

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi penjelasan yang berkaitan dengan analisa hasil dan pembahasan penelitian bata ringan menggunakan abu tempurung kelapa sebagai substitusi semen dan arang tempurung kelapa sebagai substitusi pasir. Hasil dan pembahasan dari penelitian ini berisikan pengujian material dan pengujian benda uji yaitu bata ringan meliputi uji bobot isi, daya serap air, dan kuat tekan. Termasuk juga perhitungan perbandingan harga benda uji konvensional dan benda uji substitusi,

4.1 Hasil Pengolahan Abu Tempurung Kelapa

Pengolahan abu tempurung kelapa dimulai dengan tahap *pretreatment* berupa pembersihan batok kelapa dari sisa sabut dan daging buah, pencucian dengan air bersih, serta pengeringan di bawah sinar matahari selama 1 hari. Batok kelapa kering kemudian melalui pembakaran selama ± 3 jam hingga didapatkan visualisasi abu berwarna homogen. Untuk mencapai ukuran saringan partikel yang dibutuhkan dengan kehalusan semen, abu digiling dan diayak hingga lolos saringan No. 200 (diameter pori 0,075 mm). Berikut dapat dilihat pada Gambar 4.1,



Gambar 4. 1 Hasil Abu Tempurung Kelapa

4.2 Hasil Pengolahan Arang Tempurung Kelapa

Pembuatan arang dimulai melalui proses pembakaran ± 2 jam guna mencegah material berubah menjadi abu. Setelah batok kelapa berubah menjadi arang dilakukan proses penyaringan ukuran,

dilanjutkan dengan pengayakan menggunakan saringan No. 8 (ukuran 2.38 mm) untuk memperoleh gradasi butiran arang yang seragam sebagai agregat ringan. Berikut dapat dilihat pada Gambar 4.2,



Gambar 4. 2 Arang Tempurung Kelapa

4.3 Hasil Pengujian Material

Sebelum dibuatnya benda uji bata ringan perlu dilaksanakan pengujian material terlebih dahulu. Untuk memastikan material ini dimulai dari pengujian pasir yang merupakan pengujian gradasi agregat, kadar lumpur, kadar air, berat jenis, dan zat organik yang terdapat dalam pasir. Untuk pengujian semen menggunakan uji konsistensi normal dan uji pengikatan awal.

4.3.1 Pengujian Pasir

Pasir merupakan material utama dalam komposisi *jobmix* bata ringan. Maka kualitas pasir sangat diperhatikan mutunya sebab memiliki peran yang krusial yang bisa mempengaruhi kualitas benda uji bata ringan itu sendiri. Pengujian yang dilaksanakan meliputi pengujian gradasi agregat, kadar lumpur, kadar air, berat jenis, dan zat organik.

A. Pengujian Gradasi Pasir

Pengujian ini dilaksanakan menggunakan cara menyaring sampel pasir kering menggunakan satu set saringan dengan berbagai ukuran lubang, mulai dari yang terbesar hingga yang terkecil, serta diakhiri dengan wadah atau *pan*. Hasil penimbangan berat pasir yang tertahan oleh masing-masing saringan tersebut kemudian dikonversikan ke dalam bentuk persentase kumulatif untuk

menentukan nilai Modulus Kehalusan (*Fineness Modulus*) serta mengidentifikasi zona gradasi dari sampel uji.

Tabel 4. 1 Tabel Analisis Gradasi Agregat Pasir

Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos
		Gram	%	%	%
mm	Inci	(a)	(b) = (a) / W	(c)	(d) = 100 - c
4.75	No. 4	26,8	2,6867	2,6867	97,3133
2.36	No. 8	55,05	5,5188	8,2055	91,7945
1.18	No. 16	164,45	16,4862	24,6917	75,3083
0.60	No. 30	180,5	18,0952	42,7870	57,2130
0.30	No. 50	202,65	20,3158	63,1028	36,8972
0.15	No. 100	160,5	16,0902	79,1930	20,8070
0.075	No. 200	80,4	8,0602	87,2531	12,7469
Pan		127,15	12.7469	100	0.00
Berat Total		997,5	100		

Berdasarkan tabel 4.1 di atas dapat diketahui kesimpulan berikut,

Menghitung agregat halus yang hilang selama pengujian analisis saringan,

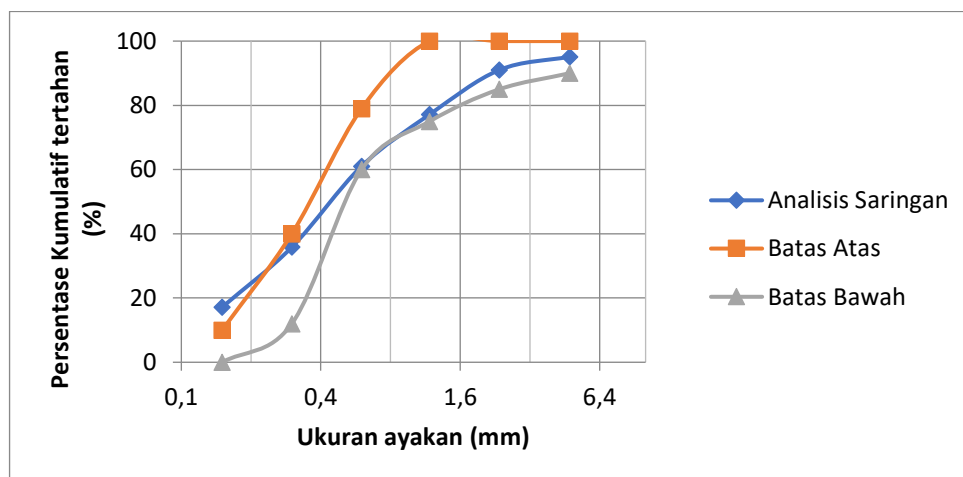
$$\begin{aligned}
 &= \frac{W-W_1}{W} \times 100\% \\
 &= \frac{1000-997.335}{1000} \times 100\% \\
 &= 0.265 \% < 2\% \text{ (Memenuhi persyaratan)}
 \end{aligned}$$

Menghitung FM atau modulus kehalusan,

$$\begin{aligned}
 FM &= \frac{\sum \% \text{kumulatif tertahan}}{100} \\
 &= \frac{220.6664}{100} \\
 &= 2.21
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan yang telah dilakukan, diperoleh nilai Modulus Kehalusan (*Fineness Modulus*) agregat pasir sebesar 2,207. Merujuk pada standar klasifikasi agregat halus, nilai tersebut memenuhi syarat dalam rentang $2,20 < FM \leq 2,60$, sehingga material pasir yang digunakan dalam penelitian ini di spesifikasikan dengan jenis pasir halus.

Selain melalui pendekatan nilai Modulus Kehalusan (FM), karakteristik dan distribusi ukuran butiran agregat halus dalam penelitian ini juga dievaluasi secara visual melalui grafik pembagian zona saringan berdasarkan standar SNI 02-24-1989.



Gambar 4. 3 Zona Agregat Halus

Hasil dari grafik gambar 4.3 menunjukkan bahwa kurva persentase lolos kumulatif pasir aktual secara keseluruhan berada di dalam koridor pembatas Zona 3 yaitu zona pasir agak halus. Meskipun terdapat fluktuasi minor pada ukuran saringan terkecil, tren kurva secara konsisten mengikuti pola jepitan antar batas atas dan batas bawah. Hal ini membuktikan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki distribusi gradasi dengan memenuhi persyaratan teknis SNI 02-24-1989 untuk pengerjaan campuran bata ringan *CLC*.

B. Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur pada sampel agregat halus dilaksanakan untuk mengetahui persentase kandungan partikel dengan diameter kurang dari 0,075 mm yang terkandung dalam sampel agregat halus. Menurut SNI D-04-1989-F, kandungan lumpur yang diizinkan dalam pasir maksimal yaitu sebanyak 5 %.

Keberadaan lumpur yang berlebihan pada pasir dapat menurunkan ikatan antara pasta semen dengan agregat, serta meningkatkan kebutuhan air pencampur yang pada akhirnya berpotensi menurunkan kuat tekan beton. Pengujian dilakukan dengan uji kocokan sehingga lumpur terlihat pada bagian atas gelas ukur, seperti pada gambar 4.4 berikut,



Gambar 4. 4 Hasil Uji Kocokan Pasir

Sehingga dari gambar berikut didapatkan hasil yang tertuang dalam tabel sebagai berikut,

Tabel 4. 2 Hasil Uji Kocokan Pasir

Sistem Kocokan		
1	Tinggi Pasir+Lumpur	240 cc
2	Tinggi Pasir	235 cc
3	Tinggi Lumpur	5 cc

Dari tabel 4.2 di atas dapat disimpulkan jumlah persentase lumpur yang terkandung dalam pasir dengan perhitungan sebagai berikut,

$$\text{Persentase} = \frac{5}{240} \times 100\%$$

$$= 2.083\% < 5\% \text{ (SNI D-04-1989-F) sehingga memenuhi}$$

Sehingga didapatkan uji kocokan untuk melihat persentase lumpur dalam pasir yakni sebanyak 2.083%. Sehingga memenuhi standar SNI dan aman untuk digunakan sebagai bahan material untuk pembuatan benda uji bata ringan.

C. Pengujian Kadar Air

Pengujian kadar air pada sampel agregat halus dilaksanakan untuk mendapati besarnya persentase yang terdapat pada kandungan air di dalam pori maupun di permukaan butiran pasir saat kondisi lapangan. Pengukuran kadar air ini sangat krusial dalam perencanaan campuran karena fluktuasi kandungan air pada

agregat akan langsung memengaruhi jumlah air yang dibutuhkan serta rasio faktor air semen. Pengujian ini dilaksanakan dengan menimbang berat sampel pasir awal dalam kondisi asli, kemudian dikeringkan di dalam oven dengan suhu $\pm 110^{\circ}\text{C}$ sehingga mencapai bobot konstan. Melalui selisih berat antara sampel pasir sebelum dan sesudah proses pengeringan, didapatkan massa air yang menguap dari dalam sampel uji. Persentase rasio massa air terhadap massa agregat kering oven tersebut kemudian dihitung untuk menentukan nilai kadar air aktual dari agregat halus,

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kadar Air

Pengujian Kadar Air		
1	Berat Pasir dalam kondisi asli	200.0 g
2	Berat Pasir setelah dioven	198.4 g

Dari tabel 4.3 berikut sehingga dapat laksanakan perhitungan untuk mengetahui selisih bobot massa pasir dalam kondisi actual dan setelah dilakukan pengeringan hingga massa tetap,

$$\text{Selisih berat} = 200 - 198.4$$

$$= 1.6 \text{ g}$$

$$\text{Persentase kadar air} = \frac{1.6}{200} \times 100\%$$

$$= 0.8\%$$

Sehingga didapatkan pasir memiliki kapasitas daya serap sebanyak 0.8% sehingga memenuhi syarat pada SNI 03-6821-2002.

D. Pengujian Kadar Zat Organik

Pengujian kandungan zat organik pada agregat halus bertujuan untuk mendeteksi indikator pengotor organik, seperti sisa-sisa tumbuhan atau humus, yang dapat menghambat proses hidrasi semen. Keberadaan zat organik dalam jumlah tinggi dapat memperlambat waktu pengikatan serta menurunkan kuat tekan pada umur rencana. Pengujian ini dilaksanakan dengan mencampurkan sampel pasir ke dalam larutan Natrium Hidroksida (NaOH) di dalam gelas ukur, kemudian didiamkan selama 24 jam hingga terjadi perubahan warna pada cairan di atas sampel. Tingkat kepekatan warna larutan yang terbentuk setelah proses sedimentasi selama 24 jam tersebut kemudian dikomparasikan secara visual

dengan skala warna standar sesuai acuan SNI 03-2816-1992. Berikut dapat dilihat pada Gambar 4.5,



Gambar 4. 5 Hasil Uji Kadar Organik Pasir

Sehingga di hasil sebagai berikut,

Tabel 4. 4 Hasil Uji Kadar Organik

Sistem Kocokan		
1	Tinggi Pasir+Lumpur	150 cc
2	Tinggi Pasir	147.5 cc
3	Tinggi Lumpur	2.5 cc
4	Warna	Kuning

Berdasarkan Tabel 4.4 hasil pengamatan visual terhadap larutan NaOH 3% setelah didiamkan selama 24 jam, cairan di atas permukaan sampel pasir menunjukkan perubahan warna menjadi kuning muda. Jika dikomparasikan dengan skala *organic plate color*, warna tersebut setara dengan plat warna no. 1 atau no. 2. Hasil ini mengindikasikan bahwa kandungan organik seperti sisa humus dan pembusukan vegetasi di dalam sampel agregat halus yang diuji berada dalam konsentrasi yang sangat rendah dan minimal. Kondisi warna kuning ini menunjukkan apabila pasir tersebut memenuhi syarat dan layak digunakan sebagai bahan pengikat

E. Pengujian Berat Jenis

Pengujian berat jenis dan penyerapan pada sampel agregat halus dilakukan untuk menentukan karakteristik densitas butiran serta kapasitas drainase internal dari pasir yang digunakan. Prosedur pengujian ini dilakukan dengan bantuan piknometer untuk mengukur volume absolut dari sampel pasir seberat 200 gram yang telah dikondisikan dalam keadaan SSD menggunakan kerucut kuning standar. Melalui perbandingan antara berat sampel dalam berbagai kondisi

(kering oven, SSD, dan berat piknometer berisi air), diperoleh nilai konstanta berat jenis serta persentase absorpsi air agregat. Berikut dapat ditinjau pada Gambar 4.6,



Gambar 4. 6 Uji Berat Jenis Pasir

Sehingga didapatkan data berat jenis yang tertuang dalam tabel sebagai berikut,

Tabel 4. 5 Hasil Uji Berat Jenis Pasir

Pengujian	Kode	Hasil
Berat benda uji kering permukaan jenuh	(SSD)	200
Berat benda uji kering oven	(BK)	198.4
Berat picnometer diisi air 25° C	(B)	665
Berat picnometer + benda uji SSD + Air 25°C	(Bt)	790

Sehingga dari tabel 4.5 di atas didapatkan perhitungan untuk mendapatkan nilai berat jenis sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 -BJ_{bulk} &= \frac{BK}{B + 200 - Bt} \\
 &= \frac{198.4}{665 + 200 - 790} \\
 &= 2.645 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -BJ_{SSD} &= \frac{200}{B + 200 - Bt} \\
 &= \frac{200}{665 + 200 - 790} \\
 &= 2.600 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -BJ_{Semu} &= \frac{BK}{B + BK - Bt} \\
 &= \frac{198.4}{665 + 198.4 - 790} \\
 &= 2.702 \text{ g/cm}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -Absorsi &= \frac{200 - BK}{BK} \\
 &= \frac{200 - 198.4}{198.4} \times 100\% \\
 &= 0.008
 \end{aligned}$$

Sehingga dari perhitungan di atas didapatkan nilai berat jenis sesuai dengan keadaan pasir masing masing yaitu dalam keadaan SSD, semu, dan kering.

F. Rekapitulasi Pengujian Agregat Halus

Setelah melewati berbagai tahapan pengujian laboratorium untuk memeriksa karakteristik dan kualitas agregat halus, kami merangkum seluruh data yang diperoleh ke dalam bagian rekapitulasi ini. Melalui ringkasan tabel dan analisis di bawah, kita dapat melihat secara jelas performa fisik material agregat pasir.

Tabel 4. 6 Rekapitulasi Analisis Uji Material Agregat Halus

No	Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	Standar Acuan	Ket
1	Gradasi Pasir			SNI 03-2834-	
	FM	= 2.21	2.2 – 3.2	2000	Memenuhi
	Zona	= Zona 3	Zona 1,2,3, 4	ASTM C33	Memenuhi
2	Kadar Lumpur	= 2.083 %	<5 %	SNI D-04-1989-F	Memenuhi
3	Zat Organik	Kuning (No.2)	Maks kuning tua (No.3)	SNI 03-2816-1992 ASTM C40	Memenuhi
4	Berat Jenis			SNI	
	-Berat Jenis Baku (Bulk SG)	= 2.645 g/cm3	2.4-2.9 g/cm3	1970:2016 ASTM C128	Memenuhi
	-Berat Jenis Jenuh (SSD SG)	= 2.600 g/cm3	2.4-2.9 g/cm3		Memenuhi
	-Berat Jenis Semu (Apparent SG)	= 2.702 g/cm3	2.4-2.9 g/cm3		Memenuhi
	-Penyerapan Air	= 0.806 %	< 3 %		Memenuhi

Berdasarkan tabel 4.6 seluruh rangkaian pengujian laboratorium yang telah dilakukan, dapat disimpulkan apabila material agregat halus yang dipakai memenuhi seluruh standar mutu yang disyaratkan oleh SNI dan ASTM. Karakteristik butiran yang cenderung halus sangat ideal dan mendukung keperluan pembuatan campuran bata ringan, karena mampu mengisi rongga mikro secara optimal guna menghasilkan permukaan benda uji yang padat dan rata. Selain itu, tingkat kebersihan material juga dinilai sangat baik, ditandai dengan kadar lumpur serta kandungan zat organik yang rendah. Maka agregat halus ini dinyatakan lolos kualifikasi dan sangat layak untuk digunakan sebagai bahan susun dalam tahapan perencanaan proporsi campuran (*mix design*).

4.3.2 Pengujian Semen

Pengujian karakteristik fisik semen dilakukan untuk mengevaluasi kualitas dan konsistensi semen yang digunakan sebagai bahan ikat hidrolis utama dalam campuran bata ringan. Mengingat semen memiliki peran krusial dalam mengikat agregat melalui reaksi hidrasi, pengujian terhadap sifat-sifat fisiknya seperti konsistensi normal dan waktu pengikatan awal penting untuk dilakukan. Pengujian ini bermaksud untuk mendapati bahwa produk semen yang dipakai di lapangan mencakupi spesifikasi standar mutu serta siap bereaksi secara optimal saat bercampur dengan air.

A. Konsistensi Normal Semen Gresik

Berdasarkan pengujian yang telah dilaksanakan, diperoleh data mengenai jumlah kebutuhan air optimum untuk mencapai kondisi konsistensi normal pada pasta semen. Pengujian ini dilaksanakan dengan alat Vicat sesuai dengan standar SNI 7064:2014 mengenai Semen PCC Komposit. Penentuan konsistensi normal didasarkan pada penurunan batang penusuk sedalam 10 ± 1 mm dari muka pasta semen pada kurun waktu 30 detik.

Tabel 4. 7 Hasil Uji Konsistensi Normal Semen

No	Berat Semen (Gram)	Persentase Air (%)	Penurunan Jarum (mm)	Keterangan
1	300	28	6	Belum memenuhi
2	300	28.5	8	Belum memenuhi
3	300	29	15	memenuhi

Berdasarkan tabel 4.7 di atas didapatkan hasil penurunan jarum di angka 10 ada di antara persentase 28.5% dan 29%, maka dilakukan perhitungan interpolasi sebagai berikut,

Interpolasi :

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

Keterangan :

Y = Persentase air saat penurunan jarum tepat berada di angka 10 mm

X = Penurunan jarum di angka 10 mm

X1 = Penurunan jarum di angka 8 mm

X2 = Penurunan jarum di angka 15 mm

Y1 = Persentase air saat penurunan jarum berada di angka 8 mm

Y2 = Persentase air saat penurunan jarum berada di angka 15 mm

$$\begin{aligned}
 Y &= 28.5\% + \frac{(10 - 8)}{(15 - 8)} \times (29 - 28.5)\% \\
 &= 28.5\% + \frac{2}{7} \times 0.5\% \\
 &= 28.643\%
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilaksanakan, dapat di tarik kesimpulan bahwa nilai konsistensi normal pasta semen diperoleh sebesar 28,643% melalui metode interpolasi linear. Nilai ini menunjukkan bahwa untuk mencapai standar keenceran ideal sesuai dengan SNI 7064-2014, dibutuhkan volume air sebesar 28,643% dari total berat sampel semen yang digunakan. Hasil tersebut telah memenuhi rentang standar konsistensi normal semen PCC pada umumnya yang berkisar antara 24% hingga 33%, sehingga nilai kadar air ini dinyatakan valid untuk digunakan.

B. Pengujian Ikat Awal Semen Gresik

Pengujian waktu ikat awal digunakan untuk menentukan durasi sejak pencampuran hingga pasta semen mulai menunjukkan proses pengikatan. Pada pengujian ini, pasta semen dibuat dengan menggunakan kadar air acuan dari nilai konsistensi normal yang telah diperoleh sebelumnya. Berdasarkan standar SNI 7064-2014, pengujian dilakukan menggunakan alat Vicat dengan jarum berdiameter 1 mm, di mana waktu ikat awal dinyatakan tercapai saat jarum hanya mampu menembus pasta semen sedalam 25 mm.

Tabel 4. 8 Hasil Uji Pengikatan Awal Semen

No	Waktu Penurunan (menit)	Penurunan Jarum (mm)	Suhu (°C)	Keterangan
1	0	48	30	Belum memenuhi
2	15	48	30	Belum memenuhi
3	30	47.5	30	Belum memenuhi
4	45	47.5	30	Belum memenuhi
5	60	41	30	Belum memenuhi
6	75	40	30	Belum memenuhi
7	90	34	30	Belum memenuhi
8	105	31	30	Belum memenuhi
9	120	28	30	Belum memenuhi
10	135	26	30	Belum memenuhi
11	150	19	30	Belum memenuhi

Berdasarkan tabel 4.8 di atas didapatkan hasil penurunan jarum di angka 25 ada di antara waktu 135 menit dan 150 menit, maka dilakukan perhitungan interpolasi sebagai berikut,

Interpolasi :

$$Y = Y_1 + \frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)} \times (Y_2 - Y_1)$$

Keterangan :

Y = Waktu saat penurunan jarum tepat berada di angka 25 mm

X = Penurunan jarum di angka 25 mm

X₁ = Penurunan jarum di angka 26 mm

X₂ = Penurunan jarum di angka 19 mm

Y₁ = Waktu saat penurunan jarum berada di angka 26 mm

Y₂ = Waktu air saat penurunan jarum berada di angka 19 mm

$$\begin{aligned} Y &= 135 + \frac{(25-26)}{(19-26)} \times (150-135)\% \\ &= 135 + \frac{-1}{-7} \times 15 \\ &= 137.14 \text{ menit} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis perhitungan dengan metode interpolasi linear, dapat disimpulkan bahwa waktu ikat awal dari sampel semen yang diuji tercapai pada menit ke 137,143. Hasil ini telah memenuhi syarat standar SNI 7064:2014 yang menetapkan bahwa waktu ikat awal untuk semen PCC tidak boleh kurang dari 45 menit. Dengan demikian, semen ini dinyatakan aman dan layak digunakan dalam pekerjaan konstruksi di lapangan karena memberikan tenggang waktu yang cukup untuk proses pengadukan, pengangkutan, hingga penuangan adonan beton sebelum campuran mulai kehilangan plastisitasnya.

4.4 Hasil Uji Bobot Isi dan Penyerapan Air

Data hasil pengujian untuk bobot isi dilakukan setelah mengoven benda uji selama minimal 24 jam hingga berat dinyatakan tetap dalam suhu oven $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Kemudian melakukan perendaman benda uji selama $24 \text{ jam} \pm 30 \text{ menit}$ untuk didapatkan bobot isi jenuh air. Pengujian dilakukan ketika benda uji telah berumur 14 hari.

A. Benda Uji Bata Ringan Variasi AR0AB0 (Kontrol)

Bata ringan yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas bobot isi 1100 kg/m^3 , dengan nilai densitas yang disyaratkan berada pada

rentang 1000 hingga 1200 kg/m³. Karakteristik bobot isi pada rentang ini dirancang khusus untuk menghasilkan material bata ringan nonstruktur kategori berat sedang. Selain densitas material, parameter kualitas bata ringan ini juga ditentukan oleh kemampuan penyerapan airnya, dengan standar kelayakan harus memenuhi kriteria kurang dari 25%.

Tabel 4. 9 Hasil Uji Bobot Isi dan Serap Air Variasi AR0AB0

Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4
Berat awal	g	BA	3670	3610	3615	3680
Berat kering oven	g	BK	3545	3590	3500	3590
Panjang	mm	P	149.13	150.18	149.57	149.53
Lebar	mm	l	153.73	154.59	150.05	150.12
Tebal	mm	t	150.12	149.78	150.22	149.82
Volume	cm ³	V	3441.60	3477.38	3477.38	3363.08
Berat jenuh air	g	BB	4405	4375	4330	4200
Bobot isi nominal	kg/m ³	BI	1066.36	1038.14	1039.58	1094.24
Bobot isi kering nominal	kg/m ³	BIK	1030.04	1003.63	1006.50	1037.74
Bobot isi jenuh air	kg/m ³	BIA	1279.93	1258.13	1245.19	1248.86
Penyerapan air	%Vol		20%	21.2%	19.7%	20.3%

Berdasarkan tabel 4.9 hasil pengujian benda uji bata ringan Variasi Kontrol pada umur 14 hari, diperoleh nilai rata-rata bobot isi nominal sebesar 1059,58 kg/m³ dan nilai rata-rata penyerapan air sebesar 20,30%. Sehingga menurut SNI 8640-2018, bata ringan variasi kontrol masuk ke dalam kategori berat 1100 kg/m³ dan memenuhi persyaratan daya serap air.

B. Benda Uji Bata Ringan Variasi AR3AB2.5

Bata ringan yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas bobot isi 1100 kg/m³, dengan nilai densitas yang disyaratkan berada pada rentang 1000 hingga 1200 kg/m³. Karakteristik bobot isi pada rentang ini dirancang khusus untuk menghasilkan material bata ringan nonstruktur kategori

berat sedang. Selain densitas material, parameter kualitas bata ringan ini juga ditentukan oleh kemampuan penyerapan airnya, dengan standar kelayakan harus memenuhi kriteria kurang dari 25%.

Tabel 4. 10 Hasil Uji Bobot Isi dan Serap Air Variasi AR3AB2.5

Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4
Berat awal	g	BA	3520	3615	3550	3565
Berat kering oven	g	BK	3405	3485	3425	3430
Panjang	mm	P	151,02	148,3	150,01	152,01
Lebar	mm	l	152,10	149,9	150,9	148,87
Tebal	mm	t	150,22	150,07	149,13	150,34
Volume	g	V	3450,574	3336,081	3375,789	3402,153
Berat jenuh air	g	BSSD	4305	4340	4315	4350
Bobot isi nominal	kg/m ³	BI	1020,12	1083,61	1051,61	1047,87
Bobot isi kering nominal	kg/m ³	BIK	986,79	1044,64	1014,58	1008,19
Bobot isi jenuh air	kg/m ³	BIA	1247,62	1300,33	1277,70	1278,40
Penyerapan air	%Vol		22.3	20	21,5	22

Berdasarkan tabel 4.10 hasil pengujian benda uji bata ringan Variasi AR3AB2.5 pada umur 14 hari, diperoleh nilai rata-rata bobot isi nominal sebesar 1050.80 kg/m³ dan nilai rata-rata penyerapan air sebesar 21.45%. Sehingga menurut SNI 8640-2018, bata ringan variasi kontrol masuk ke dalam kategori berat 1100 kg/m³ dan memenuhi persyaratan daya serap air.

C. Benda Uji Bata Ringan Variasi AR3AB5

Bata ringan yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas bobot isi 1100 kg/m³, dengan nilai densitas yang disyaratkan berada pada rentang 1000 hingga 1200 kg/m³. Karakteristik bobot isi pada rentang ini dirancang khusus untuk menghasilkan material bata ringan nonstruktur kategori berat sedang. Selain densitas material, parameter kualitas bata ringan ini juga

ditentukan oleh kemampuan penyerapan airnya, dengan standar kelayakan harus memenuhi kriteria kurang dari 25%.

Tabel 4. 11 Hasil Uji Bobot Isi dan Serap Air Variasi AR3AB5

Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4
Berat awal	g	BA	3465	3280	3375	3290
Berat kering oven	g	BK	3325	3155	3245	3175
Panjang	mm	P	150,11	151,21	150,44	150,23
Lebar	mm	l	149,23	148,88	149,76	150,01
Tebal	mm	t	150,013	147,97	150,25	150,92
Volume	cm ³	V	3360,42	3331,1	3385,11	3401,13
Berat jenuh air	g	BSSD	4265	3995	4140	4070
Bobot isi nominal	kg/m ³	BI	1031,12	984,66	997,01	967,33
Bobot isi kering nominal	kg/m ³	BIK	989,46	947,13	958,61	933,51
Bobot isi jenuh air	kg/m ³	BIA	1269,18	1199,32	1222,34	1196,58
Penyerapan air	%Vol		23,1	21,8	22,6	23,7

Berdasarkan tabel 4.11 hasil pengujian benda uji bata ringan Variasi AR3AB5 pada umur 14 hari, diperoleh nilai rata-rata bobot isi nominal sebesar 995.03 kg/m³ dan nilai rata-rata penyerapan air sebesar 22.8%. Sehingga menurut SNI 8640-2018, bata ringan variasi kontrol masuk ke dalam kategori berat 1100 kg/m³ dan memenuhi persyaratan daya serap air

D. Benda Uji Bata Ringan AR3AB7.5

Bata ringan yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas bobot isi 1100 kg/m³, dengan nilai densitas yang disyaratkan berada pada rentang 1000 hingga 1200 kg/m³. Karakteristik bobot isi pada rentang ini dirancang khusus untuk menghasilkan material bata ringan nonstruktur kategori berat sedang. Selain densitas material, parameter kualitas bata ringan ini juga

ditentukan oleh kemampuan penyerapan airnya, dengan standar kelayakan harus memenuhi kriteria kurang dari 25%.

Tabel 4. 12 Hasil Uji Bobot Isi dan Serap Air Variasi AR3AB7.5

Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4
Berat awal	g	BA	3450	3510	3475	3505
Berat kering oven	g	BK	3325	3405	3315	3370
Panjang	mm	P	149.11	151.12	149.07	150.23
Lebar	mm	l	152.13	153.55	150.21	151.01
Tebal	mm	t	152.11	148.98	152.01	147.97
Volume	cm ³	V	3450.479	3457.002	3403.778	3356.881
Berat jenuh air	g	BSSD	4230	4345	4270	4350
Bobot isi nominal	kg/m ³	BI	999,86	1015,30	1021,81	1044,42
Bobot isi kering nominal	kg/m ³	BIK	963,63	984,96	974,80	1004,50
Bobot isi jenuh air	kg/m ³	BIA	1246,84	1274,01	1278,52	1298,11
Penyerapan air	%Vol		22.6	23.7	22.8	24.1

Berdasarkan tabel 4.12 hasil pengujian benda uji bata ringan Variasi AR3AB7.5 pada umur 14 hari, diperoleh nilai rata-rata bobot isi nominal sebesar 1020.35 kg/m³ dan nilai rata-rata penyerapan air sebesar 23.3%. Sehingga menurut SNI 8640-2018, bata ringan variasi kontrol masuk ke dalam kategori berat 1100 kg/m³ dan memenuhi persyaratan daya serap air.

E. Benda Uji Bata Ringan AR3AB10

Bata ringan yang dipakai dalam penelitian ini dibedakan ke dalam kelas bobot isi 1100 kg/m³, dengan nilai densitas yang disyaratkan berada pada rentang 1000 hingga 1200 kg/m³. Karakteristik bobot isi pada rentang ini dirancang khusus untuk menghasilkan material bata ringan nonstruktur kategori berat sedang. Selain densitas material, parameter kualitas bata ringan ini juga

ditentukan oleh kemampuan penyerapan airnya, dengan standar kelayakan harus memenuhi kriteria kurang dari 25.

Tabel 4. 13 Hasil Uji Bobot Isi dan Serap Air Variasi AR3AB10

Pengujian	Satuan	Notasi	1	2	3	4
Berat awal	g	BA	3680	3610	3635	3605
Berat kering oven	g	BK	3520	3480	3508	3489
Panjang	mm	P	150,32	150,27	149,61	149,88
Lebar	mm	l	152,13	151,10	149,40	152,21
Tebal	mm	t	149,55	150,12	152,10	151,32
Volume	cm ³	V	3419,49	3405,61	3399,84	3455,97
Berat jenuh air	g	BSSD	4460	4465	4475	4445
Bobot isi nominal	kg/m ³	BI	1076,18	1059,43	1069,17	1043,99
Bobot isi kering nominal	kg/m ³	BIK	1029,40	1022,14	1031,81	1009,27
Bobot isi jenuh air	kg/m ³	BIA	1295,01	1298,12	1302,14	1266,63
Penyerapan air	%Vol		22.8	25.1	24.7	24.3

Berdasarkan tabel 4.13 hasil pengujian benda uji bata ringan Variasi AR3AB10 pada umur 14 hari, diperoleh nilai rata-rata bobot isi nominal sebesar 1062.19 kg/m³ dan nilai rata-rata penyerapan air sebesar 24.23%. Sehingga menurut SNI 8640-2018, bata ringan variasi kontrol masuk ke dalam kategori berat 1100 kg/m³ dan memenuhi persyaratan daya serap air.

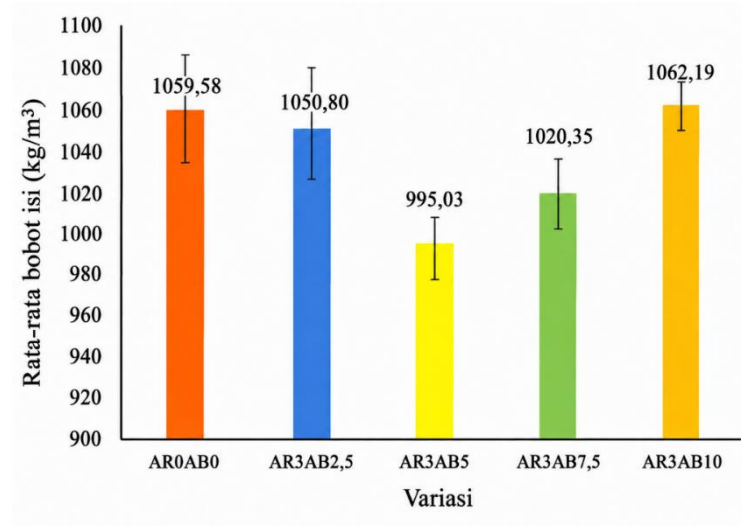
4.4.1 Hasil Analisa Bobot Isi Bata Ringan

Setelah mendapatkan nilai bobot isi nominal dari masing-masing variasi benda uji pada umur pengujian 14 hari, seluruh data tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam satu tabel rekapitulasi. Hal ini bertujuan untuk melihat tren perubahan nilai bobot isi secara keseluruhan dari setiap variasi, yang hasilnya sebagai berikut.

Tabel 4. 14 Rekapitulasi Hasil Uji Bobot Isi Bata Ringan

Variasi	Bobot Isi Rata-rata (kg/m ³)	SNI 8640-2018 (kg/m ³)	Keterangan kategori (kg/m ³)
AR0AB0	1059.58	1000-1200	1100
AR3AB2.5	1050.80	1000-1200	1100
AR3AB5	995.03	800-1000	900
AR3AB7.5	1020.35	1000-1200	1100
AR3AB10	1062.19	1000-1200	1100

Berdasarkan Tabel 4.14 persyaratan SNI 8640-2018 tentang Bata Ringan untuk Pasangan Dinding, batas bobot isi kategori berat 1.100, maka bata ringan berada dalam rentang 1.000-1.200 kg/m³. Sehingga variasi pada tabel 4.14 di atas masih memenuhi syarat bobot isi sesuai dengan standar. Berikut adalah grafik rekapitulasi dari hasil pengujian bobot isi dapat ditinjau pada Gambar 4.7,

**Gambar 4. 7** Grafik Rekapitulasi uji Bobot Isi

Berdasarkan Tabel 4.14, ditinjau adanya penurunan nilai bobot isi rata-rata bata ringan sejalan dengan bertambahnya persentase substitusi abu tempurung kelapa hingga titik variasi AR3AB5 (995,03 kg/m³). Penurunan bobot isi ini disebabkan oleh penggunaan arang tempurung kelapa yang memiliki berat jenis lebih ringan dibandingkan agregat halus (pasir) yang disubstitusikan. Oleh karena itu, abu tempurung kelapa pun memiliki berat jenis yang lebih ringan dari pada semen sehingga turut menurunkan massa jenis campuran, sehingga menghasilkan produk yang ringan. Hasil penelitian ini di dukung oleh hasil penelitian Purwanta &

Hutabarat, (2024) dimana penggunaan arang tempurung kelapa menyebabkan penurunan bobot isi beton sehingga menghasilkan material yang lebih ringan. Bata ringan mengalami penurunan hingga 6.09% dibandingkan beton konvensional.

Pada penambahan abu pada variasi AR3AB7,5 dan AR3AB10 terjadi kenaikan kembali nilai bobot isi. Hal ini dapat terjadi karena peningkatan kadar abu dan arang tempurung kelapa secara signifikan menurunkan tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran adonan. Penurunan ini terjadi akibat tingginya kapasitas penyerapan air oleh pori-pori material abu tersebut (Nasrulah dkk., 2019). Ketika sebagian besar air bebas tersedot ke dalam pori arang dan abu, adonan beton kehilangan airnya sehingga menjadi adonan yang kering dan kaku, ini diindikasikan secara nyata oleh penurunan nilai slump oleh Santosa dkk., (2023). Akibat kekakuan pada fase segar ini, stabilitas cairan busa menjadi terganggu sehingga gelembung udara (*foam*) mengalami penyusutan dan keruntuhan busa. Ini sejalan dengan penelitian oleh (Boddepalli dkk., 2024) bahwa penambahan abu menyebabkan pecahnya gelembung udara. Hilangnya fasa udara makro ini menyebabkan volume rongga di dalam bata ringan berkurang, oleh karena itu dapat disimpulkan bata ringan menjadi lebih berat. Fenomena keruntuhan struktur busa inilah yang melandasi lonjakan kenaikan nilai bobot isi rata-rata pada variasi AR3AB7,5 dan AR3AB10.

4.4.2 Hasil Analisa Penyerapan Air Bata Ringan

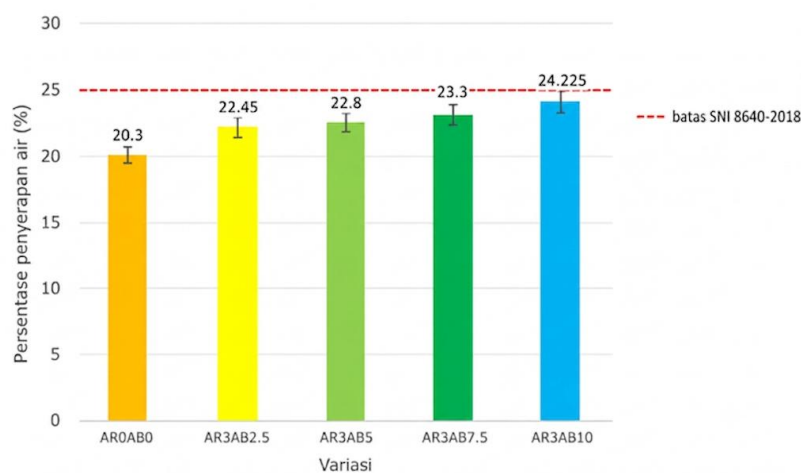
Setelah mendapatkan nilai persentase penyerapan air dari masing-masing variasi benda uji pada umur pengujian 14 hari, seluruh data tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam satu tabel rekapitulasi. Untuk mengevaluasi dampak dari pemanfaatan limbah tempurung kelapa terhadap ketahanan bata ringan terhadap air, dilakukan pengujian penyerapan air pada umur perawatan yang telah ditentukan. Adapun hasil rekapitulasi uji penyerapan air rata-rata dari variasi campuran ditunjukkan pada data tabel sebagai berikut,

Tabel 4. 15 Rekapitulasi Hasil Uji Serap Air Bata Ringan

Variasi	Penyerapan air (%)	SNI 8640- 2018 (%)	Ket.
AR0AB0	20.30	25	memenuhi
AR3AB2.5	22.45	25	memenuhi
AR3AB5	22.8	25	memenuhi
AR3AB7.5	23.3	25	memenuhi
AR3AB10	24.23	25	memenuhi

Menurut hasil pengujian pada tabel 4.15, pada hasil penyerapan air meningkat seiring bertambahnya persentase substitusi abu tempurung kelapa. Variasi AR0AB0 memiliki nilai penyerapan air terendah sebesar 20,30%, sedangkan variasi AR3AB10 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 24,23%. Meskipun demikian, seluruh variasi masih memenuhi persyaratan SNI 8640-2018 karena nilai penyerapan air berada di bawah batas maksimum 25%.

Peningkatan nilai penyerapan air tersebut diduga dipengaruhi oleh karakteristik arang tempurung kelapa yang memiliki pori pori mikro serta bersifat higroskopis sehingga mampu menyerap dan menyimpan air lebih banyak (Tarigan dkk., 2024). Hasil penelitian Ramos dkk., (2025) juga menunjukkan bahwa struktur pori mikro pada arang mampu mengikat produk hidrasi sekaligus meningkatkan kapasitas absorpsi air, sehingga nilai penyerapan air cenderung meningkat meskipun struktur material menjadi lebih kompak. Berikut adalah grafik rekapitulasi dari hasil uji penyerapan air dapat ditinjau pada Gambar 4.8,

**Gambar 4. 8** Grafik Rekapitulasi Uji Serap Air

Berdasarkan hasil pengujian, terlihat fenomena di mana peningkatan nilai bobot isi pada variasi AR3AB7,5 dan AR3AB10 tidak selalu diikuti oleh penurunan persentase penyerapan air. Kondisi ini membuktikan bahwa pemadatan semu yang terjadi akibat runtuhnya struktur gelembung udara (*foam collapse*) tidak menghilangkan sifat higroskopis alami dari arang tempurung kelapa.

Pori mikro merupakan pori-pori berukuran kecil yang memiliki diameter kurang dari 100 nm. Pori ini terbentuk di dalam matriks semen atau agregat akibat reaksi hidrasi dan struktur halus dari material tersebut (Zhang dkk., 2025). Pori makro merupakan pori-pori berukuran lebih besar yang sering kali memiliki diameter melebihi 1 μm (Xue dkk., 2026). Pori-pori ini biasanya terbentuk oleh adanya udara yang terperangkap, agregat ringan, atau *foaming agents* selama proses pembuatan adonan (Chung dkk., 2019).

Meskipun volume rongga makro dari busa berkurang sehingga bobot isi keringnya meningkat, struktur pori mikro kapiler internal pada partikel arang tetap bertindak aktif dalam menyerap air. Mekanisme absorpsi ini sejalan dengan temuan terdahulu di mana substitusi *biochar* terbukti meningkatkan laju penyerapan air kapiler secara signifikan hingga 204,4% (Jiang dkk., 2025). Jaringan pori mikro internal inilah yang melandasi mengapa bata ringan pada variasi tinggi memiliki karakteristik penyerapan air yang tinggi.

4.5 Hasil Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilaksanakan untuk mendapati informasi mengenai kapasitas beban maksimum yang dapat diterima bata ringan per satuan luas. Hal ini merupakan parameter utama dalam menentukan mutu dan kelayakan mekanis bata ringan sebagai material pasangan dinding.

Pengujian mekanis ini dilakukan menggunakan alat uji *Compression Testing Machine* ketika benda uji telah mencapai umur 14 hari. Nilai kuat tekan didapatkan dari pengujian antara beban retak maksimum bersama luas permukaan bidang tekan bata ringan.

A. Variasi AR0AB0

Pengujian kuat tekan bata ringan ini bepedomankan pada standar SNI 8640-2018. Bata ringan yang digunakan pada penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas nonstruktural, dengan nilai kuat tekan yang disyaratkan di atas 2 MPa. Berikut tabel hasil uji kuat tekan bata ringan variasi kontrol, AR0AB0,

Tabel 4. 16 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi AR0AB0

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas	Beban Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Ket.
	p	l	t				
1	149.13	153.73	150.12	22925.75	47	2.05	memenuhi
2	150.18	154.59	149.78	23216.33	55	2.37	memenuhi
3	149.57	150.05	150.22	22442.98	57	2.54	memenuhi
4	149.53	150.12	149.82	22447.44	50	2.23	memenuhi
Rata-rata				22758.13	52.25	2.3	memenuhi

Berdasarkan tabel 4.16, data pengujian kuat tekan pada Variasi AR0AB0 menunjukkan performa fasa keras yang stabil dengan nilai rata-rata beban tekan sebesar 52 KN dan capaian kuat tekan rata-rata sebesar 2,3 MPa. Seluruh sampel benda uji pada variasi ini secara konsisten menghasilkan nilai yang berada di atas ambang batas standar rencana, sehingga Variasi AR0AB0 secara keseluruhan dinyatakan memenuhi syarat mutu kuat tekan yang ditargetkan.

B. Variasi AR3AB2.5

Pengujian kuat tekan bata ringan ini berpedomankan pada standar SNI 8640-2018. Bata ringan yang digunakan pada penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas nonstruktural, dengan nilai kuat tekan yang disyaratkan di atas 2 MPa. Berikut tabel hasil data uji kuat tekan bata ringan variasi AR3AB2.5 sebagai berikut,

Tabel 4. 17 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi AR3AB2.5

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas	Beban Tekan (KN)	uat Tekan (MPa)	Ket.
	p	l	t				
1	151.02	152.10	150.2	22970.14	57	2.48	memenuhi
2	148.3	149.9	150.07	22230.17	52	2.25	memenuhi

Lanjutan Tabel 4. 17 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi AR3AB2.5

Kode Benda Uji	Dimensi	Luas	Beban Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Ket.		
3	150.01	150.90	149.13	22636.51	60	2.74	memenuhi
4	152.01	148.7	150.34	22603.89	81	3.58	memenuhi
Rata-rata				22610.18	62.5	2.76	memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.17, data pengujian kuat tekan pada Variasi AR3AB2.5 menunjukkan performa fasa keras yang stabil dengan nilai rata-rata beban tekan sebesar 62,5 KN dan capaian kuat tekan rata-rata sebesar 2,76 MPa. Seluruh sampel benda uji pada variasi ini secara konsisten menghasilkan nilai yang berada di atas ambang batas standar rencana, sehingga Variasi AR3AB2.5 secara keseluruhan dinyatakan memenuhi syarat mutu kuat tekan yang ditargetkan.

C. Variasi AR3AB5

Pengujian kuat tekan bata ringan ini berpedomankan pada standar SNI 8640-2018. Bata ringan yang digunakan pada penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas nonstruktural, dengan nilai kuat tekan yang disyaratkan di atas 2 MPa. Berikut tabel data uji kuat tekan bata ringan variasi AR3AB5,

Tabel 4. 18 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi AR3AB5

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas	Beban Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Ket.
	p	l	t				
1	150.11	149.23	150.01	22400.92	42	1.87	Belum memenuhi
2	151.21	148.88	147.97	22512.14	36	1.60	Belum memenuhi
3	150.44	149.76	150.25	22529.89	47	2.09	memenuhi
4	150.23	150.01	150.92	22536.00	38	1.69	Belum memenuhi
Rata-rata				22494.74	40.75	1.81	Belum memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.18, data pengujian kuat tekan pada Variasi AR3AB5 menunjukkan penurunan performa fasa keras dengan nilai rata-rata beban tekan

sebesar 40,75 KN dan capaian kuat tekan rata-rata 1,81 MPa. Mayoritas sampel benda uji (sampel 1, 2, dan 4) secara konsisten menghasilkan nilai yang berada di bawah ambang batas standar rencana, sehingga Variasi AR3AB5 secara keseluruhan dinyatakan tidak memenuhi syarat mutu kuat tekan yang ditargetkan.

D. Variasi AR3AB7.5

Pengujian kuat tekan bata ringan ini berpedomankan pada standar SNI 8640-2018. Bata ringan dimana dalam penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas nonstruktural, dengan nilai kuat tekan yang disyaratkan di atas 2 MPa. Berikut tabel data uji kuat tekan bata ringan variasi AR3AB7.5, sebagai berikut,

Tabel 4. 19 Hasil Uji Kuat Tekan Variasi AR3AB7.5

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas	Beban Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Keterangan
	p	l	t				
1	149.11	152.13	152.11	22684.10	35	1.54	Belum memenuhi
2	151.12	153.55	148.98	23204.48	33	1.42	Belum memenuhi
3	149.07	150.21	152.01	22391.80	27	1.21	Belum memenuhi
4	150.23	151.01	147.97	22686.23	21	0.93	Belum memenuhi
Rata-rata				22741.65	29	1.27	Belum memenuhi

Berdasarkan Tabel 4.19, data pengujian kuat tekan pada Variasi AR3AB7.5 menunjukkan penurunan performa dengan nilai rata-rata beban tekan sebesar 29 KN dan capaian kuat tekan rata-rata sebesar 1,27 MPa. Seluruh sampel benda uji pada variasi ini memiliki nilai yang berada di bawah ambang batas standar rencana, sehingga Variasi AR3AB7.5 secara keseluruhan dinyatakan tidak memenuhi syarat mutu kuat tekan yang ditargetkan.

E. Variasi AR3AB10

Pengujian kuat tekan bata ringan ini berdasarkan pada standar SNI 8640-2018. Bata ringan yang digunakan pada penelitian ini dikategorikan ke dalam kelas nonstruktural, dengan nilai kuat tekan yang disyaratkan lebih di atas 2 MPa. Berikut tabel hasil uji kuat tekan bata ringan variasi AR3AB10, pada tabel dibawah,

Tabel 4. 20 Data Uji Kuat Tekan Variasi AR3AB10

Kode Benda Uji	Dimensi			Luas	Beban Tekan (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Keterangan
	p	l	t				
1	150.32	152.13	149.55	22868.18	22	0.96	Belum memenuhi
2	150.27	151.10	150.12	22705.80	16	0.70	Belum memenuhi
3	149.61	149.40	152.10	22351.73	26	1.16	Belum memenuhi
4	149.88	152.21	151.32	22813.23	18	0.79	Belum memenuhi
Rata-rata				22684.74	20.15	0.90	Belum memenuhi

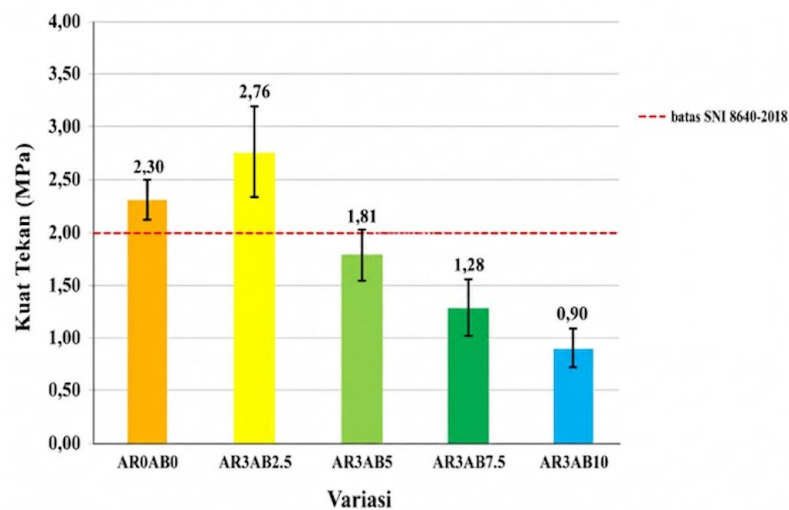
Berdasarkan Tabel 4.20, hasil pengujian kuat tekan pada Variasi AR3AB10 menunjukkan penurunan performa dengan nilai rata-rata beban tekan sebesar 20.15 KN dan capaian kuat tekan rata-rata dengan nilai 0.90 MPa. Seluruh sampel benda uji pada variasi ini menunjukan nilai yang berada di bawah ambang batas standar rencana, sehingga Variasi AR3AB10 secara keseluruhan dinyatakan tidak memenuhi syarat mutu kuat tekan yang ditargetkan.

Setelah dilakukan perhitungan terhadap masing-masing sampel pada setiap variasi campuran, diperoleh nilai representatif berupa rata-rata performa kuat tekan dari tiap kelompok benda uji. Data rekapitulasi dari pengujian kuat tekan pada seluruh variasi bata ringan disajikan secara ringkas pada tabel sebagai berikut,

Tabel 4. 21 Rekapitulasi Data Uji Kuat Tekan Bata Ringan

Tipe Variasi	Kuat Tekan Rata-Rata	Kuat Tekan SNI 8640-2018	Keterangan
AR0AB0	2.30	>2 MPa	memenuhi
AR3AB2.5	2.76	>2 MPa	memenuhi
AR3AB5	1.81	>2 MPa	Tidak memenuhi
AR3AB7.5	1.27	>2 MPa	Tidak memenuhi
AR3AB10	0.90	>2 MPa	Tidak memenuhi

Berdasarkan tabel 4.21, data pengujian kuat tekan pada seluruh variasi bata ringan, dapat disimpulkan bahwa penambahan persentase limbah abu dan arang tempurung kelapa memengaruhi performa mekanis bata ringan secara signifikan. Nilai kuat tekan terbesar adalah pada Variasi AR3AB2.5 dengan kuat tekan sebesar 2,76 MPa, yang mengalami peningkatan dibandingkan Variasi Kontrol sebesar 2,30 MPa. Namun, penambahan persentase bahan substitusi yang lebih tinggi pada Variasi AR3AB5, AR3AB7.5, dan AR3AB10 justru menurunkan kuat tekan di bawah standar baku mutu. Berdasarkan SNI 8640-2018, hanya Variasi AR0AB0 dan Variasi AR3AB2.5 yang dinyatakan memenuhi standar minimum kuat tekan bata ringan non-struktural (> 2 MPa), sedangkan Variasi AR3AB5, AR3AB7.5, dan AR3AB10 tidak memenuhi syarat. Berikut adalah grafik rekapitulasi hasil uji kuat tekan bata ringan,

**Gambar 4. 9** Grafik Rekapitulasi Uji Kuat Tekan Bata Ringan

Berdasarkan gambar grafik 4.9 dapat dihasilkan kesimpulan bahwa peningkatan variasi AR3AB2.5 menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata paling tinggi, yaitu 2,76 MPa. temuan ini menunjukkan bahwa penambahan abu tempurung kelapa pada komposisi tersebut memberikan peningkatan kuat tekan bata ringan hingga kadar optimum tertentu, sedangkan penambahan yang berlebihan justru menurunkan kekuatan bata ringan. Temuan tersebut sejalan dengan hasil penelitian Ranatunga dkk., (2023) yang menjelaskan bahwa abu tempurung kelapa ini reaktif sebab oleh interaksi antara abu dan kalsium hidroksida yang merupakan reaksi pada hidrasi semen, yang kemudian bereaksi menjadi kalsium silikat hidrat (C-S-H). Pembentukan fasa ini reaktan pada peningkatan pemadatan matriks dan kekuatan beton. Selain itu, abu tempurung kelapa membantu mengurangi makroporositas beton melalui reaksi pozzolanik dengan Ca(OH)_2 yang dihasilkan selama proses hidrasi semen. Selain itu, menurut Bentz & Stutzman, (1994) partikel abu yang sangat halus memberikan efek *filler* dengan mengisi pori-pori mikro pada bata ringan yang membuat struktur menjadi rapat diikuti kuat tekan meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa variasi AR3AB2.5 memiliki bentuk yang lebih padat dari pada variasi yang memiliki kadar substitusi yang lebih tinggi, meskipun secara bobot isi lebih rendah daripada bata ringan konvensional. Peningkatan kepadatan tersebut mengindikasikan bahwa efek *filler* dan reaksi *pozzolanik* masih bekerja secara optimal sehingga mampu meningkatkan kuat tekan bata ringan.

Namun, seiring dengan peningkatan kadar substitusi pada variasi AR3AB5 hingga AR3AB10, nilai kuat tekan mengalami penurunan yang signifikan hingga menyentuh titik terendah sebesar 0,90 MPa pada variasi AR3AB10, sehingga dikategorikan tidak memenuhi ambang batas minimal SNI 8640-2018. Penurunan kekuatan pada kadar substitusi yang tinggi ini dipicu oleh karakteristik arang tempurung kelapa yang sangat higroskopis atau haus air (Tarigan dkk., 2024). Partikel arang tersebut menyerap sebagian besar volume air bebas yang seharusnya dialokasikan untuk proses hidrasi semen. Akibatnya, rasio air semen (FAS) aktual yang tersedia di dalam matriks mengalami penurunan yang terlalu ekstrem dan membuat adonan fasa segar menjadi sangat kaku serta kehilangan kemudahan pengerjaannya (*workability*) (Kumar dkk., 2025).

Kondisi adonan yang terlalu kaku dan kering ini menjadi penyebab utama terjadinya keruntuhan struktur gelembung udara (*foam collapse*). Selain memicu pemadatan semu yang menaikkan bobot isi kering, FAS aktual yang terlalu rendah ini mengakibatkan proses hidrasi semen tidak dapat berjalan dengan sempurna. Fenomena ini sejalan dengan studi oleh Song dkk., (2026) yang menyatakan bahwa dalam sistem dengan ketersediaan air bebas yang sangat terbatas, proses hidrasi yang terganggu dapat memicu pembentukan struktur cangkang kosong (*unhydrated shell structures*) di sekeliling partikel semen yang bertindak sebagai cacat mikro internal dan mereduksi kekuatan tekan secara drastis. Kondisi ini diperparah oleh pembatasan semen murni akibat substitusi abu tempurung kelapa dalam persentase tinggi. Meskipun abu tersebut mengalami reaksi pozolanik, kapasitas mandiri untuk menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (CSH) jauh lebih sedikit dibandingkan dengan semen murni (Maheswari dkk., 2025). Ini sejalan dengan temuan oleh (Kim dkk., 2011) dimana peningkatan jumlah semen pada beton ringan berkorelasi dengan tingginya nilai kuat tekan di mana jumlah semen menjadi variabel utama yang berpengaruh positif terhadap hasil kuat tekan, sehingga akibat berkurangnya volume semen juga menurunkan kualitas kekuatan tekan pada bata ringan. Akibat berkurangnya total volume gel pengikat utama serta melimpahnya struktur mikro yang cacat dan rapuh, matriks bata ringan kehilangan kemampuan mekanisnya dalam menahan beban tekan.

4.6 Analisis Hasil Bobot Isi dan Kuat Tekan Bata Ringan

Pada prinsipnya, peningkatan nilai bobot isi kering akan diikuti oleh peningkatan kuat tekannya akibat berkurangnya volume porositas total di dalam beton (Memis & Sahin, 2019). Namun, hasil pengujian pada penelitian substitusi arang dan abu tempurung kelapa ini menampilkan fenomena yang berbeda, khususnya ketika memasuki variasi substitusi kadar tinggi.

Pada fasa awal substitusi hingga variasi optimum AR3AB2.5, korelasi positif tersebut masih berjalan dengan baik. Kehadiran abu dalam jumlah terbatas mampu mengisi pori-pori mikro secara optimal melalui efek *filler* (Bentz & Stutzman, 1994) serta menghasilkan tambahan gel kalsium silikat hidrat (CSH) melalui reaksi

pozolanik bersama $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Ranatunga dkk., 2023). Hal ini menyebabkan struktur mortar menjadi lebih rapat dan kompak, sehingga bobot isi terkendali dengan baik dan kuat tekan mengalami kenaikan hingga mencapai titik tertinggi sebesar 2,76 Mpa pada Variasi AR3AB2.5.

Sebaliknya, anomali korelasi terjadi pada variasi tinggi (AR3AB7,5 dan AR3AB10). Pada fasa ini, nilai bobot isi kering mengalami peningkatan, namun nilai kuat tekannya justru turun drastis hingga menyentuh angka 0,90 MPa. Berdasarkan analisis keterkaitan, fenomena bertolak belakang ini dikendalikan oleh,

1. Pemadatan Semu Akibat *Foam Collapse*

Meningkatnya nilai bobot isi kering pada variasi tinggi bukan disebabkan oleh pemadatan alami dari pasta semen yang semakin bermutu, melainkan akibat adonan fasa segar yang terlalu kaku dan kering karena sifat arang yang sangat higroskopis atau haus air (Tarigan dkk., 2024). Kekakuan ini menyebabkan runtuhnya struktur gelembung udara (*foam collapse*), sehingga volume rongga udara makro menyusut dan membuat bobot isi beton terukur lebih berat.

2. Cacat Mikro Struktural Semen

Di sisi lain, karena sebagian besar air bebas telah diserap ke dalam struktur pori mikro arang (Tarigan dkk., 2024), rasio air semen (FAS) aktual yang tersisa untuk hidrasi semen menjadi sangat rendah (Kumar dkk., 2025). Kekurangan air ini memicu pembentukan struktur cangkang kosong (*unhydrated shell structures*) di sekeliling partikel semen yang bertindak sebagai cacat mikro struktural (Song dkk., 2026), serta membatasi volume gel pengikat CSH yang terbentuk akibat minimnya porsi semen murni (Maheswari dkk., 2025).

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi antara bobot isi dan kuat tekan pada penelitian ini tidak berjalan searah pada variasi tinggi. Kenaikan bobot isi yang terjadi merupakan pemadatan semu akibat hilangnya pori makro busa, sementara penurunan kuat tekan yang drastis merupakan dampak dari melimpahnya cacat mikro struktural dan rapuhnya matriks pengikat di dalam struktur bata ringan.

4.7 Analisis Mutu dan Biaya pada produksi Bata Ringan

Kualitas suatu material konstruksi merupakan aspek yang penting karena berpengaruh terhadap karakteristik fisik maupun sifat mekanis material tersebut. Pada penelitian ini, penilaian mutu bata ringan dilakukan dengan mengacu pada ketentuan yang tercantum dalam SNI 8640-2018, sehingga hasil pengujian dapat dibandingkan dengan standar yang berlaku untuk menentukan kelayakan mutu produk yang dihasilkan. berdasarkan syarat mutu SNI, nilai maksimum penyerapan air yang diperbolehkan adalah sebesar 25%, dan kuat tekan lebih dari 2 MPa.

Hasil pengujian menunjukkan bata ringan konvensional memiliki bobot isi rata-rata sebesar 1059.58 kg/m³ sehingga memenuhi syarat kategori berat 1100 kg/m³. Pengujian daya serap mendapatkan hasil sebesar 20.30%. Hasil pengujian kuat tekan tertinggi menunjukkan bata ringan inovasi variasi AR3AB2.5 memiliki bobot isi sebesar 1050.80 kg/m³ sehingga memenuhi syarat kategori berat 1100 kg/m³. Pengujian daya serap memiliki persentase penyerapan air sebesar 22.45%. Karena nilai tersebut berada di bawah ambang batas maksimal SNI, maka bata ringan inovasi ini dinyatakan memenuhi syarat mutu fisik dan aman digunakan.

Untuk mengetahui kelayakan ekonomis dari inovasi yang dikembangkan, maka perlu dilakukan perbandingan Rancangan Anggaran Biaya (RAB) antara pembuatan bata ringan konvensional dengan bata ringan inovasi yang menghasilkan persentase optimum, yang mana dalam analisis ini dipilih variasi yang menunjukkan kuat tekan optimum yakni Variasi AR3AB2.5.

Dalam melakukan analisis harga satuan pekerjaan, estimasi biaya komponen material konvensional seperti semen, pasir, dan air mengacu pada data resmi Harga Satuan Dasar (HSD) yang dikhususkan untuk wilayah Kota Semarang. Data tersebut bersumber dari portal MAS PETRUK (Informasi Harga Satuan Pekerjaan Konstruksi) Jawa Tengah yang dikelola oleh Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga dan Cipta Karya (DPU BINMAR CIPKA) Provinsi Jawa Tengah Tahun 2025. Pemilihan acuan yang spesifik untuk wilayah Kota Semarang ini bertujuan agar perhitungan biaya dasar material tetap representatif, valid, dan sesuai dengan standar harga pasar yang berlaku di lokasi penelitian yaitu Fakultas Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro yang berlokasi di Kota Semarang.

Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana efisiensi biaya yang dapat dicapai dari pemanfaatan limbah abu dan arang tempurung kelapa sebagai bahan substitusi semen dan pasir.

A. Analisis Biaya Bata Ringan Konvensional

Tahapan awal dalam mengevaluasi efisiensi biaya pada penelitian ini dimulai dengan menyusun analisis anggaran untuk pekerjaan bata ringan konvensional. Langkah ini untuk memberikan gambaran nyata mengenai estimasi biaya per meter kubik pembuatan bata ringan. Hasil perhitungan harga satuan dasar yang meliputi indeks bahan yang digunakan dalam pembuatan bata ringan.

Berikut adalah Analisis Harga tentang bahan penyusun bata ringan sebagai berikut,

Tabel 4. 22 Analisis Harga Bata Ringan Konvensional

No.	Uraian	Satuan	Harga Satuan	Volume	Harga
1	Semen	Kg	Rp1.401,00	321,4	Rp450.281,40
2	Pasir	Kg	Rp276,00	642,8	Rp177.412,80
3	Air	L	Rp150,00	160,7	Rp24.105,00
4	Foam	L	Rp30.000,00	1	Rp30.000,00
5	Air Foam	L	Rp150,00	40	Rp6.000,00
Jumlah Bahan					Rp687.799,20

Sumber : (Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga dan Cipta Karya (DPU

BINMAR CIPKA) Provinsi Jawa Tengah, 2025)

Berdasarkan hasil perhitungan analisis harga yang telah disajikan pada tabel 4.22, di dapati total estimasi biaya pekerjaan pemasangan dinding secara konvensional adalah sebesar Rp687.799,20. Nilai nominal total ini mencakup seluruh akumulasi pembiayaan komponen utama material. Angka ini selanjutnya akan digunakan sebagai nilai parameter pembanding dasar dalam mengevaluasi efisiensi anggaran terhadap produk inovasi bata ringan pada variasi campuran berikutnya.

B. Analisis Biaya Bata Ringan Variasi B (AR3AB2.5)

Perhitungan anggaran biaya kemudian dilanjutkan pada perhitungan harga untuk bata ringan Variasi AR3AB2.5. Analisis harga satuan pekerjaan ini

disusun dengan mengintegrasikan nilai ekonomi dari persentase bahan tambah berupa limbah ke dalam komposisi campuran. Langkah ini dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi biaya yang dihasilkan dari inovasi substitusi material dibandingkan dengan metode konvensional yang telah dihitung sebelumnya.

Dalam perencanaan analisis harga satuan untuk komponen inovasi ini, material arang tempurung kelapa dan abu tempurung kelapa diasumsikan tidak memiliki nilai ekonomis atau bernilai Rp0,00. Penetapan nilai nol rupiah ini didasarkan pada kondisi aktual selama pelaksanaan penelitian skala laboratorium, di mana kedua material tersebut diperoleh secara langsung sebagai limbah yang diolah mandiri sehingga dapat diasumsikan tidak mengeluarkan biaya.

Namun, perlu diakui bahwa implikasi asumsi ini berpotensi mengalami perubahan apabila sistem produksi bata ringan variasi ini diimplementasikan dalam skala industri yang masif. Pada skala pabrikasi, ketersediaan pasokan dalam volume besar kemungkinan besar tidak lagi bernilai nol (Rp0,00) akibat adanya konsekuensi biaya logistik, proses pengumpulan, maupun biaya pengondisian material agar memenuhi standar konsistensi pabrik.

Berikut adalah Analisis Harga tentang bahan penyusun bata ringan variasi sebagai berikut,

Tabel 4. 23 Analisis Harga Bata Ringan Variasi

No.	Uraian	Sat.	Harga Satuan	Volume	Harga
1	Semen	Kg	Rp1.401,00	313,365	Rp439.024,37
2	Pasir	Kg	Rp276,00	623,516	Rp172.090,42
3	Air	L	Rp150,00	160,7	Rp24.105,00
4	Foam	L	Rp30.000,00	1	Rp30.000,00
5	Air Foam	L	Rp150,00	40	Rp6.000,00
6	Abu tempurung kelapa	Kg	Rp0,00	0,156	Rp0,00
7	Arang tempurung kelapa	Kg	Rp0,00	0,315	Rp0,00
Jumlah Bahan					Rp671.219,78

Sumber : (Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga dan Cipta Karya (DPU
BINMAR CIPKA) Provinsi Jawa Tengah, 2025)

Berdasarkan hasil perhitungan harga satuan pada tabel 4.23 untuk produk inovasi, diperoleh total biaya untuk pasangan bata ringan Variasi AR3AB2.5 sebesar Rp671.219,78. Nilai nominal total ini mencakup seluruh akumulasi pembiayaan komponen utama material.

C. Perbandingan Harga

Setelah melakukan analisis harga satuan terhadap masing-masing metode pelaksanaan, tahapan berikutnya adalah melakukan studi komparasi untuk mengetahui sejauh mana tingkat efisiensi anggaran yang dihasilkan oleh produk inovasi. Analisis perbandingan biaya ini ditinjau berdasarkan parameter volume, yaitu skala kebutuhan laboratorium untuk konversi volume yang setara dalam satuan meter kubik. Rangkuman perbandingan nilai ekonomis beserta selisih penghematannya disajikan secara terstruktur pada tabel berikut,

Tabel 4. 24 Perbandingan Harga Bata Konvensional dan Variasi

Variasi	Harga per m ³
Bata Ringan Konvensional	Rp687.799,20
Bata Ringan Variasi AR3AB2.5	Rp671.219,78
Selisih	Rp16.579,42

Berdasarkan Tabel 4.24, dilakukan analisis komparasi ekonomi untuk mengetahui tingkat efisiensi anggaran dari kedua material. Pada lingkup pengujian laboratorium untuk satuan volume yang setara per meter kubik, Bata Ringan Variasi AR3AB2.5 memiliki harga Rp671.219,78, sedangkan metode konvensional membutuhkan biaya sebesar Rp687.799,20. Dengan demikian, inovasi material pada Variasi AR3AB2.5 mampu menghasilkan nilai penghematan anggaran belanja konstruksi sebesar Rp16.579,42. Dengan demikian, penggunaan bata ringan Variasi AR3AB2.5 mampu memberikan efisiensi atau penurunan biaya produksi sebesar 2,41% per m³ dari harga bata ringan konvensional.

Berdasarkan keseluruhan hasil penelitian serta analisis yang telah dilaksanakan, diperoleh kesimpulan yaitu inovasi bata ringan dengan variasi substitusi abu dan arang tempurung kelapa memiliki kelayakan yang tinggi untuk diimplementasikan. Dari aspek ekonomi, variasi produk inovasi ini

terbukti lebih ekonomis dibandingkan dengan bata ringan konvensional karena mampu memberikan efisiensi anggaran dan menaikkan nilai kualitas yakni menurunkan bobot isi bata ringan tetapi tetap menaikkan kuat tekan. Dengan demikian, pemanfaatan kedua limbah tempurung kelapa tersebut berhasil mewujudkan material yang memenuhi standar mutu sekaligus memiliki nilai ekonomis yang unggul.