

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Bahan

a. Semen

Pada penelitian ini semen yang dipakai adalah semen portland tipe I. Semen ini dianggap telah memenuhi syarat sebagai bahan pengikat pada campuran beton sehingga tidak dilakukan analisa lagi.

b. Air

Air yang digunakan pada penelitian ini adalah air bersih dari PDAM Kota Malang. Air ini dianggap telah memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton sehingga tidak dilakukan analisa lagi.

c. Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir alam yang berasal dari kabupaten Lumajang. Untuk memenuhi persyaratan bahan campuran beton maka perlu dilakukan pemeriksaan gradasi agregat halus.

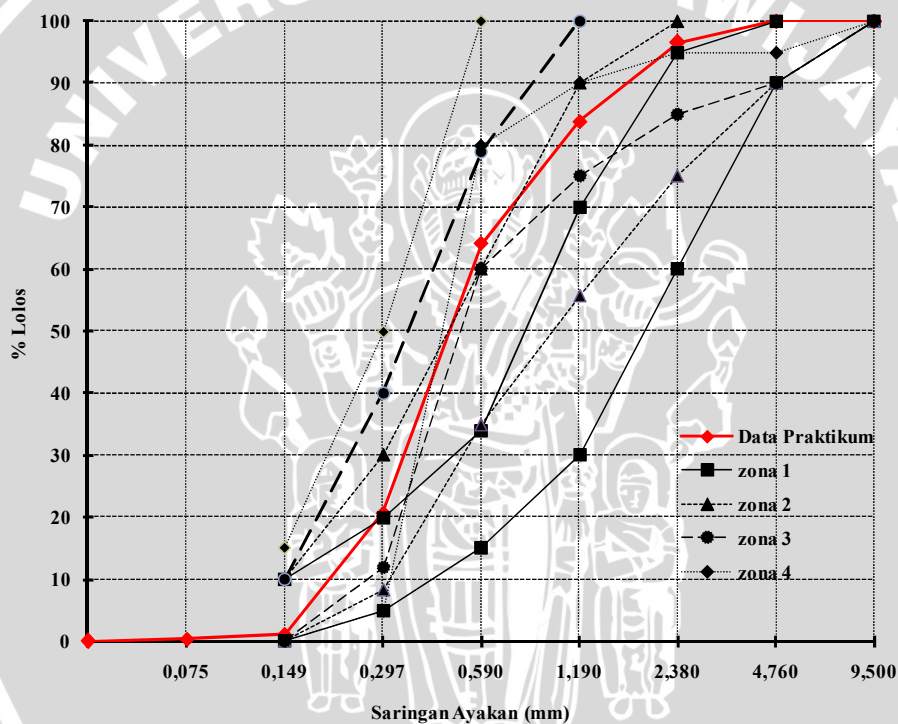
Tabel 4.1 Pemeriksaan Gradasi Agregat Halus

LUBANG SARINGAN		PASIR			
		TERTINGGAL		KUMULATIF	
No	mm	gram	%	Tertinggal	Lolos
3"	76,2	0	0	0	100
2.5"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1.5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
3/4"	19,1	0	0	0	100
1/2"	12,7	0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	0	100
4	4,76	3,6	0	0	100
8	2,38	34,4	3,464	3,464	96,536
16	1,19	126,4	12,727	16,190	83,810
30	0,59	195,2	19,654	35,844	64,156
50	0,297	431,2	43,415	79,259	20,741
100	0,149	194,6	19,593	98,852	1,148
200	0,075	7,4	0,745	100	0
Pan		0,4			
Total		993,2		333,206	

(Sumber : hasil penelitian)

$$\begin{aligned} \text{Modulus halus pasir} &= \frac{\sum \% \text{ yang tertahan ayakan no } 3/8'' \text{ sampai } 100}{100} \\ &= \frac{234,7}{100} \\ &= 2,347 \end{aligned}$$

Pada gambar 4.1 menunjukkan batas gradasi pasir terdapat pada zona 3. Menurut SNI 03-2834-1993 maka pasir tersebut termasuk dalam kategori pasir agak halus. Untuk pemeriksaan kadar air, berat isi, berat jenis dan penyerapan agregat dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.1 Zona Gradasi Pasir
(Sumber : hasil penelitian)

d. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini adalah batu pecah dari kota Malang. Untuk memenuhi persyaratan bahan campuran beton maka perlu dilakukan pemeriksaan gradasi agregat kasar.

Tabel 4.2 Pemeriksaan Gradasi Agregat Kasar

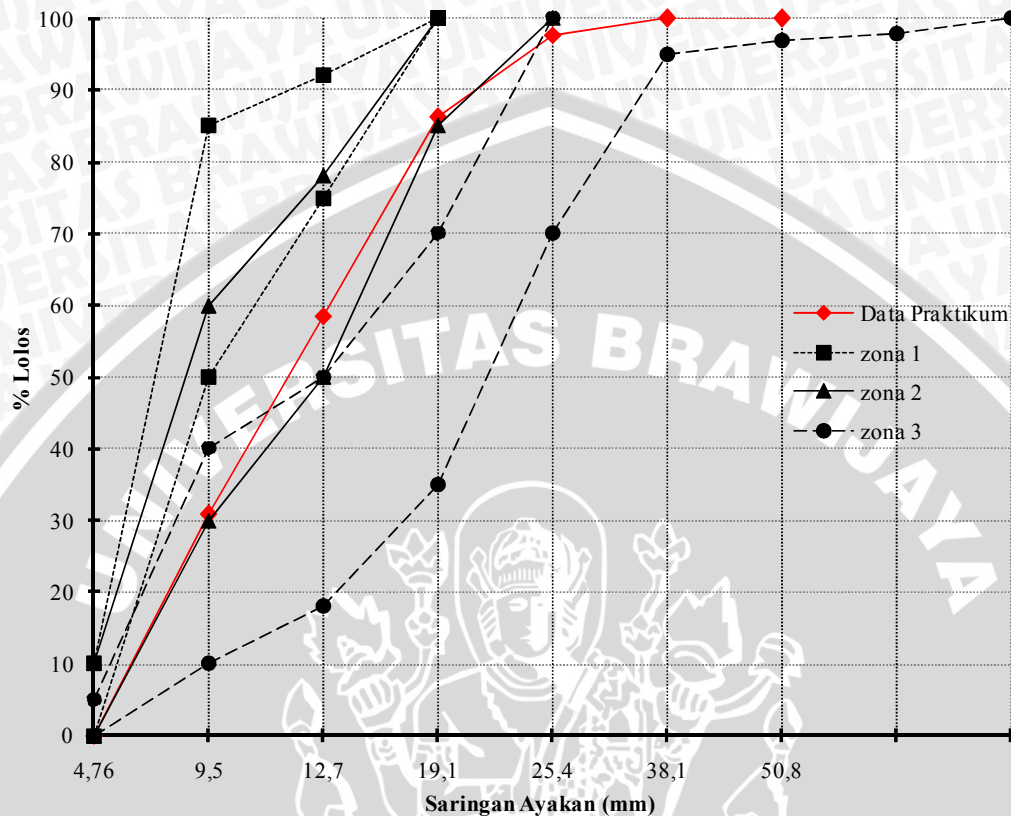
LUBANG SARINGAN		BATU PECAH			
		TERTINGGAL		KUMULATIF	
no	mm	Gram	%	Tertinggal	Lolos
3"	76,2	0	0	0	100
2.5"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1.5"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	202,8	2,228	2,228	97,772
3/4"	19,1	1055,2	11,593	13,821	86,179
1/2"	12,7	2514,4	27,623	41,444	58,556
3/8"	9,5	2525	27,740	69,184	30,816
4	4,76	2805	30,816	100	0
8	2,38	0	0	100	0
16	1,19	0	0	100	0
30	0,59	0	0	100	0
50	0,297	0	0	100	0
100	0,149	0	0	100	0
200	0,075	0	0	100	0
Pan		789,7			
Total		9102,4		826,676	

(Sumber : hasil penelitian)

$$\begin{aligned}
 \text{Modulus halus kerikil} &= \frac{\sum \% \text{ yang tertahan ayakan no } 1/2'' \text{ sampai } 100}{100} \\
 &= \frac{826,67}{100} \\
 &= 7,26
 \end{aligned}$$

Pada gambar 4.2 menunjukkan batas gradasi pasir terdapat pada zona 2. Menurut SNI 03-2834-1993 maka kerikil tersebut termasuk dalam kategori kerikil

dengan butiran maksimum 20 mm. Untuk pemeriksaan kadar air, berat isi, berat jenis dan penyerapan agregat dapat dilihat pada lampiran



Gambar 4.2 Zona Gradasi Agregat Kasar
(Sumber : hasil penelitian)

e. Campuran Beton

Tujuan dari perencanaan campuran adalah merencanakan proporsi campuran beton yang digunakan. Perencanaan campuran mengacu pada buku pedoman tata cara campuran beton laboratorium struktur dan konstruksi Universitas Brawijaya yang berpedoman pada SNI 03-2834-1993.

Kuat tekan beton yang direncanakan adalah 20 MPa. Campuran beton yang digunakan terdiri dari semen agregat halus, agregat kasar, dan air. FAS yang digunakan adalah 0,55. Total volume yang dibutuhkan pada 1 kali pengecoran adalah 0,0556 m³ terdiri dari 3 buah benda uji dan 2 buah sampel silinder uji. Dari perhitungan *mix design* didapatkan perbandingan semen : air : agregat halus : agregat kasar adalah 1 : 0,491 : 1,333 : 3,042. Perhitungan *mix design* dapat dilihat pada lampiran.

f. Tulangan Baja

Tulangan baja yang digunakan adalah tulangan baja polos $\varnothing 8$ sebagai tulangan utama dan pada sengkang dipakai tulangan polos $\varnothing 6$. Susunan tulangan dirakit dan disusun seperti pada gambar rancangan benda uji.

f. Retak Buatan

Retak buatan dibuat dari 4 lembar seng aluminium 80 x 250 x 0,25 mm dan direkatkan menjadi 1 lembar sehingga terbentuk lembar penyekat retak setebal 1 mm yang ditanam pada bekisting sebelum pengecoran. Penyekat retak ditanam sedalam 8 cm pada permukaan bekisting (lihat gambar 4.3). Penyekat retak tersebut dilepas setelah rentang waktu 3-4 jam dari waktu pengecoran, sehingga akan terbentuk retak sesuai yang diinginkan.



Gambar 4.3 Retak Buatan
(Sumber : dokumentasi penelitian)

4.2 Hasil Pengujian

4.2.1 Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton bertujuan untuk mengetahui nilai kuat tekan beton yang telah dicor. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada saat beton berumur 28 hari. Pengujian kuat tekan beton diperlukan beberapa sampel silinder uji. Silinder uji yang digunakan berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Pada penelitian ini 1 kali pengecoran beton diambil 2 buah sampel silinder. Pada setiap variasi yang terdiri dari 3 buah benda uji diperlukan 1 kali pengecoran. Sehingga dibutuhkan 10 buah sampel silinder untuk semua benda uji. Kuat tekan beton yang direncanakan adalah 20 MPa.

Proses pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada gambar 4.4. Tahapan pengujian kuat tekan pada silinder uji sebagai berikut :

1. Meletakkan silinder uji pada mesin uji tekan secara sentris.
2. Menjalankan mesin uji tekan dengan penambahan beban secara konstan
3. Pembebanan dilakukan sampai silinder uji sampai mengalami keretakan.
4. Beban maksimum yang terjadi selama pengujian dicatat agar diketahui kuat tekannya.



Gambar 4.4 Uji Kuat Tekan Silinder
(Sumber : dokumentasi penelitian)

Pada tabel 4.3 dapat dilihat hasil kuat tekan pada tiap silinder uji. Kuat tekan silinder tergantung dari beban maksimum yang dapat diterima.

Tabel 4.3 Hasil Uji Kuat Tekan Beton

NO	SILINDER	UMUR (hari)	DIAMETER (cm)	BERAT (kg)	BEBAN MAKS (kN)	KUAT TEKAN (MPa)	RATA – RATA (MPa)
1	STT ₁	28	15	12,22	389	22,01	21,87
2	STT ₂	28	15	12,5	384	21,73	
3	SB2 ₁	28	15	12,4	397	22,47	22,89
4	SB2 ₂	28	15	12,4	412	23,31	
5	SB3 ₁	28	15	12,35	438	24,79	23,91
6	SB3 ₂	28	15	12,24	407	23,03	
7	SB4 ₁	28	15	12,24	346	19,58	18,36
8	SB4 ₂	28	15	12,36	303	17,15	
9	SB5 ₁	28	15	12,28	376	21,28	20,32
10	SB5 ₂	28	15	12,18	342	19,35	

(Sumber : hasil penelitian)

Dari hasil uji kuat tekan didapatkan data beban maksimum. Dari pembacaan beban maksimum yang diterima maka nilai kuat tekan beton didapatkan dengan rumus :

$$f'c = \frac{P}{A}$$

dengan :

$f'c$ = kuat tekan (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = Luas bidang tekan (mm²)

Contoh perhitungan :

Benda uji : STT₁

Berat : 12,22 kg

Diameter : 15 cm

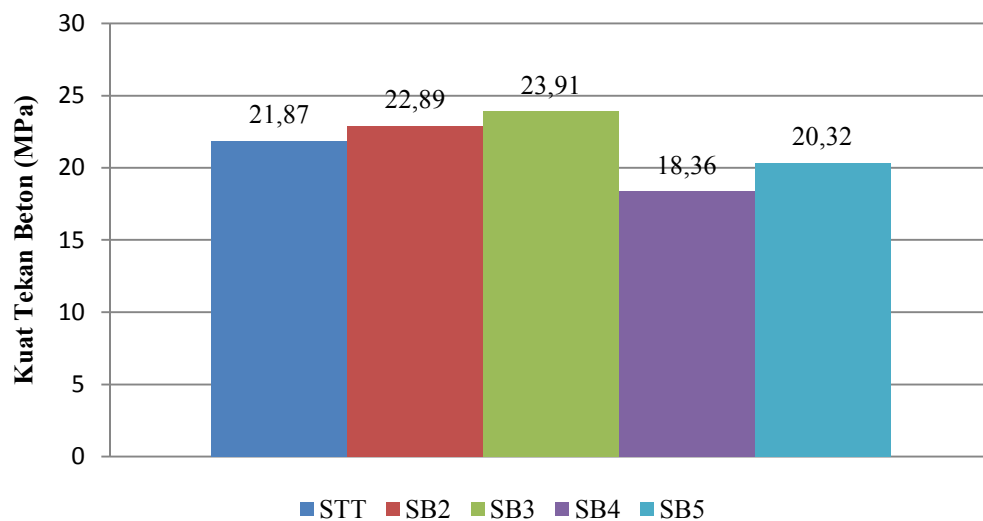
Beban Maks : 389 KN = 3,89.10⁵ N

Luas (A) : $A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 15^2 = 176,25 \text{ cm}^2 = 1,7625 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$

Maka kuat tekan benda uji :

$$f'c = \frac{3,89 \cdot 10^5}{1,7625 \cdot 10^4} = 22,01 \text{ MPa}$$

Gambar 4.5 menunjukkan hasil rata – rata kuat tekan silinder pada tiap pengecoran. Pada penelitian ini dilakukan 5 kali pengecoran.



Gambar 4.5 Hasil Rata-Rata Uji Kuat Tekan
(Sumber : hasil penelitian)

Berdasarkan gambar 4.5 kuat tekan silinder pada tiap pengecoran memiliki nilai terendah 18,36 MPa dan tertinggi 23,91 MPa.

Kualitas beton juga dapat dilihat dari kecepatan gelombang ultrasonik. Pada penelitian ini setiap sampel silinder diuji kualitasnya dengan UPV. Untuk pengujian kecepatan gelombang ultrasonik pada penelitian ini digunakan metode *direct transmission*. Pada gambar 4.6 ditunjukkan pengujian kecepatan gelombang pada silinder uji dengan metode *direct transmission*.



Gambar 4.6 Pengujian Kecepatan Gelombang Pada Silinder dengan UPV
(Sumber : dokumentasi penelitian)

Hasil pengujian kecepatan gelombang dengan UPV pada sampel silinder dapat dilihat pada tabel 4.4

Tabel 4.4 Kualitas Beton

NO	SILINDER	KECEPATAN GELOMBANG	KUALITAS BETON
		(m/s)	
1	STT ₁	4014	Baik
2	STT ₂	4046	Baik
3	SB2 ₁	3942	Baik
4	SB2 ₂	3903	Baik
5	SB3 ₁	3880	Baik
6	SB3 ₂	3242	Cukup
7	SB4 ₁	3356	Cukup
8	SB4 ₂	3916	Baik
9	SB5 ₁	3906	Baik
10	SB5 ₂	3360	Cukup

(Sumber : hasil penelitian)

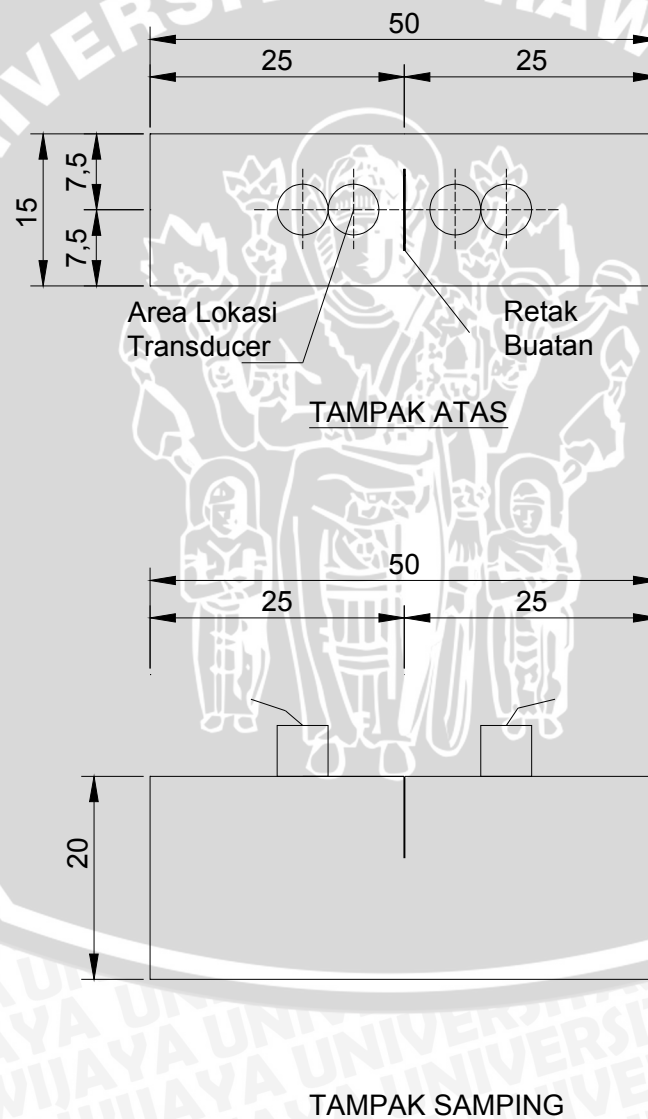
Agar mendapatkan hasil yang akurat pengujian kecepatan gelombang dilakukan dengan metode *direct transmission*. Pada metode ini gelombang ultrasonik dapat merambat dengan maksimal dan lancar karena transmitter dan receiver ditempatkan dengan kondisi saling berhadapan.

Berdasarkan tabel 2.5 yang mengacu pada *Indian Standard 13311 part 1*, kualitas beton dapat dilihat dari rentang kecepatan gelombang. Untuk rentang kecepatan gelombang 3500 m/s – 4500 m/s pada beton, kualitas beton tersebut adalah baik. Sedangkan untuk rentang kecepatan gelombang 3000 m/s – 3500 m/s pada beton, maka kualitas beton tersebut adalah cukup.

Pada tabel 4.4, kualitas beton pada penelitian ini sebagian besar memiliki kualitas yang baik. Kecepatan tertinggi ada pada silinder STT₂ sebesar 4046 m/s. Sedangkan kecepatan terendah ada pada silinder SB3₂ sebesar 3242 m/s. Penilaian dari kualitas beton dengan kecepatan gelombang diatur oleh *Indian Standard 13311 part 1*.

4.2.2 Pengukuran Kedalaman Retak Dengan UPV

Benda uji berupa 15 balok beton bertulang berukuran 15 x 20 x 50 cm dengan kedalaman retak buatan rencana 8 cm. Benda uji terdiri dari 5 variasi selimut beton. Setiap variasi terdiri dari 3 benda uji. Pengukuran dilakukan pada saat benda uji berumur 28 hari. Pengukuran UPV dilakukan dengan meletakkan *transducer* UPV pada jarak tertentu terhadap garis retak. Pada penelitian ini jarak efektif *transducer* UPV yang digunakan adalah 5 cm. Pengambilan data dilakukan pada area lokasi yang sudah ditetapkan seperti pada gambar 4.7 .



Gambar 4.7 Lokasi Pengambilan Data Kedalaman Retak

Kedalaman retak diukur pada daerah tengah garis retak. Sebelum diuji dengan UPV kedalaman retak buatan harus diukur terlebih dahulu karena pada kenyataannya kedalaman retak yang dibuat belum tentu sesuai dengan kedalaman retak rencana sedalam 8 cm.

Untuk mengukur kedalaman retak aktual digunakan batang besi tipis dan dimasukkan ke dalam retak buatan sehingga dapat diukur kedalaman retaknya (lihat gambar 4.8). Kedalaman retak diukur pada lokasi retak pada daerah yang segaris dengan *transducer* UPV. Setelah diuji, hasil pengukuran UPV dibandingkan dengan kedalaman retak aktual. Hasil pengukuran UPV berupa waktu tempuh dan kedalaman retak.



Gambar 4.8 Pengukuran Kedalaman Retak yang Sebenarnya
(Sumber : dokumentasi penelitian)

Hasil dari pengukuran UPV dibandingkan dengan kedalaman retak yang sebenarnya sehingga didapatkan kesalahan relatif pengukurannya. Kesalahan relatif pada tiap variasi dibandingkan dan dapat dilihat pola kesalahannya.

Hasil pengukuran UPV dapat dilihat pada tabel 4.5. Pada UPV ditampilkan waktu tempuh dan kedalaman retak. Pada kolom perhitungan empiris nilai yang didapatkan dihitung dari Persamaan (2-2) dengan waktu tempuh dari uji UPV, berdasarkan *British Standard 1881 part 203* :

$$H = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$$

Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Kedalaman Retak dengan UPV

BENDA UJI	TEBAL SELIMUT (cm)	H RETAK AKTUAL (cm)	UJI UPV				PERHITUNGAN EMPIRIS (cm)	SUHU (°C)
			T1 (µs)	T2 (µs)	X (cm)	H RETAK (cm)		
TT ₁	0	8,4	56,1	76,4	5	8	8	25,2
		8,4	53	71,8	5	8,1	8,1	25,5
		8,4	54,1	72,8	5	8,3	8,3	25,5
		8,4	57,3	77,6	5	8,1	8,1	25,5
TT ₂	0	8,7	57,4	78,1	5	8	8	25,7
		8,7	56	74,7	5	8,5	8,5	25,7
		8,7	57,3	77,6	5	8,1	8,1	25,7
		8,7	57,5	78	5	8,1	8,1	26
TT ₃	0	8,4	56,9	77,5	5	8	8	26
		8,4	54,7	74,1	5	8,1	8,1	26
		8,4	54,2	74,3	5	7,8	7,8	26
		8,4	52,7	71,1	5	8,2	8,2	26
S2 ₁	2	6,8	62,5	85	5	8	8	25,7
		6,8	63,6	88,9	5	7,4	7,4	25,7
		6,8	62,9	89,1	5	7,1	7,1	25,7
		6,8	63	88	5	7,4	7,4	25,7
S2 ₂	2	6,8	59,3	84	5	7,1	7,1	26
		6,8	55,6	78	5	7,3	7,3	26,2
		6,8	53,4	74,2	5	7,5	7,5	26,2
		6,8	54,5	77,1	5	7,1	7,1	26,2
S2 ₃	2	8,8	61,2	82	5	8,4	8,4	26,2
		8,8	60,7	81,6	5	8,3	8,3	26,2
		8,8	61,5	81	5	8,8	8,8	26,2
		8,8	57,4	78,2	5	8	8	26,5
S3 ₁	3	8,8	59,4	81	5	7,9	7,9	25,7
		8,8	59	79,8	5	8,1	8,1	26
		8,8	59,6	78,8	5	8,7	8,7	26
		8,8	53,8	71,6	5	8,6	8,6	26,2
S3 ₂	3	9,5	58,4	77,1	5	8,8	8,8	26,2
		9,5	60,6	78,2	5	9,4	9,4	26,2
		9,5	61,4	79,2	5	9,4	9,4	26,2
		9,5	59,7	79,3	5	8,6	8,6	26,2
S3 ₃	3	8,2	67,5	94,6	5	7,3	7,3	26,5
		8,2	68,6	95,3	5	7,5	7,5	26,5
		8,2	66,5	92,5	5	7,5	7,5	26,5
		8,2	69,9	98	5	7,3	7,3	26,5

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.5 Lanjutan

BENDA UJI	TEBAL SELIMUT (cm)	H RETAK AKTUAL (cm)	UJI UPV				PERHITUNGAN EMPIRIS (cm)	SUHU (^o C)
			T1 (μ s)	T2 (μ s)	X (cm)	H RETAK (cm)		
S4 ₁	4	8,1	71,6	97,6	5	7,9	7,9	26,5
		8,1	67,5	95,3	5	7,2	7,2	26,5
		8,1	67,9	93,8	5	7,6	7,6	26,5
		8,1	73,6	101	5	7,8	7,8	26,5
S4 ₂	4	8,3	59	78,9	5	8,4	8,4	26,5
		8,3	59,5	82,6	5	7,5	7,5	26,5
		8,3	57,6	78,3	5	8	8	26,5
		8,3	53,4	73,2	5	7,8	7,8	26,5
S4 ₃	4	7,8	51,9	69,2	5	8,5	8,5	26,5
		7,8	52,4	72,2	5	7,7	7,7	26,5
		7,8	53,3	71,2	5	8,5	8,5	26,5
		7,8	52,4	71,2	5	8	8	26,5
S5 ₁	5	7,6	51	70	5	7,8	7,8	26,5
		7,6	59,4	79,7	5	8,3	8,3	26,5
		7,6	50,9	69,5	5	7,9	7,9	26,5
		7,6	52,5	71,3	5	8	8	26,5
S5 ₂	5	7,9	75	99,6	5	8,6	8,6	26,5
		7,9	72,8	98	5	8,3	8,3	26,5
		7,9	65,2	89,6	5	7,8	7,8	26,5
		7,9	71,1	98,2	5	7,6	7,6	26,5
S5 ₃	5	9	70,5	92,1	5	9,1	9,1	26,5
		9	62,2	83,3	5	8,4	8,4	26,2
		9	61,8	82,2	5	8,6	8,6	26,2
		9	61,9	82,7	5	8,4	8,4	26,2

(Sumber : hasil penelitian)

Contoh Perhitungan : Pengukuran pada benda uji S5₃ bagian 4 dengan H hasil uji UPV
= 8,4 cm

$$T_1 = 61,9 \mu\text{s}$$

$$T_2 = 82,7 \mu\text{s}$$

$$X = 5 \text{ cm}$$

$$H = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} = 5 \sqrt{\frac{4 \cdot 61,9^2 - 82,7^2}{82,7^2 - 61,9^2}} = 8,399 \text{ cm}$$

Dari hasil yang ditampilkan alat uji UPV dan perhitungan empiris memiliki hasil yang sama. Maka, nilai kedalaman retak dari uji UPV dapat dihitung pada Persamaan (2-2) dengan mengetahui waktu tempuhnya.

Pada dasarnya, kedalaman retak dihitung dengan perbandingan waktu tempuh gelombang saat melewati retak. Pengujian dilakukan pada satu bidang permukaan dan 2 kali pengukuran waktu tempuh. Dari perbedaan waktu tempuh tersebut didapatkan kedalaman retak dengan Persamaan (2-2): $H = x \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}}$

Dari persamaan tersebut maka pengukuran kedalaman retak dipengaruhi waktu tempuh dan jarak antar *transducer*. Jarak *transducer* UPV harus presisi terhadap garis retak. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan data yang seragam pada tiap kali pengujian. Menurut British Standard 1881 203 jarak *transducer* UPV terhadap garis retak adalah 15 cm. Pada penelitian ini digunakan jarak sebesar 5 cm disebabkan keterbatasan dimensi benda uji.

Berdasarkan tabel 4.5 data hasil pengujian UPV pada penelitian ini tidak seragam. Pada penelitian ini data yang ditampilkan oleh alat uji UPV sering berubah setiap kali pengujian. Hal ini dikarenakan sulitnya menentukan lokasi *transducer* secara presisi terhadap garis retak.

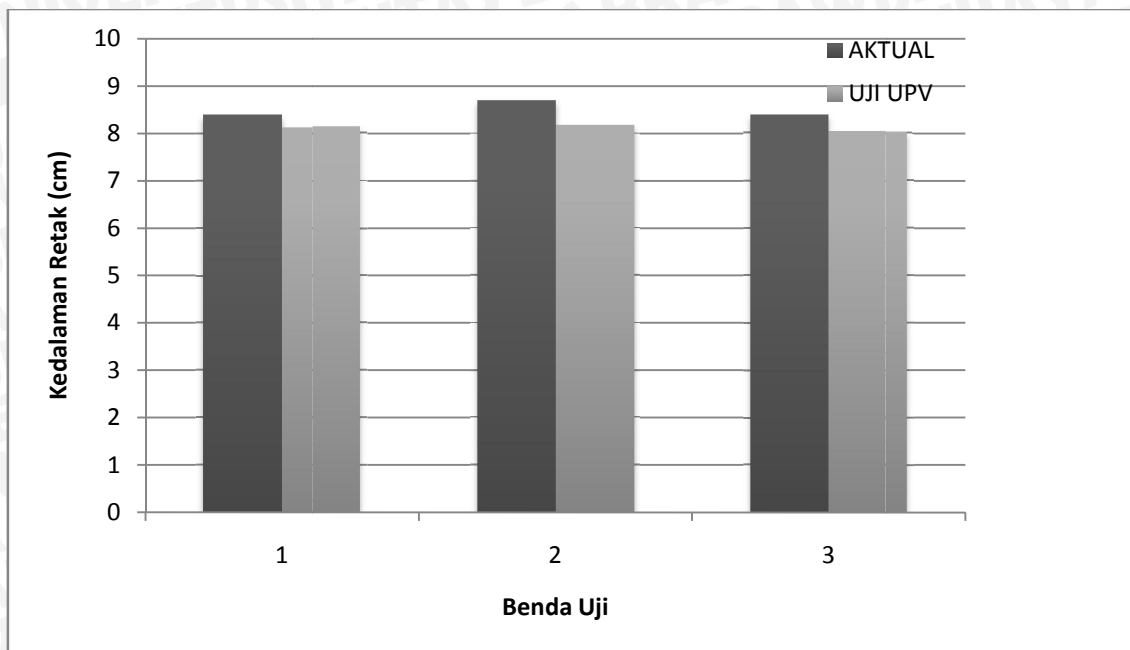
Kedalaman retak rata-rata pengukuran UPV dari setiap benda uji dapat dilihat pada tabel 4.6

Tabel 4.6 Kedalaman Retak Rata-Rata Uji UPV

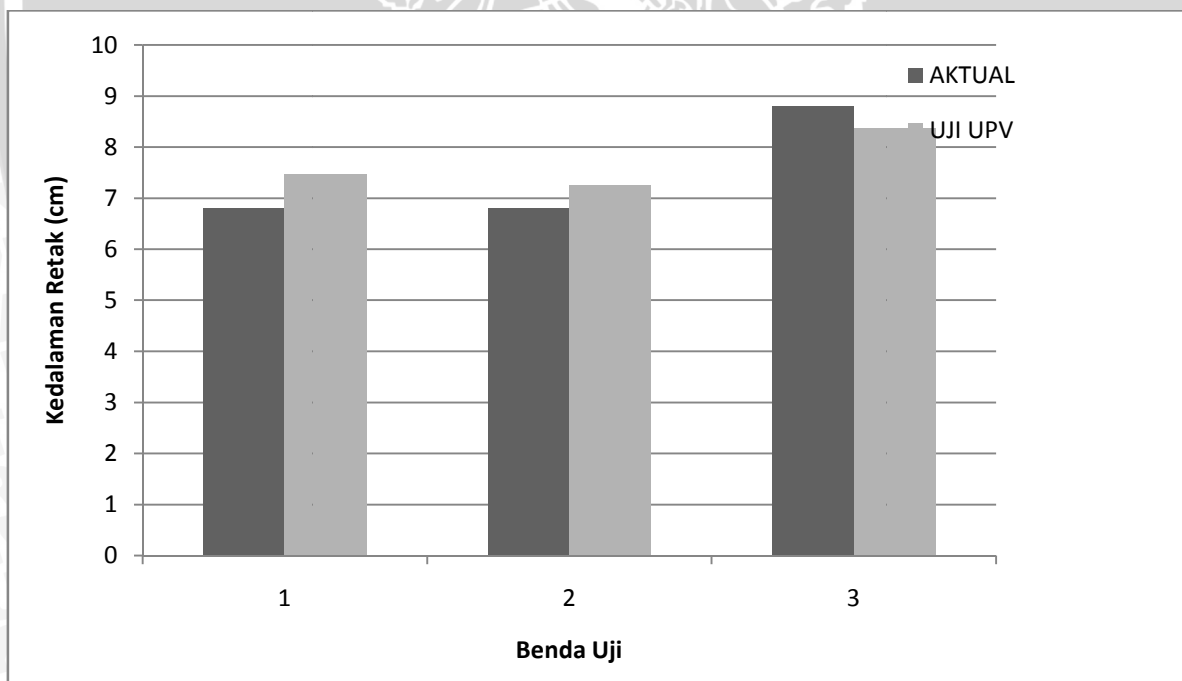
BENDA UJI	H RETAK	BENDA UJI		
		1	2	3
		cm	cm	Cm
TT	Aktual	8,4	8,7	8,4
	Rata-rata Uji UPV	8,1	8,2	8,0
S2	Aktual	6,8	6,8	8,8
	Rata-rata Uji UPV	7,5	7,3	8,4
S3	Aktual	8,8	9,5	8,2
	Rata-rata Uji UPV	8,3	9,1	7,4
S4	Aktual	8	8,3	7,8
	Rata-rata Uji UPV	7,6	7,9	8,2
S5	Aktual	7,6	7,9	9
	Rata-rata Uji UPV	8,0	8,1	8,6

(Sumber : hasil penelitian)

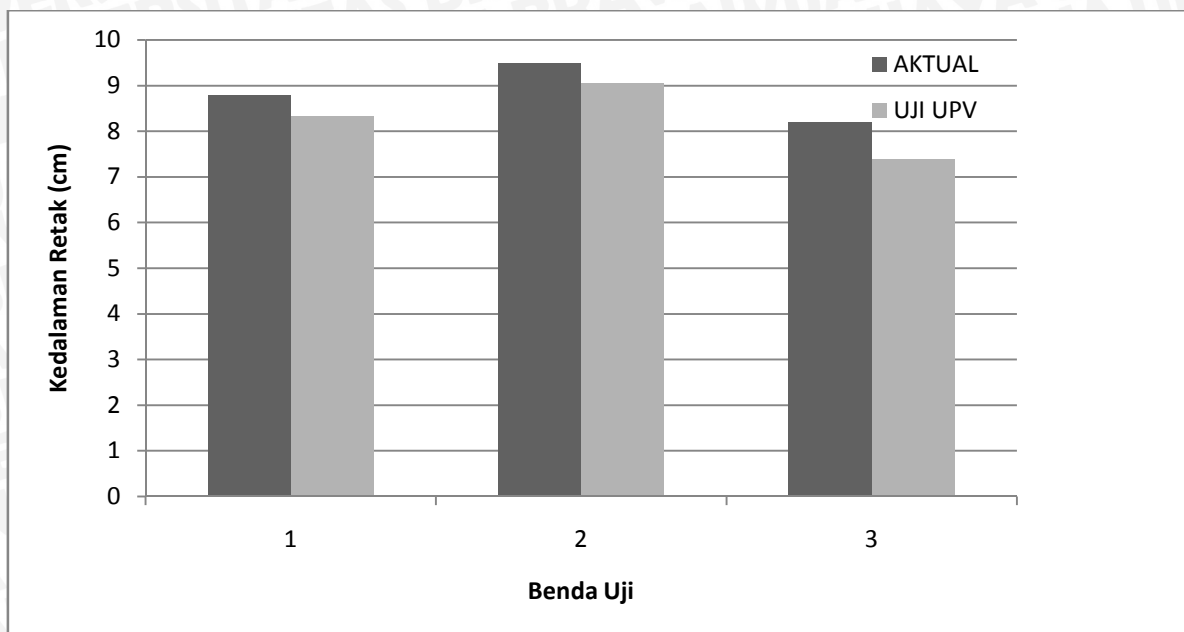
Perbandingan hasil rata-rata pengukuran UPV dan kedalaman retak yang sebenarnya di setiap variasi dapat dilihat pada gambar 4.9 sampai gambar 4.13. Pada tiap variasi terdapat 3 buah benda uji.



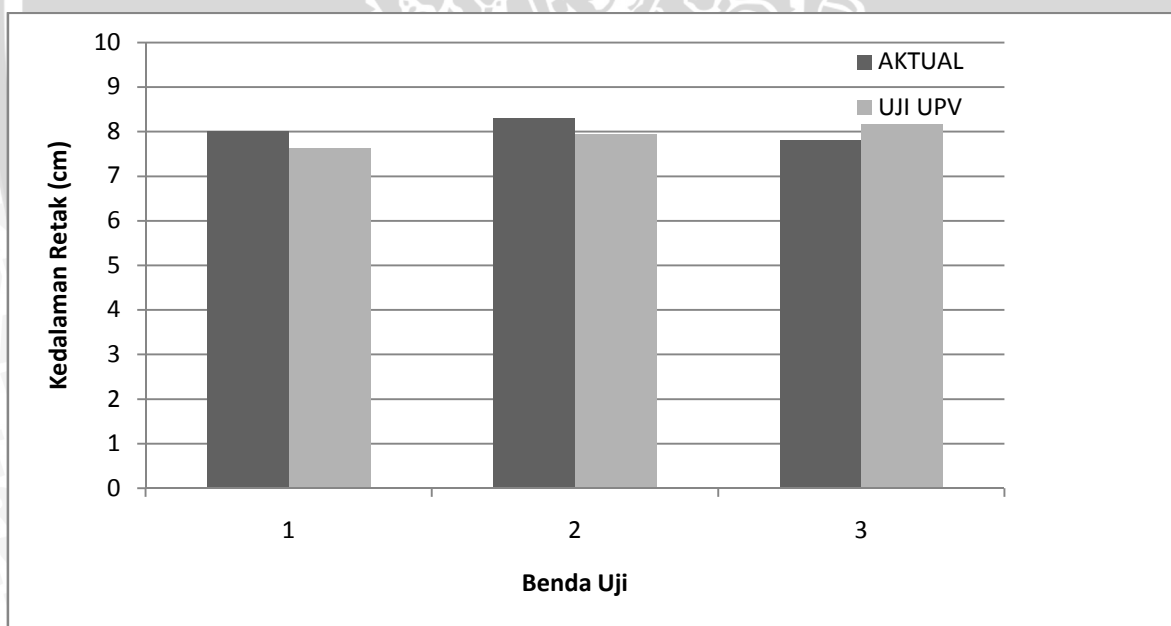
Gambar 4.9 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata – Rata Uji UPV Terhadap Kedalaman Retak yang Sebenarnya Pada Balok Tanpa Tulangan (Sumber : hasil penelitian)



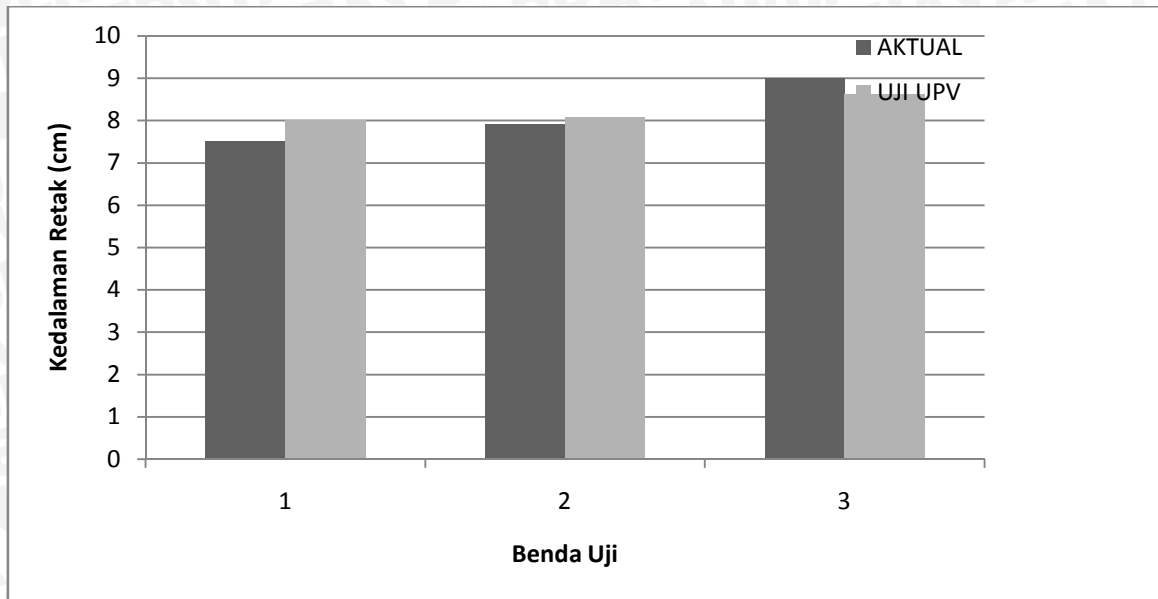
Gambar 4.10 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata – Rata Uji UPV Terhadap Kedalaman Retak yang Sebenarnya Pada Balok dengan Selimut 2 cm (Sumber : hasil penelitian)



Gambar 4.11 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata – Rata Uji UPV Terhadap Kedalaman Retak yang Sebenarnya Pada Balok dengan Selimut 3 cm (Sumber : hasil penelitian)



Gambar 4.12 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata – Rata Uji UPV Terhadap Kedalaman Retak yang Sebenarnya Pada Balok dengan Selimut 4 cm (Sumber : hasil penelitian)



Gambar 4.13 Perbandingan Hasil Pengukuran Rata – Rata Uji UPV Terhadap Kedalaman Retak yang Sebenarnya Pada Balok dengan Selimut 5 cm (Sumber : hasil penelitian)

Berdasarkan gambar 4.9 sampai 4.13, sebagian besar hasil pengukuran rata-rata pengukuran UPV secara keseluruhan lebih rendah terhadap kedalaman retak yang sebenarnya. Dari 15 benda uji hanya 5 benda uji hasil rata-rata pengukuran lebih tinggi dari kedalaman retak yang sebenarnya. Sedangkan pada 10 benda uji lainnya hasil rata-rata pengukuran lebih rendah terhadap kedalaman retak yang sebenarnya. Hal ini sulit untuk diprediksi karena kondisi pada setiap benda uji tidak selalu sama.

Suhu beton juga dapat diukur dengan UPV. Rata-rata suhu pada tiap benda uji dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7 Suhu Rata-Rata Benda Uji

BENDA UJI	SUHU		
	1	2	3
	(°C)	(°C)	(°C)
TT	25,4	25,8	26,0
S2	25,7	26,2	26,3
S3	26,0	26,2	26,5
S4	26,5	26,5	26,5
S5	26,5	26,5	26,3

(Sumber : hasil penelitian)

Suhu merupakan salah satu faktor pengaruh pada uji UPV. Cuaca luar dan suhu beton yang ekstrim dapat mempengaruhi kecepatan gelombang yang melewati beton

Berdasarkan tabel 4.7 suhu rata –rata terendah pada tiap benda uji suhu adalah 25,4⁰C dan suhu rata-rata tertinggi 26,5⁰C. Hal ini disebabkan kondisi benda uji yang terlindung dari cuaca luar sehingga membuat suhu pada benda uji tetap terjaga.

Menurut tabel 2.2 yang mengacu pada *British Standard 1881 part 203* pengaruh pada suhu yang berkisar antara rentang 20⁰C sampai dengan 40⁰C tidak memerlukan faktor koreksi pada uji UPV. Sehingga, pada penelitian ini pengaruh suhu dapat diabaikan.

4.3 Pembahasan

4.3.1 Kesalahan Relatif

Perbedaan hasil pengukuran kedalaman retak dengan UPV ditunjukkan dengan adanya kesalahan relatif pada tiap tebal selimut beton. Kesalahan relatif didapat dari perbandingan kedalaman retak aktual terhadap kesalahan absolut hasil pengukuran. Kesalahan absolut adalah nilai absolut dari selisih nilai yang sebenarnya dan nilai pendekatan. Kesalahan relatif pada tiap variasi didapatkan dari rata-rata kesalahan relatif pada tiap benda pada masing-masing variasi tebal selimut beton. Prosentase Kr dihitung menggunakan persamaan (3-3)

$$Kr = \frac{Ka}{\text{nilai yang sebenarnya}} \times 100\%$$

dengan :

Ka = Kesalahan absolut

Kr = Kesalahan relatif

Hasil perhitungan kesalahan relatif ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Kesalahan Relatif Pengukuran Kedalaman Retak

BENDA UJI	TEBAL SELIMUT	DATA	H RETAK AKTUAL	UJI UPV	KR
				H RETAK	
	(cm)		(cm)	(cm)	
TT ₁	0	A	8,4	8	4,76%
		B	8,4	8,1	3,57%
		C	8,4	8,3	1,19%
		D	8,4	8,1	3,57%
TT ₂	0	E	8,7	8	8,05%
		F	8,7	8,5	2,30%
		G	8,7	8,1	6,90%
		H	8,7	8,1	6,90%
TT ₃	0	I	8,4	8	4,76%
		J	8,4	8,1	3,57%
		K	8,4	7,8	7,14%
		L	8,4	8,2	2,38%
S2 ₁	2	A	6,8	8	17,65%
		B	6,8	7,4	8,82%
		C	6,8	7,1	4,41%
		D	6,8	7,4	8,82%
S2 ₂	2	E	6,8	7,1	4,41%
		F	6,8	7,3	7,35%
		G	6,8	7,5	10,29%
		H	6,8	7,1	4,41%
S2 ₃	2	I	8,8	8,4	4,55%
		J	8,8	8,3	5,68%
		K	8,8	8,8	0,00%
		L	8,8	8	9,09%
S3 ₁	3	A	8,8	7,9	10,23%
		B	8,8	8,1	7,95%
		C	8,8	8,7	1,14%
		D	8,8	8,6	2,27%
S3 ₂	3	E	9,5	8,8	7,37%
		F	9,5	9,4	1,05%
		G	9,5	9,4	1,05%
		H	9,5	8,6	9,47%
S3 ₃	3	I	8,2	7,3	10,98%
		J	8,2	7,5	8,54%
		K	8,2	7,5	8,54%
		L	8,2	7,3	10,98%

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.8 Lanjutan

BENDA UJI	TEBAL SELIMUT (cm)	DATA	H RETAK AKTUAL (cm)	UJI UPV H RETAK (cm)	KR
S4 ₁	4	A	8,1	7,9	2,47%
		B	8,1	7,2	11,11%
		C	8,1	7,6	6,17%
		D	8,1	7,8	3,70%
S4 ₂	4	E	8,3	8,4	1,20%
		F	8,3	7,5	9,64%
		G	8,3	8	3,61%
		H	8,3	7,8	6,02%
S4 ₃	4	I	7,8	8,5	8,97%
		J	7,8	7,7	1,28%
		K	7,8	8,5	8,97%
		L	7,8	8	2,56%
S5 ₁	5	A	7,6	7,8	2,63%
		B	7,6	8,3	9,21%
		C	7,6	7,9	3,95%
		D	7,6	8	5,26%
S5 ₂	5	E	7,9	8,6	8,86%
		F	7,9	8,3	5,06%
		G	7,9	7,8	1,27%
		H	7,9	7,6	3,80%
S5 ₃	5	I	9	9,1	1,11%
		J	9	8,4	6,67%
		K	9	8,6	4,44%
		L	9	8,4	6,67%

(Sumber : hasil penelitian)

Kesalahan relatif pada tabel 4.8 harus dilakukan uji Grubbs pada tiap variasi. Pada penelitian ini digunakan 3 benda uji pada tiap variasi. Pada tiap variasi memiliki 12 data kesalahan relatif. Dari 12 data ini harus dilakukan pengujian data untuk membuang data yang menyimpang (*outlier*) atau tidak. Pengujian data yang digunakan adalah uji Grubbs.

4.3.2 Uji Grubbs

Data dianggap menyimpang jika G hitung $>$ G kritis. Perhitungan uji grubbs dapat dihitung dengan persamaan (3-4), (3-5), dan (3-6) :

$$G_1 = \frac{|\bar{x} - x_i|}{S}$$

$$G_2 = \frac{|x_n - x_1|}{S}$$

$$G_3 = 1 - \left(\frac{(n-3)x S_{n-2}^2}{(n-1)x S^2} \right)$$

dengan:

G_1 = digunakan jika terdapat hanya satu data menyimpang

G_2 = digunakan jika terdapat dua data ekstrim yaitu 1 data menyimpang pada posisi minimum dan 1 data menyimpang pada posisi maksimum

G_3 = digunakan jika terdapat 2 buah data menyimpang yang berpasangan

\bar{x} = rata-rata

x_i = data yang dicurigai sebagai menyimpang

x_n = data minimum

x_1 = data maksimum

n = jumlah data

S_{n-2} = simpangan baku tanpa data menyimpang

S = simpangan baku

Data – data yang ada pada tiap variasi diurutkan terlebih dahulu untuk mempermudah perhitungan uji grubbs. Data – data yang menyimpang diseleksi dan diuji dengan uji grubbs. Untuk melihat data G kritis dapat dilihat pada lampiran Perhitungan uji grubbs dapat dilihat pada tabel 4.9

Jumlah data = 12 ; G_1 Kritis = 2,285 ; G_2 Kritis = 3,91 ; G_3 Kritis = 0,70004

Tabel 4.9 Perhitungan Uji Grubbs Pada Tiap Variasi

VARIASI BENDA UJI	DATA	KR	PERHITUNGAN UJI GRUBBS	
		%		
Beton Tanpa Tulangan	C	1,19	S	2,21
	F	2,30	S^2	4,91
	M	2,38	S_{n-2}	-
	B	3,57	S^2_{n-2}	-
	D	3,57	\bar{X}	4,59
	K	3,57	X_1	8,05
	A	4,76	X_n	1,19
	J	4,76	X_i	-
	G	6,90	G_2	3,10
	I	6,90	Kesimpulan	Tidak Dibuang
	L	7,14		
	E	8,05		
Beton Selimut 2 Cm	L	0,00	S	4,39
	C	4,41	S^2	19,28
	E	4,41	S_{n-2}	-
	I	4,41	S^2_{n-2}	-
	J	4,55	\bar{X}	7,12
	K	5,68	X_1	17,65
	F	7,35	X_n	0,00
	B	8,82	X_i	-
	D	8,82	G_2	4,02
	M	9,09	Kesimpulan	Dibuang
	G	10,29		
	A	17,65		
Beton Selimut 3 Cm	F	1,05	S	4,04
	G	1,05	S^2	16,34
	C	1,14	S_{n-2}	3,86
	D	2,27	S^2_{n-2}	14,94
	E	7,37	\bar{X}	6,63
	B	7,95	X_1	-
	K	8,54	X_n	-
	L	8,54	X_i	-
	I	9,47	G_3	0,25
	A	10,23	Kesimpulan	Tidak Dibuang
	J	10,98		
	M	10,98		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.9 Lanjutan

VARIASI BENDA UJI	Data	KR	Perhitungan Uji Grubbs	
		%		
Beton Selimut 4 Cm	E	1,20	S	3,49
	K	1,28	S ²	12,21
	A	2,47	S _{n-2}	-
	M	2,56	S ² _{n-2}	-
	G	3,61	\bar{X}	5,48
	K	3,70	X ₁	11,11
	I	6,02	X _n	1,20
	C	6,17	X _i	11,11
	J	8,97	G ₁	1,61
	L	8,97	Kesimpulan	Tidak Dibuang
	F	9,64		
	B	11,11		
	Beton Selimut 5 Cm	L	1,11	S
C		1,27	S ²	6,88
E		2,63	S _{n-2}	1,97
I		3,80	S ² _{n-2}	3,87
J		3,95	\bar{X}	4,91
K		4,44	X ₁	-
F		5,06	X _n	-
B		5,26	X _i	-
D		6,67	G ₃	0,54
M		6,67	Kesimpulan	Tidak Dibuang
G		8,86		
A		9,21		

(Sumber : hasil penelitian)

Berdasarkan tabel 4.9 ada 2 data yang harus dibuang pada variasi beton dengan tebal selimut 2 cm (S2) yaitu data A sebesar 0% dan data L sebesar 17,6%. Sehingga kedua data tidak disertakan pada perhitungan selanjutnya. Sedangkan pada variasi lainnya tidak ada data yang harus dibuang.

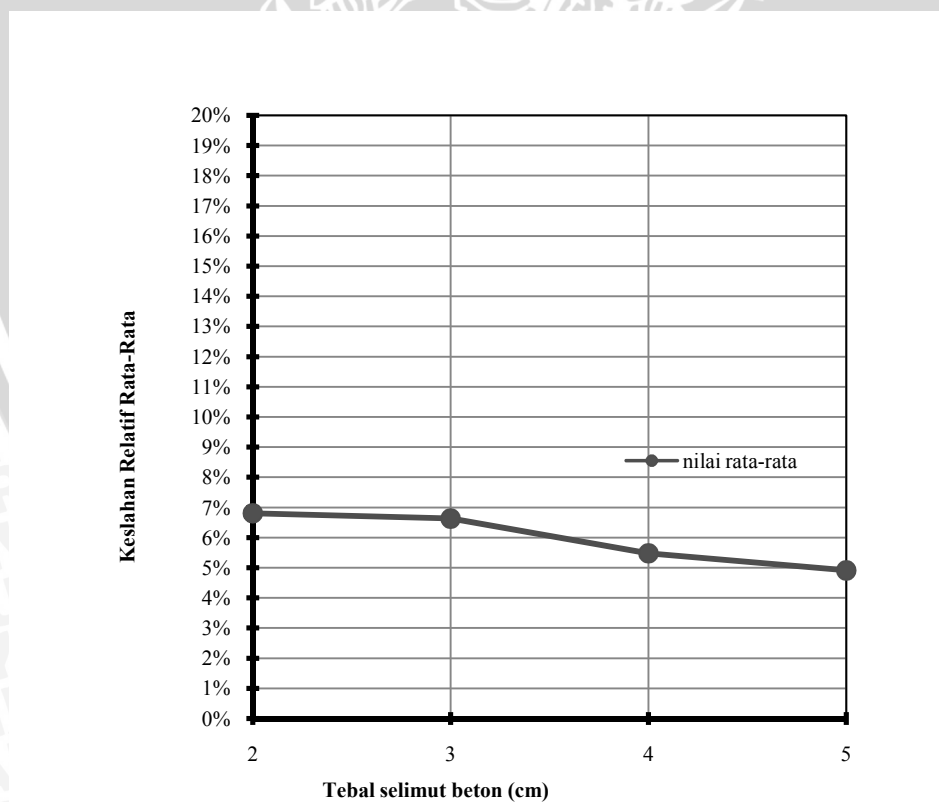
Setelah dilakukan uji Grubbs maka kesalahan relatif rata-rata pada tiap variasi benda uji dapat dihitung. Perhitungan kesalahan relatif rata-rata dihitung tanpa menyertakan data-data yang telah dibuang pada uji Grubbs. Pada tabel 4.10 dapat dilihat kesalahan relatif pada tiap variasi.

Tabel 4.10 Kesalahan Relatif Rata-Rata Pada Tiap Variasi

BENDA UJI	KR			KR RATA-RATA
	1	2	3	
	%	%	%	%
TT	3,27	6,03	4,46	4,59
S2	7,35	6,62	6,44	6,80
S3	5,40	4,74	9,76	6,63
S4	5,86	5,12	5,45	5,48
S5	5,26	4,75	4,72	4,91

(Sumber : hasil penelitian)

Gambar 4.14 menunjukkan grafik kesalahan relatif rata – rata pada tiap variasi tebal selimut. Sedangkan kesalahan relatif rata-rata pada beton tulangan adalah 4,59%



Gambar 4.14 Kesalahan Relatif Rata – Rata Pada Tiap Variasi Tebal Selimut
(Sumber : hasil penelitian)

Berdasarkan gambar 4.14 kesalahan relative rata - rata pada pengukuran kedalaman retak beton dengan tebal selimut 2 cm, 3cm, 4 cm, dan 5 cm berturut – turut adalah 6,80%; 6,63%; 5,48%; dan 4,91%. Pada beton tanpa tulangan kesalahan relatif uji UPV yaitu 4,59%.

Kesalahan relatif cenderung menurun dari beton dengan tebal selimut yang kecil terhadap beton dengan tebal selimut yang besar. Tapi sulit untuk menentukan batasan pengaruh tulangan karena data tidak seragam pada tiap variasi benda uji. Beton tanpa tulangan digunakan sebagai *benchmark* karena tidak terpengaruh adanya keberadaan tulangan. Besar tidaknya pengaruh tulangan terhadap hasil pengukuran UPV dapat dianalisa dengan uji hipotesis.

4.3.2 Uji Hipotesis

Pengujian hipotesis dilakukan dengan analisa statistik, yaitu uji F satu arah. Pengujian hipotesis dilakukan agar dapat diketahui hipotesis yang telah dibuat dapat diterima atau ditolak. Hipotesis dapat ditulis sebagai berikut :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq \mu_5$$

Dimana :

H_0 : Hipotesis nol, yang menyatakan bahwa tidak terdapat adanya perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kedalaman retak buatan menggunakan uji UPV antar variasi selimut beton

H_1 : Hipotesis alternatif, yang menyatakan bahwa terdapat adanya perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kedalaman retak buatan menggunakan uji UPV antar variasi selimut beton

μ_i : Data nilai kesalahan relatif pengukuran kedalaman retak dengan uji UPV tiap variasi selimut beton

Uji F satu arah dianalisa dengan membandingkan nilai F_{hitung} dan F_{tabel} . Apabila $F_{hitung} > F_{tabel}$ maka H_0 ditolak dan jika $F_{hitung} < F_{tabel}$ maka H_0 diterima.

F_{tabel} didapatkan dari tabel F sesuai dengan nilai α dan derajat kebebasan. F_{hitung} diperoleh dari *varian between mean* yang dibagi dengan *varian within group* dalam kelompok.

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1}$$

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n-1)}$$

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}}$$

Dimana :

- n : banyaknya pengamatan tiap sampel
- K : banyaknya sampel
- i : 1, 2, 3, ... n
- j : 1, 2, 3, ... K
- \bar{x}_j : nilai rata-rata sampel ke j
- x_{ij} : nilai pengamatan sampel ke i sampel ke j
- K-1 : derajat bebas dari *varian between mean*
- K(n-1) : derajat bebas dari *varian within group*

Input data statistik pengujian pada tiap benda uji dapat dilihat pada tabel 4.12

Tabel 4.11 Data Statistik Uji Hipotesis

BENDA UJI	KESALAHAN RELATIF		
	1	2	3
	%	%	%
TT	3,27	6,03	4,46
S2	7,35	6,62	6,44
S3	5,40	4,74	9,76
S4	5,86	5,12	5,45
S5	5,26	4,75	4,72

(Sumber : hasil penelitian)

Dengan :

- n = 3
- K = 5
- $\alpha = 0,05$
- $V_1 = K-1 = 5-1 = 4$
- $V_2 = K(n-1) = 5(3-1) = 10$

Diperoleh nilai $F_{\text{tabel}}(4;10) = 3,48$. Tabel F satu arah dengan $\alpha = 0,05$ dapat dilihat pada lampiran tabel F

F hitung didapatkan dari :

- a. Varian Between Mean

Tabel 4.12 Perhitungan Varian Between Mean

n \ k	1	2	3	4	5	JUMLAH
1	3,27	7,35	5,40	5,86	5,26	
2	6,03	6,62	4,74	5,12	4,75	
3	4,46	6,44	9,76	5,45	4,72	
$\sum X_i$	13,77	20,41	19,89	16,43	14,73	
$X_j = \sum X_j / n_j$	4,59	6,80	6,63	5,48	4,91	28,41
\bar{X}	5,68					
$X_j - \bar{X}$	-1,09	1,12	0,95	-0,20	-0,77	0,00
$(X_j - \bar{X})^2$	1,19	1,26	0,90	0,04	0,60	3,98

(Sumber : hasil penelitian)

Contoh perhitungan :

$$\sum X_i = 3,27 + 6,03 + 4,46 = 13,77$$

$$X_j = \frac{\sum X_i}{n_j} = \frac{13,77}{3} = 4,59$$

$$\sum X_j = 4,59 + 6,80 + 6,63 + 5,48 + 4,91 = 28,41$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_j}{k} = \frac{28,41}{5} = 5,68$$

$$X_j - \bar{X} = 4,59 - 5,68 = -1,09$$

$$(X_j - \bar{X})^2 = (-1,09)^2 = 1,19$$

$$\sum (X_j - \bar{X})^2 = 1,19 + 1,26 + 0,90 + 0,04 + 0,60 = 3,98$$

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1}$$

$$= \frac{3 \cdot 3,98}{5 - 1}$$

$$= 2,99$$

b. Varian Between Group

Tabel 4.13 Perhitungan Varian Between Group

n	(X _{ij} -X _j)					JUMLAH
1	1,73	0,30	1,52	0,15	0,12	3,83
2	2,08	0,03	3,58	0,13	0,03	5,86
3	0,02	0,13	9,77	0,00	0,04	9,96
						19,64

(Sumber : hasil penelitian)

Contoh Perhitungan :

$$\sum (x_{ij} - \bar{x})^2 = 3,83 + 5,86 + 9,96 = 19,64$$

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n-1)}$$

$$\text{varian within group} = \frac{19,64}{5 \cdot (3-1)}$$

$$\text{varian within group} = 1,96$$

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}}$$

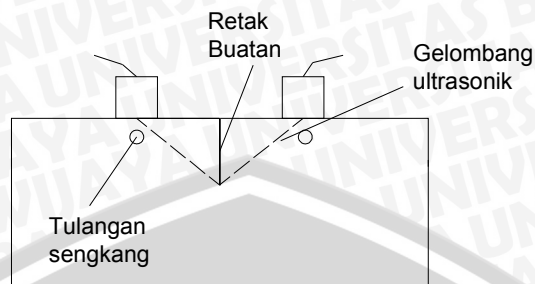
$$F_{\text{hitung}} = \frac{2,99}{1,96}$$

$$F_{\text{hitung}} = 1,52$$

Nilai dari F_{hitung} dan F_{tabel} dibandingkan, maka $F_{\text{tabel}} = 3,48$ dan $F_{\text{hitung}} = 1,52$, maka $F_{\text{hitung}} < F_{\text{tabel}}$ sehingga H_0 diterima artinya tidak terdapat adanya perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kedalaman retak buatan menggunakan uji UPV antar variasi selimut beton.

Berdasarkan gambar 4.14 ada kecenderungan nilai kesalahan relatif menurun pada beton dengan tebal selimut yang kecil terhadap tebal selimut yang besar. Tapi dari uji hipotesis menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan keseluruhan hasil pengukuran UPV. Pada penelitian ini, memang lokasi retak benda uji yang dibuat tidak melewati tulangan utama. Tapi *transducer* UPV diletakkan di atas permukaan beton dengan tulangan sengkang di bawahnya (lihat gambar 4.15). Sehingga gelombang dari

UPV masih memungkinkan untuk melewati tulangan meski tidak melewati tulangan utama.

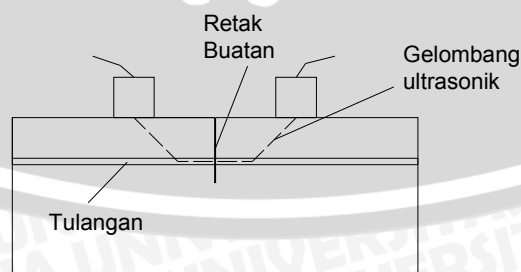


Gambar 4.15 Tulangan Sengkang Pada Benda Uji dan Gelombang UPV Secara *Indirect Transmission*

Gelombang ultrasonik melewati tulangan sehingga kecepatan gelombang berubah. Perbedaan kecepatan gelombang disebabkan oleh medium yang dilalui gelombang berbeda. Gelombang melewati beton dan tulangan sehingga waktu tempuh gelombang mengalami perubahan. Pembacaan kedalaman retak dipengaruhi oleh waktu tempuh gelombang. Jika waktu tempuh gelombang berubah maka pembacaan kedalaman retak juga berubah.

Pada penelitian ini, pengaruh tulangan tentu akan semakin berkurang jika tebal selimut semakin besar. Sehingga kesalahan relatif pada beton dengan tebal selimut yang besar tidak akan jauh berbeda dari beton tanpa tulangan. Tapi dari hasil analisa uji F tidak ada perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif antar variasi benda uji.

Untuk mendapatkan pengaruh yang lebih baik dari tulangan, gelombang yang dikirim UPV memang sebaiknya melewati tulangan secara penuh. Sehingga retak dibuat dengan melewati tulangan utama dengan rambatan gelombang secara *indirect transmission* seperti pada gambar 4.16



Gambar 4.16 Gelombang UPV Melewati Tulangan Utama Secara *Indirect Transmission*

Pada gambar 4.16 gelombang ultrasonik secara penuh melewati tulangan utama maka pembacaan kedalaman retak juga berubah. Sehingga hasil pengukuran kedalaman retak juga akan mengalami perbedaan pada tiap variasi. Tapi hal ini cukup sulit untuk diaplikasikan. Untuk membuat retak yang melewati tulangan utama dan lebih presisi pada benda uji sulit dilakukan. Oleh karena itu, pada penelitian ini retak dibuat tidak melewati tulangan utama tapi sedapat mungkin gelombang ultrasonik dapat melewati tulangan sengkang.

