

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Uji Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik dan mutu bahan penyusun beton sebelum digunakan dalam perencanaan campuran (mix design) dan pembuatan benda uji. Material yang diuji meliputi agregat halus, agregat kasar, serta material tambahan berupa *fly ash* dan *silica fume*.

Hasil pengujian ini sangat penting karena sifat fisik material berpengaruh langsung terhadap workability, kepadatan beton, rasio air-semen efektif, serta perkembangan kuat tekan beton hybrid. Seluruh pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar SNI yang berlaku untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi persyaratan mutu beton struktural.

4.1.1 Pengujian Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini berupa pasir alami. Serangkaian pengujian dilakukan untuk mengetahui berat jenis, penyerapan air, berat isi, kandungan bahan organik, kadar lumpur, serta gradasi agregat. Hasil pengujian agregat halus menjadi dasar penting dalam menentukan proporsi campuran beton, khususnya dalam penelitian beton hybrid yang menggunakan material tambahan dengan luas permukaan spesifik tinggi seperti *fly ash* dan *silica fume*.

4.1.1.1 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik pasir yang digunakan dalam campuran beton. Nilai berat jenis diperlukan dalam perencanaan campuran beton (mix design), sedangkan nilai penyerapan air digunakan untuk menentukan koreksi kebutuhan air pencampur. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-1970-1990 tentang Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus.

Tabel 4.1 Berat Jenis Agregat Halus

Pengujian Penyerapan Air Agregat Halus	A	B	C	Satuan
Berat benda uji kering permukaan jenuh (SSD)	500	500	500	Gram
Berat benda uji kering - oven, Bk	497,04	497,18	497,68	Gram
Berat piknometer diisi air, B	663,8	666,41	663,88	Gram
Berat piknometer + benda uji (SSD) + air, Bt	972,27	974,68	974,96	Gram
Kadar air	0,54			%

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.2 Penyerapan Air Agregat Halus

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Halus	A	B	C	Rata-rata	Satuan
Berat Jenis (Bulk) $\frac{Bk}{(B + 500 - Bt)}$	2,60	2,59	2,63	2,61	%
Berat jenis kering permukaan jenuh $\frac{500}{(B + 500 - Bt)}$	2,61	2,61	2,65	2,62	%
Berat jenis semu (apparent) $\frac{Bk}{(B + Bk - Bt)}$	1,50	1,51	1,50	1,50	%
Penyerapan $\frac{500 - Bk}{Bk} \times 100\%$	0,60	0,57	0,47	0,54	%

Sumber: Data Penulis, 2025

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus memiliki nilai berat jenis bulk rata-rata sebesar 2,61, berat jenis jenuh kering permukaan (SSD) sebesar 2,62, dan berat jenis semu (apparent) sebesar 1,50. Nilai penyerapan air rata-rata yang diperoleh adalah 0,54%.

Nilai berat jenis tersebut berada dalam rentang normal agregat halus untuk beton struktural dan memenuhi persyaratan standar SNI. Nilai penyerapan air yang relatif rendah mengindikasikan bahwa agregat halus memiliki porositas kecil dan struktur butiran yang cukup padat. Kondisi ini menguntungkan karena agregat tidak

menyerap air pencampur secara berlebihan, sehingga faktor air-semen efektif dapat terjaga sesuai perencanaan.

Dalam konteks beton hybrid, penyerapan air agregat yang rendah sangat penting karena penggunaan *fly ash* dan *silica fume* cenderung meningkatkan kebutuhan air akibat luas permukaan spesifik yang besar. Oleh karena itu, agregat halus dengan karakteristik ini mendukung tercapainya workability yang baik tanpa peningkatan rasio air-semen, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan kuat tekan beton.

4.1.1.2 Pengujian Berat Isi Agregat Halus

Pengujian berat isi agregat halus dilakukan untuk mengetahui berat agregat dalam satuan volume tertentu. Nilai berat isi digunakan dalam perhitungan proporsi campuran beton dan untuk mengetahui tingkat kepadatan agregat. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-4804-1998 tentang Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam Agregat.

Tabel 4.3 Berat Isi Lepas/Gembur Agregat Halus

LEPAS / GEMBUR	I	II
A. Berat tempat + benda uji (kg)	6,228	6,149
B. Berat tempat (kg)	0,964	0,964
C. Berat benda uji (kg)	5,264	5,185
D. Isi tempat (dm^3)	4,02	4,02
E. Berat isi benda uji (kg/dm^3)	1,31	1,29
F. Berat isi benda uji rata-rata (kg/dm^3)	1,30	

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.4 Pengujian Berat Isi Padat Agregat halus

PADAT	I	II
A. Berat tempat + benda uji (kg)	6,603	6,635
B. Berat tempat (kg)	0,964	0,964
C. Berat benda uji (kg)	5,639	5,671
D. Isi tempat (dm^3)	4,02	4,02
E. Berat isi benda uji (kg/dm^3)	1,40	1,41
F. Berat isi benda uji rata-rata (kg/dm^3)	1,41	

Sumber: Data Penulis, 2025

Pengujian berat isi agregat halus dilakukan dalam dua kondisi, yaitu kondisi gembur (loose) dan kondisi padat (compacted). Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat isi agregat halus pada kondisi gembur memiliki nilai rata-rata sebesar 1,30 kg/dm³, sedangkan pada kondisi padat sebesar 1,41 kg/dm³.

Perbedaan nilai berat isi ini mencerminkan kemampuan agregat halus untuk mengalami pemadatan. Nilai berat isi padat yang lebih tinggi menunjukkan bahwa agregat mampu tersusun lebih rapat ketika dipadatkan, sehingga mengurangi rongga udara dalam campuran beton. Kondisi ini berpengaruh positif terhadap kepadatan beton dan dapat meningkatkan kuat tekan beton yang dihasilkan.

Dalam perencanaan campuran beton hybrid, nilai berat isi agregat halus digunakan untuk menentukan volume agregat secara akurat. Kepadatan agregat yang baik mendukung terbentuknya beton dengan struktur mikro yang lebih kompak, terutama ketika dikombinasikan dengan efek pengisian rongga (filler effect) dari *silica fume*.

4.1.1.3 Pengujian Kotoran Organik

Pengujian kotoran organik pada agregat halus dilakukan untuk mengetahui kandungan bahan organik yang terdapat dalam pasir. Kandungan bahan organik yang tinggi dapat menghambat proses hidrasi semen dan menurunkan kuat tekan beton. Pengujian ini dilakukan berdasarkan SNI 03-2816-1992 tentang Metode Pengujian Kotoran Organik dalam Agregat Halus untuk Beton.

Tabel 4.5 Uji Kadar Organik

Agregat Pasir	No. Contoh		Satuan
	I	II	
Tinggi pasir	130	130	ml
Penambahan cairan NaOH	200	200	ml
Warna setelah dicampur 1 x 24 jam	KUNING	KUNING	
Kartu warna No.	2		

Sumber: Data Penulis, 2025

Pengujian kandungan bahan organik dilakukan menggunakan larutan NaOH untuk mendeteksi keberadaan zat organik yang berpotensi mengganggu proses hidrasi semen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa warna larutan setelah 24 jam berada pada warna kuning dengan kartu warna Gardner No. 2.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kandungan bahan organik dalam agregat halus tergolong rendah dan masih berada dalam batas yang diperbolehkan oleh standar. Kandungan organik yang rendah sangat penting karena bahan organik dapat menghambat reaksi hidrasi semen dan reaksi pozzolan *fly ash* serta *silica fume*.

Dengan demikian, agregat halus yang digunakan dinyatakan layak digunakan dalam campuran beton hybrid, karena tidak menimbulkan gangguan terhadap proses pengikatan semen maupun pembentukan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan dalam peningkatan kuat tekan beton.

4.1.1.4 Pengujian kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur pada agregat halus dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan butiran halus (lolos saringan No.200) yang terdapat dalam pasir. Kandungan lumpur yang berlebihan dapat mengganggu lekatan antara pasta semen dan agregat sehingga menurunkan kuat tekan beton. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-4142-1996 tentang Metode Pengujian Kadar Lumpur dalam Agregat Halus.

Tabel 4.6 Pengujian Kadar Lumpur

No. Sampel	Ukuran Maksimum Agregat		Satuan
	I	II	
Berat kering benda uji + wadah W1	1143	1136	Gram
Berat wadah W2	143	136	Gram
Berat kering benda uji awal W3 = W1 - W2	1000	1000	Gram
Berat kering benda uji sesudah pencucian + wadah W4	1096	1116	Gram
Berat kering benda uji sesudah pencucian + wadah W5 = W4 - W2	953	980	Gram
Persen bahan lolos saringan no.200 (0,075 mm) $W_6 = \frac{(W_3 - W_5)}{W_5} \times 100\%$	4,70	2,00	%
Rata – rata (1 + 2)/2	3,35		%

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian kadar lumpur agregat halus yang disajikan pada Tabel 4.4, diperoleh nilai kadar lumpur rata-rata sebesar 3,35%. Nilai tersebut lebih kecil dari batas maksimum 5% yang dipersyaratkan oleh SNI, sehingga agregat halus dinyatakan memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton.

Nilai kadar lumpur yang relatif rendah menunjukkan bahwa agregat halus memiliki tingkat kebersihan yang baik dan tidak mengandung partikel pengotor dalam jumlah signifikan. Kondisi ini sangat menguntungkan karena permukaan agregat yang bersih memungkinkan terjadinya ikatan yang lebih optimal antara agregat dan pasta semen.

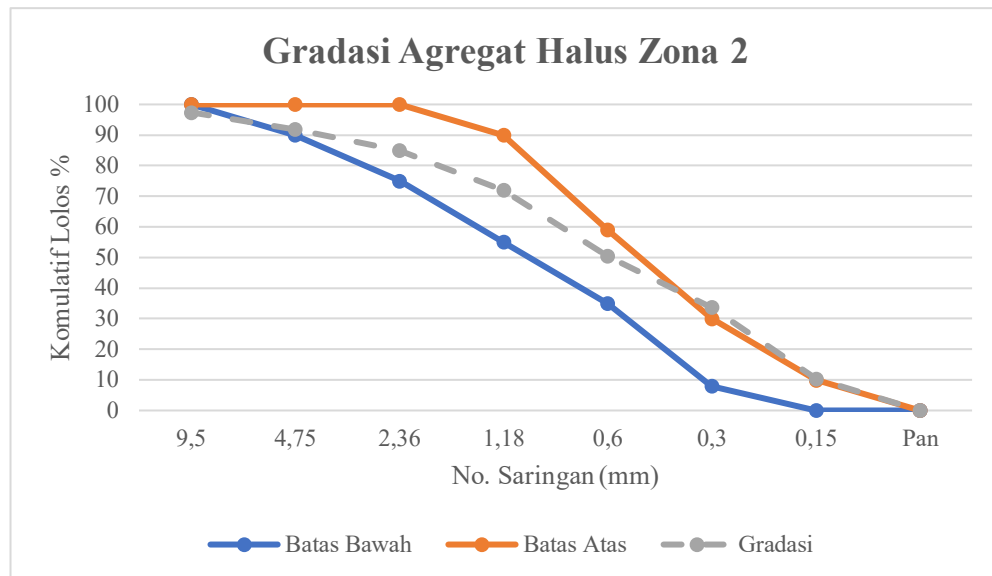
4.1.1.5 Pengujian Analisis Ayakan Agregat Halus

Pengujian analisis ayakan agregat halus dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir (gradasi) pasir yang digunakan dalam campuran beton. Gradasi agregat berpengaruh terhadap workability, kebutuhan air, serta kekuatan beton. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI S-04-1998-F tentang Metode Pengujian Analisis Saringan Agregat Halus dan Kasar, kemudian hasil gradasi dibandingkan dengan batas gradasi agregat kasar menurut SNI 7656:2012.

Tabel 4.7 Analisis Ayakan Agregat Halus

Ukuran Saringan		Sampel A				Sampel B				Rata-Rata
No	mm	Berat	Berat Kumulatif	Tertahan %	Lolos %	Berat	Berat Kumulatif	Tertahan %	Lolos %	
3/8	9,6	66	66	2,64	97,36	63	63	2,52	97,48	97,42
4	4,8	133	199	7,97	92,03	146	209	8,37	91,63	91,83
8	2,4	164	363	14,53	85,47	181	390	15,61	84,39	84,93
16	1,2	316	679	27,18	72,82	330	720	28,82	71,18	72,00
30	0,6	535	1214	48,60	51,40	541	1261	50,48	49,52	50,46
50	0,3	421	1635	65,45	34,55	415	1676	67,09	32,91	33,73
100	0,15	592	2227	89,15	10,85	574	2250	90,07	9,93	10,39
Pan		271	2498	100,00	0,00	248	2498	100,00	0,00	0,00
Jumlah		2498	-	-	-	2498	-	-	-	-
ZONE		Fineness Modulus A				Fineness Modulus B				FM
2		2,56				2,63				2,59

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.1 Gradasi Agregat Halus Zona 2

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian analisis ayakan agregat halus yang disajikan pada Tabel 4.5, diperoleh distribusi ukuran butiran agregat halus yang berada dalam batas gradasi agregat halus menurut standar SNI. Hal ini menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki gradasi yang baik dan layak digunakan sebagai bahan penyusun beton struktural.

Gradasi agregat halus yang memenuhi standar memungkinkan pengisian rongga antar agregat kasar secara optimal, sehingga mengurangi jumlah rongga udara dalam beton. Dalam beton hybrid, kondisi ini bersinergi dengan peran *silica fume* sebagai pengisi rongga mikro (filler effect) dan *fly ash* sebagai material pozzolan, sehingga menghasilkan beton dengan struktur yang lebih padat dan homogen.

4.1.2 Pengujian Agregat Kasar

Agregat kasar berfungsi sebagai kerangka utama beton dan menempati proporsi volume terbesar dalam campuran beton. Oleh karena itu, sifat fisik dan mekanik agregat kasar sangat memengaruhi kekuatan tekan dan kestabilan beton hybrid yang dihasilkan.

4.1.2.1 Pengujian Berat Jenis Dan Penyerapan air Agregat Kasar

Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar dilakukan untuk mengetahui karakteristik fisik batu pecah yang digunakan dalam campuran beton. Nilai berat jenis digunakan dalam perencanaan campuran beton (mix design), sedangkan nilai penyerapan air digunakan untuk menentukan koreksi kebutuhan air pencampur. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-1969-1990 tentang Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar.

Tabel 4.8 Pengujian Kadar Air Agregat kasar

Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Satuan
Berat benda uji kering - oven, Bk	2000	2000	2000	Gram
Berat benda uji kering permukaan jenuh Bj	2027	2026	2026	Gram
Berat benda didalam air Ba	1165	1174	1165	Gram
Kadar air	1,32			%

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.9 Berat Jenis Dan Penyerapan Agregat kasar

Perhitungan Pengujian Penyerapan Air Agregat Kasar	A	B	C	Rata-rata	Satuan
Berat Jenis (Bulk) $\frac{Bk}{(Bj - Ba)}$	2,32	2,35	2,32	2,33	%
Berat jenis kering permukaan jenuh $\frac{Bj}{(Bj - Ba)}$	2,35	2,38	2,35	2,36	%
Berat jenis semu (apparent) $\frac{Bk}{(Bk - Ba)}$	2,40	2,42	2,40	2,40	%
Penyerapan $\frac{Bj - Bk}{Bk} \times 100\%$	1,35	1,30	1,30	1,32	%

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh nilai sebagai berikut:

1. Berat jenis bulk sebesar 2,33
2. Berat jenis SSD sebesar 2,36
3. Berat jenis apparent sebesar 2,40
4. Nilai penyerapan air rata-rata sebesar 1,32%

Nilai penyerapan air tersebut masih berada dalam batas yang diperbolehkan menurut standar SNI, yaitu kurang dari 3%. Hal ini menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki porositas rendah dan tidak menyerap air secara berlebihan. Dengan demikian, agregat kasar yang digunakan memenuhi persyaratan mutu sebagai bahan campuran beton dan layak digunakan dalam penelitian ini.

4.1.2.2 Pengujian Berat Isi Agregat Kasar

Pengujian berat isi agregat kasar dilakukan untuk mengetahui berat agregat dalam satuan volume tertentu. Nilai berat isi digunakan dalam perhitungan proporsi campuran beton serta untuk mengetahui tingkat kepadatan agregat dan rongga udara antar butir. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-4804-1998 tentang Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga Udara dalam Agregat.

Tabel 4.10 Pengujian Berat Isi Lepas/Gembur Agregat Kasar

LEPAS / GEMBUR	I	II
A. Berat tempat + benda uji (kg)	4,853	4,915
B. Berat tempat (kg)	0,964	0,964
D. Isi tempat (dm ³)	3,889	3,951
E. Berat isi benda uji (kg/dm ³)	4,02	4,02
F. Berat isi benda uji rata - rata (kg/dm ³)	0,97	

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.11 Pengujian Berat Isi Padat Agregat Kasar

PADAT	I	II
A. Berat tempat + benda uji (kg)	5,439	5,432
B. Berat tempat (kg)	0,964	0,964
D. Isi tempat (dm ³)	4,475	4,468
E. Berat isi benda uji (kg/dm ³)	4,02	4,02
F. Berat isi benda uji rata - rata (kg/dm ³)	1,11	

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh berat isi agregat kasar dalam kondisi lepas sebesar 0,97 kg/dm³, sedangkan berat isi agregat kasar dalam kondisi padat sebesar 1,11 kg/dm³.

Perbedaan nilai berat isi tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki kemampuan pemadatan yang baik. Nilai berat isi pada kondisi padat yang lebih besar mengindikasikan bahwa agregat mampu tersusun lebih rapat ketika mengalami pemadatan, sehingga volume rongga antar butir agregat dapat diminimalkan.

Dalam campuran beton, khususnya beton hybrid, kemampuan pemadatan agregat kasar yang baik berkontribusi terhadap pengurangan rongga udara dalam beton, peningkatan kepadatan beton, serta berpotensi meningkatkan kuat tekan beton. Kondisi ini juga mendukung efektivitas kerja material tambahan seperti *fly ash* dan *silica fume* dalam membentuk struktur beton yang lebih padat dan homogen.

Dengan demikian, agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan sebagai agregat struktural dan layak digunakan dalam perencanaan campuran beton.

4.1.2.3 Pengujian Kadar Lumpur

Pengujian kadar lumpur agregat kasar dilakukan untuk mengetahui persentase kandungan partikel halus (lolos saringan No.200) yang melekat pada permukaan batu pecah. Kandungan lumpur yang berlebihan dapat menghambat ikatan antara pasta semen dan agregat sehingga menurunkan kuat tekan beton. Pengujian ini dilaksanakan berdasarkan SNI 03-4142-1996 tentang Metode Pengujian Kadar Lumpur dalam Agregat.

Tabel 4.12 Pengujian kadar Lumpur

No. Contoh	Ukuran Maksimum Agregat		Satuan
	No. 4 (4.75 mm)		
	I	II	
Berat kering benda uji + wadah W1	1142	1135	Gram
Berat wadah W2	142	135	Gram
Berat kering benda uji awal W3 = W1 - W2	1000	1000	Gram
Berat kering benda uji sesudah pencucian + wadah W4	1138	1130	Gram
Berat kering benda uji sesudah pencucian + wadah W5 = W4 - W2	996	995	Gram
Persen bahan lolos saringan no. 200 (0,075 mm) W6 $= \frac{(W3-W5)}{W3} \times 100\%$	0,40	0,50	%
Rata - rata (1 + 2)/2	0,45		%

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh nilai kadar lumpur agregat kasar rata-rata sebesar 0,45%. Nilai ini jauh di bawah batas maksimum 1% yang dipersyaratkan oleh standar SNI, sehingga agregat kasar dinyatakan memenuhi persyaratan mutu sebagai bahan penyusun beton.

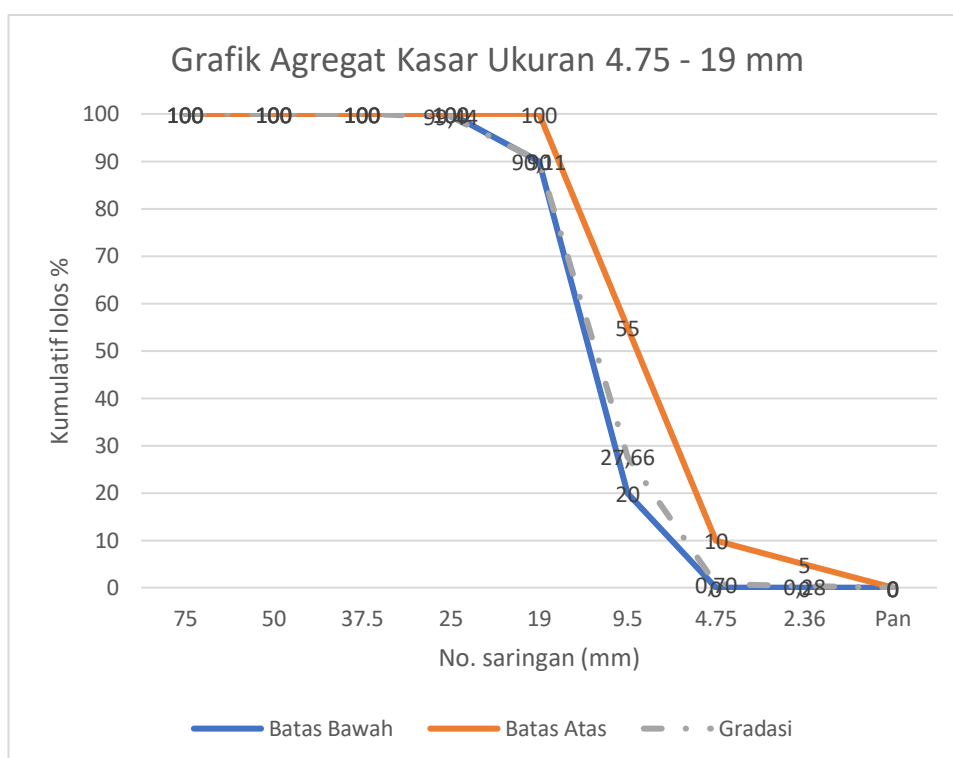
4.1.2.4 Pengujian Analisis Ayakan Kasar

Pengujian analisis saringan dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran butir (gradasi) agregat halus maupun agregat kasar. Gradasi agregat sangat berpengaruh terhadap workability, kebutuhan air, kepadatan beton, serta kekuatan yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan berdasarkan SNI S-04-1998-F, kemudian hasil gradasi dibandingkan dengan batas gradasi agregat kasar menurut SNI 7656:2012.

Tabel 4.13 Pengujian Analisis Ayakan Agregat Kasar

Ukuran Saringan		Berat (gr)	Sampel A			Berat (gr)	Sampel B			Rata-Rata
mm	AST M		Berat Komulatif	Tertahan %	Lolos %		Berat Komulatif	Tertahan %	Lolos %	
75	3	0	0	0,00	100	0	0	0,00	100	100,00
50	2	0	0	0,00	100	0	0	0,00	100	100,00
37,5	1,5	0	0	0,00	100,00	0	0	0,00	100,00	100,00
25	1	12	12	0,48	99,52	16	16	0,64	99,36	99,44
19	3/4	229	241	9,65	90,35	237	253	10,13	89,87	90,11
9,5	3/8	1558	1799	72,02	27,98	1562	1815	72,66	27,34	27,66
4,75	4	682	2481	99,32	0,68	665	2480	99,28	0,72	0,70
2,36	8	9	2490	99,68	0,32	12	2492	99,76	0,24	0,28
Pan		8	2498	100,00	0,00	6	2498	100,00	0,00	0,00
Jumlah		2498	-	-	-	2498	-	-	-	-
Ukuran Maks		Fineness Modulus A				Fineness Modulus B				FM
Ukuran 19 - 37,5		3,81				3,82				3,82

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.2 Grafik Agregat Kasar Ukuran 4.75 - 19 mm

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian analisis ayakan, distribusi ukuran butiran agregat kasar disajikan dalam bentuk Grafik Gradasi Agregat Kasar dengan ukuran butir antara 4,75 mm hingga 19 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki distribusi butiran yang berada dalam batas gradasi agregat kasar sesuai ketentuan standar SNI.

Gradasi agregat kasar yang memenuhi standar memungkinkan terbentuknya susunan agregat yang stabil dan mengurangi rongga antar agregat. Hal ini berdampak positif terhadap peningkatan kepadatan beton dan efisiensi penggunaan pasta semen dalam campuran.

Dalam beton hybrid, gradasi agregat kasar yang baik sangat mendukung terbentuknya beton dengan struktur yang lebih kompak. Rongga antar agregat yang lebih kecil dapat diisi secara optimal oleh agregat halus, *fly ash*, dan *silica fume*, sehingga menghasilkan beton yang lebih padat dan homogen serta berpotensi meningkatkan kuat tekan beton.

Dengan demikian, agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan gradasi agregat kasar dan layak digunakan sebagai bahan penyusun beton pada variasi campuran yang direncanakan.

4.1.2.5 Pengujian Keausan Agregat Kasar Menggunakan Alat LAA (*Los Angeles Abrasion Test*)

Pengujian keausan agregat kasar dilakukan untuk mengetahui tingkat ketahanan agregat terhadap gesekan dan tumbukan selama proses pencampuran maupun saat beton menerima beban. Semakin kecil nilai keausan, semakin baik kualitas agregat yang digunakan. Pengujian ini dilakukan berdasarkan SNI 2417:2008 tentang Metode Pengujian Ketahanan Agregat Kasar Terhadap Keausan dengan Mesin Los Angeles.

Tabel 4.14 Pengujian Keausan Agregat kasar

Gradasi pemeriksaan		Jumlah putaran = 500 putaran	
Ukuran saringan		1	2
Lolos	Tertahan	Berat(a)	Berat(a)
76,2 (3")	63,5 (2 ½")		
63,5 (2 ½")	50,8 (2")		
50,8 (2")	36,1 (1½")		
36,1 (1½")	25,4 (1")		
25,4 (1")	19,1 (¾")		
19,1 (¾")	12,7 (½")	2500	2500
12,7 (½")	9,25 (⅜")	2500	2500
9,25 (⅜")	6,35 (¼")		
6,35 (¼")	4,75 (No.4)		
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)		
Jumlah Berat		5000	5000
Berat saringan No. 12 sesudah percobaan (b)		3816	3840

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.15 Perhitungan Keausan Agregat kasar

Keausan I = $\frac{a-b}{b} \times 100 \%$	Keausan II = $\frac{a-b}{b} \times 100 \%$
= $\frac{5000-3816}{5000} \times 100 \%$	= $\frac{5000-3840}{5000} \times 100 \%$
= 23,68 %	= 23,2 %
Rata-rata = (Keausan I + Keausan II) / 2 = 23,44 %	

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, diperoleh nilai keausan agregat kasar sebesar 23,44%. Nilai ini menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki ketahanan aus yang baik. Mengacu pada SNI 2417:2008, agregat kasar untuk beton struktural disyaratkan memiliki nilai keausan $\leq 40\%$.

Dengan demikian, nilai keausan agregat kasar pada penelitian ini masih berada jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan, sehingga agregat kasar dinyatakan memenuhi persyaratan mutu dan layak digunakan sebagai bahan campuran beton struktural.

Ketahanan aus agregat kasar yang baik menunjukkan bahwa agregat memiliki kekuatan dan stabilitas mekanis yang memadai terhadap abrasi. Dalam beton hybrid, karakteristik ini sangat penting untuk memastikan bahwa peningkatan kuat tekan beton yang dihasilkan benar-benar dipengaruhi oleh kontribusi material tambahan seperti *fly ash*, *silica fume*, dan *superplasticizer*, bukan dibatasi oleh kelemahan agregat kasar.

4.2 Hasil Perencanaan Campuran Beton (Mix Design)

Perencanaan campuran beton (mix design) pada penelitian ini bertujuan untuk memperoleh proporsi material penyusun beton yang mampu menghasilkan kuat tekan rencana sebesar $f'_c = 30$ MPa, dengan tingkat workability yang sesuai serta tetap memperhatikan aspek keberlanjutan melalui substitusi sebagian semen menggunakan *fly ash* dan *silica fume*.

Metode perencanaan campuran beton mengacu pada SNI 7656:2012 – Tata Cara Pemilihan Campuran Beton Normal. Data karakteristik material yang digunakan dalam perhitungan mix design berasal dari hasil pengujian agregat halus, agregat kasar, serta spesifikasi material tambahan yang telah dijelaskan pada Bab III.

4.2.1 Parameter Dasar Perencanaan Campuran

Parameter dasar yang digunakan dalam perencanaan campuran beton adalah sebagai berikut:

1. Kuat tekan beton pada umur 28 hari : 30 Mpa
2. Berat jenis semen : 3,12 gram/cm³
3. Berat kering oven agregat kasar : 1600 kg/m³
4. Modulus kehalusan agregat halus : 2,59 %
5. Modulus kehalusan agregat kasar : 2,32 %
6. Berat jenis SSD agregat halus : 2,62 %
7. Berat jenis SSD agregat kasar : 2,36 %
8. Absorpsi agregat halus : 0,54 %
9. Absorpsi agregat kasar : 1,32 %
10. Kadar air agregat halus : 0,83 %
11. Kadar air agregat kasar : 1,58 %

12. Berat Jenis Relatif Fly ash : 2,32 %
13. Slump rencana : 100 – 150 mm
14. Ukuran maksimum agregat kasar : 19 mm
15. Rasio air semen (w/c) : 0,54

4.2.2 Hasil Perhitungan Mix Design Beton Normal Tanpa Campura

Berdasarkan hasil perhitungan mix design menggunakan metode SNI 7656:2012, diperoleh komposisi campuran beton normal per 1 m³ beton sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.16 Komposisi Campuran Beton Normal Per 1 m³

Material	Jumlah
Semen (kg)	389,8
Air (kg/liter)	188,04
Agregat Halus (kg)	1085,64
Agregat Kasar (kg)	681,50

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.17 Komposisi Campuran Beton Normal Per 1 silinder

Material	Jumlah
Semen (kg)	1,86
Air (kg/liter)	1,00
Agregat Halus (kg)	3,61
Agregat Kasar (kg)	5,76

Sumber: Data Penulis, 2025

4.2.3 Hasil Perhitungan Mix Design Beton Hybrid

Untuk beton hybrid, sebagian berat semen digantikan oleh *fly ash* dan *silica fume* sesuai variasi yang direncanakan. Total bahan pengikat (binder) tetap dijaga agar tidak jauh berbeda dengan beton normal sehingga perbandingan kinerja dapat dianalisis secara objektif.

1. Beton Hybrid Kontrol

Tabel 4.18 Komposisi Campuran Beton Hybrid Kontrol Per 1 m³

Material	Jumlah
Semen (kg)	350,83
<i>Fly ash</i> (kg)	0
<i>Silica fume</i> (kg)	38,98
Air (kg/liter)	150,43
Agregat Halus (kg)	681,50
Agregat Kasar (kg)	1085,64
<i>Superplasticizer</i> (kg)	3,898

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.19 Komposisi Campuran Beton Hybrid Kontrol Per 1 Silinder

Material	Jumlah
Semen (kg)	1,67
<i>Fly ash</i> (kg)	0
<i>Silica fume</i> (kg)	0,19
Air (kg/liter)	0,80
Agregat Halus (kg)	3,61
Agregat Kasar (kg)	5,76
<i>Superplasticizer</i> (kg)	0,0744

Sumber: Data Penulis, 2025

2. Beton Variasi 1

Tabel 4.20 Komposisi Campuran Beton Variasi 1 Per 1 m³

Material	Jumlah
Semen (kg)	311,85
<i>Fly ash</i> (kg)	38,98
<i>Silica fume</i> (kg)	38,98
Air (kg/liter)	150,43
Agregat Halus (kg)	681,50
Agregat Kasar (kg)	1085,64
<i>Superplasticizer</i> (kg)	3,898

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.21 Komposisi Campuran Beton Variasi 1 Per 1 Silinder

Material	Jumlah
Semen (kg)	1,49
<i>Fly ash</i> (kg)	0,19
<i>Silica fume</i> (kg)	0,19
Air (kg/liter)	0,80
Agregat Halus (kg)	3,61
Agregat Kasar (kg)	5,76
<i>Superplasticizer</i> (kg)	0,0744

Sumber: Data Penulis, 2025

3. Beton Hybrid Variasi 2

Tabel 4.22 Komposisi Campuran Beton Variasi 2 Per 1 m³

Material	Jumlah
Semen (kg)	272,87
<i>Fly ash</i> (kg)	77,96
<i>Silica fume</i> (kg)	38,98
Air (kg/liter)	150,43
Agregat Halus (kg)	681,50
Agregat Kasar (kg)	1085,64
<i>Superplasticizer</i> (kg)	3,898

Sumber: Data Penulis, 2025

Tabel 4.23 Komposisi Campuran Beton Variasi 2 Per 1 silinder

Material	Jumlah
Semen (kg)	1,30
<i>Fly ash</i> (kg)	0,37
<i>Silica fume</i> (kg)	0,19
Air (kg/liter)	0,80
Agregat Halus (kg)	3,61
Agregat Kasar (kg)	5,76
<i>Superplasticizer</i> (kg)	0,0744

Sumber: Data Penulis, 2025

4.3 Hasil Uji Kuat Tekan Beton

4.3.1 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Kontrol

Hasil uji kuat tekan beton kontrol disajikan dalam tabel berdasarkan variasi umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Pengujian dilakukan terhadap

empat benda uji pada setiap umur beton. Luas penampang benda uji yang digunakan dalam perhitungan kuat tekan adalah sebesar 17.671,5 mm².

Tabel 4.24 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Kontrol

BETON KONTROL			
Benda Uji	Berat Tekan (P) (N)	$A = 17671,5 \text{ mm}^2$ $f_c = (P/A)$ (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)
Umur 28 Hari			
1	400424	22,66	22,09
2	383612	21,71	
3	386857	21,89	
4	390298	22,09	
Umur 21 Hari			
1	366199	20,72	20,55
2	358606	20,29	
3	364719	20,64	
4	363175	20,55	
Umur 14 Hari			
1	339754	19,23	18,50
2	310029	17,54	
3	309317	17,50	
4	348530	19,72	
Umur 7 Hari			
1	304925	17,26	16,58
2	299204	16,93	
3	283913	16,07	
4	283821	16,06	

Sumber: Data Penulis, 2025

Pada umur beton 7 hari, hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan masing-masing benda uji sebesar 17,26 MPa, 16,93 MPa, 16,07 MPa, dan 16,07 MPa. Dari keempat benda uji tersebut diperoleh nilai kuat tekan rata-rata beton sebesar 16,58 MPa.

Pada umur beton 14 hari, nilai kuat tekan yang diperoleh dari empat benda uji berturut-turut adalah 19,23 MPa, 17,54 MPa, 17,50 MPa, dan 19,72 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur ini tercatat sebesar 18,50 MPa.

Selanjutnya, pada umur beton 21 hari, hasil uji kuat tekan menunjukkan nilai sebesar 20,72 MPa, 20,29 MPa, 20,64 MPa, dan 20,55 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 21 hari adalah 20,55 MPa.

Pada umur beton 28 hari, kuat tekan beton yang diperoleh dari masing-masing benda uji adalah 22,66 MPa, 21,71 MPa, 21,89 MPa, dan 22,09 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 28 hari tercatat sebesar 22,09 MPa.

Tabel tersebut memuat data hasil pengujian berupa beban tekan maksimum, nilai kuat tekan masing-masing benda uji, serta nilai kuat tekan rata-rata beton kontrol pada setiap umur pengujian.

4.3.2 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi 1

Hasil uji kuat tekan beton variasi 1 disajikan dalam tabel berdasarkan variasi umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Pengujian dilakukan terhadap empat benda uji pada setiap umur beton. Luas penampang benda uji yang digunakan dalam perhitungan kuat tekan adalah sebesar 17.671,5 mm².

Tabel 4.25 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi 1

VARIASI 1			
Benda Uji	Berat Tekan (P) (Kg)	A = 17671,5 mm ² Fc = (P/A) (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)
Umur 28 Hari			
1	496554	28,10	29,93
2	571081	32,32	
3	538613	30,48	
4	509112	28,81	
Umur 21 Hari			
1	406198	22,99	22,93
2	416031	23,54	
3	427758	24,21	
4	371045	21,00	
Umur 14 Hari			
1	345532	19,55	19,01
2	358248	20,27	
3	319845	18,10	
4	319781	18,10	
Umur 7 Hari			
1	214256	12,12	11,09
2	198145	11,21	
3	192718	10,91	
4	178997	10,13	

Sumber: Data Penulis, 2025

Pada umur beton 7 hari, hasil uji kuat tekan beton variasi 1 menunjukkan nilai kuat tekan masing-masing benda uji sebesar 12,12 MPa, 11,21 MPa, 10,91 MPa, dan 10,13 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur ini adalah 11,09MPa.

Pada umur beton 14 hari, nilai kuat tekan beton yang diperoleh dari empat benda uji berturut-turut adalah 19,55 MPa, 20,27 MPa, 18,10 MPa, dan 18,10 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton variasi 1 pada umur 14 hari tercatat sebesar 19,01 MPa.

Pada umur beton 21 hari, hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan masing-masing benda uji sebesar 22,99 MPa, 23,54 MPa, 24,21 MPa, dan 21,00 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 21 hari adalah 22,93 MPa.

Pada umur beton 28 hari, kuat tekan beton variasi 1 yang diperoleh dari keempat benda uji masing-masing sebesar 28,10 MPa, 32,32 MPa, 30,48 MPa, dan 28,81 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 28 hari tercatat sebesar 29,93 MPa.

Secara keseluruhan, tabel tersebut memuat data hasil pengujian berupa beban tekan maksimum, nilai kuat tekan masing-masing benda uji, serta nilai kuat tekan rata-rata beton variasi 1 pada setiap umur pengujian.

4.3.3 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi 2

Hasil uji kuat tekan beton variasi 2 disajikan dalam tabel berdasarkan variasi umur beton, yaitu 7 hari, 14 hari, 21 hari, dan 28 hari. Pengujian dilakukan terhadap empat benda uji pada setiap umur beton. Luas penampang benda uji yang digunakan dalam perhitungan kuat tekan adalah sebesar 17.671,5 mm².

Tabel 4.26 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi 2

VARIASI 2			
Benda Uji	Berat Tekan (P) (Kg)	$A = 17671,5 \text{ mm}^2$ $F_c = (P/A)$ (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)
Umur 28 Hari			
1	551278	31,20	32,02
2	638925	36,16	
3	531227	30,06	
4	541764	30,66	

Tabel 4.27 Hasil Uji Kuat Tekan Beton Variasi 2 (Lanjutan)

VARIASI 2			
Benda Uji	Berat Tekan (P) (Kg)	A = 17671,5 mm ² Fc = (P/A) (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)
Umur 21 Hari			
1	505497	28,61	27,32
2	451857	25,57	
3	477841	27,04	
4	495612	28,05	
Umur 14 Hari			
1	382816	21,66	22,48
2	373659	21,14	
3	448161	25,36	
4	384286	21,75	
Umur 7 Hari			
1	157493	8,91	10,58
2	179438	10,15	
3	213188	12,06	
4	197422	11,17	

Sumber: Data Penulis, 2025

Pada umur beton 7 hari, hasil uji kuat tekan beton variasi 2 menunjukkan nilai kuat tekan masing-masing benda uji sebesar 8,91 MPa, 10,15 MPa, 12,06 MPa, dan 11,17 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur ini tercatat sebesar 10,58 MPa.

Pada umur beton 14 hari, nilai kuat tekan beton yang diperoleh dari empat benda uji berturut-turut adalah 21,66 MPa, 21,14 MPa, 25,36 MPa, dan 21,75 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton variasi 2 pada umur 14 hari adalah 22,48 MPa.

Pada umur beton 21 hari, hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan masing-masing benda uji sebesar 28,61 MPa, 25,57 MPa, 27,04 MPa, dan 28,05 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 21 hari tercatat sebesar 27,32 MPa.

Pada umur beton 28 hari, kuat tekan beton variasi 2 yang diperoleh dari keempat benda uji masing-masing sebesar 31,20 MPa, 36,16 MPa, 30,06 MPa, dan 30,66 MPa. Nilai kuat tekan rata-rata beton pada umur 28 hari adalah 32,02 MPa.

Secara keseluruhan, tabel tersebut memuat data hasil pengujian berupa beban tekan maksimum, nilai kuat tekan masing-masing benda uji, serta nilai kuat tekan rata-rata beton variasi 2 pada setiap umur pengujian.

4.4 Analisis Perbandingan dan Pembahasan

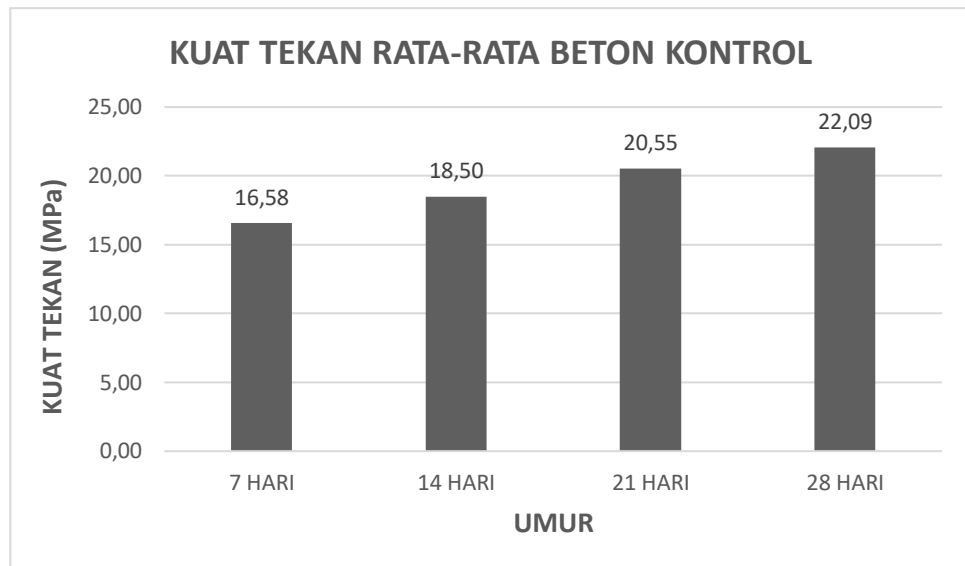
4.4.1 Analisis Perbandingan dan Pembahasan Kuat Tekan Beton Kontrol

Pengujian kuat tekan beton variasi 1 dilakukan untuk mengetahui pengaruh substitusi *fly ash* sebesar 0% terhadap kuat tekan beton dengan penambahan *silica fume* sebesar 10% dan *superplasticizer* sebesar 1% dari berat semen. Beton kontrol digunakan sebagai beton pembanding terhadap beton variasi yang menggunakan material tambahan. Pengujian dilakukan pada benda uji silinder dengan umur perawatan 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk nilai kuat tekan masing-masing benda uji, kuat tekan rata-rata, serta nilai deviasi untuk menunjukkan tingkat keseragaman hasil pengujian.

Tabel 4. 28 Hasil Kuat Tekan Beton Kontrol

BETON KONTROL				
Benda Uji	Berat Tekan (P) (N)	A = 176,71 cm ² Fc = (P/A) (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)	Deviasi
Umur 28 Hari				
1	400424	22,66	22,09	0,41
2	383612	21,71		
3	386857	21,89		
4	390298	22,09		
Umur 21 Hari				
1	366199	20,72	20,55	0,19
2	358606	20,29		
3	364719	20,64		
4	363175	20,55		
Umur 14 Hari				
1	339754	19,23	18,50	1,14
2	310029	17,54		
3	309317	17,50		
4	348530	19,72		
Umur 7 Hari				
1	304925	17,26	16,58	0,61
2	299204	16,93		
3	283913	16,07		
4	283821	16,06		

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.3 Kuat Tekan Rata-Rata Beton Kontrol

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton kontrol yang disajikan pada Tabel 4.29, diperoleh nilai kuat tekan rata-rata sebesar 16,58 MPa pada umur 7 hari, 18,50 MPa pada umur 14 hari, 20,55 MPa pada umur 21 hari, dan 22,09 MPa pada umur 28 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kuat tekan beton kontrol mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Peningkatan kuat tekan dari umur 7 hari ke 14 hari sebesar 11,58%, dari umur 14 hari ke 21 hari sebesar 11,08%, dan dari umur 21 hari ke 28 hari sebesar 7,50%. Secara keseluruhan, kuat tekan beton kontrol mengalami peningkatan sebesar 33,22% dari umur 7 hari hingga umur 28 hari.

Nilai deviasi kuat tekan beton kontrol pada masing-masing umur menunjukkan variasi hasil yang relatif kecil. Pada umur 7 hari, deviasi sebesar 0,61 MPa, sedangkan pada umur 14 hari deviasi meningkat menjadi 1,14 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa pada umur awal, proses hidrasi semen dan pemadatan beton belum berlangsung secara merata pada seluruh benda uji.

Pada umur 21 hari dan 28 hari, nilai deviasi masing-masing menurun menjadi 0,19 MPa dan 0,41 MPa. Penurunan nilai deviasi ini menunjukkan bahwa beton telah mengalami proses hidrasi yang lebih stabil dan homogen, sehingga perbedaan kuat tekan antar benda uji semakin kecil. Dengan demikian, hasil pengujian kuat tekan beton kontrol dapat dikatakan cukup konsisten pada umur lanjut.

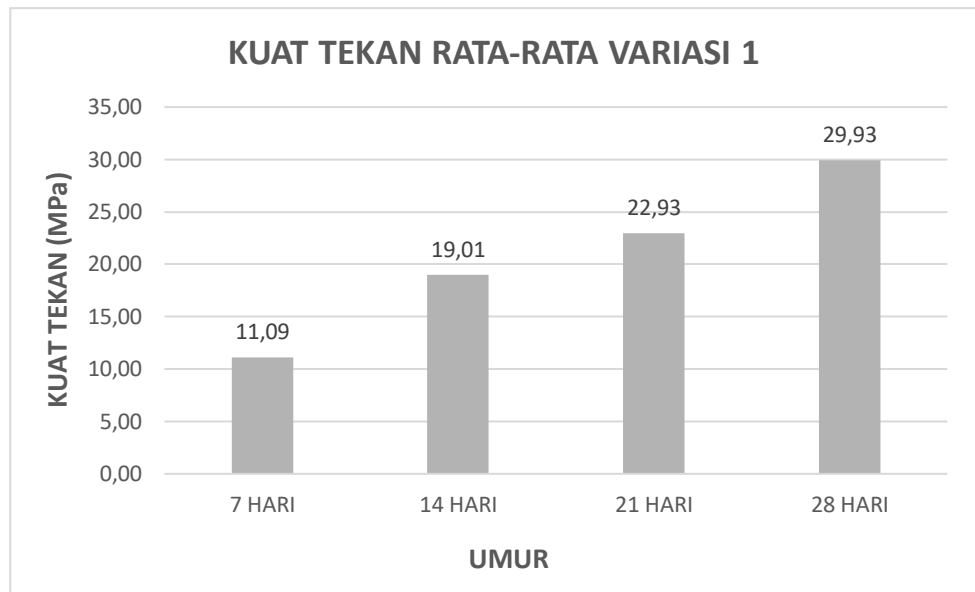
4.4.2 Analisis Perbandingan dan Pembahasan Kuat Tekan Beton Variasi 1

Pengujian kuat tekan beton variasi 1 dilakukan untuk mengetahui pengaruh substitusi *fly ash* sebesar 10% terhadap kuat tekan beton dengan penambahan *silica fume* sebesar 10% dan *superplasticizer* sebesar 1% dari berat semen. Variasi ini diuji pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari untuk mengevaluasi perkembangan kuat tekan beton pada umur awal dan umur lanjut. Hasil pengujian disajikan dalam bentuk kuat tekan masing-masing benda uji, kuat tekan rata-rata, dan nilai deviasi guna menilai konsistensi hasil pengujian.

Tabel 4.29 Hasil Kuat Tekan Beton Variasi 1

V1				
Benda Uji	Berat Tekan (P) (Kg)	A = 176,71,cm2 Fc = (P/A) (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)	Deviasi
Umur 28 Hari				
1	496554	28,10	29,93	1,88
2	571081	32,32		
3	538613	30,48		
4	509112	28,81		
Umur 21 Hari				
1	406198	22,99	22,93	1,38
2	416031	23,54		
3	427758	24,21		
4	371045	21,00		
Umur 14 Hari				
1	345532	19,55	19,01	1,09
2	358248	20,27		
3	319845	18,10		
4	319781	18,10		
Umur 7 Hari				
1	214256	12,12	11,09	0,83
2	198145	11,21		
3	192718	10,91		
4	178997	10,13		

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.4 Kuat Tekan Rata-Rata Beton Variasi 1

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton variasi 1 yang disajikan pada Tabel 4.30, diperoleh nilai kuat tekan rata-rata sebesar 11,09 MPa pada umur 7 hari, 12,12 MPa pada umur 14 hari, 11,21 MPa pada umur 21 hari, dan 10,91 MPa pada umur 28 hari 10,13 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beton variasi 1 mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan seiring dengan bertambahnya umur beton. Peningkatan kuat tekan dari umur 7 hari ke 14 hari sebesar 71,42%, dari umur 14 hari ke 21 hari sebesar 20,62%, dan dari umur 21 hari ke 28 hari sebesar 30,54%. Secara keseluruhan, kuat tekan beton variasi 1 mengalami peningkatan sebesar 169,88 % dari umur 7 hari hingga umur 28 hari.

Nilai deviasi kuat tekan beton variasi 1 menunjukkan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya umur beton, yaitu sebesar 0,83 MPa pada umur 7 hari, 1,09 MPa pada umur 14 hari, 1,38 MPa pada umur 21 hari, dan 1,88 MPa pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan adanya variasi kekuatan antar benda uji, yang dapat disebabkan oleh perbedaan tingkat pemadatan, distribusi material, dan proses pencampuran. Meskipun demikian, nilai deviasi tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk pengujian beton di laboratorium.

4.4.3 Analisis Perbandingan dan Pembahasan Kuat Tekan Beton Variasi 2

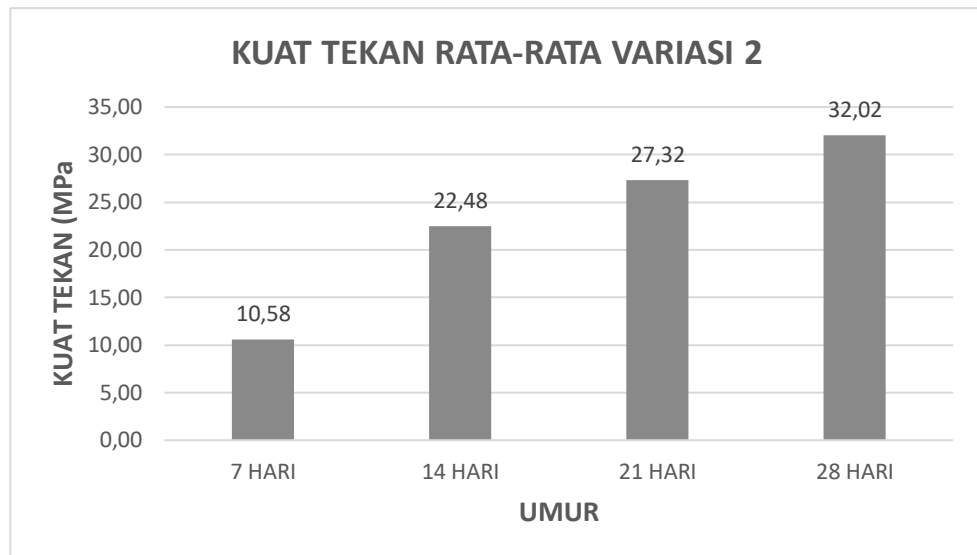
Pengujian kuat tekan beton variasi 2 dilakukan untuk menganalisis pengaruh substitusi *fly ash* sebesar 20% terhadap kuat tekan beton dengan kandungan *silica*

fume dan *superplasticizer* yang dijaga tetap konstan. Pengujian dilakukan pada benda uji silinder dengan umur perawatan 7, 14, 21, dan 28 hari. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk kuat tekan tiap benda uji, kuat tekan rata-rata, serta nilai deviasi untuk mengetahui tingkat penyebaran dan kestabilan hasil uji pada variasi ini.

Tabel 4.30 Hasil Kuat Tekan Beton Variasi 2

V2				
Benda Uji	Berat Tekan (P) (Kg)	A = 176,71 cm ² Fc = (P/A) (Mpa)	Fc Rata-Rata (Mpa)	Deviasi
Umur 28 Hari				
1	551278	31,20	32,02	2,80
2	638925	36,16		
3	531227	30,06		
4	541764	30,66		
Umur 21 Hari				
1	505497	28,61	27,32	1,33
2	451857	25,57		
3	477841	27,04		
4	495612	28,05		
Umur 14 Hari				
1	382816	21,66	22,48	1,94
2	373659	21,14		
3	448161	25,36		
4	384286	21,75		
Umur 7 Hari				
1	157493	8,91	10,58	1,36
2	179438	10,15		
3	213188	12,06		
4	197422	11,17		

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.5 Kuat Tekan Rata-Rata Beton Variasi 2

Sumber: Data Penulis, 2025

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton variasi 2 yang disajikan pada Tabel 4.31, diperoleh nilai kuat tekan rata-rata sebesar 10,58 MPa pada umur 7 hari, 22,48 MPa pada umur 14 hari, 27,32 MPa pada umur 21 hari, dan 32,02 MPa pada umur 28 hari. Hasil tersebut menunjukkan bahwa beton variasi 2 mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan seiring dengan bertambahnya umur beton. Peningkatan kuat tekan dari umur 7 hari ke 14 hari sebesar 112,48%, dari umur 14 hari ke 21 hari sebesar 21,53%, dan dari umur 21 hari ke 28 hari sebesar 17,20%. Secara keseluruhan, kuat tekan beton variasi 2 mengalami peningkatan sebesar 202,65% dari umur 7 hari hingga umur 28 hari.

Nilai deviasi kuat tekan beton variasi 2 menunjukkan kecenderungan yang relatif lebih besar dibandingkan beton kontrol dan beton variasi 1. Deviasi pada umur 7 hari sebesar 1,36 MPa, meningkat menjadi 1,94 MPa pada umur 14 hari, kemudian 1,33 MPa pada umur 21 hari, dan mencapai 2,80 MPa pada umur 28 hari. Nilai deviasi yang cukup besar ini menunjukkan adanya variasi kekuatan antar benda uji, yang kemungkinan disebabkan oleh kadar *fly ash* yang lebih tinggi sehingga memerlukan tingkat pencampuran dan pemadatan yang lebih teliti. Meskipun demikian, nilai deviasi tersebut masih dapat diterima dalam pengujian laboratorium dan tidak mengurangi kecenderungan peningkatan kuat tekan beton secara umum.

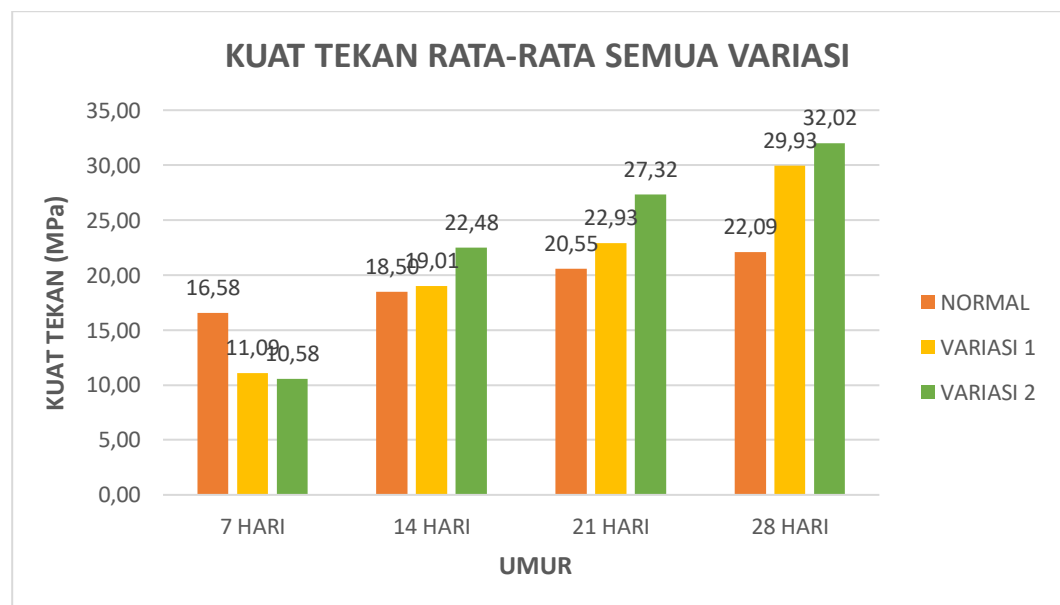
4.4.4 Analisis Perbandingan Dan Pembahasan Kuat Tekan Rata-Rata Seluruh Beton

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dan *silica fume* memberikan dampak positif yang signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton jika dibandingkan dengan beton kontrol. Berikut adalah ringkasan perbandingan kuat tekan rata-rata yang diperoleh:

Tabel 4.31 Hasil Kuat Tekan Rata-Rata Semua Beton

VARIASI CAMPURAN	7 HARI (MPa)	14 HARI (MPa)	21 HARI (MPa)	28 HARI (MPa)
KONTROL	16,58	18,50	20,55	22,09
VARIASI 1	11,09	19,01	22,93	29,93
VARIASI 2	10,58	22,48	27,32	32,02

Sumber: Data Penulis, 2025



Gambar 4.6 Kuat Tekan Rata-Rata Semua Beton

Sumber: Data Penulis, 2025

1. Fase Kekuatan Awal (Umur 7 dan 14 Hari)

- a. Beton Kontrol mencapai nilai kuat tekan rata-rata sebesar 16,58 MPa pada umur 7 hari dan meningkat menjadi 18,50 MPa pada umur 14 hari, atau mengalami kenaikan sebesar 11,58%. Meskipun tanpa penambahan *fly ash*, penggunaan *silica fume* telah memberikan kontribusi terhadap kepadatan struktur beton pada umur awal melalui pengisian pori-pori mikro.
- b. Beton Variasi 1 menunjukkan nilai kuat tekan sebesar 11,09 MPa pada umur 7 hari dan meningkat menjadi 19,01 MPa pada umur 14 hari, dengan persentase kenaikan sebesar 71,42 %. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai kuat tekan yang relatif rendah yaitu 11,09 MPa, yang salah satunya disebabkan oleh terjadinya segregasi pada campuran beton. Segregasi ini mengindikasikan bahwa distribusi agregat kasar, agregat halus, dan pasta semen tidak merata, sehingga terjadi pemisahan material selama proses pengecoran maupun pemadatan. Akibatnya, sebagian zona beton menjadi lebih kaya pasta semen sementara bagian lainnya didominasi agregat, yang menyebabkan terbentuknya rongga dan porositas yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menghambat perkembangan ikatan antar material pada beton, sehingga kekuatan tekan yang dihasilkan belum optimal.
- c. Beton Variasi 2 menghasilkan kuat tekan paling tinggi pada fase awal, yaitu sebesar 10,58 MPa pada umur 7 hari dan 22,48 MPa pada umur 14 hari, atau mengalami kenaikan sebesar 112,48%. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai kuat tekan yang relatif rendah yaitu 11,09 MPa, yang salah satunya disebabkan oleh terjadinya segregasi pada campuran beton. Segregasi ini mengindikasikan bahwa distribusi agregat kasar, agregat halus, dan pasta semen tidak merata, sehingga terjadi pemisahan material selama proses pengecoran maupun pemadatan. Akibatnya, sebagian zona beton menjadi lebih kaya pasta semen sementara bagian lainnya didominasi agregat, yang menyebabkan terbentuknya rongga dan porositas yang lebih tinggi. Kondisi tersebut menghambat perkembangan ikatan antar material pada beton, sehingga kekuatan tekan yang dihasilkan belum optimal.

2. Fase Kekuatan Lanjut (Umur 21 dan 28 Hari)

- a. Beton Kontrol Pada umur 21 hari, mencapai kuat tekan sebesar 20,55 MPa dan meningkat menjadi 22,09 MPa pada umur 28 hari, dengan persentase kenaikan sebesar 7,50%. Meskipun mengalami peningkatan, kuat tekan akhir beton kontrol masih belum mampu mencapai mutu rencana f_c 30 MPa, yang menunjukkan keterbatasan reaksi hidrasi lanjutan tanpa dukungan material pozzolan tambahan.
- b. Beton Variasi 1 mengalami peningkatan kuat tekan dari 22,93 MPa pada umur 21 hari menjadi 29,93 MPa pada umur 28 hari, atau meningkat sebesar 30,54%. Jika dibandingkan dengan beton kontrol pada umur 28 hari, beton variasi 1 menunjukkan peningkatan kuat tekan sebesar 35,49%. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* 10% bekerja secara efektif sebagai bahan pozzolan sekunder yang meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton.
- c. Beton Variasi 2 menunjukkan performa mekanis terbaik dengan kuat tekan sebesar 27,32 MPa pada umur 21 hari dan meningkat menjadi 32,02 MPa pada umur 28 hari, dengan persentase kenaikan sebesar 17,20%. Dibandingkan beton kontrol, beton variasi 2 mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 44,95% pada umur 28 hari dan berhasil melampaui mutu rencana f_c 30 MPa. Hal ini menegaskan efektivitas penggunaan *fly ash* dalam kadar lebih tinggi yang dikombinasikan dengan *silica fume* dalam meningkatkan kekuatan beton pada umur lanjut.

4.5 Penentuan Komposisi Optimum

Penentuan komposisi campuran beton optimum dalam penelitian ini didasarkan pada hasil pengujian kuat tekan silinder beton pada umur 28 hari, yang merupakan parameter utama dalam menilai kinerja mekanis beton hybrid¹. Komposisi optimum dipilih berdasarkan variasi yang mampu menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi dan memenuhi atau melampaui mutu beton rencana (f_c) sebesar 30 MPa.

Berdasarkan data hasil pengujian pada Bab 4.4, perbandingan capaian kuat tekan pada umur 28 hari untuk ketiga variasi adalah sebagai berikut:

1. Beton Kontrol: 22,09 MPa.
2. Beton Variasi 1 (V1): 29,93 MPa.
3. Beton Variasi 2 (V2): 32,02 MPa.

Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa Beton Variasi 2 (V2) dengan proporsi substitusi sebagian semen berupa *fly ash* sebesar 20%, *silica fume* sebesar 10%, dan penambahan *superplasticizer* sebesar 1% merupakan komposisi campuran optimum.

Dengan demikian, formulasi pada Variasi 2 direkomendasikan sebagai standar dalam pembuatan beton hybrid ramah lingkungan dengan mutu f_c 30 MPa untuk diaplikasikan pada proyek infrastruktur.

.