

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Bahan

4.1.1 Semen

Dalam penelitian ini, semen yang digunakan adalah semen Portland tipe I yang diproduksi oleh PT. Semen Gresik. Semen ini dianggap telah memenuhi syarat Standart Industri Indonesia (SII) sebagai bahan pengikat pada campuran beton sehingga tidak perlu dilakukan analisa.

4.1.2 Air

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

4.1.3 Agregat

Dalam penelitian ini digunakan dua jenis agregat, yaitu agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus berasal dari daerah kabupaten Lumajang, sedangkan agregat kasar berasal dari daerah kabupaten Malang. Untuk memenuhi syarat sebagai bahan campuran beton, maka perlu dilakukan pemeriksaan terhadap kedua jenis agregat. Dari data pemeriksaan didapatkan sebagai berikut :

Tabel 4.1 Hasil pemeriksaan agregat

Nomor Contoh	Agregat Halus	Agregat Kasar
Gradasi	Zona 3	Zona 3
Kadar Air	2.77	0.70
Berat Jenis Kering Permukaan Jenuh (Bulk Specific Gravity Saturated Surface Dry)	2.32	3.26
Penyerapan (%) (Absorption)	6.02	1.05
Berat Isi Agregat	1370.40	1490.33

(Sumber : hasil penelitian)

4.1.4 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 0,54. Total volume yang dibutuhkan pada 1 kali pengecoran adalah $0,0526 \text{ m}^3$, terdiri dari 1 buah benda uji balok dan 2 buah sampel silinder uji. Dari perhitungan *mix design* diperoleh perbandingan semen : air : agregat halus : agregat kasar adalah 1 : 0,6 : 1,5 : 3,6. Perhitungan *mix design* dapat dilihat pada lampiran.

4.2 Hasil Pengujian

4.2.1 Kuat tekan beton

Setelah beton berumur 28 hari, dilakukan pengujian kuat tekan yang bertujuan untuk mengetahui mutu atas beton yang telah dibuat. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Struktur Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang dengan menggunakan alat uji tekan (*Compression Testing Machine*).



Gambar 4.1 Alat uji kuat tekan (*Compression Testing Machine*)

(Sumber : dokumentasi penelitian)

Benda uji yang digunakan dalam pengujian ini adalah silinder uji dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pada penelitian ini 1 kali pengecoran beton diambil 2 buah sampel silinder uji. Pada setiap variasi yang terdiri dari 4 buah benda uji diperlukan 4 kali pengecoran. Sehingga dibutuhkan 40 buah sampel silinder uji untuk semua benda uji. Hasil dari pengujian kuat tekan secara lengkap dapat disajikan pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Hasil uji kuat tekan sampel silinder

Sampel Silinder untuk Variasi	Benda Uji		Luas Penampang (cm ²)	Berat (Kg)	Beban Maksimal (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Nilai Rata2 (MPa)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	176.71	12.76	352	19.92	19.55
		2	176.71	12.34	339	19.18	
	B	1	176.71	12.72	337	19.07	19.21
		2	176.71	12.46	342	19.35	
	C	1	176.71	12.72	355	20.09	20.91
		2	176.71	12.62	384	21.73	
	D	1	176.71	12.62	345	19.52	20.34
		2	176.71	12.58	374	21.16	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	176.71	12.62	318	18.00	18.28
		2	176.71	12.32	328	18.56	
	B	1	176.71	12.44	331	18.73	19.16
		2	176.71	12.54	346	19.58	
	C	1	176.71	12.48	382	21.62	20.94
		2	176.71	12.56	358	20.26	
	D	1	176.71	12.96	348	19.69	19.47
		2	176.71	12.38	340	19.24	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	176.71	12.52	345	19.52	19.24
		2	176.71	12.42	335	18.96	
	B	1	176.71	12.96	326	18.45	18.62
		2	176.71	12.38	332	18.79	
	C	1	176.71	12.58	365	20.65	20.06
		2	176.71	12.68	344	19.47	
	D	1	176.71	12.70	359	20.32	21.62
		2	176.71	12.54	405	22.92	

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.2 Lanjutan

Sampel Silinder untuk Variasi	Benda Uji		Luas Penampang (cm ²)	Berat (Kg)	Beban Maksimal (KN)	Kuat Tekan (MPa)	Nilai Rata2 (MPa)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	176.71	12.32	311	17.60	17.94
		2	176.71	12.54	323	18.28	
	B	1	176.71	12.60	340	19.24	19.01
		2	176.71	12.38	332	18.79	
	C	1	176.71	12.72	327	18.50	20.40
		2	176.71	12.92	394	22.30	
	D	1	176.71	12.72	347	19.64	19.81
		2	176.71	12.64	353	19.98	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	176.71	12.54	331	18.73	18.99
		2	176.71	12.60	340	19.24	
	B	1	176.71	12.64	331	18.73	18.53
		2	176.71	12.28	324	18.33	
	C	1	176.71	12.60	356	20.15	19.81
		2	176.71	12.04	344	19.47	
	D	1	176.71	12.76	393	22.24	20.60
		2	176.71	12.72	335	18.96	

(Sumber : hasil penelitian)

Perhitungan kuat tekan berdasarkan rumus tegangan dimana :

$$\text{Tegangan}(f) = \frac{P(kN)}{A(cm^2)} \quad (4 - 1)$$

Keterangan : f = Tegangan (kN/cm²)
 P = Beban maksimum yang dapat ditahan (kN)
 A = Luas penampang yang ditekan (cm²)

Contoh perhitungan :

Benda uji : Balok Beton Tanpa Tulangan (A/1)

Berat : 12,76 kg

Diameter : 15 cm

Beban Maks : 352 KN = 3,52.10⁵ NLuas (A) : $A = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 15^2 = 176,71 \text{ cm}^2 = 1,7671 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ Maka kuat tekan benda uji : $f'c = \frac{3,52 \cdot 10^5}{1,7671 \cdot 10^4} = 19,92 \text{ MPa}$

Dari tabel 4.2 diperoleh data rata-rata kuat tekan silinder pada tiap benda uji, akan tetapi harus dilakukan pengujian data untuk membuang data yang menyimpang (*outlier*) atau tidak. Pengujian data yang digunakan adalah uji Grubbs.

4.2.2 Uji Grubbs kuat tekan beton

Data dianggap menyimpang jika $G_{hitung} > G_{kritis}$. Perhitungan uji Grubbs dapat dilakukan dengan persamaan berikut :

$$G_1 = \frac{|\bar{x} - x_i|}{S} \quad (4-2)$$

$$G_2 = \frac{|x_n - x_1|}{S} \quad (4-3)$$

$$G_3 = 1 - \left(\frac{(n-3)x S_{n-2}^2}{(n-1)x S^2} \right) \quad (4-4)$$

Keterangan :

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

Untuk nilai G_{kritis} dapat dilihat pada lampiran. Perhitungan uji Grubbs kuat tekan beton dapat dilihat pada tabel 4.3.

Jumlah data = 4 ; $G_1 \text{ kritis} = 1,463$; $G_2 \text{ kritis} = 2,43$; $G_3 \text{ kritis} = 0,9992$

Tabel 4.3 Perhitungan uji Grubbs kuat tekan sampel silinder

Sampel Silinder untuk Variasi	Benda Uji	Compression Test (MPa)	Perhitungan Uji Grubbs Compression Test		Kesimpulan
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	19.55	S	0.77	Tidak Dibuang
	B	19.21	$\bar{X}$	20.00	
	C	20.91	X_i	20.91	
	D	20.34	G_1	1.18	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	18.28	S	1.11	Tidak Dibuang
	B	19.16	$\bar{X}$	19.46	
	C	20.94	X_i	20.94	
	D	19.47	G_1	1.34	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	19.24	S	1.30	Tidak Dibuang
	B	18.62	$\bar{X}$	19.88	
	C	20.06	X_i	21.62	
	D	21.62	G_1	1.34	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	17.94	S	1.06	Tidak Dibuang
	B	19.01	$\bar{X}$	19.29	
	C	20.40	X_i	17.94	
	D	19.81	G_1	1.27	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	18.99	S	0.91	Tidak Dibuang
	B	18.53	$\bar{X}$	19.48	
	C	19.81	X_i	20.60	
	D	20.60	G_1	1.22	

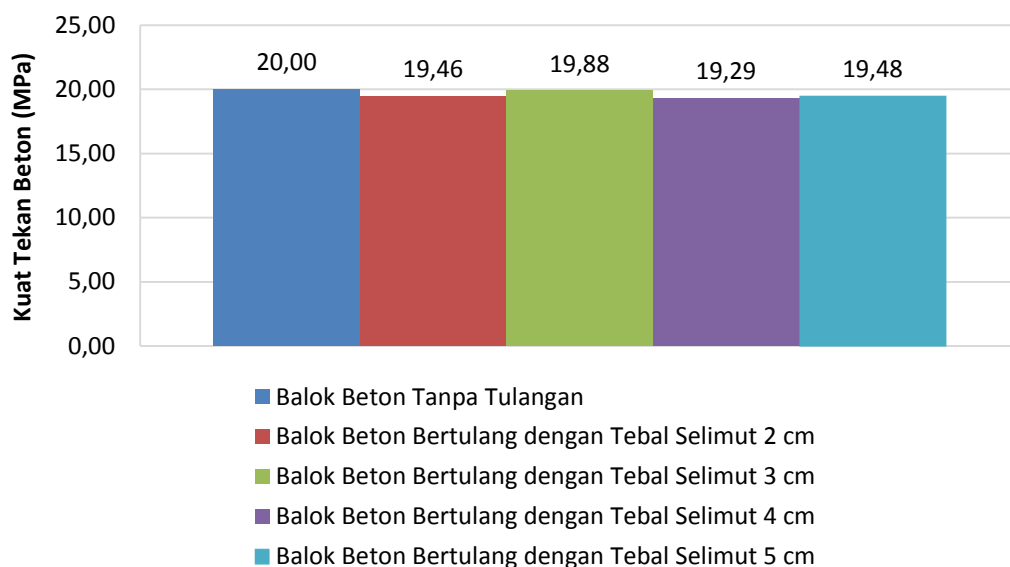
(Sumber : hasil penelitian)

Berdasarkan tabel 4.3 tidak ada data yang harus dibuang, maka nilai rata-rata kuat tekan silinder pada tiap variasi dapat dihitung. Pada tabel 4.4 dapat dilihat rata-rata kuat tekan silinder pada tiap variasi.

Tabel 4.4 Rata-rata kuat tekan sampel silinder pada tiap variasi

Sampel Silinder untuk Variasi	Benda Uji				Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	D (MPa)	
Balok Beton Tanpa Tulangan	19.55	19.21	20.91	20.34	20.00
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	18.28	19.16	20.94	19.47	19.46
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	19.24	18.62	20.06	21.62	19.88
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	17.94	19.01	20.40	19.81	19.29
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	18.99	18.53	19.81	20.60	19.48

(Sumber : hasil penelitian)

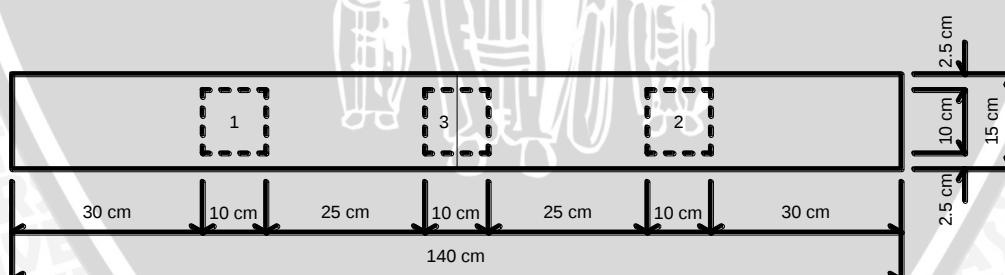


Grafik 4.1 Rata-rata kuat tekan silinder uji tiap variasi benda uji

(Sumber : hasil penelitian)

4.2.3 *Hammer test*

Pengujian *hammer* dilakukan pada setiap benda uji yang berupa balok beton dengan dimensi 20 x 15 x 140 cm sejumlah 20 benda uji, terdiri dari 5 variasi dan setiap variasi terdapat 4 benda uji. Pengujian dilakukan dengan menekan tongkat pemukul *hammer* sebanyak 10 kali dengan posisi tegak lurus permukaan beton. Setiap benda uji dilakukan 3 area pengujian, lihat pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Tampak atas lokasi pengambilan data *hammer test*

Pengambilan data dilakukan pada area lokasi yang sudah ditetapkan. Hasil pengujian *hammer* berupa nilai *rebound* yang selanjutnya akan di konversikan menjadi kuat tekan dengan menggunakan kurva konversi mengikuti persamaan (2-5) kemudian data tersebut dirata-rata. Hasil pengujian *hammer* dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil pengujian *hammer test*

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai Rebound (Q)	Mutu (MPa)	Rata-rata Nilai Rebound (Q)	Rata-rata Benda Uji (MPa)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	42.2	21	41.5	20.33
		2	41.7	20.5		
		3	40.7	19.5		
	B	1	42.7	21.5	42.4	21.17
		2	42.7	21.5		
		3	41.7	20.5		
	C	1	40.7	19.5	40.3	19.17
		2	40.7	19.5		
		3	39.6	18.5		
	D	1	40.1	19	40.1	19.00
		2	39.6	18.5		
		3	40.7	19.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	41.7	20.5	41.2	20.00
		2	41.2	20		
		3	40.7	19.5		
	B	1	42.2	21	41.7	20.50
		2	42.2	21		
		3	40.7	19.5		
	C	1	41.2	20	40.3	19.171
		2	40.1	19		
		3	39.6	18.5		
	D	1	40.7	19.5	40.1	19.00
		2	40.1	19		
		3	39.6	18.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	41.7	20.5	40.6	19.50
		2	40.1	19		
		3	40.1	19		
	B	1	40.1	19	40.1	19.00
		2	40.1	19		
		3	40.1	19		
	C	1	41.2	20	41.2	20.00
		2	41.2	20		
		3	41.2	20		
	D	1	42.7	21.5	41.5	20.33
		2	41.2	20		
		3	40.7	19.5		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.5 Lanjutan

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai Rebound (Q)	Mutu (MPa)	Rata-rata Nilai Rebound (Q)	Rata-rata Benda Uji (MPa)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	37.8	17	37.8	17.00
		2	37.8	17		
		3	37.8	17		
	B	1	40.1	19	40.1	19.00
		2	40.1	19		
		3	40.1	19		
	C	1	43.6	22.5	42.7	21.50
		2	42.7	21.5		
		3	41.7	20.5		
	D	1	41.2	20	41.3	20.17
		2	42.2	21		
		3	40.7	19.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	40.1	19	39.9	18.83
		2	40.1	19		
		3	39.6	18.5		
	B	1	39.0	18	38.6	17.67
		2	39.0	18		
		3	37.8	17		
	C	1	41.7	20.5	41.9	20.67
		2	42.7	21.5		
		3	41.2	20		
	D	1	41.2	20	41.4	20.17
		2	41.7	20.5		
		3	41.2	20		

(Sumber : hasil penelitian)

Contoh perhitungan :

Benda uji : Balok Beton Tanpa Tulangan (A/1)

Nilai *Rebound* (Q) : 42,2

Maka mutu benda uji : $f_{ck} = 2,77e^{0,048(42,2)} = 21 \text{ MPa}$

Berdasarkan tabel 4.5 diperoleh nilai rata-rata kuat tekan *hammer* untuk tiap benda uji. Seperti hasil pengujian kuat tekan beton, data kuat tekan *hammer* harus diuji guna mengetahui data yang menyimpang atau tidak. Dengan jumlah data yang akan diuji ada 4, maka perhitungan uji Grubbs kuat tekan *hammer* dapat dilihat pada tabel 4.6.

Jumlah data = 4 ; $G_1 \text{ kritis} = 1,463$; $G_2 \text{ kritis} = 2,43$; $G_3 \text{ kritis} = 0,9992$

Tabel 4.6 Perhitungan uji Grubbs kuat tekan *hammer*

Variasi	Benda Uji	Hammer Test (MPa)	Perhitungan Uji Grubbs Hammer		Kesimpulan
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	20.33	S	1.02	Tidak Dibuang
	B	21.17	$\bar{X}$	19.92	
	C	19.17	X_i	21.17	
	D	19.00	G_1	1.22	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	20.00	S	0.71	Tidak Dibuang
	B	20.50	$\bar{X}$	19.67	
	C	19.17	X_i	20.50	
	D	19.00	G_1	1.18	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	19.50	S	0.58	Tidak Dibuang
	B	19.00	$\bar{X}$	19.71	
	C	20.00	X_i	19.00	
	D	20.33	G_1	1.21	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	17.00	S	1.91	Tidak Dibuang
	B	19.00	$\bar{X}$	19.42	
	C	21.50	X_i	17.00	
	D	20.17	G_1	1.27	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	18.83	S	1.35	Tidak Dibuang
	B	17.67	$\bar{X}$	19.33	
	C	20.67	X_i	17.67	
	D	20.17	G_1	1.23	

(Sumber : hasil penelitian)

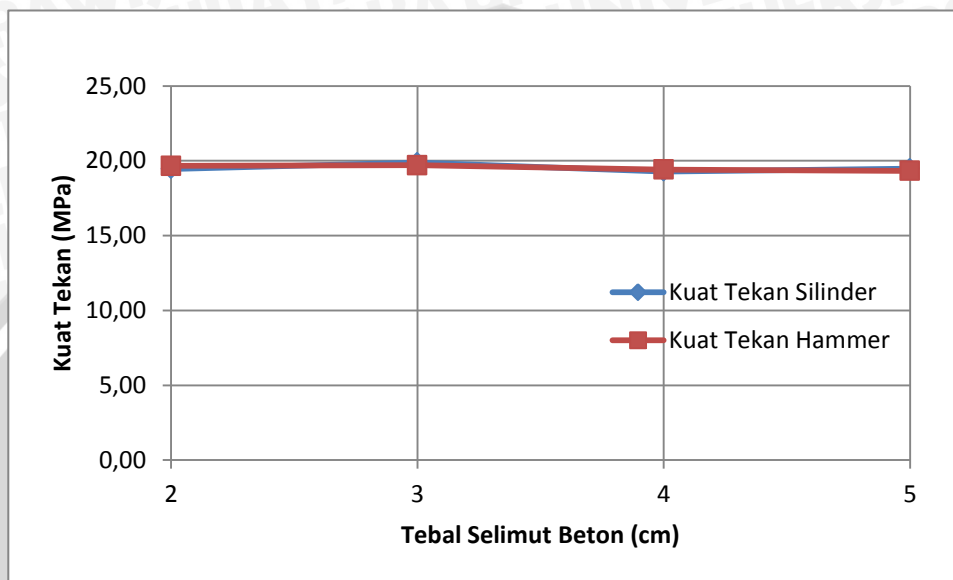
Dari tabel 4.6 diketahui bahwa tidak ada data yang dibuang. Perhitungan rata-rata kuat tekan *hammer* pada tiap variasi dapat dilakukan dan selanjutnya data tersebut dibandingkan dengan rata-rata kuat tekan silinder, lihat tabel 4.7.

Tabel 4.7 Rata-rata kuat tekan *hammer* terhadap silinder pada tiap variasi

Variasi	Benda Uji				Rata-rata Kuat Tekan Hammer (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan Silinder (MPa)
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	D (MPa)		
Balok Beton Tanpa Tulangan	20.33	21.17	19.17	19.00	19.92	20.00
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	20.00	20.50	19.17	19.00	19.67	19.46
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	19.50	19.00	20.00	20.33	19.71	19.88
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	17.00	19.00	21.50	20.17	19.42	19.29
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	18.83	17.67	20.67	20.17	19.33	19.48

(Sumber : hasil penelitian)

Dari tabel 4.7 dapat dilihat bahwa kuat tekan yang diperoleh dari pengujian *hammer* dibandingkan dengan data kuat tekan selinder relatif sama. Pada grafik 4.2 juga menunjukkan perbandingan rata-rata kuat tekan *hammer* dengan rata-rata kuat tekan silinder pada tiap variasi.

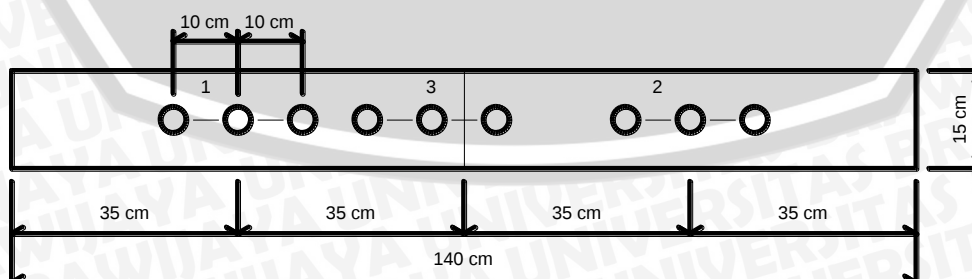


Grafik 4.2 Perbandingan rata-rata kuat tekan silinder dan *hammer* test

(Sumber : hasil penelitian)

4.2.4 UPV test

Pengujian UPV dilakukan pada setiap benda uji yang berupa balok beton dengan dimensi 20 x 15 x 140 cm sejumlah 20 benda uji, terdiri dari 5 variasi dan setiap variasi terdapat 4 benda uji. Pengujian UPV dilakukan dengan metode *indirect transmission* yaitu meletakkan *transducer* UPV pada jarak tertentu, yakni $B = 10$ cm dan $2B = 20$ cm. Setiap benda uji dilakukan 3 area pengujian, lihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.3 Tampak atas lokasi pengambilan data UPV test

Pengambilan data dilakukan pada area lokasi yang sudah ditetapkan. Hasil pengukuran UPV berupa cepat rambat gelombang yang selanjutnya akan di konversikan menjadi kuat tekan dengan menggunakan persamaan (2-4), kemudian data tersebut dirata-rata. Hasil pengujian UPV dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil pengujian UPV

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai Rebound (Q)	Kecepatan (m/s)	Mutu (MPa)	Rata-rata Kecepatan (m/s)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	41.5	2841	20.5	2838.3	20.46
		2		2841	20.5		
		3		2833	20.4		
	B	1	42.4	2841	21.0	2844.0	21.05
		2		2850	21.1		
		3		2841	21.0		
	C	1	40.3	2850	19.9	2874.7	20.18
		2		2907	20.6		
		3		2867	20.1		
	D	1	40.1	2899	20.4	2891.0	20.28
		2		2915	20.6		
		3		2859	19.9		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	41.2	3521	30.2	3550.3	30.64
		2		3559	30.8		
		3		3571	31.0		
	B	1	41.7	3571	31.4	3529.7	30.77
		2		3509	30.4		
		3		3509	30.4		
	C	1	40.3	3559	29.9	3521.7	29.37
		2		3497	29.0		
		3		3509	29.2		
	D	1	40.1	3534	29.4	3542.3	29.53
		2		3559	29.8		
		3		3534	29.4		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	40.6	3333	26.8	3329.3	26.76
		2		3333	26.8		
		3		3322	26.7		
	B	1	40.1	3378	27.0	3355.7	26.72
		2		3356	26.7		
		3		3333	26.4		
	C	1	41.2	3311	26.9	3337.0	27.32
		2		3356	27.6		
		3		3344	27.4		
	D	1	41.5	3333	27.5	3329.3	27.48
		2		3311	27.2		
		3		3344	27.7		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.8 Lanjutan

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai <i>Rebound</i> (Q)	Kecepatan (m/s)	Mutu (MPa)	Rata-rata Kecepatan (m/s)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	37.8	3165	22.3	3165.0	22.26
		2		3185	22.5		
		3		3145	22.0		
	B	1	40.1	3135	23.6	3141.7	23.65
		2		3165	24.0		
		3		3125	23.4		
	C	1	42.7	3125	25.3	3115.3	25.15
		2		3115	25.1		
		3		3106	25.0		
	D	1	41.3	3125	24.3	3138.3	24.51
		2		3165	24.9		
		3		3125	24.3		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	39.9	2994	21.5	2991.0	21.47
		2		2994	21.5		
		3		2985	21.4		
	B	1	38.6	3030	21.1	3000.0	20.69
		2		2985	20.5		
		3		2985	20.5		
	C	1	41.9	3030	23.3	3051.7	23.63
		2		3058	23.7		
		3		3067	23.9		
	D	1	41.4	2985	22.3	3003.0	22.60
		2		3012	22.7		
		3		3012	22.7		

(Sumber : hasil penelitian)

Contoh perhitungan :

Benda uji : Balok Beton Tanpa Tulangan (A/1)

Nilai *Rebound* (Q) : 41,5

Kecepatan (V) : 2941 m/s

Maka mutu benda uji : $f_{ck} = 8,06 \times 10^{-8} (2941)^{1,85} (41,5)^{1,246} = 21,6 \text{ MPa}$

Adapun cara lain untuk mengkonversikan kecepatan rambat gelombang *ultrasonic* pada kuat tekan, seperti metode *British Standard* yang menggunakan persamaan berikut :

$$f_{ck} = 0,3161e^{1,03Vn} \quad (4 - 5)$$

Keterangan :

f_{ck} = kuat tekan konversi

e = Euler number

Vn = Cepat rambat gelombang *ultrasonic* (m/μs)

Akan tetapi metode *British Standard* hanya difungsikan untuk kualitas beton yang baik, sesuai dalam *Indian Standard 13311 part 1* seperti pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Kualitas beton

Kecepatan gelombang (m/s)	Kualitas Beton
Di atas 4500	Sangat Baik
3500 – 4500	Baik
3000 – 3500	Cukup
Di bawah 3000	Buruk

(Sumber : *Indian Standard 13311 part 1*)

Sehingga dalam penelitian ini yang digunakan adalah metode gasparik dengan kurva konversi SONREB yang menggunakan nilai *rebound hammer*, karena dapat meningkatkan akurasi perkiraan kuat tekan beton. Selanjutnya data yang diperoleh dilakukan pengujian Grubbs seperti pada pengujian kuat tekan silinder dan pengujian kuat tekan *hammer*. Dengan jumlah data yang akan diuji ada 4, maka perhitungan uji Grubbs kuat tekan UPV dapat dilihat pada tabel 4.10.

Jumlah data = 4 ; $G_{1 \text{ kritis}} = 1,463$; $G_{2 \text{ kritis}} = 2,43$; $G_{3 \text{ kritis}} = 0,9992$

Tabel 4.10 Perhitungan uji Grubbs kuat tekan UPV

Variasi	Benda Uji	UPV Test (MPa)	Perhitungan Uji Grubs UPV		Kesimpulan
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	20.46	S	0.39	Tidak Dibuang
	B	21.05	$\bar{X}$	20.49	
	C	20.18	X_i	21.05	
	D	20.28	G_1	1.43	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	30.64	S	0.73	Tidak Dibuang
	B	30.77	$\bar{X}$	30.08	
	C	29.37	X_i	29.37	
	D	29.53	G_1	0.97	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	26.76	S	0.39	Tidak Dibuang
	B	26.72	$\bar{X}$	27.07	
	C	27.32	X_i	26.72	
	D	27.48	G_1	0.91	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	22.26	S	1.25	Tidak Dibuang
	B	23.65	$\bar{X}$	23.89	
	C	25.15	X_i	22.26	
	D	24.51	G_1	1.31	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	21.47	S	1.29	Tidak Dibuang
	B	20.69	$\bar{X}$	22.10	
	C	23.63	X_i	23.63	
	D	22.60	G_1	1.19	

(Sumber : hasil penelitian)

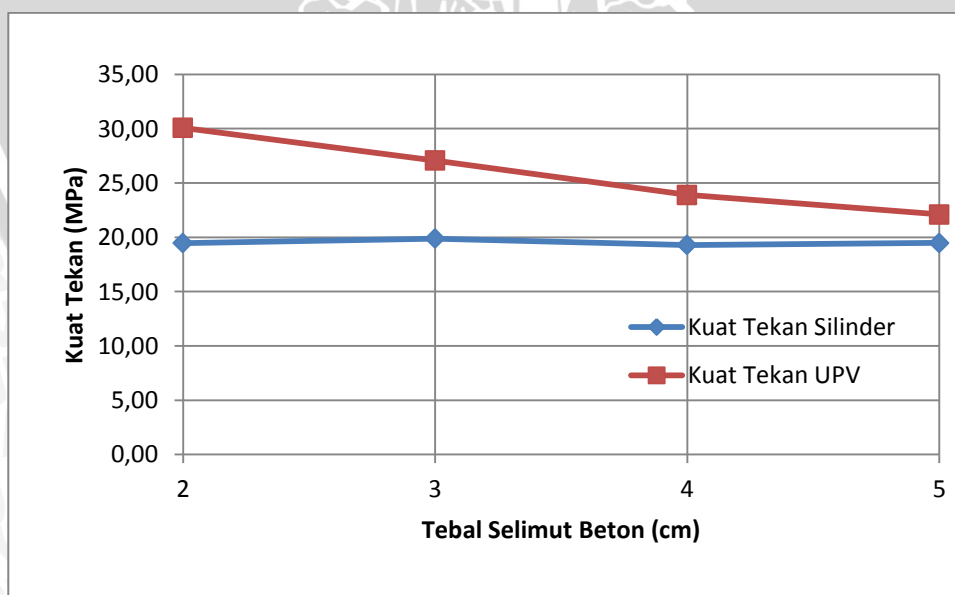
Dari tabel 4.10 diketahui bahwa tidak ada data yang dibuang. Perhitungan rata-rata kuat tekan UPV pada tiap variasi dapat dilakukan dan selanjutnya data tersebut dibandingkan dengan rata-rata kuat tekan silinder, lihat tabel 4.11.

Tabel 4.11 Rata-rata kuat tekan UPV terhadap silinder pada tiap variasi

Variasi	Benda Uji				Rata-rata Kuat Tekan UPV (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan Silinder (MPa)
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	D (MPa)		
Balok Beton Tanpa Tulangan	20.46	21.05	20.18	20.28	20.49	20.00
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	30.64	30.77	29.37	29.53	30.08	19.46
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	26.76	26.72	27.32	27.48	27.07	19.88
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	22.26	23.65	25.15	24.51	23.89	19.29
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	21.47	20.69	23.63	22.60	22.10	19.48

(Sumber : hasil penelitian)

Dari tabel 4.11 dapat dilihat bahwa kuat tekan yang diperoleh dari pengujian UPV dibandingkan dengan data kuat tekan selinder berbeda. Pada variasi balok beton bertulang dengan tebal selimut 2 cm kuat tekan UPV dibandingkan kuat tekan silinder memiliki perbedaan yang signifikan dan terus menurun pada variasi tebal selimut 3, 4 dan 5 cm. Pada grafik 4.3 juga menunjukkan perbandingan rata-rata kuat tekan hammer dengan rata-rata kuat tekan silinder pada tiap variasi.



Grafik 4.3 Perbandingan rata-rata kuat tekan silinder dan UPV

(Sumber : hasil penelitian)

4.2.5 Pembebanan lentur balok beton

Setelah pengujian *hammer* dan UPV test, dilakukan pembebanan lentur pada benda uji. Pembebanan lentur dilakukan dengan meletakkan *loadcell* pada tengah bentang dan dial pembaca dibagian bawah sebanyak 3 buah, lihat pada gambar 3.5.

Pengambilan data dilakukan dengan pembacaan *dial gauge* pada tempat yang telah ditetapkan. Pembebanan lentur pada benda uji dibagi menjadi 2, untuk benda uji tanpa tulangan beban maksimum 400 kg dengan pembacaan *dial gauge* pada beban kelipatan 20 kg. Sedangkan untuk benda uji dengan tulangan, beban maksimum yang diberikan 1000 kg dengan pembacaan *dial gauge* pada beban kelipatan 40 kg. Dengan perhitungan pengambilan beban maksimum sebagai berikut:

Diketahui : $b = 150 \text{ mm}$ $h = 200 \text{ mm}$ $f'c = 20 \text{ MPa}$ $L = 1400 \text{ mm}$

Jumlah tulangan = $2\emptyset\text{-}8 \text{ mm}$ $f_y = 300 \text{ MPa}$ $d = 150 \text{ mm}$

Ditanya : Beban maksimum hingga timbul retak?

Untuk balok beton tanpa tulangan :

Menggunakan rumus tegangan dari momen : $f = \frac{M.y}{I}$

keterangan : $f = f'c = 20 \text{ MPa}$

$M = \frac{1}{4}PL$ $P = \text{beban maksimum}$ $L = 140 \text{ cm}$

$y = \text{jarak garis netral ke serat terluar } (h/2 = 10 \text{ cm})$

$I = \text{momen inersia } (\frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} \times 15 \times 20^3 = 10^4 \text{ cm}^4)$

sehingga : $20 = \frac{\frac{1}{4}P(140)(10)}{10^4} \Rightarrow P = \frac{20 \times 10^4}{350} = 571,43 \text{ Kg}$

Diambil 70% dari beban maksimum = $70\% \times 571,43 = 400 \text{ kg}$

Untuk balok beton bertulang :

Menggunakan rumus keseimbangan gaya : $C = T \Rightarrow 0,85.f'c.b.a = A_s.f_y$

dari persamaan tersebut : $a = \frac{A_s.f_y}{0,85.f'c.b}$

keterangan : $A_s = \text{luas tulangan tarik } (2\emptyset\text{-}8 \text{ mm} = 101 \text{ mm}^2)$

$f_y = 300 \text{ MPa} = 300 \text{ N/mm}^2$

$f'c = 20 \text{ MPa} = 20 \text{ N/mm}^2$

$b = 150 \text{ mm}$

$$\text{sehingga : } a = \frac{101 \times 300}{0,85(20)(150)} \Rightarrow a = \frac{30300}{2550} = 11,88 \text{ mm}$$

$$\text{letak garis netral } c = a/\beta_1 \quad \text{untuk } f'_c \leq 30 \text{ Mpa, harga } \beta_1 = 0,85$$

$$c = a/\beta_1 \Rightarrow c = \frac{11,88}{0,85} = 13,98 \text{ mm}$$

$$\text{kontrol regangan baja tarik } (\epsilon_s) = \epsilon_c \frac{d-c}{c} \quad \text{untuk } \epsilon_c = 0,003$$

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{150-13,98}{13,98} = 0,0292$$

$$\text{tegangan baja tarik } (f_s) = \epsilon_s E_s \quad \text{untuk } E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$f_s = 0,0292 \times 200000 = 5838,12 \text{ MPa} > 300 \text{ MPa}$$

$$f_s > f_y \text{ (tulangan tarik sudah leleh)}$$

$$\begin{aligned} \text{momen lentur nominal } (M_n) &= A_s f_y (d-a/2) \\ &= 101 \times 300 \times (150 - 11,88/2) \\ &= 4,364982 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{momen desain maksimum } (M_u) &= \phi M_n \\ &= 0,8 \times 4,364982 = 3,491986 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\text{dari rumus momen } (M = \frac{1}{4} PL)$$

$$P = 3,491986/0,35 = 9977,1 \text{ N} = 997,71 \text{ kg} \approx 1000 \text{ kg}$$

Data pembacaan *dial gauge* dapat dilihat di lampiran.

Dengan beban maksimum yang diberikan pada benda uji, diharapkan terjadi retak lentur. Selanjutnya dilakukan pengujian NDT terhadap benda uji yang telah mengalami retak lentur, guna mengetahui kapasitas kuat tekannya.

4.2.6 NDT setelah pembebanan

Pengujian ini dilakukan pada setiap benda uji yang telah mengalami retak lentur akibat pembebanan lentur. Alat yang digunakan adalah *hammer test* dan UPV seperti pengujian sebelum pembebanan lentur. Posisi pengujian NDT seperti pada gambar 4.2 dan gambar 4.3.

Selanjutnya data kuat tekan yang diperoleh pada *hammer test* dan UPV setelah pembebanan akan dilakukan pengujian data seperti data kuat tekan sebelum pembebanan. Kemudian data yang telah teruji dirata-rata tiap variasi dan dibandingkan dengan data rata-rata kuat tekan sebelum pembebanan. Perhitungan kuat tekan setelah pembebanan lentur dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.12 Hasil pengujian *hammer* test setelah pembebanan lentur

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai <i>Rebound</i> (Q)	Mutu (MPa)	Rata-rata Nilai <i>Rebound</i> (Q)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	39.6	18.5	39.6	18.50
		2	39.0	18		
		3	40.1	19		
	B	1	40.7	19.5	41.5	20.33
		2	42.2	21		
		3	41.7	20.5		
	C	1	40.1	19	39.7	18.67
		2	39.6	18.5		
		3	39.6	18.5		
	D	1	38.4	17.5	38.6	17.67
		2	38.4	17.5		
		3	39.0	18		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	39.6	18.5	39.9	18.83
		2	39.6	18.5		
		3	40.7	19.5		
	B	1	40.1	19	39.9	18.83
		2	40.7	19.5		
		3	39.0	18		
	C	1	39.6	18.5	38.4	17.50
		2	37.2	16.5		
		3	38.4	17.5		
	D	1	39.0	18	38.6	17.67
		2	39.6	18.5		
		3	37.2	16.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	39.0	18	39.0	18.00
		2	38.4	17.5		
		3	39.6	18.5		
	B	1	39.0	18	39.2	18.17
		2	39.0	18		
		3	39.6	18.5		
	C	1	37.8	17	39.0	18.00
		2	39.0	18		
		3	40.1	19		
	D	1	39.6	18.5	39.4	18.33
		2	39.6	18.5		
		3	39.0	18		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.12 Lanjutan

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai Rebound (Q)	Mutu (MPa)	Rata-rata Nilai Rebound (Q)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	35.9	15.5	36.1	15.67
		2	37.2	16.5		
		3	35.2	15		
	B	1	39.6	18.5	39.2	18.17
		2	38.4	17.5		
		3	39.6	18.5		
	C	1	39.6	18.5	39.5	18.50
		2	40.7	19.5		
		3	38.4	17.5		
	D	1	39.0	18	38.8	17.83
		2	39.0	18		
		3	38.4	17.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	37.8	17	38.0	17.17
		2	39.0	18		
		3	37.2	16.5		
	B	1	37.2	16.5	37.4	16.67
		2	37.8	17		
		3	37.2	16.5		
	C	1	37.8	17	38.2	17.33
		2	38.4	17.5		
		3	38.4	17.5		
	D	1	38.4	17.5	38.8	17.83
		2	39.0	18		
		3	39.0	18		

(Sumber : hasil penelitian)

Jumlah data = 4 ; $G_{1 \text{ kritis}} = 1,463$; $G_{2 \text{ kritis}} = 2,43$; $G_{3 \text{ kritis}} = 0,9992$

Tabel 4.13 Perhitungan uji Grubbs kuat tekan *hammer* setelah pembebanan lentur

Variasi	Benda Uji	Hammer Test Setelah Pembebanan (MPa)	Perhitungan Uji Grubbs Hammer Setelah Pembebanan		Kesimpulan
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	18.50	S	1.12	Tidak Dibuang
	B	20.33	$\bar{X}$	18.79	
	C	18.67	X_i	20.33	
	D	17.67	G_1	1.38	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	18.83	S	0.72	Tidak Dibuang
	B	18.83	$\bar{X}$	18.21	
	C	17.50	X_i	17.50	
	D	17.67	G_1	0.98	

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.13 Lanjutan

Variasi	Benda Uji	Hammer Test Setelah Pembebanan (MPa)	Perhitungan Uji Grubs Hammer Setelah Pembebanan		Kesimpulan
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	18.00	S	0.16	Tidak Dibuang
	B	18.17	$\bar{X}$	18.13	
	C	18.00	X_i	18.33	
	D	18.33	G_1	1.31	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	15.67	S	1.28	Dibuang
	B	18.17	$\bar{X}$	17.54	
	C	18.50	X_i	15.67	
	D	17.83	G_1	1.47	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	17.17	S	0.48	Tidak Dibuang
	B	16.67	$\bar{X}$	17.25	
	C	17.33	X_i	16.67	
	D	17.83	G_1	1.21	

(Sumber : hasil penelitian)

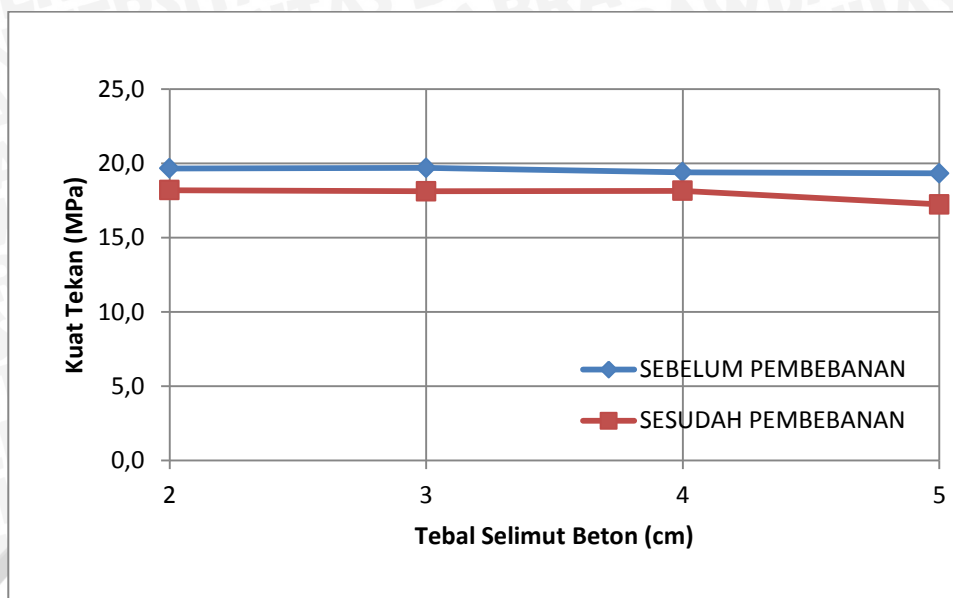
Dari tabel 4.13 diketahui bahwa ada data yang dibuang, yakni data kuat tekan variasi tebal selimut 4 cm benda uji A. Perhitungan rata-rata kuat tekan *hammer* setelah pembebanan pada tiap variasi dapat dilakukan dan selanjutnya data tersebut dibandingkan dengan rata-rata kuat tekan *hammer* sebelum pembebanan, lihat tabel 4.14.

Tabel 4.14 Rata-rata kuat tekan *hammer*

Variasi	Benda Uji				Setelah Pembebanan (MPa)	Sebelum Pembebanan (MPa)
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	D (MPa)		
Balok Beton Tanpa Tulangan	18.50	20.33	18.67	17.67	18.79	19.92
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	18.33	18.33	17.50	17.67	18.21	19.67
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	18.00	18.17	18.00	18.33	18.13	19.71
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	-	18.17	18.50	17.83	18.17	19.42
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	17.17	16.67	17.33	17.83	17.25	19.33

(Sumber : hasil penelitian)

Dari tabel 4.14 dapat dilihat bahwa kuat tekan rata-rata yang diperoleh dari pengujian *hammer* sebelum dan setelah pembebanan berbeda, semua variasi mengalami penurunan setelah pembebanan. Terlihat dari variasi tanpa tulangan dan beton bertulang, kuat tekan *hammer* setelah pembebanan berada di bawah kuat tekan *hammer* sebelum pembebanan.



Grafik 4.4 Perbandingan rata-rata kuat tekan *hammer test*

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.15 Hasil pengujian UPV setelah pembebanan lentur

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai <i>Rebound</i> (Q)	Kecepatan (m/s)	Mutu (MPa)	Rata-rata Kecepatan (m/s)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	39.6	2793	18.7	2707	17.68
		2		2809	18.9		
		3		2519	15.4		
	B	1	41.5	2801	20.0	2830	20.35
		2		2825	20.3		
		3		2865	20.8		
	C	1	39.7	2793	18.8	2833	19.31
		2		2841	19.4		
		3		2865	19.7		
	D	1	38.6	2841	18.7	2833	18.62
		2		2825	18.5		
		3		2833	18.6		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	39.9	3425	27.6	3425	27.58
		2		3436	27.7		
		3		3413	27.4		
	B	1	39.9	3390	27.1	3398	27.17
		2		3425	27.6		
		3		3378	26.9		
	C	1	38.4	3425	26.3	3354	25.27
		2		3236	23.6		
		3		3401	25.9		
	D	1	38.6	3425	26.4	3440	26.64
		2		3448	26.8		
		3		3448	26.8		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.15 Lanjutan

Variasi	Benda Uji	Lokasi Pengujian	Nilai Rebound (Q)	Kecepatan (m/s)	Mutu (MPa)	Rata-rata Kecepatan (m/s)	Rata-rata Mutu (MPa)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	39.0	3215	23.8	3236	24.11
		2		3236	24.1		
		3		3257	24.4		
	B	1	39.2	3205	23.8	3205	23.83
		2		3215	24.0		
		3		3195	23.7		
	C	1	39.0	3195	23.5	3192	23.49
		2		3175	23.3		
		3		3205	23.7		
	D	1	39.4	3247	24.6	3229	24.31
		2		3205	24.0		
		3		3236	24.4		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	36.1	3067	19.8	3049	19.61
		2		2994	19.0		
		3		3086	20.0		
	B	1	39.2	2985	20.9	3003	21.12
		2		3030	21.5		
		3		2994	21.0		
	C	1	39.5	3003	21.4	3018	21.57
		2		3049	22.0		
		3		3003	21.4		
	D	1	38.8	2985	20.6	3000	20.83
		2		3040	21.3		
		3		2976	20.5		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	38.0	2915	19.2	2947	19.63
		2		2950	19.7		
		3		2976	20.0		
	B	1	37.4	2924	19.0	2907	18.77
		2		2933	19.1		
		3		2865	18.3		
	C	1	38.2	2950	19.8	2936	19.63
		2		2950	19.8		
		3		2907	19.3		
	D	1	38.8	2882	19.3	2896	19.51
		2		2890	19.4		
		3		2915	19.7		

(Sumber : hasil penelitian)

Jumlah data = 4 ; $G_1 \text{ kritis} = 1,463$; $G_2 \text{ kritis} = 2,43$; $G_3 \text{ kritis} = 0,9992$

Tabel 4.16 Perhitungan uji Grubbs kuat tekan UPV setelah pembebanan lentur

Variasi	Benda Uji	UPV Test Setelah Pembebanan (MPa)	Perhitungan Uji Grubbs UPV Setelah Pembebanan		Kesimpulan
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	17.68	S	1.13	Tidak Dibuang
	B	20.35	$\bar{X}$	18.99	
	C	19.31	X_i	17.68	
	D	18.62	G_1	1.16	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	27.58	S	1.01	Tidak Dibuang
	B	27.17	$\bar{X}$	26.67	
	C	25.27	X_i	25.27	
	D	26.64	G_1	1.39	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	24.11	S	0.36	Tidak Dibuang
	B	23.83	$\bar{X}$	23.93	
	C	23.49	X_i	23.49	
	D	24.31	G_1	1.25	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	19.61	S	0.84	Tidak Dibuang
	B	21.12	$\bar{X}$	20.78	
	C	21.57	X_i	19.61	
	D	20.83	G_1	1.40	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	19.63	S	0.41	Dibuang
	B	18.77	$\bar{X}$	19.38	
	C	19.63	X_i	18.77	
	D	19.51	G_1	1.49	

(Sumber : hasil penelitian)

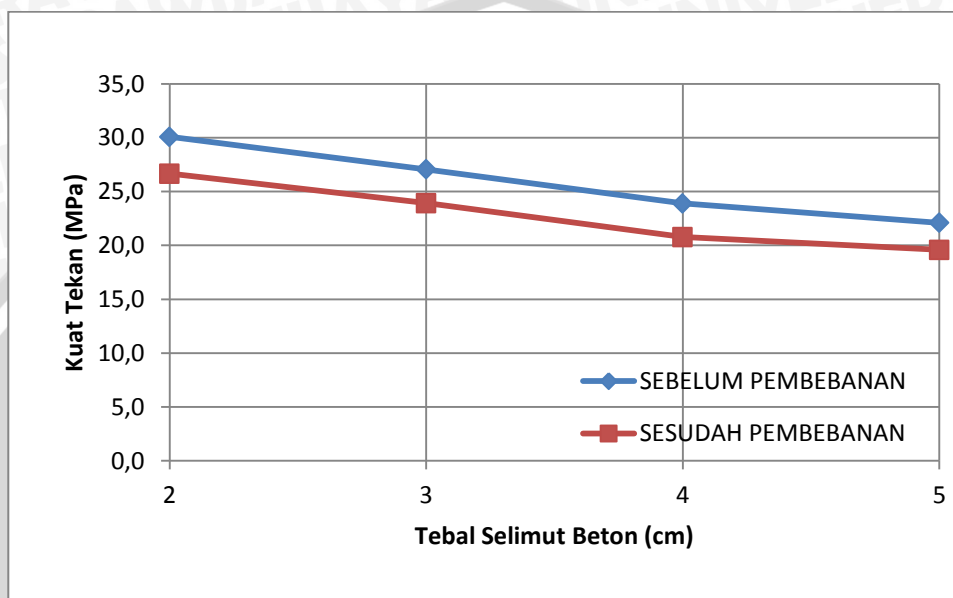
Dari tabel 4.16 diketahui bahwa ada data yang dibuang, yakni data kuat tekan variasi tebal selimut 5 cm benda uji B. Perhitungan rata-rata kuat tekan UPV setelah pembebanan pada tiap variasi dapat dilakukan dan selanjutnya dibandingkan dengan rata-rata kuat tekan UPV sebelum pembebanan, lihat tabel 4.17.

Tabel 4.17 Rata-rata kuat tekan UPV

Variasi	Benda Uji				Setelah Pembebanan (MPa)	Sebelum Pembebanan (MPa)
	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	D (MPa)		
Balok Beton Tanpa Tulangan	17.68	20.35	19.31	18.62	18.99	20.49
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	27.58	27.17	25.27	26.64	26.67	30.08
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	24.11	23.83	23.49	24.31	23.93	27.07
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	19.61	21.12	21.57	20.83	20.78	23.89
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	19.63	-	19.63	19.51	19.59	22.10

(Sumber : hasil penelitian)

Dari tabel 4.17 dapat dilihat bahwa kuat tekan rata-rata yang diperoleh dari pengujian UPV sebelum dan setelah pembebanan berbeda, semua variasi mengalami penurunan setelah pembebanan. Terlihat dari variasi tanpa tulangan dan beton bertulang, kuat tekan UPV setelah pembebanan berada di bawah kuat tekan UPV sebelum pembebanan.



Grafik 4.5 Perbandingan rata-rata kuat tekan UPV

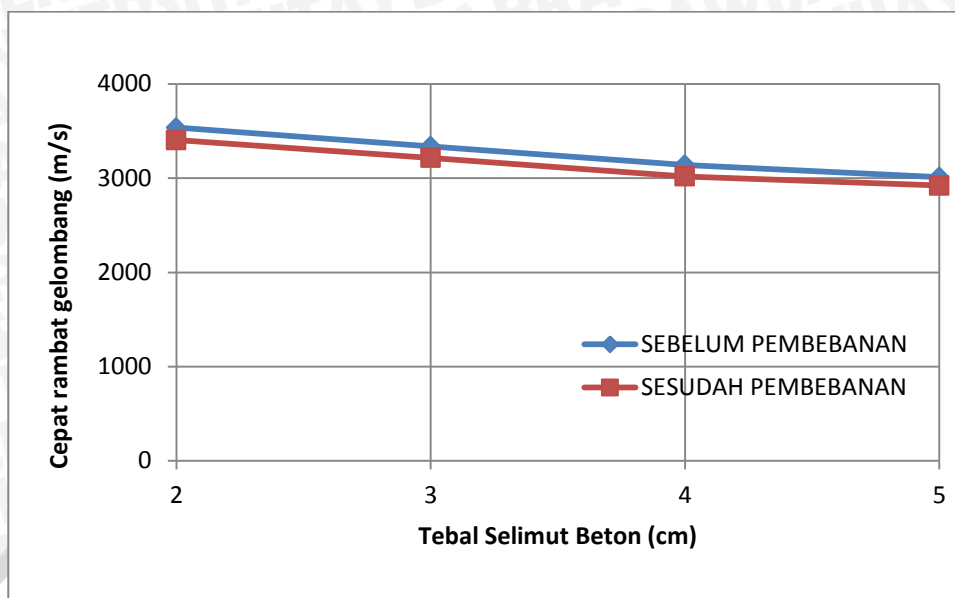
(Sumber : hasil penelitian)

Dari grafik 4.5 juga menunjukkan perbedaan kuat tekan UPV sebelum pembebanan dan sesudah pembebanan. Hal ini juga dapat dibuktikan pada kecepatan rambat gelombang *ultrasonic* sebelum pembebanan dan sesudah pembebanan, lihat tabel 4.18 dan grafik 4.6.

Tabel 4.18 Rata-rata cepat rambat gelombang *ultrasonic*

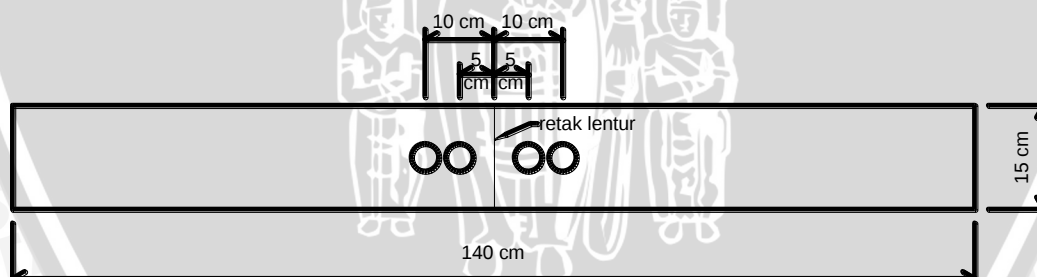
Rata-Rata Cepat Rambat Gelombang <i>Ultrasonic</i>	Tebal Selimut				
	0 (cm)	2 (cm)	3 (cm)	4 (cm)	5 (cm)
Sebelum Pembebanan	2862.0	3536.0	3337.8	3140.1	3011.4
Sesudah Pembebanan	2800.8	3404.2	3215.5	3017.7	2921.4

(Sumber : hasil penelitian)



Grafik 4.6 Perbandingan rata-rata cepat rambat gelombang *ultrasonic*
(Sumber : hasil penelitian)

Perbedaan hasil kuat tekan UPV setelah pembebanan dengan sebelum pembebanan dapat diakibatkan karena adanya retak pada benda uji. Retak ini terjadi akibat pembebanan lentur. Selain untuk mengukur kuat tekan, alat UPV juga dapat digunakan untuk menghitung kedalaman retak yang terjadi. Metode yang digunakan untuk perhitungan tersebut dapat ditunjukkan dengan gambar 4.4.



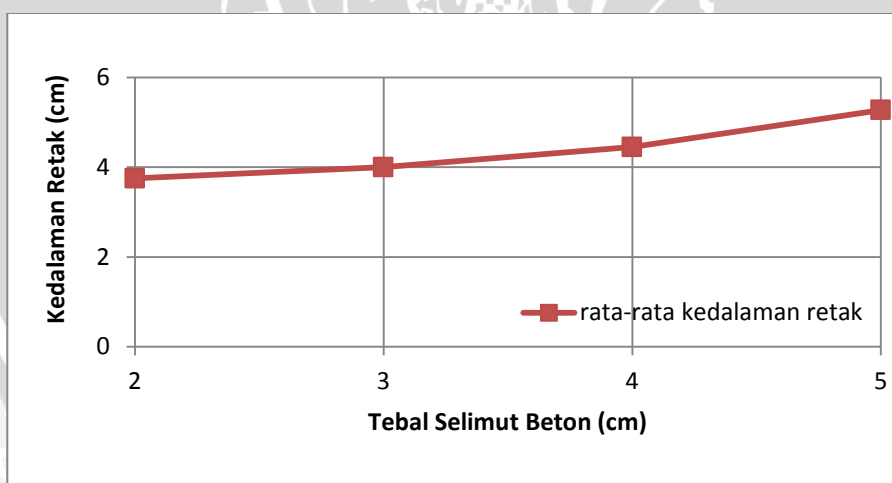
Gambar 4.4 Tampak atas posisi pengujian kedalaman retak

Pengambilan data dilakukan pada area lokasi yang sudah ditetapkan. Hasil pengukuran UPV berupa kedalaman retak yang terjadi, kemudian data tersebut dirata-rata. Hasil pengujian kedalaman retak dapat dilihat pada tabel 4.19.

Tabel 4.19 Kedalaman retak

Variasi	Benda Uji	Dept crack	
		Kedalaman retak (cm)	Rata-rata (cm)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	2.6	2.1
	B	2.4	
	C	1.7	
	D	1.7	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	4.0	3.8
	B	3.4	
	C	3.7	
	D	3.9	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	3.9	4.0
	B	3.7	
	C	4.0	
	D	4.4	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	3.8	4.5
	B	3.5	
	C	4.8	
	D	5.7	
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	6.8	5.3
	B	3.5	
	C	6.3	
	D	4.5	

(Sumber : hasil penelitian)



Grafik 4.7 Kedalaman retak

(Sumber : hasil penelitian)

Dari grafik 4.7 dapat dilihat bahwa kedalaman retak yang terjadi pada tiap variasi berbeda. Semakin tebal selimut beton semakin tinggi pula kedalaman retak yang terjadi akibat pembebanan dan mutu yang sama.

4.3 Pembahasan

4.3.1 Kesalahan relatif mutlak pengukuran kuat tekan *hammer*

Perbedaan hasil antara uji kuat tekan silinder dengan kuat tekan balok beton menggunakan *hammer* test pada tiap variasi tebal selimut beton menunjukkan adanya kesalahan relatif. Kesalahan relatif pada tiap variasi didapat dari rata-rata kesalahan relatif pada tiap benda pada masing-masing variasi tebal selimut beton. Prosentase kesalahan relatif (Kr) dihitung menggunakan persamaan (3-2).

$$KR = \left| \frac{(\text{Kuat Tekan Silinder} - \text{Kuat Tekan Hammer})}{\text{Kuat Tekan Silinder}} \times 100\% \right|$$

Perhitungan kesalahan relatif antara kuat tekan yang dihasilkan oleh uji *hammer* dibandingkan dengan kesalahan relatif antara kuat tekan yang dihasilkan oleh uji silinder disajikan dalam tabel 4.20.

Tabel 4.20 Kesalahan relatif kuat tekan *hammer* terhadap kuat tekan silinder

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kuat Tekan Hammer (MPa)	Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	19.55	21.00	7.41	4.17	7.32
		2		20.50	4.85		
		3		19.50	0.26		
	B	1	19.21	21.50	11.91	10.18	
		2		21.50	11.91		
		3		20.50	6.71		
	C	1	20.91	19.50	6.74	8.33	
		2		19.50	6.74		
		3		18.50	11.52		
	D	1	20.34	19.00	6.60	6.60	
		2		18.50	9.06		
		3		19.50	4.15		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	18.28	20.50	12.16	9.42	6.85
		2		20.00	9.42		
		3		19.50	6.69		
	B	1	19.16	21.00	9.63	7.02	
		2		21.00	9.63		
		3		19.50	1.80		
	C	1	20.94	20.00	4.48	8.46	
		2		19.00	9.25		
		3		18.50	11.64		
	D	1	19.47	19.50	0.17	2.51	
		2		19.00	2.40		
		3		18.50	4.96		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.20 Lanjutan

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kuat Tekan Hammer (MPa)	Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	19.24	20.50	6.55	3.01	2.83
		2		19.00	1.25		
		3		19.00	1.25		
	B	1	18.62	19.00	2.05	2.05	
		2		19.00	2.05		
		3		19.00	2.05		
	C	1	20.06	20.00	0.30	0.30	
		2		20.00	0.30		
		3		20.00	0.30		
	D	1	21.62	21.50	0.54	5.94	
		2		20.00	7.48		
		3		19.50	9.79		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	17.94	17.00	5.23	5.23	3.39
		2		17.00	5.23		
		3		17.00	5.23		
	B	1	19.01	19.00	0.07	0.07	
		2		19.00	0.07		
		3		19.00	0.07		
	C	1	20.40	22.50	10.29	5.39	
		2		21.50	5.39		
		3		20.50	0.49		
	D	1	19.81	20.00	0.98	2.85	
		2		21.00	6.03		
		3		19.50	1.54		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	18.99	19.00	0.08	0.90	3.00
		2		19.00	0.08		
		3		18.50	2.56		
	B	1	18.53	18.00	2.87	4.67	
		2		18.00	2.87		
		3		17.00	8.27		
	C	1	19.81	20.50	3.50	4.35	
		2		21.50	8.55		
		3		20.00	0.98		
	D	1	20.60	20.00	2.90	2.09	
		2		20.50	0.48		
		3		20.00	2.90		

(Sumber : hasil penelitian)

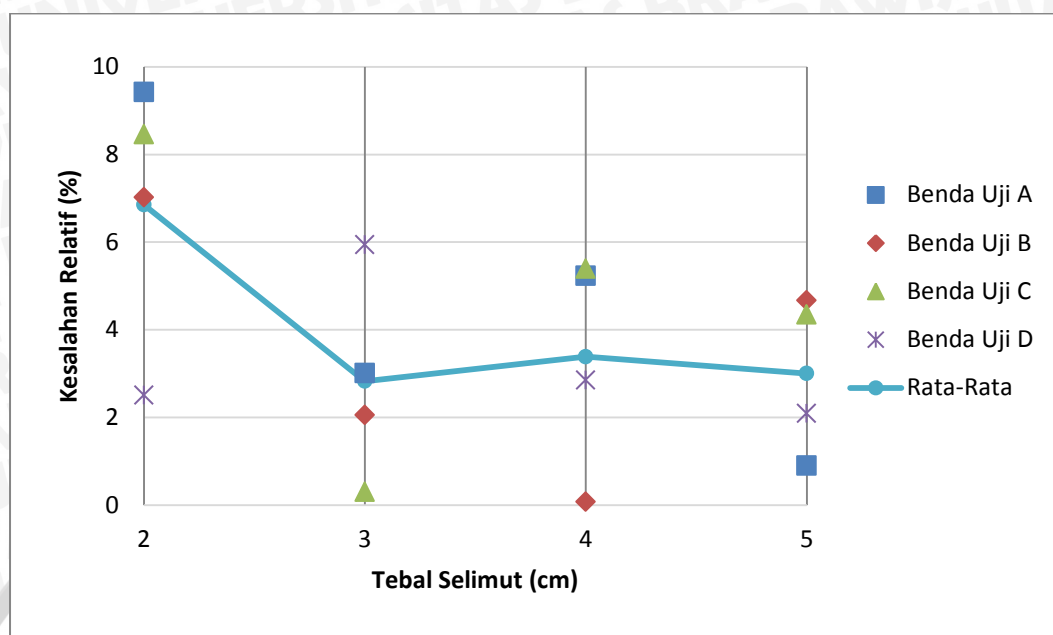
Contoh perhitungan :

Benda uji : Balok Beton Tanpa Tulangan (A/1)

Kuat tekan silinder : 19,55

Kuat tekan *hammer* : 21,00

Maka kesalahan relatifnya : $KR = \left| \frac{19,55 - 21,00}{19,55} \times 100\% \right| = 7,41\%$



Grafik 4.8 Rata-rata kesalahan relatif kuat tekan *hammer* terhadap kuat tekan silinder
(Sumber : hasil penelitian)

Pada grafik 4.8 menunjukkan kesalahan relatif kuat tekan *hammer* rata-rata pada tiap variasi tebal selimut berturut-turut pada balok beton bertulang dengan tebal selimut 2 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 3 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 4 cm dan balok beton bertulang dengan tebal selimut 5 cm adalah 6,85% ; 2,83% ; 3,39% dan 3,00%. Sedangkan pada variasi balok beton tanpa tulangan kesalahan relatifnya sebesar 7,32%.

4.3.2 Kesalahan relatif mutlak pengukuran kuat tekan UPV

Perbedaan hasil antara uji kuat tekan silinder dengan kuat tekan balok beton menggunakan UPV pada tiap variasi tebal selimut beton menunjukkan adanya kesalahan relatif. Kesalahan relatif pada tiap variasi didapat dari rata-rata kesalahan relatif pada tiap benda pada masing-masing variasi tebal selimut beton. Prosentase kesalahan relatif (Kr) dihitung menggunakan persamaan (3-2).

$$KR = \left| \frac{(\text{Kuat Tekan Silinder} - \text{Kuat Tekan UPV})}{\text{Kuat Tekan Silinder}} \times 100\% \right|$$

Perhitungan kesalahan relatif antara kuat tekan yang dihasilkan oleh uji UPV dibandingkan dengan kesalahan relatif antara kuat tekan yang dihasilkan oleh uji silinder disajikan dalam tabel 4.21.

Tabel 4.21 Kesalahan relatif kuat tekan UPV terhadap kuat tekan silinder

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kuat Tekan UPV (MPa)	Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	19.55	20.49	4.82	4.63	4.74
		2		20.49	4.82		
		3		20.39	4.27		
	B	1	19.21	21.01	9.37	9.58	
		2		21.13	10.01		
		3		21.01	9.37		
	C	1	20.91	19.86	5.04	3.50	
		2		20.60	1.49		
		3		20.08	3.99		
	D	1	20.34	20.38	0.17	1.25	
		2		20.59	1.20		
		3		19.86	2.37		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	18.28	30.17	65.06	67.62	55.05
		2		30.78	68.37		
		3		30.97	69.42		
	B	1	19.16	31.44	64.15	60.66	
		2		30.44	58.91		
		3		30.44	58.91		
	C	1	20.94	29.95	43.02	40.27	
		2		28.99	38.45		
		3		29.17	39.33		
	D	1	19.47	29.40	51.01	51.67	
		2		29.78	53.00		
		3		29.40	51.01		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	19.24	26.82	39.38	39.09	36.47
		2		26.82	39.38		
		3		26.65	38.53		
	B	1	18.62	27.05	45.27	43.50	
		2		26.72	43.52		
		3		26.38	41.71		
	C	1	20.06	26.93	34.24	36.20	
		2		27.61	37.63		
		3		27.43	36.73		
	D	1	21.62	27.53	27.36	27.10	
		2		27.20	25.81		
		3		27.70	28.14		

(Sumber : hasil penelitian)

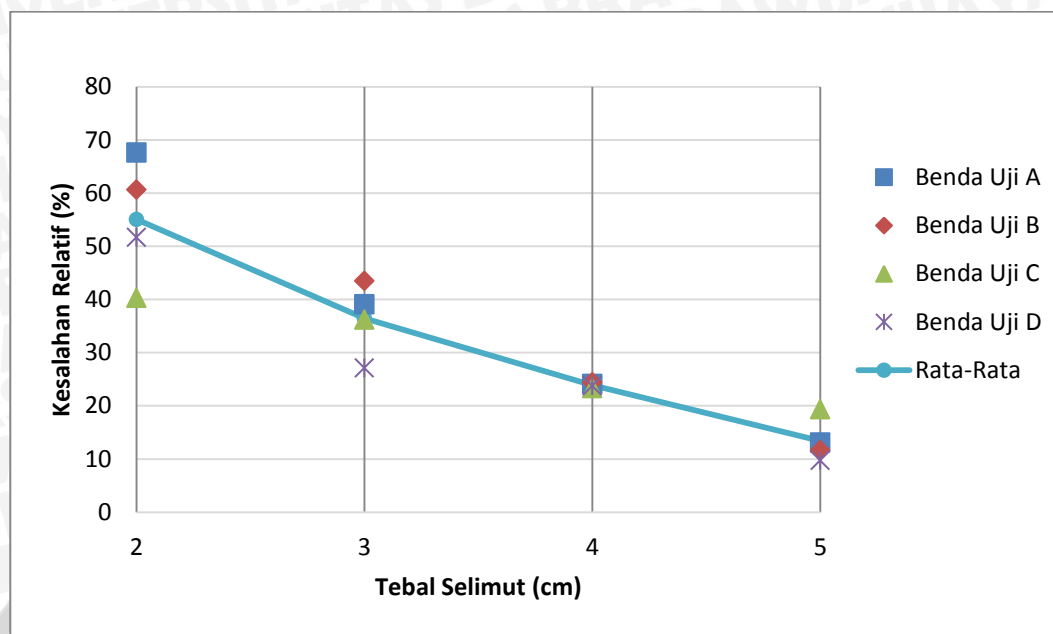
Tabel 4.21 Lanjutan

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan Silinder (MPa)	Kuat Tekan UPV (MPa)	Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	17.94	22.26	24.10	24.11	23.88
		2		22.52	25.56		
		3		22.00	22.66		
	B	1	19.01	23.56	23.89	24.38	
		2		23.98	26.10		
		3		23.42	23.16		
	C	1	20.40	25.29	23.99	23.28	
		2		25.14	23.26		
		3		25.01	22.60		
	D	1	19.81	24.32	22.78	23.75	
		2		24.90	25.70		
		3		24.32	22.78		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	18.99	21.51	13.30	13.09	13.44
		2		21.51	13.30		
		3		21.39	12.67		
	B	1	18.53	21.08	13.73	11.66	
		2		20.50	10.62		
		3		20.50	10.62		
	C	1	19.81	23.32	17.75	19.31	
		2		23.72	19.77		
		3		23.85	20.42		
	D	1	20.60	22.35	8.48	9.70	
		2		22.72	10.31		
		3		22.72	10.31		

(Sumber : hasil penelitian)

Pada tabel 4.21 menunjukkan kesalahan relatif kuat tekan UPV rata-rata pada tiap variasi tebal selimut berturut-turut pada balok beton bertulang dengan tebal selimut 2 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 3 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 4 cm dan balok beton bertulang dengan tebal selimut 5 cm adalah 55,05% ; 36,47% ; 23,88% dan 13,44%. Sedangkan pada variasi balok beton tanpa tulangan kesalahan relatifnya sebesar 4,74%.

Dari kesalahan relatif tersebut dapat dilihat bahwa semakin tebal selimut beton maka kesalahan dalam pembacaan kuat tekan dengan menggunakan alat UPV akan kecil dan semakin tipis tebal selimut betonnya maka kesalahan relatifnya akan semakin besar.



Grafik 4.9 Rata-rata kesalahan relatif kuat tekan UPV terhadap kuat tekan silinder
(Sumber : hasil penelitian)

4.3.3 Kesalahan relatif mutlak pengukuran kuat tekan NDT

Perbedaan hasil antara kuat tekan menggunakan NDT sebelum pembebanan dengan kuat tekan setelah pembebanan pada tiap variasi tebal selimut beton menunjukkan adanya kesalahan relatif. Kesalahan relatif pada tiap variasi didapat dari rata-rata kesalahan relatif pada tiap benda pada masing-masing variasi tebal selimut beton. Prosentase kesalahan relatif (K_r) dihitung dengan persamaan (3-2).

$$K_r = \left| \frac{(\text{Kuat Tekan Sebelum Pembebanan} - \text{Kuat Tekan Setelah Pembebanan})}{\text{Kuat Tekan Sebelum Pembebanan}} \times 100\% \right|$$

Perhitungan kesalahan relatif antara kuat tekan sebelum pembebanan dan setelah pembebanan yang dihasilkan oleh NDT disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 4.22 Kesalahan relatif kuat tekan *hammer*

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan <i>Hammer</i>		Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
			Sebelum Pembebanan (MPa)	Sesudah Pembebanan (MPa)			
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	21.00	18.50	11.90	8.89	5.58
		2	20.50	18.00	12.20		
		3	19.50	19.00	2.56		
	B	1	21.50	19.50	9.30	3.88	
		2	21.50	21.00	2.33		
		3	20.50	20.50	0.00		
	C	1	19.50	19.00	2.56	2.56	
		2	19.50	18.50	5.13		
		3	18.50	18.50	0.00		
	D	1	19.00	17.50	7.89	7.00	
		2	18.50	17.50	5.41		
		3	19.50	18.00	7.69		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	20.50	18.50	9.76	5.75	7.40
		2	20.00	18.50	7.50		
		3	19.50	19.50	0.00		
	B	1	21.00	19.00	9.52	8.12	
		2	21.00	19.50	7.14		
		3	19.50	18.00	7.69		
	C	1	20.00	18.50	7.50	8.69	
		2	19.00	16.50	13.16		
		3	18.50	17.50	5.41		
	D	1	19.50	18.00	7.69	7.04	
		2	19.00	18.50	2.63		
		3	18.50	16.50	10.81		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	20.50	18.00	12.20	7.57	7.92
		2	19.00	17.50	7.89		
		3	19.00	18.50	2.63		
	B	1	19.00	18.00	5.26	4.39	
		2	19.00	18.00	5.26		
		3	19.00	18.50	2.63		
	C	1	20.00	17.00	15.00	10.00	
		2	20.00	18.00	10.00		
		3	20.00	19.00	5.00		
	D	1	21.50	18.50	13.95	9.72	
		2	20.00	18.50	7.50		
		3	19.50	18.00	7.69		

(Sumber : hasil penelitian)

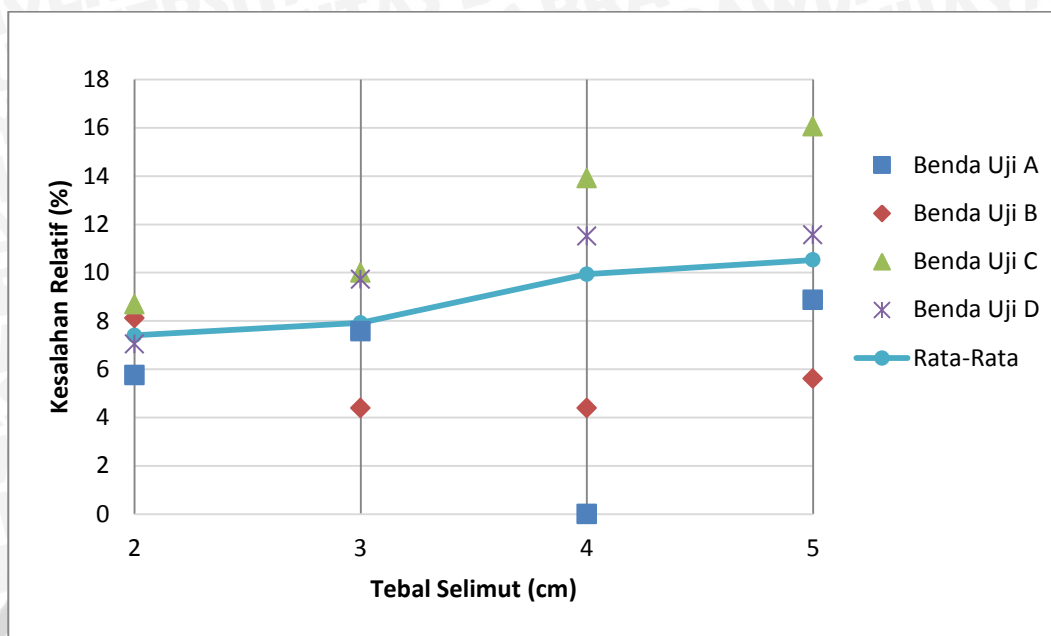
Tabel 4.22 Lanjutan

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan <i>Hammer</i>		Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
			Sebelum Pembebanan (MPa)	Sesudah Pembebanan (MPa)			
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	17.00	-	-	-	9.93
		2	17.00				
		3	17.00				
	B	1	19.00	18.50	2.63	4.39	
		2	19.00	17.50	7.89		
		3	19.00	18.50	2.63		
	C	1	22.50	18.50	17.78	13.90	
		2	21.50	19.50	9.30		
		3	20.50	17.50	14.63		
	D	1	20.00	18.00	10.00	11.51	
		2	21.00	18.00	14.29		
		3	19.50	17.50	10.26		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	19.00	17.00	10.53	8.87	10.53
		2	19.00	18.00	5.26		
		3	18.50	16.50	10.81		
	B	1	18.00	16.50	8.33	5.61	
		2	18.00	17.00	5.56		
		3	17.00	16.50	2.94		
	C	1	20.50	17.00	17.07	16.06	
		2	21.50	17.50	18.60		
		3	20.00	17.50	12.50		
	D	1	20.00	17.50	12.50	11.57	
		2	20.50	18.00	12.20		
		3	20.00	18.00	10.00		

(Sumber : hasil penelitian)

Pada tabel 4.22 menunjukkan kesalahan relatif kuat tekan *hammer* rata-rata pada tiap variasi tebal selimut berturut-turut pada balok beton bertulang dengan tebal selimut 2 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 3 cm, balok beton bertulang dengan tebal selimut 4 cm dan balok beton bertulang dengan tebal selimut 5 cm adalah 7,40% ; 7,92% ; 9,93% dan 10,53%. Sedangkan pada variasi balok beton tanpa tulangan kesalahan relatifnya sebesar 5,58%.

Kesalahan relatif rata-rata kuat tekan *hammer* setelah pembebanan dibandingkan dengan kuat tekan *hammer* sebelum pembebanan berkisar antara 5,58% - 10,53%.



Grafik 4.10 Rata-rata kesalahan relatif kuat tekan *hammer*

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.23 Kesalahan relatif kuat tekan UPV

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan UPV		Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
			Sebelum Pembebanan (MPa)	Sesudah Pembebanan (MPa)			
Balok Beton Tanpa Tulangan	A	1	20.49	18.69	8.78	13.61	7.35
		2	20.49	18.89	7.81		
		3	20.39	15.44	24.25		
	B	1	21.01	19.96	4.99	3.33	
		2	21.13	20.28	4.05		
		3	21.01	20.81	0.94		
	C	1	19.86	18.81	5.29	4.29	
		2	20.60	19.41	5.78		
		3	20.08	19.71	1.81		
	D	1	20.38	18.71	8.18	8.17	
		2	20.59	18.52	10.05		
		3	19.86	18.61	6.27		

(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.23 Lanjutan

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan UPV		Error	Error Benda Uji	Mean Error Variasi
			Sebelum Pembebanan	Sesudah Pembebanan			
			(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 2 cm	A	1	30.17	27.58	8.58	9.98	11.35
		2	30.78	27.75	9.84		
		3	30.97	27.40	11.51		
	B	1	31.44	27.06	13.94	11.68	
		2	30.44	27.58	9.40		
		3	30.44	26.88	11.69		
	C	1	29.95	26.26	12.32	13.97	
		2	28.99	23.64	18.45		
		3	29.17	25.92	11.15		
	D	1	29.40	26.42	10.11	9.76	
		2	29.78	26.75	10.17		
		3	29.40	26.75	8.99		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 3 cm	A	1	26.82	23.82	11.19	9.92	11.57
		2	26.82	24.10	10.11		
		3	26.65	24.40	8.47		
	B	1	27.05	23.83	11.90	10.81	
		2	26.72	23.97	10.31		
		3	26.38	23.69	10.21		
	C	1	26.93	23.53	12.62	14.03	
		2	27.61	23.26	15.76		
		3	27.43	23.67	13.71		
	D	1	27.53	24.56	10.80	11.52	
		2	27.20	23.97	11.85		
		3	27.70	24.40	11.90		
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 4 cm	A	1	22.26	19.82	10.97	11.89	12.96
		2	22.52	18.96	15.83		
		3	22.00	20.05	8.88		
	B	1	23.56	20.89	11.33	10.69	
		2	23.98	21.47	10.44		
		3	23.42	21.00	10.31		
	C	1	25.29	21.37	15.53	14.24	
		2	25.14	21.98	12.60		
		3	25.01	21.37	14.57		
	D	1	24.32	20.63	15.14	15.01	
		2	24.90	21.34	14.27		
		3	24.32	20.52	15.62		

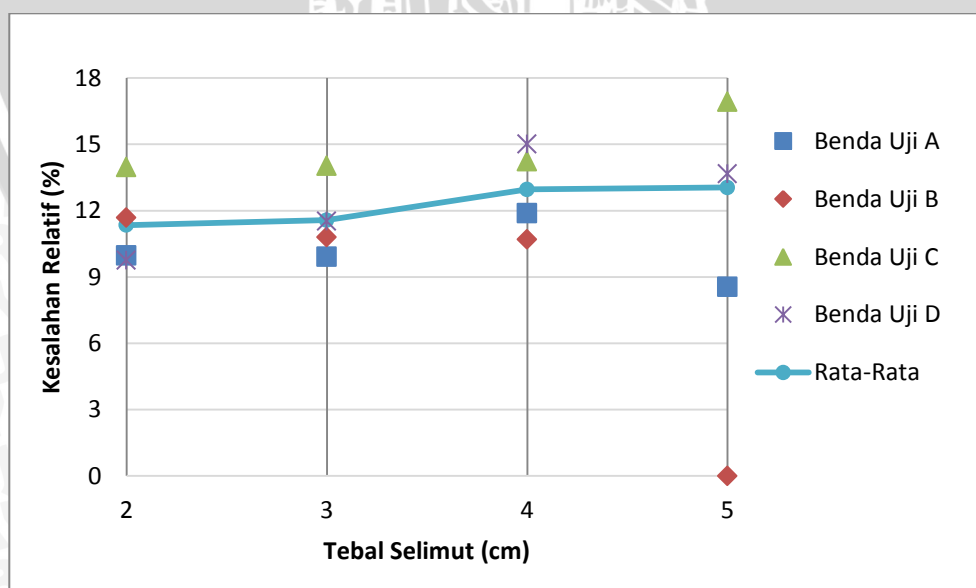
(Sumber : hasil penelitian)

Tabel 4.23 Lanjutan

Variasi	Benda Uji		Kuat Tekan UPV		Error (%)	Error Benda Uji (%)	Mean Error Variasi (%)
			Sebelum Pembebanan (MPa)	Sesudah Pembebanan (MPa)			
Balok Beton Bertulang dengan Tebal Selimut 5 cm	A	1	21.51	19.24	10.56	8.56	13.05
		2	21.51	19.67	8.56		
		3	21.39	19.99	6.55		
	B	1	21.08	-	-	-	
		2	20.50				
		3	20.50				
	C	1	23.32	19.81	15.08	16.92	
		2	23.72	19.81	16.51		
		3	23.85	19.27	19.19		
	D	1	22.35	19.34	13.47	13.67	
		2	22.72	19.44	14.46		
		3	22.72	19.75	13.09		

(Sumber : hasil penelitian)

Pada tabel 4.23 menunjukkan kesalahan relatif kuat tekan UPV rata-rata pada tiap variasi tebal selimut berturut-turut pada balok beton bertulang dengan tebal selimut 2 cm, tebal selimut 3 cm, tebal selimut 4 cm dan tebal selimut 5 cm adalah 11,35% ; 11,57% ; 12,96% dan 13,05%. Sedangkan pada variasi balok beton tanpa tulangan kesalahan relatifnya sebesar 7,35%. Kesalahan relatif rata-rata kuat tekan UPV setelah pembebanan dibandingkan dengan kuat tekan UPV sebelum pembebanan berkisar antara 7,35% - 13,05%.



Grafik 4.11 Rata-rata kesalahan relatif kuat tekan UPV

(Sumber : hasil penelitian)

4.4 Uji Hipotesis

4.4.1 Analisis statistik *hammer test*

Pengujian hipotesis dilakukan dengan analisis 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 :

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

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

Keterangan :

H_0 : Hipotesis nol, yang menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji *hammer* antar variasi tebal selimut beton

H_1 : Hipotesis alternatif, yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji *hammer* antar variasi tebal selimut beton

μ_i : Data nilai kesalahan relatif pengukuran kuat tekan beton dengan uji *hammer* tiap variasi selimut beton

Uji F satu arah dianalisa dengan membandingkan nilai F_{hitung} dengan 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, sedangkan F_{hitung} diperoleh dari *varian between mean* yang dibagi dengan *varian within group* dalam kelompok, mengikuti persamaan (3-3), (3-4) dan (3-5).

Tabel 4.24 Data analisis statistik uji *hammer* terhadap silinder

Tebal Selimut (cm)	Kesalahan Relatif (%)			
	Benda Uji			
	A	B	C	D
0	4.17	10.18	8.33	6.60
2	9.42	7.02	8.46	2.51
3	3.01	2.05	0.30	5.94
4	5.23	0.07	5.39	2.85
5	0.90	4.67	4.35	2.09

(Sumber : hasil penelitian)

Dengan : $n = 4$ $K = 5$ $\alpha = 0,05$

$$V_1 = K-1 = 5-1 = 4$$

$$V_2 = K(n-1) = 5(4-1) = 15$$

diperoleh nilai F tabel (4:15) = 3,06

F hitung :

a. *Varian between mean*

$n \backslash K$	1	2	3	4	5
1	0.042	0.094	0.030	0.052	0.009
2	0.102	0.070	0.021	0.001	0.047
3	0.083	0.085	0.003	0.054	0.043
4	0.066	0.025	0.059	0.029	0.021
$\sum X_i$	0.293	0.274	0.113	0.135	0.120
$X_j = \sum X_i / n_j$	0.071	0.067	0.028	0.033	0.029
$\sum X_j$	0.228				
$\bar{X}$	0.046				
$x_j - \bar{X}$	0.026	0.021	-0.018	-0.013	-0.016
$\sum x_j - \bar{X}$	0.000				
$(x_j - \bar{X})^2$	0.00067	0.00045	0.00033	0.00016	0.00027
$\sum (x_j - \bar{X})^2$	0.00187				

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1} = \frac{4 \cdot 0,00187}{5 - 1} = 0,0019$$

b. *Varian within group*

n	$(X_{ij} - X_j)^2$					Jumlah
1	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
2	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002
3	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002
4	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.003
$\sum (X_{ij} - X_j)^2$						0.009

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n - 1)} = \frac{0,009}{5 \cdot (4 - 1)} = 0,00062$$

Maka :

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}} = \frac{0,0019}{0,00062} = 3,007$$

Dari hasil perhitungan diperoleh $F_{\text{tabel}} = 3,06$ dan $F_{\text{hitung}} = 3,007$, maka $F_{\text{hitung}} < F_{\text{tabel}}$ sehingga H_0 diterima yang artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji *hammer* antar variasi tebal selimut beton terhadap uji silinder. Hasil di atas menunjukkan bahwa kuat tekan *hammer* test sebelum dibebani identik dengan kuat tekan silinder.

4.4.2 Analisis statistik uji UPV

Pengujian hipotesis dilakukan dengan analisis 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 :

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

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

Keterangan :

H_0 : Hipotesis nol, yang menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji UPV antar variasi tebal selimut beton

H_1 : Hipotesis alternatif, yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji UPV antar variasi tebal selimut beton

μ_i : Data nilai kesalahan relatif pengukuran kuat tekan beton dengan uji UPV tiap variasi selimut beton

Uji F satu arah dianalisa dengan membandingkan nilai F_{hitung} dengan 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, sedangkan F_{hitung} diperoleh dari *varian between mean* yang dibagi dengan *varian within group* dalam kelompok, mengikuti persamaan (3-3), (3-4) dan (3-5).

Tabel 4.25 Data analisis statistik uji UPV terhadap silinder

Tebal Selimut (cm)	Kesalahan Relatif (%)			
	Benda Uji			
	A	B	C	D
0	4.63	9.58	3.50	1.25
2	67.62	60.66	40.27	51.67
3	39.09	43.50	36.20	27.10
4	24.11	24.38	23.28	23.75
5	13.09	11.66	19.31	9.70

(Sumber : hasil penelitian)

Dengan : $n = 4$

$K = 5$

$\alpha = 0,05$

$V_1 = K-1 = 5-1 = 4$

$V_2 = K(n-1) = 5(4-1) = 15$

diperoleh nilai F tabel (4:15) = 3,06

F hitung :

a. *Varian between mean*

n \ K	1	2	3	4	5
1	0.046	0.676	0.391	0.241	0.131
2	0.096	0.607	0.435	0.244	0.117
3	0.035	0.403	0.362	0.233	0.193
4	0.012	0.517	0.271	0.238	0.097
$\sum X_i$	0.190	2.202	1.459	0.955	0.538
$X_j = \sum X_i / n_j$	0.047	0.551	0.365	0.239	0.134
$\sum X_j$	1.336				
$\bar{X}$	0.267				
$x_j - \bar{X}$	-0.220	0.283	0.098	-0.028	-0.133
$\sum x_j - \bar{X}$	0.000				
$(x_j - \bar{X})^2$	0.04830	0.08030	0.00952	0.00080	0.01763
$\sum (x_j - \bar{X})^2$	0.15655				

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1} = \frac{4 \cdot 0,15655}{5 - 1} = 0,1566$$

b. *Varian within group*

N	$(X_{ij} - X_j)^2$					Jumlah
1	0.000	0.016	0.001	0.000	0.000	0.016
2	0.002	0.003	0.005	0.000	0.000	0.011
3	0.000	0.022	0.000	0.000	0.003	0.026
4	0.001	0.001	0.009	0.000	0.001	0.013
$\sum (X_{ij} - X_j)^2$						0.065

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n - 1)} = \frac{0,065}{5 \cdot (4 - 1)} = 0,00435$$

Maka :

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}} = \frac{0,1566}{0,00435} = 35,949$$

Dari hasil perhitungan diperoleh $F_{\text{tabel}} = 3,06$ dan $F_{\text{hitung}} = 35,949$, maka $F_{\text{hitung}} > F_{\text{tabel}}$ sehingga H_0 ditolak atau H_1 diterima yang artinya terdapat perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji UPV antar variasi tebal selimut beton terhadap uji silinder. Hasil di atas menunjukkan bahwa kuat tekan UPV sebelum dibebani terdapat perbedaan dengan kuat tekan silinder (tidak identik) akibat pengatuh besi tulangan dan tebal selimut beton.

4.4.3 Analisis statistik uji NDT

Pengujian hipotesis dilakukan dengan analisis 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 :

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

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

Keterangan :

H_0 : Hipotesis nol, yang menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji NDT sebelum pembebanan dengan setelah pembebanan antar variasi tebal selimut beton

H_1 : Hipotesis alternatif, yang menyatakan bahwa terdapat perbedaan kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji NDT sebelum pembebanan dengan setelah pembebanan antar variasi tebal selimut beton

μ_i : Data nilai kesalahan relatif pengukuran kuat tekan beton dengan uji NDT tiap variasi selimut beton

Uji F satu arah dianalisa dengan membandingkan nilai F_{hitung} dengan 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, sedangkan F_{hitung} diperoleh dari *varian between mean* yang dibagi dengan *varian within group* dalam kelompok, mengikuti persamaan (3-3), (3-4) dan (3-5).

Tabel 4.26 Data analisis statistik uji *hammer*

Tebal Selimut (cm)	Kesalahan Relatif (%)			
	Benda Uji			
	A	B	C	D
0	8.89	3.88	2.56	7.00
2	5.75	8.12	8.69	7.04
3	7.57	4.39	10.00	9.72
4	0.00	4.39	13.90	11.51
5	8.87	5.61	16.06	11.57

(Sumber : hasil penelitian)

Dengan : $n = 4$ $K = 5$ $\alpha = 0,05$
 $V_1 = K-1 = 5-1 = 4$ $V_2 = K(n-1) = 5(4-1) = 15$
 diperoleh nilai F tabel $(4:15) = 3,06$

F hitung :

a. *Varian between mean*

$n \backslash K$	1	2	3	4	5
1	0.089	0.058	0.076	0.000	0.089
2	0.039	0.081	0.044	0.044	0.056
3	0.026	0.087	0.100	0.139	0.161
4	0.070	0.070	0.097	0.115	0.116
$\sum X_i$	0.223	0.296	0.317	0.298	0.421
$X_j = \sum X_i / n_j$	0.056	0.074	0.079	0.099	0.105
$\sum X_j$	0.414				
$\bar{X}$	0.083				
$X_j - \bar{X}$	-0.027	-0.009	-0.004	0.017	0.023
$\sum X_j - \bar{X}$	0.000				
$(X_j - \bar{X})^2$	0.00072	0.00008	0.00001	0.00028	0.00051
$\sum (X_j - \bar{X})^2$	0.00160				

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1} = \frac{4 \cdot 0,00160}{5 - 1} = 0,0016$$

b. *Varian within group*

n	$(X_{ij} - X_j)^2$					Jumlah
1	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002
2	0.000	0.000	0.001	0.003	0.002	0.007
3	0.001	0.000	0.000	0.002	0.003	0.006
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
$\sum (X_{ij} - X_j)^2$						0.016

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n - 1)} = \frac{0,016}{5 \cdot (4 - 1)} = 0,00105$$

Maka :

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}} = \frac{0,0016}{0,00105} = 1,518$$

Dari hasil perhitungan diperoleh $F_{\text{tabel}} = 3,06$ dan $F_{\text{hitung}} = 1,518$, maka $F_{\text{hitung}} < F_{\text{tabel}}$ sehingga H_0 diterima yang artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan

uji *hammer* sebelum pembebanan dengan setelah pembebanan antar variasi tebal selimut beton.

Tabel 4.27 Data analisis statistik uji UPV

Tebal Selimut (cm)	Kesalahan Relatif (%)			
	Benda Uji			
	A	B	C	D
0	13.61	3.33	4.29	8.17
2	9.98	11.68	13.97	9.76
3	9.92	10.81	14.03	11.52
4	11.89	10.69	14.24	15.01
5	8.56	0.00	16.92	13.67

(Sumber : hasil penelitian)

Dengan : $n = 4$ $K = 5$ $\alpha = 0,05$

$V_1 = K-1 = 5-1 = 4$ $V_2 = K(n-1) = 5(4-1) = 15$

diperoleh nilai F tabel (4:15) = 3,06

F hitung :

a. *Varian between mean*

$n \backslash K$	1	2	3	4	5
1	0.136	0.100	0.099	0.119	0.086
2	0.033	0.117	0.108	0.107	0.000
3	0.043	0.140	0.140	0.142	0.169
4	0.082	0.098	0.115	0.150	0.137
$\sum X_i$	0.294	0.454	0.463	0.518	0.392
$X_j = \sum X_i / n_j$	0.073	0.113	0.116	0.130	0.131
$\sum X_j$	0.563				
$\bar{X}$	0.113				
$X_j - \bar{X}$	-0.039	0.001	0.003	0.017	0.018
$\sum X_j - \bar{X}$	0.000				
$(X_j - \bar{X})^2$	0.00152	0.00000	0.00001	0.00029	0.00032
$\sum (X_j - \bar{X})^2$	0.00215				

$$\text{varian between mean} = \frac{n \sum_{j=1}^K (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{K - 1} = \frac{4 \cdot 0,00215}{5 - 1} = 0,00215$$

b. *Varian within group*

n	$(X_{ij}-X_j)^2$					Jumlah
1	0.004	0.000	0.000	0.000	0.002	0.007
2	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002
3	0.001	0.001	0.001	0.000	0.002	0.004
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
$\Sigma(X_{ij}-X_j)^2$						0.013

$$\text{varian within group} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K (x_{ij} - \bar{x})^2}{K(n-1)} = \frac{0,013}{5 \cdot (4-1)} = 0,00089$$

Maka :

$$F_{\text{hitung}} = \frac{\text{varian between mean}}{\text{varian within group}} = \frac{0,00215}{0,00089} = 2,407$$

Dari hasil perhitungan diperoleh $F_{\text{tabel}} = 3,06$ dan $F_{\text{hitung}} = 2,407$, maka $F_{\text{hitung}} < F_{\text{tabel}}$ sehingga H_0 diterima yang artinya tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton menggunakan uji UPV sebelum pembebanan dengan setelah pembebanan antar variasi tebal selimut beton.

Berdasarkan analisis statistik NDT menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada kesalahan relatif hasil pengukuran kuat tekan beton sebelum pembebanan dengan setelah pembebanan. Akan tetapi hasil yang terlihat pada grafik 4.4 dan grafik 4.5 hasil pengukuran kuat tekan dengan NDT mengalami penurunan yang relatif sama.