

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan temuan penelitian serta analisis mengenai dampak pemanfaatan limbah kertas HVS dan limbah serbuk kaca terhadap karakteristik batako yang dihasilkan. Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yang meliputi persiapan bahan, pembuatan benda uji, proses perawatan (*curing*), serta pengujian sifat fisik dan mekanik batako. Variasi campuran yang diterapkan terdiri atas penambahan limbah kertas HVS sebesar 0%, 2,5%; 5%; dan 7,5% terhadap total volume campuran serta penggantian (substitusi) sebagian semen dengan limbah serbuk kaca sebesar 0%; 2,5%; 5%; dan 10%. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh setiap variasi terhadap kuat tekan, daya serap air, serta karakteristik fisik batako sebagai material non-struktural.

Hasil pengujian yang didapatkan kemudian diolah dan dievaluasi terhadap standar yang berlaku serta penelitian terdahulu untuk mengetahui efektivitas penggunaan kedua jenis limbah tersebut dalam komposisi batako. Analisis ini dimaksudkan untuk menentukan kadar optimum penggunaan limbah kertas HVS dan limbah serbuk kaca yang mampu menghasilkan batako dengan kualitas terbaik. Selain itu, pembahasan pada bab ini juga dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perubahan komposisi campuran dengan peningkatan maupun penurunan sifat mekanik dan fisik batako, sehingga dapat menjadi dasar pemanfaatan limbah sebagai alternatif material konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

4.1 Hasil Pengujian Karakteristik Material

Pengujian karakteristik material dilakukan untuk menilai sifat fisik dan kualitas bahan penyusun batako sebelum pembuatan benda uji. Material yang diuji

meliputi semen, pasir, limbah kertas HVS, limbah serbuk kaca, dan air sebagai bahan campuran mortar. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh material memenuhi persyaratan yang diperlukan sehingga dapat menghasilkan campuran batako yang baik dan sesuai standar. Selain itu, hasil pengujian karakteristik material juga digunakan sebagai dasar dalam perencanaan job mix serta untuk mengkaji pengaruh tiap material terhadap sifat mekanik dan fisik batako yang dihasilkan. Pengujian karakteristik material meliputi pemeriksaan sifat-sifat yang berpengaruh terhadap proses pencampuran, pengerasan, dan kualitas akhir batako, seperti berat jenis, gradasi agregat, kadar air, kadar lumpur, serta konsistensi semen. Hasil pengujian tersebut memberikan informasi mengenai kelayakan setiap material untuk digunakan sebagai bahan penyusun batako dan menjadi acuan dalam menentukan proporsi campuran yang tepat. Dengan demikian, penggunaan material yang telah memenuhi persyaratan diharapkan mampu menghasilkan batako dengan kualitas yang lebih seragam, memiliki performa yang baik, serta memenuhi persyaratan mutu sesuai standar yang berlaku.

1. Keadaan Kemasan Semen

Pada penelitian ini digunakan semen *Portland Pozzolan Cement* (PPC) dengan merek Rajawali sebagai bahan pengikat utama dalam pembuatan batako. Semen PPC merupakan jenis semen hidrolis yang mengandung campuran material pozzolan alami maupun buatan, seperti abu vulkanik atau *fly ash*, yang berfungsi meningkatkan karakteristik dan ketahanan material. Berdasarkan SNI 15-0302-2004, penambahan bahan pozzolan bertujuan untuk meningkatkan durabilitas, mengurangi panas hidrasi, serta meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat dan lingkungan yang agresif. Dibandingkan dengan *Ordinary Portland Cement* (OPC), semen PPC memiliki proses pengerasan awal yang relatif lebih lambat, namun mampu menghasilkan kuat tekan yang baik pada umur panjang serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap retak akibat panas hidrasi. Sebelum digunakan dalam proses pembuatan benda uji, dilakukan pemeriksaan terhadap kondisi fisik semen, meliputi kemasan yang harus

dalam keadaan utuh, tidak robek, tidak bocor, serta tidak terdapat gumpalan yang menandakan semen telah menyerap kelembapan. Selain itu, semen dipastikan disimpan pada tempat yang kering dan terlindung dari air agar mutu serta karakteristiknya tetap terjaga selama proses penelitian berlangsung. Semen merek Rajawali yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1



Gambar 4.1. Semen Rajawali

2. Keadaan Butiran Semen

Karakterisasi keadaan butiran semen dilakukan secara visual dengan mengamati tekstur dan bentuk butiran semen, yaitu memastikan bahwa semen berada dalam kondisi kering, tidak terdapat butiran yang menggumpal, serta memiliki warna abu-abu yang merata. Selain itu, semen yang berada dalam kondisi baik akan mudah terurai saat disentuh dengan tangan. Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan bahwa semen masih dalam kondisi layak digunakan dan belum mengalami hidrasi awal akibat paparan kelembapan. Butiran Semen Rajawali dapat dilihat pada Gambar 4.2.

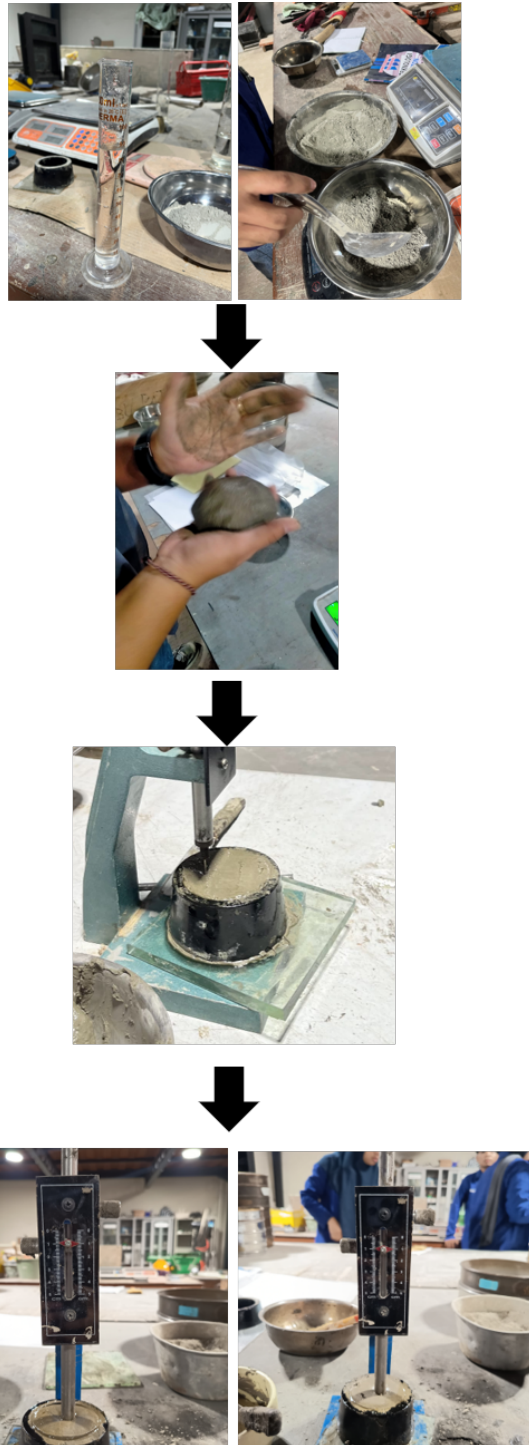


Gambar 4.2. Butiran Semen

3. Pengujian Konsistensi Normal Semen

Uji konsistensi normal semen dilaksanakan untuk mengidentifikasi jumlah kebutuhan air optimum yang diperlukan dalam pembuatan pasta semen sehingga diperoleh tingkat kelecakan (*workability*) standar. Nilai konsistensi normal merupakan salah satu parameter penting yang digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan pengujian waktu ikat semen, karena jumlah air pencampur memiliki pengaruh yang signifikan terhadap proses hidrasi, kelecakan, serta proses pengerasan semen. Apabila jumlah air yang digunakan terlalu sedikit, pasta semen akan menjadi terlalu kaku sehingga sulit dikerjakan. Sebaliknya, apabila jumlah air terlalu banyak, proses hidrasi dan waktu pengerasan semen dapat berubah sehingga memengaruhi hasil pengujian. Oleh karena itu, pengujian konsistensi normal perlu dilakukan untuk memastikan bahwa pasta semen yang digunakan berada pada kondisi plastis yang sesuai dengan ketentuan standar. Selain itu, nilai konsistensi normal juga memberikan gambaran mengenai karakteristik semen yang digunakan dalam penelitian sebelum diaplikasikan pada campuran batako. Hasil pengujian ini menjadi acuan dalam menentukan proporsi air yang tepat sehingga proses pencampuran material dapat berlangsung dengan lebih baik dan menghasilkan adukan yang homogen. Dengan demikian, pelaksanaan pengujian konsistensi normal berperan penting dalam menjaga keakuratan dan konsistensi hasil pengujian pada tahapan penelitian berikutnya. Pada penelitian ini, pengujian konsistensi normal semen dilakukan menggunakan Alat Vicat yang dilengkapi dengan

plunger atau batang penembus berdiameter 10 mm. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi penambahan air hingga diperoleh kedalaman penetrasi *plunger* yang memenuhi persyaratan konsistensi normal. Hasil pengujian ini kemudian dijadikan dasar dalam pelaksanaan pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir semen sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan sesuai dengan standar pengujian yang berlaku. Selain digunakan sebagai dasar dalam penentuan waktu ikat semen, hasil pengujian konsistensi normal juga berfungsi untuk mengevaluasi kualitas dan karakteristik fisik semen sebelum digunakan sebagai bahan penyusun campuran batako. Nilai konsistensi normal yang diperoleh menunjukkan kemampuan semen dalam menyerap air untuk membentuk pasta dengan tingkat plastisitas tertentu. Karakteristik ini dipengaruhi oleh kehalusan butiran semen, komposisi senyawa penyusun, serta kondisi penyimpanan semen sebelum digunakan. Semen dengan kualitas yang baik umumnya memiliki nilai konsistensi normal yang masih berada dalam kisaran yang dipersyaratkan oleh standar, sehingga proses hidrasi dapat berlangsung secara optimal. Oleh karena itu, pengujian ini tidak hanya berfungsi sebagai tahapan awal dalam pengujian sifat semen, tetapi juga sebagai bentuk pengendalian mutu (*quality control*) terhadap material yang akan digunakan selama penelitian. Seluruh tahapan pengujian konsistensi normal dilaksanakan dengan memperhatikan prosedur pengujian yang berlaku agar hasil yang diperoleh memiliki tingkat ketelitian dan keandalan yang tinggi. Data hasil pengujian tersebut selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan pengujian waktu ikat semen serta menjadi dasar penentuan kebutuhan air pada penelitian ini agar proses pencampuran dan pembentukan benda uji dapat berlangsung secara optimal. Proses pelaksanaan uji konsistensi normal semen dapat dilihat pada Gambar 4.3.



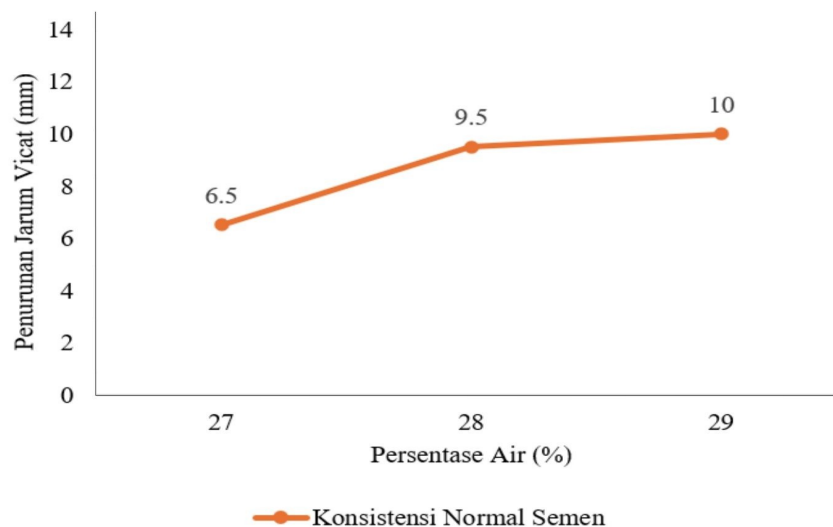
Gambar 4.3. Pengujian Konsistensi Normal Semen

Hasil pengujian konsistensi normal ini selanjutnya dijadikan sebagai dasar dalam menentukan persentase air yang digunakan pada pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir semen. Penggunaan jumlah air yang sesuai dengan nilai konsistensi normal bertujuan agar pasta semen memiliki tingkat plastisitas yang seragam sesuai standar pengujian. Dengan demikian, proses hidrasi dapat berlangsung secara optimal sehingga waktu ikat yang diperoleh benar-benar mencerminkan karakteristik semen yang digunakan dalam penelitian.. Berikut merupakan Tabel 4.1 dan Gambar 4.4 grafik hasil pengujian konsistensi normal semen yang diperoleh pada penelitian ini.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen

No	Berat Semen (Gram)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	300	27	6,5	29	PPC Rajawali
2	300	28	9,5	29	PPC Rajawali
3	300	29	10	29	PPC Rajawali

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)



Gambar 4.4. Grafik Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen

Penentuan nilai konsistensi normal semen dapat dilakukan dengan menggunakan cara interpolasi. Interpolasi sendiri dapat diartikan sebagai cara untuk mengetahui nilai sisip diantara nilai – nilai yang diketahui. (ASTM C 39/ C 39 M / SNI 03-1974-1990)

$$X = X1 + \frac{(Y - Y1)(X2 - X1)}{(Y2 - Y1)}$$

$$X = 28 + \frac{(10-9,5)(29-28)}{(10-9,5)} = 29\%$$

Keterangan :

X = kadar air yang dicari (% atau cc)

X1 = kadar air pertama

X2 = kadar air kedua

Y = nilai penetrasi standar yang ditentukan

Y1 = hasil penetrasi pada kadar air pertama

Y2 = hasil penetrasi pada kadar air kedua

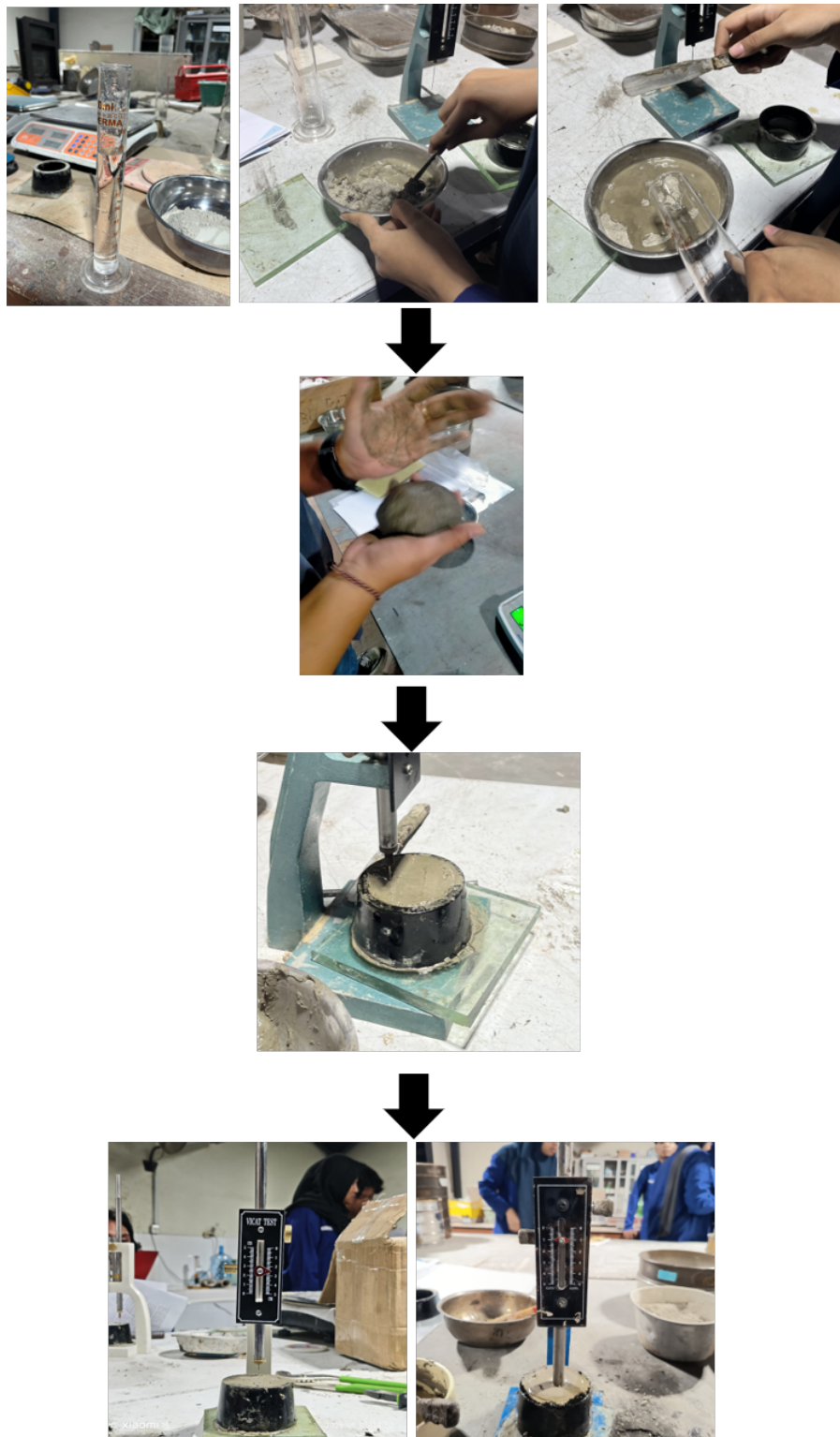
Pada grafik diatas menunjukkan tiga kali pengujian dalam penentuan kadar air normal, diperoleh penurunan jarum 10 mm sesuai dengan PUBI 1982 Pasal 1 ayat 1.1 syarat pengujian konsistensi normal dengan kadar air sebesar 87 cc yang menghasilkan pasta semen dengan kekentalan yang optimum. Dari hasil pengujian tersebut diperoleh nilai konsistensi normal semen sebesar 29% terhadap berat semen yang digunakan. Nilai ini menunjukkan bahwa kebutuhan air untuk menghasilkan pasta semen dengan tingkat kelecakan standar berada pada kadar air tersebut. Konsistensi normal yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pengujian waktu ikat semen agar proses pengujian dapat menghasilkan data yang sesuai dengan ketentuan standar.

4. Pengujian Pengikatan Awal Semen

Pengujian waktu ikat semen bertujuan untuk mengetahui lamanya proses pengerasan semen, yaitu sejak semen mulai bereaksi dengan air hingga

pasta semen mengalami perubahan dari kondisi plastis menjadi kondisi yang semakin kaku dan akhirnya mengeras. Reaksi antara semen dan air akan memicu proses hidrasi yang menghasilkan senyawa-senyawa baru sebagai penyusun utama kekuatan pasta semen. Selama proses tersebut berlangsung, sifat fisik pasta semen akan mengalami perubahan secara bertahap, mulai dari mudah dikerjakan (*workable*), kemudian kehilangan kelecakannya, hingga akhirnya mencapai kondisi mengeras. Oleh karena itu, pengujian waktu ikat menjadi salah satu pengujian penting untuk mengetahui karakteristik awal semen yang digunakan dalam penelitian.

Pada penelitian ini, pengujian waktu ikat semen dilakukan menggunakan Alat Vicat sesuai dengan prosedur pengujian yang berlaku. Pasta semen yang telah dibuat berdasarkan nilai konsistensi normal ditempatkan ke dalam cincin cetakan Vicat, kemudian dilakukan pengujian secara berkala menggunakan jarum Vicat untuk mengetahui perubahan tingkat penetrasi terhadap pasta semen. Pengamatan dilakukan mulai dari saat pencampuran semen dengan air hingga diperoleh waktu ikat awal (*initial setting time*), yaitu ketika jarum Vicat tidak lagi mampu menembus pasta sesuai batas yang telah ditentukan, dan dilanjutkan hingga diperoleh waktu ikat akhir (*final setting time*), yaitu ketika pasta semen telah mengalami pengerasan sehingga jarum tidak lagi meninggalkan bekas penetrasi yang memenuhi kriteria standar. Data yang diperoleh dari pengujian ini selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi karakteristik pengerasan semen sebagai bahan pengikat utama pada campuran batako serta memastikan bahwa semen yang digunakan memenuhi persyaratan standar sehingga tidak mengganggu proses pencampuran, pencetakan, curing, maupun perkembangan kuat tekan benda uji. Proses pengujian waktu ikat awal semen dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Pengujian Pengikatan Awal Semen

Waktu ikat semen terbagi menjadi dua, yaitu waktu ikat awal (*initial setting time*) dan waktu ikat akhir (*final setting time*). Waktu ikat awal menunjukkan batas waktu sejak semen dicampur dengan air hingga adukan mulai kehilangan sifat plastisnya, sedangkan waktu ikat akhir menunjukkan saat pasta semen telah mengeras sehingga tidak lagi mengalami deformasi akibat beban ringan. Syarat-syarat waktu ikat Semen Portland menurut PUBI Pasal 1 Ayat 2.2 disajikan pada Tabel berikut. dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Syarat Waktu Ikut Semen Portland

Jenis Semen <i>Portland</i>	I	II	III	IV	V
Uraian					
- Waktu Pengikatan dengan alat Vicat :					
Awal, min, menit	60	60	60	60	60
Akhir, maks, jam	8	8	8	8	8
- Waktu Pengikatan dengan alat <i>Gillmore</i> :					
Awal, min, menit	-	-	-	-	-
Akhir, maks, jam	10	10	10	10	10

Sumber : PUBI Pasal 1 ayat 2.2

Pengujian waktu ikat semen dapat dilakukan ketika nilai konsistensi normal semen sudah diketahui. Adapun syarat nilai konsistensi normal dikatakan memenuhi apabila jarum penetrasi mencapai angka 10 ± 1 mm,

sedangkan waktu ikat awal 25 ± 1 mm. Hasil dari pengujian pengikatan awal semen dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.6.

Tabel 4.3. Hasil Pengujian Pengikatan Awal Semen

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	15	41	29	PPC Rajawali
2	30	40	29	PPC Rajawali
3	45	39	29	PPC Rajawali
4.	60	38	29	PPC Rajawali
5.	75	37	29	PPC Rajawali
6.	90	37	29	PPC Rajawali
7.	105	30	29	PPC Rajawali
8.	120	25	29	PPC Rajawali

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Penentuan nilai waktu pengikatan awal semen dapat dilakukan dengan menggunakan metode interpolasi. Interpolasi merupakan suatu metode matematis yang digunakan untuk memperkirakan suatu nilai yang berada di antara dua data yang telah diketahui berdasarkan hubungan linier dari data tersebut. Pada pengujian waktu pengikatan awal semen menggunakan Alat Vicat, metode ini diterapkan karena nilai penetrasi jarum yang menjadi acuan penentuan waktu pengikatan tidak selalu tercapai secara tepat pada saat interval pengamatan. Selama proses pengujian, kedalaman penetrasi jarum diukur pada selang waktu tertentu sehingga sering kali nilai penetrasi yang dipersyaratkan berada di antara dua hasil pengamatan. Oleh karena itu, metode interpolasi digunakan untuk memperkirakan waktu yang bersesuaian dengan nilai penetrasi tersebut secara lebih teliti. Penggunaan metode interpolasi bertujuan untuk meningkatkan ketelitian dalam penentuan waktu pengikatan awal sehingga hasil yang diperoleh lebih representatif terhadap karakteristik semen yang diuji. Nilai waktu pengikatan awal yang diperoleh

melalui metode ini selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam mengevaluasi sifat semen sebelum diaplikasikan pada campuran batako, karena waktu pengikatan berpengaruh terhadap proses pencampuran, pencetakan, dan pengerasan material. Perhitungan waktu pengikatan awal dengan metode interpolasi dilakukan mengacu pada prosedur pengujian yang berlaku sesuai ASTM C191 dan SNI 03-6827-2002, sehingga hasil yang diperoleh memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

$$Y = Y1 + \frac{(X1 - X)}{(X1 - X2)} \times (Y2 - Y1)$$

$$Y = 105 + \frac{(30 - 25)}{(30 - 25)} \times (120 - 105) = 120 \text{ menit}$$

Keterangan :

Y = waktu yang dicari untuk mencapai penetrasi standar (menit)

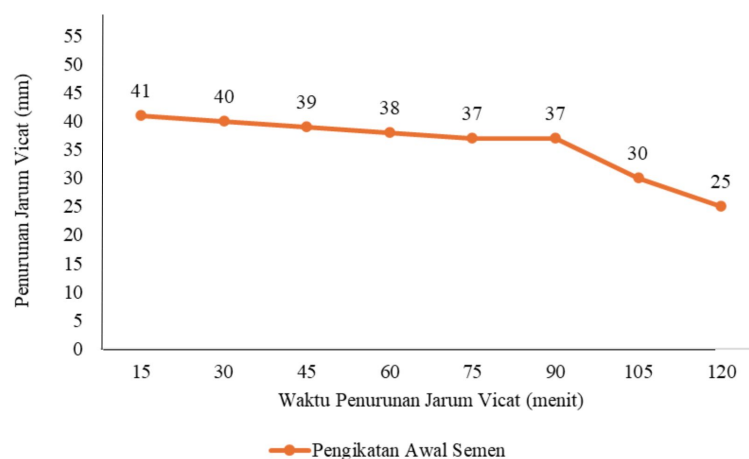
Y1 = waktu pada data pertama (menit)

Y2 = waktu pada data kedua (menit)

X = nilai penetrasi standar yang ditentukan (mm)

X1 = nilai penetrasi jarum pada data pertama (mm)

X2 = nilai penetrasi jarum pada data kedua (mm)



Gambar 4.6. Grafik Hasil Pengikatan Awal Semen

Dari Gambar 4.6 diatas hasil pengujian menunjukkan proses waktu pengikatan dan pengerasan pasta semen yang diamati menggunakan Alat Vicat. Berdasarkan data pengujian, pasta semen mulai mengalami pengikatan awal pada menit ke-120 yang ditunjukkan oleh penurunan jarum mencapai 25 mm. Nilai penetrasi tersebut telah memenuhi ketentuan standar pengujian waktu ikat awal semen berdasarkan PUBI Pasal 1 ayat 2.2, dimana semakin kecil nilai penetrasi jarum menunjukkan bahwa pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya dan mengalami proses pengerasan.

Hasil ini menunjukkan bahwa reaksi hidrasi semen berlangsung secara normal sehingga pasta semen mulai membentuk ikatan antar partikel secara bertahap. Waktu pengikatan awal yang diperoleh sebesar 120 menit menandakan bahwa semen masih memiliki waktu pengerjaan (*workability*) yang cukup baik dimana syarat maksimal waktu pengikatan semen berdasarkan PUBI Pasal 1 ayat 2.2 ada di 8 jam sebelum mengalami pengerasan. Nilai tersebut juga mengindikasikan bahwa semen yang digunakan berada dalam kondisi baik dan layak digunakan sebagai bahan pengikat pada pembuatan batako dalam penelitian ini.

4.1.1. Pasir

1. Pengujian Gradasi Pasir

Pasir yang digunakan dalam penelitian pembuatan batako ini adalah pasir muntiran. Pemilihan pasir muntiran didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki butiran halus, bersih, serta gradasi yang baik sehingga cocok digunakan sebagai agregat halus dalam campuran batako. Selain itu, pasir muntiran dikenal dengan kandungan lumpur yang relatif rendah dan mampu menghasilkan ikatan yang baik dengan semen, sehingga dapat meningkatkan kepadatan, kuat tekan, dan kualitas permukaan batako. Penggunaan pasir ini juga dipilih karena ketersediaannya yang mudah diperoleh serta telah banyak digunakan pada pekerjaan konstruksi dan pembuatan produk beton non-struktural. Pengujian gradasi pasir

dimaksudkan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel agregat halus yang digunakan dalam komposisi batako. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan tingkat kehalusan pasir serta memastikan bahwa agregat halus yang diaplikasikan telah memenuhi ketentuan standar sebagai bahan penyusun mortar. Gradasi pasir yang baik sangat berpengaruh terhadap *workability*, kepadatan campuran, serta kekuatan batako yang dihasilkan. Selain itu, distribusi ukuran butiran yang sesuai dapat mengurangi rongga dalam campuran sehingga menghasilkan batako dengan struktur yang lebih padat dan kuat.

Karakterisasi gradasi pasir dilakukan dengan metode analisis saringan menggunakan ayakan *standart Tatonas* dengan ukuran $\frac{3}{4}$; $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{8}$; No. 4; No. 8; No. 16; No. 30; No. 50; No. 100; No. 200 sesuai dengan aturan dalam PBI 1971 Bab III, Pasal 3.5 ayat 1 dan juga PUBI (Persyaratan Umum Bahan Bangunan Indonesia) 1982 Bab 5 Pasal 11, tentang Pasir Beton. Pengujian *grain size* dengan menggunakan alat *sieve shaker* dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Pengujian *Grain size*

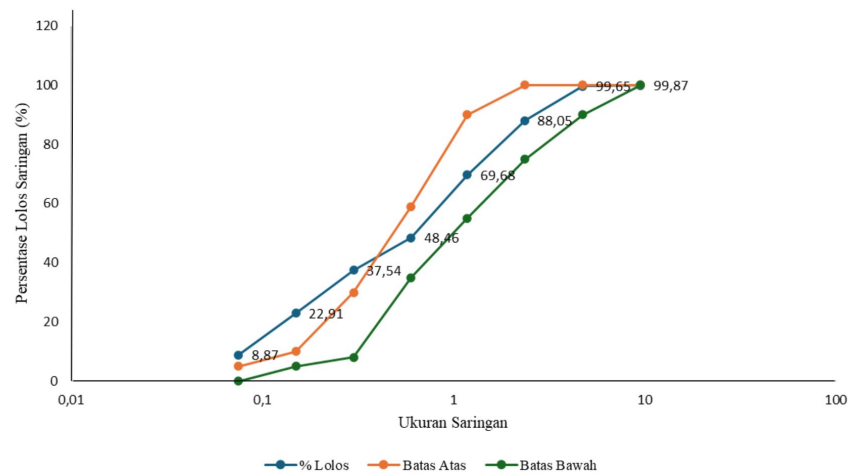
Dari hasil pengujian tersebut diperoleh persentase lolos dan tertahan pada setiap saringan yang kemudian digunakan untuk menentukan zona gradasi pasir. Hasil analisis gradasi ini menjadi salah satu parameter penting dalam perencanaan campuran mortar, karena karakteristik agregat halus memiliki pengaruh langsung terhadap sifat fisik dan mekanik batako, seperti

kuat tekan dan daya serap air. Hasil pengujian *grain size* dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.8.

Tabel 4.4. Hasil Pengujian *Grain Size*

Saringan		Berat Tertahan	Presentase Berat Tertahan	Presentase Tertahan Kumulatif	Presentase Lolos
mm	inci	Gram (a)	% (b) = (a) / W	% (c)	% (d) = 100 - c
19	¾	0	0	0	100
12.7	½	0	0	0	100
9.25	⅜	1.3	0.13	0.13	99.87
4.75	No. 4	2.2	0.22	0.35	99.65
2.36	No. 8	115.4	11.60	11.95	88.05
1.18	No. 16	182.7	18.37	30.32	69.68
0.60	No. 30	211.1	21.22	51.54	48.46
0.30	No. 50	108.6	10.92	62.46	37.54
0.15	No. 100	145.5	14.63	77.09	22.91
0.075	No. 200	139.6	14.04	91.13	8.87
Pan		88.2	8.87	100	0
Total (W)		994.6	99.95		

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)



Gambar 4.8. Grafik Hasil Analisis Saringan

Modulus Kehalusan Butir (FM) merupakan suatu aspek yang digunakan untuk menentukan tingkat kehalusan agregat halus berdasarkan hasil analisis saringan. Nilai FM diperoleh dari akumulasi jumlah persentase agregat yang tertahan pada saringan di atas No. 100 kemudian dibagi 100. Nilai FM digunakan untuk mengetahui karakteristik ukuran butiran agregat yang akan berpengaruh terhadap kualitas campuran mortar atau beton. Perhitungan modulus kehalusan dilakukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{\text{Jumlah sisa saringan di atas No. 100}}{100} \\
 FM &= \frac{0+0+0.13+0.35+11.95+30.31+51.54+52.46+77.09}{100} \\
 FM &= \frac{233.83}{100} \\
 FM &= 2,3383 \approx 2,33
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, diperoleh nilai FM sebesar 2,33. Nilai tersebut masih memenuhi ketentuan PUBI Bab 5 Pasal 2 ayat 2.3 seperti pada Tabel 4.5, yaitu berada pada rentang 1,9-2,5 untuk agregat halus yang diuji menggunakan susunan ayakan standar.

Tabel 4.5. Ketentuan Jenis Modulus *Fineness*/Kehalusan

Jenis Pasir	Modulus Kehalusan	Sisa di atas 0,6
Sangat Kasar	3,6	75% - 80%
Kasar	2,4 – 3,6	50% - 75%
Sedang	1,9 – 2,5	35% - 50%
Halus	1,5 – 2,0	20% - 35%
Sangat Halus	1,1 – 1,6	7% - 20%

Sumber : PUBI Bab 5 Pasal 2 ayat 2.3

Dengan demikian, pasir yang dipakai tergolong dalam kategori pasir sedang dan layak digunakan sebagai bahan campuran mortar atau batako. Pengujian juga dilakukan untuk mengetahui persentase kehilangan berat agregat setelah proses analisis saringan. Berat awal pasir yang digunakan sebesar 1000 gram, sedangkan berat setelah pengujian sebesar 994,6 gram.

Dengan demikian, kehilangan berat yang terjadi adalah sebesar 5,4 gram. Persentase kehilangan berat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Presentase} &= \frac{5.4}{1000} \times 100\% \\ &= 0,54\% < 1\% \text{ (Memenuhi)}\end{aligned}$$

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa persentase kehilangan berat sebesar 0,54% masih berada pada bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI ASTM C136:2012, yaitu tidak melebihi 1% dari massa total benda uji. Oleh karena itu, proses pengujian dapat dinyatakan memenuhi standar dan telah dilakukan dengan baik.

Jika dibandingkan dengan ketentuan PBI 1971 Bab 3 Pasal 3.3 ayat 5, maka hasil analisis saringan menunjukkan bahwa:

- a. Ayakan **No. 4** dengan jumlah sisa 0.35% dari berat tidak memenuhi syarat, karena presentase yang dihasilkan kurang dari 2%.
- b. Ayakan **No. 30** dengan jumlah sisa 51.54 % dari berat memenuhi syarat, karena presentase yang dihasilkan lebih besar dari 10%.
- c. Ayakan **No. 50** dengan jumlah sisa 62.46% dari berat tidak memenuhi syarat, karena presentase yang dihasilkan tidak pada 80% - 95%.

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan, pasir yang digunakan memiliki nilai Modulus Kehalusan Butir (FM) sebesar 2,33 sehingga termasuk dalam kategori pasir sedang. Persentase kehilangan berat sebesar 0,54% menunjukkan bahwa pengujian telah dilaksanakan dengan baik karena masih berada di bawah batas maksimum standar. Selain itu, sebagian besar hasil analisis saringan telah memenuhi persyaratan PBI 1971, meskipun pada ayakan No.4 dan No. 50 nilai yang diperoleh belum memenuhi rentang persyaratan yang ditentukan.

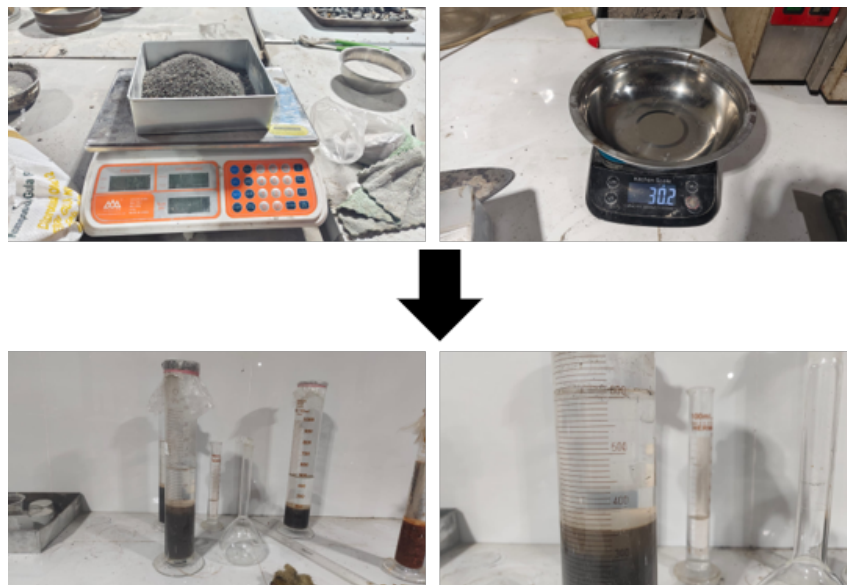
2. Pengujian Kadar Lumpur Pasir

Pengujian kadar lumpur pada pasir dilakukan untuk mengetahui besarnya kandungan material halus, seperti lumpur dan partikel lempung, yang terdapat dalam agregat halus yang akan digunakan sebagai bahan penyusun

campuran batako. Material halus tersebut umumnya berasal dari proses pelapukan batuan, pencampuran dengan tanah, maupun kotoran yang terbawa selama proses penambangan, pengangkutan, dan penyimpanan agregat. Keberadaan lumpur dalam jumlah yang melebihi batas yang diizinkan dapat memberikan dampak negatif terhadap kualitas campuran mortar karena partikel lumpur akan melapisi permukaan butiran pasir. Lapisan tersebut menghambat terbentuknya ikatan yang kuat antara pasta semen dengan agregat halus sehingga mengurangi daya lekat (*bonding*) antar material penyusun. Akibatnya, batako yang dihasilkan berpotensi mengalami penurunan kuat tekan, kuat tarik, maupun ketahanan terhadap beban. Selain itu, kandungan lumpur yang tinggi juga dapat meningkatkan porositas, memperbesar daya serap air, serta menurunkan durabilitas batako terhadap pengaruh lingkungan. Oleh karena itu, pengujian kadar lumpur menjadi salah satu tahapan penting dalam pengendalian mutu material untuk memastikan bahwa pasir yang digunakan memenuhi persyaratan standar dan layak diaplikasikan sebagai bahan campuran pembuatan batako.

Pengujian kadar lumpur dan lempung dilakukan menggunakan metode pencucian dan pengendapan untuk menentukan persentase kandungan material halus yang terdapat dalam agregat halus. Pada metode ini, pasir dicampurkan dengan air sehingga partikel lumpur dan lempung yang memiliki ukuran lebih kecil akan terpisah dari butiran pasir melalui proses pengendapan. Setelah proses pengujian selesai, besarnya kadar lumpur dihitung berdasarkan perbedaan tinggi endapan atau volume material halus yang terbentuk, kemudian dibandingkan dengan ketentuan batas maksimum yang ditetapkan dalam standar yang berlaku. Hasil pengujian tersebut digunakan untuk menilai kelayakan agregat halus sebagai bahan penyusun mortar pada pembuatan batako. Pasir dengan kadar lumpur dan lempung yang rendah menunjukkan kualitas agregat yang lebih baik karena memiliki permukaan butiran yang lebih bersih sehingga mampu membentuk ikatan yang lebih kuat dengan pasta semen. Kondisi tersebut akan menghasilkan campuran mortar yang lebih homogen, padat, dan memiliki sifat mekanis

yang lebih baik, termasuk peningkatan kuat tekan serta penurunan porositas dan daya serap air. Dengan demikian, pengujian kadar lumpur tidak hanya berfungsi sebagai evaluasi mutu agregat halus, tetapi juga sebagai langkah untuk menjamin kualitas batako yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang diharapkan. Proses pengujian kadar lumpur dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Pengujian Kadar Lumpur

Hasil praktikum didapat data sebagai berikut:

Hasil Praktikum Pasir (Sistem Kocokan)

Tinggi pasir dan lumpur = 360 cc

Tinggi pasir = 300 cc

Tinggi lumpur = 60 cc

Perhitungan :

Tinggi lumpur = 60 cc

Tinggi pasir dan lumpur = 360cc

Kandungan lumpur = $60 / 360 \times 100\% = 16,67 \%$

Jadi, kandungan lumpur yang terdapat di dalam pasir adalah 16,67 %. Persentase kandungan lumpur pada praktikum sistem kocokan dan sistem cucian lebih dari 5%. Jenis pasir pada praktikum ini tidak memenuhi syarat sebagai bahan adukan atau beton, namun tetap dapat digunakan tetapi harus melalui proses pencucian terlebih dahulu. Setelah dilakukan pencucian dilakukan pengujian kadar lumpur lagi dengan hasil sebagai berikut:

Hasil Praktikum Pasir (Sistem Kocokan)

Tinggi pasir dan lumpur = 330 cc

Tinggi pasir = 325 cc

Tinggi lumpur = 5 cc

Perhitungan :

Tinggi lumpur = 5 cc

Tinggi pasir dan lumpur = 325 cc

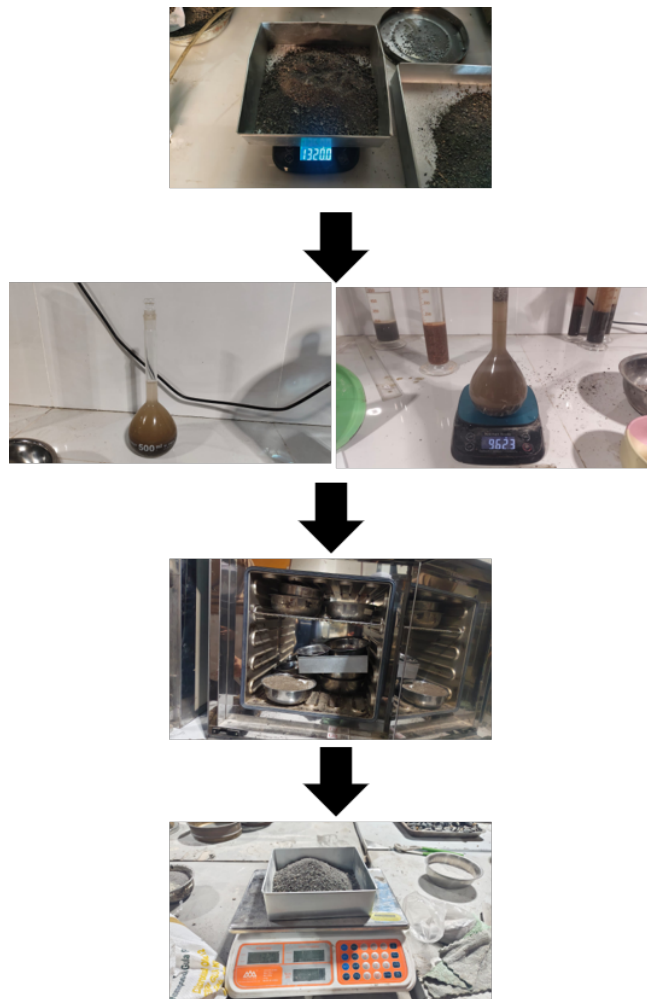
Kandungan lumpur = $5 / 325 \times 100\% = 1,5 \%$

Pada praktikum pengujian kedua, yaitu setelah pasir dilakukan pencucian, diperoleh kandungan lumpur sebesar 1,5%, sehingga kandungan lumpur pada pasir berada di bawah batas maksimum 5%. Dengan demikian, kondisi pasir telah memenuhi persyaratan yang ditetapkan dalam PBI 1971 Pasal 3 dan PUBI 1982 Pasal 11. Rendahnya kandungan lumpur menunjukkan bahwa pasir memiliki tingkat kebersihan yang baik, sehingga tidak mengganggu proses ikatan antara semen dan agregat halus serta berpotensi menghasilkan batako dengan kualitas dan kuat tekan yang lebih optimal.

3. Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Pasir

Pengujian berat jenis serta tingkat penyerapan pasir dilakukan guna mengidentifikasi karakteristik fisik agregat halus yang digunakan dalam campuran batako. Pengujian ini penting karena sifat agregat halus berpengaruh terhadap kualitas mortar, seperti kuat tekan, kepadatan, dan daya serap air batako. Selain itu, nilai berat jenis dan penyerapan pasir menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan air pada campuran sehingga

proporsi bahan penyusun dapat direncanakan secara lebih tepat. Agregat halus dengan berat jenis dan daya serap yang sesuai akan menghasilkan campuran yang lebih homogen serta mendukung proses hidrasi semen secara optimal. Oleh karena itu, hasil pengujian ini digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi kelayakan pasir sebagai bahan penyusun batako serta memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi persyaratan teknis yang berlaku. Proses pengujian berat jenis pasir dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Pengujian Berat Jenis Pasir

Pengujian dilakukan dengan metode standar untuk memperoleh nilai berat jenis dan persentase penyerapan air pasir. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar yang berlaku guna mengetahui kelayakan pasir sebagai bahan campuran mortar. Dari hasil percobaan yang telah dilakukan dalam laboratorium, didapatkan hasil pengujian berat jenis yang dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan Tabel 4.7

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Berat Jenis Pasir

Pengujian	Pasir
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh (SSD)	500
Berat Benda Uji Kering Oven (BK)	493,2
Berat <i>Picnometer</i> diisi Air 25°C (B)	668,7
Berat <i>Picnometer</i> + Benda Uji SSD + Air 25°C (Bt)	962,3

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Tabel 4.7. Perhitungan Berat Jenis Pasir

Perhitungan	Pasir
Berat Jenis (<i>Bulk</i>) $\frac{BK}{(B + 500 - Bt)}$	2,34
Berat Jenis Permukaan Jenuh (SSD) $\frac{500}{(B + 500 - Bt)}$	2.42
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>) $\frac{BK}{(B + BK - Bt)}$	2,47
Penyerapan (<i>Absorbion</i>)	1,37 %

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Pada percobaan pengujian berat jenis agregat halus diketahui berat jenis pasir (*bulk*) sebesar 2,34, pada kondisi permukaan jenuh (*Saturated Surface*

Dry/SSD) sebesar 2,42, dan kondisi semu (*apparent specific gravity*) sebesar 2,47. Berdasarkan spesifikasi karakteristik agregat halus (pasir) menurut SNI 1970:2008, interval berat jenis berada pada kisaran 1,6–3,3, sehingga nilai berat jenis pasir yang diperoleh telah memenuhi standar yang dipersyaratkan. Selain itu, berdasarkan ASTM C128-93, nilai berat jenis agregat halus yang baik berada pada kisaran 2,1–2,6, sehingga hasil pengujian pada kondisi SSD maupun semu juga telah memenuhi spesifikasi tersebut. Nilai berat jenis yang memenuhi standar menunjukkan bahwa pasir yang digunakan memiliki tingkat kepadatan dan kualitas yang baik sebagai agregat halus dalam campuran batako. Kondisi tersebut diharapkan mampu menghasilkan campuran yang lebih homogen, meningkatkan ikatan antara agregat dan pasta semen, serta memberikan kontribusi terhadap kekuatan dan mutu batako yang dihasilkan.

4.1.2. Limbah Kertas HVS

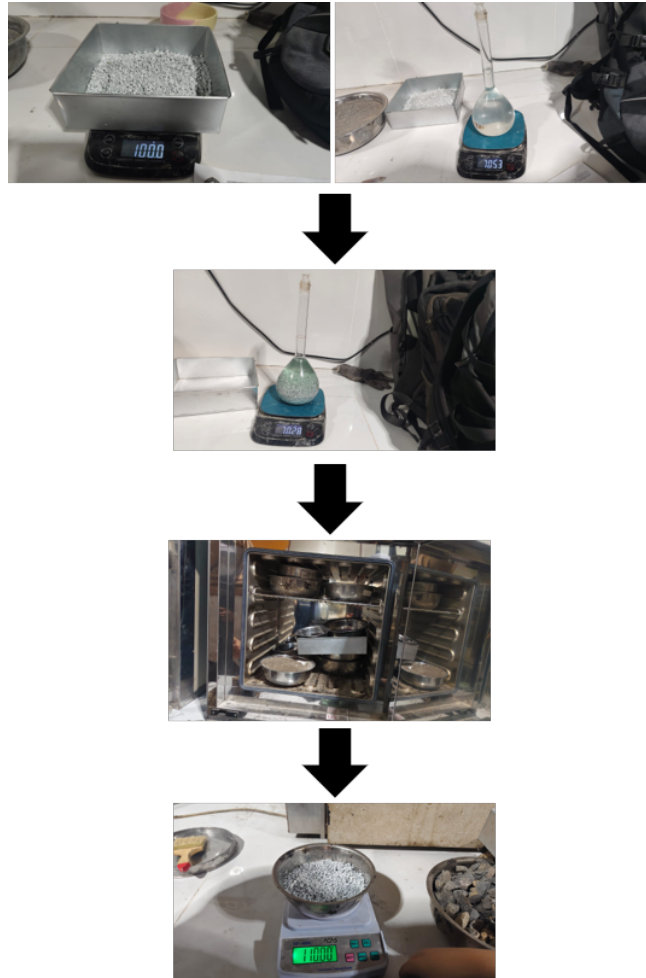
1. Pengujian Berat Jenis

Berat jenis merupakan perbandingan antara massa material terhadap volumenya, sehingga nilai yang diperoleh dapat menggambarkan tingkat kerapatan atau kepadatan suatu material. Pengujian ini menjadi salah satu parameter penting karena berat jenis berpengaruh terhadap perhitungan komposisi campuran (*mix design*) serta distribusi material di dalam adukan batako. Selain itu, nilai berat jenis kertas HVS digunakan sebagai dasar dalam menentukan proporsi penambahan material agar campuran yang dihasilkan tetap sesuai dengan komposisi yang direncanakan.

Perbedaan berat jenis antara kertas HVS, semen, dan agregat halus juga dapat memengaruhi berat volume, homogenitas campuran, serta tingkat porositas batako yang dihasilkan. Oleh karena itu, hasil pengujian berat jenis kertas HVS diperlukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaannya terhadap karakteristik campuran dan mutu batako secara keseluruhan.

Nilai berat jenis yang diperoleh juga dapat digunakan sebagai acuan dalam menganalisis pengaruh penambahan limbah kertas HVS terhadap perubahan berat satuan dan karakteristik batako yang dihasilkan. Mengingat limbah kertas HVS memiliki sifat ringan, berserat, dan berpori, penambahannya dalam campuran diperkirakan dapat menghasilkan batako yang memiliki bobot lebih ringan dibandingkan batako konvensional tanpa menghilangkan fungsi utamanya sebagai bahan pasangan dinding. Selain memengaruhi berat satuan, keberadaan serat pada limbah kertas HVS juga berpotensi memengaruhi struktur pori, kemampuan penyerapan air, serta ikatan antara pasta semen dan material penyusun lainnya. Karakteristik tersebut dapat memberikan pengaruh terhadap sifat fisik maupun mekanik batako, sehingga perlu dianalisis lebih lanjut melalui serangkaian pengujian yang telah direncanakan dalam penelitian ini.

Oleh karena itu, pengujian berat jenis limbah kertas HVS dilakukan sebagai salah satu tahapan awal untuk mengetahui karakteristik dasar material sebelum diaplikasikan ke dalam campuran batako. Pengujian ini penting karena nilai berat jenis merupakan salah satu parameter yang memengaruhi perhitungan proporsi campuran, terutama dalam menentukan volume material yang digunakan pada setiap variasi campuran. Data berat jenis yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam perancangan komposisi campuran serta sebagai bahan analisis untuk mengevaluasi hubungan antara penambahan limbah kertas HVS dengan perubahan berat, daya serap air, dan kuat tekan batako yang dihasilkan. Selain itu, nilai berat jenis juga dapat memberikan gambaran mengenai pengaruh keberadaan limbah kertas HVS terhadap kepadatan dan struktur internal batako. Dengan demikian, hasil pengujian berat jenis tidak hanya memberikan informasi mengenai sifat dasar material, tetapi juga mendukung interpretasi hasil pengujian pada tahap berikutnya sehingga pengaruh penggunaan limbah kertas HVS terhadap kualitas batako dapat dijelaskan secara lebih komprehensif. Proses pengujian berat jenis limbah kertas HVS dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. Pengujian Berat Jenis Kertas HVS

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik limbah kertas HVS yang digunakan sebagai bahan tambah dalam campuran batako. Nilai berat jenis yang diperoleh menjadi salah satu parameter dalam perancangan komposisi campuran karena memengaruhi proporsi material yang digunakan. Hasil pengujian berat jenis kertas HVS yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut.

Tabel 4.8. Hasil Pengujian Berat Jenis Kertas HVS

Pengujian		Kertas HVS
Berat Benda Uji Kering Permukaan Jenuh	(SSD)	53,1
Berat Benda Uji Kering Oven	(BK)	45,37
Berat <i>Picnometer</i> diisi Air 25°C	(B)	704,4
Berat <i>Picnometer</i> + Benda Uji SSD + Air 25°C	(Bt)	702,8
Perhitungan		Kertas HVS
Berat Jenis (<i>Bulk</i>)		0,329
Berat Jenis Permukaan Jenuh (<i>SSD</i>)		0,971
Berat Jenis Semu (<i>Apparent</i>)		0,965
Penyerapan (<i>Absorbion</i>)		17%

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

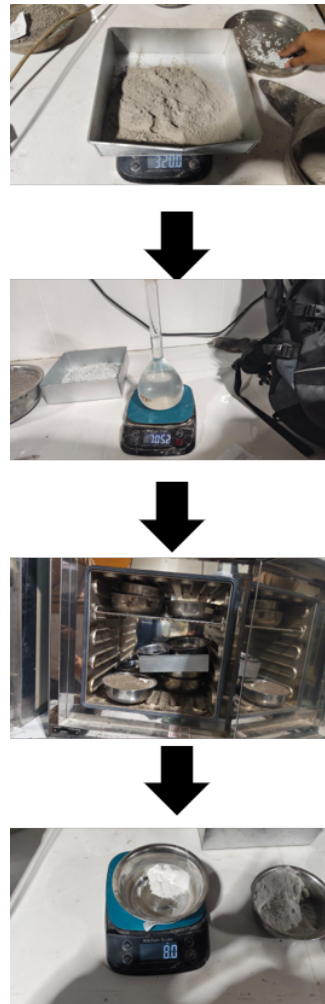
Berdasarkan hasil pengujian yang sudah dilakukan, didapatkan nilai berat jenis kertas HVS sebesar 0,97 dengan nilai penyerapan air sebesar 17%. Nilai berat jenis tersebut menunjukkan bahwa kertas HVS tergolong material ringan karena mempunyai massa jenis yang lebih kecil dibandingkan agregat halus maupun semen. Rendahnya berat jenis dipengaruhi oleh struktur serat selulosa pada kertas yang memiliki banyak rongga dan pori udara sehingga tingkat kerapatannya relatif kecil. Selain itu, nilai penyerapan air sebesar 17% menunjukkan bahwa kertas HVS memiliki kemampuan menyerap air yang cukup tinggi akibat sifat serat selulosa yang higroskopis. Dari penelitian ini sejalan dengan penelitian Hendrawan dkk (2024) yang menyatakan bahwa limbah kertas memiliki berat jenis rendah dan daya serap air tinggi sehingga dapat menghasilkan material konstruksi yang lebih ringan, namun memerlukan pengaturan kadar air untuk menjaga kualitas dan kekuatan material.

4.1.3. Serbuk Kaca

1. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis serbuk kaca dimaksudkan untuk mengkaji karakteristik fisik material yang digunakan sebagai bahan substitusi parsial semen dalam campuran batako. Berat jenis merupakan parameter yang menunjukkan

perbandingan antara massa material terhadap volumenya, sehingga nilai yang diperoleh dapat menggambarkan tingkat kerapatan dan kepadatan serbuk kaca. Pengujian ini penting dilakukan karena karakteristik berat jenis suatu material berpengaruh terhadap perhitungan komposisi campuran (*mix design*), kebutuhan material, serta distribusi partikel di dalam adukan batako. Nilai berat jenis yang diperoleh juga menjadi acuan dalam menentukan proporsi penggunaan serbuk kaca agar sesuai dengan variasi campuran yang telah direncanakan pada penelitian ini. Pengujian ini memiliki peran penting karena perbedaan berat jenis setiap material akan memengaruhi perhitungan kebutuhan bahan dalam campuran, sehingga komposisi yang dirancang dapat sesuai dengan target penelitian. Serbuk kaca memiliki sifat padat, keras, serta mengandung silika (SiO_2) yang tinggi, sehingga berpotensi memberikan pengaruh terhadap kepadatan struktur mikro batako dan meningkatkan kualitas ikatan antarpartikel dalam campuran. Selain itu, perbedaan berat jenis antara serbuk kaca dan semen dapat memengaruhi distribusi partikel, tingkat rongga (void), proses pemadatan adukan, serta karakteristik fisik dan mekanik batako yang dihasilkan. Apabila partikel serbuk kaca dapat terdistribusi secara merata di dalam campuran, rongga-rongga mikro pada batako berpotensi terisi sehingga menghasilkan struktur yang lebih rapat dan padat. Struktur yang lebih padat tersebut diharapkan mampu meningkatkan kualitas matriks semen, memperbaiki daya ikat antarpartikel penyusun batako, serta mengurangi terbentuknya pori-pori yang dapat menjadi jalur masuknya air. Kondisi tersebut diharapkan dapat memberikan pengaruh terhadap peningkatan kuat tekan serta mengurangi daya serap air batako pada kadar substitusi tertentu. Oleh karena itu, hasil pengujian berat jenis serbuk kaca diperlukan sebagai salah satu dasar dalam mengevaluasi pengaruh penggunaan serbuk kaca terhadap karakteristik campuran, proses pembuatan benda uji, serta kualitas batako yang dihasilkan secara keseluruhan. Proses pengujian berat jenis serbuk kaca dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Pengujian Berat Jenis Serbuk Kaca

Pada penelitian ini, limbah kaca terlebih dahulu dihancurkan dan dihaluskan hingga menjadi serbuk agar dapat tercampur secara merata dengan bahan penyusun lainnya. Nilai berat jenis serbuk kaca yang diperoleh digunakan sebagai data pendukung dalam perencanaan campuran (*mix design*) serta untuk menganalisis pengaruh penggunaan serbuk kaca terhadap karakteristik batako. Adapun hasil pengujian berat jenis serbuk kaca yang telah dilakukan disajikan pada Tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9. Hasil Pengujian Berat Jenis Serbuk Kaca

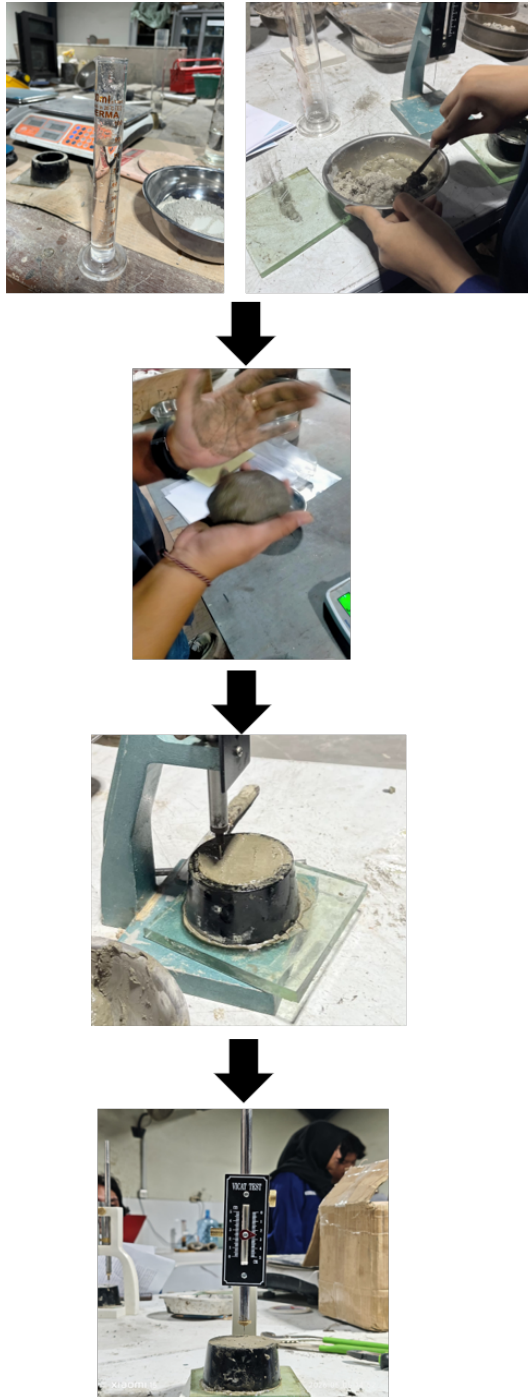
Pengujian		Kertas HVS
Berat benda uji	(W1)	40
Berat <i>Picnometer</i>	(W2)	32,4
Berat Benda Uji + <i>Picnometer</i>	(W3)	72,4
Berat <i>Picnometer</i> + Benda Uji SSD + Air 25°C	(W4)	160,0
Berat <i>Picnometer</i> + Air 25°C	(W5)	138,2
Berat Benda Uji Kering Oven	(W6)	39,2
Perhitungan		Kertas HVS
Berat Jenis	$\frac{W3 - W2}{(W5 - W2) - (W4 - W3)}$	0,329
Penyerapan (<i>Absorbtion</i>)	$\frac{W1 - W6}{W6} \times 100$	0,971

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, diperoleh nilai berat jenis serbuk kaca sebesar 2,19 dengan nilai penyerapan air 2,04%. Nilai berat jenis ini menunjukkan bahwa serbuk kaca memiliki tingkat kerapatan yang cukup tinggi dibandingkan limbah kertas HVS, sehingga material ini tergolong padat. Rendahnya nilai penyerapan air menunjukkan bahwa serbuk kaca memiliki sifat tidak berpori dan tidak mudah menyerap air karena tersusun dari material kaca yang bersifat kedap air.

2. Pengujian Konsistensi Normal

Pengujian konsistensi normal material kaca merupakan salah satu pengujian awal yang dilakukan yang bertujuan untuk memperoleh tingkat kelecakan pasta yang sesuai dengan standar sehingga campuran memiliki kondisi plastis yang baik. Nilai konsistensi normal sangat diperlukan dalam penelitian karena berguna untuk dasar dalam pelaksanaan pengujian waktu ikat awal maupun waktu ikat akhir. Selain itu, jumlah air yang digunakan pada campuran juga berpengaruh terhadap proses hidrasi semen, tingkat *workability* pasta, serta proses pengerasan material yang akan memengaruhi kualitas campuran secara keseluruhan. Proses pengujian konsistensi normal dapat dilihat pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13. Pengujian Konsistensi Semen Variasi

Pada campuran semen dan serbuk kaca, kebutuhan air dapat berbeda dibandingkan pasta semen normal. Hal tersebut disebabkan oleh karakteristik serbuk kaca yang memiliki tekstur permukaan dan ukuran butiran yang berbeda dengan semen. Semakin halus ukuran serbuk kaca yang digunakan, maka luas permukaan material akan semakin besar sehingga dapat memengaruhi kebutuhan air dalam campuran. Oleh karena itu, pengujian konsistensi normal perlu dilakukan untuk memperoleh kadar air yang paling sesuai agar campuran dapat mencapai kondisi plastis standar dan tidak mengalami kondisi terlalu encer ataupun terlalu kaku.

Pengujian konsistensi normal pada penelitian ini dilakukan menggunakan alat Vicat yang dilengkapi dengan batang penembus (*plunger*) berdiameter 10 mm. Sebelum pengujian dilakukan, seluruh alat dan bahan dipersiapkan terlebih dahulu agar kondisi pengujian sesuai dengan prosedur yang berlaku. Bahan yang digunakan dalam pengujian terdiri dari semen, serbuk kaca, dan air. Campuran pasta dibuat dengan beberapa variasi kadar air untuk mengetahui hubungan antara jumlah air dan nilai penetrasi yang dihasilkan. Proses pencampuran dilakukan hingga pasta menjadi homogen agar tidak terjadi penggumpalan material yang dapat memengaruhi hasil pengujian.

Setelah proses pencampuran selesai, pasta dimasukkan ke dalam cetakan vicat dan permukaannya diratakan agar pengujian dapat dilakukan secara merata. Selanjutnya, *plunger* pada alat vicat diturunkan secara perlahan hingga menyentuh permukaan pasta, kemudian dilepaskan untuk mengetahui kedalaman penetrasi yang terjadi. Kedalaman penetrasi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan konsistensi normal campuran. Konsistensi normal dinyatakan tercapai apabila penetrasi *plunger* memenuhi batas standar yang telah ditentukan. Hasil pengujian konsistensi normal material kaca pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.10 berikut.

Tabel 4.10. Hasil Pengujian Konsistensi Normal Semen Substitusi Serbuk Kaca

No	Berat Semen (Gram)	Berat Kaca (Gram)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	7.5	292.5	29	9,5	29	PPC Rajawali
2	15	285	29	10	29	PPC Rajawali
3	30	270	29	10.5	29	PPC Rajawali

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Penentuan nilai konsistensi normal semen didapatkan dari interpolasi. Interpolasi dilakukan untuk mengetahui nilai sisip diantara nilai – nilai yang diketahui. (ASTM C 39/ C 39 M / SNI 03-1974-1990)

$$X = X1 + \frac{(Y - Y1)(X2 - X1)}{(Y2 - Y1)}$$

$$X = 28 + \frac{(10-9.5)(29-28)}{(10-9.5)} = 29\%$$

Keterangan :

X = kadar air yang dicari (% atau cc)

X1 = kadar air pertama

X2 = kadar air kedua

Y = nilai penetrasi standar yang ditentukan

Y1 = hasil penetrasi pada kadar air pertama

Y2 = hasil penetrasi pada kadar air kedua

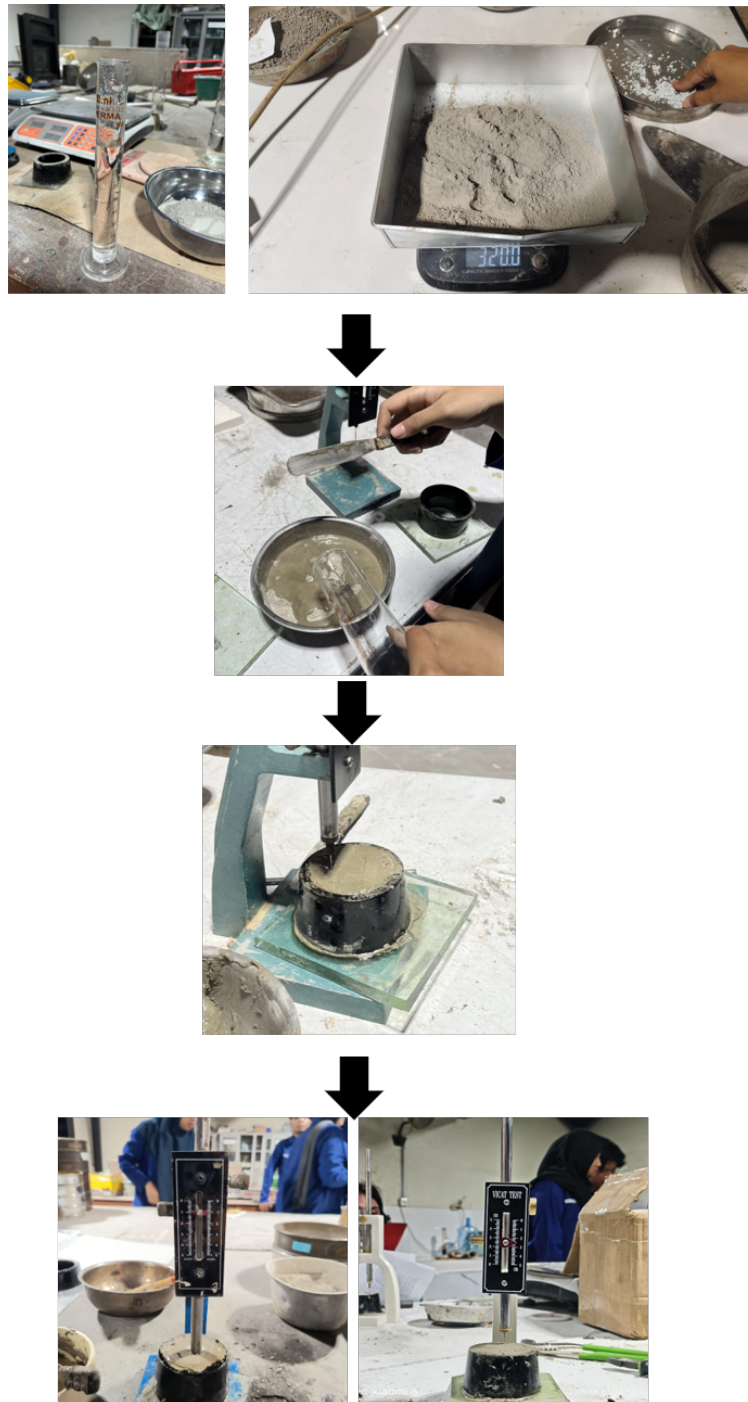
Berdasarkan grafik hasil pengujian yang telah dilakukan, terlihat bahwa pengujian dilakukan untuk menentukan nilai konsistensi normal campuran. Dari hasil tersebut diperoleh nilai penetrasi jarum sebesar 10 mm pada penggunaan air sebanyak 87 cc. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pasta semen yang dihasilkan memiliki tingkat kelecakan yang sesuai, yaitu tidak terlalu encer maupun terlalu kaku, sehingga memenuhi syarat untuk digunakan dalam pengujian lanjutan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai konsistensi normal semen dengan substitusi serbuk kaca diperoleh

sebesar 29% terhadap berat semen. Nilai konsistensi normal ini selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pengujian waktu ikat awal dan waktu ikat akhir semen sesuai dengan ketentuan standar yang berlaku.

3. Pengujian Pengikatan Awal

Uji waktu ikat semen bertujuan untuk menentukan lamanya proses pengerasan pasta semen sejak pertama kali bereaksi dengan air hingga mencapai kondisi pengikatan awal (*initial setting time*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui rentang waktu ketika pasta semen mulai kehilangan sifat plastisnya akibat berlangsungnya proses hidrasi. Selama proses tersebut, senyawa-senyawa dalam semen bereaksi dengan air dan membentuk produk hidrasi yang menyebabkan pasta semen berubah secara bertahap dari kondisi yang mudah dikerjakan menjadi semakin kaku. Nilai waktu ikat awal menjadi salah satu parameter penting dalam mengevaluasi karakteristik semen karena berkaitan dengan waktu yang tersedia untuk proses pencampuran, pengadukan, pencetakan, dan pemadatan sebelum adukan mulai mengeras.

Hasil pengujian waktu ikat awal digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi kelayakan penggunaan serbuk kaca sebagai bahan substitusi semen dalam pembuatan batako. Nilai waktu ikat yang masih berada dalam batas persyaratan menunjukkan bahwa proses pencampuran dan pencetakan benda uji masih dapat dilakukan dengan baik tanpa mengalami gangguan akibat pengerasan yang terlalu cepat maupun terlalu lambat. Selain itu, data hasil pengujian ini juga menjadi bahan analisis dalam menjelaskan hubungan antara penggunaan serbuk kaca dengan karakteristik fisik dan mekanik batako yang dihasilkan, karena proses hidrasi semen memiliki pengaruh langsung terhadap perkembangan kekuatan material. Adapun proses pengujian pengikatan awal semen dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14. Pengujian Pengikatan Awal Semen

Pengujian waktu ikat dilakukan setelah nilai konsistensi normal semen diketahui, dimana konsistensi normal dinyatakan memenuhi syarat apabila jarum penetrasi mencapai 10 ± 1 mm, sedangkan waktu ikat awal ditentukan pada saat penetrasi jarum mencapai 25 ± 1 mm. Adapun hasil pengujian waktu ikat awal semen dengan substitusi serbuk kaca dapat dilihat pada Tabel 4.11 dan Gambar 4.15.

Tabel 4.11. Hasil Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Substitusi Serbuk Kaca

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)			Suhu (°C)	Keterangan
		Variasi 2,5%	Variasi 5%	Variasi 10%		
1	15	40	45	41	29	PPC Rajawali
2	30	39	44	41	29	PPC Rajawali
3	45	28,5	40	40	29	PPC Rajawali
4.	60	23	33	40	29	PPC Rajawali
5.	75	13	30	39	29	PPC Rajawali
6.	90		21	36	29	PPC Rajawali
7.	105		15	30	29	PPC Rajawali
8.	120			25	29	PPC Rajawali

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Penentuan nilai pengikatan awal semen dapat dilakukan dengan menggunakan cara interpolasi. Interpolasi sendiri dapat diartikan sebagai cara untuk mengetahui nilai sisip diantara nilai – nilai yang diketahui. (ASTM C 39/ C 39 M / SNI 03-1974-1990)

$$Y = Y1 + \frac{(X1 - X)}{(X1 - X2)} \times (Y2 - Y1)$$

Keterangan :

Y = waktu yang dicari untuk mencapai penetrasi standar (menit)

Y1 = waktu pada data pertama (menit)

Y2 = waktu pada data kedua (menit)

X = nilai penetrasi standar yang ditentukan (mm)

$X1$ = nilai penetrasi jarum pada data pertama (mm)

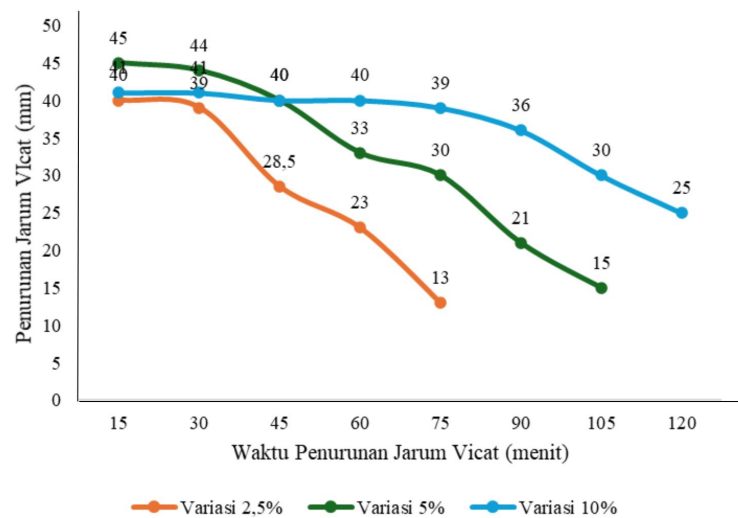
$X2$ = nilai penetrasi jarum pada data kedua (mm)

1. Interpolasi dari hasil pengujian pengikatan awal semen pada variasi substitusi semen sebesar 2,5%

$$Y = 45 + \frac{(28,5-25)}{(28,5-23)} \times (60 - 45) = 54,5 \text{ menit}$$

2. Interpolasi dari hasil pengujian pengikatan awal semen pada variasi substitusi semen sebesar 5%

$$Y = 75 + \frac{(30-25)}{(30-21)} \times (90 - 75) = 83,3 \text{ menit}$$



Gambar 4.15. Grafik Pengikatan Awal Serbuk Kaca Substitusi Semen

Berdasarkan grafik hasil pengujian pengikatan awal semen dengan substitusi serbuk kaca, diperoleh waktu ikat awal sebesar 54,5 menit pada variasi substitusi 2,5% ada pada 83,3 menit pada variasi substitusi 5%, dan 120 menit pada variasi substitusi 10%.

Pada variasi 2,5% penurunan jarum mencapai 28,5 mm pada menit ke-45 dan 23 mm pada menit ke-60 sehingga diperoleh waktu interpolasi sebesar 54,5 menit. Pada variasi 5%, penurunan jarum mencapai 30 mm pada menit ke-75 dan 21 mm pada menit ke-90 sehingga diperoleh waktu interpolasi sebesar 83,3 menit. Sementara itu, pada variasi 10%, penurunan jarum mencapai 25 mm tepat pada menit ke-120 sehingga waktu pengikatan awal diperoleh sebesar 120 menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar persentase substitusi serbuk kaca yang digunakan, maka waktu pengikatan awal semen cenderung semakin lama. Meskipun demikian, hasil pengujian tersebut masih memenuhi ketentuan Badan Standardisasi Nasional pada SNI 2049:2015 tentang semen *Portland*, dimana waktu ikat awal semen tidak boleh kurang dari 45 menit dan berdasarkan PUI Pasal 1 ayat 2.2 maksimal waktu pengikatan awal semen ada di 8 jam sebelum mengalami pengerasan. Maka, penggunaan substitusi serbuk kaca hingga variasi 10% masih layak digunakan karena tidak melanggar batas waktu pengikatan awal yang dipersyaratkan.

4.1.4. Bata Beton (Batako)

1. Perencanaan Campuran (*Mix Design*) Benda Uji

Studi ini menerapkan empat variasi campuran dengan perbandingan semen terhadap agregat halus sebesar 1:4. Proporsi material didasarkan pada berat pada spesimen kubus berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm dan cetakan batako $30 \times 10 \times 15$ cm. Limbah kertas HVS ditambahkan sebagai bahan tambah dari total berat campuran serbuk kaca digunakan sebagai pengganti sebagian semen dengan faktor air semen (FAS) 0,5 terhadap berat semen. Dapat dilihat pada Tabel 4.12 dan Tabel 4.13 kebutuhan material untuk benda uji batako dan kubus.

Tabel 4.12. *Jobmix* Desain Variasi Campuran Batako

Variasi	Serbuk Kaca	HVS	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kertas HVS (kg)	Serbuk Kaca (kg)	FAS	Air (liter)
A	0%	0%	9,900	39,600	0	0	0,5	6,783
B	2,5%	2,5%	9,653	39,600	1,361	0,248	0,5	6,891
C	5%	5%	9,405	39,600	2,723	0,495	0,5	6,999
D	10%	7,5%	8,910	39,600	4,084	0,990	0,5	6,983
TOTAL			37,868	158,400	8,168	1,733		27,656

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Tabel 4.13. *Jobmix* Desain Variasi Campuran Kubus

Variasi	Serbuk Kaca	HVS	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kertas HVS (kg)	Serbuk Kaca (kg)	FAS	Air (liter)
A	0%	0%	0,330	1,320	0	0	0,5	0,226
B	2,5%	2,5%	0,322	1,320	0,045	0,008	0,5	0,230
C	5%	5%	0,314	1,320	0,091	0,017	0,5	0,233
D	10%	7,5%	0,297	1,320	0,136	0,033	0,5	0,233
TOTAL			1,262	5,280	0,272	0,058		0,922

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

2. Pemeriksaan Benda Uji

Pemeriksaan kondisi fisik benda uji kubus dan batako dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh benda uji memenuhi persyaratan sebagai sampel penelitian dan berada dalam kondisi yang layak untuk dilakukan pengujian. Pengamatan meliputi bentuk dan dimensi batako, kerataan permukaan, keberadaan retak, rongga, keropos, maupun cacat visual lainnya yang berpotensi memengaruhi nilai kuat tekan dan daya serap air. Selain itu, dilakukan penimbangan berat benda uji kubus dan batako untuk mengetahui keseragaman massa serta mengamati pengaruh penambahan limbah kertas HVS dan serbuk kaca terhadap berat benda uji.

Pemeriksaan kondisi fisik dilakukan setelah batako mencapai umur pengujian dan selesai menjalani proses perawatan (*curing*). Pada tahap ini,

batako diharapkan telah memiliki bentuk yang stabil, permukaan yang padat, serta tidak mengalami kerusakan yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Pemeriksaan juga mengacu pada persyaratan mutu batako berdasarkan SNI 03-0349-1989, yang menekankan pentingnya kondisi fisik benda uji yang baik agar hasil pengujian kuat tekan dan daya serap air dapat merepresentasikan mutu batako secara akurat. Hasil pemeriksaan kondisi fisik selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk memastikan bahwa seluruh benda uji memenuhi persyaratan pengujian sebelum dilakukan pengujian kuat tekan dan daya serap air.

Benda uji batako pada penelitian ini dibuat dengan dimensi 30 cm × 15 cm × 10 cm menggunakan cetakan batako yang umum digunakan dalam praktik produksi di lapangan. Pemilihan dimensi tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa ukuran serupa telah banyak diterapkan pada penelitian-penelitian terdahulu, sehingga hasil penelitian diharapkan lebih representatif terhadap kondisi produksi aktual serta memudahkan proses perbandingan dengan penelitian sejenis. Hendrawan dkk (2024), misalnya, menggunakan benda uji batako berukuran 30 cm × 15 cm × 10 cm untuk pengujian kuat tekan dan daya serap air, sedangkan Syaifuddin (2021) juga menggunakan dimensi yang sama dalam pengujian kuat tekan batako. Oleh karena itu, penggunaan dimensi 30 cm × 15 cm × 10 cm pada penelitian ini didasarkan pada praktik yang telah diterapkan dalam penelitian sebelumnya. Seluruh benda uji dicetak menggunakan cetakan yang sama sehingga memiliki dimensi yang seragam, keseragaman dimensi tersebut penting untuk meminimalkan pengaruh faktor geometris terhadap hasil pengujian, sehingga perbedaan nilai kuat tekan, daya serap air, maupun berat batako lebih mencerminkan pengaruh variasi komposisi campuran daripada perbedaan ukuran benda uji. Berikut hasil pemeriksaan dari berat benda uji kubus dan batako yang akan diuji dapat dilihat pada Tabel 4.14 dan Tabel 4.15.

Tabel 4.14. Berat Benda Uji Batako

No	Variasi	Komposisi	Kode	Berat Batako (kg)
1.	A	Serbuk Kaca : Kertas HVS (0% : 0%)	BTK-A1	8,620
			BTK-A2	8,740
			BTK-A3	8,690
			BTK-A4	8,790
			BTK-A5	8,635
2.	B	Serbuk Kaca : Kertas HVS (2,5% : 5%)	BTK-B1	7,590
			BTK-B2	7,795
			BTK-B3	7,665
			BTK-B4	7,575
			BTK-B5	7,855
3.	C	Serbuk Kaca : Kertas HVS (5% : 5%)	BTK-C1	7,040
			BTK-C2	7,070
			BTK-C3	7,045
			BTK-C4	7,135
			BTK-C5	7,160
4.	D	Serbuk Kaca : Kertas HVS (10% : 7,5%)	BTK-D1	6,530
			BTK-D2	6,650
			BTK-D3	6,740
			BTK-D4	6,720
			BTK-D5	6,715

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Tabel 4.15. Berat Benda Uji Kubus

No	Variasi	Komposisi	Kode	Berat Kubus (kg)
1.	A	Serbuk Kaca : Kertas HVS (0% : 0%)	KBS-A1	277,2
			KBS-A2	270,0
			KBS-A3	269,3
			KBS-A4	273,7
			KBS-A5	265,2
			KBS-A6	270,7
2.	B	Serbuk Kaca : Kertas HVS (2,5% : 5%)	KBS-B1	240,8
			KBS-B2	242,3
			KBS-B3	243,1
			KBS-B4	240,7
			KBS-B5	248,0
			KBS-B6	243,5
3.	C	Serbuk Kaca : Kertas HVS (5% : 5%)	KBS-C1	212,9
			KBS-C2	212,9
			KBS-C3	214,5
			KBS-C4	216,2
			KBS-C5	216,2
			KBS-C6	213,9
4.	D	Serbuk Kaca : Kertas HVS (10% : 7,5%)	KBS-D1	190,7
			KBS-D2	193,4
			KBS-D3	193,4
			KBS-D4	189,0

KBS-D5	198,5
KBS-D6	187,3

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)

Selain benda uji batako, penelitian ini juga menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 5 cm × 5 cm × 5 cm sebagai benda uji mortar. Penggunaan ukuran tersebut mengacu pada metode pengujian kuat tekan mortar yang umum diterapkan dalam penelitian material berbasis semen. Seluruh benda uji kubus dicetak menggunakan cetakan yang sama sehingga memiliki dimensi yang seragam dan memenuhi persyaratan untuk pelaksanaan pengujian kuat tekan, sehingga hasil pengujian dapat menggambarkan karakteristik mortar dari setiap variasi campuran secara akurat.

3. Perawatan Benda Uji

Setelah proses pencetakan selesai, benda uji kubus dilakukan perawatan (*curing*) menggunakan metode *dry curing* dengan memanfaatkan lapisan plastik sebagai media pelindung. Benda uji dibungkus menggunakan plastik untuk menjaga kelembapan campuran agar proses hidrasi tetap berlangsung dengan baik serta mengurangi penguapan air secara langsung dari permukaan benda uji. Metode ini dipilih karena dinilai lebih praktis dalam proses perawatan dan mampu menjaga kondisi benda uji tetap stabil selama masa *curing* berlangsung. Selain itu, penggunaan plastik juga membantu melindungi benda uji dari pengaruh lingkungan luar yang dapat memengaruhi kualitas pengerasan material. Dengan terjaganya kelembapan selama proses perawatan, reaksi hidrasi semen dapat berlangsung secara lebih optimal sehingga pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) menjadi lebih sempurna. Kondisi tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kepadatan mikrostruktur mortar dan mengurangi potensi terjadinya retak akibat kehilangan air pada usia awal. Oleh karena itu, metode *dry curing* menggunakan plastik diharapkan mampu menghasilkan

benda uji dengan kualitas yang lebih seragam sehingga hasil pengujian kuat tekan dapat merepresentasikan karakteristik campuran secara lebih akurat. Perawatan benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. Perawatan *Dry Curing*

Selama proses perawatan berlangsung, kondisi benda uji tetap terjaga dengan baik dan tidak ditemukan kerusakan maupun perubahan bentuk yang signifikan pada permukaan kubus. Proses curing dilakukan secara rutin dengan memastikan plastik penutup tetap dalam kondisi rapat sehingga kelembapan di dalamnya tetap terjaga. Berdasarkan hasil pengamatan selama masa perawatan, metode *dry curing* yang digunakan dapat mendukung proses pengerasan benda uji secara optimal dan tidak menimbulkan kendala selama penelitian berlangsung.

4. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan guna mengetahui kesanggupan benda uji kubus dalam menahan beban tekan hingga mencapai kondisi hancur. Pengujian ini merupakan termasuk aspek utama dalam menentukan mutu batako yang dihasilkan pada penelitian. Benda uji yang digunakan pada pengujian ini merupakan kubus mortar yang telah melalui proses curing selama 28 hari. Umur 28 hari dipilih karena pada umur tersebut reaksi

hidrasi semen telah berjalan lebih sempurna sehingga kuat tekan yang dihasilkan dapat menggambarkan kekuatan akhir dari campuran yang diteliti.

Sebelum pengujian dilakukan, seluruh benda uji terlebih dahulu diperiksa untuk memastikan kondisi permukaannya dalam keadaan baik serta tidak terdapat kerusakan yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Selanjutnya, benda uji diletakkan pada mesin uji tekan (*Compression Testing Machine*) secara tepat di bagian tengah agar distribusi beban dapat berlangsung secara merata. Pembebanan tekan kemudian diberikan secara bertahap hingga benda uji mengalami retak dan akhirnya hancur. Nilai beban maksimum yang diperoleh selama pengujian tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai kuat tekan masing-masing benda uji.

Pada penelitian ini, target mutu batako yang direncanakan adalah mutu tingkat III dengan kuat tekan minimum sebesar 4 MPa. Target tersebut mengacu pada persyaratan mutu batako yang umum digunakan untuk konstruksi non-struktural. Hasil pengujian kuat tekan umur 28 hari menunjukkan bahwa campuran yang menggunakan material serbuk kaca mampu mencapai nilai kuat tekan yang mendekati maupun memenuhi kuat tekan rencana. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan serbuk kaca pada campuran masih dapat memberikan kontribusi terhadap kekuatan mortar, terutama apabila proses pencampuran dan perawatan dilakukan dengan baik.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, nilai kuat tekan yang diperoleh menunjukkan adanya pengaruh dari variasi campuran terhadap kekuatan benda uji. Semakin baik ikatan antar material penyusun, maka kuat tekan yang dihasilkan juga semakin meningkat. Selain dipengaruhi oleh komposisi campuran, hasil kuat tekan juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti jumlah air pencampur, proses pengadukan, kepadatan saat pencetakan, serta metode *curing* yang dilakukan selama masa perawatan. Dengan tercapainya kuat tekan minimum sebesar 4 MPa pada umur 28 hari, maka campuran yang digunakan pada penelitian ini dapat dikategorikan memenuhi persyaratan mutu batako tingkat III.

5. Pengujian Daya Serap Air

Pengujian absorpsi air dilakukan untuk mengidentifikasi kemampuan batako dalam menyerap air melalui pori-pori material. Nilai absorpsi air merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan mutu batako, karena berhubungan dengan tingkat kerapatan material dan porositas material. Batako dengan nilai penyerapan air yang terlalu tinggi umumnya memiliki banyak rongga sehingga dapat memengaruhi kekuatan dan ketahanan material. Oleh karena itu, pengujian ini dilakukan untuk mengetahui mutu batako yang dihasilkan memenuhi persyaratan mutu yang sesuai dengan target penelitian yang direncanakan atau tidak.

Pada penelitian ini, pengujian daya serap air dilakukan pada benda uji batako umur 14 hari menggunakan metode pengeringan oven dan perendaman air. Sebelum dilakukan pengujian, benda uji terlebih dahulu ditempatkan ke dalam oven selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air yang masih terkandung di dalam batako hingga mencapai kondisi kering. Setelah proses pengeringan selesai, benda uji didiamkan pada suhu ruang, kemudian dilakukan penimbangan untuk memperoleh berat kering batako. Tahapan pengovenan dilakukan agar nilai berat awal yang diperoleh benar-benar menunjukkan kondisi kering sehingga hasil pengujian daya serap air menjadi lebih akurat.

Setelah berat kering diperoleh, benda uji direndam ke dalam air selama periode yang telah ditetapkan sehingga air dapat terdistribusi dan terserap ke dalam pori-pori batako dengan maksimal. Setelah proses perendaman selesai, batako diangkat dan permukaannya dibersihkan dari sisa air yang menempel menggunakan kain lembab sebelum dilakukan penimbangan kembali untuk memperoleh berat basah benda uji. Selisih antara berat basah dan berat kering kemudian digunakan sebagai dasar dalam menghitung persentase daya serap air batako. Pada penelitian ini, target nilai daya serap air rata-rata yang direncanakan berada pada rentang maksimum 25–35%.

Berdasarkan hasil pengujian yang sudah dikerjakan, didapatkan nilai daya serap air yang masih berada dalam batas target yang direncanakan. Hal tersebut membuktikan bahwa batako yang dihasilkan memiliki tingkat porositas yang masih dapat diterima dan cukup baik dalam menahan penyerapan air. Nilai daya serap air yang tidak terlalu tinggi menunjukkan bahwa struktur batako cukup padat sehingga kualitas material yang dihasilkan menjadi lebih baik. Selain itu, penggunaan serbuk kaca pada campuran juga memberikan pengaruh terhadap tingkat kerapatan batako, sehingga penyerapan air dapat dikendalikan dan tetap memenuhi persyaratan mutu yang telah ditentukan.

6. Analisis Biaya Produksi

Analisis biaya produksi dilakukan untuk mengetahui besarnya kebutuhan biaya pada setiap variasi campuran batako yang digunakan dalam penelitian. Perhitungan biaya produksi meliputi seluruh material penyusun batako, seperti semen, pasir, serbuk kaca, kertas HVS, dan air. Analisa ini dilakukan untuk membandingkan biaya produksi antara batako normal dan batako dengan penambahan material limbah, sehingga dapat diketahui variasi campuran yang paling ekonomis tanpa mengurangi mutu batako yang dihasilkan. Selain itu, Analisis biaya juga digunakan untuk melihat potensi pemanfaatan kertas HVS dan limbah serbuk kaca sebagai alternatif bahan tambahan yang lebih efisien dari segi ekonomi.

Pada penelitian ini digunakan empat variasi campuran, yaitu variasi normal tanpa penambahan material limbah sebesar 0% serbuk kaca dan 0% HVS, variasi kedua menggunakan 2,5% serbuk kaca dan 2,5% HVS, variasi ketiga menggunakan 5% serbuk kaca dan 5% HVS, serta variasi keempat menggunakan 10% serbuk kaca dan 7,5% HVS. Setiap variasi memiliki kebutuhan material yang berbeda sehingga memengaruhi total biaya produksi pada masing-masing campuran. Semakin besar persentase bahan tambahan yang digunakan, maka komposisi material utama seperti semen

juga mengalami perubahan. Perubahan komposisi tersebut secara langsung akan memengaruhi biaya produksi tiap benda uji batako.

Analisis biaya produksi dilakukan dengan menghitung harga masing-masing material berdasarkan kebutuhan campuran pada setiap variasi. Material semen menjadi komponen dengan biaya terbesar karena berfungsi sebagai bahan pengikat utama dalam campuran batako. Sementara itu, pasir digunakan sebagai agregat halus yang jumlah penggunaannya relatif tetap pada setiap variasi. Penggunaan kertas HVS dan serbuk kaca pada penelitian ini cenderung memberikan pengaruh terhadap pengurangan kebutuhan semen, sehingga biaya produksi dapat ditekan apabila material limbah diperoleh dengan harga yang lebih rendah atau berasal dari limbah yang sudah tidak terpakai. Selain itu, penggunaan limbah juga memberikan nilai tambah dari sisi pengelolaan lingkungan karena dapat mengurangi jumlah limbah yang terbuang.

Berdasarkan hasil Analisis biaya, variasi normal tanpa penambahan material limbah memiliki biaya produksi yang relatif lebih tinggi dibandingkan variasi dengan substitusi sebagian material menggunakan serbuk kaca. Hal tersebut disebabkan karena kebutuhan semen pada variasi normal lebih besar dibandingkan variasi lainnya. Pada variasi dengan penambahan serbuk kaca, sebagian penggunaan semen dapat dikurangi sehingga biaya material utama menjadi lebih rendah. Namun demikian, peningkatan persentase material tambahan juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi kualitas batako yang dihasilkan, terutama pada nilai kuat tekan dan daya serap air. Tetapi untuk penambahan kertas HVS sebagai bahan tambah, harga material cenderung meningkat, dikarenakan kertas sebagai bahan tambah jadi tidak menggantikan material-material lain yang sudah pasti menjadi penyusun batako konvensional.

Hasil analisis secara umum mengindikasikan bahwa penambahan kertas HVS dan serbuk kaca sebagai bahan tambahan atau substitusi parsial pada campuran batako dapat memberikan keuntungan dari segi biaya produksi. Variasi campuran dengan persentase tertentu mampu menghasilkan biaya

yang lebih ekonomis dengan tetap memenuhi target mutu batako yang direncanakan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah kertas HVS dan serbuk kaca tidak hanya berpotensi meningkatkan nilai guna limbah, tetapi juga dapat menjadi alternatif material yang lebih efisien dan ramah lingkungan dalam pembuatan batako.

4.2 Pembahasan

4.2.1 Uji Kuat Tekan

Uji kuat tekan merupakan salah satu pengujian utama yang dilakukan untuk mengetahui kemampuan batako dalam menahan beban tekan hingga mencapai kondisi runtuh. Nilai kuat tekan yang diperoleh menjadi indikator mutu dan kualitas batako, karena menunjukkan kemampuan material dalam menahan gaya tekan sebelum mengalami kerusakan. Oleh karena itu, pengujian kuat tekan digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi kelayakan batako berdasarkan persyaratan SNI 03-0349-1989 tentang Bata Beton untuk Pasangan Dinding, sehingga hasil pengujian dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi mutu batako yang dihasilkan. Pada penelitian ini, pengujian kuat tekan dilakukan terhadap batako yang menggunakan limbah kertas HVS sebagai bahan tambah dan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen. Penggunaan kedua material tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekuatan batako sekaligus memanfaatkan limbah sebagai bahan konstruksi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Selanjutnya, hasil pengujian pada setiap variasi campuran dibandingkan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah kertas HVS dan serbuk kaca terhadap nilai kuat tekan serta menentukan komposisi campuran yang paling optimum berdasarkan keseimbangan antara kinerja mekanis dan pemanfaatan material limbah (Hendrawan dkk., 2024).

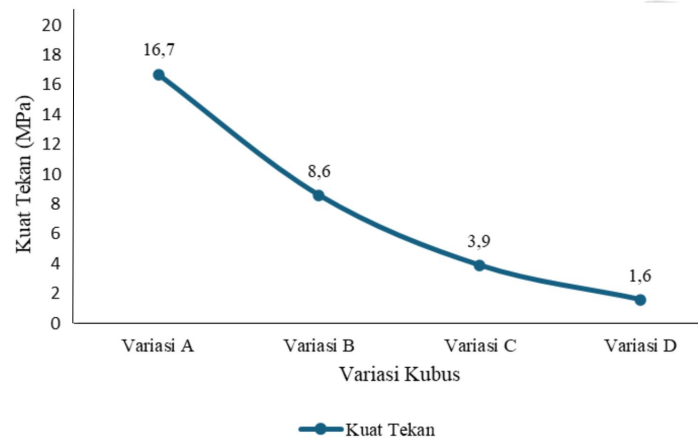
Sebelum dilakukan pengujian, seluruh benda uji batako terlebih dahulu melalui proses *curing* hingga mencapai umur rencana pengujian 28 hari. Proses perawatan diperlukan untuk memastikan berlangsungnya reaksi hidrasi semen

secara optimal sehingga dapat menghasilkan kekuatan yang direncanakan. Setelah itu, permukaan batako diperiksa untuk memastikan tidak terdapat kerusakan yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin *Compression Testing Machine* dengan memberikan perlakuan memberikan pembebanan secara berangsur-angsur hingga benda uji mencapai kondisi retak atau hancur. Nilai beban maksimum yang diperoleh selama pengujian kemudian digunakan untuk menghitung kuat tekan masing-masing variasi campuran batako sesuai metode pengujian yang telah dilakukan pada penelitian Ladi, dkk (2018) dengan target mutu batako disesuaikan berdasarkan SNI 03-0349-1989. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 4.16 dan Gambar 4.17.

Tabel 4.16. Hasil Pengujian Kuat Tekan

No	Variasi	Komposisi	Kode	Nilai Kuat Tekan (KN)	Nilai Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
1.	A	Serbuk Kaca : Kertas HVS (0% : 0%)	KB-A1	35	14	16,7
			KB -A2	42	16,8	
			KB -A3	34	13,6	
			KB -A4	46	18,4	
			KB -A5	47	18,8	
			KB -A6	47	18,8	
2.	B	Serbuk Kaca : Kertas HVS (2,5% : 5%)	KB-B1	24	9,6	8,6
			KB -B2	22	8,8	
			KB -B3	21	8,4	
			KB -B4	22	8,8	
			KB -B5	20	8	
			KB -B6	20	8	
3.	C	Serbuk Kaca : Kertas HVS (5% : 5%)	KB-C1	7	2,8	3,9
			KB -C2	10	4	
			KB -C3	9	3,6	
			KB -C4	12	4,8	
			KB -C5	12	4,8	
			KB -C6	9	3,6	
4.	D	Serbuk Kaca : Kertas HVS (10% : 7,5%)	KB-D1	4	1,6	1,6
			KB -D2	4	1,6	
			KB -D3	5	2	
			KB -D4	4	1,6	
			KB -D5	4	1,6	
			KB -D6	4	1,6	

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)



Gambar 4.17. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan

Perolehan data berdasarkan proses pengujian didapatkan sebagai berikut:

- Variasi A (normal tanpa adanya bahan tambah) diperoleh nilai rata-rata kuat tekan sebesar 16,7 MPa.
- Variasi B (2,5% substitusi serbuk kaca dan 2,5% tambahan kertas HVS) diperoleh nilai rata-rata kuat tekan sebesar 8,6 MPa.
- Variasi C (5% substitusi serbuk kaca dan 5% tambahan kertas HVS) diperoleh nilai rata-rata kuat tekan sebesar 3,9 MPa.
- Variasi D (10% substitusi serbuk kaca dan 7.5% tambahan kertas HVS) diperoleh nilai rata-rata kuat tekan sebesar 1,6 MPa.

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh nilai kekuatan kuat tekan rata-rata batako pada variasi A sebesar 16,7 MPa, variasi B sebesar 8,6 MPa, variasi C sebesar 3,9 MPa, dan variasi D sebesar 1,6 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase substitusi serbuk kaca dan pemberian material limbah kertas sebagai bahan tambahan HVS, maka kuat tekan batako cenderung menurun. Variasi A menghasilkan kuat tekan tertinggi karena seluruh semen

berfungsi sebagai bahan pengikat utama sehingga proses hidrasi berlangsung optimal dan menghasilkan struktur batako yang lebih padat. Pada variasi B, C, dan D terjadi penurunan kuat tekan akibat berkurangnya jumlah semen aktif yang digantikan oleh serbuk kaca serta meningkatnya kandungan serat kertas yang dapat menambah porositas dan mengurangi kepadatan batako. Kondisi ini menyebabkan ikatan antar material menjadi kurang efektif sehingga kemampuan menahan beban tekan menurun.

Mengacu pada standar SNI 03-0349-1989 tentang Bata Beton untuk Pasangan Dinding, persyaratan minimum kuat tekan yang harus dipenuhi yaitu yang dipersyaratkan untuk Mutu III adalah 3,5 MPa. Berdasarkan ketentuan tersebut, variasi A (16,7 MPa), variasi B (8,6 MPa), dan variasi C (3,9 MPa) memenuhi persyaratan Mutu III, sedangkan variasi D (1,6 MPa) tidak memenuhi standar yang ditetapkan.

4.2.2 Uji Daya Serap Air

Pengujian kemampuan penyerapan air dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai kemampuan batako dalam menyerap air melalui pori-pori yang terdapat pada material. Nilai absorpsi air termasuk salah satu indikator utama dalam menentukan kualitas batako karena berhubungan langsung dengan tingkat kepadatan dan porositas campuran. Semakin kecil nilai daya serap air, maka semakin padat struktur batako dan semakin sedikit pori-pori yang terbentuk di dalam material, sehingga kualitas batako menjadi lebih baik (Sutoni dkk, 2018; Rumbayan & Sudarno, 2020). Pada penelitian ini, pengujian dilakukan terhadap batako dengan campuran kertas HVS dan serbuk kaca untuk mengetahui pengaruh kedua material tersebut terhadap kemampuan penyerapan air. Penggunaan material tambahan dari limbah diharapkan dapat menghasilkan batako yang tidak hanya memberikan manfaat terhadap lingkungan, namun juga memiliki kualitas yang baik sesuai standar yang direncanakan. Proses pengujian daya serap air dapat dilihat pada Gambar 4.18



Gambar 4.18. Pengujian Daya Serap Air

Sebelum dilakukan pengujian, benda uji batako terlebih dahulu dikeringkan menggunakan oven hingga mencapai kondisi kering agar kadar air yang masih terkandung di dalam material dapat diminimalkan. Proses pengeringan ini bertujuan untuk memperoleh kondisi awal yang seragam pada setiap benda uji sehingga hasil pengujian daya serap air menjadi lebih akurat dan dapat dibandingkan secara objektif. Setelah proses pengeringan selesai, benda uji didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian ditimbang untuk memperoleh berat kering awal. Tahap pendinginan dilakukan agar suhu benda uji stabil dan tidak memengaruhi hasil penimbangan akibat pemuaian atau penguapan yang

masih berlangsung. Berat kering awal yang diperoleh selanjutnya dijadikan sebagai acuan dalam menghitung persentase daya serap air setelah benda uji direndam selama waktu yang telah ditentukan. Dengan demikian, nilai daya serap air yang dihasilkan dapat mencerminkan kemampuan batako dalam menyerap air sekaligus menggambarkan tingkat porositas dan kepadatan material sebagai salah satu indikator mutu batako.

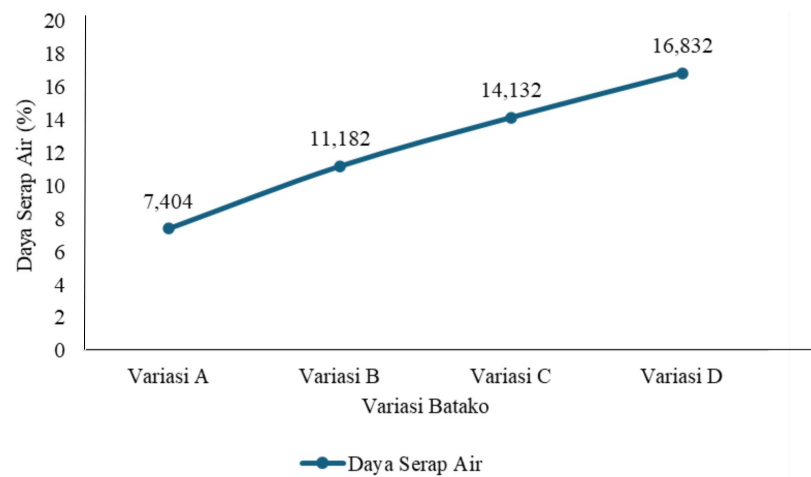
Selanjutnya, batako direndam di dalam air selama waktu yang telah ditentukan sehingga air dapat terserap ke dalam pori-pori material secara maksimal. Lama perendaman disesuaikan dengan prosedur pengujian yang berlaku agar kondisi jenuh air pada benda uji dapat tercapai. Setelah proses perendaman selesai, benda uji diangkat dan dibersihkan dari sisa air yang menempel pada permukaannya menggunakan kain lembut atau lap kering tanpa menghilangkan air yang telah terserap ke dalam pori-pori. Benda uji kemudian segera ditimbang untuk memperoleh berat basah. Perbandingan antara berat dalam kondisi kering dan berat setelah perendaman digunakan sebagai dasar dalam menghitung persentase daya serap air pada masing-masing variasi campuran batako. Nilai rekapitulasi hasil pengujian daya serap air disajikan pada Tabel 4.17 dan Gambar 4.19.

Tabel 4.17. Hasil Pengujian Daya Serap Air

No	Variasi	Komposisi	Kode	Berat Kering Oven (kg)	Berat Setelah Direndam (kg)	Daya Serap Air (%)	Rata-Rata (%)
1.	A	Serbuk Kaca : Kertas HVS (0% : 0%)	BTK-A1	8,120	8,895	9,544	7,404
			BTK-A2	8,140	8,575	5,344	
			BTK-A3	8,990	9,530	6,006	
			BTK-A4	8,790	9,480	7,850	
			BTK-A5	8,635	9350	8,280	
2.	B	Serbuk Kaca : Kertas HVS (2,5% : 5%)	BTK-B1	7,590	8,450	11,331	11,182
			BTK-B2	7895	8,715	10,386	
			BTK-B3	7,665	8,545	11,481	
			BTK-B4	7,575	8,505	12,277	
			BTK-B5	7.855	8,675	10,439	
3.	C	Serbuk Kaca : Kertas HVS (5% : 5%)	BTK-C1	7040	7980	13,352	14,132
			BTK-C2	7070	8015	13,366	
			BTK-C3	7045	8060	14,407	
			BTK-C4	7335	8400	14,519	
			BTK-C5	7260	8350	15,014	
4.	D	Serbuk Kaca :	BTK-D1	6530	7315	16,616	16,832

No	Variasi	Komposisi	Kode	Berat Kering Oven (kg)	Berat Setelah Direndam (kg)	Daya Serap Air (%)	Rata-Rata (%)
		Kertas HVS	BTK-D2	6650	7800	17,293	
		(10% : 7,5%)	BTK-D3	6740	7960	18,101	
			BTK-D4	6920	8045	16,257	
			BTK-D5	7015	8130	15,894	

Sumber : Hasil Analisis Pengujian (2026)



Gambar 4.19. Grafik Hasil Pengujian Daya Serap Air

Data hasil Pengujian didapatkan sebagai berikut:

- Variasi A (normal tanpa adanya bahan tambah) menghasilkan rata-rata nilai daya serap air sebesar 7,404%.
- Variasi B (2.5% substitusi serbuk kaca dan 2.5% tambahan kertas HVS) menghasilkan rata-rata nilai daya serap air sebesar 11,182%.
- Variasi C (5% substitusi serbuk kaca dan 5% tambahan kertas HVS) mempunyai rata-rata daya serap air sebesar 14,132%.
- Variasi D (10% substitusi serbuk kaca dan 7.5% tambahan kertas HVS) mempunyai rata-rata daya serap air sebesar 16,832%.

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.15, penambahan kertas HVS dan serbuk kaca memberikan pengaruh terhadap karakteristik daya serap air yang dimiliki batako, yang ditunjukkan dengan meningkatnya kemampuan batako dalam menyerap air seiring bertambahnya kadar campuran limbah. Peningkatan daya serap air ini mengindikasikan terbentuknya pori-pori yang lebih banyak pada struktur batako akibat penambahan limbah kertas HVS, sehingga air lebih mudah masuk dan terserap ke dalam material. Serat kertas memiliki kemampuan menyerap dan menahan air sehingga dapat meningkatkan porositas material setelah proses pengeringan dan perawatan. Kenaikan nilai daya serap air ini mengindikasikan bahwa semakin banyak limbah kertas yang ditambahkan, semakin besar jumlah rongga atau pori internal yang terbentuk sehingga air lebih mudah masuk ke dalam struktur batako. Hasil tersebut mendukung penelitian Hendriyani dkk. (2017) yang menyebutkan bahwa penambahan limbah kertas HVS pada batako menyebabkan peningkatan daya serap air akibat karakteristik serat pada kertas yang bersifat menyerap kelembapan. Berdasarkan ketentuan standar SNI 03-0349-1989 terkait Bata Beton untuk Pasangan Dinding, persyaratan maksimum daya serap air untuk batako mutu I adalah 25% dan mutu II, III adalah 35%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran memiliki nilai penyerapan air jauh berada dalam rentang yang dipersyaratkan sesuai batas maksimum yang dipersyaratkan, yaitu berkisar antara 7,404% hingga 16,832%. Dengan demikian seluruh variasi batako pada penelitian ini memenuhi persyaratan SNI untuk daya serap air dan termasuk dalam kategori yang layak digunakan sebagai bahan pasangan dinding. Hal tersebut menunjukkan bahwa limbah kertas HVS dan serbuk kaca masih berpotensi diperdayakan sebagai bahan campuran alternatif dalam penyusunan batako.

4.2.3 Analisis biaya Material

Tinjauan terhadap komponen biaya material merujuk pada nilai harga material yang ada di pasaran. Proses ini dilakukan guna memperoleh perbandingan nilai biaya material batako non-variasi dan batako dengan penambahan limbah kertas

HVS dan serbuk kaca. Biaya material produksi batako dihitung per batako. Rincian perhitungan biaya pokok produksi akan disajikan secara terperinci setiap materialnya. Komponen biaya bahan baku meliputi seluruh material yang digunakan sebagai penyusun dalam pembuatan batako. Harga batako yang beredar di pasaran saat ini berdasarkan berkisar Rp2.500,00 per buah untuk batako press standar.

Untuk mengetahui besarnya biaya material produksi batako, dilakukan survei harga material secara langsung di beberapa toko bangunan dan penyedia material yang berada di wilayah setempat. Survei ini bertujuan untuk memperoleh data harga material terkini yang sesuai dengan kondisi pasar sehingga perhitungan biaya produksi dapat dilakukan secara realistis dan akurat. Material yang disurvei meliputi semen, pasir, serbuk kaca, dan limbah kertas HVS sebagai bahan tambahan dalam pembuatan batako.

Berdasarkan hasil survei yang telah dilakukan, diperoleh variasi harga pada masing-masing material sesuai dengan jenis, kualitas, dan tempat pembelian. Data hasil survei harga material tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam perhitungan biaya pokok produksi batako non-variasi maupun batako dengan penambahan limbah kertas HVS dan substitusi serbuk kaca. Adapun rincian hasil survei harga material dapat dilihat pada Tabel 4.18 berikut.

Tabel 4.18. Hasil Survei Harga di Pasaran

No	Material	Material			Rata-Rata Harga
		Toko A	Toko B	Toko C	
1.	Pasir (1/4 colt)	Rp115.000,00	Rp95.000,00	Rp105.000,00	Rp105.000,00
2.	Semen (40kg)	Rp50.000,00	Rp58.000,00	Rp62.000,00	Rp56.666,67
3.	Limbah kaca (kg)	Rp200,00	Rp100,00	Rp400,00	Rp233,33
4.	Limbah kertas HVS (kg)	Rp2.000,00	Rp2.300,00	Rp2.500,00	Rp2.266,67

Sumber : Hasil Survei (2026)

Tiga material utama yang digunakan dalam penyusunan campuran adalah agregat halus, semen, serta air.

1. Material Pasir

Jenis pasir = Pasir Muntilan

Berat pasir = 375 kg ($\frac{1}{4}$ colt)

Harga pasir = Rp. 105.000

Kebutuhan pasir per batako = 7,920 kg

Harga material pasir = $\frac{7,920}{375} \times \text{Rp } 105.500 = \text{Rp } 2.217,60$

Berdasarkan hasil perhitungan biaya material pasir dengan total berat material sebesar 375 kg dan harga sebesar Rp105.000. Pada pembuatan satu buah batako, kebutuhan pasir yang digunakan adalah sebesar 7,920 kg. Berdasarkan perhitungan tersebut, diperoleh biaya penggunaan material pasir per batako sebesar Rp2.217,6. Nilai tersebut diperoleh dari perbandingan kebutuhan pasir per batako terhadap total berat pasir, kemudian dikalikan dengan harga total material pasir yang digunakan.

2. Material Semen

Merk semen = Semen Rajawali

Berat 1 sak semen = 40kg

Harga 1 sak semen = Rp 56.666,67

Tabel 4.19. Perhitungan Harga Semen Tiap Batako

Variasi Batako	Berat Semen per Batako (kg)	Harga Semen 1 Sak (40 kg)	Perhitungan	Harga Semen per Batako
A	1,98	Rp56.666,67	$= 1,98/40 \times \text{Rp } 56.666,67$	Rp2.805,00
B	1,931	Rp56.666,67	$= 1,931/40 \times \text{Rp } 56.666,67$	Rp2.734,88
C	1,881	Rp56.666,67	$= 1,881/40 \times \text{Rp } 56.666,67$	Rp2.664,75
D	1,782	Rp56.666,67	$= 1,782/40 \times \text{Rp } 56.666,67$	Rp2.524,50

Sumber : Hasil Survei (2026)

Berdasarkan Tabel 4.19, diketahui bahwa harga semen yang digunakan adalah Rp56.666,67 per sak dengan berat 40 kg. Pada variasi A, kebutuhan semen untuk satu batako sebesar 1,98 kg, sehingga diperoleh biaya semen per batako sebesar Rp2.805,00. Pada variasi B, kebutuhan semen sebesar 2.734,88 kg dengan biaya semen sebesar Rp2.598,13 per batako. Selanjutnya, pada variasi C kebutuhan semen sebesar 1,881 kg, sehingga biaya semen yang diperoleh sebesar Rp2.664,75 per batako. Sementara itu, pada variasi D kebutuhan semen mengalami penurunan menjadi 1,782 kg dengan biaya semen sebesar Rp2.524,50 per batako.

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil penggunaan semen pada campuran batako, maka biaya material semen yang dibutuhkan untuk setiap batako juga semakin rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa substitusi penggantian sebagian semen dengan material serbuk kaca mampu mengurangi kebutuhan semen dan menurunkan biaya penggunaan semen pada pembuatan batako.

3. Material Limbah Kertas HVS

Jenis kertas = HVS berwarna putih

Gramasi = 70 gsm

Harga kertas HVS per kg = Rp 2.266,67

Tabel 4.20. Perhitungan Harga Kertas HVS Tiap Batako

Variasi Batako	Berat Kertas HVS per Batako (kg)	Harga Kertas HVS per kg	Perhitungan	Harga Kertas HVS per Batako
A	0	Rp0,00	0	0
B	0,272	Rp2.266,67	= 0,272 x Rp2.266,67	Rp617,10
C	0,545	Rp2.266,67	= 0,545 x Rp2.266,67	Rp1.234,20
D	0,817	Rp2.266,67	=0,817x Rp2.266,67	Rp1.851,30

Sumber : Hasil Analisis Penelitian (2026)

Berdasarkan Tabel 4.20 hasil perhitungan harga kertas HVS tiap batako, diketahui bahwa harga kertas HVS yang digunakan sebesar Rp2.266,67 per kilogram. Pada variasi A tidak menggunakan tambahan limbah kertas HVS sehingga tidak terdapat biaya material kertas pada campuran batako. Pada variasi B, kebutuhan kertas HVS sebesar 0,272 kg per batako sehingga diperoleh biaya sebesar Rp617,10. Selanjutnya pada variasi C, kebutuhan kertas HVS meningkat menjadi 0,545 kg dengan biaya material sebesar Rp1.234,20 per batako. Sementara itu, pada variasi D kebutuhan kertas HVS sebesar 0,817 kg sehingga menghasilkan biaya material sebesar Rp1.851,30 per batako. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar penggunaan limbah kertas HVS pada campuran batako, maka biaya material kertas yang dibutuhkan untuk setiap batako juga mengalami peningkatan.

4. Material Limbah Kaca

Jenis kaca = kaca bening dengan merek Asahi
 Harga kaca per kg = Rp 233,33

Tabel 4.21. Perhitungan Harga Serbuk Kaca Tiap Batako

Variasi Batako	Berat Serbuk Kaca per Batako (kg)	Harga Kaca per (kg)	Perhitungan	Harga Serbuk Kaca per Batako
A	0	Rp0,00	0	0
B	0,050	Rp233,33	= 0,0495 x Rp 233,33	Rp11,55
C	0,099	Rp233,33	= 0,099 x Rp 233,33	Rp23,10
D	0,198	Rp233,33	= 0,198 x Rp 233,33	Rp46,20

Sumber : Hasil Analisis Penelitian (2026)

Berdasarkan Tabel 4.21 perhitungan biaya serbuk kaca per batako, diketahui bahwa variasi A tidak menggunakan serbuk kaca sehingga biaya tambahan serbuk kaca sebesar Rp0,00. Pada variasi B digunakan serbuk kaca

sebanyak 0,0495 kg dengan harga Rp233,33 per kg, sehingga diperoleh biaya serbuk kaca per batako sebesar Rp11,55. Pada variasi C, penggunaan serbuk kaca meningkat menjadi 0,099 kg dengan harga yang sama, sehingga biaya serbuk kaca per batako sebesar Rp23,10. Sementara itu, pada variasi D digunakan serbuk kaca sebanyak 0,198 kg dengan harga Rp233,33 per kg, sehingga biaya serbuk kaca per batako mencapai Rp46,20. Dari data yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah penggunaan serbuk kaca pada campuran batako, maka biaya material serbuk kaca per batako juga semakin meningkat secara proporsional.

5. Total Harga Material Pada Setiap Batako

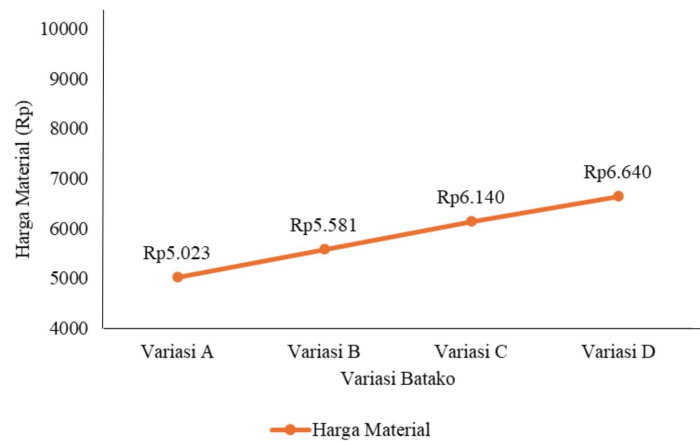
Untuk mengetahui besarnya biaya material pada setiap variasi batako, dilakukan perhitungan total harga material yang meliputi biaya pembelian semen, pasir, serbuk kaca, dan limbah kertas HVS yang digunakan dalam pembuatan satu buah batako. Perhitungan biaya material dilakukan berdasarkan jumlah kebutuhan masing-masing bahan sesuai dengan komposisi campuran (*mix design*) pada setiap variasi, kemudian dikalikan dengan harga satuan material yang berlaku pada saat penelitian dilaksanakan. Hasil analisis ini digunakan sebagai dasar dalam menentukan variasi campuran yang paling optimum, yaitu variasi yang tidak hanya memenuhi persyaratan kuat tekan dan daya serap air sesuai standar, tetapi juga memberikan biaya material yang relatif lebih efisien sehingga berpotensi diterapkan dalam produksi batako secara berkelanjutan. Perhitungan total harga material tiap batako dapat dilihat pada Tabel 4.22 dan Gambar 4.20.

Tabel 4.22. Perhitungan Total Harga Material Tiap Batako

Variasi Batako	Harga Pasir per Batako	Harga Semen per Batako	Harga Serbuk Kaca per Batako	Harga Kertas HVS per Batako	Total Harga Material
A	Rp2.217,60	Rp2.805,00	0	0	Rp5.023
B	Rp2.217,60	Rp2.734,88	Rp11,55	Rp617,10	Rp5.581

C	Rp2.217,60	Rp2.664,75	Rp23,10	Rp1.234,20	Rp6.140
D	Rp2.217,60	Rp2.524,50	Rp46,20	Rp1.851,30	Rp6.640

Sumber : Hasil Analisis Penelitian (2026)



Gambar 4.20. Grafik Analisis Harga Material

Berdasarkan Tabel 4.22 total harga material pada setiap batako, diketahui bahwa variasi A memiliki total harga material sebesar Rp5.023. Nilai tersebut berasal dari biaya pasir sebesar Rp2.217,60 dan biaya semen sebesar Rp2.805,00 tanpa penggunaan serbuk kaca dan kertas HVS. Pada variasi B, total harga material meningkat menjadi Rp5.581. Kenaikan ini disebabkan oleh adanya penambahan biaya serbuk kaca sebesar Rp11,55 dan biaya kertas HVS sebesar Rp617,10, meskipun biaya semen mengalami penurunan menjadi Rp2.734,88. Selanjutnya, variasi C memiliki total harga material sebesar Rp6.140. Peningkatan biaya terjadi karena penggunaan serbuk kaca sebesar Rp23,10 dan kertas HVS sebesar Rp1.234,20, sedangkan biaya semen menurun menjadi Rp2.664,75. Pada variasi D diperoleh total harga material tertinggi yaitu sebesar Rp6.640. Hal ini dipengaruhi oleh meningkatnya penggunaan serbuk kaca sebesar Rp46,20 dan kertas HVS sebesar Rp1.851,30, walaupun biaya semen turun menjadi

Rp2.524,50 sehingga berdasarkan grafik harga material juga semakin meningkat.

4.2.4 Analisis Komparasi Hubungan Kuat Tekan, Daya Serap Air, dan Biaya Material Batako

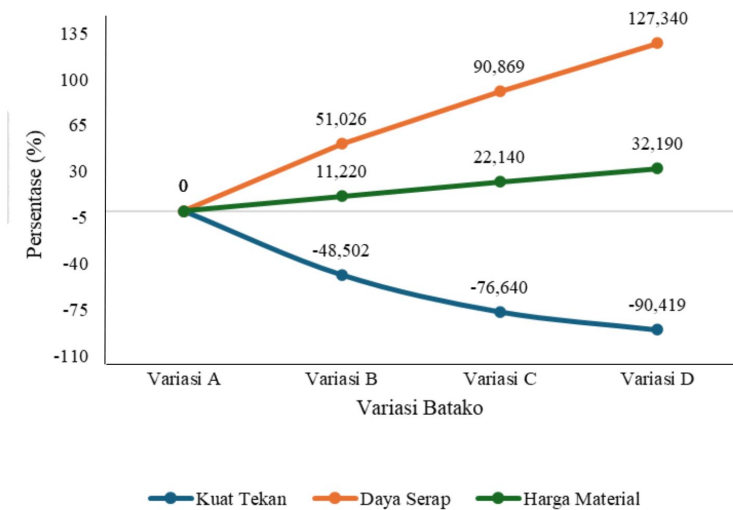
Analisis hubungan kuat tekan, daya serap air, dan biaya material dilakukan untuk mengevaluasi kinerja teknis dan ekonomis batako mortar dengan penambahan limbah kertas HVS dan substitusi sebagian semen menggunakan serbuk kaca. Kuat tekan menunjukkan kemampuan batako menahan beban, sedangkan daya serap air mencerminkan tingkat porositas dan kepadatan material. Secara umum, semakin rendah porositas batako maka daya serap air semakin kecil dan kuat tekan semakin tinggi. Sebaliknya, meningkatnya jumlah pori akan meningkatkan daya serap air dan menurunkan kuat tekan batako (Rumbayan & Sudarno, 2020; Sutoni dkk, 2018).

Selain aspek teknis, biaya material juga menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas penggunaan suatu campuran batako. Pemanfaatan limbah kertas HVS dan serbuk kaca berpotensi mengurangi penggunaan material konvensional sehingga dapat menekan biaya produksi. Namun, campuran yang paling ekonomis belum tentu menghasilkan kuat tekan tertinggi atau daya serap air terendah. Oleh karena itu, diperlukan analisis hubungan antara kuat tekan, daya serap air, dan biaya material pada setiap variasi campuran untuk memperoleh komposisi batako yang tidak hanya memenuhi persyaratan mutu, tetapi juga memberikan efisiensi biaya yang optimal (Hendrawan dkk., 2024). Hasil analisis diharapkan dapat menunjukkan variasi campuran yang memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja teknis, aspek ekonomis, dan pemanfaatan limbah sebagai material alternatif yang mendukung pembangunan berkelanjutan. Hasil analisis hubungan kuat tekan, daya serap air, dan biaya material pada batako dapat dilihat pada Tabel 4.23 dan Gambar 4.21.

Tabel 4.23. Hubungan Daya Serap Air, Kuat Tekan, dan Harga Material Batako

Pengujian (%)	Variasi			
	Variasi A	Variasi B	Variasi C	Variasi D
	0% SK+	2,5% SK+	5% SK+	10% SK+
	0% HVS	2,5% HVS	5% HVS	7,5% HVS
Daya Serap (%)	0	51.026	90.869	127.34
Kuat Tekan (%)	0	-48.502	-76.64	-90.419
Biaya (%)	0	11,22	22,14	32,19

Sumber : Hasil Analisis Penelitian (2026)



Gambar 4.21. Grafik Hubungan Daya Serap Air, Kuat Tekan, dan Harga Material Batako

Berdasarkan hasil pengujian, terdapat hubungan antara daya serap air, kuat tekan, dan harga material pada setiap variasi campuran batako. Secara umum, peningkatan daya serap air diikuti oleh penurunan kuat tekan karena semakin banyak pori yang terbentuk di dalam batako, sehingga struktur menjadi kurang padat dan kemampuan menahan beban berkurang. Sebaliknya, batako dengan daya serap air yang rendah memiliki struktur yang lebih rapat sehingga

menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi (Rumbayan dkk., 2020). Penambahan limbah kertas HVS dan serbuk kaca memengaruhi ketiga parameter tersebut. Limbah kertas HVS meningkatkan jumlah rongga sehingga daya serap air bertambah, sedangkan serbuk kaca berperan sebagai *filler* dan bahan pozzolan yang dapat memperbaiki struktur mikro mortar. Dari aspek ekonomi, pemanfaatan kedua limbah tersebut berpotensi mengurangi penggunaan material konvensional, meskipun biaya material dapat meningkat apabila limbah diperoleh dalam jumlah terbatas.

Berdasarkan perbandingan ketiga parameter tersebut, variasi campuran yang optimal adalah variasi yang mampu memberikan keseimbangan antara kuat tekan yang memenuhi persyaratan mutu, daya serap air yang tetap berada dalam rentang persyaratan maksimum standar, serta biaya material yang lebih ekonomis dibandingkan batako normal. Dengan demikian, penentuan campuran terbaik tidak hanya didasarkan pada satu parameter saja, tetapi mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomis secara bersamaan sehingga diperoleh batako yang berkualitas, ramah lingkungan, dan efisien dari segi biaya produksi.

Terlepas dari adanya penurunan kuat tekan pada variasi dengan kadar limbah yang tinggi, inovasi batako berbasis limbah kertas HVS dan serbuk kaca tetap memiliki potensi sebagai alternatif material konstruksi yang lebih berkelanjutan. Penambahan limbah kertas HVS juga menghasilkan batako yang lebih ringan, sehingga berpotensi mempermudah proses pengangkutan dan pemasangan di lapangan. Dengan demikian, inovasi ini mendukung pemanfaatan limbah sekaligus menjadi alternatif material bangunan yang lebih ramah lingkungan.

Di sisi lain, penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan persentase limbah kertas HVS dan serbuk kaca belum mampu meningkatkan performa mekanis batako secara bersamaan. Selain itu, biaya material pada penelitian ini juga masih relatif lebih tinggi dibandingkan batako normal karena proses pengolahan limbah kertas HVS, seperti pencacahan, perendaman, dan pengeringan, masih dilakukan dalam skala laboratorium sehingga belum mencapai efisiensi produksi.