melaporkan berat jenis 2,46 dan penyerapan air 18,4% dibandingkan agregat alami dengan berat jenis 2,75 dan penyerapan hanya 0,4%, sehingga mengonfirmasi bahwa limbah keramik memang secara umum memiliki porositas internal yang jauh lebih tinggi dibandingkan agregat alami. Kondisi ini konsisten dengan mekanisme yang diuraikan Paul dkk., (2023), yang menemukan hubungan linear antara penyerapan air dan porositas terhadap penurunan kuat tekan pada beton berbasis agregat keramik ubin, serta mengaitkan penurunan kekuatan tersebut dengan lemahnya *interfacial transition zone* (ITZ) akibat permukaan agregat keramik yang halus dan sifatnya yang getas, sehingga kegagalan cenderung terjadi pada zona ikatan (*bond failure*) alih-alih pada gabungan pasta dan agregat. Temuan serupa juga dilaporkan Alshahwany dkk., (2024), yang menyatakan bahwa penyerapan air agregat keramik yang tinggi mengurangi jumlah air efektif yang tersedia untuk hidrasi semen, serta bahwa tekstur porselen pada permukaan agregat keramik menyebabkan ikatan yang tidak sempurna dengan pasta semen sehingga menghasilkan zona transisi yang lemah.

Kondisi ini diperparah oleh fakta bahwa penerapan pra-saturasi atau *saturated surface dry* (SSD) pada limbah keramik dalam penelitian ini tidak dilakukan secara merata ke seluruh agregat sebelum pencampuran, berbeda dengan prosedur SSD terkontrol yang diterapkan Pacheco-Torgal & Jalali, (2010) pada

Fase B penelitiannya. Pada penelitian tersebut, agregat keramik direndam dalam air selama 24 jam kemudian dikeringkan di udara hingga mencapai kondisi jenuh permukaan kering, dan prosedur ini diterapkan secara konsisten pada ketiga campuran yang diuji (kontrol, campuran dengan pasir keramik, dan campuran dengan agregat kasar keramik), dengan faktor air-semen (FAS) dijaga tetap sama sebesar 0,5 dan kadar air campuran sebesar 175 liter/m³ pada seluruh variasi. Agregat kasar keramik yang digunakan memiliki berat jenis 2263 kg/m³ dan penyerapan air 6,0% dibandingkan agregat alami dengan berat jenis 2643 kg/m³ dan penyerapan hanya 1,4% menunjukkan bahwa meskipun penyerapan air agregat keramiknya cukup tinggi, kondisi SSD yang seragam dan FAS yang konstan berhasil menjaga agar air tidak diserap secara tidak terkendali dari pasta semen selama proses pencampuran. Akibatnya, sebagian limbah keramik yang belum mencapai kondisi SSD secara merata pada penelitian ini tetap menyerap air pencampur pada saat proses hidrasi berlangsung, sehingga air efektif untuk hidrasi semen berkurang dan menyebabkan penurunan kuat tekan. Fenomena ini sejalan dengan mekanisme yang dijelaskan De Brito dkk., (2005) mengenai lemahnya ikatan agregat-pasta akibat densitas rendah, penyerapan air tinggi, dan bentuk partikel kurang ideal, serta diperkuat oleh temuan Paul dkk., (2023) yang secara khusus mengonfirmasi peran ITZ lemah dan porositas tinggi, dan Alshahwany dkk., (2024) yang menegaskan bahwa agregat berdensitas rendah cenderung menyerap lebih banyak air saat pencampuran sehingga mengurangi air yang tersedia untuk hidrasi semen sebagai penyebab mekanistik penurunan kuat tekan pada agregat keramik dengan karakteristik serupa.

Selanjutnya, pada variasi LK20BK10, penambahan 10% *biochar* ampas kopi sebagai substitusi agregat halus meningkatkan kuat tekan secara signifikan menjadi 39,04 MPa, melampaui beton kontrol. Peningkatan ini sejalan dengan temuan Roychand dkk., (2023) yang menyatakan bahwa *biochar* ampas kopi hasil pirolisis pada suhu 350°C (350CBC) memiliki kemampuan menyimpan air di dalam struktur porinya dan melepaskannya secara bertahap saat kelembaban relatif internal beton mulai menurun, sehingga menyediakan mekanisme *internal curing* yang membantu proses hidrasi semen berlangsung lebih optimal. Kemampuan ini didukung oleh berat jenis 350CBC yang jauh lebih rendah (0,30) dibandingkan pasir (2,62), yang

mengindikasikan porositas tinggi pada struktur *biochar*, serta hasil analisis SEM yang menunjukkan pasta semen mampu menembus pori *biochar* sehingga ikatan antara *biochar* dan matriks semen menjadi kuat. Proses pirolisis *biochar* ampas kopi pada penelitian ini menghasilkan rendemen sebesar 31,80% dengan kehilangan massa mencapai 68,20% yang menunjukkan bahwa sebagian besar senyawa organik pada ampas kopi telah terdekomposisi secara termal sejalan dengan temuan Roychand dkk., (2023) yang melaporkan peningkatan kandungan karbon pada *biochar* hasil pirolisis 350°C (62,8%) dibandingkan ampas kopi mentah (51,2%), sebagai indikasi keberhasilan proses dekomposisi termal dalam menghilangkan senyawa organik yang berpotensi menghambat hidrasi semen. Dengan demikian, tingginya rendemen kehilangan massa pada *biochar* penelitian ini turut mendukung terbentuknya struktur mikropori yang berperan dalam mekanisme *internal curing* tersebut. Mekanisme ini pada penelitian ini berperan mengimbangi kekurangan air akibat penyerapan tinggi limbah keramik yang tidak sepenuhnya tersaturasikan, sehingga hidrasi semen pada variasi LK20BK10 menjadi lebih optimal dibandingkan LK20BK0.

Namun, pada variasi LK20BK15, penambahan *biochar* hingga 15% kembali menurunkan kuat tekan menjadi 31,59 MPa. Penurunan ini konsisten dengan temuan Roychand dkk., (2023) pada *biochar* dengan kadar berlebih, di mana jumlah pori yang melampaui kebutuhan optimal untuk *internal curing* menyebabkan porositas berlebih dan melemahkan mikrostruktur matriks semen, di mana berat jenis *biochar* ampas kopi yang jauh lebih rendah (0,30) dibandingkan pasir (2,62), sehingga efek negatif porositas menjadi lebih dominan dibandingkan manfaat penyediaan air yang diberikan.

Selain kuat tekan, perubahan komposisi material substitusi juga memengaruhi berat isi teoritis beton. Berdasarkan hasil perhitungan berat isi teoritis, berat isi beton menurun dari 2307,11 kg/m³ pada LK0BK0 menjadi 2276,23 kg/m³ pada LK20BK0, 2210,29 kg/m³ pada LK20BK10, dan 2177,32 kg/m³ pada LK20BK15, atau masing-masing turun sebesar 1,3%, 4,2%, dan 5,6%. Penurunan tersebut disebabkan oleh penggunaan material substitusi yang memiliki berat jenis lebih rendah dibandingkan agregat normal.

Meskipun berat isi menurun secara konsisten, perubahan kuat tekan tidak menunjukkan pola yang sama. LK20BK0 mengalami penurunan berat isi sebesar 1,3% dan kuat tekan sebesar 14,9%, sedangkan LK20BK10 mengalami penurunan berat isi sebesar 4,2% tetapi kuat tekan justru meningkat sebesar 9,4%. Hal ini menunjukkan bahwa berat isi tidak berhubungan secara linier dengan kuat tekan. Berat isi terutama dipengaruhi oleh komposisi volumetrik material, sedangkan kuat tekan dipengaruhi oleh mikrostruktur, keseimbangan air, dan kualitas ikatan dalam beton (Shrestha & Säteri, 2021.) Elinwa, (2026) melaporkan hubungan linier yang sangat rendah antara densitas dan kuat tekan ($R^2 = 0,0386$), sehingga densitas bukan prediktor langsung kuat tekan. (Ibrahim dkk., 2025) juga menunjukkan bahwa pada beton *steel slag*, peningkatan kuat tekan lebih berkaitan dengan hidrasi tambahan dan pembentukan C-S-H yang menghasilkan mikrostruktur lebih padat, meskipun perubahan *unit weight* tidak selalu sebanding dengan peningkatan kuat tekan.

Dengan demikian, penurunan berat isi pada penelitian ini tidak dapat dijadikan dasar untuk menjelaskan penurunan atau peningkatan kuat tekan secara langsung. Hal tersebut terlihat pada LK20BK10 yang memiliki berat isi lebih rendah dibandingkan beton normal, tetapi menghasilkan kuat tekan tertinggi. Peningkatan kuat tekan pada variasi tersebut lebih berkaitan dengan mekanisme *internal curing* dan ikatan pasta-biochar yang telah dijelaskan sebelumnya berdasarkan (Roychand dkk., 2023b) sedangkan perubahan berat isi terutama menunjukkan pengaruh komposisi dan berat jenis material penyusun.

4. 2. 2 Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan parameter kekuatan lentur beton dengan menghitung beban maksimum yang mampu ditahan oleh benda uji balok saat mengalami keruntuhan akibat pembebanan, sesuai dengan SNI 4431:2011 tentang Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan. Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan gaya tarik yang timbul akibat momen lentur, sehingga dapat menggambarkan kekuatan beton dalam mendukung mutu struktur yang direncanakan, khususnya pada elemen struktur seperti pelat dan perkerasan kaku (*rigid pavement*) yang banyak mengalami tegangan lentur akibat beban yang bekerja. Berikut ini adalah **Tabel 4.34.** yang merupakan tabel rekapitulasi hasil uji kuat lentur beton.

Tabel 4. 34 Rekapitulasi Hasil Uji Kuat Lentur Beton

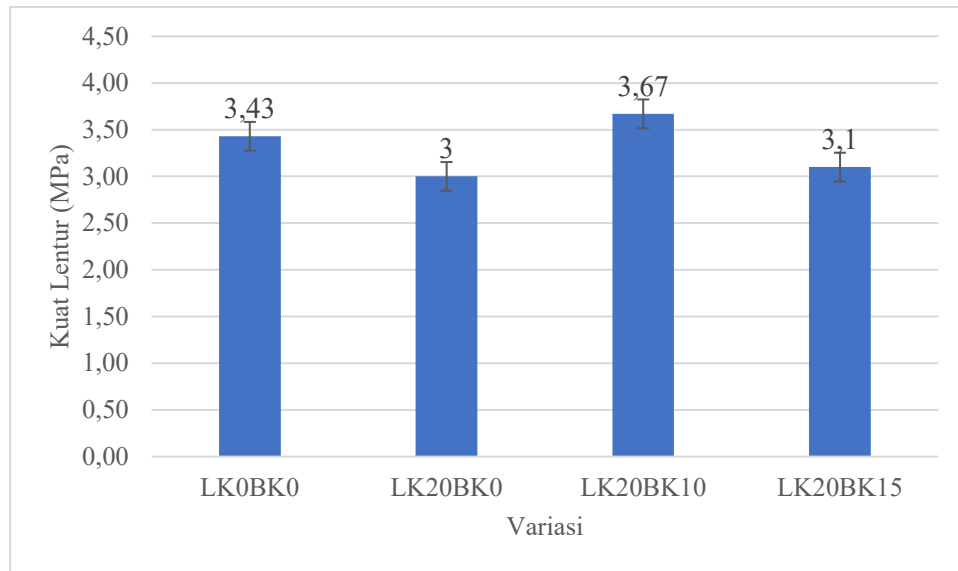
Variasi	Kode Sampel	Umur (Hari)	Dimensi			Kuat Lentur (MPa)	Rata-rata Kuat Lentur (MPa)
			L (mm)	T (mm)	P (mm)		
LK0BK0	A	28 Hari	150	150	600	3,4	3,43
	B	28 Hari	150	150	600	3,5	
	C	28 Hari	150	150	600	3,4	
LK20BK0	A	28 Hari	150	150	600	2,9	3,00
	B	28 Hari	150	150	600	3	
	C	28 Hari	150	150	600	3,1	
LK20BK10	A	28 Hari	150	150	600	3,7	3,67
	B	28 Hari	150	150	600	3,7	
	C	28 Hari	150	150	600	3,6	
LK20BK15	A	28 Hari	150	150	600	3	3,10
	B	28 Hari	150	150	600	3,3	
	C	28 Hari	150	150	600	3	

(Sumber: Analisis penulis, 2026)

Hasil pengujian pada **Tabel 4.34.** di atas menunjukkan bahwa kuat lentur beton pada umur 28 hari untuk keempat variasi benda uji ditunjukkan pada Tabel diatas. Pada variasi LK0BK0 diperoleh kuat lentur rata-rata sebesar 3,43 MPa, sedangkan pada variasi LK20BK0 kuat lentur rata-rata menurun menjadi 3,00 MPa. Variasi LK20BK10 menghasilkan kuat lentur rata-rata tertinggi, yaitu sebesar 3,67 MPa, sementara pada variasi LK20BK15 kuat lentur rata-rata kembali menurun menjadi 3,10 MPa.

Berdasarkan kuat tekan rencana (f'_c) sebesar 30 MPa, syarat kuat lentur minimum menurut korelasi ACI 318 ($f_s = 0,62\sqrt{f'_c}$) adalah sebesar 3,40 MPa. Jika dibandingkan dengan syarat tersebut, variasi LK0BK0 (3,47 MPa) dan LK20BK10 (3,80 MPa) telah memenuhi bahkan melampaui syarat minimum kuat lentur. Sebaliknya, variasi LK20BK0 (3,10 MPa) dan LK20BK15 (3,20 MPa) belum memenuhi syarat kuat lentur minimum tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *biochar* ampas kopi sebesar 10% pada variasi LK20BK10 memberikan kontribusi positif terhadap kuat lentur beton melalui mekanisme *internal curing*, sehingga mampu mengimbangi penurunan kekuatan akibat

substitusi agregat kasar keramik. Sementara itu, pada kadar *biochar* 15% (LK20BK15), efek *internal curing* tidak lagi optimal sehingga kuat lentur yang dihasilkan berada di bawah syarat minimum yang disyaratkan. **Gambar 4.13.** berikut ini merupakan grafik perbandingan kuat lentur beton seluruh variasi campuran pada umur 28 hari.



Gambar 4. 13 Grafik Perbandingan Kuat Lentur Seluruh Variasi Umur 28 Hari

Berdasarkan **Gambar 4.13.**, beton normal (LK0BK0) menghasilkan kuat lentur sebesar 3,43 MPa, sedangkan substitusi 20% limbah keramik pada LK20BK0 menurunkan kuat lentur menjadi 3,00 MPa atau sebesar 12,54%. Penurunan tersebut diduga disebabkan oleh karakteristik limbah keramik yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu berat jenis 2,03 dan penyerapan air sebesar 11,4%, serta bentuk partikel yang pipih, bersudut tajam, dan bertekstur permukaan licin. Karakteristik ini sejalan dengan penjelasan Alshahwany dkk., (2024) bahwa agregat keramik dengan penyerapan air tinggi dapat menyerap sebagian air pencampur sehingga mengurangi air yang tersedia untuk hidrasi semen, sedangkan permukaan porselen menyebabkan ikatan antara agregat dan pasta semen kurang sempurna serta menghasilkan zona transisi antarmuka (ITZ) yang kurang baik. Bentuk partikel pipih dan bersudut tajam pada limbah keramik hasil penelitian ini turut mempersulit pemadatan campuran, sehingga rongga udara yang terjebak berpotensi menambah porositas beton dan mempermudah terbentuknya retak pada daerah tarik ketika beton menerima beban lentur. Penelitian De Brito dkk., (2005) juga

menunjukkan bahwa penggunaan agregat keramik dapat menurunkan kuat tekan dan kuat lentur, tetapi penurunan kuat lentur pada penelitian tersebut (26%) jauh lebih kecil dibandingkan penurunan kuat tekan (45%). Hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang sama, karena penurunan kuat lentur LK20BK0 sebesar 12,54% juga lebih kecil daripada penurunan kuat tekan sebesar 14,95% pada variasi yang sama. Perbedaan besaran penurunan ini berkaitan dengan perbedaan mekanisme pengujian, di mana berdasarkan SNI 4431:2011 kuat lentur diukur dari kemampuan balok beton menahan gaya tegak lurus sumbu benda uji dengan sisi bawah balok menahan tegangan tarik dan sisi atas menahan tegangan tekan, berbeda dengan pengujian kuat tekan yang bebannya bekerja merata ke seluruh penampang benda uji.

Selanjutnya, pada variasi LK20BK10, penambahan 10% *biochar* ampas kopi sebagai substitusi agregat halus meningkatkan kuat lentur secara signifikan menjadi 3,67 MPa, melampaui beton kontrol (3,43 MPa) dan menjadi nilai tertinggi di antara seluruh variasi campuran. Peningkatan ini sejalan dengan peningkatan kuat tekan pada variasi yang sama (39,04 MPa). *Biochar* ampas kopi hasil pengujian pada penelitian ini didominasi oleh butiran halus dengan ukuran 0,15–0,30 mm (FM 0,95), sehingga mampu mengisi rongga-rongga kecil dalam campuran dan memperbaiki gradasi agregat halus secara keseluruhan. Kondisi ini sejalan dengan hasil analisis SEM yang dilaporkan Roychand dkk., (2023) yang menunjukkan bahwa pasta semen mampu menembus pori *biochar* sehingga ikatan antara *biochar* dan matriks semen menjadi kuat. Ikatan yang kuat ini relevan bagi kapasitas lentur karena, berdasarkan SNI 4431:2011, kegagalan lentur diinisiasi oleh retak pada zona tarik terluar penampang, sehingga perbaikan kualitas ikatan pasta-agregat pada zona tersebut turut berkontribusi terhadap kemampuan beton menahan tegangan tarik akibat lenturan. Dengan tersedianya air tambahan dari mekanisme *internal curing biochar* untuk mengimbangi kekurangan air akibat penyerapan tinggi limbah keramik (11,4%) yang tidak sepenuhnya tersaturasikan pada penelitian ini, hidrasi semen pada variasi LK20BK10 berlangsung lebih optimal, sehingga kuat lentur yang dihasilkan menjadi lebih tinggi dibandingkan LK20BK0.

Namun, peningkatan kadar *biochar* dari 10% menjadi 15% pada LK20BK15 justru menyebabkan kuat lentur turun menjadi 3,10 MPa. Nilai tersebut mengalami

penurunan sebesar 15,53% dibandingkan LK20BK10, meskipun masih lebih tinggi 3,33% dibandingkan LK20BK0. Jika dibandingkan dengan beton kontrol, LK20BK15 tetap mengalami penurunan sebesar 9,62%. Pola ini menunjukkan bahwa penambahan *biochar* memiliki kadar optimum dan tidak memberikan peningkatan kuat lentur secara linier. Pada kadar 10%, kemampuan *biochar* dalam menyimpan air diduga masih memberikan manfaat terhadap hidrasi dan pembentukan matriks beton. Akan tetapi, ketika jumlahnya ditingkatkan menjadi 15%, volume material berpori dalam campuran juga meningkat, mengingat berat jenis *biochar* ampas kopi hasil pirolisis pada penelitian ini jauh lebih rendah dibandingkan pasir yang digantikannya, sehingga dapat menghasilkan porositas yang lebih besar dan mengurangi kontinuitas matriks semen. Kondisi ini sejalan dengan temuan Roychand dkk., (2023), yang menjelaskan bahwa pada kadar *biochar* berlebih, jumlah pori yang terbentuk melampaui kebutuhan optimal untuk *internal curing* sehingga porositas yang tersisa justru melemahkan mikrostruktur matriks semen. Akibatnya, meskipun air yang tersimpan untuk *internal curing* bertambah, efek negatif akibat meningkatnya volume pori dan berkurangnya material padat yang mampu meneruskan tegangan menjadi lebih dominan pada zona tarik penampang lentur. Pola yang sama terlihat pada kuat tekan, yaitu dari 39,04 MPa pada LK20BK10 turun menjadi 31,59 MPa pada LK20BK15.

Kecenderungan yang sama antara kuat tekan dan kuat lentur menunjukkan adanya hubungan yang searah dan cenderung linear pada variasi campuran yang diuji. Variasi LK20BK10 yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 39,04 MPa juga menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 3,67 MPa, sedangkan LK20BK0 yang memiliki kuat tekan terendah sebesar 30,34 MPa menghasilkan kuat lentur terendah sebesar 3,00 MPa. Berdasarkan data keempat variasi pada penelitian ini, peningkatan kuat tekan diikuti oleh peningkatan kuat lentur, sehingga menunjukkan bahwa kualitas matriks beton yang lebih baik secara umum juga meningkatkan kemampuan beton dalam menahan beban lentur. Hubungan tersebut menunjukkan korelasi yang kuat, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan hubungan sebab-akibat secara langsung, mengingat kuat lentur beton turut dipengaruhi oleh karakteristik agregat, porositas, kualitas *interfacial transition zone* (ITZ), serta mekanisme inisiasi dan propagasi retak selama pembebanan. Oleh

karena itu, hubungan linear antara kuat tekan dan kuat lentur dalam penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai indikator bahwa kedua parameter mekanis tersebut menunjukkan pola respons yang konsisten terhadap perubahan komposisi campuran.

4. 2. 3 Analisa Biaya

Anggaran biaya pembuatan beton normal dihitung berdasarkan kebutuhan material yang digunakan pada setiap sampel. Perhitungan tersebut mencakup penggunaan agregat kasar, agregat halus, semen, *biochar* ampas kopi, limbah keramik, dan air sebagai bahan penyusun campuran beton. Volume pekerjaan beton normal dalam Rencana Anggaran Biaya dihitung berdasarkan tandon air cor tanam yang digunakan oleh peneliti sebagai sampel.

Data harga material diperoleh melalui survei pada 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, *biochar* ampas kopi, limbah keramik, dan air yang digunakan dalam pembuatan beton normal. **Tabel 4.35.** berikut ini merupakan tabel lokasi perolehan material yang didapat untuk penelitian ini.

Tabel 4.35 Lokasi Perolehan Material

No	Nama Toko Bangunan	Alamat	Keterangan
1	TB. Gede Unggul	Jl. Durian Raya No. 29A, Pedalangan, Banyumanik, Semarang	Meterial Bangunan dan Limbah Keramik
2	TB. Subur Makmur	Jl. MT Haryono No. 65, Semarang	Limbah Keramik
3	Peacockoffie Gombel	Jl. Gombel Lama No. 11 Tinjomoyo, Semarang	Limbah ampas kopi
4	Gedung Teknik Kimia Universitas Diponegoro	Jl. Prof Soedarto, S.H., Tembalang, Semarang	Proses Pirolisis <i>Biochar</i> Ampas Kopi

Kebutuhan banyaknya material yang digunakan dihitung berdasarkan komposisi variasi uji. Sedangkan perhitungan 1 m³, didapatkan dari perhitungan *job mix design* pada **Tabel 4.36.** berikut ini.

Tabel 4.36 Kebutuhan Material Benda Uji				
Variasi	LK0BK0	LK20BK0	LK20BK10	LK20BK15
Agregat Kasar	57,26	45,81	45,81	45,81
Agregat Halus	54,15	52,21	46,99	44,38
Semen	30,49	30,49	30,49	30,49
<i>Biochar</i> Ampas Kopi	0,00	0,00	0,61	0,90
Limbah Keramik	0,00	11,45	11,45	11,45
Air	13,87	13,87	13,87	13,87

(Sumber: Analisa penulis, 2026)

Analisa biaya material pembuatan beton normal rencana dengan kuat tekan 30 MPa, diambil dari data harga satuan dasar dari website Mas Petruk yang diperuntukan sebagai acuan awal dalam perencanaan campuran beton pada penelitian ini. Harga satuan yang diperoleh dari sumber website Mas Petruk yang digunakan sebagai acuan penentuan harga yang tercantum pada **Tabel 4.37.**

Tabel 4.37 Harga Satuan Material Mas Petruk					
No.	Material	Satuan	Harga Maks. (Rp)	Harga Min. (Rp)	Harga Digunakan (Rp)
1	Agregat Kasar	Kg	204	321	321
2	Agregat Halus	Kg	229	321	321
3	Semen	Kg	1.410	1.500	1.500
4	Air	Liter	500	500	500

Berikut ini adalah **Tabel 4.38**, mengenai analisa harga satuan untuk perencanaan mutu beton F'c 30 MPa yang didasari harga satuan dari website Mas Petruk.

Tabel 4.38 Analisa Harga Satuan Mas Petruk					
Variasi	Material	Kebutuhan per m ³	satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
FC 30	Agregat Kasar	1015,2	kg	321	325.879,2
	Agregat Halus	960,0962	kg	321	308.190,9
	Semen	540,6593	kg	1500	810.989
	Air	246	Liter	500	123.000
	Total Biaya				1.568.059

Berdasarkan **Tabel 4.38**, beton mutu rencana sebesar 30 MPa memerlukan biaya sejumlah Rp. 1.568.059 untuk kebutuhan pembuatannya sesuai dengan harga satuan material yang tertera.

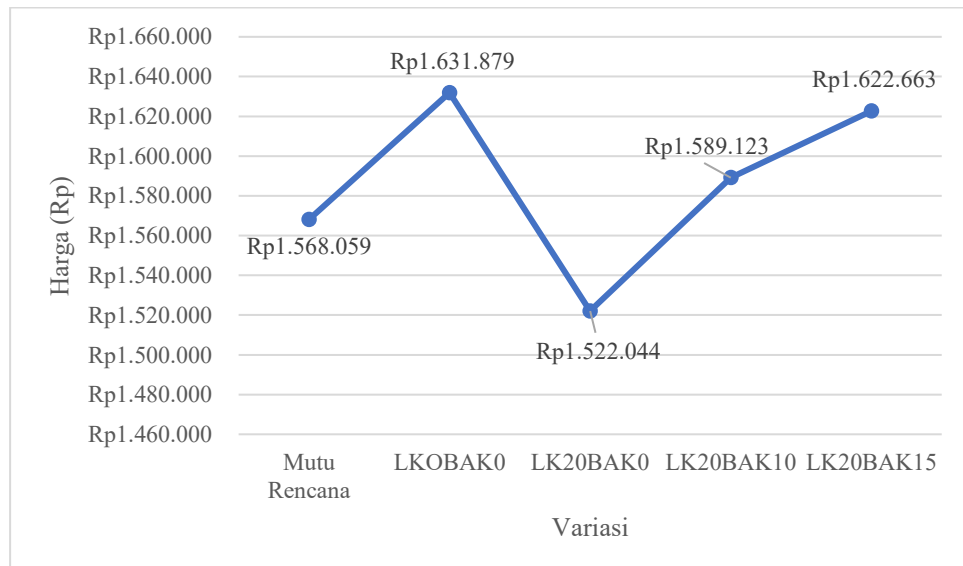
Perhitungan biaya material beton normal menggunakan harga satuan bahan yang diperoleh dari hasil survei dan direkapitulasi pada Lampiran Harga satuan tersebut digunakan sebagai dasar dalam analisis biaya campuran beton normal untuk setiap variasi penelitian. Rekapitulasi harga satuan material yang digunakan disajikan pada **Tabel 4.39**.

Tabel 4.39 Harga Satuan Material Aktual				
No	Material	Satuan	Harga Satuan (Rp)	Harga Bahan Digunakan (Rp)
1	Agregat Kasar	Kg	480	480
2	Agregat Halus	Kg	360	360
3	Semen	Kg	1.475	1.475
4	<i>Biochar</i> Ampas Kopi	Kg	166.666,7	166.666,7
5	Limbah Keramik	Kg	0	0
6	Air	Kg	6	6

Berikut adalah **Tabel 4.40.** mengenai analisis harga satuan masing-masing variasi rencana campuran beton berdasarkan harga aktual.

Tabel 4.40 Analisa Harga Satuan Sample Beton Setiap Variasi Campuran					
Variasi	Material	Kebutuhan per m ³	satuan	Harga Satuan (Rp)	Jumlah Harga (Rp)
LK0BK0	Agregat Kasar	1015,2	kg	480	487.296
	Agregat Halus	960,0962	kg	360	345.634,6
	Semen	540,6593	kg	1.475	797.472,5
	<i>Biochar</i> Ampas Kopi	0	kg	166.666,7	0
	Limbah Keramik	0	kg	0	0
	Air	246	liter	6	1.476
	Total Biaya				1.631.879
LK20BK0	Agregat Kasar	812,16	kg	480	389.836,8
	Agregat Halus	925,7194	kg	360	333.259
	Semen	540,6593	kg	1.475	797.472,5
	<i>Biochar</i> Ampas Kopi	0	kg	166.666,7	0
	Limbah Keramik	203,04	kg	0	0
	Air	246	liter	6	1.476
	Total Biaya				1.522.044
LK20BK10	Agregat Kasar	812,16	kg	480	389.836,8
	Agregat Halus	833,1475	kg	360	299.933,1
	Semen	540,6593	kg	1.475	797.472,5
	<i>Biochar</i> Ampas Kopi	0,60243	kg	166.666,7	100.405
	Limbah Keramik	203,04	kg	0	0
	Air	246	liter	6	1.476
	Total Biaya				1.589.123
LK20BK15	Agregat Kasar	812,16	kg	480	389.836,8
	Agregat Halus	786,8615	kg	360	283.270,1
	Semen	540,6593	kg	1.475	797.472,5
	<i>Biochar</i> Ampas Kopi	0,903645	kg	166.666,7	150.607,4
	Limbah Keramik	203,04	kg	0	0
	Air	246	liter	6	1.476
	Total Biaya				1.622.663

Tabel 4.40. menunjukkan rincian rancangan biaya beton per 1 m³ untuk keempat variasi campuran. Komponen biaya terbesar pada seluruh variasi berasal dari semen, yaitu sebesar Rp797.472,5, yang nilainya tetap sama karena tidak ada substitusi pada bahan semen di seluruh variasi penelitian ini. Pada variasi yang menggunakan limbah keramik (LK20BK0, LK20BK10, LK20BK15), kebutuhan agregat kasar berkurang dari 1015,2 kg menjadi 812,16 kg akibat 20% volumenya digantikan oleh limbah keramik yang tidak dikenakan biaya, sehingga memberikan penghematan pada komponen biaya agregat kasar sebesar Rp97.459,2 di setiap variasi tersebut. Di sisi lain, penambahan *biochar* ampas kopi pada variasi LK20BK10 dan LK20BK15 menambah komponen biaya baru yang cukup besar, yaitu masing-masing Rp100.405 dan Rp150.607,4, akibat harga satuan *biochar* yang jauh lebih mahal dibandingkan agregat halus konvensional.



Gambar 4. 14 Grafik Perbandingan Harga Setiap Variasi Campuran

Gambar 4.14. memperlihatkan kecenderungan perubahan harga beton terhadap keempat variasi yang diuji dalam bentuk kurva garis. Secara visual, harga tertinggi berada pada dua ujung kurva, yaitu pada variasi LK0BK0 dan LK20BK15, sedangkan harga terendah berada pada variasi LK20BK0 di tengah kurva. Pola ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik saja secara konsisten menurunkan biaya produksi beton, namun penambahan *biochar* ampas kopi dalam jumlah yang semakin besar berangsur-angsur menaikkan kembali biaya tersebut hingga mendekati harga beton normal. Dengan kata lain, terdapat *trade-off* antara efisiensi biaya dan kadar *biochar* yang digunakan, dimana penambahan *biochar*

dalam jumlah kecil (10%) masih memberikan biaya yang relatif ekonomis, sementara penambahan pada kadar yang lebih tinggi (15%) mulai mengurangi keuntungan dari segi biaya meskipun performa mekanik beton tetap perlu dipertimbangkan secara bersamaan.

Peninjauan lebih lanjut terhadap korelasi antara aspek keekonomian dan performa mekanis menyimpulkan bahwa variasi LK20BK10 merupakan campuran yang paling efisien dan sangat direkomendasikan. Pada variasi ini, biaya produksi per meter kubik (Rp1.589.123) terbukti lebih hemat dan ekonomis dibandingkan dengan biaya pembuatan beton normal (Rp1.631.879). Secara bersamaan, variasi dengan harga yang lebih rendah ini justru mampu menghasilkan performa material yang paling optimal, ditandai dengan pencapaian nilai kuat tekan tertinggi sebesar 39,04 MPa dan kuat lentur sebesar 3,67 MPa. Oleh karena itu, penerapan kombinasi 20% limbah keramik dan 10% *biochar* ampas kopi terbukti berhasil memberikan keuntungan ganda: mereduksi biaya produksi secara finansial sekaligus meningkatkan mutu struktural beton secara signifikan melampaui beton konvensional tanpa substitusi.

4.3 Analisa Pengujian

Berikut merupakan hasil yang diperoleh dari pengujian kuat tekan beton, kuat lentur beton, dan pemeriksaan analisa biaya beton yang selanjutnya dapat menghasilkan variasi beton paling optimum. Berikut ini adalah **Tabel 4.41**, yaitu rekapitulasi hasil pengujian

Variasi	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Kuat Lentur Rata-rata (MPa)	Harga Berdasarkan 1 m ³
Mutu Rencana	30	3,40	1.568.059
LK0BK0	35,67	3,43	1.631.879
LK20BK0	30,34	3,00	1.522.044
LK20BK10	39,04	3,67	1.589.123
LK20BK15	31,59	3,10	1.622.663

Setiap pengujian yang telah dilakukan, setiap variasi campuran menunjukkan karakteristik terhadap nilai kuat tekan beton, kuat lentur beton dan biaya produksi. Oleh karena itu, diperlukan analisis secara menyeluruh untuk membandingkan kinerja masing-masing variasi dan menentukan variasi yang memberikan keseimbangan terbaik antara aspek teknis dan ekonomis. Berikut ini merupakan tabel persentase hubungan hasil uji penelitian dengan beton normal (LK0BK0) sebagai kontrol. **Tabel 4.42.** adalah tabel hubungan hasil penelitian dengan beton normal.

Tabel 4. 42 Persentase Hubungan Hasil Uji Penelitian dengan Beton Normal					
Jenis Pengujian	Variasi Beton				
	Beton	LK0	LK20	LK20	LK20
	Normal	BK0	BK0	BK10	BK15
Kuat Tekan (%)	0	+18,9%	+1,1%	+30,1%	+5,3%
Kuat Lentur (%)	0	+0,9%	-11,8%	+7,9%	-8,8%
Harga (%)	0	-4,1%	+2,9%	-1,3%	-3,5%
Total	0	+15,7%	-7,8%	+36,7%	-7%

Note: Beton Normal adalah beton konvensional dengan kuat tekan f_c 30 MPa, kuat lentur 3,40 MPa, dan Harga per m^3 berdasarkan harga Mas Petruk

Berdasarkan **Tabel 4.42.**, hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa Berdasarkan tabel rekapitulasi, variasi LK20BK10 memberikan kinerja paling optimal dibandingkan variasi lainnya. Variasi ini menghasilkan peningkatan kuat tekan sebesar 30,1% dan peningkatan kuat lentur sebesar 7,9% dibandingkan beton normal. Meskipun dari aspek harga mengalami penurunan sebesar 1,3%, kombinasi tersebut menunjukkan bahwa substitusi 20% limbah keramik dan 10% *biochar* ampas kopi mampu memberikan peningkatan sifat mekanik sekaligus efisiensi biaya. Dengan demikian, variasi LK20BK10 memiliki nilai total peningkatan sebesar 36,7%, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan seluruh variasi.

Sebagai pembandingan, variasi LK0BK0 menghasilkan peningkatan kuat tekan sebesar 18,9% dan kuat lentur sebesar 0,9%, disertai penurunan harga sebesar 4,1%, sehingga nilai totalnya mencapai 15,7%. Variasi LK20BK0 mengalami peningkatan kuat tekan yang relatif kecil, yaitu 1,1%, serta penurunan kuat lentur sebesar 11,8% dan peningkatan harga sebesar 2,9%, sehingga menghasilkan nilai total -7,8%. Sementara itu, variasi LK20BK15 menunjukkan peningkatan kuat tekan sebesar

18,9%, tetapi kuat lenturnya mengalami penurunan sebesar 8,8%, dengan harga yang lebih rendah sebesar 3,5% dibandingkan beton normal, sehingga nilai totalnya mencapai 6,6%.

Berdasarkan hubungan antara kuat tekan, kuat lentur, dan harga, LK20BK10 dapat dinilai sebagai variasi yang paling optimum karena memberikan peningkatan sifat mekanik paling tinggi dengan biaya yang justru lebih rendah dibandingkan beton normal. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik sebesar 20% yang dikombinasikan dengan *biochar* ampas kopi sebesar 10% memberikan keseimbangan paling baik antara kinerja mekanik dan efisiensi biaya dibandingkan variasi lainnya.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian yang meliputi kuat tekan, kuat lentur, dan biaya produksi, dapat diketahui bahwa setiap variasi campuran menunjukkan karakteristik kinerja yang berbeda. Beton normal LK0BK0 menghasilkan kuat tekan sebesar 35,67 MPa dan kuat lentur sebesar 3,43 MPa dengan biaya produksi Rp1.631.879/m³, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam menilai perubahan kinerja akibat penggunaan limbah keramik dan *biochar* ampas kopi. Pada variasi LK20BK0, substitusi 20% limbah keramik tanpa penambahan *biochar* menyebabkan kuat tekan dan kuat lentur masing-masing turun menjadi 30,34 MPa dan 3,00 MPa. Meskipun variasi ini memiliki biaya produksi paling rendah, yaitu Rp1.522.044/m³, penurunan kinerja mekanis menunjukkan bahwa penghematan biaya belum diikuti dengan peningkatan kualitas beton. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan limbah keramik saja belum mampu memberikan keseimbangan yang baik antara aspek ekonomi dan kinerja mekanis pada kondisi penelitian ini.

Penambahan *biochar* ampas kopi sebesar 10% pada variasi LK20BK10 menunjukkan perubahan kinerja yang paling signifikan. Kuat tekan meningkat menjadi 39,04 MPa dan menjadi nilai tertinggi dari seluruh variasi, sedangkan kuat lentur juga meningkat menjadi 3,67 MPa. Jika dibandingkan dengan beton normal, nilai tersebut menunjukkan peningkatan kuat tekan sebesar 9,45% dan kuat lentur sebesar 6,99%. Peningkatan pada kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa penambahan *biochar* sebesar 10% mampu mengimbangi kelemahan yang ditimbulkan oleh penggunaan limbah keramik, terutama terkait penyerapan air yang

tinggi dan potensi terbentuknya zona ikatan yang kurang optimal. Dalam kondisi penelitian ini, struktur berpori *biochar* diduga memberikan kontribusi melalui kemampuan menyimpan dan melepaskan air secara bertahap sehingga mendukung proses hidrasi semen, sementara ukuran partikelnya yang halus juga dapat membantu pengisian rongga dalam campuran. Hal tersebut menghasilkan matriks beton yang lebih kompak dan memberikan peningkatan kemampuan beton dalam menahan beban tekan maupun lentur.

Namun, peningkatan kadar *biochar* menjadi 15% pada variasi LK20BK15 tidak memberikan peningkatan lanjutan. Kuat tekan turun menjadi 31,59 MPa dan kuat lentur turun menjadi 3,10 MPa. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa manfaat *biochar* terhadap *internal curing* dan pengisian rongga memiliki batas optimum. Pada kadar yang lebih tinggi, peningkatan volume material berpori dengan berat jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan pasir berpotensi meningkatkan volume rongga dan mengurangi kontinuitas matriks semen. Akibatnya, manfaat penambahan air internal tidak lagi mampu mengimbangi pengaruh negatif dari meningkatnya porositas beton. Selain itu, biaya produksi juga meningkat menjadi Rp1.589.123/m³ dan Rp1.622.663/m³, sehingga keuntungan ekonomi yang diperoleh dari penggunaan limbah keramik semakin berkurang. Dengan demikian, peningkatan kadar *biochar* dari 10% menjadi 15% justru menghasilkan penurunan kinerja mekanis tanpa memberikan keuntungan ekonomi yang lebih baik.

Apabila ketiga aspek tersebut dibandingkan secara bersamaan, LK20BK10 menunjukkan keseimbangan kinerja yang paling baik. LK20BK0 memang memberikan biaya produksi terendah, tetapi menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur terendah. LK20BK15 memiliki kinerja mekanis yang lebih rendah dibandingkan LK20BK10 dan biaya yang lebih tinggi, sedangkan LK0BK0 memiliki kinerja yang cukup baik tetapi membutuhkan biaya produksi paling tinggi. Sebaliknya, LK20BK10 mampu menghasilkan kuat tekan dan kuat lentur tertinggi sekaligus mempertahankan biaya produksi sebesar Rp1.589.123/m³, atau lebih rendah sekitar 2,62% dibandingkan beton normal. Oleh karena itu, berdasarkan hubungan antara kinerja mekanis dan biaya produksi, LK20BK10 dapat ditetapkan sebagai variasi paling optimal dalam penelitian ini, karena memberikan kombinasi

yang paling seimbang antara peningkatan kuat tekan, peningkatan kuat lentur, dan efisiensi biaya. Penetapan ini menunjukkan bahwa kadar substitusi 20% limbah keramik yang dikombinasikan dengan 10% *biochar* ampas kopi merupakan komposisi yang paling efektif dari variasi yang diuji, sedangkan peningkatan *biochar* hingga 15% tidak lagi memberikan keuntungan yang sebanding terhadap kinerja dan biaya beton.