

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Material

Pengujian material dalam penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Program Studi Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur. Rangkaian pengujian tersebut meliputi karakteristik agregat halus, agregat kasar, serta pasir zeolit yang digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus. Data hasil pengujian material digunakan untuk acuan campuran beton yang ingin direncanakan.

4.1.1 Pengujian Agregat Halus

Pengujian agregat halus yang dilakukan meliputi pengujian analisa agregat halus, menentukan berat jenis agregat halus, mengetahui penyerapan atau absorpsi dan kadar air. Selain itu, agregat halus harus bersih dari kadar lumpur dengan cara menganalisis melalui pengujian kadar lumpur.

1. Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

Tabel 4.1. Hasil *Grain Size* Pasir Muntlan

Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos
mm	Inch	Gram (a)	% (b) = (a) / W	% (c)	% (d) = 100 - c
19	¾	0	0	0	100
12.7	½	0	0	0	100
9.25	"3/8"	0	0	0	100
4.75	No. 4	0,4	0,04	0,04	99,96
2.36	No. 8	45,2	4,52	4,56	95,44
1.18	No. 16	276,4	27,64	32,2	67,8
0.60	No. 30	225,6	22,56	54,76	45,24
0.30	No. 50	160,7	16,07	70,83	29,17
0.15	No. 100	246,3	24,63	95,46	4,54
0.075	No. 200	10,1	1,01	96,47	3,53
	Pan	34	3,4	99,87	0,13
Total (W)		998,7	99,87		

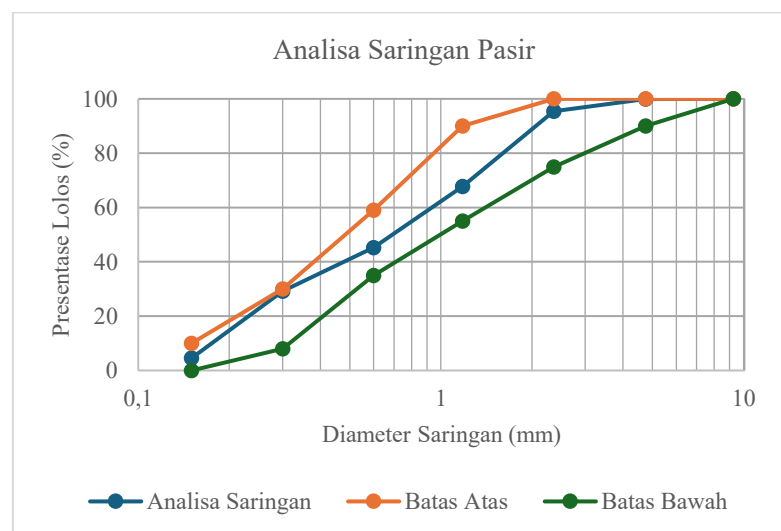
Hasil pada tabel di atas merupakan hasil pengujian *grain size* pada material yang akan digunakan pada beton. Pengujian ini menggunakan pasir dengan berat 1000 gram berat kering oven. Pengujian analisa agregat halus untuk menentukan karakteristik modulus kehalusan (FM) dan menggunakan saringan yang telah diurutkan dari No.4 sampai 200, dan yang terakhir pan.

Persentase kehilangan agregat halus sebesar 0,13% kurang dari 2% dengan perhitungan berikut ini:

$$\begin{aligned}
 &= (w-w_1)/w \times 100 \\
 &= (1000 - 998,7)/1000 \times 100 \\
 &= 0,13 < 2\%
 \end{aligned}$$

Dengan hasil yang telah diketahui dari pengujian analisa saringan agregat halus, dapat ditentukan perhitungan modulus kehalusan.

$$\begin{aligned}
 FM &= \Sigma(\% \text{kumulatif tertahan}) / 100 \\
 &= 257,85 / 100 \\
 &= 2,58
 \end{aligned}$$



Gambar 4.1. Diagram Hasil Pengujian Analisa Saringan Pasir Muntilan

Hasil dari perhitungan tingkat kehalusan yang dimiliki material pasir atau agregat halus tersebut merujuk pada ASTM C33-03. Hasil pengujian pada penelitian ini masuk dalam rentang persyaratan FM 2,3-3,1. Pada gambar

diagram zona analisa saringan, pasir yang digunakan pada penelitian ini menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2000) dalam SNI 03 2834:2000 terdapat pada zona 2 pasir sedang.

2. Pengujian Berat Jenis Agregat Halus

Tahap ini dilakukan menggunakan pasir dengan kondisi jenuh kering permukaan dengan alat piknometer. Pengujian menggunakan piknometer dimasukkan agregat halus dengan berat 200 gram dan air sampai batas piknometer yang telah ditentukan. Berikut ini perhitungan hasil pengujian jenuh kering permukaan.

Diketahui :

$$\begin{aligned}
 \text{Massa piknometer + air} & \quad (B) & = & \quad 628,1 \text{ gram} \\
 \text{Massa piknometer + pasir + air} & \quad (C) & = & \quad 753 \text{ gram} \\
 \text{Berat jenuh kering permukaan (SSD)} & \quad (S) & = & \quad 200 \text{ gram} \\
 \text{Berat jenis} & = & S / (B+S-C) & = & 2,663 \text{ gram/cm}^3
 \end{aligned}$$

Angka hasil berat jenis tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* dari kebutuhan agregat halus atau pasir dengan nilai sebesar 2,663 gram/cm³.

3. Pengujian Absorpsi atau Penyerapan Air Agregat Halus

Pengujian ini dapat dilakukan satu waktu dengan pengujian berat jenis, karena pengujian ini menggunakan agregat halus jenuh kering permukaan. Pada pengujian ini diperlukan pasir dengan jenuh kering permukaan dan pasir kering oven. Berikut ini perhitungan hasil pengujian dari absorpsi,

Diketahui:

$$\begin{aligned}
 W1 & = \text{Agregat Halus Jenuh Kering Permukaan (SSD)} & = & \quad 500 \text{ gram} \\
 W2 & = \text{Agregat Halus Uji Kering Oven} & = & \quad 493.9 \text{ gram} \\
 P & = (W1 - W2)/W2 \times 100\% & = & \quad 1,235 \%
 \end{aligned}$$

Angka hasil penyerapan air tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* untuk kebutuhan air pada beton dengan nilai sebesar 1,235%. Pengukuran pengujian tersebut untuk menjaga campuran beton tetap terjaga. Tidak hanya itu, nilai dari penyerapan air dapat juga untuk mengantisipasi nilai rasio air semen yang direncanakan.

4. Pengujian Kadar Air Agregat Halus

Pengujian kadar air mendapatkan hasil dengan agregat halus kondisi lapangan dengan cara menimbang pasir atau agregat halus sebesar 500 gram dan setelah itu mengambil data berat pasir dari hasil pasir yang sudah dikeringkan menggunakan oven.

Diketahui :

$$W1 = \text{Massa Agregat Halus Kondisi Lapangan} = 500 \text{ gram}$$

$$W2 = \text{Berat kering Oven} = 499,6 \text{ gram}$$

$$P = (W1 - W2)/W2 \times 100\% = 0,08 \%$$

Angka hasil kadar air tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* untuk kebutuhan air pada beton dengan nilai sebesar 0,08 %.

5. Pengujian Kadar Lumpur Agregat Halus

Pengujian kadar lumpur dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari agregat halus. Dari pengujian kadar lumpur, material yang digunakan memiliki hasil kurang dari 5% syarat maksimal kadar lumpur pada agregat halus pasir.

Diketahui :

$$\text{Tinggi total pasir + lumpur} = 205 \text{ cc}$$

$$\text{Tinggi total pasir} = 200 \text{ cc}$$

$$\text{Rumus} = (A - B)/A \times 100 = 2,44 \%$$

Dari hasil yang telah diketahui kurang dari 5%, maka pasir tersebut layak digunakan sebagai material pada beton.

4.1.2 Pengujian Agregat Kasar

Pengujian terhadap agregat kasar dilakukan secara menyeluruh untuk mengevaluasi karakteristik fisik material yang akan digunakan dalam campuran beton. Parameter pengujian meliputi pemeriksaan berat jenis, nilai penyerapan atau absorpsi, kadar air total, serta berat isi agregat kasar. Data hasil pengujian nantinya akan masukkan dalam perhitungan *jobmix design*.

1. Pengujian Berat Jenis Agregat Kasar

Pengujian ini dilakukan menggunakan pasir zeolit jenuh kering permukaan dengan menggunakan timbangan air dengan wadah yang dimasukkan ke dalam

air dengan agregat kasar sebesar 4000 gram. Berikut ini perhitungan hasil pengujian pasir zeolit jenuh kering permukaan.

Diketahui :

$$\begin{aligned} \text{Berat SSD Agregat Kasar} & \quad (B) &= & 4000 \text{ gram} \\ \text{Berat Agregat Dalam Air} & \quad (C) &= & 2480 \text{ gram} \\ \text{Berat jenis} &= & B / (B-C) &= & 2,632 \text{ gram/cm}^3 \end{aligned}$$

Angka hasil berat jenis tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* dari kebutuhan agregat kasar dengan nilai sebesar 2,632 gram/cm³.

2. Pengujian Absorpsi atau Penyerapan Air Agregat Kasar

Pada tahap ini dapat uji dengan pengujian berat jenis secara bersamaan, karena pengujian ini menggunakan agregat kasar jenuh kering permukaan. Pada pengujian ini diperlukan berat agregat kasar dengan SSD dan berat isi kering menggunakan oven. Berikut ini perhitungan hasil pengujian dari absorpsi.

Diketahui:

$$\begin{aligned} W1 &= \text{Agregat Kasar Jenuh Kering Permukaan (SSD)} &= & 4000 \text{ gram} \\ W2 &= \text{Agregat Kasar Uji Kering Oven} &= & 3955 \text{ gram} \\ P &= (W1 - W2)/W2 \times 100\% &= & 1,138 \% \end{aligned}$$

Angka hasil penyerapan air tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* untuk kebutuhan air pada beton dengan nilai sebesar 1,138%.

3. Kadar Air Agregat Kasar

Pengujian kadar air mendapatkan hasil dengan agregat kasar kondisi jenuh permukaan (SSD) dengan cara menimbang agregat kasar sebesar 1000 gram dan setelah itu mengambil data berat agregat kasar dari hasil kering oven.

Diketahui :

$$\begin{aligned} W1 &= \text{Berat Agregat Halus Kondisi Lapangan} &= & 1000 \text{ gram} \\ W2 &= \text{Berat kering Oven} &= & 992 \text{ gram} \\ P &= (W1 - W2)/W2 \times 100\% &= & 0,806 \% \end{aligned}$$

Angka hasil kadar air tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* untuk kebutuhan air pada beton dengan nilai sebesar 0,806 %.

4. Berat Isi Agregat Kasar

Agregat kasar perlu pengujian berat isi untuk menentukan berat isi dari kerikil dengan kondisi jenuh kering permukaan (SSD) dengan cara menimbang berat bejana dan berat agregat kasar yang penuh pada bejana.

Diketahui :

$$G = \text{Berat Agregat Halus dan Bejana} = 27,37 \text{ kg}$$

$$T = \text{Berat Bejana} = 6,315 \text{ kg}$$

$$V = \text{Volume Bejana} = 0,0141 \text{ m}^3$$

$$M = (G - T) / V = 1496 \text{ kg}$$

Angka hasil berat isi agregat kasar tersebut dapat digunakan untuk perhitungan *mix design* untuk kebutuhan agregat kasar pada beton dengan nilai sebesar 1496 kg.

4.1.3 Pengujian Pasir Zeolit

Pengujian terhadap pasir zeolit dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik fisik material substitusi tersebut sebelum digunakan dalam campuran beton. Tahapan ini difokuskan pada pemeriksaan nilai berat jenis pasir zeolit. Melalui tahapan pengujian pasir zeolit, penelitian ini dapat mengetahui pengaruh hasil akhir dari pengujian beton.

1. Pengujian Analisa Saringan Pasir Zeolit

Pengujian analisa pada pasir zeolit menggunakan alat *sieve shaker* sebagai alat uji dan saringan dengan ukuran yang sudah diurutkan. Pengujian yang dilakukan pada pasir zeolit ini menggunakan pasir zeolit yang sudah kering oven dengan berat 1000 gram. Analisa ini untuk menentukan karakteristik dari pasir zeolit dengan menentukan zona grafik sesuai standar SNI 03 2834:2000, serta merujuk pada ASTM C33-03 sebagai nilai rentang modulus kehalusan 2,3-3,1. Persentase kehilangan pasir zeolit sebesar 1,36% dengan batas maksimum 2% dengan perhitungan dari tabel 4.2 hasil *grain size* berikut ini:

$$= (w-w_1)/w \times 100$$

$$= (1000 - 986,4)/1000 \times 100$$

$$= 1,36 < 2\%$$

Tabel 4.2. Hasil *Grain Size* Pasir Zeolit

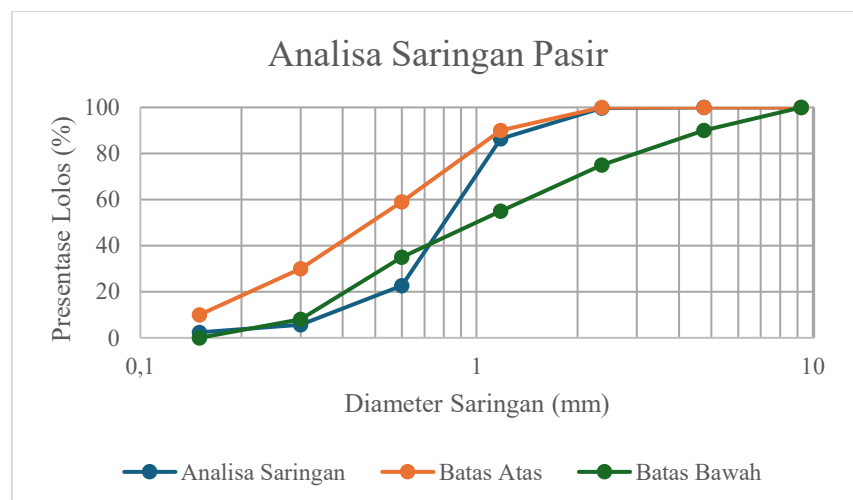
Saringan		Berat Tertahan	Persentase Berat Tertahan	Persentase Tertahan Kumulatif	Persentase Lolos
mm	Inci	Gram	%	%	%
		(a)	(b) = (a) / W	(c)	(d) = 100 - c
19	¾	0	0	0	100
12.7	½	0	0	0	100
9.25	"3/8"	0	0	0	100
4.75	No. 4	0	0	0	100
2.36	No. 8	2,5	0,25	0,25	99,75
1.18	No. 16	133	13,3	13,55	86,45
0.60	No. 30	638,2	63,82	77,37	22,63
0.30	No. 50	169,2	16,92	94,29	5,71
0.15	No. 100	33,3	3,33	97,62	2,38
0.075	No. 200	3,2	0,32	97,94	2,06
	Pan	7	0,7	98,64	1,36
Total (W)		986,4	98,64		

Dengan hasil yang telah diketahui dari pengujian analisa saringan agregat halus, dapat ditentukan perhitungan modulus kehalusan.

$$FM = \Sigma(\% \text{kumulatif tertahan}) / 100$$

$$= 283,08 / 100$$

$$= 2,83$$



Gambar 4.2. Diagram Hasil Pengujian Analisa Saringan Pasir Zeolit

Dari hasil pengujian perhitungan saringan pasir zeolit menunjukkan memenuhi persyaratan modulus 2,3-3,1. Angka tersebut sesuai rujukan pada standar ASTM C33-03. Pada grafik di atas menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2000) dalam SNI 03 2834:2000, menunjukkan pasir tersebut memiliki karakteristik pasir sedang karena berada pada zona 2.

2. Pengujian Berat Jenis Pasir Zeolit

Pengujian ini menggunakan pasir zeolit jenuh kering permukaan dengan menggunakan piknometer yang dimasukkan agregat halus dengan berat 200 gram dan air sampai batas piknometer yang telah ditentukan. Berikut ini perhitungan hasil pengujian pasir zeolit.

Diketahui :

piknometer dengan air	(B)	=	706,4 gram
piknometer + pasir + air	(C)	=	815 gram
Berat jenuh kering permukaan (SSD)	(S)	=	200 gram
Berat jenis = $S / (B+S-C)$		=	2,188 gram/cm ³

Dari hasil pengujian berat jenis yang sudah dilakukan, berat jenis pasir zeolit penelitian ini sebesar 2,188 gram/cm³. Nilai tersebut menunjukkan karakteristik pasir zeolit yang lebih ringan dibanding pasir utama.

4.2 Kebutuhan Material *Job Mix Design*

Berdasarkan seluruh data hasil pengujian karakteristik material yang telah dipaparkan sebelumnya. Data material nantinya akan mempermudah saat melakukan perhitungan kebutuhan beton sesuai dengan rencana penelitian ini agar mempermudah percampuran material beton saat pembuatan benda uji. Berikut rincian kebutuhan berat dan volume material untuk setiap variasi benda uji disajikan secara detail sebagai acuan pembuatan *job mix design* sebagai berikut:

A. Rencana Beton

Rencana beton didapat dari rencana pada bab 3. Pada penelitian ini merencanakan pemilihan nilai setiap bagian pembuatan beton dengan detail sebagai berikut :

Tabel 4.3. Rencana Pembuatan Beton

Rencana	Nilai
Tipe Konstruksi	: Pelat Lantai
Nilai Slump	: 75 mm
Kuat Tekan	: 20 MPa
Ukuran Agregat Maksimum	: 25 mm
Kebutuhan Air Pencampur	: 193 kg/m ³
Rasio Air Semen	: 0,635
Kadar Semen	: 304 kg/m ³

B. Data Material

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Bahan Material Beton

Pengujian Material	Nilai	
Modulus kehalusan agregat halus (FM)	2,58	-
Berat jenis agregat halus (SSD)	2,66	g/cm ³
Penyerapan air agregat halus	1,24	%
Kadar air agregat halus (kondisi lap)	0,08	%
Berat jenis agregat kasar (SSD)	2,63	g/cm ³
Penyerapan air agregat kasar	1,14	%
Kadar air agregat kasar (kondisi lap)	0,81	%
Berat isi agregat kasar	1496	kg/m ³
Berat jenis semen portland	2,96	g/cm ³

Data material yang disajikan di atas merupakan hasil pengujian laboratorium dari bahan-bahan penyusun untuk pembuatan beton normal. Seluruh prosedur pengujian tersebut dilaksanakan dengan spesifikasi Standar Nasional Indonesia (SNI) yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional. Penggunaan standarisasi digunakan untuk parameter campuran pembuatan benda uji beton.

C. Proporsi Kebutuhan

Berdasarkan perhitungan *jobmix* dengan data rencana dan data pengujian material bahan, didapatkan hasil kebutuhan untuk 1 variasi yang berisi 6 sampel. Total kebutuhan campuran beton meliputi semen, air, agregat kasar, agregat halus dan pasir zeolit. Kebutuhan material tersebut disiapkan agar tidak mengurangi mutu target yang sudah direncanakan.

Tabel 4.5. Kebutuhan Beton per 6 Sampel

Variasi	Semen (kg)	Air (L)	Agregat Kasar (kg)	Agregat Halus (kg)	Pasir Zeolit 15% (kg)
V1 (Normal Kontrol)	9,67	6,54	32,84	24,76	0
V2 (Subs P.Normal)	9,67	6,54	32,84	21,05	3,09
V3 (Subs P.Kering)	9,67	6,54	32,84	21,05	3,09
V4 (Subs P. SSD)	9,67	6,54	32,84	21,05	3,09
V5 (Subs P.Kimia)	9,67	6,54	32,84	21,05	3,09

4.3 Hasil Pengujian Benda Uji

Karakteristik fisik dan mekanis dari beton dengan material substitusi pasir zeolit dievaluasi secara menyeluruh melalui serangkaian pengujian. Evaluasi terhadap beton segar dilakukan melalui pengujian densitas dan nilai slump, sedangkan perlakuan pada saat kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari menjadi indikator utama mengukur performa beton terhadap rencana. Hasil dari pengujian ini berfungsi untuk mengidentifikasi pengaruh antara beton normal dengan beton substitusi pasir zeolit dengan berbagai perlakuan.

4.3.1 Hasil Pengujian Slump Beton

Pengujian *slump test* dilakukan untuk mengevaluasi *workability* beton segar. Nilai slump mencerminkan konsistensi campuran dan secara tidak langsung mengindikasikan FAS yang efektif. Target slump dalam perencanaan campuran adalah 75 mm. Seluruh data hasil pengukuran slump dari kedua pengujian slump untuk kelima variasi disajikan pada Tabel berikut.

Tabel 4.6. Hasil Pengujian Slump Beton

Kode	Variasi Beton	Pengukuran 1 (cm)	Pengukuran 2 (cm)	Rata-rata (cm)
V1	Normal	7,5	7,0	7,25
V2	Tanpa Perlakuan	6,5	7,0	6,75
V3	Perlakuan Kering	4,0	4,0	4,00
V4	Perlakuan SSD	6,5	5,0	5,75
V5	Perlakuan Kimia	2,5	2,5	2,50

Hasil pengujian *slump* pada campuran Beton Normal (V1) menghasilkan nilai rata-rata tertinggi sebesar 7,25 cm. Nilai tersebut sesuai dengan target perencanaan yaitu 2,5 cm sampai 7,5 cm karena karakteristik pasir alami yang memiliki tingkat penyerapan (*absorpsi*) rendah dan permukaan yang relatif halus. Kondisi tersebut membuat seluruh air di dalam beton segar tersedia untuk menjaga keenceran adukan tanpa adanya gangguan absorpsi internal, sehingga menjadikan variasi V1 ini sebagai standar kontrol (*baseline*) untuk mengevaluasi pengaruh substitusi pasir zeolit terhadap tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*).

Ketika pasir alami mulai disubstitusi oleh pasir zeolit, karakteristik slump mengalami penurunan yang bervariasi tergantung pada kondisi perlakuan agregatnya. Pada Beton Tanpa Perlakuan (V2), nilai slump berkurang menjadi rata-rata 6,75 cm karena faktor absorpsi alami zeolit mentah. Sementara itu, pada perlakuan Jenuh Kering Permukaan atau SSD (V4), terjadi penurunan lanjutan dengan nilai rata-rata sebesar 5,75 cm. Meskipun angka ini lebih rendah dari V1 dan V2, kondisi SSD ini terbukti masih mampu menahan laju slump agar tidak merosot terlalu drastis seperti yang terjadi pada variasi kering oven maupun variasi kimia. Hal ini dikarenakan pori-pori zeolit V4 yang sudah jenuh air tidak lagi menyerap air dari semen serta partikel mikroskopis yang terlepas yang membuat adonan beton menjadi lebih kental.

Sebaliknya, penurunan *slump* yang sangat drastis dan konstan ditunjukkan oleh variasi Kering Oven (V3) dengan nilai rata-rata sebesar 4,00 cm. Fenomena ini merupakan hasil langsung dari penyerapan zeolit, di mana seluruh saluran dan pori internal zeolit yang kosong akibat pengeringan oven langsung menyerap air bebas secara masif saat pencampuran berlangsung. Proses penyerapan ini menurunkan faktor air semen (FAS) efektif secara signifikan pada pasta semen di sekeliling agregat, sehingga meningkatkan kekentalan adukan dan air masuk ke dalam pori – pori zeolit akibat pori – pori yang terbuka atau kosong.

Tingkat *workability* pengerjaan paling rendah dicatatkan oleh variasi Perlakuan Kimia (V5) dengan nilai *slump* rata-rata sebesar 2,50 cm. Karakteristik adukan yang sangat kaku ini disebabkan oleh kombinasi pembersihan pori oleh asam HCl yang menghasilkan mesopori aktif dengan daya isap kapiler sangat tinggi yang

sebelumnya bersifat mikropori, serta aktivasi dengan zat basa (NaOH) yang membuat tekstur mikro zeolit menjadi kasar, sekaligus mengaktifkan reaksi pozolan yang mengonsumsi air bebas di dalam adukan sejak awal pencampuran. Meskipun karakteristik adukannya tergolong kaku, kendala kemudahan alir pada variasi V5 ini dapat diantisipasi melalui proses pemadatan yang maksimal saat pencetakan, sehingga struktur mikro beton tetap padat dan performa mekanisnya yang lebih unggul tetap dapat dicapai.

4.3.2 Hasil Pengujian Densitas Beton

Pengujian densitas beton segar dilakukan untuk mengetahui berat isi (*bulk density*) campuran beton per satuan volume adukan setelah proses pemadatan di laboratorium. Hasil pengujian tersebut berdasarkan acuan SNI-1973-2016 tentang pembuatan dan perawatan beton dengan rumus sebagai berikut :

$$Densitas = \frac{A - B}{V}$$

Keterangan :

A = Berat Silinder + Beton

B = Berat Silinder

V = Volume Silinder

Nilai densitas dipengaruhi oleh berat jenis material penyusun dan kondisi kadar air awal agregat. Rekapitulasi hasil densitas rata-rata kelima variasi pada Tabel berikut :

Tabel 4.7. Rata-Rata Densitas Variasi Beton

Kode	Variasi Beton	Densitas Rata-rata (kg/m ³)	Selisih thd Beton Normal (kg/m ³)
V1	Normal	2.405,354	-
V2	Tanpa Perlakuan	2.360,272	-45,082
V3	Perlakuan Kering	2.385,045	-20,309
V4	Perlakuan SSD	2.372,155	-33,199
V5	Perlakuan Kimia	2.384,416	-20,938

Hasil tersebut menunjukkan bahwa substitusi pasir zeolit efektif menurunkan berat isi atau densitas beton. Penurunan densitas ini mengonfirmasi dipengaruhi oleh material penyusun beton khususnya pasir dengan karakteristik fisik pasir zeolit sebagai substitusi pasir yang secara alami memiliki rongga dan memiliki berat jenis (*specific gravity*) lebih ringan sebesar 2,188 gram/cm³ dibandingkan pasir muntitan yang digunakan sebesar 2,663 gram/cm³.

Untuk detail hasil densitas beton normal dan variasi perlakuan dari pasir zeolit pada beton substitusi pasir zeolit sebagai berikut:

A. Beton Normal

Tabel 4.8. Densitas Beton Normal

Benda Uji	Berat Cetakan (kg)	Berat Cetakan + Isi (kg)	Volume Cetakan (m ³)	Densitas D (kg/m ³)
V1-1	10,480	23,185	0,005301	2396,520
V1-2	12,295	25,100	0,005301	2415,383
V1-3	13,054	25,675	0,005301	2380,675
V1-4	9,060	21,905	0,005301	2422,928
V1-5	9,795	22,520	0,005301	2400,292
V1-6	10,260	23,070	0,005301	2416,326
Rata-rata Densitas Normal				2405,354

Berdasarkan data pada Tabel 4.7, beton normal V1 menghasilkan densitas per benda uji yang bervariasi antara 2380,675 kg/m³ (V1-3) hingga 2422,928 kg/m³ (V1-4), dengan nilai rata-rata sebesar 2405,354 kg/m³. Dari tabel dibawah hasil densitas beton normal, bahwa campuran V1 secara konsisten masuk dalam klasifikasi beton normal SNI-7656-2012 tabel 6 yaitu minimal 2380 (kg/m³) untuk ukuran agregat maksimum 25 mm. Densitas yang tinggi ini didukung oleh berat jenis pasir yang digunakan sebesar 2,663 gram/cm³ yang menghasilkan butiran rapat dengan rongga udara minimal di dalam beton segar.

B. Beton Substitusi Pasir Zeolit Tanpa Perlakuan

Berdasarkan data pada Tabel 4.8, beton normal V2 menghasilkan densitas per benda uji yang bervariasi antara 2312,58 kg/m³ (V2-5) hingga 2382,373 kg/m³ (V2-2), dengan nilai rata-rata sebesar 2360,209 kg/m³. Akibat pasir zeolit tidak ada perlakuan khusus, pori-pori pada zeolit masih berisi senyawa pengotor dan air tertahan yang menghalangi masuk ke dalam pasta semen dan menghasilkan

lebih banyak rongga udara sisa yang membuat berat isi campuran menjadi lebih renggang dan densitas beton rata-ratanya menurun.

Tabel 4.9. Densitas Beton Substitusi Pasir Zeolit tanpa Perlakuan

Benda Uji	Berat Cetakan (kg)	Berat Cetakan + Isi (kg)	Volume Cetakan (m ³)	Densitas D (kg/m ³)
V2-1	10,485	23,060	0,005301	2371,998
V2-2	12,305	24,935	0,005301	2382,373
V2-3	13,040	25,555	0,005301	2360,680
V2-4	9,060	21,600	0,005301	2365,396
V2-5	9,795	22,055	0,005301	2312,580
V2-6	10,260	22,815	0,005301	2368,226
Rata-rata Densitas Tanpa Perlakuan				2360,209

Dari tabel di atas hasil densitas beton substitusi pasir zeolit tanpa perlakuan, menunjukkan bahwa adanya variasi dalam distribusi butiran zeolit di dalam cetakan yang berkaitan dengan sifat berat jenis zeolit yang lebih rendah sebesar 2,188 dibandingkan pasir alam.

C. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan Kering

Berdasarkan data pada Tabel 4.9, beton normal V3 menghasilkan densitas per benda uji yang bervariasi antara 2360,68 kg/m³ (V3-5) hingga 2410,667 kg/m³ (V3-6), dengan nilai rata-rata sebesar 2385,045 kg/m³. Dari tabel di bawah ini, hasil densitas beton substitusi pasir zeolit dengan perlakuan kering, bahwa proses pengeringan memengaruhi hasil terhadap densitas beton variasi.

Tabel 4.10. Densitas Beton Substitusi Pasir Zeolit dengan Perlakuan Kering

Benda Uji	Berat Cetakan (kg)	Berat Cetakan + Isi (kg)	Volume Cetakan (m ³)	Densitas D (kg/m ³)
V3-1	10,480	23,050	0,005301	2371,055
V3-2	12,305	24,980	0,005301	2390,861
V3-3	13,045	25,560	0,005301	2360,680
V3-4	9,060	21,820	0,005301	2406,894
V3-5	9,785	22,350	0,005301	2370,112
V3-6	10,255	23,035	0,005301	2410,667
Rata-rata Densitas Perlakuan Kering				2385,045

Kondisi pori-pori pada pasir zeolit yang kosong akibat pengeringan oven memungkinkan pasta semen meresap masuk ke dalam butiran agregat selama

pencampuran. Masuknya pasta semen ke dalam rongga zeolit ini menghasilkan ikatan fisik antar-material yang jauh lebih rapat, sehingga menciptakan struktur campuran yang lebih padat jika dibandingkan dengan variasi tanpa perlakuan.

D. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan SSD

Berdasarkan data pada Tabel 4.10, beton normal V4 menghasilkan densitas per benda uji yang bervariasi antara 2347,476 kg/m³ (V4-1) hingga 2389,918 kg/m³ (V4-6), dengan nilai rata-rata sebesar 2372,155 kg/m³. Dari tabel di bawah hasil densitas beton substitusi pasir zeolit dengan perlakuan SSD, menghasilkan nilai densitas yang lebih rendah dibanding perlakuan kering dan lebih tinggi dibanding tanpa perlakuan.

Tabel 4.11. Densitas Beton Substitusi Pasir Zeolit dengan Perlakuan SSD

Benda Uji	Berat Cetakan (kg)	Berat Cetakan + Isi (kg)	Volume Cetakan (m ³)	Densitas D (kg/m ³)
V4-1	10,475	22,920	0,005301	2347,476
V4-2	12,295	24,935	0,005301	2384,259
V4-3	13,040	25,635	0,005301	2375,771
V4-4	9,060	21,625	0,005301	2370,112
V4-5	9,790	22,330	0,005301	2365,396
V4-6	10,255	22,925	0,005301	2389,918
Rata-rata Densitas Perlakuan SSD				2372,155

Hal tersebut disebabkan pori-pori zeolit sudah terjenuh oleh air menghasilkan densitas yang lebih tinggi dibanding tanpa perlakuan. Berbeda dengan perlakuan kering yang pori-porinya menyerap pasta semen yang memberikan berat lebih besar dibanding air dan memperkuat struktur.

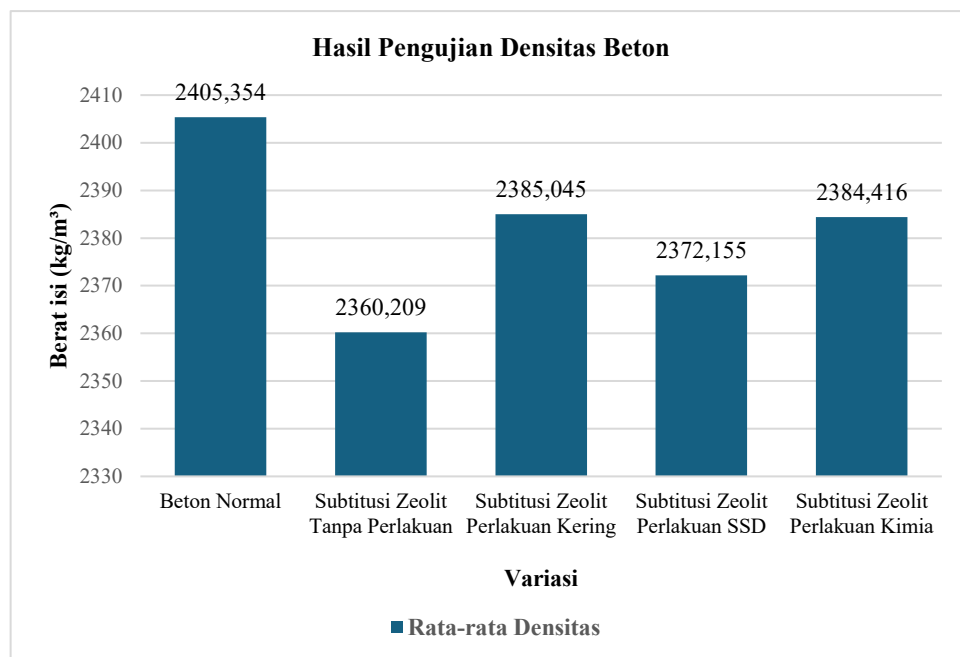
E. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan Kimia

Berdasarkan data pada Tabel 4.11, beton normal V5 menghasilkan densitas per benda uji yang bervariasi antara 2371,998 kg/m³ (V5-5) hingga 2397,463 kg/m³ (V5-6), dengan nilai rata-rata sebesar 2384,416 kg/m³. Dari tabel 4.11 hasil densitas beton substitusi pasir zeolit dengan perlakuan kimia, menghasilkan densitas yang hampir sama dengan perlakuan kering. Hal tersebut berkorelasi pada proses aktivasi kimia dengan asam dan basa yang menghasilkan permukaan yang lebih bersih dari zat pengotor seperti logam dan permukaan lebih kasar dibanding variasi yang lain.

Tabel 4.12. Densitas Beton Substitusi Pasir Zeolit dengan Perlakuan Kimia

Benda Uji	Berat Cetakan (kg)	Berat Cetakan + Isi (kg)	Volume Cetakan (m ³)	Densitas D (kg/m ³)
V5-1	10,480	23,140	0,005301	2388,032
V5-2	12,305	25,000	0,005301	2394,633
V5-3	13,045	25,640	0,005301	2375,771
V5-4	9,055	21,665	0,005301	2378,600
V5-5	9,790	22,365	0,005301	2371,998
V5-6	10,255	22,965	0,005301	2397,463
Rata-rata Densitas Perlakuan Kimia				2384,416

Perbedaan khusus antara perlakuan terletak pada karakteristik dari pasir zeolit. Zeolit tanpa perlakuan disebabkan oleh pasir zeolit yang menjebak udara. Zeolit perlakuan SSD disebabkan oleh pori-pori zeolit sudah terisi oleh air. Berikut grafik rata-rata dari variasi densitas pada gambar di bawah.



Gambar 4.3. Diagram Hasil Pengujian Densitas Beton

Berdasarkan grafik di atas, beton substitusi pasir zeolit menurunkan densitas beton disebabkan oleh berat jenis dari pasir zeolit yang rendah. Perbedaan khusus antara perlakuan terletak pada karakteristik dari pasir zeolit. Zeolit tanpa perlakuan disebabkan oleh pasir zeolit yang menjebak udara. Zeolit perlakuan

SSD disebabkan oleh pori-pori zeolit sudah terisi oleh air. Zeolit perlakuan kering disebabkan absorpsi zeolit yang tinggi yang membuat ikatan antar material lebih rapat. Zeolit perlakuan kimia hampir mirip dengan perlakuan kering, perbedaan kecil hanya pada ukuran mikroskopis yaitu perlakuan kimia mengikis permukaan zeolit.

4.3.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Tahap terakhir dari penelitian ini mencari hasil nilai kuat tekan beton umur 7 dan 28 hari untuk mengetahui hasil dari beton setiap variasi yang telah dibuat. Pada umur tersebut dapat dibandingkan dengan penambahan pasir zeolit pada beton pada perkembangan kekuatan beton setiap masing-masing variasi.

A. Beton Normal

Beton normal (V1) dilakukan pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari tanpa ada penambahan pasir zeolit seperti variasi yang lainnya. Pada pengujian beton normal ditargetkan dapat mencapai rencana awal saat pembuatan *mix design* dengan nilai 20 MPa.

Tabel 4.13. Kuat Tekan Beton Normal

Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
V1-1	7	17839,1	236,0	13,23	13,01
V1-2	7	18076,7	238,0	13,17	
V1-3	7	17981,5	227,0	12,62	
V1-4	28	17784,7	366,0	20,58	20,29
V1-5	28	17713,9	354,0	19,98	
V1-6	28	17775,3	361,0	20,31	

Dari hasil pengujian umur 7 hari didapat rata - rata dari kuat tekan 13,007 MPa dapat diprediksi pada umur 28 hari sudah memenuhi target rencana dengan hasil 20,010 MPa. Setelah umur 28 hari didapatkan hasil kuat tekan beton normal ini dengan rata - rata 20,29 MPa lebih tinggi dari rencana beton 7 hari. Dari kedua hasil tersebut memiliki selisih 0,281 MPa. Hasil kuat tekan beton normal

tersebut melebihi kuat tekan rencana dan menjadi acuan untuk hasil nilai kuat tekan variasi pasir zeolit.

B. Beton Substitusi Pasir Zeolit Tanpa Perlakuan

Beton dengan tanpa perlakuan (V2) dilakukan pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari dengan penambahan pasir zeolit 15%. Pada pengujian beton tanpa perlakuan pada pasir zeolit mendapatkan hasil pengujian kuat tekan seperti tabel 4.13. hasil pasir zeolit tanpa perlakuan. Menurut hasil pengujian, kuat tekan rata-rata umur 7 hari mencapai 9,529 MPa, yang diprediksikan akan mencapai 14,660 MPa pada umur 28 hari. Namun, pengujian aktual pada umur 28 hari menunjukkan hasil 16,130 MPa, ada peningkatan sebesar 1,469 MPa dari prediksi awal.

Tabel 4.14. Kuat Tekan Beton Substitusi Pasir Zeolit tanpa Perlakuan

Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
V2-1	7	17872,3	163,0	9,12	9,53
V2-2	7	18124,4	181,0	9,99	
V2-3	7	17824,9	169,0	9,48	
V2-4	28	17749,3	309,0	17,41	16,13
V2-5	28	18107,7	293,0	16,18	
V2-6	28	17974,3	266,0	14,80	

Meskipun grafik cenderung naik dari umur 7 ke 28 hari, performa mekanis variasi ini tetap menurun jika dibandingkan dengan beton normal. Hal ini disebabkan oleh struktur pori yang tinggi pada zeolit alam yang cenderung memerangkap air pencampur, sehingga mengurangi ketersediaan air bebas untuk proses hidrasi semen di sekitar zona transisi antarmuka atau ITZ (Islam & Mohr, 2024). Selain itu, densitas beton menjadi lebih rendah dan membuat ikatan antara agregat dan pasta semen kurang mengikat. Hal ini disebabkan oleh adanya senyawa pengotor di dalam pori-pori pasir zeolit yang belum dibersihkan, sehingga membatasi reaktivitas pozolan beton (Muttaqii dkk., 2019).

C. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan Kering

Beton substitusi pada variasi ini terdapat perlakuan kering dengan menggunakan oven dengan suhu 110°C dilakukan pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari dengan penambahan pasir zeolit 15%. Pada pengujian beton dengan perlakuan tersebut pada pasir zeolit mendapatkan hasil seperti tabel 4.14. hasil pengujian kuat tekan beton perlakuan kering. Pada umur 7 hari, beton variasi perlakuan kering (V3) menghasilkan kuat tekan rata-rata 10,988 MPa, yang kalau diprediksi ke umur 28 hari harusnya mendapatkan hasil 16,905 MPa. Sementara itu, hasil uji kuat tekan aktual di umur 28 hari menunjukkan rata-rata 16,924 MPa, yang berarti sedikit lebih tinggi dari prediksi umur 7 hari dengan selisih sebesar 0,019 MPa.

Tabel 4.15. Kuat Tekan Beton Substitusi Pasir Zeolit Perlakuan Kering

Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Luas Penampang (mm^2)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
V3-1	7	17817,8	182,0	10,21	10,99
V3-2	7	18076,7	203,0	11,23	
V3-3	7	18055,2	208,0	11,52	
V3-4	28	17735,1	311,0	17,54	16,92
V3-5	28	17846,2	297,0	16,64	
V3-6	28	17716,3	294,0	16,59	

Kuat tekan ini mengalami peningkatan disebabkan oleh kondisi zeolit yang kering setelah di oven, membuat air di dalam porinya hilang, sehingga pasta semen bisa meresap masuk ke dalam pori-pori zeolit yang kosong selama pencampuran (Zhang & Wang, 2020). Campuran ini menghasilkan ikatan pori yang lebih rapat dan padat dibandingkan variasi sebelumnya. Itu sebabnya variasi perlakuan kering ini mampu menahan beban yang lebih besar daripada variasi zeolit mentah. Namun, hasil dari perlakuan kering ini tetap belum bisa mencapai target dari kuat beton rencana. Hal ini disebabkan oleh butiran zeolit alam yang mudah hancur, menyebabkan kuat tekan lebih rendah daripada menggunakan pasir konvensional, sehingga menjadi batas atas kekuatan betonnya menurun (Islam & Mohr, 2024).

D. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan SSD

Beton dengan perlakuan SSD atau jenuh kering permukaan (V4) pada pasir zeolit dilakukan pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari dengan penambahan pasir zeolit 15%. Pada pengujian beton tanpa perlakuan pada pasir zeolit mendapatkan hasil seperti tabel 4.15 pengujian pasir zeolit dengan perlakuan SSD. Menurut hasil tabel di atas, pengujian umur 7 hari didapat rata-rata dari kuat tekan 8,661 MPa. Dari hasil umur tersebut dapat diprediksi dalam umur 28 hari mendapatkan kuat tekan 13,325 MPa.

Tabel 4.16. Kuat Tekan Beton Substitusi Pasir Zeolit Perlakuan SSD

Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
V4-1	7	17749,3	169,0	9,52	8,66
V4-2	7	18029,0	168,0	9,32	
V4-3	7	17917,4	128,0	7,14	
V4-4	28	17834,4	259,0	14,52	13,19
V4-5	28	18010,0	233,0	12,94	
V4-6	28	17834,4	216,0	12,11	

Setelah dilakukan pengujian aktual pada umur 28 hari, didapatkan hasil kuat tekan sebesar 13,190 MPa. Hasil umur 28 hari tersebut memiliki selisih yang lebih kecil 0,135 MPa daripada prediksi yang diketahui sebelumnya. Kuat tekan pada variasi perlakuan SSD ini tidak memberikan kontribusi optimal dan cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh pori-pori pasir zeolit yang sudah sepenuhnya jenuh dan terisi penuh oleh air dalam kondisi SSD, sehingga pasta semen tidak memiliki ruang untuk meresap masuk ke dalam pori guna membentuk angkur mekanis yang kuat seperti pada variasi kering oven (Zhang & Wang, 2020). Akibatnya, interaksi dan ikatan antara pasta semen dengan agregat zeolit menjadi kurang maksimal. Selain itu, variasi ini memiliki sebaran nilai individual benda uji yang relatif lebih besar, yang menandakan adanya ketidakhomogenan adukan saat proses pemadatan. Hal ini disebabkan oleh kondisi jenuh permukaan agregat yang memengaruhi distribusi pasir zeolit dalam campuran, sehingga agregat tidak tersebar merata dan menurunkan tingkat kepadatan beton secara keseluruhan.

E. Beton Substitusi Pasir Zeolit Dengan Perlakuan Kimia

Beton dengan perlakuan menggunakan kimia seperti zat asam dan basa menggunakan cairan HCl dan NaOH dilakukan pengujian kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari dengan penambahan pasir zeolit 15%. Pada pengujian beton tanpa perlakuan pada pasir zeolit mendapatkan hasil seperti tabel di bawah ini.

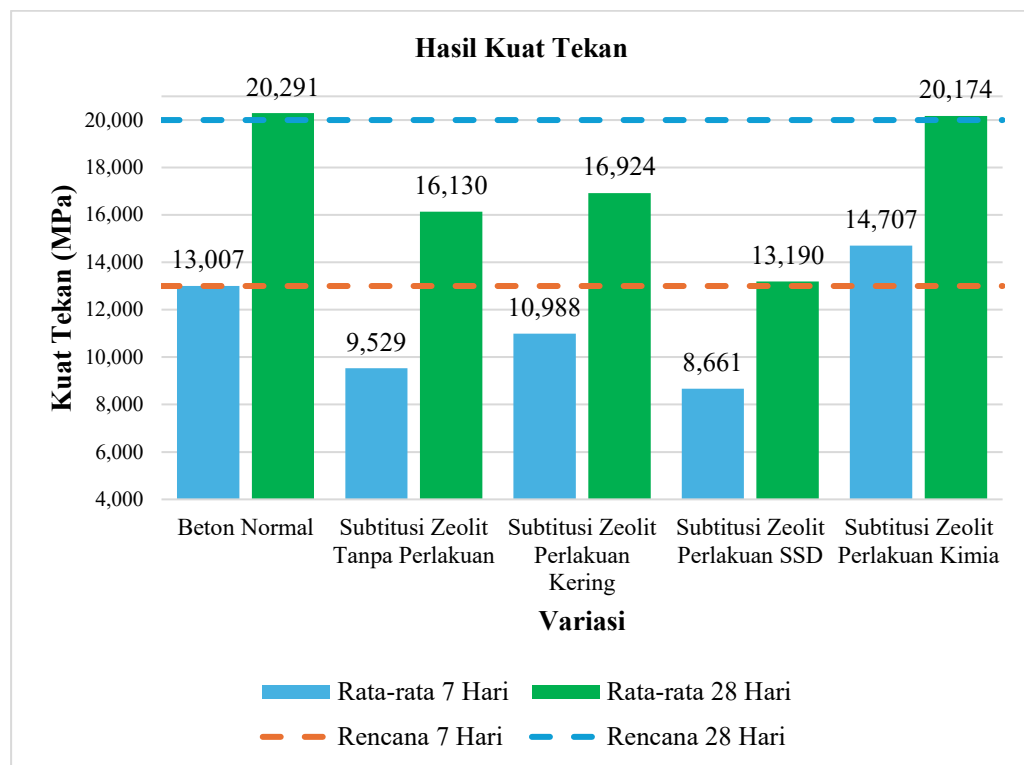
Tabel 4.17. Kuat Tekan Beton Substitusi Pasir Zeolit Perlakuan Kimia

Benda Uji	Umur Beton (Hari)	Luas Penampang (mm ²)	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
V5-1	7	17827,3	265,0	14,86	14,71
V5-2	7	17922,1	250,0	13,95	
V5-3	7	17768,2	272,0	15,31	
V5-4	28	18110,0	347,0	19,16	20,17
V5-5	28	17829,7	364,0	20,42	
V5-6	28	17950,6	376,0	20,95	

Dari hasil tabel di atas, pengujian kuat tekan umur 7 hari didapat rata-rata sebesar 14,710 MPa. Dalam 28 hari sudah dapat diprediksi hasil target kuat tekan mendapatkan hasil 22,327 MPa. Setelah dilakukan pengujian benda uji silinder umur 28 hari mendapatkan hasil 20,170 MPa dengan selisih dari umur 7 hari sebesar 2,453 MPa lebih kecil dari prediksi yang diketahui sebelumnya. Beton silinder saat umur 7 hari memperlihatkan peningkatan nilai uji yang signifikan akibat pasir zeolit yang menjadi jauh lebih reaktif. Hal ini disebabkan oleh proses aktivasi HCl dan NaOH yang berhasil membersihkan senyawa pengotor (Muttaqii dkk., 2019). Hal tersebut mengakibatkan kandungan silika aktif di dalam zeolit bisa langsung bekerja secara ekstrem memakan kalsium hidroksida yang merupakan zat limbah sisa hasil hidrasi semen (Islam & Mohr, 2024). Proses konsumsi limbah semen ini menghasilkan gel C-S-H tambahan yang membuat struktur beton di umur awal mengeras dengan sangat cepat dan padat. Namun, pada umur 28 hari, nilai kuat tekan aktual yang diperoleh cenderung melandai mendekati karakteristik beton normal dan tidak mencapai estimasi proyeksi awal. Hal ini disebabkan oleh sifat reaksi pozolan dari zeolit yang sudah dipicu secara ekstrem di umur awal, sehingga silika reaktifnya

sudah banyak habis dikonsumsi di awal dan membuat laju pertumbuhan kekuatannya melambat saat memasuki umur 28 hari (Zhang & Wang, 2020).

Berikut grafik dari rata-rata kuat tekan umur 7 hari dan 28 hari sebagai berikut:



Gambar 4.4. Diagram Hasil Kuat Tekan Beton

Berdasarkan hasil grafik pengujian, substitusi pasir zeolit secara umum memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan beton. Pada umur 7 hari, hasil kuat tekan semua variasi selain perlakuan zat kimia tidak mampu mencapai kuat tekan beton rencana. Hanya variasi perlakuan kimia yang nilainya berhasil melebihi beton normal sebesar 1,707 MPa dari nilai rencana sebesar 13 MPa. Hal ini disebabkan oleh peningkatan reaktivitas silika aktif pada zeolit yang sudah dibersihkan lewat aktivasi kimia, sehingga mempercepat reaksi pozolan awal di umur awal (Muttaqii dkk., 2019).

Pada umur 28 hari, seluruh variasi beton mengalami kenaikan kekuatan, tetapi performanya berbeda-beda. Beton dengan perlakuan kimia menghasilkan nilai terbaik dan hampir setara dengan beton normal, dengan selisih hanya 0,117

MPa lebih rendah. Sementara itu, variasi lainnya seperti tanpa perlakuan, perlakuan kering (16,924 MPa), dan perlakuan SSD (13,190 MPa) menghasilkan kuat tekan yang tetap berada di bawah target beton rencana. Hal ini disebabkan oleh sifat asli agregat zeolit mentah tanpa perlakuan kimia yang memiliki kepadatan campuran kurang baik dan kekuatan hancur agregat yang secara alami lebih rendah dibandingkan pasir biasa (Fariqie dkk., 2023).

Secara keseluruhan, beton dengan perlakuan kimia menjadi variasi terbaik untuk meningkatkan kuat tekan dalam substitusi pasir zeolit karena hasilnya paling optimal dan mendekati beton normal. Hal ini disebabkan oleh keberhasilan larutan asam dan basa dalam memodifikasi tekstur permukaan pasir zeolit sehingga menciptakan ikatan antarmuka (ITZ) yang sangat kuat dengan pasta semen (Ramu & Manikandan, 2017). Sebaliknya, perlakuan SSD menjadi metode yang paling tidak optimal dan menghasilkan kuat tekan yang rendah. Hal ini disebabkan oleh pori-pori zeolit yang penuh oleh air akibat kondisi SSD, sehingga pasta semen tidak bisa meresap masuk dan memicu ketidakhomogenan adukan serta distribusi agregat yang tidak merata saat proses pemadatan (Zhang & Wang, 2020).