

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Sifat Fisik Material Penyusun Beton ECC

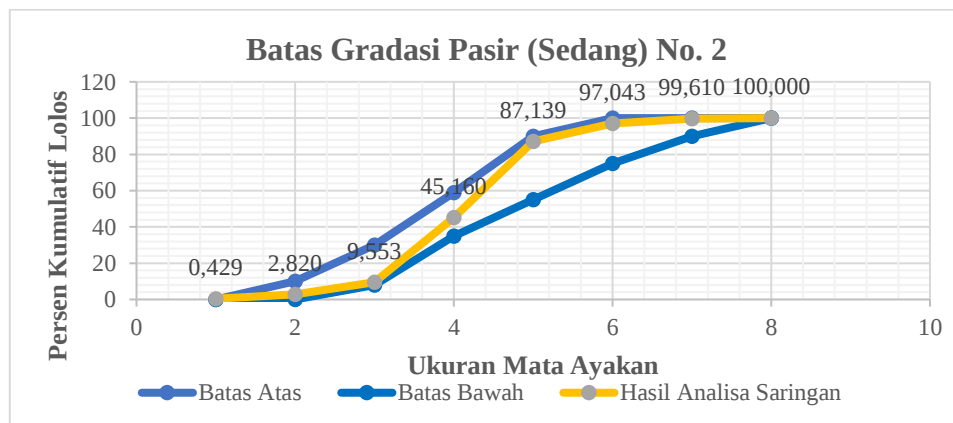
Data dalam penelitian ini meliputi pengujian sifat fisik dari material penyusun beton ECC. Hasil pengujian sifat fisik material yang dilakukan pada Agregat Halus, Pasir Silika dan Semen Portland dapat dilihat pada beberapa sub-bab di bawah ini.

4.1.1 Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus

Berdasarkan hasil pengujian analisis saringan terhadap agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini, diperoleh nilai modulus halus butir dan distribusi gradasi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\text{Modulus Halus Butir 1} &= \frac{358,2}{100} \\ &= 3,582\end{aligned}$$

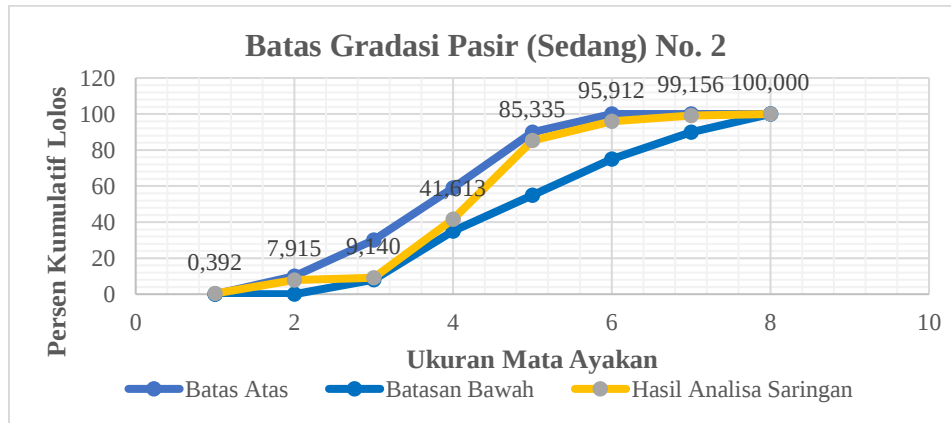
Pengujian Analisis Saringan 1 didapatkan grafik zona gradasi agregat halus antara hubungan persen butir lolos dan ukuran saringan agregat dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Batas Gradasi Pasir Analisis Saringan 1
(Sumber: Data Penulis yang Diolah Berdasarkan SNI 03-2834-2000, 2026)

$$\begin{aligned}\text{Modulus Halus Butir 2} &= \frac{360,5}{100} \\ &= 3,605\end{aligned}$$

Pengujian Analisis Saringan 2 didapatkan grafik zona gradasi agregat halus yang dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Batas Gradasi Pasir Analisis Saringan 2
(Sumber: Data Penulis yang Diolah Berdasarkan SNI 03-2834-2000, 2026)

Dari kedua pengujian analisis saringan sebelumnya dapat diambil kesimpulan sesuai pada SNI 03-2834-2000 bahwa zona gradasi agregat halus yang digunakan berada di zona gradasi nomor 2 yang termasuk pada pasir sedang. Hal tersebut berdasarkan pada tiap ukuran saringan dimana hasil penelitian menunjukkan nilai yang sesuai pada tiap ukuran saringan dan berdasarkan hasil perhitungan rata-rata Modulus Butir Halus (MHB) agregat halus didapat sebesar 3,73. Hasil Ini memenuhi standar SNI 1968 – 1990, dimana syarat ketetapannya yaitu 1,5 – 3,8.

Keterkaitan terhadap gradasi agregat halus dan kualitas beton telah di bahas pada penelitian (Fattah & Nabi, 2017). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa gradasi agregat halus zona 1 dan zona 2 cenderung mempengaruhi karakteristik beton yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh distribusi ukuran butir yang lebih seimbang sehingga mampu meningkatkan kepadatan campuran dan mengurangi rongga antar partikel.

Selain menggunakan agregat halus zona 2, penelitian ini juga memanfaatkan pasir silika sebagai material pengisi tambahan beton ECC. Kombinasi antara agregat halus dengan gradasi yang seimbang dan pasir silika yang memiliki ukuran lebih halus

diharapkan dapat meningkatkan matriks homogenitas dan mendukung sifat mekanis beton ECC.

4.1.2 Pengujian Kadar Air Agregat Halus

Hasil perhitungan pengujian kadar air agregat halus pada penelitian ini yang mengacu pada standar referensi SNI 03-1971-1990 maupun ASTM C566, diperoleh nilai kadar air sebesar 4,866%. Hasil pengujian kadar air agregat halus tersebut menunjukkan bahwa agregat berada dalam kondisi lembab apabila dibandingkan dengan nilai penyerapan agregat.

4.1.3 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Hasil perhitungan pengujian kadar lumpur agregat halus, diperoleh nilai kadar lumpur sebesar 1,010%. Berdasarkan ASTM C33, nilai dari hasil pengujian tersebut rendah dan termasuk memenuhi standar kadar lumpur agregat halus yaitu kurang dari 3% untuk beton terabrasi maupun 5% untuk beton tak terabrasi.

4.1.4 Pengujian Bobot Isi Agregat Halus

Hasil pengujian bobot isi gembur agregat halus didapatkan berat padat sebesar 1507,45 kg/m³ sedangkan untuk berat gemburnya sebesar 1375,23 kg/m³. Berdasarkan ASTM C29, berat yang didapat telah memenuhi standar bobot isi gembur agregat halus yaitu mendekati nilai ≥ 1000 kg/m³.

4.1.5 Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Perhitungan pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus (pasir) didapat nilai berat jenis kering sebesar 2,528. Berat jenis jenuh permukaan (SSD) sebesar 2,554. Berat jenis semu sebesar 2,595. Persentase penyerapan air sebesar 1,031%. Nilai berat jenis tersebut menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan termasuk dalam kategori agregat normal karena berada pada kisaran umum 2,50–2,60

begitupun juga untuk persentase penyerapannya yang berguna dalam pengendalian kebutuhan air efektif (SNI 1970-2008).

4.1.6 Pengujian Kadar Organik Agregat Halus

Hasil pengujian kadar bahan organik pada agregat halus yang digunakan pada penelitian ini menunjukkan bahwa warna larutan yang terbentuk setelah perendaman menggunakan larutan NaOH 3% selama 24 jam setara dengan *Circular Disk 14* (*Organic Plate No. 3*). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kandungan bahan organik masih berada pada batas yang umumnya dapat diterima untuk digunakan sebagai material penyusun beton yaitu tidak menghasilkan warna lebih gelap dari warna standar *Circular Disk 14* (*Organic Plate No. 3*) berdasarkan ASTM C40 – C40M.

4.1.7 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik Material Agregat Halus

Pada subbab ini menyajikan rekapitulasi hasil pengujian sifat fisik material agregat halus yang digunakan dalam penelitian. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada tabel berikut sebagai acuan dalam pembahasan karakteristik material yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4. 1 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik Material Agregat Halus

No	Nama Pengujian	Referensi Standar	Satuan	Syarat Standar	Hasil
1	Analisis Saringan	- SNI 03-1968-2010 (Metode Kerja) - ASTM C33 - ASTM C136-14 (Metode Kerja)	-	2.3 s/d 3.8	3,73
2	Kadar Air	- ASTM C566 (Metode Kerja) - SNI 1971:2011 (Metode Kerja)	%	Tidak Bersyarat	4,87

3	Kadar Lumpur	- PBI 1971 - ASTM C33 - SNI 8321:2016	%	- Beton Abrasi $\leq 3\%$ - Beton Non Abrasi $\leq 5\%$	0,87
4	Kadar Organik	- ASTM C40 - SNI 2816:2014	-	Tidak gelap dari warna standar ($\leq$ No. 3)	No. 3
5	Berat Isi Gembur Padat	- ASTM C29 (Metode Kerja) - SNI 03-4804- 1998 (Metode Kerja)	kg/m ³		1375,2 1507,5
6	Berat Jenis Dan Penyerapan	- SNI 1970:2008 (Metode Kerja)	-	Tidak Bersyarat	2,528
	Berat Jenis Kondisi Kering	- ASTM C33	-		2,595
	Berat Jenis Kondisi Jenuh	- ASTM C 127	-		2,554
	Berat Jenis Kondisi SSD Penyerapan	(Metode Kerja)	%		1,031

(Sumber: Data Penulis, 2026)

4.1.6 Pengujian Berat Jenis Semen Portland dan Pasir Silika

Berdasarkan hasil pengujian berat jenis semen, diperoleh nilai berat jenis semen portland dengan nilai 3,01 gr/cm³. Hasil pengujian tersebut memiliki karakteristik yang mendekati nilai standar berat jenis umumnya yaitu $\pm 3 - 3,15$ gr/cm³ (SNI 2531-2011).

Hasil dari pengujian berat jenis pasir silika menunjukkan nilai sebesar 2,634 gr/cm³. Jika dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Suhelmidawati et al. (2023) dan Turk & Nehdi (2021), hasil ini sejalan dan berada dalam rentang berat jenis pasir silika yaitu 2,60 – 2.70 gr/cm³.

4.1.7 Pengujian Konsistensi Semen

Berdasarkan hasil pengujian konsistensi normal semen menggunakan alat Vicat, diperoleh kebutuhan air sebesar 27% terhadap berat semen dengan nilai penetrasi konsistensi semen sebesar 11 mm. Nilai konsistensi normal tersebut menunjukkan bahwa semen memiliki kebutuhan air yang masih berada dalam kisaran umum semen

Portland, yaitu sekitar 25%–27%. Berdasarkan SNI 03-6826-2002 dan ASTM C187, persentase air yang digunakan tersebut mencapai penetrasi standar konsistensi normal semen yaitu 10 ± 1 mm.

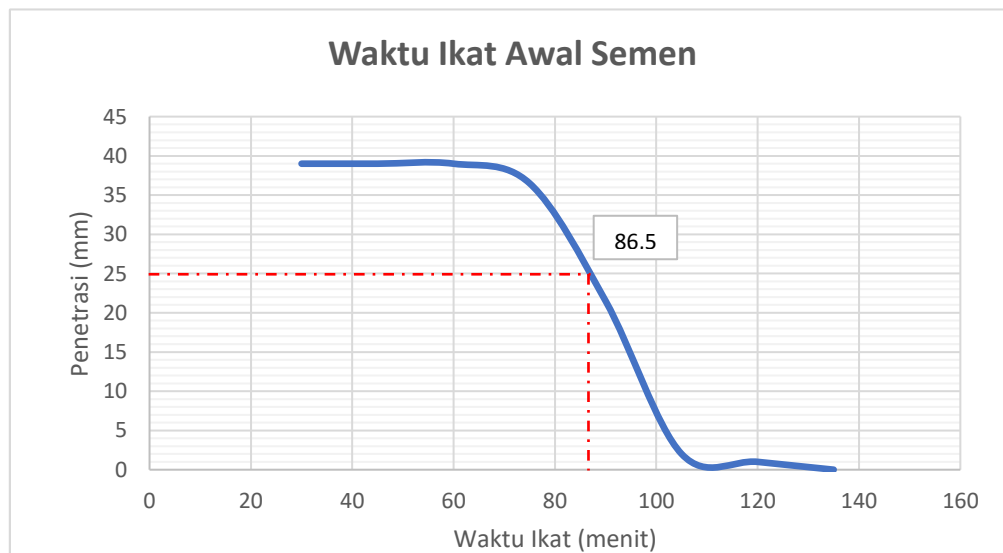
4.1.8 Pengujian Waktu Ikat Awal Semen

Tabel 4. 2 Waktu Ikat Awal Semen

No	Menit	Penetrasi (mm)
1	30	39
2	45	39
3	60	39
4	75	36,5
5	90	21,5
6	105	2
7	120	1
8	135	0

(Sumber: Data Penulis, 2026)

$$\begin{aligned} \text{Waktu Ikat Awal Semen} &= \left(\frac{90 - 75}{36,5 - 21,5} \right) \times (36,5 - 25) + 75 \\ &= 86,5 \text{ menit} \end{aligned}$$



Gambar 4. 3 Grafik Waktu Ikat Awal Semen
(Sumber: Data Penulis, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat vicat, diperoleh penetrasi jarum vicat mencapai nilai 25 mm pada 86,5 menit sebagai waktu ikat awal semen. Pengujian yang diperoleh menunjukkan bahwa semen yang digunakan memiliki waktu kerja yang cukup untuk proses pencampuran, pengadukan, dan pengecoran yaitu tidak kurang dari 45 menit berdasarkan SNI 03-6827-2002 dan ASTM C191-19.

4.1.8 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik Material Semen

Pada subbab ini menyajikan rekapitulasi hasil pengujian sifat fisik material semen Portland yang digunakan dalam penelitian. Rekapitulasi hasil pengujian disajikan pada tabel berikut sebagai acuan dalam pembahasan karakteristik material yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 4. 3 Rekapitulasi Hasil Pengujian Sifat Fisik Material Semen Portland

No	Nama Pengujian	Referensi Standar	Satuan	Syarat Standar	Hasil
1	Berat Jenis	- SNI 15-2531-1991 (Metode Kerja) - SNI 2531-2015 (Metode Kerja) - ASTM C188 (Metode Kerja)	g/cm ³	3,00 g/cm ³ - 3,15 g/cm ³	3,01
2	Konsistensi Normal	- SNI 03-6826-2002 (Metode Kerja) - ASTM C187 (Metode Kerja)	mm	10 mm ±1 mm	11
3	Waktu Ikat Awal	- SNI 03-6827-2002 (Metode Kerja) - ASTM C191 - 19 (Metode Kerja)	menit	Tidak Bersyarat	86,5

(Sumber: Data Penulis, 2026)

4.2 Perencanaan Campuran Beton ECC (*Mix Design*)

Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan yang mengacu terhadap *mix design* peneliti terdahulu sebagai dasar perancangan campuran beton *Engineered*

Cementitious Composites (ECC). Karena hingga saat ini belum terdapat standar baku tentang perencanaan campuran beton ECC, *mix design* yang diacu merupakan dari penelitian terdahulu yang telah divalidasi yaitu Wardana et al. (2025) yang juga mengacu terhadap penelitian (Bright et al., 2018). Selanjutnya pada *mix design* penelitian ini, dilakukan beberapa improvisasi melalui penyesuaian komposisi material dan variabel penelitian yang digunakan oleh penulis.

Penyesuaian pada penelitian ini meliputi variasi penggunaan serat mikro, bahan tambah kimia, rasio perbandingan material, dan koreksi kebutuhan material dalam satuan volume untuk memperoleh campuran beton ECC dengan *workability* yang optimal dan tetap mempertimbangkan prinsip dasar beton ECC sesuai pada buku (Li, 2007). Berikut beberapa perbandingan *mix design* dari beberapa penelitian yang telah disebutkan sebelumnya.

Tabel 4. 4 Perbandingan *Mix Design* Penelitian Terdahulu

Jurnal Referensi	Mutu Rencana (MPa)	Semen (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	Agregat Halus (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	Air (kg/m ³)
Wardana et al., 2025	20	320	96	226	3,52	144
Bright et al., 2018	30	320	96	2226	-	144

(Sumber: Diolah dari Wardana et al., 2025, dan Bright et al., 2018)

Tabel 4. 5 Rasio Perbandingan *Mix Design* ECC Penelitian Terdahulu

Jurnal Referensi	Semen (kg/m ³)	Binder (kg/m ³)	Agregat Halus (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	W/C
Wardana et al., 2025	1,0	0,3	0,7	0,011	0,45
Bright et al., 2018	1,0	0,3	7,0	-	0,5

(Sumber: Diolah dari Wardana et al., 2025, dan Bright et al., 2018)

Berdasarkan kedua referensi *mix design* beton *Engineered Cementitious Composite* (ECC) tersebut, penelitian (Wardana et al., 2025) yang paling mendekati desain campuran tipikal ECC pada Tabel 2.1. Penelitian (Bright et al., 2018) setelah

dilakukan uji coba (*trial*) melalui pembuatan benda uji oleh penulis, tidak menunjukkan sifat beton ECC yang memadat sendiri sesuai pada prinsip dasar beton ECC yang ada pada buku *Engineered Cementitious Composites* (Li, 2007a). Untuk rincian lebih lanjut, penelitian (Wardana et al., 2025) menggunakan bahan *binder* pasir nanosilika sedangkan (Bright et al., 2018) menggunakan *fly ash*.

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan acuan *mix design* dari penelitian (Wardana et al., 2025) yang selanjutnya penulis melakukan pengembangan terhadap koreksi kebutuhan material pencampurnya. Penulis mengasumsikan densitas beton ECC dengan nilai 2500 kg/m³. Berikut beberapa perhitungan koreksi kebutuhan material yang dapat dicari menggunakan persamaan-persamaan di bawah ini.

a. Perhitungan

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$Mc_{w1} = \left((-FA) \times \frac{(Mc - Abs)}{100} \right) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$Mc_{w2} = W + Mc_{w1} \dots\dots\dots (4.2)$$

$$Mc_{fa} = FA + \left(FA \times \left(\frac{Mc}{100} \right) \right) \dots\dots\dots (4.3)$$

$$Adwc = Mc_{w2} - (Mc_{w2} \times W_{reduce} \%) \dots\dots\dots (4.4)$$

$$M_n = F \times M_r \dots\dots\dots (4.5)$$

Keterangan:

ρ = Densitas Beton ECC

M_n = Massa material baru

F = Faktor penyesuaian

M_r = Massa material referensi

Mc_{w1} = Koreksi material air awal

FA = Massa material agregat halus baru

Mc = Kadar air agregat halus yang digunakan

Abs = Penyerapan agregat halus yang digunakan

Mc_{w2} = Koreksi material air akhir

W = Massa material air baru

$Adwc$ = Koreksi air akibat *admixture*

W_{reduce} = persentase pengurangan air akibat *admixture* (Tabel 3.1) sesuai lembar data teknis produk *admixture* yang digunakan, pada penelitian ini menggunakan 30%

b. Contoh Perhitungan

$$\begin{aligned} M_n &= 144 \text{ kg/m}^3 \times 3,16726 \\ &= 456,09 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Kalikan seluruh material referensi dengan faktor penyesuaian hingga total densitas seluruh material mencapai 2500 kg/m^3 .

$$\begin{aligned} Mc_{w1} &= \left((-456,09 \text{ kg/m}^3) \times \frac{(4,87 - 1,03)}{100} \right) \\ &= -27,49 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mc_{w2} &= 456,09 \text{ kg/m}^3 + (-27,49 \text{ kg/m}^3) \\ &= 428,60 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Mc_{fa} &= 715,80 \text{ kg/m}^3 + \left(715,80 \text{ kg/m}^3 \times \left(\frac{4,87}{100} \right) \right) \\ &= 750,66 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Adwc &= 428,60 \text{ kg/m}^3 - (428,60 \text{ kg/m}^3 \times 30\%) \\ &= 300,02 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

Tabel 4. 6 Proporsi Kebutuhan Material Pencampur Beton ECC

No	Material	Kebutuhan Material (kg/m ³)	Koreksi Material (kg/m ³)	Koreksi Air Akibat HRWR (kg/m ³)	Penyesuaian Berat (kg/m ³)
1	Air	456,09	428,60	300,02	315,31
2	Semen	1013,52	1013,52	1013,52	1065,17
3	Agregat Halus	715,80	750,66	750,66	788,91
4	Pasir Silika	304,06	304,06	304,06	319,55
5	HRWR	10,54	10,54	10,54	11,08
	Densitas	2500,01	2507,38	2378,80	2500,01

(Sumber: Data Penulis yang Diolah Berdasarkan Mix Design Wardana et al., 2025, 2026)

Tabel 4. 7 Rasio Perbandingan *Mix Design* ECC

Semen (kg/m ³)	Pasir Silika (kg/m ³)	Agregat Halus (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)	W/C
1,0	0,3	0,7	0,0104	0,30

(Sumber: Data Penulis, 2026)

4.3 Pengujian *Slump Flow*

Pengujian *slump flow* pada penelitian ini berasal dari empat variasi campuran beton ECC yang dibedakan berdasarkan kandungan serat mikro yang digunakan. Variasi tersebut terdiri atas beton normal (BN) sebagai kontrol, dan beton serat mikro (BSMi) yang dibedakan persentase kandungan seratnya yang masing-masing menunjukkan kadar serat sebesar 0,5%;0,75%;1%. Hasil pengukuran *slump flow* dari setiap variasi benda uji selanjutnya dirangkum dan disajikan pada tabel berikut ini

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian *Slump Flow* Beton ECC

Nama Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Diameter (mm)				Rata-Rata (mm)	Γ
		1	2	3	4		
BN	7	765	715	730	740	737,5	6,375
BSMi 0,5%		525	520	515	505	516,25	4,1625
BSMi 0,75%		415	405	400	390	402,5	3,025
BSMi 1%		310	295	315	290	302,5	2,025
BN	14	680	685	690	680	683,75	5,8375
BSMi 0,5%		660	630	615	595	625	5,25
BSMi 0,75%		455	440	445	450	447,5	3,475
BSMi 1%		330	325	320	330	326,25	2,263
BN	28	815	840	845	830	832,5	7,325
BSMi 0,5%		635	620	600	615	617,5	5,175

BSMi 0,75%	390	380	395	380	386,25	2,8625
BSMi 1%	270	275	270	265	270	1,7

(Sumber: Data Penulis, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada tabel 4.8, terlihat bahwa dengan penambahan kadar serat di setiap variasi dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap nilai *slump flow*. Berdasarkan hasil analisis, penurunan nilai *slump flow* seiring bertambahnya kadar menunjukkan berkurangnya kemampuan alir campuran beton seperti yang disajikan pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Rata-Rata dan Persentase Penurunan *Slump Flow*

Nama Benda Uji	Rata-Rata		Γ	Rentang Kadar Serat	Persentase Penurunan
	Diameter (mm)	Persentase Penurunan			
BN	751,25	-	6,51		
BSMi 0,5%	586,25	21,96	4,86	BSMi 0,5% - 0,75%	29,71
BSMi 0,75%	412,08	45,15	3,12		
BSMi 1%	299,58	60,12	2,00	BSMi 0,75% - 1%	27,30

(Sumber: Data Penulis, 2026)

Dapat disimpulkan dari hasil pengujian tabel 4.9, setiap interval peningkatan kadar serat sebesar 0,25% menyebabkan penurunan kemampuan alir dengan rentang persentase 27,30% sampai dengan 29,71%. Menurut Li (2007), salah satu karakteristik ECC haruslah memiliki kemampuan alir yang tinggi sehingga menjamin distribusi serat yang merata dalam matriks yaitu nilai Γ tidak kurang dari 2,75. Berdasarkan tabel 4.8 dan 4.9, beton ECC variasi normal dan serat 0,5% masih menunjukkan *slump flow* yang relatif baik sehingga proses pencampuran, penuangan, dan pemadatan dapat dilakukan dengan lebih mudah. Sebaliknya untuk variasi serat 0,75% dan 1% mengalami penurunan nilai *slump flow* yang cukup signifikan sehingga campuran menjadi lebih kaku dan sulit mengalir.

Fenomena ini sangat berpengaruh terhadap proses pencampuran apabila dilakukan secara konvensional menggunakan *concrete mixer* ataupun pengadukan manual seperti yang dilakukan pada penelitian ini. Penurunan *workability* akibat bertambahnya kadar serat berpotensi menyebabkan distribusi serat menjadi kurang homogen sehingga mengurangi efektivitas mekanisme dan kualitas beton ECC yang dihasilkan tanpa bantuan teknologi pencampuran khusus. Hasil penelitian ini masih sejalan berdasarkan (Li, 2007).

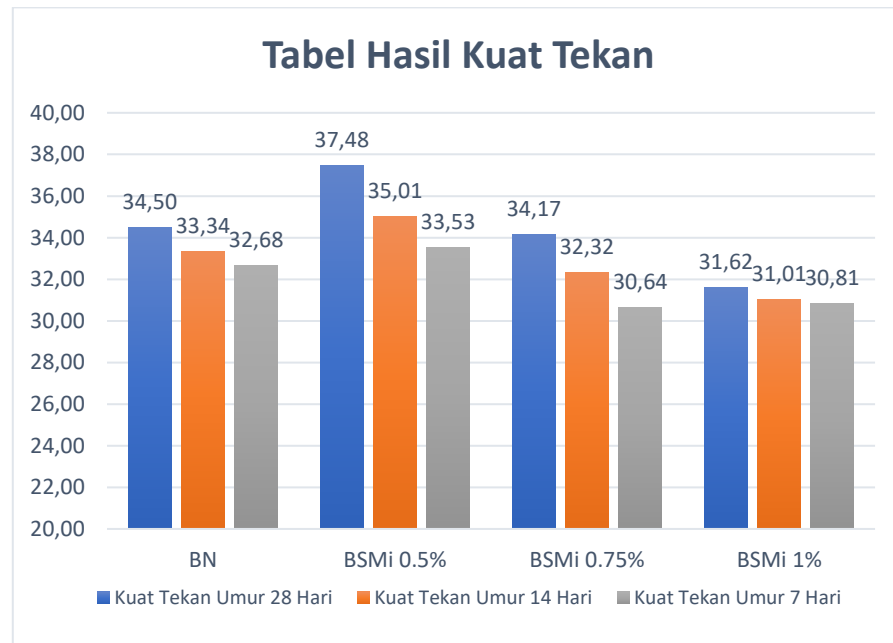
4.4 Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder

Benda uji silinder yang digunakan untuk di uji tekan yaitu berdimensi 10 cm x 20 cm. Berdasarkan hasil pengujiannya, diperoleh kuat tekan yang dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4. 10 Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Silinder

Nama Benda Uji	Umur Benda Uji					
	7 Hari		14 Hari		28 Hari	
	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
BN	34,63	32,68	32,93	33,34	34,12	34,50
	30,94		34,01		35,65	
	32,47		33,09		33,74	
BSMi 0.5%	32,09	33,53	35,94	35,01	38,83	37,48
	34,50		34,36		38,83	
	34,00		34,74		34,76	
BSMi 0.75%	33,10	30,64	32,69	32,32	29,28	34,17
	29,28		30,54		37,56	
	29,54		33,72		35,65	
BSMi 1%	25,59	30,81	30,12	31,01	30,56	31,62
	32,85		30,58		30,56	
	34,00		32,34		33,74	

(Sumber: Data Penulis, 2026)



Gambar 4. 4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton ECC
(Sumber: Data Penulis, 2026)

Hasil pengujian kuat tekan beton ECC pada Gambar 4.4 menunjukkan perkembangan seiring bertambahnya umur benda uji untuk setiap variasi campuran yang diteliti. Meskipun demikian, setiap variasi campuran mengindikasikan perkembangan kuat tekan yang berbeda-beda, menunjukkan pengaruh dari penambahan variasi serat mikro terhadap karakteristik mekanik beton ECC.

Pada benda uji BN (ECC Normal tanpa serat), kuat tekan yang diperoleh pada umur benda uji 7 hari sebesar 32,68 MPa. Kemudian meningkat menjadi 33,34 MPa pada umur 14 hari dan meningkat lagi menjadi 34,50 MPa pada umur 28 Hari.

Variasi benda uji serat mikro (BSMi) 0,5% menghasilkan kuat tekan tertinggi dibandingkan seluruh variasi lainnya pada umur 28 hari, yaitu sebesar 37,48 MPa. Nilai tersebut meningkat sebesar 8,61% dibandingkan beton ECC normal yang memiliki kuat tekan tertinggi urutan kedua. Pada umur benda uji 14 hari menghasilkan kuat tekan sebesar 35,01 MPa sedangkan untuk umur benda uji 7 hari sebesar 33,53 MPa.

Pada variasi benda uji BSMi 0,75%, kuat tekan yang diperoleh pada umur benda uji 7 hari sebesar 30,64 MPa. Untuk umur benda uji 14 hari diperoleh nilai sebesar 32,32 MPa, sedangkan benda uji dengan umur 28 hari diperoleh nilai sebesar 34,17 MPa.

Variasi BSMi 1% menunjukkan kuat tekan terendah dibandingkan seluruh umur pengujian, yaitu 30,81 MPa untuk benda uji umur 7 hari. Pada umur 14 hari diperoleh nilai kuat tekan sebesar 31,01 MPa, dan benda uji umur 28 hari diperoleh nilai sebesar 31,62 MPa.

Hasil penelitian ini memiliki kecenderungan yang sejalan dengan penelitian Prawira Wardana & Rosidawani (2025), dimana penambahan serat sintetis dapat meningkatkan kinerja mekanik ECC. Namun, penelitian tersebut belum secara spesifik menetapkan kadar serat optimum karena keterbatasan variasi benda uji. Dengan demikian, kedua penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat mikro memberikan peningkatan kuat tekan hingga mencapai kadar optimum tertentu tetapi penambahan serat yang berlebih justru menyebabkan penurunan kuat tekan. Ini mengindikasikan bahwa penambahan serat mikro dalam campuran ECC dibatasi.

4.1.6 Analisis Pola Keruntuhan Beton

Analisis pola keruntuhan beton *Engineered Cementitious Composites* (ECC) dilakukan dengan pengamatan secara visual terhadap bentuk, arah, panjang, dan tingkat keparahan retak yang terbentuk pada setiap benda uji. Baik benda uji beton ECC normal (BN) maupun beton berserat (BSMi) secara umum dapat dikategorikan memiliki pola keruntuhan *columnar failure* dan *cone and split failure* sesuai klasifikasi ASTM C39/C39 M. Meskipun demikian, karakteristik pola keruntuhan diantara benda uji tersebut menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan.

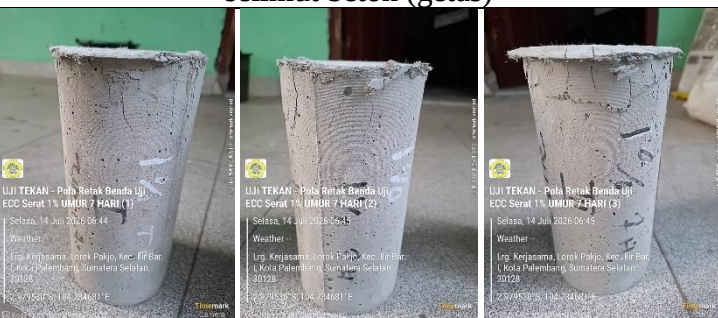
Berdasarkan hasil pengamatan pola keruntuhan pada Tabel 4.11, penambahan serat mikro *Polyamide 6.6* memberikan pengaruh terhadap karakteristik keruntuhan beton ECC. Benda uji BN (tanpa serat) pada umur 7, 14 dan 28 hari menunjukkan

kegagalan *Cone and Split Failure*, yang ditandai dengan keruntuhan bersifat getas, terbentuknya retak makro yang berkembang sepanjang tinggi benda uji, serta pelepasan sebagian selimut beton (*spalling*). Sebaliknya, penambahan serat mikro mengubah karakteristik keruntuhan menjadi lebih terkendali dan didominasi oleh keruntuhan dengan jenis *columnar*.

Meskipun begitu, benda uji dengan variasi serat pada umur 7 hari dan 28 hari menunjukkan keruntuhan *columnar*, karakteristik retak yang terbentuk memperlihatkan perbedaan yang cukup jelas. Pada umur 7 hari, retak yang terbentuk masih berupa retak mikro dengan propagasi yang terbatas karena proses hidrasi semen belum berlangsung optimal. Sebaliknya, pada umur 28 hari, retak mikro terpropagasi pada lebih banyak bagian permukaan benda uji seiring meningkatnya kuat tekan akibat perkembangan hidrasi. Kondisi ini dipengaruhi oleh proses hidrasi semen sehingga kekuatan dan kekakuan matriks berkembang seiring umur benda uji. Akibatnya, retak-retak mikro berkembang dan terpropagasi pada lebih banyak bagian permukaan benda uji.

Namun demikian, propagasi retak tetap terkendali dengan bukaan retakan yang relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa serat mikro *Polyamide 6.6* masih berperan efektif melalui mekanisme *fiber bridging*, yaitu menjembatani retak-retak yang terbentuk sehingga menghambat perkembangan retak menjadi retak makro yang bersifat eksplosif. Mekanisme ini menghasilkan keruntuhan yang bertahap dan retakan yang lebih kecil dibandingkan campuran ECC tanpa serat yang dapat mengurangi permeabilitas dan memungkinkan untuk mengurangi zat agresif untuk masuk ke dalam ECC sehingga dapat meningkatkan umur layan struktur, penelitian ini sejalan dengan (Kan & Shi, 2012). Dengan kata lain, penambahan serat dapat meningkatkan daktilitas material serta mengurangi kecenderungan keruntuhan yang bersifat eksplosif.

Tabel 4. 11 Pola Keruntuhan Beton

Variasi	Umur Benda Uji	Dokumentasi dan Karakteristik Keruntuhan
BN	7 Hari	 Three concrete cylinders are shown, each with a vertical crack running down its center. The cylinders are labeled 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 7 HARI (1)', 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 7 HARI (2)', and 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 7 HARI (3)'. They are all from the same location: Lrg. Kerjasama, Lontok Pakjo, Kec. Iir Bar, I. Kota Palembang, Sumatera Selatan, 30128.
	14 Hari	 Three concrete cylinders are shown, each with a vertical crack running down its center. The cylinders are labeled 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 14 HARI (1)', 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 14 HARI (2)', and 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 14 HARI (3)'. They are all from the same location: Lrg. Kerjasama, Lontok Pakjo, Kec. Iir Bar, I. Kota Palembang, Sumatera Selatan, 30128.
	28 Hari	 Three concrete cylinders are shown, each with a vertical crack running down its center. The cylinders are labeled 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 28 HARI (1)', 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 28 HARI (2)', and 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Normal UMUR 28 HARI (3)'. They are all from the same location: Lrg. Kerjasama, Lontok Pakjo, Kec. Iir Bar, I. Kota Palembang, Sumatera Selatan, 30128.
Keruntuhan eksplosif, retak dominan berkembang sepanjang tinggi benda uji, diikuti pelepasan sebagian selimut beton (getas)		
BSMi 0,5%	7 Hari	 Three concrete cylinders are shown, each with a vertical crack running down its center. The cylinders are labeled 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Serat 1% UMUR 7 HARI (1)', 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Serat 1% UMUR 7 HARI (2)', and 'UJI TEKAN - Pola Retak Benda Uji ECC Serat 1% UMUR 7 HARI (3)'. They are all from the same location: Lrg. Kerjasama, Lontok Pakjo, Kec. Iir Bar, I. Kota Palembang, Sumatera Selatan, 30128.

14 Hari

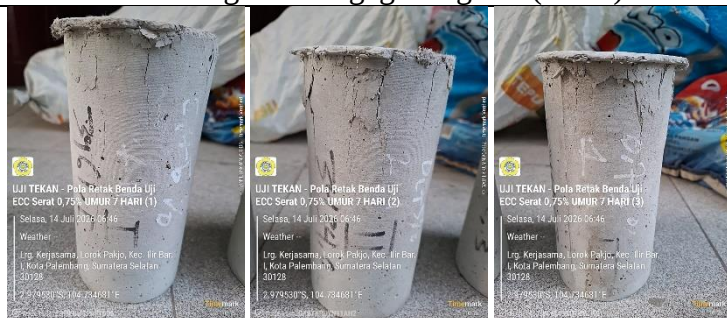


28 Hari



Pola keretakan berukuran mikro, seiring bertambahnya umur benda uji, propagasi retak cenderung bertambah, dan mengalami kegagalan geser (*shear*)

7 Hari

BSMi
0,75%

14 Hari

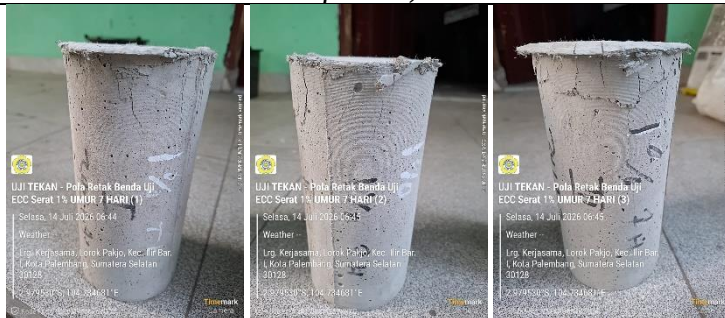


28 Hari



Retakan berkembang longitudinal hanya di setiap sisi benda uji, retak mikro yang cenderung berbentuk kerucut dan terbelah lurus (*cone & split* dan *columnar failure*)

7 Hari

BSMi
1%

14 Hari



28 Hari



Retakan propagasi secara longitudinal di setiap sisi benda uji, memiliki ukuran retak relatif kecil dan benda uji masih utuh meskipun diberi beban maksimum

(Sumber: Data Penulis, 2026)