

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penyajian Data

Penyajian data dalam penelitian ini memuat hasil-hasil pengujian yang telah dilaksanakan terhadap agregat buatan yang mengandung tambahan limbah konstruksi dinding berupa bata merah dan bata ringan. Seluruh pengujian dilakukan berdasarkan standar acuan yang telah ditetapkan, guna memastikan validitas dan kesesuaian data terhadap kriteria teknis yang berlaku.

4.1.1 Hasil Pengujian Material Penyusun Agregat Buatan

Agregat buatan pada penelitian ini disusun dari bahan utama berupa abu terbang, limbah konstruksi dinding bata merah dan bata ringan, serta pasir sebagai agregat halus. Campuran kemudian diproses secara bertahap dengan penambahan larutan aktivator alkali dalam kondisi jenuh hingga membentuk partikel granular (pellet). Kandungan silika dan alumina dalam abu terbang, serta limbah bata merah dan bata ringan, berkontribusi signifikan terhadap berlangsungnya reaksi geopolimerisasi, sehingga memungkinkan terbentuknya struktur yang padat dan keras dengan bantuan aktivator kimia alkali.

4.1.2 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

Pengujian berat jenis agregat halus dilakukan sesuai dengan SNI 1970-2016 mengenai uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus. Berikut merupakan hasil dari pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus:

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

No	Percobaan	Satuan	1	2
1	Nomor flash		1	2
2	Berat flash (A)	Gr	141,00	224,00
3	Berat sampel dan flask (B)	Gr	641,00	724,00
4	Berat sampel (C=B-A)	Gr	500,00	500,00
5	Berat flask, sampel, dan air (D)	Gr	944,50	1025,60
6	Berat air (E=D-B)	Gr	303,50	301,60

7	Berat Jenis ($F=C/(C-E)$)	2,54	2,52
8	Selisih	0,02	
9	Rata-Rata	2,53	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berdasarkan hasil uji berat jenis sampel agregat halus memenuhi standar berat jenis sesuai dengan SNI-03-1969-2008, yaitu di atas 2,5. Sedangkan sampel agregat halus nilainya 2,53.

4.1.3 Hasil Pengujian Berat Isi Agregat Halus

Pengujian berat isi agregat halus dilakukan sesuai dengan SNI 03-4804-1998 mengenai uji berat isi agregat halus. Berikut merupakan hasil dari pengujian berat isi agregat halus:

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Berat Isi Agregat Halus

No	Percobaan	Satuan	1	2
1	Volume container (A)	cm ³	2002,00	2002,00
2	Berat container (B)	Gr	788,00	788,00
3	Berat sampel dan container (C)	Gr	3662,00	3725,80
4	Berat sampel ($D=C-B$)	Gr	2874,00	2937,80
5	Berat isi ($E=D/A$)	cm ³ /gr	1,44	1,47
6	Selisih		0,03	
7	Rata-rata		1,45	
8	Berat jenis (G)		2,53	
9	Persentase volume padat ($H=(F/G) \times 100\%$)		57,32	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Densitas agregat halus rata – rata mendapatkan nilai 1,45 g/cm³. Nilai tersebut telah memenuhi standar SNI-03-4142-1996, yaitu batas rata rata dengan nilai melebihi 1,4 g/cm³.

4.1.4 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Pengujian kadar lumpur pada agregat halus dilakukan berdasarkan ketentuan dalam SNI 03-4142-1996 tentang Metode Pengujian Kadar Lumpur pada Agregat Halus. Adapun hasil pengujian terhadap agregat halus tersebut disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus					
No.	Percobaan	Satuan	1	2	
1.	Berat kering material sebelum dicuci (A)	gr	1000.00	1000.00	
2.	Berat kering material sesudah dicuci (B)	gr	965.60	970.10	
3.	Material lolos ayakan 0.074 mm ($C = ((A-B)/A) \times 100\%$)	%	3.44	2.99	
4.	Selisih		0.45		
5.	Rata-Rata		3.22		

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Keterangan :

1. Persentase material yang lolos ayakan 0,075 mm dianggap setara dengan kadar lumpur dalam agregat.
2. Rata-rata kadar lumpur yang diperoleh adalah sebesar 3,31%, yang masih berada di bawah ambang batas maksimum 7% sesuai ketentuan dalam SNI 03-4142-1996.

4.1.5 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar Alami

Pengujian terhadap kadar lumpur pada agregat halus dilakukan berdasarkan ketentuan SNI 03-4428-1997. Selain itu, pengujian ini juga mencakup penentuan nilai berat jenis dan daya serap air agregat halus. Hasil pengujian tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar Alami				
No	Percobaan	Satuan	1	2
1	Berat kering material sebelum dicuci (A)	Gr	2000,00	2000,00
2	Berat kering material sesudah dicuci (B)	Gr	1983,60	1980,00
3	Material lolos ayakan 0,074 mm ($C = ((A-B/A) \times 100\%)$)	%	0,82	1,00
4	Selisih		0,18	
5	Rata-rata		0,91	

Sumber: Olahan Pribadi (2025)

Keterangan :

Nilai presentase material lolos ayakan 0.074 mm adalah sama dengan nilai presentase kadar lumpur.

4.2 Analisa Data

Subbab 4.2 Analisis Data membahas secara rinci mengenai proses perancangan, pembuatan, serta tahapan pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini. Analisis difokuskan pada perbandingan karakteristik agregat buatan dengan agregat kasar alami melalui pengujian berat jenis, berat isi, dan ketahanan abrasi.

4.2.1 Perancangan Campuran Agregat Buatan

Perancangan campuran dalam penelitian ini dilakukan dengan mereaksikan abu terbang yang disubstitusi menggunakan limbah bata merah dan bata ringan, menggunakan larutan alkali aktivator berupa NaOH dan Na_2SiO_3 dengan konsentrasi 10 M.

Tabel 4. 5 Kebutuhan NaOH dan Air per Kg/m ³								
No	Material	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH	NaOH
		2	4	6	8	10	12	16
		Mol	Mol	Mol	Mol	Mol	Mol	Mol
1	NaOH (KG)	9,5	18,5	27,8	37,1	48,1	55,1	73,5
2	Water (KG)	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65	114,65

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Pencampuran bahan untuk pembuatan mortar geopolimer dan agregat kasar buatan dilakukan dengan rasio 1:2,5 antara fly ash dan larutan alkali aktivator. Proses ini menghasilkan 10 kg agregat kasar buatan menggunakan alkali aktivator berkonsentrasi 10M dan mixer dengan sudut kemiringan 40°.

Tabel 4. 6 Komposisi pada limbah bata merah

Limbah Bata Merah		
SiO ₂	60%	0,6
Al ₂ O ₃	20%	0,2

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 7 Komposisi pada limbah bata ringan (Hebel)

Limbah Bata Ringan (Hebel)		
SiO ₂	55%	0,55
Al ₂ O ₃	8%	0,08

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Penelitian ini menggunakan beberapa bahan utama dengan komposisi kimia yang beragam. Salah satunya adalah limbah bata merah dan bata ringan, yang berfungsi sebagai bahan pozzolan dengan kandungan SiO₂ sebesar 60% dan Al₂O₃ sebesar 20% untuk bata merah, sedangkan untuk bata ringan kandungan SiO₂ sebesar 55% dan Al₂O₃ sebesar 8%. Kandungan silika dalam limbah bata merah dan bata ringan memainkan peran penting dalam mendukung proses reaksi dalam mortar geopolimer.

Tabel 4. 8 Komposisi pada Fly Ash kelas F

Fly Ash Kelas F		
SiO ₂	41,40%	0,414
Al ₂ O ₃	22,70%	0,227
Fe ₂ O ₃	17,70%	0,177
Total	81,80%	0,818

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Selain itu, penelitian ini turut memanfaatkan fly ash kelas F, yang mengandung SiO₂ sebesar 41,40%, Al₂O₃ sebesar 22,70%, dan Fe₂O₃

sebesar 17,70%. Tingginya kadar silika dan alumina dalam fly ash menjadikannya sebagai material pengikat yang berperan penting dalam proses pembentukan mortar geopolimer.

Tabel 4. 9 Komposisi Larutan NaOH pada 10M

Larutan NaOH 10M		
NaOH	200	gr flake
Air	500	gr

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Sebagai aktivator alkali dalam penelitian ini, digunakan campuran larutan NaOH dan waterglass (sodium silikat/ Na_2SiO_3). Larutan NaOH disiapkan dalam berbagai tingkat molaritas, salah satunya adalah larutan 10M, yang dibuat dengan melarutkan 200 gram flakes NaOH ke dalam 500 gram air. Sementara itu, waterglass (Na_2SiO_3) yang digunakan memiliki komposisi Na_2O sebesar 18,50%, SiO_2 sebesar 36,40%, dan H_2O sebesar 45,10%. Waterglass berfungsi sebagai sumber silika tambahan yang berperan dalam mempercepat reaksi geopolimerisasi serta meningkatkan kekuatan mekanis mortar.

Tabel 4. 10 Komposisi pada Waterglass (Na_2SiO_3)

Waterglass (Na_2SiO_3)		
Na_2O	18,50%	0,185
SiO_2	36,40%	0,364
H_2O	45,10%	0,451

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 11 Komposisi pada NaOH (Sodium Hidroksida)

NaOH (Sodium Hidroksida)		
Na_2O	98%	0,98
H_2O	2%	0,02

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Untuk memperoleh larutan alkali dengan konsentrasi 10 M, diperlukan informasi mengenai kandungan air (H_2O) dan massa molekul relatif (M_r) dari

zat yang akan dilarutkan. Adapun rumus untuk menghitung molaritas adalah sebagai berikut:

$$M1. V1 = M2. V2$$

$$10M \times 500 \text{ gr} = M2.500$$

$$\frac{10 M1 \times 250}{500} = 10M$$

Untuk mendapatkan larutan 10M dihitung menggunakan perhitungan di atas, perlu memasukan (NaOH) = 200 gr dan dilarutkan dengan air sebanyak 500 ml air, sehingga mendapatkan 10M. Setelah itu tambahkan *waterglass* sebanyak 500 ml.

Karena limbah bata merah dan bata ringan disubstitusikan dengan *fly ash* dalam campuran mortar geopolimer dan agregat kasar buatan, perbandingan sebagai berikut:

Tabel 4. 12 Perbandingan campuran mortar geopolimer dengan agregat kasar buatan

Variabel	Abu terbang (Kg)	Limbah Konstruksi Bata Merah	NaOH	Na ₂ SiO ₃	Agregat Halus (Kg)	Berat Total (Kg)
20%	6	0,8	200	500	3,2	10
40%	6	1,6	200	500	2,4	10
60%	6	2,4	200	500	1,6	10
80%	6	3,2	200	500	0,8	10
100%	6	4	200	500	0	10

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.2.2 Hasil Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis untuk agregat buatan dan agregat kasar alami sebagai bahan pembanding dilakukan mengacu pada SNI 03-1969-2008 tentang Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. Standar ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai sifat fisik agregat, khususnya terkait massa jenis dan kapasitas penyerapan air. Hasil pengujian berat jenis dari kedua jenis agregat tersebut disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 4. 13 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Merah 20%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00

No.	Percobaan	Sat.	1	2
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	369,00	372,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1565,50	1583,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1196,50	1211,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,49	2,53
8.	Selisih		0,05	
9.	Rata - rata		2,51	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 14 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Merah 40%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	345,00	352,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1558,00	1560,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1213,00	1208,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,54	2,53
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,53	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 15 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Merah 60%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	332,00	338,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1542,00	1546,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1210,00	1208,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,53	2,53
8.	Selisih		0,01	
9.	Rata - rata		2,53	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 16 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Merah 80%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00

No.	Percobaan	Sat.	1	2
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	317,00	324,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1521,00	1535,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1204,00	1211,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,51	2,53
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,52	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 17 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Merah 100%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	311,00	308,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1502,00	1505,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1191,00	1197,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,47	2,49
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,48	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 18 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Ringan 20%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	332,00	338,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1546,00	1557,00
6.	Berat sample dalam air (F=E-D)	gr	1214,00	1219,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,54	2,56
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,55	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 19 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Ringan 40%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample (C=B-A)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	324,00	329,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1531,00	1543,00

6.	Berat sample dalam air ($F=E-D$)	gr	1207,00	1214,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,52	2,54
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,53	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 20 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Ringan 60%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample ($C=B-A$)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	315,00	319,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1526,00	1535,00
6.	Berat sample dalam air ($F=E-D$)	gr	1211,00	1216,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,53	2,55
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,54	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 21 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Ringan 80%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample ($C=B-A$)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	301,00	308,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1515,00	1527,00
6.	Berat sample dalam air ($F=E-D$)	gr	1214,00	1219,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,54	2,56
8.	Selisih		0,02	
9.	Rata - rata		2,55	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 22 Perhitungan Berat Jenis Agregat Buatan Persentase Limbah Bata Ringan 100%

No.	Percobaan	Sat.	1	2
1.	Berat keranjang (A)	gr	527,00	527,00
2.	Berat sample dan keranjang (B)	gr	2527,00	2527,00
3.	Berat sample ($C=B-A$)	gr	2000,00	2000,00
4.	Berat keranjang dalam air (D)	gr	286,00	295,00
5.	Berat sample dan keranjang dalam air (E)	gr	1502,00	1506,00
6.	Berat sample dalam air ($F=E-D$)	gr	1216,00	1211,00
7.	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,55	2,53
8.	Selisih		0,02	

9. Rata - rata	2,54
----------------	------

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Pengujian berat jenis agregat buatan pada penelitian ini menghasilkan dua parameter utama, yakni berat jenis semu dan berat jenis curah dalam kondisi jenuh kering permukaan (SSD), yang keduanya tercatat sebesar 1,98 gram/cm³. Nilai ini diperoleh dari dua variasi campuran yang menggunakan abu sekam padi sebagai salah satu komponen penyusun agregat buatan. Hasil tersebut mencerminkan sifat fisik agregat buatan, terutama dalam hal kerapatan dan kelayakannya untuk diaplikasikan dalam material konstruksi. Sebagai pembanding, pengujian juga dilakukan terhadap agregat kasar alami dengan merujuk pada standar SNI, untuk mengetahui kesesuaian berat jenisnya sebagai bahan konstruksi. Adapun hasil pengujian berat jenis agregat kasar alami disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. 23 Hasil Berat Jenis Agregat Kasar Alami

No	Percobaan	Satuan	1	2
1	Berat keranjang (A)	Gr	527,00	527,00
2	Berat sampel dan keranjang (B)	Gr	2527,00	2527,00
3	Berata sampel(C=B-A)	Gr	2000,00	2000,00
4	Berat keranjang dalam air (D)	Gr	365,00	365,00
5	Berat sampel dan keranjang dalam air (E)	Gr	1575,50	1583,00
6	Berat sampel dalam air (F=E-D)	Gr	1210,50	1218,00
7	Berat jenis ($G=C/(C-F)$)		2,53	2,56
8	Selisih			0,02
9	Rata-rata			2,55

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.2.3 Hasil Pengujian Berat Isi

Pengujian densitas pada agregat buatan dan agregat kasar alami dilakukan mengacu pada SNI 03-4804-1991, yang menetapkan metode uji bobot isi serta rongga udara dalam agregat. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik fisik agregat, khususnya berat isi dalam kondisi lepas maupun padat. Hasil pengujian tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 4. 24 Berat Isi Agregat Buatan

No.	Percobaan	Satuan	1	2	3
1.	Volume container (A)	cm ³	2838	2838	2838
2.	Berat container (B)	gr	450	450	450
3.	Berat sampel dan container (C)	gr	3215	3443	3208
4.	Berat sampel (D=C-B)	gr	2765	2993	2758
5.	Berat isi (E=D/A)	cm ³ /gr	0,974	1,054	0,974
6.	Rata - rata (F)		1,008		
7.	Berat jenis (G)		1,98		
8.	Persentase volume padat (H=(F/G)x100%)		50,9		

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berat isi agregat kasar alami adalah sebagai standar pembanding dari berat isi agregat buatan adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 25 Berat Isi Agregat Kasar Alami

No.	Percobaan	Satuan	1	2	3
1.	Volume container (A)	cm ³	2002	2002	2002
2.	Berat container (B)	gr	787	787	787
3.	Berat sampel dan container (C)	gr	3732	3639	3895
4.	Berat sampel (D=C-B)	gr	2945	2852	3108
5.	Berat isi (E=D/A)	cm ³ /gr	1,47	1,42	1,55
6.	Selisih		0,13		
7.	Rata - rata (F)		1,48		
8.	Berat jenis (G)		2,53		
9.	Persentase volume padat (H=(F/G)x100%)		58.49		

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.2.4 Hasil Pengujian Analisis Saringan

Analisis saringan dilakukan untuk mengelompokkan ukuran agregat buatan yang diproduksi melalui metode pelletizing. Meskipun demikian, metode ini menghasilkan agregat dengan ukuran butiran yang bervariasi. Oleh sebab itu, pengujian ini penting dilakukan guna mengetahui distribusi ukuran butiran agregat kasar sesuai dengan standar gradasi yang ditetapkan, terutama untuk mendukung kelayakan dalam pengujian ketahanan aus menggunakan mesin Los Angeles. Dalam penelitian ini digunakan gradasi A, mengingat sebagian besar agregat kasar buatan dengan total massa sekitar 90 kg untuk tiga kali pengujian abrasi memiliki ukuran yang termasuk dalam rentang gradasi tersebut. Pemilihan gradasi A bertujuan untuk memaksimalkan penggunaan agregat yang telah diproduksi serta memastikan bahwa hasil uji abrasi mewakili karakteristik dari material dominan. Gradasi A mensyaratkan agar agregat tertahan pada empat ukuran saringan, yaitu 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, dan 12,5 mm. Hasil analisis saringan yang digunakan untuk memastikan kesesuaian terhadap gradasi A dalam pengujian abrasi menggunakan mesin Los Angeles disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4. 26 Analisis Saringan Gradasi Pengujian Abrasi (*Los Angeles*)

Ukuran Saringan				Gradasi dan Berat Benda Uji (gram)						
Lolos saringan		Tertahan saringan		A	B	C	D	E	F	G
mm	inci	mm	inci							
75	3.0	63	2 ½	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
63	2 ½	50	2.0	-	-	-	-	2500 ± 50	-	-
50	2.0	37.5	1 ½	-	-	-	-	2500 ± 50	5000 ± 50	-
37.5	1 1/2	25	1	1250 ± 25	-	-	-	-	5000 ± 25	5000 ± 10
25	1	19	3/4	1250 ± 25	-	-	-	-	-	5000 ± 10
19	¾	12.5	½	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-
12.5	½	9.5	3/8	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-	-	-	-

9.5	3/8	6.3	¼	-	-	2500	-	-	-	-
						± 10				
6.3	¼	4.75	No.	-	-	2500	2500	-	-	-
						± 10	± 10			
4.75	No.	2.36	No.	-	-	-	2500	-	-	-
							± 10			
Total				5000	5000	5000	5000	1000	10000	1000
				± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10	± 10
Jumlah bola				12	11	8	6	12	12	12
Berat bola (gram)				5000	4584	3330	5000	5000	5000	5000
				± 25	± 25	± 20	± 25	± 25	± 25	± 25

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Hasil analisis saringan terhadap agregat buatan yang dibandingkan dengan batas gradasi A disajikan sebagai berikut:

Tabel 4. 27 Hasil Analisis Saringan dari 5 Persentase Limbah Bata Merah

Ukuran Saringan				Berat Benda Uji (gram)				
Lolos Saringan		Tertahan Saringan		Bata Merah				
mm	inci	mm	inci	20%	40%	60%	80%	100%
37,5	1 1/2	25	1	5070 gr	4680 gr	5000 gr	6310 gr	3920 gr
25	1	19	¾	4700 gr	5270 gr	6410 gr	5400 gr	4840 gr
19	¾	12,5	½	8530 gr	9300 gr	8580 gr	10230 gr	9460 gr
12,5	1/2	9,5	3/8	4310 gr	4800 gr	5500 gr	8110 gr	7840 gr
9,5	3/8	4.75	No.4	4810 gr	2500 gr	6820 gr	4260 gr	5320 gr

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

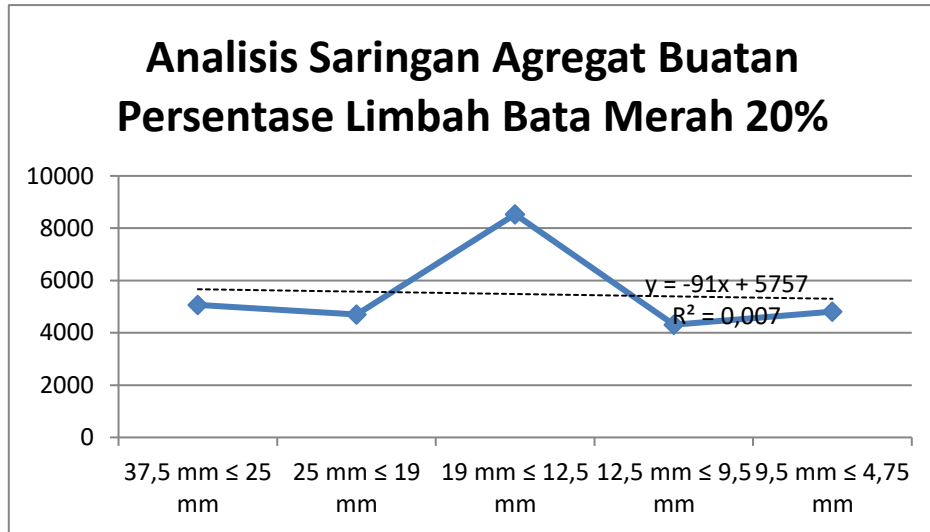
Tabel 4. 28 Hasil Analisis Saringan dari 5 Persentase Limbah Bata Ringan

Ukuran Saringan				Berat Benda Uji (gram)				
Lolos Saringan		Tertahan Saringan		Bata Ringan				
Mm	inci	mm	inci	20%	40%	60%	80%	100%
37,5	1 1/2	25	1	5720 gr	4900 gr	5210 gr	6213 gr	3802 gr
25	1	19	¾	6630 gr	6500 gr	8150 gr	7168 gr	5930 gr
19	¾	12,5	½	9360 gr	8410 gr	10500 gr	9910 gr	7840 gr
12,5	1/2	9,5	3/8	4630 gr	5306 gr	8400 gr	6437 gr	7190 gr
9,5	3/8	4.75	No.4	3550 gr	5572 gr	6503 gr	4850 gr	4500 gr

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 20% menghasilkan persamaan $y = -91x + 5757$ dan $R^2 =$

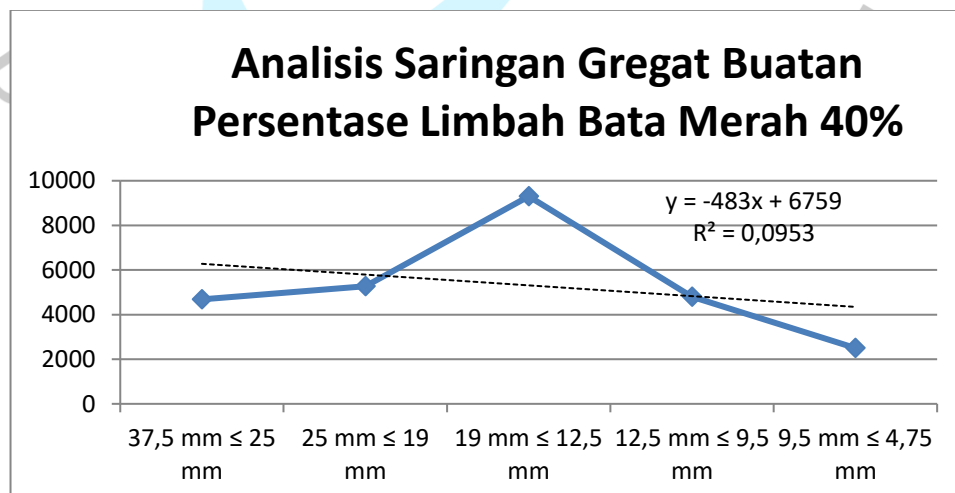
0,007 ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 1 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 20%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Grafik tersebut menunjukkan bahwa agregat buatan dari 20% limbah bata merah didominasi oleh ukuran 19 sampai 12,5 mm. Namun, distribusinya belum merata, terlihat dari nilai R^2 sebesar 0,007 yang mengindikasikan bahwa sebaran partikel masih acak.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 40% menghasilkan persamaan $y = -483x + 6759$ dan $R^2 = 0,0953$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



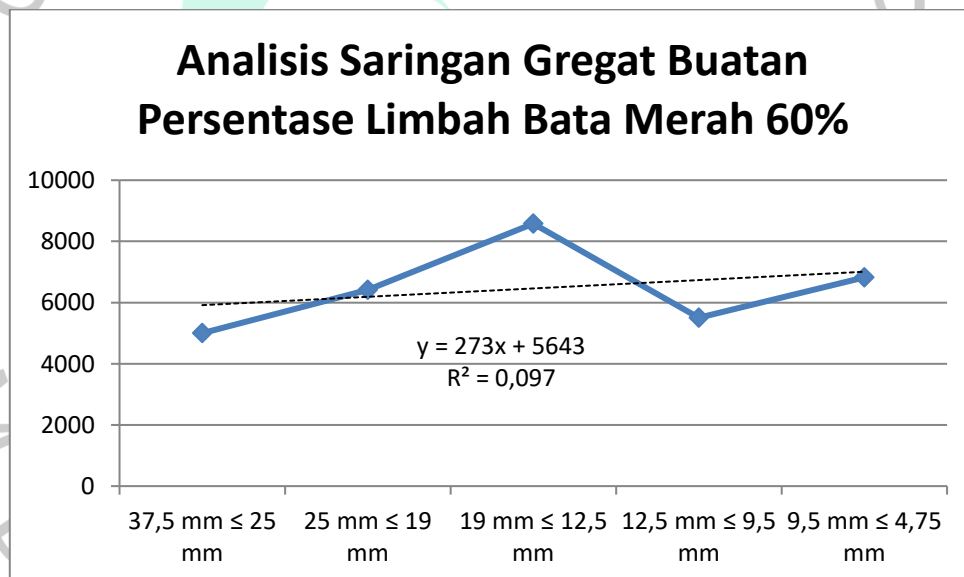
Gambar 4. 2 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 40%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Pada grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 40%

limbah bata merah, terlihat bahwa distribusi butiran agregat cenderung terpusat pada rentang ukuran 19 mm hingga 12,5 mm. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar agregat buatan memiliki ukuran menengah, yang mendominasi hasil proses pelletisasi.

Persamaan regresi linear yang diperoleh adalah $y = -483x + 6759$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0953. Nilai R^2 yang rendah ini menunjukkan bahwa hanya sekitar 9,53% dari variasi data yang dapat dijelaskan oleh hubungan linier antara ukuran saringan dan jumlah agregat tertahan.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 60% menghasilkan persamaan $y = 273x + 5645$ dan $R^2 = 0,097$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



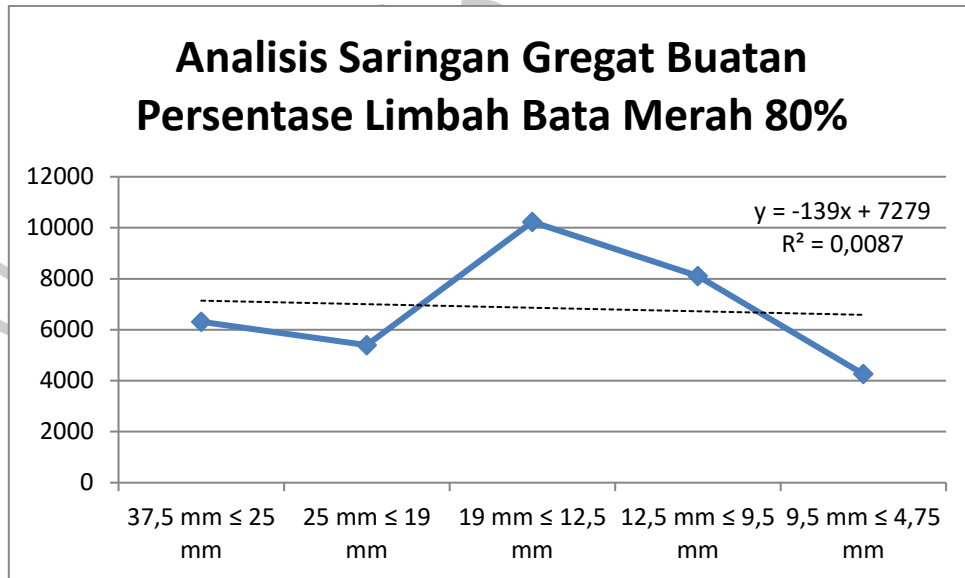
Gambar 4. 3 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 60%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Pada grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 60% limbah bata merah, terlihat bahwa distribusi butiran agregat terpusat pada rentang ukuran 19 mm hingga 12,5 mm, dengan berat tertahan tertinggi mencapai sekitar 8500 gram. Meskipun terdapat peningkatan kembali pada ukuran butiran terkecil ($\leq 4,75$ mm), pola distribusi secara keseluruhan menunjukkan ketidakteraturan.

Persamaan regresi linear yang dihasilkan adalah $y = 273x + 5643$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,097. Nilai R^2 yang rendah ini

mengindikasikan bahwa hubungan antara ukuran saringan dan berat agregat tertahan tidak bersifat linier dan gradasi agregat belum seragam.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 80% menghasilkan persamaan $y = -139x + 7279$ dan $R^2 = 0,0087$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



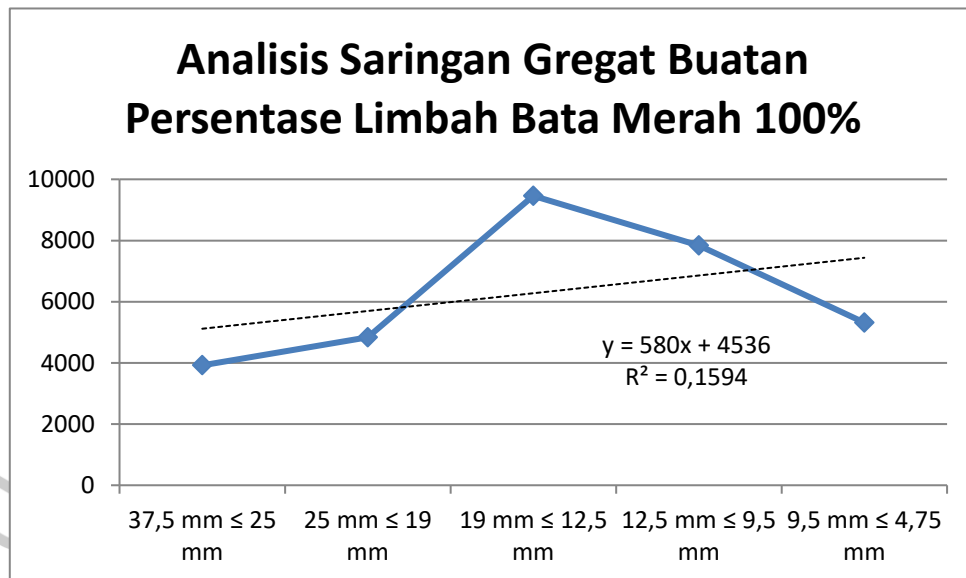
Gambar 4. 4 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 80%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berdasarkan grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 80% limbah bata merah, terlihat bahwa distribusi butiran agregat didominasi oleh ukuran 19 mm hingga 12,5 mm, dengan berat tertahan tertinggi mencapai lebih dari 10.000 gram. Ukuran lainnya, terutama ukuran terkecil ($\leq 4,75$ mm), menunjukkan jumlah agregat yang relatif sedikit.

Persamaan regresi linier yang dihasilkan adalah $y = -139x + 7279$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0087. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran saringan dan berat agregat tertahan sangat lemah dan tidak mengikuti pola distribusi yang seragam.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 100% menghasilkan persamaan $y = 580x + 4536$ dan $R^2 = 0,1594$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:

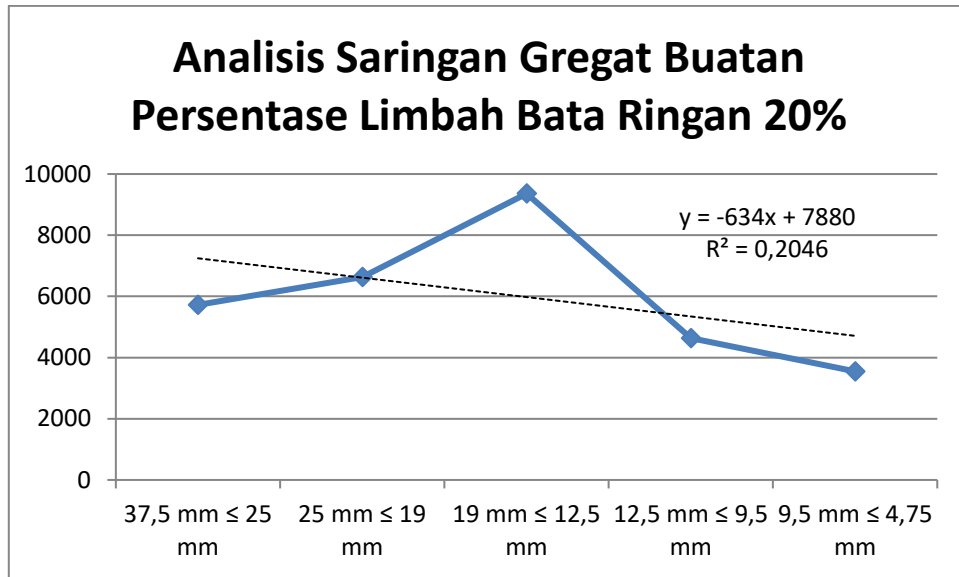
Gambar 4. 5 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 100%



Gambar 4. 5 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Merah 100%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Persamaan regresi $y = 580x + 4536$ dengan nilai R^2 sebesar 0,1594 menunjukkan hubungan yang masih lemah antara ukuran saringan dan berat agregat, meskipun lebih baik dibandingkan persentase limbah yang lebih rendah. Dengan demikian, distribusi ini belum sepenuhnya memenuhi karakteristik gradasi yang ideal.

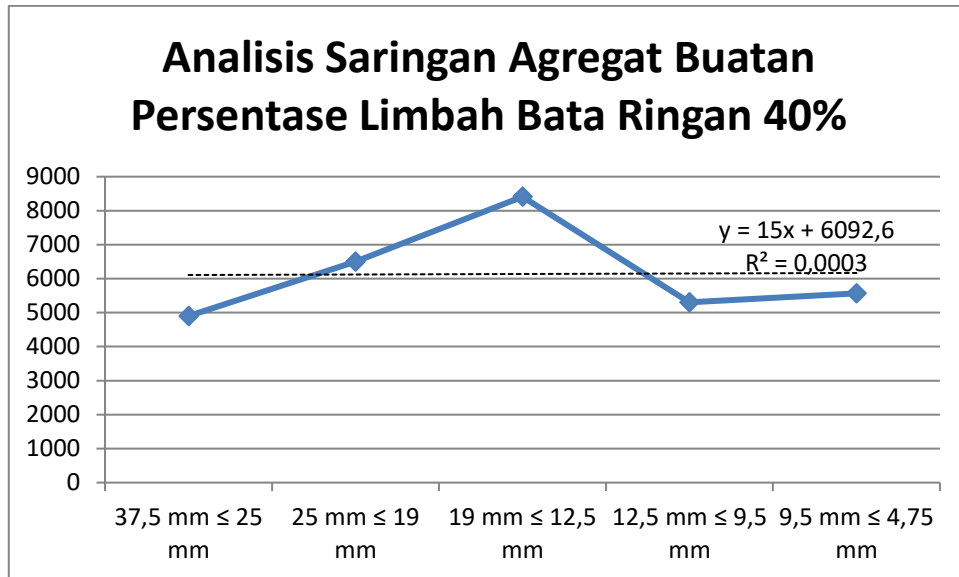
Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 20% menghasilkan persamaan $y = -634x + 7880$ dan $R^2 = 0,2046$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 6 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Ringan 20%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berdasarkan grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 20% limbah bata ringan, terlihat bahwa distribusi butiran agregat didominasi oleh ukuran 19 mm hingga 12,5 mm, dengan berat tertahan tertinggi mencapai sekitar 9400 gram. Persamaan regresi yang dihasilkan adalah $y = -634x + 7880$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,2046. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran saringan dan berat agregat tertahan cukup lebih baik.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 40% menghasilkan persamaan $y = 15x + 6092,6$ dan $R^2 = 0,0003$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:

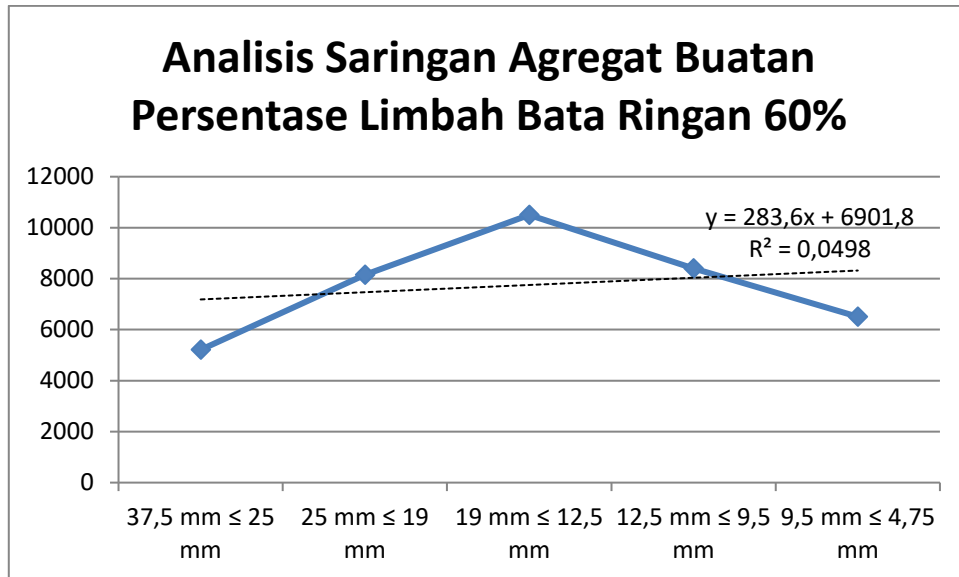


Gambar 4. 7 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Ringan 40%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berdasarkan grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 40% limbah bata ringan, terlihat bahwa distribusi partikel didominasi oleh ukuran 19 mm hingga 12,5 mm, dengan berat tertahan sekitar 8200 gram. Ukuran lainnya memiliki jumlah yang lebih rendah dan cenderung fluktuatif.

Persamaan regresi yang diperoleh adalah $y = 15x + 6092,6$ dengan nilai R^2 sebesar 0,0003. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran saringan dan berat agregat tertahan hampir tidak ada, sehingga distribusi agregat dapat dikategorikan tidak seragam.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 60% menghasilkan persamaan $y = 283,6x + 6901,8$ dan $R^2 = 0,0498$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:

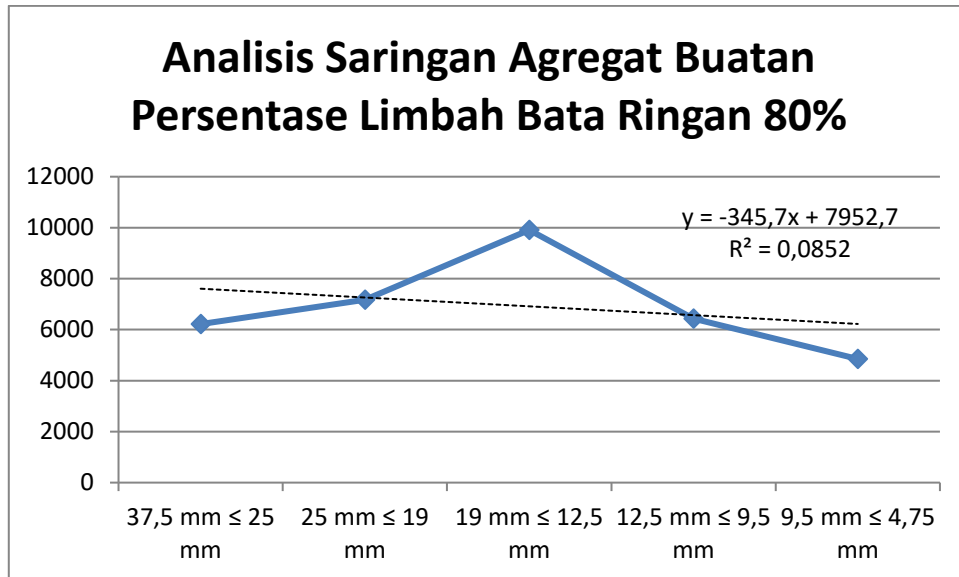


Gambar 4. 8 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Ringan 60%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berdasarkan grafik analisis saringan agregat buatan dengan komposisi 60% limbah bata ringan, distribusi butiran didominasi oleh ukuran 19 mm hingga 12,5 mm dengan berat tertahan lebih dari 10.000 gram. Ukuran lainnya memiliki distribusi yang lebih rendah, menunjukkan gradasi yang belum merata.

Persamaan regresi linier yang diperoleh adalah $y = 283,6x + 6901,8$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0498. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan antara ukuran saringan dan berat agregat tertahan masih sangat lemah.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 80% menghasilkan persamaan $y = -345,7x + 7952,7$ dan $R^2 = 0,0852$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:

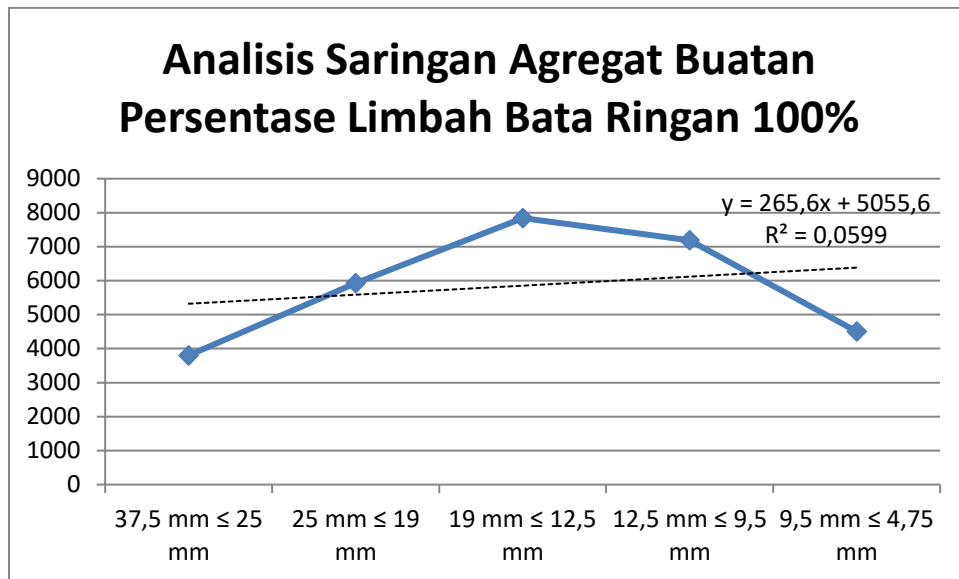


Gambar 4. 9 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Ringan 80%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Grafik menunjukkan bahwa berat tertinggi agregat terdapat pada fraksi ukuran $19 \text{ mm} \leq 12,5 \text{ mm}$, mendekati 10.000 gram, menandakan dominasi butiran berukuran menengah. Sebaliknya, fraksi berukuran lebih kecil dari 9,5 mm hingga 4,75 mm memiliki berat terendah, kurang dari 5.000 gram.

Persamaan garis tren yang dihasilkan adalah $y = -345,7x + 7952,7$ dengan nilai R^2 sebesar 0,0852. Nilai ini menunjukkan bahwa hubungan linier antara ukuran butiran dan massa agregat tergolong lemah, yang mengindikasikan distribusi partikel tidak sepenuhnya seragam dan dipengaruhi oleh variasi bentuk serta ukuran limbah bata ringan.

Hasil rekapitulasi analisis saringan agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 100% menghasilkan persamaan $y = 265,6x + 5055,6$ dan $R^2 = 0,0599$ ditampilkan dalam gambar sebagai berikut:



Gambar 4. 10 Analisis Saringan Agregat Buatan Limbah Bata Ringan 100%
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Hasil pengujian menunjukkan bahwa distribusi agregat membentuk pola menyerupai kurva lonceng, dengan fraksi ukuran $19 \text{ mm} \leq 12,5 \text{ mm}$ memiliki massa tertahan tertinggi, mendekati 8.000 gram. Hal ini menunjukkan dominasi butiran berukuran menengah. Sementara itu, pada fraksi paling kasar ($37,5 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm}$) dan paling halus ($9,5 \text{ mm} \leq 4,75 \text{ mm}$), massa tertahan relatif rendah, yaitu di bawah 5.000 gram.

Persamaan garis tren yang diperoleh adalah $y = 265,6x + 5055,6$ dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0599. Nilai ini mencerminkan hubungan linier yang lemah antara ukuran butiran dan massa agregat, sehingga distribusi gradasi dinilai kurang teratur dan menunjukkan keragaman ukuran butiran yang tinggi.

Berdasarkan grafik analisis saringan, distribusi agregat buatan menunjukkan kecenderungan yang sebanding dengan peningkatan proporsi limbah bata merah dan bata ringan. Namun, nilai koefisien determinasi (R^2) pada persamaan regresi yang dihasilkan tergolong rendah, yang mengindikasikan adanya penyimpangan data, terutama pada ukuran saringan $\frac{3}{4}$ inci dan $\frac{1}{2}$ inci, di mana kelima variasi persentase limbah menghasilkan jumlah agregat yang hampir sama. Selain itu, semakin tinggi persentase abu sekam padi yang digunakan dalam campuran, semakin banyak agregat buatan

yang tertahan maupun lolos pada saringan ukuran 3/8 inci, yang menjadi fraksi dominan dalam hasil gradasi.

4.3 Uji Abrasi

Pengujian abrasi menggunakan mesin Los Angeles bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan agregat kasar terhadap keausan yang disebabkan oleh tumbukan dan gesekan dengan bola baja di dalam drum berputar. Drum tersebut dioperasikan pada kecepatan antara 45 hingga 55 putaran per menit (rpm), dengan jumlah putaran berkisar antara 100 hingga 500 putaran, sesuai dengan ketentuan standar. Metode ini merujuk pada SNI 2417:2008, dan digunakan untuk menilai apakah agregat kasar memenuhi standar kelayakan dalam konstruksi berdasarkan ketahanannya terhadap abrasi. Hasil pengujian ini menjadi dasar untuk mengklasifikasikan kualitas agregat kasar.

4.3.1 Uji Abrasi Agregat Buatan

Pengujian abrasi dilakukan berdasarkan SNI 2417:2008 yang mengatur metode uji keausan agregat menggunakan mesin abrasi Los Angeles. Pengujian ini diterapkan pada agregat buatan yang disusun dari campuran abu terbang, pasir, serta limbah bata merah dan bata ringan dengan variasi proporsi sebesar 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% dari total campuran. Dua sampel uji digunakan untuk masing-masing variasi, dengan gradasi A sebagai acuan dalam proses analisis saringan. Proses curing dilakukan pada dua temperatur berbeda, yaitu 70°C dan 90°C. Rincian hasil pengujian abrasi ditampilkan dalam tabel berikut.

Tabel 4. 29 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 100% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1254	1255
25	1	19	¾	1250±50	1261	1259

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1253
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1255	1252
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5028	5019
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2471	2411
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	50,85%	51,96%
Rata-rata keausan				-	51,40	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 30 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 80% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1259	1260
25	1	19	¾	1250±50	1256	1257
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1255
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1253	1258
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5026	5030
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3015	2924
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	40,01%	41,87%
Rata-rata keausan				-	40,94	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 31 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 60% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1251	1263
25	1	19	¾	1250±50	1260	1259
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1259
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1257	1254
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5026	5035
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2472	2491
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	50,81%	50,52%
Rata-rata keausan				-	50,66	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 32 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 40% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1261	1257
25	1	19	¾	1250±50	1259	1252
19	¾	12,5	½	1250±10	1255	1258
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1258	1253
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5033	5020
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2870	3814
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	42,97%	43,94%
Rata-rata keausan				-	43,45	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 33 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 20% Limbah Bata Merah						
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1263	1255
25	1	19	¾	1250±50	1256	1257
19	¾	12,5	½	1250±10	1260	1256
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1255	1258
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5034	5026
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2845	2813
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	43,48%	44,03%
Rata-rata keausan				-	43,75	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 34 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 100% Limbah Bata Ringan						
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1260	1259
25	1	19	¾	1250±50	1259	1258
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1254
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1255	1250
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5032	5021
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	1561	1487
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	68,97%	70,38%
Rata-rata keausan				-	69,67	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 35 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 80% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1257	1258
25	1	19	¾	1250±50	1260	1256
19	¾	12,5	½	1250±10	1255	1253

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1253	1256
9,5	3/8	6.3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5025	5023
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2173	2146
$\bullet \text{Keausan} = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	56,75%	57,27%
Rata-rata keausan				-	57,01	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 36 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 60% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1263	1259
25	1	19	¾	1250±50	1254	1252
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1256
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1252	1257
9,5	3/8	6.3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch	-	-	-
Total				5000±70	5027	5024
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2965	2890
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	41,01%	42,45%
Rata-rata keausan				-	41,73	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 37 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 40% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1268	1257
25	1	19	¾	1250±50	1256	1259
19	¾	12,5	½	1250±10	1251	1255
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1258	1250
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5033	5021
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3120	3030

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	38,00%	39,65%
Rata-rata keausan				-	38,82	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 26 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 20% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1261	1260
25	1	19	¾	1250±50	1258	1257
19	¾	12,5	½	1250±10	1254	1254
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1256	1255
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5029	5026
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3101	3096
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	38,33%	38,40%
Rata-rata keausan				-	38,36	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 38 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 100% Limbah Bata Merah (90°C Steam Curing)

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1263	1261
25	1	19	¾	1250±50	1260	1259
19	¾	12,5	½	1250±10	1259	1256
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1256	1252
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5038	5028
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2439	2580
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	51,58%	48,68%
Rata-rata keausan				-	50,13	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 39 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 80% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1259	1257
25	1	19	¾	1250±50	1260	1255

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
19	¾	12,5	½	1250±10	1255	1257
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1253	1250
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5027	5019
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2989	3021
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	40,54%	39,80%
Rata-rata keausan				-	40,17	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 40 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 60% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1267	1265
25	1	19	¾	1250±50	1260	1260
19	¾	12,5	½	1250±10	1259	1258
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1256	1257
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5042	5040
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3061	3002
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	39,29%	40,43%
Rata-rata keausan				-	39,86	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 41 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 40% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1258	1259
25	1	19	¾	1250±50	1260	1258
19	¾	12,5	½	1250±10	1254	1256
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1257	1255
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5029	5028
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3152	3125
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	37,32%	37,84%
Rata-rata keausan				-	37,58	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 42 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 20% Limbah Bata Merah

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1261	1258
25	1	19	¾	1250±50	1259	1254
19	¾	12,5	½	1250±10	1254	1255
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1256	1257
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5030	5024
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3042	3050
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	39,52%	39,29%
Rata-rata keausan				-	39,40	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 43 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 100% Limbah Bata Ringan						
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1259	1260
25	1	19	¾	1250±50	1255	1257
19	¾	12,5	½	1250±10	1258	1258
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1256	1254
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5028	5029
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	1894	1903
$Keausan = \frac{a - b}{a} \times 100\%$				-	62,33%	62,15%
Rata-rata keausan				-	62,24	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 44 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 80% Limbah Bata Ringan						
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1260	1259

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
25	1	19	$\frac{3}{4}$	1250±50	1258	1257
19	$\frac{3}{4}$	12,5	$\frac{1}{2}$	1250±10	1256	1258
12,5	$\frac{1}{2}$	9,5	$\frac{3}{8}$	1250±10	1258	1252
9,5	$\frac{3}{8}$	6,3	$\frac{1}{4}$	-	-	-
6,3	$\frac{1}{4}$	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5032	5026
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2474	2427
$K_{eausan} = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	50,83%	51,71%
Rata-rata keausan				-	52,77	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 45 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 60% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	$2 \frac{1}{2}$	-	-	-
63	$2 \frac{1}{2}$	50	2	-	-	-
50	2	37,5	$1 \frac{1}{2}$	-	-	-
37,5	$1 \frac{1}{2}$	25	1	1250±50	1257	1259
25	1	19	$\frac{3}{4}$	1250±50	1253	1256
19	$\frac{3}{4}$	12,5	$\frac{1}{2}$	1250±10	1259	1259
12,5	$\frac{1}{2}$	9,5	$\frac{3}{8}$	1250±10	1256	1257
9,5	$\frac{3}{8}$	6,3	$\frac{1}{4}$	-	-	-
6,3	$\frac{1}{4}$	4,75	No.4	-	-	-

4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5025	5031
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	2985	2997
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	40,59%	40,22%
Rata-rata keausan				-	40,40	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 46 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 40% Limbah Bata Ringan

Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1262	1263
25	1	19	¾	1250±50	1257	1252
19	¾	12,5	½	1250±10	1254	1256
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1252	1257
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5027	5028
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3054	3085
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	39,24%	38,63%
Rata-rata keausan				-	38,93	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 47 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Buatan 20% Limbah Bata Ringan						
Ukuran saringan				Gradasi dan berat benda uji (gram)		
Lolos Saringan		Saringan tertahan		A	Sampel 1	Sampel 2
Mm	Inch	mm	inch			
75	3	63	2 ½	-	-	-
63	2 ½	50	2	-	-	-
50	2	37,5	1 ½	-	-	-
37,5	1 ½	25	1	1250±50	1258	1260
25	1	19	¾	1250±50	1253	1254
19	¾	12,5	½	1250±10	1257	1258
12,5	½	9,5	3/8	1250±10	1258	1253
9,5	3/8	6,3	¼	-	-	-
6,3	¼	4,75	No.4	-	-	-
4,75	No. 4	2,,36	No.8	-	-	-
Total				5000±70	5026	5025
Jumlah bola				12	12	12
Berat bola (gram)				5000±25	5000±25	5000±25
Jumlah tertahan saringan No.12				-	3120	3098
$Keausan = \frac{a-b}{a} \times 100\%$				-	37,92%	38,36%
Rata-rata keausan				-	38,14	

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Berikut merupakan hasil dari rekapitulasi dari pengujian abrasi dari persentase campuran limbah bata merah dan bata ringan.

Tabel 4. 48 Rekapitulasi Hasil Pengujian Abrasi

REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN ABRASI										
Curing	PERSENTASE CAMPURAN LIMBAH BATA MERAH (%)					PRESENTASE CAMPURAN LIMBAH BATA RINGAN (%)				
	20%	40%	60%	80%	100%	20%	40%	60%	80%	100%
70°C	43,75%	43,45%	50,66%	40,94%	51,4%	38,36%	38,42%	41,73%	57,01%	69,67%
90°C	39,4%	37,58%	39,86%	40,17%	50,17%	38,14%	38,93%	40,4%	52,77%	62,24%

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.3.2 Uji Abrasi Agregat Kasar Alami

Pengujian keausan pada agregat kasar alami dilaksanakan berdasarkan ketentuan dalam SNI 2417:2008 mengenai metode uji abrasi menggunakan mesin Los Angeles. Hasil pengujian terhadap agregat kasar alami dengan gradasi B ditampilkan pada Tabel 4.49.

Tabel 4. 49 Hasil Uji Abrasi Agregat Kasar Alami

Ukuran saringan (mm)		Sampel I	Sampel II	Sampel III
Lolos	Tertahan	Berat (gr)	Berat (gr)	Berat (gr)
76,2	63,5	0	0	0
63,5	50,8	0	0	0
50,8	36,1	0	0	0
36,1	25,4	0	0	0
25,4	19,1	0	0	0
19,1	12,7	2500	2500	2500
12,7	9,52	2500	2500	2500
9,52	6,35	0	0	0
6,35	4,75	0	0	0
4,75	2,36	0	0	0
Jumlah Putaran		500	500	500
Jumlah Bola Baja		11	11	11
Jumlah Berat (gram) (a)		5000	5000	5000
Berat tertahan saringan no.12 sesudah percobaan (gram) (b)		3985	4123	4012
$\text{Keausan } (\%) = \frac{a-b}{b} \times 100\%$		20,3	17,54	19,76
Selisih sampel I, II, dan III		2,22		
Rata-rata Keausan (%)		18,92		

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.4 Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Pengujian mortar geopolimer dilakukan berdasarkan acuan SNI 03-6820:2002. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya gaya maksimum per satuan luas yang diterima oleh benda uji mortar geopolimer berbentuk kubus dengan dimensi 5 × 5 cm dan volume 125 cm³. Jumlah total benda uji sebanyak 80 buah, dengan variasi variabel dan umur mortar 7 serta 28 hari.

$$fc' = \frac{N}{mm}$$
$$fc' = \frac{3600}{2500}$$
$$= 14,4 MPa$$

Tabel 4. 50 Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Suhu 70° C

Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Suhu 70°C																			
Jenis Campuran	Umur	Hasil Kuat Tekan (kN)					tinggi (mm)	lebar (mm)	Luas (mm ²)	Kuat Tekan (Mpa)					Rata-rata				
		20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				20%	40%	60%	80%	100 %	20%	40%	60%	80%	100 %
Bata Merah	7	14	19	15	13	6	50	50	2500	5.60	7.60	6.00	5.20	2.40	7.20	10.80	7.00	5.80	4.00
		22	35	20	16	14	50	50	2500	8.80	14.00	8.00	6.40	5.60					
	28	23	38	23	20	15	50	50	2500	9.20	15.20	9.20	8.00	6.00	13.40	15.60	10.60	12.60	10.20
		44	40	30	43	36	50	50	2500	17.60	16.00	12.00	17.20	14.40					
		30	9	20	6	1	50	50	2500	12.00	3.60	8.00	2.40	0.40	11.60	4.60	7.20	4.40	0.40
Bata Ringan	7	28	14	16	16	1	50	50	2500	11.20	5.60	6.40	6.40	0.40					
	28	64	24	26	26	3	50	50	2500	25.60	9.60	10.40	10.40	1.20	24.20	18.20	12.80	9.40	1.20
		57	67	38	21	3	50	50	2500	22.80	26.80	15.20	8.40	1.20					

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Tabel 4. 51 Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Suhu 90° C

Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Suhu 90°C																			
Jenis Campuran	Umur	Hasil Kuat Tekan (kN)					tinggi (mm)	lebar (mm)	Luas (mm ²)	Kuat Tekan (Mpa)					Rata-rata				
		20 %	40 %	60 %	80 %	100 %				20%	40%	60%	80%	100 %	20%	40%	60%	80%	100 %
Bata Merah	7	13	20	20	10	4	50	50	2500	5.20	8.00	8.00	4.00	1.60	7.60	11.40	7.80	5.60	3.80
		25	37	19	18	15	50	50	2500	10.00	14.80	7.60	7.20	6.00					
	28	30	46	35	34	16	50	50	2500	12.00	18.40	14.00	13.60	6.40	17.20	17.20	12.40	15.40	11.20
		56	40	27	43	40	50	50	2500	22.40	16.00	10.80	17.20	16.00					
Bata Ringan	7	21	11	20	13	5	50	50	2500	8.40	4.40	8.00	5.20	2.00	10.00	5.60	8.40	6.00	1.80
		29	17	22	17	4	50	50	2500	11.60	6.80	8.80	6.80	1.60					
	28	55	32	40	28	7	50	50	2500	22.00	12.80	16.00	11.20	2.80	23.60	17.00	14.60	9.60	3.40
		63	53	33	20	10	50	50	2500	25.20	21.20	13.20	8.00	4.00					

Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

4.5 Pembahasan

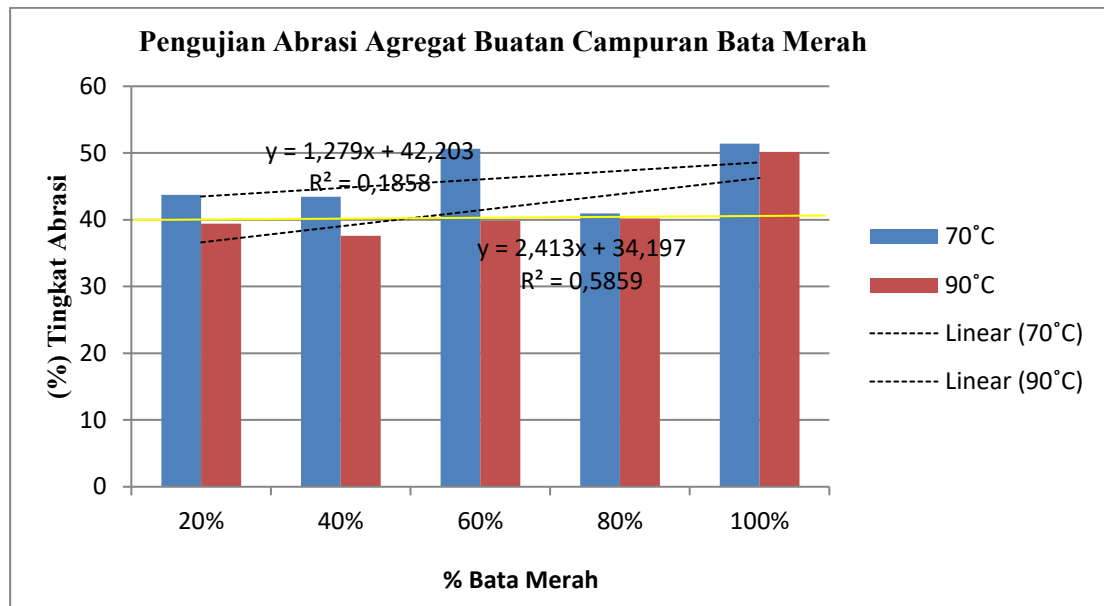
Subbab 4.3 membahas hasil pengujian yang meliputi uji abrasi, uji berat jenis, dan uji berat isi terhadap agregat buatan. Pembahasan dilakukan berdasarkan data yang telah dianalisis pada Subbab 4.2, dengan penyajian dalam bentuk grafik untuk menggambarkan tren dan perbandingan hasil pengujian secara visual..

4.5.1 Uji Abrasi

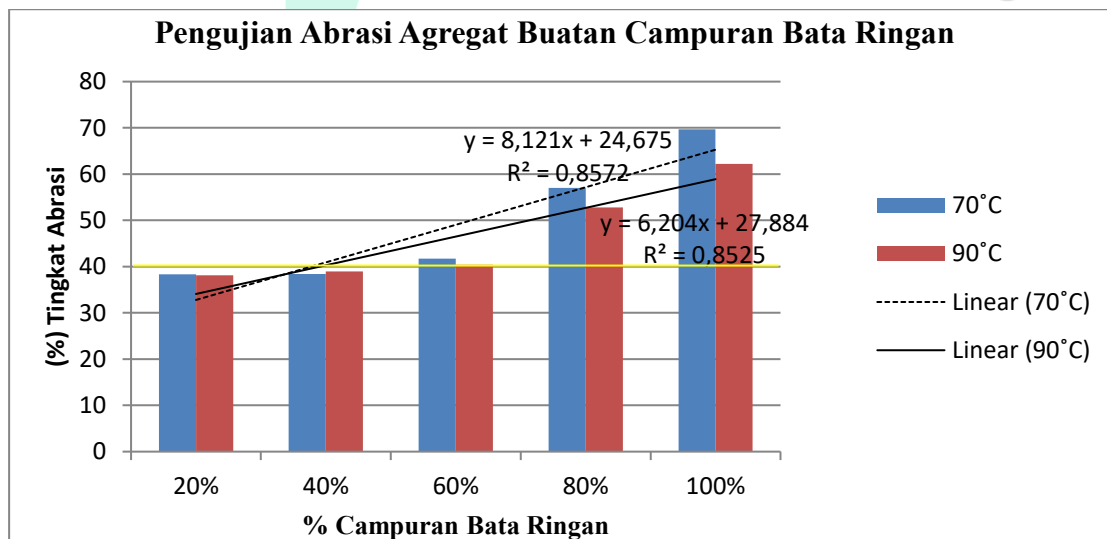
Pada pekerjaan konstruksi sipil, kondisi agregat sangat memengaruhi kinerja, khususnya dalam hal ketahanan aus selama proses pencampuran hingga pemadatan. Uji Los Angeles digunakan untuk menilai tingkat keausan, dengan klasifikasi bahwa agregat keras memiliki nilai abrasi $\leq 20\%$, sementara agregat lunak menunjukkan nilai $> 50\%$.

Pengujian keausan agregat didahului dengan analisis saringan untuk mengklasifikasikan gradasi agregat dominan, apakah termasuk kategori A, B, C, atau D. Klasifikasi tersebut juga menjadi dasar dalam menentukan jumlah bola baja yang digunakan, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 2.3.

Uji abrasi terhadap agregat buatan dilakukan berdasarkan prosedur SNI 2417–2008 menggunakan mesin Los Angeles, dengan konfigurasi gradasi A dan 12 bola baja. Dalam gradasi ini, agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran butiran mulai dari 9,5 mm ($3/8$ inci) hingga 37,5 mm ($1 \frac{1}{2}$ inci), dan pengujian dilakukan selama 500 putaran. Grafik di bawah ini menunjukkan hasil uji abrasi dari agregat buatan pada masing-masing variasi 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%.



Gambar 4. 11 Pengujian Abrasi Agregat Buatan Campuran Bata Merah
 Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025



Gambar 4. 12 Pengujian Abrasi Agregat Buatan Campuran Bata Ringan
 Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

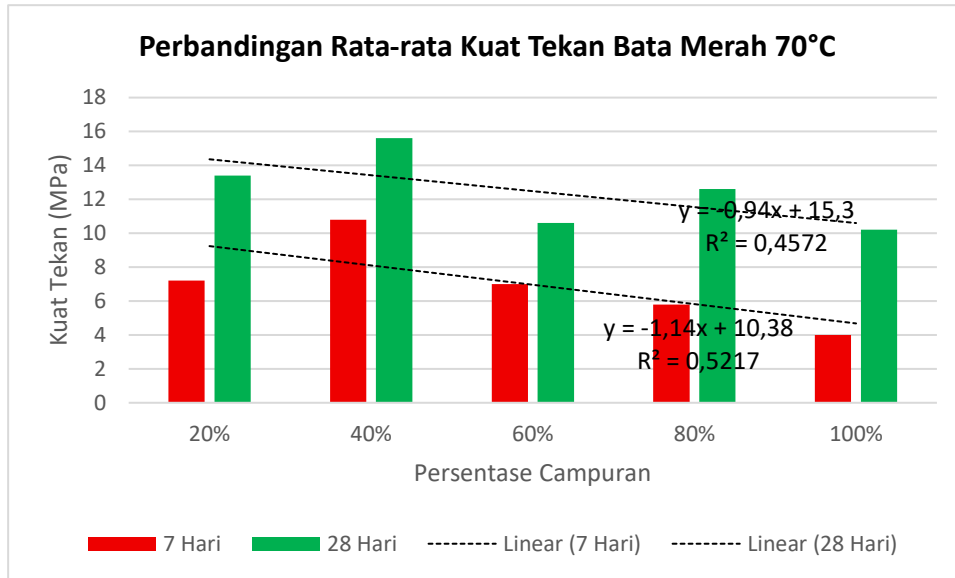
Pengujian abrasi dilakukan dengan 2 sampel pada masing-masing persentase. Pada pengujian limbah bata merah dengan suhu curing 70°C menghasilkan persamaan $y = 1,279x + 42,203$ dan $R^2 = 0,1858$ menandakan adanya bias pada sampel limbah bata merah dengan persentase 20%, 40%, 60%, 80%, 100% yang mengalami penurunan persentase berat hancur. Pada pengujian limbah bata merah dengan suhu curing 90°C menghasilkan persamaan $y = 2,413x + 34,197$ dan $R^2 = 0,5859$ menandakan adanya bias pada sampel limbah bata merah dengan persentase 20%, 40%, 60%, 80%,

100% yang mengalami penurunan persentase berat hancur. Pengujian abrasi agregat buatan dengan campuran limbah bata merah 20% menghasilkan nilai keausan 39,4% pada suhu curing 90°C, campuran limbah bata merah 40% menghasilkan nilai keausan sebesar 37,58% pada suhu 90°C, dan campuran limbah bata merah 60% menghasilkan nilai keausan sebesar 39,86% pada suhu curing 90°C. Pengujian abrasi pada campuran limbah bata merah dengan persentase 20%, 40%, dan 60% dengan suhu curing 90°C.

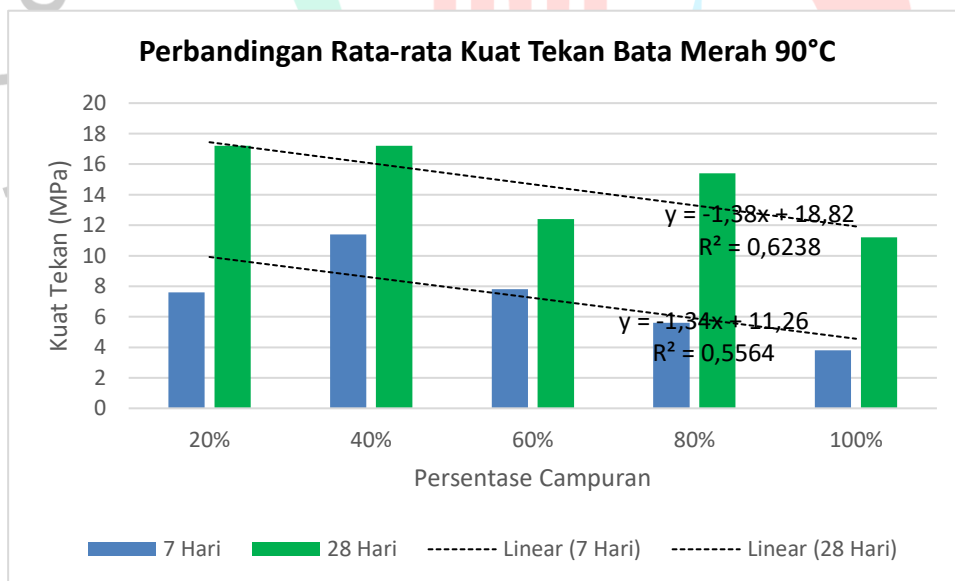
Pada pengujian limbah bata ringan dengan suhu curing 70°C menghasilkan persamaan $y = 8.121x + 24.675$ dan $R^2 = 0.8572$ menandakan adanya bias pada sampel limbah bata ringan dengan persentase 20%, 40%, 60%, 80%, 100% yang mengalami penurunan persentase berat hancur. Pada pengujian limbah bata ringan dengan suhu curing 90°C menghasilkan persamaan $y = 6.204x + 27.884$ dan $R^2 = 0.8525$ menandakan adanya bias pada sampel limbah bata ringan dengan persentase 20%, 40%, 60%, 80%, 100% yang mengalami penurunan persentase berat hancur. Pengujian abrasi agregat buatan dengan campuran limbah bata ringan 20% menghasilkan nilai keausan 38,36% pada suhu 70°C dan 38,14% pada suhu 90°C, campuran limbah bata ringan 40% menghasilkan nilai keausan sebesar 38,42% pada suhu 70°C dan 38,93% pada suhu 90°C.

Hasil pengujian abrasi limbah bata merah dan bata ringan berdasarkan SNI 2417-2008, limbah merah mendapatkan hasil nilai keausan 39,4% pada persentase 20% suhu curing 90°C, 37,58% pada persentase 40% suhu curing 90°C, 39,86% pada persentase 60% suhu curing 90°C. Limbah bata ringan mendapatkan hasil nilai keausan 38,36% pada suhu 70°C dan 38,14% pada suhu 90°C persentase 20%, 38,42% pada suhu 70°C dan 38,93% pada suhu 90°C. Hasil pengujian yang didapatkan menunjukkan bahwa hasil tersebut memenuhi syarat nilai keausan sesuai dengan SNI 2417-2008, yaitu nilai abrasi <40%.

4.5.2 Kuat Tekan Mortar Geopolimer



Gambar 4. 13 Kuat Tekan Bata Merah 70°C
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

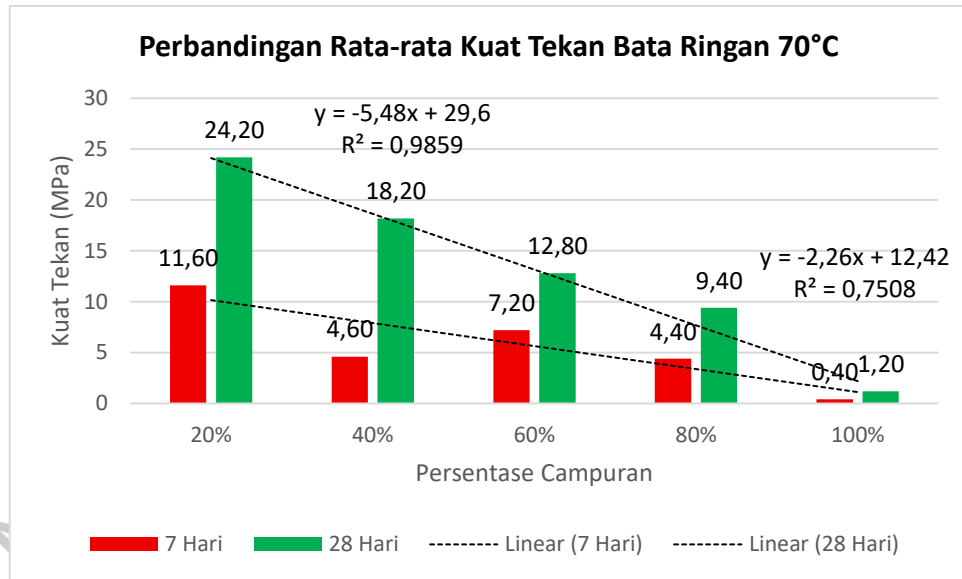


Gambar 4. 14 Kuat Tekan Bata Merah 90°C
Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

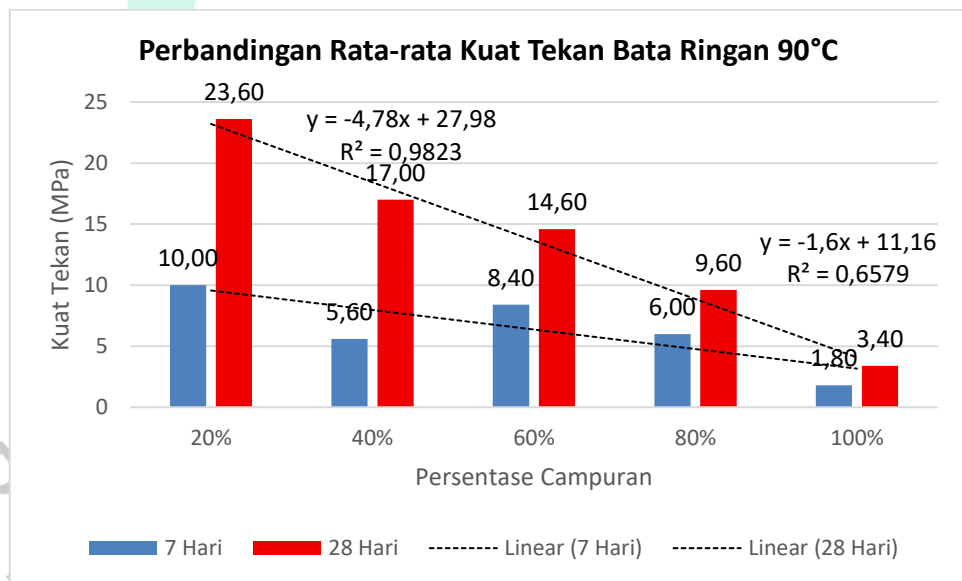
Pada suhu 70°C, grafik menunjukkan bahwa kuat tekan bata merah cenderung menurun seiring dengan meningkatnya persentase campuran, terutama pada pengujian umur 7 hari. Pada umur 7 hari, kuat tekan tertinggi tercapai pada campuran 20% (7,20 MPa), kemudian menurun secara

konsisten hingga mencapai 4,00 MPa pada campuran 100%. Penurunan ini ditunjukkan dengan persamaan garis regresi $y = -1,14x + 10,38$ $y = -1,14x + 10,38$ $y = -1,14x + 10,38$ dan koefisien determinasi $R^2=0,5217$ $R^2=0,5217$ $R^2=0,5217$, yang menunjukkan adanya hubungan linier negatif moderat antara peningkatan persentase campuran dengan kuat tekan. Sebaliknya, pada umur 28 hari, kuat tekan mengalami fluktuasi. Nilai tertinggi terdapat pada campuran 40% (15,60 MPa), yang kemudian menurun secara signifikan pada campuran 60% (10,60 MPa) dan naik kembali pada campuran 80% (12,60 MPa), sebelum akhirnya turun pada 100% (10,20 MPa). Persamaan garis regresi linier $y = -0,94x + 15,30$ $y = -0,94x + 15,30$ $y = -0,94x + 15,30$ dengan $R^2 = 0,4572$ $R^2 = 0,4572$ $R^2 = 0,4572$ menunjukkan tren penurunan, namun tidak sekuat penurunan pada umur 7 hari.

Pada suhu 90°C, kuat tekan mengalami peningkatan yang signifikan pada umur 28 hari dibandingkan umur 7 hari. Untuk umur 7 hari, nilai tertinggi terlihat pada campuran 40% (11,40 MPa), kemudian menurun menjadi 5,60 MPa pada campuran 100%. Persamaan regresi $y = -1,26x + 10,80$ $y = -1,26x + 10,80$ $y = -1,26x + 10,80$ dan $R^2 = 0,5564$ $R^2 = 0,5564$ $R^2 = 0,5564$ kembali mengindikasikan penurunan kuat tekan seiring kenaikan campuran. Sementara itu, pada umur 28 hari, nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada campuran 20% dan 40% yang masing-masing mencapai 17,20 MPa, kemudian menurun menjadi 12,40 MPa pada 60%, dan sedikit turun menjadi 15,40 MPa di 80%, serta turun lagi di 100% (12,20 MPa). Persamaan regresi linier $y = -1,08x + 18,81$ $y = -1,08x + 18,81$ $y = -1,08x + 18,81$ dengan $R^2 = 0,6238$ $R^2 = 0,6238$ $R^2 = 0,6238$ menunjukkan tren penurunan yang cukup kuat. terlihat bahwa curing bata merah pada suhu 90°C menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan suhu 70°C, terutama setelah 28 hari pengujian. Namun, peningkatan persentase campuran cenderung menurunkan kuat tekan, baik pada 7 hari maupun 28 hari. Hal ini dapat disebabkan oleh komposisi campuran yang terlalu tinggi dapat melemahkan ikatan antar partikel dan mengganggu hidrasi semen, sehingga mempengaruhi kekuatan akhir beton.



Gambar 4. 15 Kuat Tekan Bata Ringan 70°C
 Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025



Gambar 4. 16 Kuat Tekan Bata Ringan 70°C
 Sumber: Pengolahan Data Peneliti, 2025

Penggunaan terhadap limbah bata merah dan bata ringan sebagai bahan substitusi dalam pembuatan mortar geopolimer merupakan pendekatan yang menarik dalam bidang konstruksi berkelanjutan. Salah satu cara penting untuk menilai mutu mortar geopolimer adalah melalui pengamatan terhadap kuat tekan yang dihasilkan mortar itu. Grafik pengujian kuat tekan didasarkan pada berbagai variasi komposisi campuran (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%) juga dua suhu *curing* 70°C serta 90°C, sehingga terlihat sebuah tren yang

cukup konsisten serta mencerminkan pengaruh signifikan baik dari komposisi limbah juga suhu curing terhadap performa mekanik mortar geopolimer.

Mortar geopolimer itu menggunakan limbah bata ringan serta dicuring pada suhu 70°C. Pada campuran dengan 20% mortar ini, kuat tekannya tertinggi, yaitu 24,20 MPa pada umur hingga 28 hari serta 11,60 MPa pada umur sampai 7 hari. Persentase limbah meningkat menjadi 40%, 60%, sampai 100%, sehingga nilai kuat tekan menurun signifikan secara bertahap sampai nilai itu mencapai titik terendah yaitu 0,20 MPa pada komposisi 100%. Penurunan tersebut linier, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan regresi linier $y = -5,48x + 29,6$. Nilai determinasi yang tinggi yaitu $R^2 = 0,9859$ menunjukkan konsistensi pada data juga keandalan terhadap tren penurunan itu.

Ketika hasil ini dibandingkan dengan penelitian terdahulu, ditemukan keselarasan yang kuat. Neville (2011) dalam bukunya *Properties of Concrete* menyebutkan bahwa campuran dengan bahan substitusi sebaiknya dibatasi tidak lebih dari 30–40% untuk menjaga integritas struktural beton atau mortar. Demikian pula, penelitian oleh Hardjito dan Rangan (2005) menyatakan bahwa curing pada suhu 60–90°C memang mempercepat kekuatan awal pada material geopolimer, namun dapat menyebabkan penguapan air internal terlalu cepat dan meningkatkan risiko retakan mikro, terutama jika campuran tidak dikendalikan dengan baik.

Selain itu, Sata et al. (2007) dalam jurnal *Construction and Building Materials* menemukan bahwa penggunaan fly ash dan limbah keramik secara berlebihan dalam geopolimer akan menyebabkan penurunan kekuatan tekan akibat distribusi partikel yang tidak optimal dan rendahnya rasio bahan reaktif terhadap bahan pengisi. Temuan ini senada dengan penurunan kekuatan tekan pada campuran limbah 60–100% pada pengujian ini, yang gagal menghasilkan struktur padat dan kuat.

Hal lain yang menarik dari hasil ini adalah bahwa suhu curing 90°C memang dapat mempercepat pengembangan kekuatan pada usia awal, namun tidak selalu menjamin kekuatan jangka panjang yang lebih baik. Sebaliknya, suhu 70°C memberikan kekuatan 28 hari yang cenderung lebih stabil,

khususnya untuk komposisi 20–40%. Ini menunjukkan bahwa dalam praktiknya, kontrol suhu curing harus mempertimbangkan target umur beton dan keseimbangan hidrasi atau reaksi geopolimerisasi. Selain itu, bata ringan memiliki kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang tinggi dan bersifat lebih reaktif terhadap larutan alkali. Ini sangat mendukung terbentuknya struktur ikatan geopolimer berupa Natrium Alumino Silikat Hidrat (N-A-S-H) yang memperkuat ikatan antar partikel. Sebaliknya, bata merah memiliki struktur yang sudah terbentuk stabil akibat proses pembakaran suhu tinggi, sehingga reaktivitas kimianya terhadap alkali rendah dan kurang mendukung proses geopolimerisasi.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kombinasi curing suhu 70°C dan komposisi limbah 20–40% adalah kondisi optimal untuk mortar geopolimer berbasis limbah bata ringan, dengan hasil kuat tekan yang melebihi 17 MPa. Sementara itu, penggunaan limbah bata merah pada grafik lain cenderung menghasilkan nilai kuat tekan lebih rendah dibanding bata ringan, kemungkinan karena sifat fisik dan kimia limbah bata merah yang kurang mendukung pembentukan ikatan geopolimer yang kuat.