

**PENYELIDIKAN VALIDITAS *ULTRASONIC PULSE VELOCITY*
DALAM MENCITRAKAN KERETAKAN MIRING PADA BETON
NORMAL DENGAN VARIASI SUDUT KEMIRINGAN RETAK**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**CANDRA ADI NUGROHO
NIM. 175060107111028**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2021



LEMBAR PENGESAHAN**PENYELIDIKAN VALIDITAS *ULTRASONIC PULSE VELOCITY*
DALAM MENCITRAKAN KERETAKAN MIRING PADA BETON
NORMAL DENGAN VARIASI SUDUT KEMIRINGAN RETAK****SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

**CANDRA ADI NUGROHO****NIM. 175060107111028**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 9 Agustus 2021

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)
NIP. 19810220 200604 1 002

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.
NIP. 201102 840705 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1



Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI**JUDUL SKRIPSI:**

Penyelidikan Validitas *Ultrasonic Pulse Velocity* dalam Mencitrakan Keretakan Miring pada Beton Normal dengan Variasi Sudut Kemiringan Retak

Nama Mahasiswa : Candra Adi Nugroho

NIM : 175060107111028

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Christin Remayanti Nainggolan, ST., MT.,

Dosen Penguji II : Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko., ST., M.Eng(Prac.)

Dosen Penguji III : Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.

Tanggal Ujian : 28 Juli 2021

SK Penguji : 1298/UN10.F07/PP/2021

PERNYATAAN ORISINILITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam Naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 18 Agustus 2021

Candra Adi Nugroho

175060107111028

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....i

DAFTAR ISI.....iii

DAFTAR GAMBAR.....vii

DAFTAR TABEL.....ix

DAFTAR LAMPIRAN.....xi

RINGKASAN.....xiii

SUMMARY.....xv

BAB 1 PENDAHULUAN.....1

 1.1 Latar Belakang1

 1.2 Identifikasi Masalah3

 1.3 Rumusan Masalah3

 1.4 Batasan Masalah.....3

 1.5 Tujuan4

 1.6 Manfaat4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....5

 2.1 Beton.....5

 2.1.1 Semen.....5

 2.1.2 Agregat Kasar6

 2.1.3 Agregat Halus6

 2.1.4 Air7

 2.1.5 Bahan Tambah7

 2.1.6 Sifat-Sifat Beton8

 2.2 Perawatan Beton (*Curing*).....10

 2.3 Evaluasi Kuat Tekan Beton11

 2.4 Pola Retak Pada Beton11

 2.5 Retak Miring.....13

 2.6 NDT (*Non-Destructive Test*)15



2.7	<i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	16
2.7.2	Komponen utama pada pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	16
2.7.3	Metode Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	18
2.8	Gelombang	20
2.8.1	Jenis-jenis Gelombang	20
2.8.2	Perambatan Gelombang UPV terhadap Beton	22
2.8.3	Korelasi Retak Miring pada Beton dengan UPV	23
2.9	Analisa Statistik	26
2.9.1	Analisa Deskriptif	26
2.9.2	Uji Anova Satu Jalur (<i>One Wat Anova</i>)	26
2.10	Penelitian Terdahulu	26
BAB III METODE PENELITIAN		29
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	29
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	29
3.2.1	Alat Penelitian	29
3.2.2	Bahan Penelitian	30
3.3	Variabel Penelitian	30
3.4	Analisis Bahan	30
3.4.1	Agregat Halus	30
3.4.2	Agregat Kasar	31
3.4.3	Semen	31
3.4.4	Air	31
3.5	Tahap Penelitian	32
3.6	Rancangan Penelitian	33
3.7	Prosedur Penelitian	34
3.7.1	Pengujian Material Penyusun Beton	35
3.7.2	Pengujian Keleccakan Beton	35

3.7.3 Pembuatan Benda Uji	35
3.7.4 Perawatan Benda Uji	35
3.7.5 Pengujian Kuat Tekan Beton	36
3.7.6 Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)	36
3.8 Metode Pengumpulan Data	38
3.9 Pengolahan Data	39
3.10 Hipotesis	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Pembuatan Benda Uji	41
4.1.1 Perencanaan Campuran Benda Uji	41
4.1.2 Proses Pembuatan Benda Uji	41
4.1.3 Proses Curing beton	42
4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	43
4.2.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 90°	45
4.2.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 60°	47
4.2.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 45°	48
4.3 Hasil Pengujian UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)	51
4.4 Analisis Statistik	58
4.4.1 Uji Normalitas	59
4.4.2 Rata-Rata Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring	59
4.4.3 Uji Homogenitas	60
4.4.4 Uji ANOVA (Analysis of Variance)	61
4.4.5 Uji Post-Hoc Metode Tukey	61
4.5 Analisa Waktu Gelombang Terhadap Kemiringan Retak	62
4.5.1 Hasil Waktu Tempuh Gelombang tiap Variasi Kemiringan Retak	63
4.5.1.1 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90	63
4.5.1.2 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60	65

4.5.1.3 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45..... 66

4.5.2 Perbandingan Hasil Waktu Tempuh Gelombang..... 68

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....75

5.1 Kesimpulan..... 75

5.2 Saran..... 76

DAFTAR PUSTAKA.....77

LAMPIRAN.....79



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pola retak pada beton 12

Gambar 2. 2 Distribusi gaya geser pada beton 13

Gambar 2. 3 Jenis Keruntuhan geser pada balok pendek 14

Gambar 2. 4 Keruntuhan tarik diagonal pada balok bentang sedang 14

Gambar 2. 5 *Magnetic Particle Testing* 15

Gambar 2. 6 Komponen pada pengujian UPV 17

Gambar 2. 7 Metode pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* 18

Gambar 2. 8 Alur Pengujian UPV 19

Gambar 2. 9 Gelombang transversal 21

Gambar 2. 10 Gelombang Longitudinal 21

Gambar 2. 11 Gelombang *Rayleigh* 22

Gambar 2. 12 Gelombang *love* 22

Gambar 2. 13 Pergerakan Gelombang berdasarkan kondisi beton 23

Gambar 2.14 Pengukuran kedalaman retak 24

Gambar 2. 15 Kemungkinan pembacaan UPV pada retak miring 25

Gambar 3.1 Flowchart Penelitian 31

Gambar 3.2 Dimensi benda uji RL. (a) Tampak perspektif (b) tampak samping 32

Gambar 3.3 Dimensi benda uji RM 45 (a) tampak perspektif (b) tampak samping 33

Gambar 3.4 Dimensi benda uji RM 60 (a) tampak perspektif (b) tampak samping 33

Gambar 3.5 Dimensi benda uji silinder 33

Gambar 3.6 Susunan transducer 36

Gambar 3.7 Pengujian UPV *Indirect Method* 37

Gambar 3.8 Data Hasil pengujian UPV pada *PUNDIT PL-200* 37

Gambar 3. 9 Waveform pada uji kedalaman retak menggunakan UPV 38

Gambar 4.1 Pembuatan benda uji. (a) Persiapan uji, (b) Pengujian nilai *slump* (c) Penuangan serta pemadatan beton dalam bekisting 41

Gambar 4. 2 Proses *Curing* beton. (a) *Curing* pada benda uji balok, (b) *Curing* pada beton silinder 42

Gambar 4. 3 Pengujian kuat tekan beton dengan *compressive test* 42

Gambar 4. 4 Pengujian kuat tekan beton dengan *hammer test* 43

Gambar 4. 5 Hasil Pengujian *Compressive* RM90 44

Gambar 4. 6 Hasil Pengujian <i>Hammer</i> RM90	45
Gambar 4. 7 Hasil Pengujian <i>Compressive</i> RM60.....	46
Gambar 4. 8 Hasil Pengujian <i>Hammer</i> RM60	47
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian <i>Compressive</i> RM45.....	48
Gambar 4. 10 Hasil Pengujian <i>Hammer</i> RM45	49
Gambar 4.11 Boxplot Hasil Pengujian Kuat Tekan	50
Gambar 4.12 Pengujian UPV <i>Crack Depth Methode</i>	50
Gambar 4.13 Tampilan PUNDIT PL-200 <i>Crack Depth Methode</i>	51
Gambar 4.14 Skema Perletakkan <i>Transducer</i> (Tampak Samping).....	51
Gambar 4.15 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 90° dengan Retak Aktual.....	54
Gambar 4.16 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 60° dengan Retak Aktual.....	54
Gambar 4.17 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 45° dengan Retak Aktual.....	55
Gambar 4.18 Boxplot Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring.....	57
Gambar 4.19 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90.....	63
Gambar 4.20 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60.....	64
Gambar 4. 21 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45.....	66
Gambar 4. 22 Boxplot distribusi t1	67
Gambar 4. 23 Boxplot distribusi t2	68
Gambar 4.24 Grafik Hasil t1/t2 pada Benda Uji RM90.....	70
Gambar 4. 25 Grafik Hasil t1/t2 pada Benda Uji RM60.....	70
Gambar 4. 26 Grafik Hasil t1/t2 pada Benda Uji RM90.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Beton berdasarkan kuat tekannya..... 9

Tabel 2. 2 Berat jenis beton..... 9

Tabel 2. 3 Hubungan kecepatan gelombang dengan kualitas beton..... 20

Tabel 2. 4 Penelitian terdahulu..... 26

Tabel 3.1 Rancangan Benda Uji..... 32

Tabel 3.2 Hasil Pengukuran Kedalaman Retak dengan UPV..... 38

Tabel 4. 1 Kebutuhan Material Benda Uji..... 40

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*..... 44

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*..... 45

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*..... 46

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*..... 47

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*..... 48

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*..... 48

Tabel 4.8 Jarak perletakan transducer dengan garis retak..... 51

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Kedalaman Retak Miring dengan UPV 53

Tabel 4. 10 Nilai Kesalahan Relatif Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 55

Tabel 4. 11 Uji Normalitas metode *Shapiro-Wilk* 58

Tabel 4. 12 Deskriptif data pembacaan kedalaman retak miring 58

Tabel 4. 13 Uji Homogenitas dengan metode *Levene Statistic* 59

Tabel 4. 14 Hasil Uji *ANOVA*..... 60

Tabel 4. 15 Multiple Comparison metode *Tukey HSD* 60

Tabel 4. 16 Homogeneous Subset 61

Tabel 4. 17 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90..... 62

Tabel 4. 18 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60..... 64

Tabel 4. 19 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45..... 65

Tabel 4. 20 Rekapitulasi nilai $t1/t2$ 70

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Pembuatan Benda Uji 75
Lampiran 2. Pengujian Kuat Tekan 77
Lampiran 3. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (upv) 77
Lampiran 4. Hasil Pengujian Pada PROCEQ 78



RINGKASAN

Candra Adi Nugroho, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Penyelidikan Validitas Ultrasonic Pulse Velocity dalam Mencitrakan Keretakan Miring pada Beton Normal dengan Variasi Sudut Kemiringan Retak*, Dosen Pembimbing: Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko., ST., M.Eng(Prac.) dan Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.

Semakin meningkatnya kebutuhan akan pembangunan konstruksi di Indonesia berbanding lurus dengan angka meningkatnya kebutuhan material konstruksi salah satunya beton. Beton yang memiliki segudang keunggulan dan digemari oleh para pengguna jasa konstruksi ternyata memiliki beberapa kelemahan salah satunya sifat minimnya kuat tarik yang dimiliki beton. Sehingga dapat mengakibatkan munculnya retakan sebagai penanda bahwa tegangan tarik yang terjadi telah mencapai batas maksimum. Apabila retak telah berada pada fisik beton maka diperlukan penanganan yang cepat dan intensif, namun bentuk, pola, maupun kedalaman retak pada beton tidak dapat diprediksi hanya dengan melihatnya secara superfisial. Sehingga diperlukan pemeriksaan dengan cara *Non Destructive Test* untuk mendeteksi adanya retak pada beton salah satunya *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV).

Dengan memanfaatkan pancaran gelombang antar kedua transducer maka dengan mengetahui jarak transducer dan juga waktu tempuh gelombang secara otomatis kedalaman retak akan dapat diprediksi. Penelitian ini memanfaatkan beton normal 28 hari berupa balok tanpa tulangan berukuran 0,2 x 0,2 x 0,7 m yang diberi retak buatan pada bagian tengahnya dengan variasi sudut kemiringannya yaitu 90°, 60°, dan 45°. Retak tersebut memiliki kedalaman vertikal yang sama sebesar 0,8 m sebagai pengunci agar pembahasan tidak meluas. Metode *Indirect* digunakan dalam pengujian ini dengan jarak 10 cm dari garis retak. Dengan menggunakan *PUNDIT PL-200* yang mengikuti kaidah *BS 1881* dalam metode kedalaman retak maka hasil yang dikeluarkan berupa waktu tempuh gelombang dan juga hasil estimasi kedalaman retak.

Hasil penelitian ini setelah melewati proses analisa menunjukkan bahwa UPV tidak dapat mencitrakan secara utuh terkait retak bersudut atau miring. Hal tersebut dapat dilihat dari hasil rata-rata kesalahan relatif pada benda uji retak 45° sebesar 61%, pada benda uji retak 60° didapatkan sebesar 14% sedangkan pada benda uji 90° sebesar 5%. Selain itu dari hasil analisa statistik didapatkan rata-rata hasil pembacaan kedalaman retak yang berbeda secara signifikan antar kelompok. Rata-rata hasil pembacaan kedalaman retak benda uji retak 45° sebesar 0,1818 m, benda uji retak 60° sebesar 0,1094 m, sedangkan pada benda uji retak 90° sebesar 0,0808 m. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin landai kemiringan retak yang ada akan semakin tidak akurat pembacaan kedalaman retak pada UPV.

Kata kunci: *Ultrasonic Pulse Velocity*, Pengujian kedalaman retak, Retak miring pada beton.

SUMMARY

Candra Adi Nugroho, *Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Brawijaya University (2021). Investigating the Validity of Ultrasonic Pulse Velocity for Imaging Inclination Cracks in Normal Concrete with Variations in Crack Inclination Angle.* Supervisor: **Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko., ST., M.Eng(Prac.) and Dr. Eng. Ir. Ming Narto W., ST., MT., M.Sc.**

The increasing need for construction development in Indonesia is directly proportional to the increasing demand for construction materials, one of which is concrete. Concrete which has many advantages and is favored by construction service users turns out to have several weaknesses, one of which is the lack of tensile strength of concrete. So that it can cause the appearance of cracks as a marker that the tensile stress that occurs has reached the maximum limit. If the crack is already in the physical concrete, fast and intensive treatment is needed, but the shape, pattern, and depth of the crack in concrete cannot be predicted just by looking at it superficially. So it is necessary to check the Non-destructive Test to detect cracks in the concrete, one of which is Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).

By utilizing the wave beam between the two transducers, the after knowing the distance of the transducer and also the travel time of the waves will automatically predict the depth of the crack. This research utilizes 28 days normal concrete in the form of an unreinforced beam with sized 0.2 x 0.2 x 0.7 m which is given an artificial crack in the middle with variations in the angle of inclination, namely 90°, 60°, and 45°. The cracks have the same vertical depth of 0.8 m as a control so that the discussion does not expand. Indirect method is used in this test with a distance of 10 cm from the crack line. By using PUNDIT PL-200 which follows the rules of BS 1881 in the crack depth method, the results issued are in the form of wave travel time and also the results of the estimated crack depth.

The results of this study after going through the analysis process showed that the UPV could not fully image the inclination crack. It can be seen from the results of the average relative error on the 45° cracked specimen by 61%, on the 60° cracked specimen it is 14% while on the 90° test object it is 5%. In addition, from the results of statistical analysis, it was found that the average crack depth readings were significantly different between groups. The average estimasting of the crack depth of the 45° crack test object is 0.1818 m, the 60° crack test object is 0.1094 m, while the 90° cracked specimen is 0.0808 m. So it can be concluded that the more gentle the slope of the existing crack, the more inaccurate the crack depth reading on the UPV will be.

Keywords: *Ultrasonic Pulse Velocity, Crack depth testing, Inclination cracks in concrete.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebagai fondasi negara untuk berkompetisi dengan negara lain, Indonesia memprioritaskan pembangunan berbagai proyek infrastruktur. Berdasarkan paparan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (2020) total pendanaan tahun 2020 sampai dengan 2024 yang dialokasikan pada proyek infrastruktur sebesar 887,9 triliun.

Meninjau data yang menggambarkan pesatnya pembangunan infrastruktur di Indonesia akan berdampak besar pada penggunaan material konstruksi, khususnya beton. Beton banyak dilirik oleh pengguna jasa konstruksi karena berbagai keunggulannya dibandingkan material konstruksi lainnya. Beton memiliki kuat tekan yang sangat tinggi, mampu bertahan di suhu 200°C – 300°C, dan mudah dicetak sesuai kebutuhan.

Beton adalah salah satu material konstruksi yang keberadaannya sangat dibutuhkan bagi berbagai infrastruktur dan digemari oleh para pengguna jasa Konstruksi. Beton didapat dari hasil pencampuran antara agregat halus, agregat kasar, semen, air, dan/atau bahan tambahan seperti *admixture* maupun *additive* bila diperlukan. Campuran bahan penyusun beton perlu didesain agar mampu memenuhi kriteria beton yang diinginkan. Proses hidrasi antara semen dengan air akan memaksa penggunaan beton mengeras, setidaknya 28 hari untuk mencapai kuat tekan maksimum.

Ironinya, dibalik fungsi material beton sebagai penyongsong utama kebutuhan konstruksi di Indonesia juga masih memiliki kekurangan. Salah satu kekurangan yang timbul diakibatkan oleh sifat beton yang getas. Getas sendiri dapat membuat beton mendadak mengalami keretakan akibat mendapatkan tegangan tarik yang melampaui tegangan tarik maksimumnya. Keretakan pada beton sangat lumrah terjadi, karena kuat tarik pada beton hanya berkisar 9% - 15% dari kuat tekannya (Istimawan.D,1996).

Keretakan pada beton dibedakan menjadi retak non-struktural dan retak struktural. Retak struktural terjadi diakibatkan oleh adanya kesalahan perencanaan atau beban yang melebihi tahanan beton. Masing-masing keretakan memiliki ciri khas visualnya, yang sekaligus sebagai penanda penyebab terjadinya keretakan. Dari ciri khas itu dapat dilihat keretakan beton dipengaruhi oleh adanya gaya lentur, geser atau torsi.

Salah satu contohnya adalah retak miring (*diagonal crack*) yang dapat disebabkan oleh tekanan akibat gaya geser yang melebihi kapasitasnya. Keretakan pada beton akan sangat berdampak secara langsung pada kekuatannya. Semakin dalam dan lebar keretakan, akan mengurangi luas tahanan penampang beton secara gradual, sehingga akan mendegradasi kekuatan beton. Namun pada kenyataannya, kondisi aktual kedalaman dan bentuk retakan beton sangat muskil untuk diprediksi, sebab penampakan retakan pada beton hanya bersifat superfisial. Ironinya, sebagian besar orang langsung menarik kesimpulan bahwa retakan mikro (*micro-crack*) tidak berdampak signifikan pada kekuatan beton, sehingga banyak orang yang abai terhadap kasus tersebut. Padahal retak permukaan (*surface crack*) pada beton tidak dapat menginterpretasikan besar maupun kedalaman retakan pada bagian dalam beton (*internal crack*).

Seiring berkembang pesatnya teknologi khususnya di bidang konstruksi, terdapat suatu peranti yang mampu menguji material termasuk beton tanpa harus merusaknya yaitu *Non Destructive Test* (NDT). Maka dari itu untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh keretakan beton, tidak ada alasan untuk tidak melakukan pemeriksaan fisik pada beton.

Non Destructive Test (NDT) merupakan seperangkat peranti yang memiliki segudang manfaat di bidang konstruksi khususnya pada lingkup evaluasi serta validasi material konstruksi. Salah satu manfaatnya yaitu dapat mendeteksi kerusakan termasuk retakan yang ada pada beton. Metode yang dapat digunakan untuk mendeteksi keretakan pada beton adalah *Ultra Pulse Velocity* (UPV). Alat ini dapat mengetahui keretakan dengan mengirimkan gelombang ultrasonik pada struktur beton. Gelombang ultrasonik akan bekerja dengan mengukur waktu tempuh gelombang yang menjalar dalam struktur beton, sehingga apabila terdapat keretakan langsung terbaca pada alat UPV. Namun, di dalam berbagai kajian mengenai pengujian UPV sebagian besar memvalidasi keakuratannya dalam membaca kedalaman retakan, sedangkan pada kasus retak miring sangat minim literatur yang membahas ataupun menguji kevalidannya padahal retak diagonal sangat mungkin terjadi pada beton khususnya balok. Sehingga diperlukan penelitian yang menguji keabsahan *Ultra Pulse Velocity* (UPV) dalam menguji retak diagonal atau retak miring pada beton.

1.2 Identifikasi Masalah

Pemeriksaan keretakan pada beton dapat diuji menggunakan cara *non destructive test*, salah satu metode yang dapat digunakan adalah *Ultra Pulse Velocity (UPV)*. Hasil yang diberikan pada *UPV test* adalah data cepat rambat gelombang ultrasonik yang menjalar di dalam struktur beton. Di dalam teorinya, kepadatan suatu partikel akan mempengaruhi cepat rambat gelombang, karena keretakan beton sama halnya dengan sebuah gap yang terdapat pada struktur beton, maka kemungkinan cepat rambat gelombang akan menjadi lebih lambat dibanding tanpa keretakan. Namun, didalam kajian ini, penulis ingin menguji kevalidan *UPV test* dalam membaca keretakan diagonal pada beton, yang dimaksud keretakan diagonal adalah keretakan bersudut.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah di atas, penulis dapat merumuskan suatu masalah di dalam beberapa poin, yaitu :

1. Bagaimana pengaruh variasi sudut kemiringan retak pada beton terhadap pembacaan alat *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*.
2. Bagaimana perbedaan waktu tempuh gelombang yang dihasilkan pengujian *UPV* pada saat mendeteksi adanya retak miring pada beton.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, terdapat batasan yang sengaja penulis berikan agar pembahasan tidak terlalu meluas, adapun batasan yang dimaksud sebagai berikut :

1. Proporsi campuran beton yang digunakan yaitu 1 : 1,6 : 2,6, dengan mutu 25 MPa.
2. Dimensi benda uji adalah balok dengan ukuran 20x20x70 cm.
3. Retakan dibuat dengan memberikan *acrylic* dengan tebal 1,5 mm pada bagian tengah bentang.
4. Sudut kemiringan retakan adalah 45°, 60°, 90°
5. Pengujian dilakukan menggunakan *UPV test (indirect Method)*.
6. Alat NDT yang digunakan adalah *PUNDIT PL-200* dan *Schmidr Rebound Hammer* dari *PROCEQ*.
7. Sampel balok yang diuji hanya berjumlah 1 balok pada setiap variasinya, jumlah tersebut dipilih dengan mempertimbangkan kondisi pandemi.

1.5 Tujuan

1. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut kemiringan retak pada beton terhadap pembacaan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV).
2. Untuk mengetahui perbedaan waktu tempuh gelombang yang diakibatkan oleh adanya retak miring pada beton.

1.6 Manfaat

Dari hasil penelitian ini, penulis berharap para pembaca dapat mengambil manfaat dari penelitian ini, beberapa manfaat yang penulis harap adalah :

1. Dapat memberi pengetahuan mengenai *non destructive test* khususnya *UPV test*.
2. Dapat mengetahui keabsahan pembacaan UPV pada kasus retak miring pada beton.
3. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk penelitian yang akan datang.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan material konstruksi yang tersusun atas campuran semen hidrolis (*Portland cement*), agregat kasar, agregat halus, air, dan/atau bisa menggunakan bahan tambah (*admixture* atau *additive*). Penambahan bahan lain seperti *admixture* atau *additive* berguna untuk memperbaiki kualitas beton atau untuk mendapatkan karakteristik beton sesuai dengan yang diinginkan, seperti kemudahan pengerjaan (*workability*), *durability* atau keawetan, dan *setting time*. Umumnya proporsi campuran beton mengandung pasta semen (semen dan air) sekitar 25% - 40%, agregat (agregat halus dan kasar) sekitar 60% - 75%, dan sisanya rongga udara sekitar 1% - 2% (Mulyono, 2004:19)

Beberapa parameter yang disinyalir dapat memengaruhi kekuatan beton adalah a) kualitas semen, b). perbandingan antara semen dengan campuran, c). karakteristik agregat, d). interaksi antara pasta semen dengan agregat, e). pencampuran yang baik dari bahan-bahan penyusun beton, f). pemadatan beton yang baik, g). perawatan beton (*curing*), h). kandungan klorida harus kurang dari 0,15 % dalam beton (Nawy, 1998:24). Maka selain kualitas bahan penyusun yang harus diperhatikan, kualitas dari pelaksanaan pekerjaan beton juga harus diacuhkan.

Belakangan ini penggunaan beton masih dominan digunakan pada berbagai jenis bangunan. Hal itu dikarenakan keunggulan yang dimiliki beton salah satunya kekuatan tekan yang tinggi, selain itu kemudahan dalam mendapatkan material penyusunnya juga dapat meningkatkan kemudahan proses pengadaan beton.

2.1.1 Semen

Semen dapat dibagi menjadi dua jenis, 1). Semen non-hidrolis, 2). Semen hidrolis.

Kedua jenis semen tersebut dibedakan berdasarkan proses pengikatannya, dimana pada semen non-hidrolis proses pengikatan dan pengerasan di udara sedangkan semen hidrolis mempunyai daya untuk mengikat dan mengeras di dalam air. Terdapat beberapa contoh semen hidrolis antara lain kapur hidrolis, semen pozzolan, semen alam, semen portland, semen portland-pozzolan, semen portland putih, semen warna, dan semen-semen untuk keperluan khusus.

Semen portland merupakan semen yang paling sering digunakan. Semen ini dihasilkan dengan menggiling klinker yang tersusun dari kalsium silikat (CaSiO_3) dan kalsium sulfat (CaSO_4). Fungsi utama semen adalah mengagregasi butiran agregat hingga menjadi suatu massa yang solid dan mengisi rongga udara di antara butir-butir agregat. Meskipun proporsi semen di dalam beton hanya berkisar 10% namun peranannya sebagai bahan pengikat menjadikan peranannya sungguh vital (Mulyono, 2004:28).

2.1.2 Agregat Kasar

Sederhananya agregat kasar adalah agregat atau butiran yang lebih dari 4.75 mm (Standart ASTM). Agregat yang memiliki ukuran lebih besar dari 4.75 mm dibedakan lagi menjadi dua, antara lain 1). Kerikil beton yang memiliki diameter antara 4.75-40 mm dan 2). Kerikil kasar yaitu yang memiliki diameter lebih dari 40 mm. Umumnya agregat yang digunakan dalam campuran beton agregat yang berukuran kurang dari 40 mm sedangkan untuk agregat yang berukuran lebih dari 40 mm difungsikan untuk pekerjaan sipil seperti, pekerjaan jalan, tanggul-tanggul penahan tanah, bronjong, atau bendungan, dan lain sebagainya (Mulyono, 2004:65).

Pada campuran beton, agregat kasar memiliki kedudukan yang dominan dari total volume beton. Perlu diingat bahwa agregat kasar memiliki sumbangsih dalam menentukan kekuatan beton, sehingga agregat yang lunak, rapuh, getas, serta *flaky* sebisa mungkin dihindari. Terdapat beberapa pengujian kekerasan pada agregat kasar seperti *Los Angeles test*, bejana tekan *Rudolf*, *Leighton Buzzard* atau *Rockwell test*. (Antoni, 2004:58)

2.1.3 Agregat Halus

Agregat halus memiliki fungsi pada campuran beton sebagai pengisi yang umumnya berupa pasir. Agregat halus memiliki ukuran yang masuk pada saringan standar Amerika (ASTM) No.4 – No. 100. Celah diantara agregat kasar akan dipenuhi oleh agregat halus sehingga gradasi agregat sangat penting pada perencanaan campuran beton untuk mencegah terjadinya kesenjangan antar butiran. Agregat halus dapat berupa pasir alam yang didapat dari hasil disintegrasi alami dari batuan atau pasir buatan (*artificial*) yang merupakan hasil dari alat pemecah batu.

Berdasarkan SNI-02-6280-2002, secara garis besar agregat halus harus memenuhi persyaratan yaitu :

- 1) Agregat halus terdiri atas butiran keras dan tajam

- 2) Butiran agregat halus harus kekal meskipun dipengaruhi oleh cuaca.
- 3) Kandungan lumpur dalam agregat halus tidak boleh melebihi 5% dari berat keringnya. Apabila melebihi 5% maka agregat halus perlu dicuci

2.1.4 Air

Pada dasarnya air diperlukan pada pembuatan beton agar terjadi proses hidrasi antara semen dengan air. selain itu air juga digunakan sebagai pelumas campuran agar mudah dalam pengerjaannya (*workable*). Untuk mempertahankan kekuatan beton dan sifat-sifat semen, sebaiknya air yang digunakan tidak mengandung senyawa yang berbahaya, seperti yang tercemar garam, minyak, gula atau bahan-bahan kimia lainnya. Selain itu air yang demikian akan mengurangi afinitas antara pasta semen dengan agregat (Nawy, 1998;13).

Air yang berlebihan akan menghasilkan gelembung air setelah proses hidrasi selesai dan menimbulkan *bleeding* pada beton, sedangkan air yang terlalu sedikit pada campuran akan mengurangi daya lekat atau afinitas antara agregat dengan pasta semen sehingga besar kemungkinan beton akan mengalami segregasi. Sehingga perencanaan perbandingan antara air dan semen harus diperhatikan sebab faktor tersebut merupakan ukuran kekuatan suatu beton.

2.1.5 Bahan Tambah

Bahan kimia pembantu (*chemical admixtures*) dan bahan-bahan lain merupakan bahan tambahan (*additive*) pada campuran beton. Menurut ASTM, bahan kimia pembantu adalah material selain agregat dan semen yang ditambahkan ke dalam campuran beton sebelum atau selama proses pengecoran. Sedangkan definisi bahan tambah (*admixture*) berdasarkan ISO dan *European Federation of Concrete Admixture Associations*, adalah material yang ditambahkan selama proses pengadukan beton dalam kuantitas yang tidak lebih dari 5% berat semen yang berguna untuk mengubah sifat campuran dan/atau keadaan keras.

Bahan campuran tambahan berfungsi sebagai pengubah karakteristik beton agar menjadi relevan dan sesuai untuk pekerjaan yang direncanakan serta untuk tujuan lain seperti menghemat biaya dan energi. Menurut ASTM, bahan kimia tambahan pada beton terbagi menjadi:

- 1) Jenis A – Mengurangi Air (*Water Reducer*)
- 2) Jenis B – Memperlambat pengikatan (*Retarder*)
- 3) Jenis C – Mempercepat pengikatan (*Accelerator*)

4) Jenis D – Mengurangi Air dan Memperlambat pengikatan (*Water Reducer & Retarder*)

5) Jenis E – Mengurangi air + mempercepat pengikatan (*Water Reducer & Accelerator*)

6) Jenis F – Superplasticizer (*Water Reducer & High Range*)

7) Jenis G – *Water Reducer, High Range & Retarder*

Disamping itu juga ada bahan tambahan yang digunakan untuk menambahkan buih udara (*Air Entrainment*) dan menjadikan beton kedap air (*Waterproofing*).

2.1.6 Sifat-Sifat Beton

Tentu saja sifat yang dimiliki oleh beton segar dengan beton keras akan berbeda secara signifikan. Hal tersebut dapat diuraikan dengan singkat sebagai berikut:

2.1.6.1 Sifat Beton Segar

Pada saat beton masih segar, terdapat sifat-sifat inheren yang perlu untuk diperhatikan yaitu kemudahan pengerjaan (*workability*), pemisahan agregat dengan pasta (*segregation*), dan pendarahan atau naiknya air (*bleeding*).

1) Kelecekan (*Workability*)

Kelecekan adalah kemudahan dalam pengerjaan beton, yang mana penuangan (*placing*) dan pemadatan (*compacting*) tidak menimbulkan atau menyebabkan munculnya resio berupa pemisahan (*segregation*) maupun pendarahan (*bleeding*). Tingkat kemudahan ini dilihat dari nilai *slump* yang didapat suatu campuran beton yang mana identik dengan tingkat keplastisan beton. Semakin tinggi nilai *slump* dapat menginterpretasikan beton tersebut semakin mudah dalam pengerjaannya begitu juga sebaliknya. (Mulyono, 2004:232)

2) Pemisahan Agregat (*Segregation*)

Segregasi merupakan suatu kondisi pada beton segar yang mana butir-butir secara visual terpisah dari pasta beton. Singkatnya, segregasi dapat terjadi karena turunnya butiran agregat ke bagian bawah cetakan dari beton segar atau terpisahnya agregat kasar dari campuran beton. Segregasi merupakan salah satu pemicu terjadinya kerosok pada beton. Faktor penyebab terjadinya pemisahan agregat ini adalah cara penuangan atau pemadatan yang salah. (Antoni, 2004:115)

3) Pendarahan (*Bleeding*)

Predisposisi air untuk menuju ke atas permukaan cetakan beton yang baru dipadatkan disebut *bleeding*. Biasanya air yang naik akan membawa semen dan butiran agregat halus, yang nantinya saat beton mengeras akan membentuk selapu (*laitance*). *Bleeding* dapat terjadi akibat terlalu banyaknya air dan proses hidrasi yang lama (Mulyono, 2004;236)

2.1.6.2 Sifat Beton Keras

Beton memiliki beberapa sifat yang dimiliki pada saat kondisi beton itu telah mengeras (*hardened concrete*). Sifat itu sering digunakan untuk acuan dalam mendesain beton, sifat tersebut antara lain :

1) Kekuatan Beton

Beton memiliki sifat yang getas (*brittle*) sehingga memiliki kuat tekan tinggi namun kuat tariknya rendah. Oleh sebab itu kuat tekan beton sangat berdampak pada sifat yang lain.

Tabel 2.1 Beton berdasarkan kuat tekannya

Jenis Beton	Kuat Tekan (MPa)
Beton Sederhana	< 10
Beton normal	15 – 30
Beton prategang	30 - 40
Beton kuat tekan tinggi	40 – 80
Beton kuat tekan sangat tinggi	> 80

Sumber : Tjokrodimuljo (2007)

2) Berat Jenis

Menurut Tjokrodimuljo (2007) berat jenis beton yang digunakan pada konstruksi bangunan dapat menggambarkan jenis beton dan pemakaiannya.

Tabel 2. 2 Berat jenis beton

Jenis Beton	Berat Jenis	Pemakaian
Beton sangat ringan	< 1,00	Non struktur
Beton ringan	1,00 – 2,00	Struktur ringan
Beton normal	2,30 – 2,40	Struktur
Beton berat	> 3,00	Perisai sinar X

3) Modulus Elastisitas Beton

Menurut Tjokodimuljo, modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh modulus elastisitas agregat dan pastanya. Modulus elastisitas beton dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$Ee = (We)1,5 \times 0,043 \sqrt{f'c} \quad \text{untuk } We = 1,5 - 2,5 \dots\dots\dots (2-1)$$

$$Ee = \sqrt{4700/f'c} \quad \text{untuk beton normal} \dots\dots\dots (2-2)$$

Dimana :

Ee = Modulus Elastisitas Beton (MPa)

We = Berat jenis beton

$F'c$ = Kuat tekan beton (MPa)

4) Penyusutan Volume

Volume beton setelah mengeras akan berkurang dari pada volume beton saat segar, hal itu dikarenakan adanya proses hidrasi antara semen dengan air yang memungkinkan adanya penguapan air. Penyusutan yang dialami oleh beton lebih kecil daripada pasta, karena agregat tidak mengalami perubahan volume. Oleh sebab itu semakin besar jumlah pastanya maka akan semakin besar penyusutan beton.

2.2 Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan pada beton tidak dimaksudkan untuk menambah kekuatannya melainkan untuk menjaga keawetan serta memperbaiki kualitas beton. Perawatan pada beton dilakukan pada saat beton mencapai *final setting* atau beton telah mengeras. Perawatan ini dilakukan agar proses hidrasi tidak terganggu akibat adanya air yang menguap. Beton yang dirawat selama 7 hari lebih kuat 50% daripada beton yang tidak dirawat (Antoni, 2004). Perawatan (*Curing*) pada beton dapat dilakukan dengan cara sebagai berikut :

- ✓ Meletakkan beton segar dalam ruangan lembab
- ✓ Meletakkan beton segar dalam genangan air
- ✓ Menyelimuti permukaan beton dengan air
- ✓ Menyelimuti permukaan beton dengan karung atau kain basah
- ✓ Menyirami secara kontinyu pada permukaan beton

2.3 Evaluasi Kuat Tekan Beton

Evaluasi kuat tekan beton digunakan untuk menjamin terjaminnya proporsi dari campuran, tingkat *workability* dan mutu beton. Menurut Mulyono (2004) evaluasi kuat tekan didapat dari hasil beberapa pengujian, yaitu:

1) Pengujian kuat tekan di laboratorium,

Evaluasi ini bertujuan untuk mengaudit kesesuaian kuat tekan beton aktual dengan perencanaan awal. Umumnya pengujian ini menggunakan mesin uji tekan (*compression test machine*) terhadap benda uji berbentuk silinder dengan ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 atau kubus dengan dimensi 150 x 150 x 150 mm. Pada pengujian ini data kuat tekan yang dihasilkan harus dikonversikan menjadi satuan N/mm^2 atau MPa.

2) Uji kuat tekan dengan *non-destructive test*

Pengujian tidak merusak (*non-destructive test*) biasanya dilakukan setelah evaluasi kuat tekan beton melalui uji silinder atau kubus tidak memenuhi syarat SNI 03-2847-2002. Sehingga perlu dilakukan uji tidak merusak dengan menggunakan palu beton (*hammer test*), *core drill*, atau *pulse velocity*.

3) Pengujian Merusak (*Destructive test*)

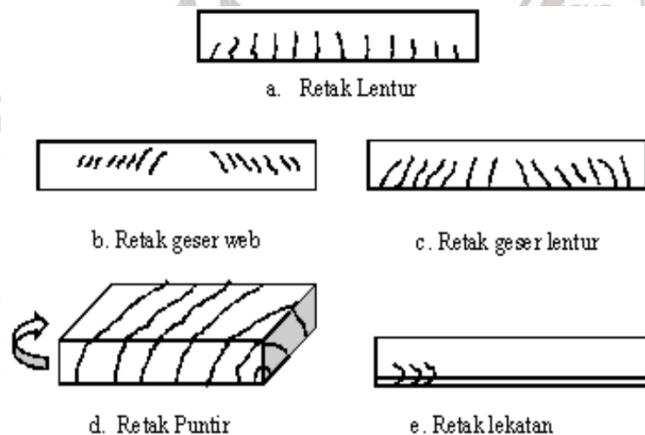
Berdasarkan SNI 03-2847-2002 Pengujian merusak ini dilakukan sebagai tahap akhir apabila kuat tekan beton yang didapat tidak memenuhi syarat yaitu kurang dari 75% kuat tekan f_c' . Pada tahap ini dapat dilakukan dengan menguji beton dengan beban langsung (*load test*) pada struktur di lapangan. Pembebanan diberikan sesuai dengan batas pembebanan yang direncanakan, apabila kekuatan serta deformasinya memenuhi, maka beton dapat digunakan.

2.4 Pola Retak Pada Beton

Retak adalah jenis kegagalan yang umum terjadi pada material beton. Banyak sekali pemicu terjadinya retak pada beton, mulai dari perbedaan temperatur pada bagian luar dan dalam beton, retak akibat penurunan yang tidak seragam, maupun beban yang telah melampaui kekuatan beton. Retak dapat terjadi pada struktur beton yang belum mengering maupun setelah mengeras, pada beton yang baru mengering permukaan beton akan menimbulkan tegangan tarik yang lebih besar dari kuat tariknya. (Antoni, 2004;201).

Variasi pola retak pada struktur beton seringkali berbeda satu dengan yang lainnya, sebab perbedaan faktor pemicu terjadinya retakan dapat menghasilkan pola retak yang berbeda. Retak dimulai dari yang secara visual dapat terlihat sampai retak yang tidak tampak secara kasat mata. Retak struktural adalah retak yang terjadi pada beton keras (*hardened concrete*) yang disebabkan adanya beban yang memicu timbulnya tegangan lentur, tegangan geser, dan tegangan tarik yang melampaui kapasitas dari suatu beton. Menurut McCornac (2001), terdapat beberapa tipe retak ada pada struktur beton bertulang, antara lain :

1. Retak lentur (*flexural crack*) adalah retak vertikal, retak ini dapat terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur lebih besar dan gaya geser yang kecil. Umumnya retak lentur terjadi pada bagian tengah bentang balok.
2. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*) yaitu retak yang secara visual tampak garis miring atau diagonal. Retak ini terjadi pada garis netral penampang, yang mana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil.
3. Retak geser-lentur (*flexural shear crack*) retak ini terjadi pada struktur beton yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Sehingga sebelum timbulnya retak miring terdapat tanda retak vertikal pada struktur beton.
4. Retak puntir (*torsion crack*), pemicu terjadinya retak ini adalah beton tanpa tulangan yang menerima torsi sehingga pola retak yang dihasilkan retak miring yang melingkar di sekeliling balok.
5. Retak lekatan adalah retakan yang terjadi di sekitar tulangan, sebabnya daya awal tulangan untuk melawan beton sehingga terjadi kecenderungan tulangan untuk berpindah.



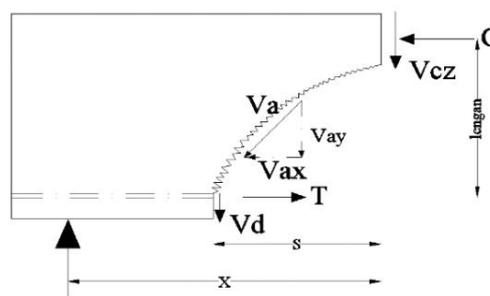
Gambar 2.1 Pola retak pada beton

Sumber: Mccornac (2001)

2.5 Retak Miring

Berbeda dengan retak lentur, yang mana keretakan sering terjadi di tengah bentang dan tegak lurus terhadap sumbu tengangan. Retak diagonal atau retak miring pada struktur beton bertulang dapat terjadi setelah adanya retak lentur sebelum terjadinya retak diagonal yang dikenal dengan istilah retak geser lentur (*flexure-shear crack*), selain itu retak diagonal juga dapat terjadi tanpa mengalami retak lentur terlebih dahulu atau yang bisa disebut dengan retak geser badan (*web shear-crack*).

Pada balok tanpa tulangan, perlawanan gaya geser dapat terjadi oleh adanya transfer dari beberapa unsur yang ada pada beton seperti, perlawanan gaya geser pada beton (V_{cz}), gaya ikat antar agregat atau *interlock* (V_a), gaya Pasak atau *dowel action* (V_d), serta aksi pelengkung atau *arch action* seperti yang terlihat pada Gambar 2.2. Besar kecilnya retak miring yang terjadi dipengaruhi dari tegangan geser (v) dan tegangan tarik lentur (f_t) serta sudut kemiringan masing-masing tegangan,



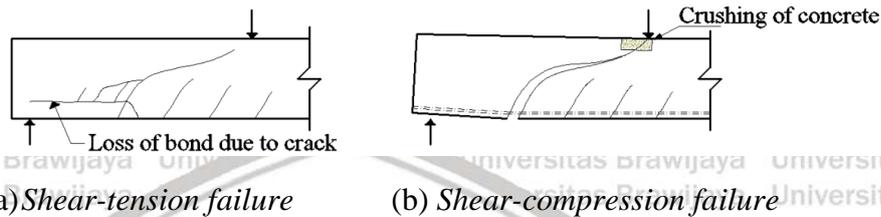
Gambar 2. 2 Distribusi gaya geser pada beton

Sumber : Kia-Wang dan Salmon (1995)

Variasi keruntuhan balok dapat dipengaruhi oleh kelangsingan penampang balok. Di mana kelangsingan dinyatakan sebagai perbandingan antara bentang geser dengan tinggi efektif balok (a/d). variasi kekuatan geser dan keruntuhan balok dibagi dalam empat kategori:

- 1) Balok Tinggi ($a/d < 1$), pada balok tinggi tegangan geser memiliki pengaruh yang signifikan dibandingkan dengan tegangan lentur. Setelah terjadinya retak miring, balok memiliki sifat seperti pelengkung.

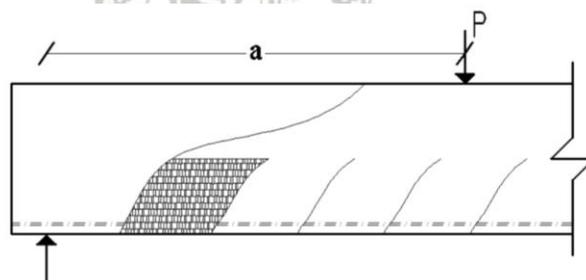
- 2) Balok Pendek ($1 < a/d < 2,5$), retak miring pada balok pendek dapat dilawan dengan kekuatan geser yang dimilikinya. Namun setelah terjadinya retak geser lentur (*flexure-shear crack*), retak akan menjalar ke area tekan seiring dengan meningkatnya beban lalu merambat hingga menuju tulangan tarik. Setelah itu, keruntuhan beton dapat terjadi akibat keruntuhan angker pada tulangan tarik (*shear-tension failure*) ataupun akibat hancurnya beton pada daerah tekan (*shear-compression failure*). Ilustrasi keruntuhan dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Jenis Keruntuhan geser pada balok pendek

Sumber : Kia-Wang dan Salmon (1995)

- 3) Balok Biasa dengan bentang sedang ($2,5 < a/d < 6$), pada balok bentang sedang, biasanya diawali dengan retak vertikal akibat tegan lentur, yang kemudian diikuti oleh retak miring (*flexure shear-crack*). Awalnya keretakan vertikal terjadi membentuk segmen balok yang cenderung untuk melengkung seperti terlihat pada Gambar 2.4. Akibatnya balok tidak dapat mendistribusikan serta menahan beban yang ada.



Gambar 2. 4 Keruntuhan tarik diagonal pada balok bentang sedang

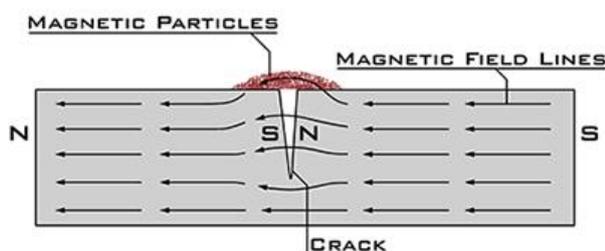
Sumber : Kia-Wang dan Salmon (1995)

- 4) Balok Panjang ($a/d > 6$), keruntuhan pada balok panjang terjadi pada daerah momen maksimum sehingga keretakan yang terjadi hampir vertikal dan tidak dipengaruhi oleh gaya geser.

2.6 NDT (*Non-Destructive Test*)

Uji tak rusak (*Non-Destructive Test*) merupakan salah satu pengujian untuk memenuhi serta memeriksa kualitas (*quality control*) suatu material. Beberapa kontrol kualitas yang mampu untuk dimonitor oleh NDT, seperti mengetahui adanya cacat, retak, atau dikontinuitas pada suatu material. Selaras dengan namanya, di dalam proses pengujianya NDT tidak sampai mengubah sifat fisik maupun kimia, merusak atau bahkan menghancurkan sebuah material yang diuji. Adapun beberapa metode yang dapat dilakukan dengan NDT yaitu :

1. Pengujian dengan penetran cair (*Liquid Penetrant Testing*) merupakan salah satu metode pengujian tak merusak (*Non-Destructive Test*) yang menggunakan cairan penetrant berdaya serap tinggi untuk mengetahui kerusakan maupun keretakan pada suatu material.
2. Pengujian dengan partikel magnet (*Magnetic Particle Testing*), merupakan salah satu metode NDT terbaik terhadap logam. Pengujian ini dilakukan dengan mendistribusikan serbuk magnet pada permukaan material yang akan diuji, nantinya permukaan yang cacat akan terdeteksi oleh adanya magnet yang terkumpul pada titik tertentu.



Gambar 2. 5 *Magnetic Particle Testing*

Sumber: [Mengenal Pengujian NDT Magnetic Particles Inspection \(nda-indonesia.com\)](http://MengenalPengujianNDTMagneticParticlesInspection(nda-indonesia.com)) (Diakses 2 Februari 2021)

3. Pengujian dengan arus melingkar (*Eddy Current Testing*) merupakan metode pemeriksaan yang dikhususkan pada material non-ferromagnetik. Mekanisme kerja pada metode ini yaitu dengan memberikan arus listrik pada kumparan dengan tujuan membentuk medan magnet di dalamnya.
4. Pengujian dengan gelombang ultrasonik (*Ultrasonic Testing*) adalah pengecekan suatu material yang menggunakan gelombang ultrasonik dalam prosesnya. Prinsip kerja pengujian ultrasonik memanfaatkan propagasi gelombang, dari data propagasi dapat menginterpretasikan material yang sedang diinspeksi.

5. Pengujian Radiografi (*Radiography Testing*) adalah salah satu pengujian NDT yang memanfaatkan sinar x atau sinar gamma, dimana sinar tersebut akan menembus hampir ke semua logam kecuali timbal dan material yang padat lainnya.

2.7 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Ultrasonic Pulse Velocity merupakan salah satu keluarga dari pengujian *Non-Destructive Test* yang memanfaatkan propagasi atau waktu tempuh gelombang ultrasonik pada suatu material yang diinspeksi. Berdasarkan *International Atomic Energy Agency* (2018) beberapa intensi dari UPV *test* yaitu untuk memprediksi umur layan struktur beton, mengetahui kuat tekan beton, mengetahui modulus elastisitas dan koefisien poisson beton, serta mengetahui keseragaman kualitas beton.

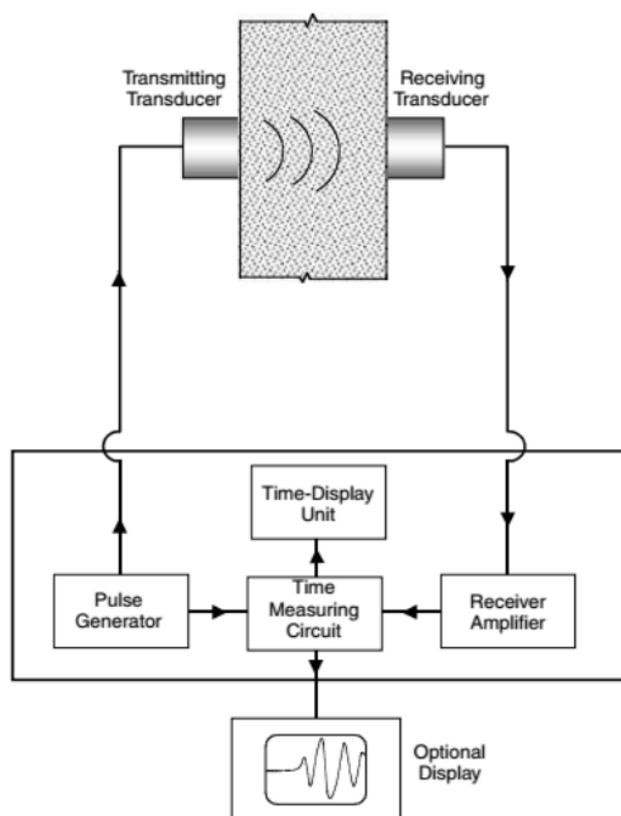
Sederhananya, prinsip kerja UPV dengan menghitung lama waktu tempuh perambatan getaran gelombang yang dikirim oleh transmitter (V.M Malhotra & N.J Carino, 2004). Kecepatan gelombang ultrasonik nantinya akan terbaca pada alat PUNDIT (*Portable Unit Non Destructive Indicator Tester*) dengan satuan hingga *micro second*. Dikarenakan pengujian UPV memanfaatkan hasil data berupa cepat rambat gelombang, maka beton yang memiliki kualitas buruk seperti pematatannya kurang baik, kuat tekannya lemah, tidak seragam, dan lain sebagainya akan berimbas terhadap kecepatan gelombang yang mengalami degradasi. namun, jika gelombang ultrasonik terjadi percepatan, maka beton dapat diindikasikan memiliki kualitas yang baik. Menurut Ari Wibowo, dkk (2014) terdapat beberapa penyebab yang memengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik pada struktur beton, yaitu:

- 1) Distansi antar *transmitter* dan *receiver*,
- 2) Kualitas permukaan beton,
- 3) Suhu beton, serta
- 4) Adanya baja tulangan.

2.7.2 Komponen utama pada pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Terlihat pada gambar 2.6, terdapat komponen-komponen yang saling berimplikasi agar pengujian UPV dapat bekerja. Komponen tersebut yaitu :

- 1) Generator gelombang (*pulse generator*) adalah berupa sirkuit penghasil gelombang listrik yang akan dikirimkan oleh *transmitting transducer*.
- 2) *Transducer*, dalam pengujian UPV terdapat 2 *transducer* yang saling koheren satu sama lain. 2 *transducer* dibedakan berdasarkan fungsinya, *transmitting transducer* berfungsi sebagai pengubah gelombang listrik menjadi gelombang ultrasonik dan kemudian mengirimkannya, sedangkan *receiving transducer* berfungsi sebagai penerima gelombang ultrasonik yang dikirim oleh *transmitting transducer*.
- 3) Pencatat waktu (*time measuring circuit*) adalah alat yang difungsikan sebagai pengukur *transite time* gelombang yang melewati struktur beton.
- 4) Osiloskop, adalah pemonitor gerakan bolak-balik gelombang yang diterima oleh *receiver*.

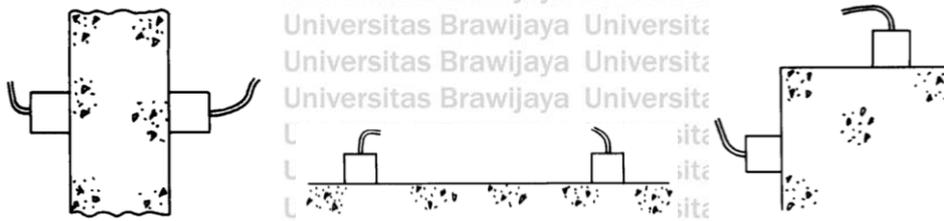


Gambar 2. 6 Komponen pada pengujian UPV

Sumber: Malhotra & Carino (2004)

2.7.3 Metode Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pengujian UPV dibagi menjadi 3 metode, yaitu langsung (*direct transmission*), tidak langsung (*indirect transmission*), dan semi langsung (*semi-direct transmission*). Ketiga metode pengujian tersebut dapat diilustrasikan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



a) Metode langsung

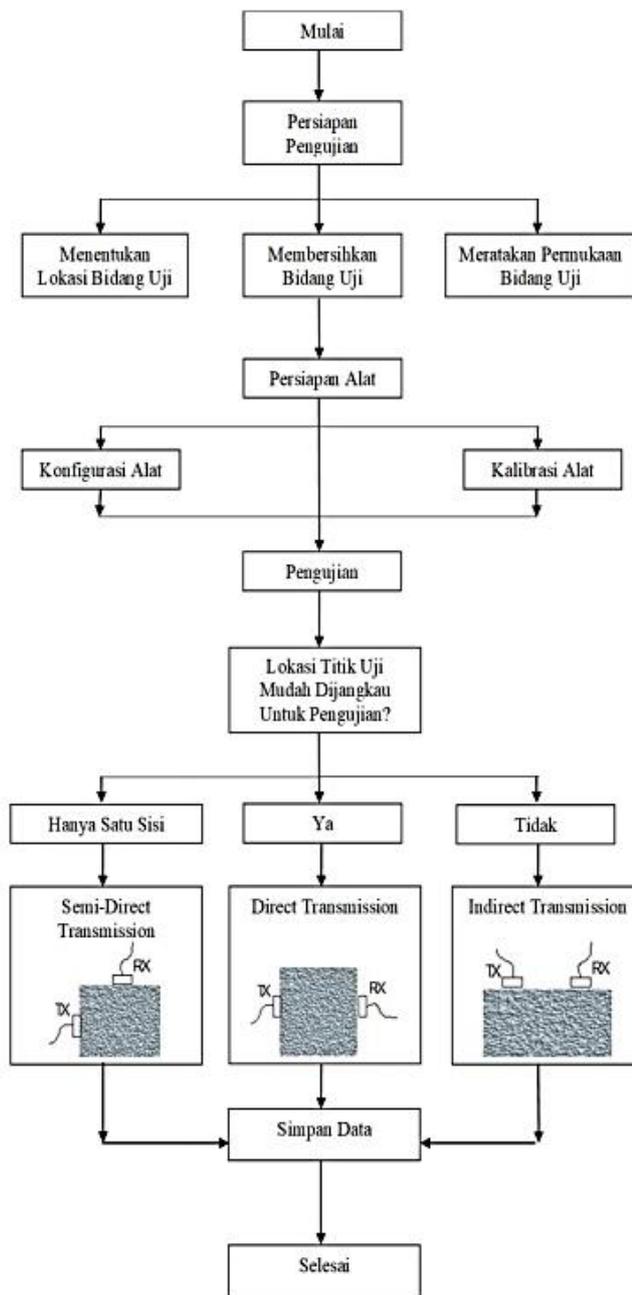
b) Metode tidak langsung

c) Metode semi langsung

Gambar 2. 7 Metode pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Sumber: Bungey (1996)

Dari ketiga metode pengujian tersebut, metode langsung (*direct transmission*) memiliki hasil yang paling kooperatif dalam hal pengukuran cepat rambat gelombang ketimbang saudaranya, meskipun kembali lagi kepada faktor keadaan fisik beton yang diuji tentu saja akan mempengaruhi. Namun, penggunaan metode *direct transmission* perlu memerhatikan kemudahan akses supaya kedua *transmitter* dapat bekerja. Untuk metode tidak langsung (*indirect transmission*) hasil yang didapat tergantung kepada jarak antar *transducer*, semakin jauh jarak yang digunakan semakin tidak akurat hasilnya. Sama halnya pada metode semi langsung (*semi-direct transmission*) dimana hasil pembacaan perlu diberikan koefisien reduksi sebab sinyal yang diterima kurang baik. Terdapat bagan alur pengujian UPV yang dapat ditinjau pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Alur Pengujian UPV

Sumber : Wijaya, U (2019)

Berdasarkan Tabel 2.3 dapat dilihat hubungan kecepatan gelombang dengan kualitas beton yang dapat dikonklusikan bahwa kecepatan gelombang yang merambat pada struktur beton biasanya berkisar antara 3 km/s sampai 4,5 km/s. oleh sebab itu, untuk kasus dengan distansi lintasan 30 cm, *travel timen* yang dibutuhkan sekurang-kurangnya 70 sampai 85 μ s, sehingga dapat dipastikan bahwa peralatan UPV mampu mengukur dengan akurat *travel time* yang pendek sekalipun. Tetapi malfungsi pada peralatan UPV bisa saja terjadi, salah

satunya disebabkan tidak terhubungnya *transducer* ke beton dengan baik karena adanya kantong udara yang terperangkap. Sehingga disarankan menggunakan *coplant* atau pelumas untuk menghindari terjadinya kesalahan dalam membaca waktu transit gelombang.

Tabel 2.3 Hubungan kecepatan gelombang dengan kualitas beton

Kecepatan gelombang (km/s)	Kualitas beton
Lebih dari 4,5	Sangat baik
3,5 – 4,5	Baik
3,0 – 3,5	Sedang
Kurang dari 3,0	Buruk

Sumber : Ari wibowo, dkk (2014)

Dengan melihat cara kerja dari pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) yang memerlukan variabel kecepatan jarak antar *transducer* (*transmitter & receiver*) dan waktu yang dibutuhkan gelombang dalam perjalanannya melalui struktur beton (*travel time*). Dengan demikian dapat didapatkan rumus untuk mencari kecepatan gelombang, yang dapat dilihat pada persamaan 2-3

$$V = \frac{L}{T} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dengan :

V = kecepatan gelombang longitudinal (m/s)

L = Panjang lintasan gelombang (m)

T = *Travel time* (s)

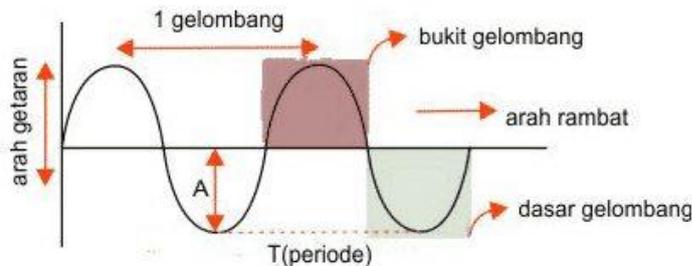
2.8 Gelombang

2.8.1 Jenis-jenis Gelombang

Gelombang secara garis besar dibagi atas 4 jenis yang didasari oleh penyebarannya atau perambatannya. Suatu benda padat elastis yang permukaannya diberi beban dinamis dapat menghasilkan jenis-jenis gelombang tersebut, yaitu:

1) Gelombang Transversal

Gelombang transversal memiliki arah tegak lurus terhadap arah rambatnya. Sehingga bentuk yang dihasilkan seperti kurva yang mempunyai titik puncak dan dasar, seperti bukit dan lembah. Contoh sederhana dari gelombang transversal adalah gelombang pada permukaan air dan tali.

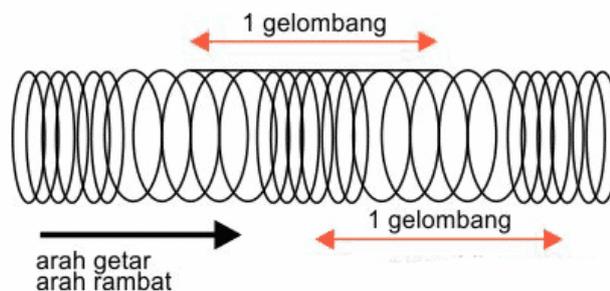


Gambar 2. 9 Gelombang transversal

Sumber: <https://www.utakatikotak.com/kongkow/detail/14971/Definisi-Gelombang-dan-Jenis-Jenis-Gelombang> (diakses 3 Februari 2021)

2) *Compression Wave* (Gelombang longitudinal)

Gelombang longitudinal dapat didefinisikan sebagai gelombang yang mempunyai arah rambat dan getaran yang searah atau sejajar. Ciri-ciri gelombang ini adalah adanya regangan dan rapatan. Contoh dari gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi, di mana yang menjadi perantara adalah udara. Gambar 2.7 merupakan penggambaran dari gelombang longitudinal.



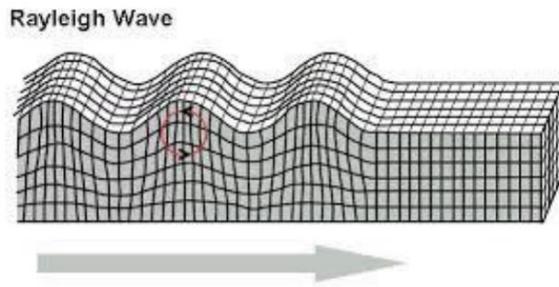
Gambar 2. 10 Gelombang Longitudinal

Sumber: <https://www.utakatikotak.com/kongkow/detail/14971/Definisi-Gelombang-dan-Jenis-Jenis-Gelombang> (diakses 3 Februari 2021)

3) Gelombang Permukaan (Gelombang *Rayleigh*)

Gelombang *Rayleigh* atau gelombang permukaan merupakan gelombang yang terjadi akibat adanya intervensi gelombang tekan dan gelombang geser secara konstruktif pada medium *half space*. Gelombang ini memiliki sifat seperti

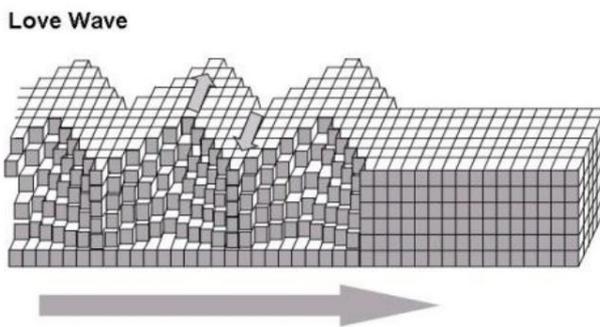
amplitudo yang menurun bahkan berkurang secara signifikan terhadap kedalaman di bawah permukaan. Gelombang *Rayleigh* secara garis besar mempunyai frekuensi yang kecil dengan spektrum yang landai.



Gambar 2. 11 Gelombang *Rayleigh*

4) Gelombang *Love* (*Love wave*)

Gelombang *Love* ditemukan oleh Edward Hough Love (1863-1940). Sebenarnya gelombang ini masih termasuk gelombang permukaan. Gelombang *Love* (*love wave*) hanya bergerak pada bidang horizontal atau dari samping ke samping dengan cepat. Dapat dilihat pada gambar 2.9 di bawah adalah contoh dari gelombang *love*.



Gambar 2. 12 Gelombang *love*

2.8.2 Perambatan Gelombang UPV terhadap Beton

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dependen dengan adanya gelombang ultrasonik, sebab pengujian UPV merupakan salah satu pengujian non-destruktif yang berbasis *ultrasonic testing*. Pada struktur beton, gelombang akan menjalar sesuai dengan lintasan pada material yang sejenis dan seragam. Namun, apabila material beton yang diinspeksi mempunyai karakteristik maupun *properties* yang berbeda, secara parsial, energi gelombang akan menyebar dari lintasan awalnya. Margin frekuensi yang digunakan untuk beton sekitar 500 kHz, sehingga dapat memberikan panjang lintasan kurang lebih 1

cm, yang mana sama dengan ukuran agregat kasar. Kecepatan rambat gelombang dipengaruhi oleh elastisitas serta kerapatan dari materialnya. Untuk material padat elastis yang seragam, kecepatan P-waves dapat dihitung dengan persamaan 2-4.

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \dots \dots \dots (2-4)$$

Dimana:

V = Kecepatan rambat gelombang

$$K = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}$$

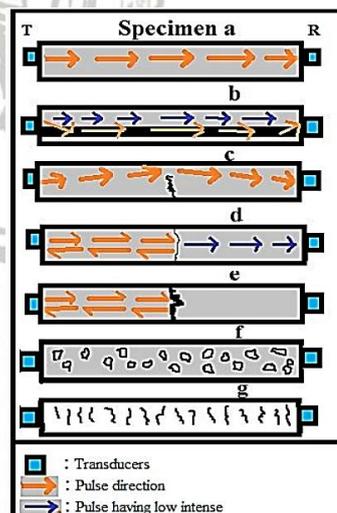
E = Modulus elastisitas dinamis

ρ = Kerapatan beton

μ = Poisson ratio

2.8.3 Korelasi Retak Miring pada Beton dengan UPV

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) merupakan salah satu alat yang dapat mengevaluasi kualitas beton dengan memanfaatkan cepat rambat gelombang ultrasonik. Perlu untuk diketahui bahwa di dalam propagasi gelombang ultrasonik memerlukan medium dalam perambatannya, seperti benda padat, benda cair maupun gas. Sehingga propagasi gelombang muskil atau bahkan tidak akan bisa melewati ruang kosong. Pada Gambar 2.13 diilustrasikan pergerakan serta arah gerak gelombang dengan berbagai kondisi pada beton.



(a) Beton normal (b) Beton bertulang (c) Beton dengan retak dangkal atau *shallow crack* (d) beton dengan retak sempit atau *narrow crack* (e) Beton dengan retak makro (f) Beton ber-void (g) Beton dengan *micro-crack*

Gambar 2. 13 Pergerakan Gelombang berdasarkan kondisi beton

Begitu juga dengan retakan pada beton yang dapat diibaratkan sebagai ruang kosong, yang mana propagasi gelombang tidak bisa melewati celah pada retakan tersebut. Tetapi, bukan berarti retakan pada beton tidak dapat dideteksi dengan pengujian UPV. Menurut VM Maholtra & NJ Carino (2004) bahwa cara kerja UPV dengan menghitung waktu perambatan dari propagasi gelombang (*transite time*) pada struktur beton untuk mengetahui kecepatan gelombang. Sehingga dengan mengetahui cepat rambat gelombang, kualitas beton dapat diketahui, salah satunya yaitu untuk mendeteksi kedalaman retak pada beton begitu juga dengan retak miring.

Sederhananya untuk mengetahui cepat rambat gelombang ultrasonik, perlu merencanakan jarak antar *transducer*. Sehingga dengan mengetahui jarak tersebut yang nantinya dibagi dengan waktu tempuh gelombang, kecepatan gelombang akan dapat dihitung dengan membagi jarak antar transducer dengan waktu tempuh (ASTM C597). Untuk pendeteksian kedalaman retak *British Standart* 1881 mengutarakan bahwa dengan menggunakan persamaan 2-5 kedalaman retak pada beton yang diilustrasikan seperti pada Gambar 2.13 dapat diestimasi dengan menggunakan UPV.

$$h = b \sqrt{\frac{4T_1^2 - T_2^2}{T_2^2 - T_1^2}} \quad (2-5)$$

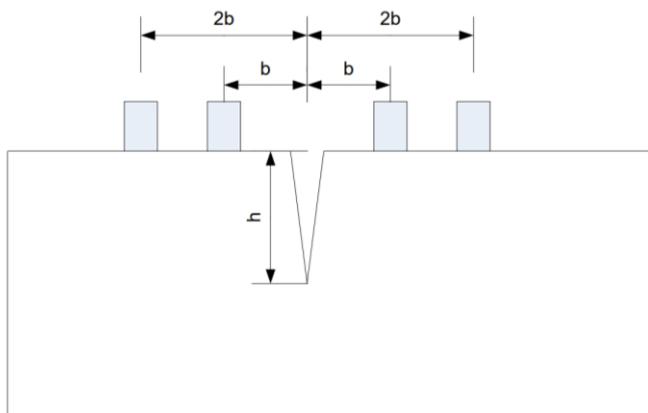
Dimana :

h = Kedalaman retak

b = Jarak *transducer* dari retakan

T_1 = Waktu tempuh gelombang saat jarak b

T_2 = Waktu tempuh gelombang saat jarak $2b$

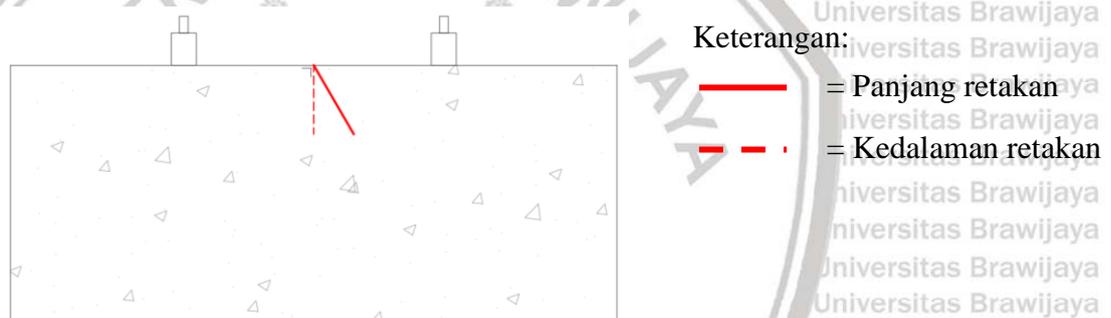


Gambar 2.14 Pengukuran kedalaman retak

Sumber : *British Standart* 1881

Pada tahap awal *Transducer* yang terdiri dari *transmitter* dan *receiver* diletakkan berlawanan di antara retakan pada jarak yang sama yang dalam hal ini dimisalkan sebagai b . Sedangkan untuk *transite time* dinotasikan dengan T_1 . Kemudian kedua *transducer* diletakkan menjauhi retakan dengan jarak dua kali dari jarak awal ($2b$) dan dalam hal ini akan didapatkan kembali waktu transit gelombang yaitu T_2 . Kecepatan rambat gelombang dapat menginterpretasikan ke dalam nilai retak yang didasari oleh perhitungan empiris menggunakan persamaan (2-5) di atas.

Persoalannya adalah kemampuan alat UPV dalam mencitrakan retak miring, tentunya masih perlu diinvestigasi mengenai kedalaman retakan pada bagian mana yang akan dideteksi sebagai kedalaman retak miring pada alat UPV. Sebab terdapat dua kemungkinan kedalaman yang dapat terbaca seperti yang ada pada Gambar 2.14, yaitu kedalaman berdasarkan panjang retakan atau berdasarkan kedalaman tegak lurus retakan terhadap permukaan beton.



Gambar 2. 15 Kemungkinan pembacaan UPV pada retak miring

Tetapi dengan memanfaatkan sorotan gelombang yang dipancarkan oleh *transmitter*, refraksi gelombang akan mencari ujung dari retakan yang nantinya akan diterima oleh *receiver*. Dari data yang didapat hasil pantulan gelombang tersebut adalah waktu tempuh gelombang beserta hasil kedalaman retak. Namun hasil kedalaman retak tersebut terikat dengan hasil waktu tempuh gelombangnya. Maka, kemungkinan yang dapat dijadikan sebagai tolok ukur agar dapat mengetahui retak yang ada pada dalam beton itu bersudut atau tegak bergantung dari hasil waktu tempuh gelombang.

Dengan jarak antar transducer dan kedalaman vertikal retak yang telah disamakan pada semua variabel, maka hasil waktu perjalanan gelombang dapat menjadi informasi utama dalam menjelaskan keadaan retak pada beton. Dengan kemiringan retak yang semakin landai dapat disinyalir bahwa *transite time* yang dihasilkan akan semakin besar atau perjalanan waktu tempuh gelombang semakin lama dibandingkan retak lurus.

2.9 Analisa Statistik

2.9.1 Analisa Deskriptif

Analisa statistic deskriptif merupakan metode analisis yang terdiri atas pengumpulan, pengolahan, penyederhanaan, penyajian, serta analisis data kuantitatif agar dapat memberi penjelasan tentang suatu peristiwa berupa tabel atau grafik.

2.9.2 Uji Anova Satu Jalur (*One Way Anova*)

Uji Anova satu jalur adalah metode statistik parametric yang difungsikan dalam menguji perbedaan beberapa kelompok rata-rata, yang mana hanya terdapat satu variabel bebas dan satu variabel terikat. Agar hasilnya valid, perlu untuk memenuhi asumsi data dalam perancangan percobaan, asumsi tersebut antara lain:

1. *Multivariate normality*: uji ini memiliki fungsi untuk mengidentifikasi variabel terikat yang dipakai dalam keadaan tersebar secara normal dalam setiap variabel bebas
2. *Homogeneity of variance*: pengujian ini bertujuan untuk mengetahui variansi yang dimiliki pada setiap kategori variabel bebas atau independen.

Hipotesis dalam Anova akan membandingkan rata-rata dari beberapa kelompok, sehingga hipotesis tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut:

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2 \dots = \mu_k$, yang berarti seluruh *mean* populasi adalah sama
- H_1 : tidak seluruh mean populasi adalah sama, terdapat sebuah efek *treatment* terdapat minimal 1 *mean* populasi yang berbeda.

2.10 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang masih selaras dan kompatibel sebaiknya dijadikan pijakan untuk melakukan penelitian terbaru. Hasil dari penelitian terdahulu mestinya terdapat kekurangan maupun kelebihan dari penelitiannya serta solusi yang ditawarkan oleh penulis, sehingga dapat dijadikan bahan pembelajaran agar penelitian terbaru dapat terlaksana dengan optimal. Di bawah ini beberapa penelitian terdahulu yang digunakan untuk sumber referensi dalam menyusun penelitian ini.

Tabel 2. 4 Penelitian terdahulu

No	Nama Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Teguh Dwi Saputra, Sugeng P. Budio, Indra Waluyohadi (2018)	Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beton dengan UPE dan UPV	<ol style="list-style-type: none"> 1. UPE dapat mendeteksi adanya rongga dalam beton secara akurat, namun faktor <i>human error</i> dan ketidak seragaman beton perlu diperhatikan karena akan mempengaruhi efikasi pembacaan UPE. 2. UPV <i>test</i> dapat disimpulkan dapat mmebaca adanya keretakan pada beton secara akurat. Namun terdapat hal-hal yang dapat mengurangi efikasi pembacaan yaitu faktor penggambaran retak yang tidak sempurna dan jarak antar retak yang terlalu dekat. 3. Perlu dilakukan pengujian keretakan pada bagian tengah beton dengan UPV dengan tujuan untuk menghindari deviasi gelombang ultrasonik yang dirambatkan sehingga pembacaan keretakan dapat lebih akurat.
2	Ari Wibowo, Hendro Suseno, M. Hamzah Hasyim, Roland Martin, Christin Remayanti N., Ardian Prima K. (2014)	Akurasi Pengukuran Kedalaman Retak Pada Balok Beton Bertulang Menggunakan UPV dengan Variasi Tebal Selimut. Tidak dipublikasikan	<ol style="list-style-type: none"> 1. Analisis keretakan dapat diperkirakan secara akurat dengan menggunakan beton tanpa tulangan 2. Di dalam penelitiannya, semakin dalam keretakan akan semakin kecil kesalahan relatifnya 3. Disarankan untuk menambahkan variasi keretakan, seperti membuat keretakan diagonal, serta menambah jumlah retakan yang ada pada struktur beton

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini diadakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang. Waktu pelaksanaan direncanakan mulai pada bulan Maret 2021 sampai selesai.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Pada penelitian ini, peralatan yang dibutuhkan sebagai berikut:

- a) Timbangan elektrik
- b) Satu set peralatan untuk pengujian berat jenis agregat halus dan kasar (kerucut terpancung beserta batang penumbuknya, talam, oven, piknometer, dan lain-lain)
- c) Satu set ayakan agregat halus dan kasar
- d) Concrete Mixer
- e) Alat bantu pengecoran
- f) Satu set peralatan uji slump
- g) Compression Testing Machine
- h) Cetakan silinder 150 x 300 mm
- i) Bekisting beton ukuran 30 x 30 x 70 cm
- j) Satu set alat ukur panjang
- k) Satu set alat Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)
- l) Akrilik bening tebal 1,5 mm

3.2.2 Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut:

- a) Agregat halus (Pasir)
- b) Agregat kasar (batu pecah)
- c) *Portland Composite Sement*
- d) Air Bersih

3.3 Variabel Penelitian

- 1) Variabel Bebas (*Interpendent Variable*), pada variabel ini faktor yang ada bersifat absolut atau bebas ditentukan oleh peneliti. Tentu saja variabel ini akan mempengaruhi variabel yang lain. Pada penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah variasi sudut kemiringan keretakan pada sampel beton.
- 2) Variabel terikat (*Dependet Variable*) adalah variabel yang faktornya diteliti dengan tujuan untuk mengetahui keabsahan data yang dihasilkan oleh variabel bebas, sehingga sesuai namanya variabel ini terikat dengan variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil pengujian UPV yang memperlihatkan pembacaan kedalaman pada retak miring.
- 3) Variabel kontrol (*Control Variable*), variabel ini umumnya digunakan untuk membandingkan sesuatu yang sedang diteliti. Tujuannya untuk mengontrol pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Pada penelitian ini variabel kontrol yang digunakan adalah rencana keretakan buatan (*artificial crack*) pada sampel beton.

3.4 Analisis Bahan

3.4.1 Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini adalah pasir yang telah diuji dengan mengikuti kaidah sesuai peraturan tentang pengujian agregat halus sebelum dilakukan tahap pengecoran. Adapun pengujian agregat halus didasari oleh peraturan sebagai berikut:

- a) SNI ASTM C136-06:2012 Metode uji untuk Analisis saringan agregat halus dan agregat kasar.
- b) SNI 1971:2011 Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.
- c) SNI 03-1970:2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.
- d) SNI 03-4804:1998 Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat.

3.4.2 Agregat Kasar

Pada penelitian ini, agregat kasar yang dipakai adalah batu pecah. Yang telah melewati proses beberapa pengujian berdasarkan:

- a) SNI ASTM C136-06:2012 Metode uji untuk Analisis saringan agregat halus dan agregat kasar
- b) SNI 1971:2011 Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan
- c) SNI 03-1969:2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar
- d) SNI 03-4804:1998 Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat

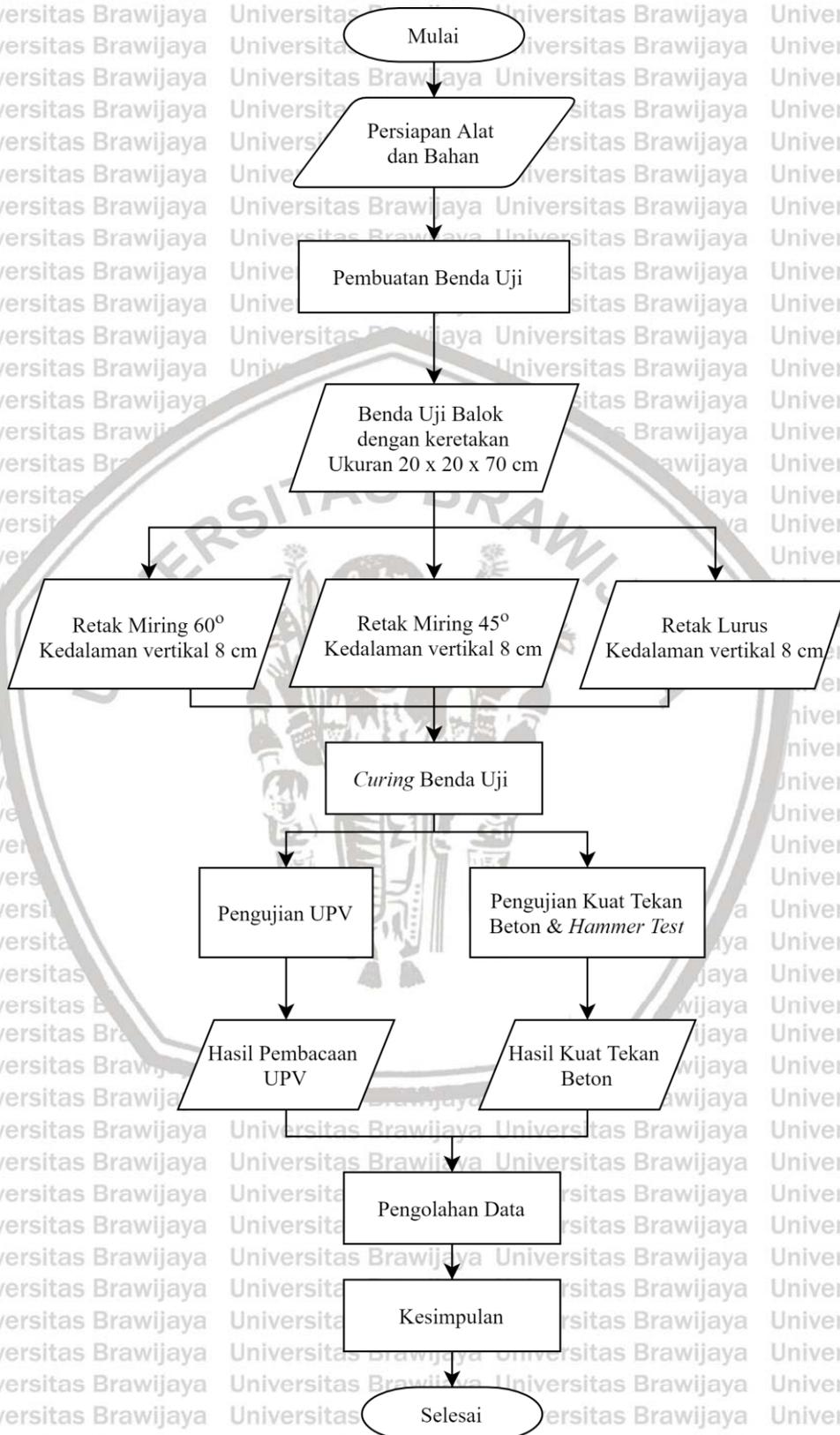
3.4.3 Semen

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah *Portland Composite Sement* (PCC) tipe 1. Untuk merk semen yang dipakai adalah Semen Gresik

3.4.4 Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini adalah air yang bersih, tidak berwarna, serta tidak berbau.

3.5 Tahap Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

3.6 Rancangan Penelitian

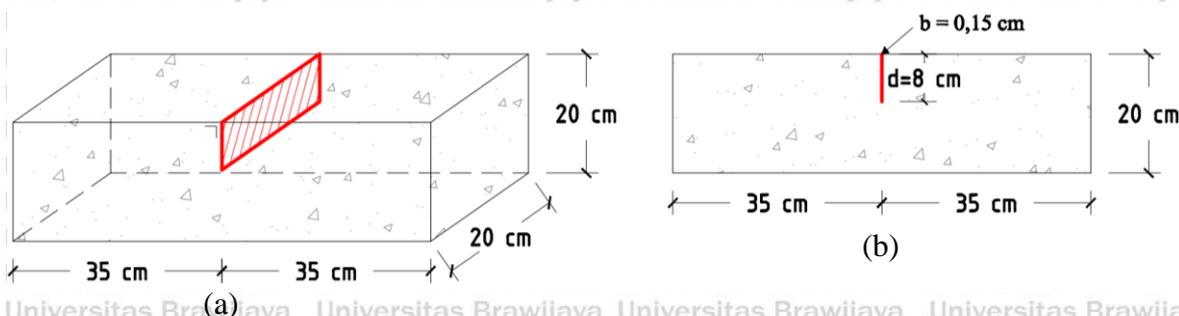
Dalam penelitian ini terdapat 3 benda uji balok beton dengan ukuran 20 x 20 x 70 cm, yang mana masing-masing benda uji balok tersebut diberikan retakan buatan (*artificial crack*) pada tengah bentang yang berbeda satu sama lain. Benda uji balok ini digunakan sebagai acuan dalam pengamatan pada penelitian ini. Selain itu terdapat juga benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pada penelitian ini benda uji silinder berjumlah 9 yang digunakan sebagai kontrol kuat tekan pada tiap sampel benda uji.

Tabel 3.1 Rancangan Benda Uji

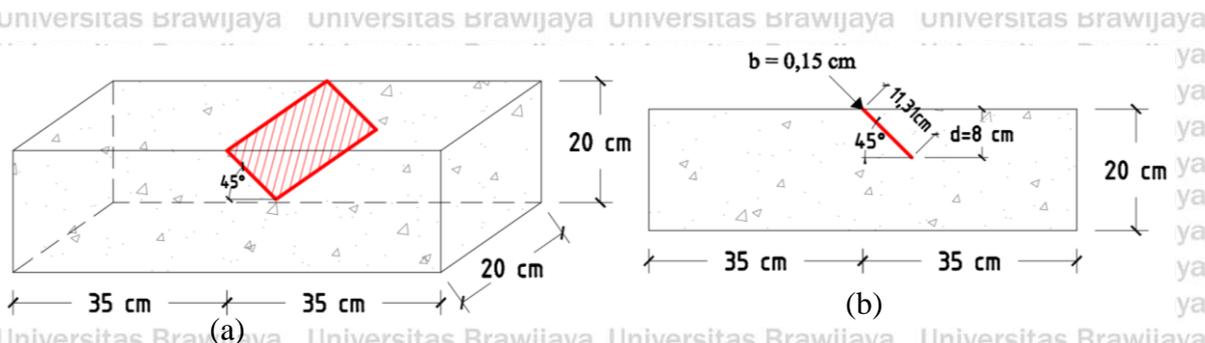
Benda Uji	Jenis Benda Uji	Volume (m ³)	Jumlah Benda Uji	Notasi Benda Uji
Beton dengan retak lurus kedalaman 8 cm	Balok	0,063	1	RL
Beton dengan retak miring 45° kedalaman 8 cm	Balok	0,063	1	RM 45
Beton dengan retak miring 60° kedalaman 8 cm	Balok	0,063	1	RM 60
Beton normal	Silinder	0,0053	9	-

Untuk lebih detailnya, rancangan benda uji dapat dilihat pada gambar 3.2 sampai 3.5 dengan keterangan simbol sebagai berikut:

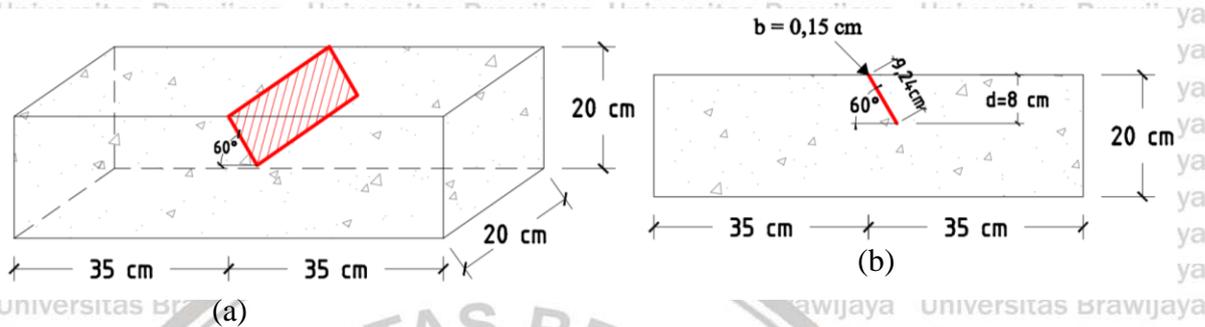
-  = Retak pada beton
-  = Beton normal
- d = Kedalaman retakan
- b = Lebar retakan



Gambar 3.2 Dimensi benda uji RL. (a) Tampak perspektif (b) tampak samping

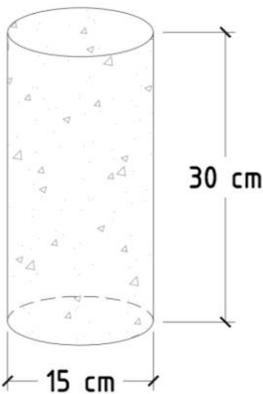


Gambar 3.3 Dimensi benda uji RM 45 (a) tampak perspektif (b) tampak samping



Gambar 3.4 Dimensi benda uji RM 60 (a) tampak perspektif (b) tampak samping

Gambar 0.1



Gambar 3.5 Dimensi benda uji silinder

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Pengujian Material Penyusun Beton

Pengujian material penyusun beton (agregat halus, agregat kasar) dilandasi oleh beberapa peraturan di dalamnya agar material yang digunakan sesuai kaidah yang ada, sehingga dapat memperbesar efikasi dalam mencapai mutu beton yang direncanakan.

Adapun peraturan yang dimaksud sebagai berikut:

- ✓ SNI ASTM C136-06:2012 Metode uji untuk Analisis saringan agregat halus dan agregat kasar

- ✓ SNI 1971:2011 Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan.
- ✓ SNI 03-1970:2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.
- ✓ SNI 03-1969:2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat kasar
- ✓ SNI 03-4804:1998 Metode pengujian bobot isi dan rongga udara dalam agregat

3.7.2 Pengujian Keleccakan Beton

Pengujian beton segar (*fresh concrete*) identik dengan pengujian keleccakan atau *slump test* yang berguna untuk mengetahui tingkat kemudahan beton saat dikerjakan maupun dipadatkan (*workability*). *Slump Test* merupakan pengujian paling sederhana untuk mengidentifikasi nilai slump atau keleccakan beton, dan pada penelitian ini digunakan pengujian *slump* yang didasari pada peraturan SNI 1972:2008 tentang Cara Uji Slump Beton.

3.7.3 Pembuatan Benda Uji

Prosedur atau tahapan untuk pembuatan benda uji pada penelitian ini tidak jauh beda dengan proses pembuatan beton pada umumnya. Yang membuat tahapan ini sedikit berbeda adalah adanya tahapan dalam proses pembuatan retakan pada benda uji (*artificial crack*) yang berada pada tahap akhir. Untuk detail tahapannya adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan material penyusun beton (agregat halus, agregat kasar, air, semen) sesuai perencanaan.
2. Campur material tersebut selama 15 menit dengan menggunakan bantuan *concrete mixer*.
3. Setelah material dirasa telah tercampur dan menjadi beton segar (*fresh concrete*), langkah selanjutnya menguji keleccakan beton segar dengan uji slump.
4. Apabila nilai slump telah sesuai dengan rencana, setelah itu mempersiapkan cetakan benda uji beserta akrilik yang telah dilapisi oleh pelumas (oli atau minyak).
5. Letakkan akrilik di celah yang terdapat pada tengah bentang cetakan.
6. Tuang dan padatkan campuran beton segar ke dalam cetakan hingga penuh dan rataakan permukaannya.

3.7.4 Perawatan Benda Uji

Perawatan atau *curing* pada benda uji dilakukan selayaknya perawatan benda uji beton pada umumnya, yaitu dengan melapisi kain atau karung goni basah. Utilitas pembasahan ini memungkinkan beton terjaga kelembabannya, sehingga proses hidrasi

tidak terganggu. Adapun proses *curing* dilakukan selama lebih kurang 26 hari setelah beton mengeras atau lebih tepatnya 1 hari sebelum pengujian dilakukan.

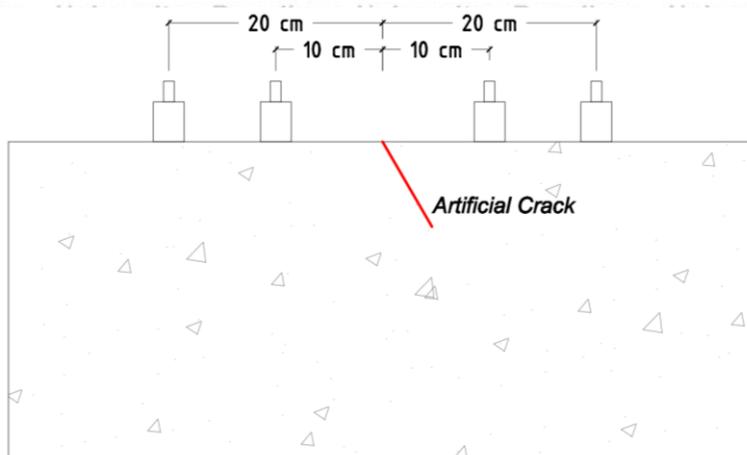
3.7.5 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton ini bertujuan untuk memastikan nilai kuat tekan beton aktual sama dengan yang direncanakan. Pengujian ini menggunakan benda uji silinder berumur 28 hari yang sebelumnya telah melewati proses *curing*. Tahapan yang perlu dilakukan pada pengujian kuat tekan beton silinder adalah sebagai berikut:

1. Timbang benda uji silinder untuk mendapatkan berat benda uji yang digunakan untuk pengolahan data kuat tekan.
2. Lapsi salah satu sisi permukaan silinder dengan belerang atau bisa disebut dengan *caping*. Hal itu dimaksudkan untuk meratakan permukaan benda uji silinder agar mesin penguji dapat mendistribusikan beban secara merata.
3. Letakkan benda uji silinder pada *compression test machine*.
4. Jalankan mesin tersebut dengan penambahan beban secara konstan hingga benda uji retak ataupun hancur.
5. Pada saat beton mulai retak atau hancur, catat beban maksimum yang mampu ditahan beton.

3.7.6 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pada penelitian ini alat yang digunakan untuk pengujian UPV adalah PUNDIT PL-200 dengan frekuensi yang digunakan 54 KHz terhadap benda uji yang telah berumur 28 hari. Sedangkan susunan *transducer* yang digunakan adalah *indirect transmission* yang mana kedua transduser (*transmitter* dan *receiver*) diletakkan sejajar pada permukaan yang sama. Pada Gambar 3.6 dapat dilihat susunan jarak antar *transducer* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.6 Susunan transducer

Dalam penelitian ini prosedur pengujian UPV dilakukan dengan tahapan sebagai berikut:

1. Ratakan dan bersihkan permukaan beton pada bagian yang akan diletakkan *transducer*.
2. Beri tanda pada permukaan beton sesuai dengan jarak yang telah ditentukan untuk acuan
3. Kalibrasi alat UPV agar hasil pembacaan yang dihasilkan oleh *transmitter* dan *receiver* sama.
4. *Setting* frekuensi serta jarak antar *transducer* pada layar PUNDIT PL-200
5. Oleskan *ultrasonic gel* pada permukaan benda uji sesuai tanda yang sudah diberikan pada poin 2.
6. Letakkan *transmitter* dan *receiver* sesuai dengan tanda yang telah diolesi dengan *ultrasonic gel*. Lalu dilakukan pengujian
7. Alat PUNDIT PL-200 akan menampilkan hasil *transit time* pada kedua jarak *transducer*.
8. Pengujian selesai apabila hasil kedalaman retak yang dibaca oleh alat PUNDIT PL-200.

Agar hasil deteksi kedalaman yang didapatkan meyakinkan, diperlukan pembacaan sebanyak tiga kali dengan hasil yang tidak jauh berbeda.

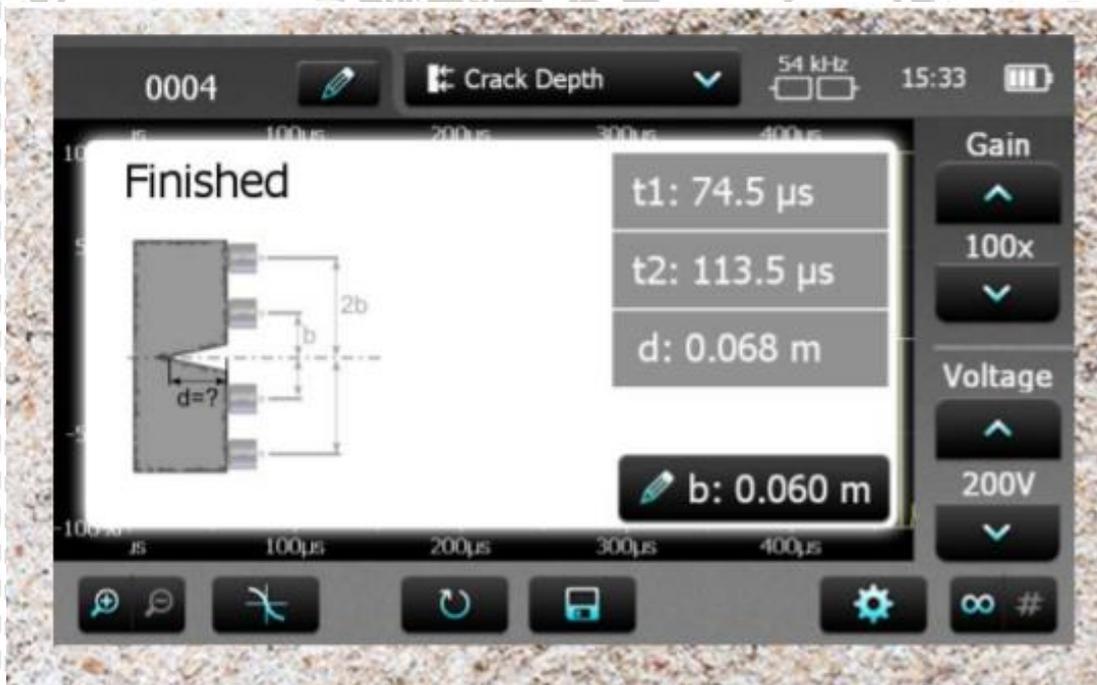


Gambar 3.7 Pengujian UPV *Indirect Method*

Sumber: Dokumentasi Penelitian

3.8 Metode Pengumpulan Data

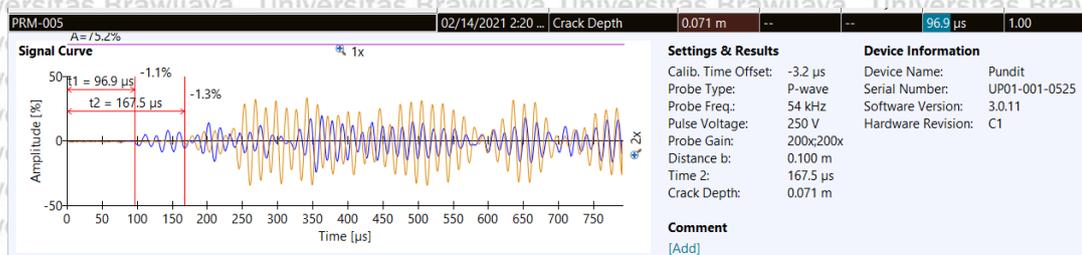
Data yang didapatkan berasal dari PUNDIT PL-200, yang mana setiap benda uji akan dilakukan pengujian untuk memerkirakan kedalaman retak pada struktur beton dengan data yang sebelumnya sudah diketahui yaitu waktu tempuh gelombang dan jarak antar *transducer*.



Gambar 3.8 Data Hasil pengujian UPV pada PUNDIT PL-200

Sumber : PROCEQ

Selain data di atas, pada penelitian ini juga terdapat data yang dikumpulkan dari pengujian UPV. Data yang dimaksud adalah bentuk gelombang atau *waveform* yang tercipta dari hasil pengujian UPV terhadap jarak antar transduser atau waktu tempuh gelombang (*transit-time*): *Waveform* tersebut akan diolah menggunakan aplikasi PL-Link untuk didapatkan beberapa parameternya seperti amplitude gelombang, periode gelombang.



Gambar 3. 9 *Waveform* pada uji kedalaman retak menggunakan UPV

3.9 Pengolahan Data

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui validitas UPV dalam mendeteksi atau menggambarkan retak miring pada struktur beton normal. Di dalam penelitian ini, digunakan variasi sudut kemiringan retak untuk memperkirakan tingkat keakuratan alat UPV dalam mencitrakan berbagai variasi kemiringan aktual di lapangan. Serta pada penelitian ini terdapat acuan (*banch marking*) yang digunakan sebagai pembandingan, yaitu benda uji dengan keretakan lurus pada kedalaman yang sama dengan keretakan miring.

Dari data hasil pembacaan pada alat PUNDIT PL-200 yang telah didapat kemudian disusun tabel untuk mendapatkan nilai keakuratan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) untuk mendeteksi adanya retak miring.

Tabel 3.2 Hasil Pengukuran Kedalaman Retak dengan UPV

Benda Uji	Sudut Kemiringan Retak ($^{\circ}$)	H Retak Aktual (cm)	L Retak Aktual (cm)	Data Pengujian UPV			Kedalaman Retak hasil Pengujian (cm)	Rata-rata Pengujian kedalaman retak (cm)
				T1 (μ s)	T2 (μ s)	Jarak Transducer (cm)		

Dimana :

H = Kedalaman retakan

L = Panjang retakan

Tabel 3.3 Form Parameter *waveform*

Benda Uji	Waktu (μs)		Amplitudo		T (μs)
	t_1	t_2	A_1	A_2	
Retak lurus					
Retak Miring 45					
Retak Miring 60					

Dengan :

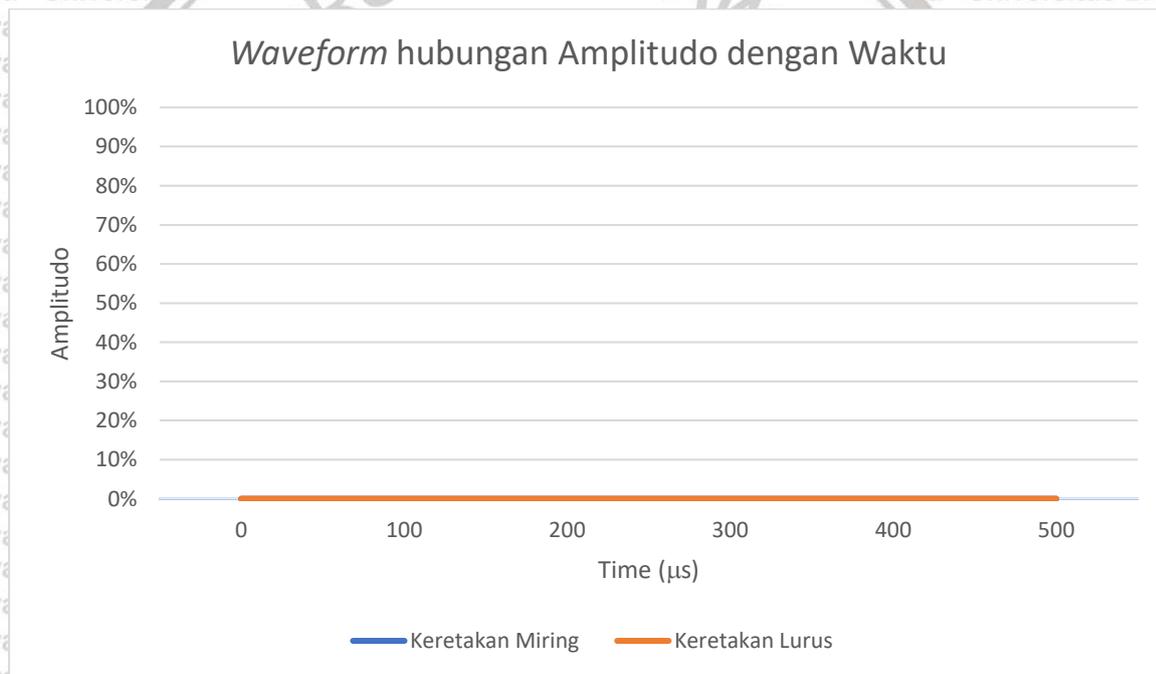
t_1 = waktu tempuh gelombang pertama (μs)

t_2 = waktu tempuh gelombang kedua (μs)

A_1 = Amplitudo gelombang pada saat t_1 (%)

A_2 = Amplitudo gelombang pada saat t_2 (%)

T = Periode gelombang (μs)



3.10 Hipotesis

Berdasarkan hasil pembahasan, maka penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil sebagai berikut:

1. Terdapat perbedaan hasil pembacaan kedalaman retak pada alat UPV terhadap variasi sudut kemiringan retak.
2. Adanya perbedaan pada nilai waktu tempuh gelombang yang dihasilkan akibat pengaruh retak miring pada beton.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Benda Uji

4.1.1 Perencanaan Campuran Benda Uji

Dalam penelitian ini benda uji yang digunakan adalah balok tanpa tulangan dengan ukuran 20 x 20 x 70 cm. Sesuai dengan variabel penelitian, direncanakan benda uji balok berjumlah 3 sampel yang dibedakan berdasarkan sudut kemiringan retaknya yaitu 45⁰, 60⁰, dan 90⁰. Sesuai dengan aturan yang terdapat pada SNI-03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal, proporsi campuran material beton untuk benda uji balok dapat dilihat pada Tabel.

Tabel 4. 1 Kebutuhan Material Benda Uji

Kuat Tekan Rencana (Mpa)	Jumlah Benda Uji	Proporsi Campuran	Kebutuhan Material Per Benda Uji (kg)			
			Semen	Air	Pasir	Kerikil
25	3	1 : 1,6 : 2,6	11,48	4,61	18,-8	61,72

4.1.2 Proses Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji diawali dengan persiapan alat serta bahan. Penimbangan material benda uji sesuai dengan perencanaan *mix design* yang ada pada Tabel 4.1. Bekisting berukuran 20 x 20 x 70 cm dilapisi pelumas agar beton nantinya mudah dilepas dari bekisting. Material yang telah disiapkan dicampur dalam alat *concrete mixer* hingga adukan dirasa cukup memenuhi nilai *slump*.

Setelah proses pengadukan selesai, beton segar dituang dan dipadatkan dengan menggunakan *vibrator* ke dalam bekisting serta *mold* silinder berdiameter 15 cm dengan tinggi 30 cm. Retak buatan berasal dari hasil cetakan akrilik yang diletakkan pada tengah bentang bekisting. Sehingga setelah akrilik dilepas benda uji akan membentuk celah atau retak buatan.



Gambar 4.1 Pembuatan benda uji. (a) Persiapan uji, (b) Pengujian nilai *slump* (c) Penuangan serta pepadatan beton dalam bekisting

4.1.3 Proses *Curing* beton

Proses *curing* adalah proses merawat kualitas beton setelah beton tersebut dilepas dari cetakan. Proses perawatan benda uji atau *curing* pada benda uji balok dilakukan dengan menutupinya dengan karung yang telah dibasahi, sedangkan untuk beton silinder perawatan dilakukan dengan meletakkannya di bak air.



Gambar 4. 2 Proses *Curing* beton. (a) *Curing* pada benda uji balok,
(b) *Curing* pada beton silinder

4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian hasil faktual dengan perencanaan. Dalam penelitian ini digunakan 2 metode untuk menguji kuat tekan beton yaitu *Compression test* pada benda uji silinder dan *Hammer test* pada benda uji balok.



Gambar 4. 3 Pengujian kuat tekan beton dengan *compressive test*



Gambar 4. 4 Pengujian kuat tekan beton dengan *hammer test*

Salah satu cara untuk mengevaluasi hasil kuat tekan adalah menguji benda uji silinder dengan *Compressive Test Machine*. Secara sederhana metode ini dihitung dari perbandingan antara beban maksimum yang dipikul benda uji silinder terhadap luas penampang silinder. Pengujian kuat tekan diterapkan pada benda uji silinder berumur 14 hari sehingga nantinya hasil kuat tekan dibagi dengan faktor konversi terhadap umur beton pada 28 hari. Secara umum rumus yang digunakan untuk mengetahui hasil akhir kuat tekan beton dengan menggunakan *compressive test* sebagai berikut:

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

Di mana:(4-1)

$f'c$ = kuat tekan beton (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas permukaan bidang tekan (mm^2)

Contoh perhitungan:

Benda uji : Silinder beton untuk retak lurus kedalam vertikal 8 cm

Luas Benda uji (A) : $\frac{1}{4}\pi D^2 = \frac{1}{4}\pi \cdot 150^2 = 17678,6 \text{ mm}^2$

Beban Maksimum (P) : 381 kN = 38100 N

Faktor konversi umur : 0,88

Kuat tekan benda uji : $f'c = \frac{P}{A} : \text{faktor konversi}$
 $= \frac{38100}{17678,6} : 0,88 = 24,039 \text{ Mpa}$

4.2.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 90°

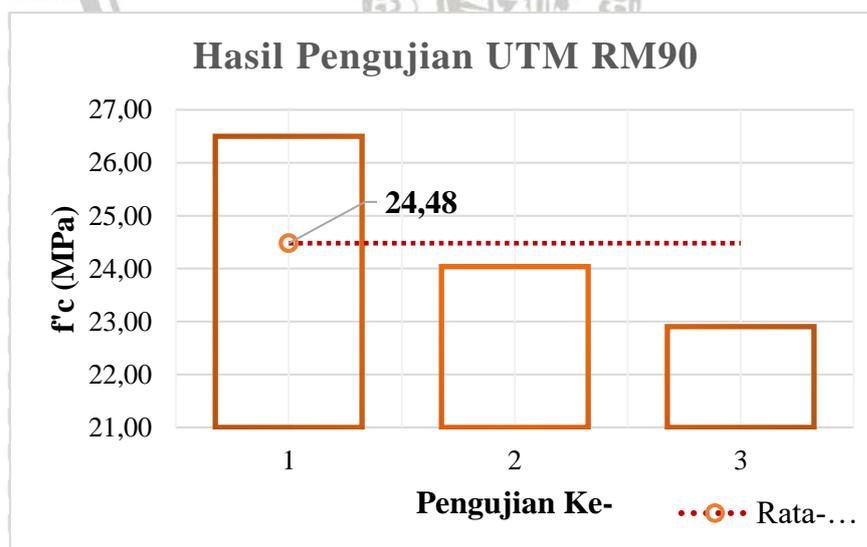
Pada Tabel 4.2 terlihat hasil pengujian kuat tekan pada 3 sampel silinder beton untuk benda Uji retak 90° yang bervariasi dengan rata-rata kuat tekan yang didapatkan sebesar 24,480 MPa dan standar deviasi 1,83. Pada pengujian *compressive test* untuk benda uji retak 90° didapatkan nilai kuat tekan maksimum sebesar 26,5 MPa sedangkan untuk nilai terendah didapatkan 22,9 MPa.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*

Benda Uji	Luas Penampang	Beban Maksimum	$f'c$ 14 hari	$f'c$ 28 hari	Rata-rata $f'c$ 28 hari	Standar Deviasi
	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Beton retak 90°	176,625	420000	23,32	26,50	24,480	1,83
	176,625	381000	21,15	24,04		
	176,625	363000	20,15	22,90		

Sumber : Hasil Penelitian

Pada Gambar 4.5 terdapat ilustrasi dari distribusi data pengujian kuat tekan beton dengan menggunakan metode *Compressive test*. Dalam gambar tersebut terlihat bahwa ketiga data yang didapatkan memiliki data yang tidak berekuivalen satu dengan yang lainnya. Namun dari hasil rata-rata didapatkan nilai yang mendekati kuat tekan rencana.



Gambar 4. 5 Hasil Pengujian *Compressive* RM90

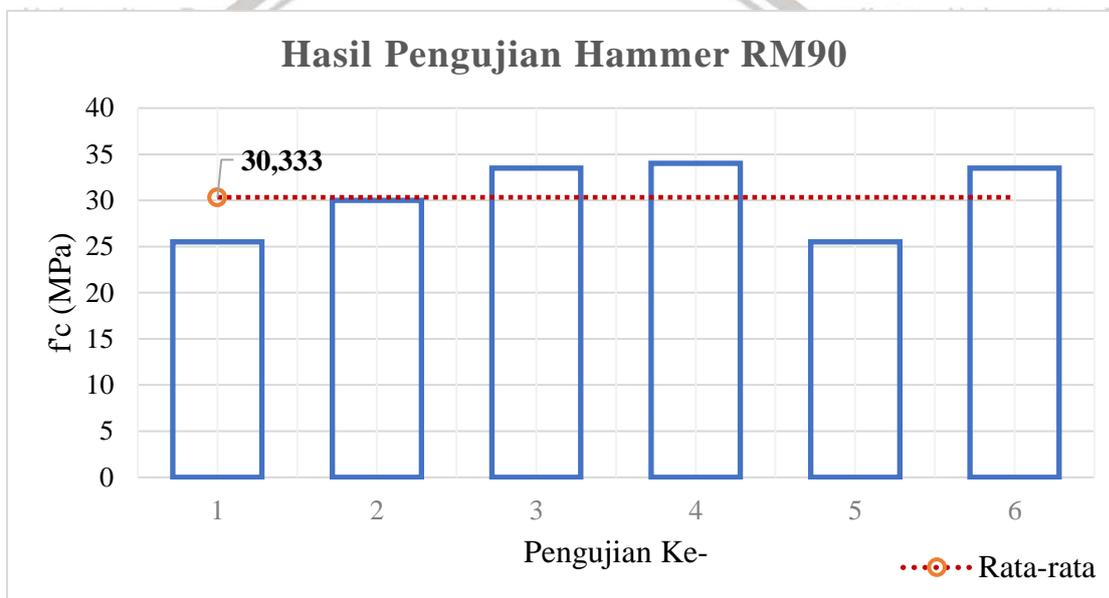
Sedangkan data hasil pengujian *hammer test* dapat dilihat pada tabel 4.3 dan Gambar 4.6 yang mana dilakukan 6 kali pengujian dengan hasil maksimum kuat tekan sebesar 33,5 MPa. Pada benda uji balok retak 90° memiliki rata-rata kuat tekan sebesar 30,33 MPa

dengan standar deviasi 4,008 MPa yang mana dapat dikatakan bahwa data kuat tekan hasil *hammer test* pada benda uji retak 90° bervariasi.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*

Benda Uji	f'_c Hammer test (MPa)	Rata-rata f'_c hammer test (MPa)	Standar Deviasi (MPa)
Beton retak 90	25,5	30,333	4,008
	30		
	33,5		
	34		
	25,5		
	33,5		

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4.6 Hasil Pengujian *Hammer* RM90

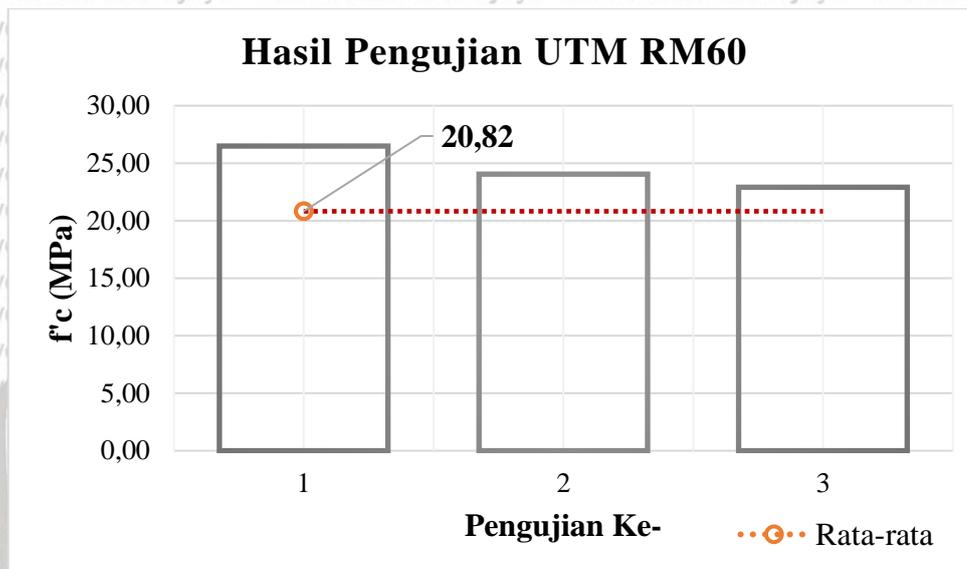
4.2.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 60°

Pada benda uji retak miring 60° juga dilakukan pengujian kuat tekan dengan menggunakan *compressive test* pada benda uji silinder dan *hammer test* untuk benda uji balok. Kedua metode tersebut menghasilkan nilai kuat tekan yang bervariasi. Dapat dilihat pada Tabel 4.4 dan Gambar 4.7 yang memaparkan nilai kuat tekan beton dengan *compressive test* pada benda uji retak 60° memiliki kuat tekan beton sebesar 22,59 MPa yang lebih tinggi dibandingkan dengan sampel silinder lainnya. Pada ketiga sampel silinder beton yang diuji tekan memiliki rata-rata sebesar 20,82 MPa dengan nilai standar deviasi yaitu 5,012 MPa.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*

Benda Uji	Luas Penampang	Beban Maksimum	$f'c$ 14 hari	$f'c$ 28 hari	Rata-rata $f'c$ 28 hari	Standar Deviasi
	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Beton retak 60	176,625	420000	19,88	22,59	20,820	5,012
	176,625	381000	16,10	18,30		
	176,625	363000	18,99	21,58		

Sumber : Hasil Penelitian

Gambar 4. 7 Hasil Pengujian *Compressive* RM60

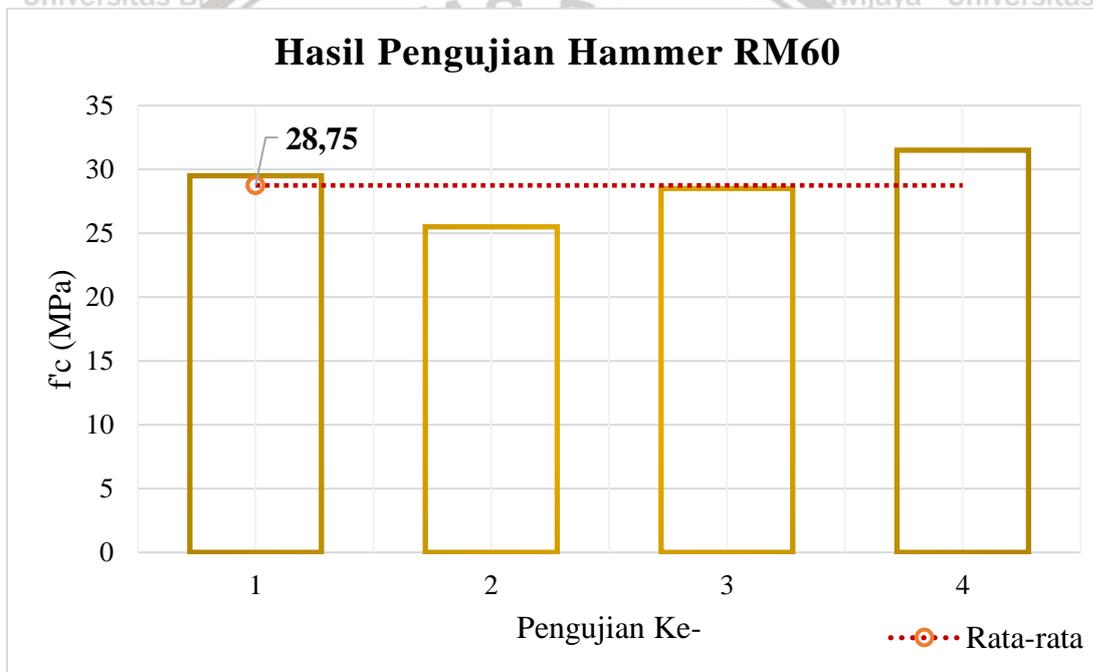
Pada benda uji balok untuk retak 60° selain dilakukan pengujian *compressive* juga dilakukan pengujian *hammer* dengan hasil pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 4.5, yang mana pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa setelah melakukan 4 kali pengujian *hammer* didapatkan nilai kuat tekan beton maksimum sebesar 31,5 Mpa sedangkan nilai kuat tekan terendah didapatkan dengan nilai 25,5 MPa. Hasil *hammer test* pada benda uji retak 60° menyimpulkan bahwa benda uji ini memiliki rata-rata kuat tekan sebesar 28,75 MPa dengan nilai standar deviasi 2,5 MPa.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*

Benda Uji	$f'c$ Hammer test	Rata-rata $f'c$ hammer test	Standar Deviasi
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Beton retak 60°	29,5	28,75	2,5
	25,5		
	28,5		
	31,5		

Sumber : Hasil Penelitian

Data yang ada pada tabel 4.5 selanjutnya diplot menjadi sebuah grafik untuk menggambarkan kondisi sebaran data agar mudah dipahami. Penggambaran hasil kuat tekan dengan metode *hammer* pada benda uji retak 60° dapat dilihat dalam Gambar 4.8.

Gambar 4. 8 Hasil Pengujian *Hammer* RM60

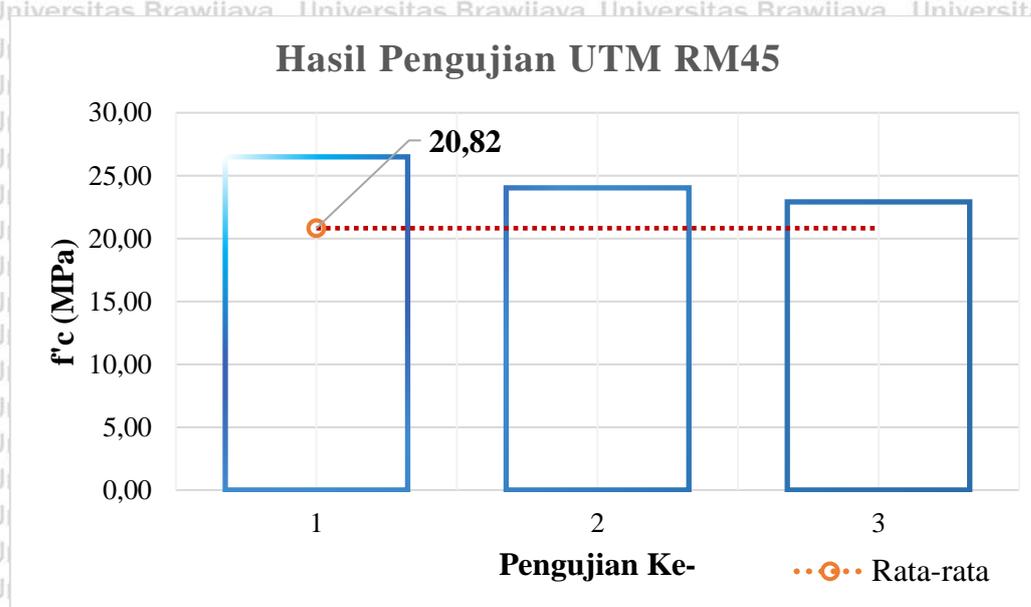
4.2.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton pada Benda Uji Retak 45°

Hasil pengujian kuat tekan pada benda uji retak 45° dapat dilihat pada Tabel 4.6 dan juga pada Gambar 4.9. Pengujian *compressive* benda uji 45° dilakukan pada 3 benda uji silinder yang menghasilkan kuat tekan maksimal sebesar 22,59 MPa sedangkan kuat tekan terendah terdapat pada benda uji silinder 2 yaitu 18,30 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada benda uji silinder retak 45° sama dengan benda uji silinder pada retak 60° yaitu 20,82 MPa begitu juga dengan nilai deviasi standar yaitu 5,012 MPa.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Silinder Menggunakan *Compressive Test*

Benda Uji	Luas Penampang	Beban Maksimum	$f'c$ 14 hari	$f'c$ 28 hari	Rata-rata $f'c$ 28 hari	Standar Deviasi
	(mm ²)	(N)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Beton retak 45	176,625	420000	19,88	22,59	20,820	5,012
	176,625	381000	16,10	18,30		
	176,625	363000	18,99	21,58		

Sumber : Hasil Penelitian

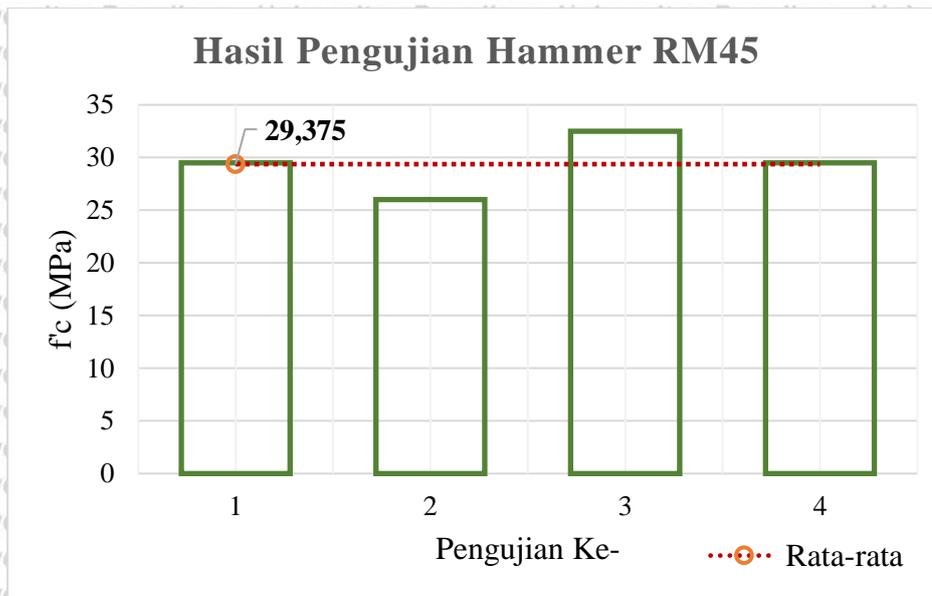
Gambar 4. 9 Hasil Pengujian *Compressive* RM45

Sedangkan pada pengujian *hammer* untuk benda uji retak 45° rata-rata kuat tekan yang didapatkan sebesar 29,375 MPa dengan standar deviasi 2,65 MPa. Berikut hasil pengujian *hammer* pada benda uji retak 45° yang terdapat pada Tabel 4.7 dan Gambar 4.10.

Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Menggunakan *Hammer Test*

Benda Uji	$f'c$ Hammer test	Rata-rata $f'c$ hammer test	Standar Deviasi
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Beton retak 45	29,5	29,375	2,657
	26		
	32,5		
	29,5		

Sumber : Hasil Penelitian



Gambar 4. 10 Hasil Pengujian Hammer RM45

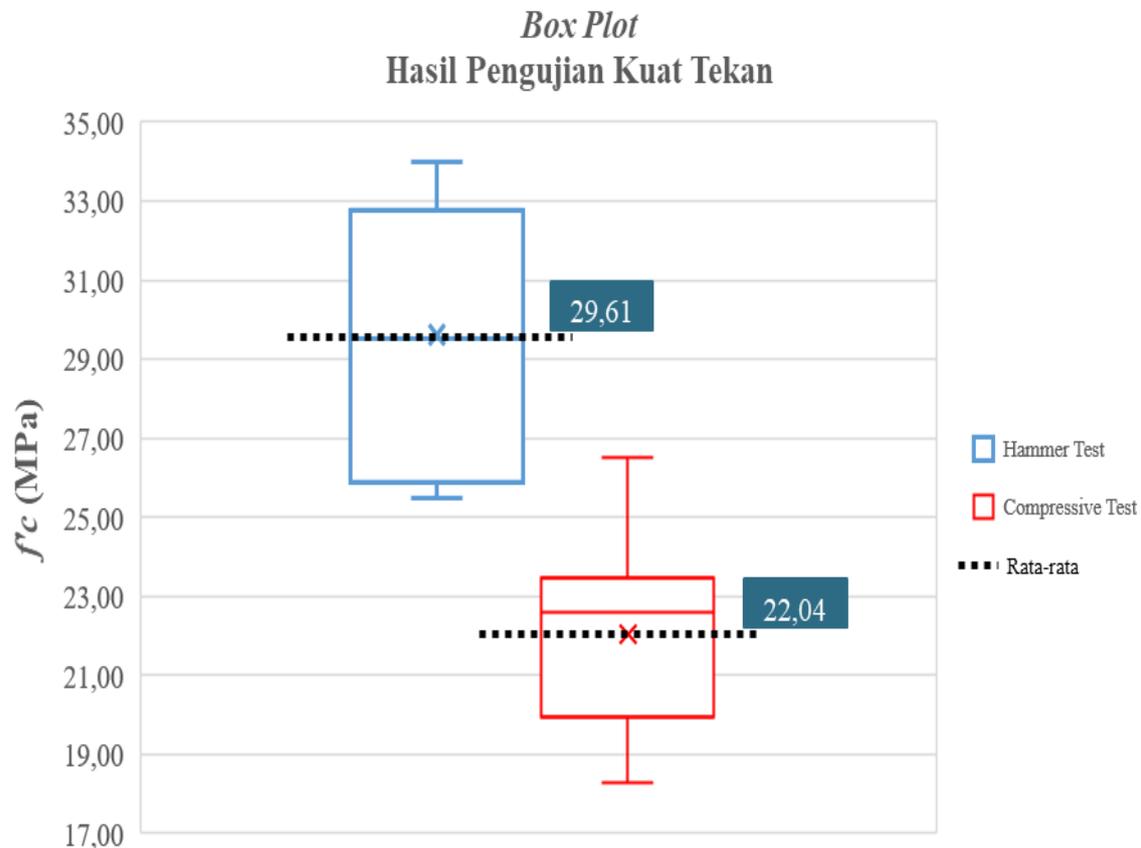
Dari hasil rata-rata pengujian kuat tekan beton dengan menggunakan metode *compressive test* maupun *hammer test* terdapat perbedaan yang cenderung signifikan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.11 yang menggambarkan secara detail hasil kuat tekan beton yang dibedakan berdasarkan metodenya dalam suatu grafik *box plot*.

Pada grafik tersebut terlihat bahwa hasil kuat tekan yang didapatkan pada kedua metode bervariasi. Nilai yang bervariasi tersebut dapat disebabkan oleh beberapa hal antara lain perbedaan karakteristik material penyusun beton itu sendiri. Selain itu dapat juga disebabkan oleh faktor pembuatan benda uji yang dilakukan secara manual, yang dapat mengakibatkan bertambahnya peluang kesalahan atau *human error* mulai dari tahap perancangan campuran beton hingga tahap pengecoran beton. Sehingga dari kedua penyebab tersebut, benda uji yang dihasilkan dapat memiliki karakteristik yang bervariasi.

Selain itu hasil yang didapatkan pada pengujian *hammer* menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih besar yaitu 34 MPa daripada pengujian *compressive* yang hanya 26,5 MPa. Namun apabila dilihat dari hasil *mean* kedua metode tersebut, pada pengujian *compressive* dengan *mean* sebesar 22,04 MPa lebih mendekati nilai kuat tekan rencana daripada nilai rata-rata kuat tekan yang dihasilkan oleh *hammer test* yaitu sebesar 29,6 MPa.

Adanya perbedaan ini didasari oleh prinsip pengujian yang berbeda pada masing-masing metode yang dapat menjadi salah satu faktor penyebab hasil kuat tekan pada kedua metode berbeda. Selain itu perbedaan hasil kuat tekan dapat disebabkan oleh proses

pembuatan benda uji yang dilakukan secara manual yang memungkinkan adanya perbedaan karakteristik benda uji, baik dari segi keseragaman, campuran, maupun kepadatan benda uji yang dapat mempengaruhi hasil kuat tekannya.



Gambar 4.11 *Boxplot* Hasil Pengujian Kuat Tekan

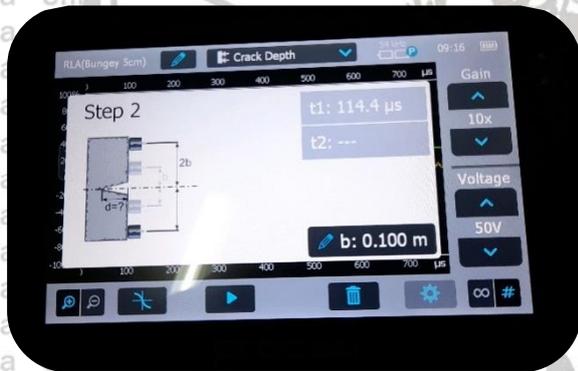
4.3 Hasil Pengujian UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

Pengujian UPV dilakukan pada benda uji beton yang telah berumur 28 hari agar kualitas perambatan gelombang dapat maksimal, hal ini juga didasari oleh pencapaian maksimum kuat tekan beton. Alat yang digunakan dalam pengujian UPV adalah *PUNDIT PL-200* milik *PROCEQ* yang memanfaatkan salah satu metodenya yaitu *Crack Depth*, yaitu metode yang dapat mengestimasi kedalaman retak pada beton berdasarkan BS 1881.

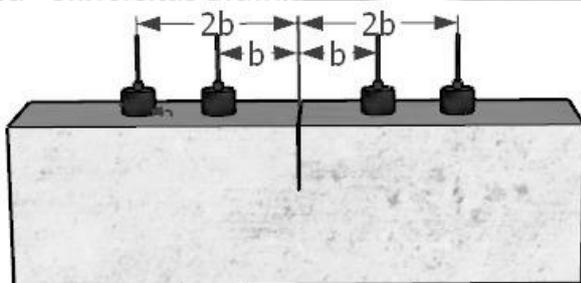


Gambar 4.12 Pengujian UPV *Crack Depth Method*

Untuk mengestimasi kedalaman retak pada alat *PUNDIT PL-200* perlu untuk mengisi data berupa jarak *transducer* terhadap garis retak (b) pada permukaan yang sama. Selanjutnya *transducer* diletakkan pada benda uji sesuai dengan jarak yang telah dimasukkan untuk mendapatkan nilai *transit time* 1 (t_1), setelah itu untuk mendapatkan *transit time* 2 (t_2) *transducer* dipindah pada jarak ($2b$) sehingga pada akhir pengujian *PUNDIT PL-200* akan menampilkan hasil estimasi kedalaman retak. Skema perletakkan *transducer* dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.13 Tampilan *PUNDIT PL-200 Crack Depth Methode*



Gambar 4.14 Skema Perletakkan *Transducer* (Tampak Samping)

Untuk penjelasan terkait notasi b dan $2b$ atau jarak *transducer* terhadap garis retak dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Jarak perletakan *transducer* dengan garis retak

Benda Uji	Jarak tranduser dengan Retak (m)	
	<i>b</i>	<i>2b</i>
Beton Retak 90 ⁰	0,1	0,2
Beton Retak 60 ⁰	0,1	0,2
Beton Retak 45 ⁰	0,1	0,2

Sebelum melaksanakan pengujian UPV perlu untuk melakukan pengecekan kedalaman retak aktual pada benda uji menggunakan alat bantu ukur panjang. Hal ini dilakukan sebagai kontrol pembacaan kedalaman retak UPV. Hasil dari pengukuran retak aktual akan dibandingkan dengan hasil estimasi pengujian UPV sehingga didapatkan nilai kesalahan relatif pada setiap pengujiannya.

Hasil pengujian kedalaman retak UPV pada penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 4.9 Pada tabel tersebut tertera data pengujian dan hasil kedalaman retak pembacaan UPV yang didapat dari pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity*. Sedangkan pada kolom perhitungan empiris nilai kedalaman retak didapatkan dari hasil persamaan 4-1 yang didapatkan berdasarkan *British Standart 1881 Part 203*.

$$h = b \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \dots\dots\dots(4-1)$$

Dimana :

h = Kedalaman retak

b = Jarak *transducer* dari retakan

*t*₁ = Waktu tempuh gelombang saat jarak *b*

*t*₂ = Waktu tempuh gelombang saat jarak *2b*

Contoh perhitungan:

Benda uji : RM90

Jarak tranduser dari retakan : 0,1 m

Waktu tempuh gelombang pertama (*t*₁) : 84,2 μs

Waktu tempuh gelombang kedua (*t*₂) : 140,7 μs

54 Maka estimasi kedalaman retak dapat dicari dengan cara sebagai berikut:

$$h = b \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}}$$

$$= 0,1 \sqrt{\frac{4(84,2)^2 - (140,7)^2}{(140,7)^2 - (84,2)^2}}$$

$$= 0,0821 \text{ m}$$

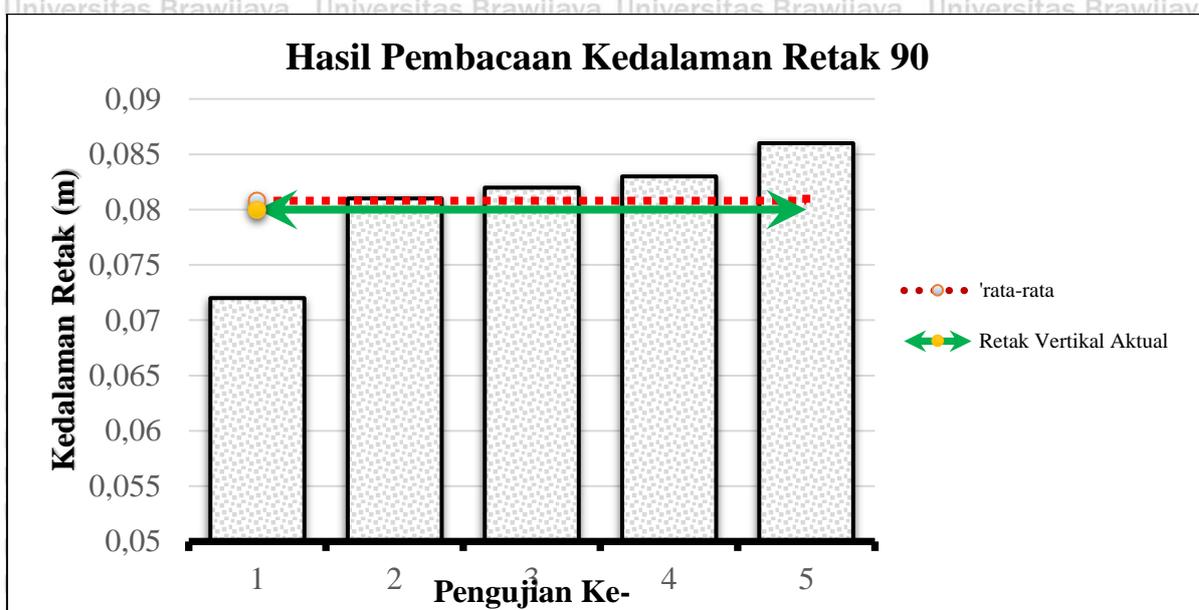
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Kedalaman Retak Miring dengan UPV

Ben da Uji	Sudut Kemir ingan Retak (°)	Retak Miring Aktual (m)	Proyeksi Kedala man Vertikal Retak Miring (μs)	data pengujian			Hasil kedalaman Retak		Rata- Rata (m)
				t1 (μs)	t2 (μs)	b (m)	Berdasar kan Pembacaan UPV (m)	Berdasar kan Perhitung an Empiris (m)	
RM 90	90	-	0,08	83,7	144,2	0,1	0,072	0,0724	0,081
	90	-	0,08	84,9	142,4	0,1	0,081	0,0809	
	90	-	0,08	84,2	140,7	0,1	0,082	0,0821	
	90	-	0,08	92,1	153,5	0,1	0,083	0,0829	
	90	-	0,08	87,7	144,6	0,1	0,086	0,0864	
RM 60	60	0,092	0,08	90,2	140,6	0,1	0,105	0,1048	0,109
	60	0,092	0,08	89,1	138,7	0,1	0,105	0,1053	
	60	0,092	0,08	89,1	137,5	0,1	0,108	0,1082	
	60	0,092	0,08	89,1	135,3	0,1	0,114	0,1139	
	60	0,092	0,08	91,9	139,3	0,1	0,115	0,1145	
RM 45	45	0,113	0,08	103,6	137,5	0,1	0,171	0,1715	0,081
	45	0,113	0,08	107,4	141,3	0,1	0,176	0,1762	
	45	0,113	0,08	104,4	136,3	0,1	0,181	0,1805	
	45	0,113	0,08	104	135,2	0,1	0,183	0,1830	
	45	0,113	0,08	105,8	134,2	0,1	0,198	0,1982	

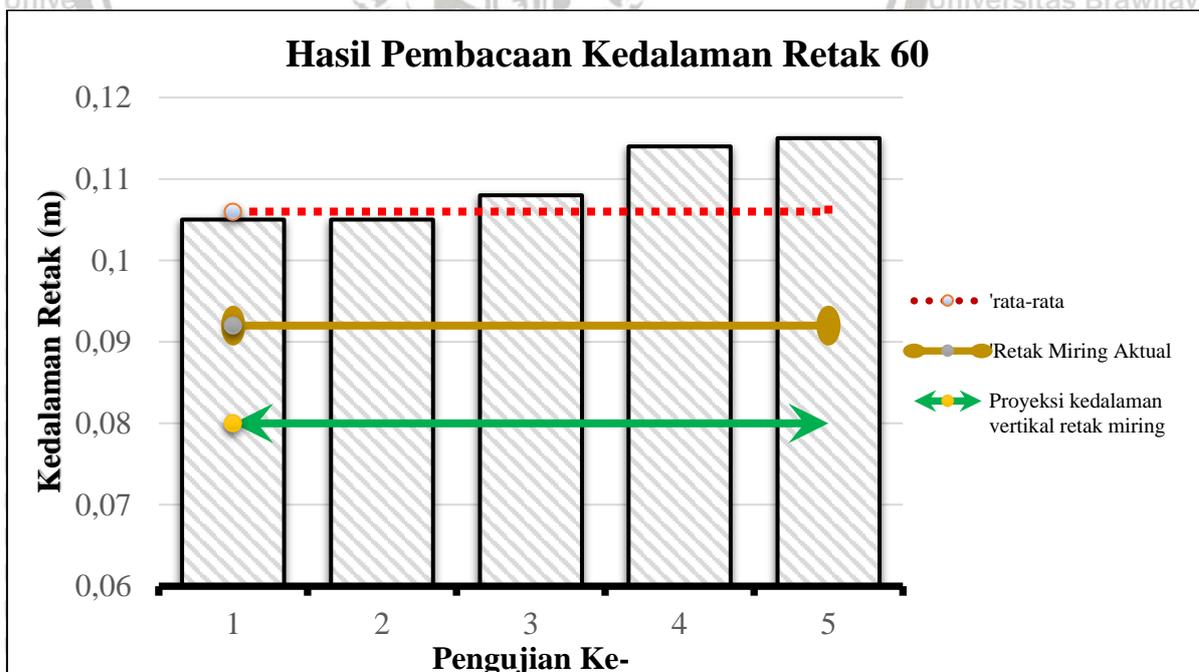
Pengujian estimasi kedalaman retak miring dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* dilakukan sebanyak 5 kali pada setiap variasi kemiringan retak. Dengan membandingkan waktu tempuh yang didapat pada jarak b dan $2b$ nilai kedalaman retak dapat diperkirakan baik dengan hasil pembacaan UPV maupun melalui perhitungan empiris, yang mana dari hasil keduanya tidak didapati hasil yang berbeda.

Secara parsial hasil pembacaan kedalaman retak tidak terlalu bervariasi pada masing-masing variasi benda uji. Namun dari hasil rata-rata yang didapatkan benda uji RM45 dan

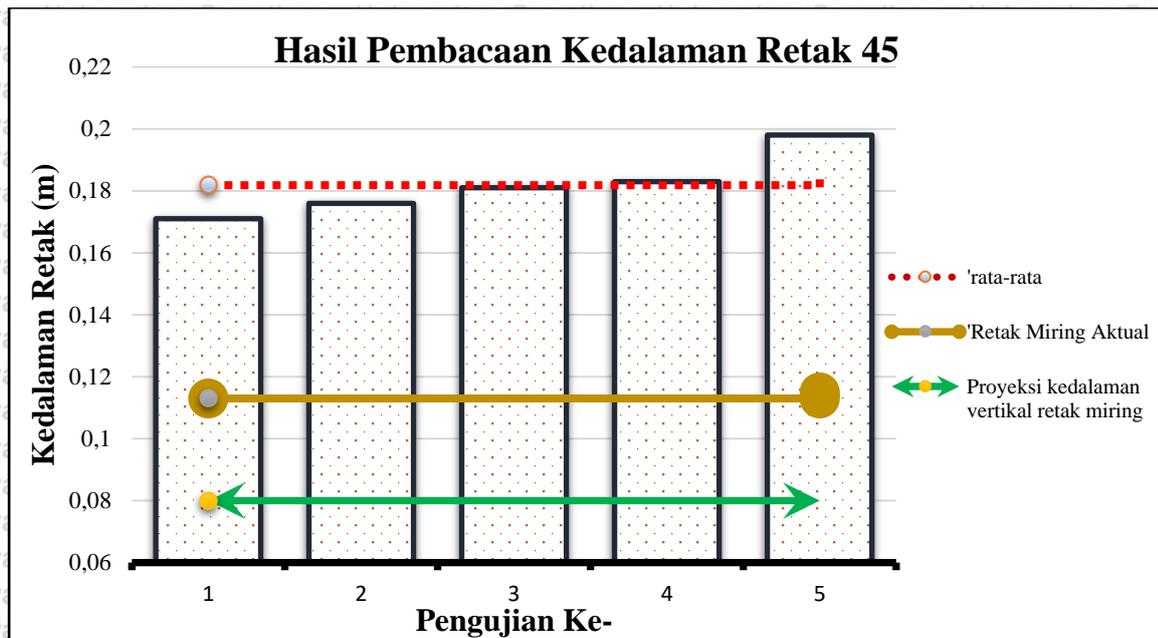
RM60 mendapati nilai kedalaman retak yang tidak condong kepada panjang retak aktual manapun. Berbeda dengan benda uji RM90 yang memiliki hasil pembacaan kedalaman retak yang mendekati proyeksi kedalaman vertikal dari retak miring. Pada gambar 4.15 - 4.17 dapat dilihat ilustrasi terkait perbandingan antara hasil pembacaan kedalaman retak UPV dengan retak aktual.



Gambar 4. 15 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 90° dengan Retak Aktual



Gambar 4. 16 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 60° dengan Retak Aktual



Gambar 4. 17 Perbandingan Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring 45° dengan Retak Aktual

Selanjutnya pada Tabel 4.10 terdapat perhitungan kesalahan relatif hasil pembacaan kedalaman retak miring dengan retak sesungguhnya. Retak sesungguhnya yang dimaksud adalah proyeksi kedalaman vertikal dari retak miring aktual yaitu 8 cm dan retak miring aktual pada benda uji retak 45° yaitu 11,3 cm sedangkan benda uji retak 60° yaitu 9,2 cm.

Perhitungan kesalahan relatif dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$KR = \left| \frac{NE - NA}{NA} \right| \times 100$$

Dimana:

KR : Kesalahan Relatif (%)

NE : Nilai Estimasi Kedalaman Retak

NA : Nilai Aktual Kedalaman Retak

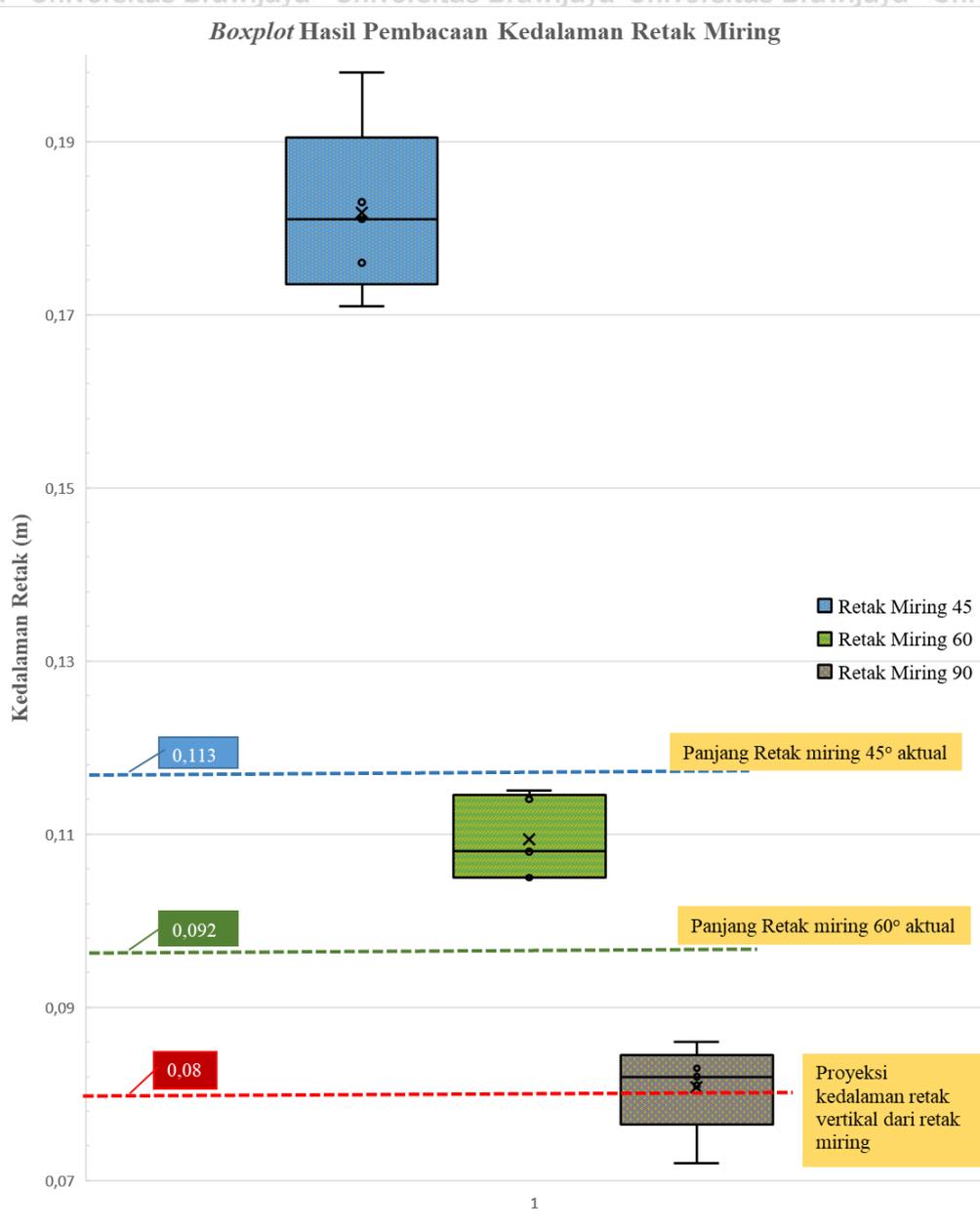
Tabel 4. 10 Nilai Kesalahan Relatif Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring

Benda Uji	Pengujian Ke-	Nilai Kesalahan Relatif (%)	
		Terhadap Proyeksi kedalaman vertikal retak miring	Terhadap Retak Miring
RM45	1	114	52
	2	120	56
	3	126	60
	4	129	62
	5	148	75
Rata-rata		127	61
RM60	1	31	14
	2	31	14
	3	35	18
	4	43	24
	5	44	25
Rata-rata		37	19
R90	1	10	-
	2	1	-
	3	3	-
	4	4	-
	5	7	-
Rata-rata		5	-

Pada Gambar 4.18 terdapat penggambaran sebaran data hasil pembacaan kedalaman retak miring atau bersudut dalam beton. Dalam grafik *boxplot* tersebut terlihat disparitas yang besar antar pembacaan kedalaman retak yang dibedakan berdasarkan sudut kemiringan retaknya. Dari grafik tersebut juga didapati nilai yang lebih beragam pada sudut retak 45 dibandingkan variasi lainnya, seperti retak miring 60 yang mempunyai sebaran data memusat pada reratanya.

Sebagaimana yang terdapat dalam Tabel 4.10 dan juga ilustrasi data hasil pembacaan kedalaman retak miring dengan UPV pada Gambar 4.18, maka dapat diambil konklusi sementara bahwa hanya retak miring 90° yang dapat membaca retak aktual dengan lebih akurat ditimbang variasi sudut kemiringan retak 60° maupun 45°. Meskipun begitu estimasi pembacaan kedalaman retak pada sudut 60° lebih condong kepada retak miring aktualnya, berbeda dengan hasil pembacaan kedalaman retak pada sudut 45° yang mana data yang

dihasilkan sangat jauh dari retak miring aktualnya maupun dari proyeksi kedalaman vertikalnya.



Gambar 4.18 *Boxplot* Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring

4.4 Analisis Statistik

Analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah ANOVA (*Analysis Variance*). Analisis ANOVA sendiri berguna untuk mengetahui perbedaan dari rata-rata suatu sampel pengujian. Dalam penelitian ini variabel bebas yaitu variasi sudut kemiringan retak sedangkan variabel terikatnya adalah hasil pembacaan kedalaman retak oleh alat

PUNDIT PL-200. Sebelum mengetahui hasil dari analisis ANOVA perlu untuk memenuhi beberapa persyaratan dibawah ini, sebagai berikut:

1. Data berasal dari kelompok yang tidak terikat (*independent*)
2. Data yang akan diuji harus berdistribusi normal
3. Varian data antar kelompok harus homogeny

4.4.1 Uji Normalitas

Uji normalitas pada penelitian ini menggunakan metode *Shapiro-Wilk* yang dapat dilihat hasilnya pada tabel 4.12. Uji normalitas berguna untuk menilai sebaran data pada sebuah kelompok atau variabel.

Tabel 4. 11 Uji Normalitas metode *Shapiro-Wilk*

Variasi Kemiringan Retak	Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.
90°	0,865	5	0,245
60°	0,834	5	0,15
45°	0,929	5	0,592

Sumber: *Software SPSS*

Berdasarkan program SPSS, data yang digunakan dalam penelitian ini berdistribusi normal. Hal itu dapat dibuktikan dengan metode “*Shapiro-Wilk*” yang mana kaidah yang harus dipenuhi agar suatu data dapat dipastikan berdistribusi normal adalah dengan nilai signifikansi lebih dari 0,05. Apabila melihat hasil nilai signifikansi pada tabel 4.12 data dalam semua kelompok baik 90°, 60°, 45° maupun lebih dari 0,05, sehingga data penelitian yang akan di analisis berdistribusi normal.

4.4.2 Rata-Rata Hasil Pembacaan Kedalaman Retak Miring

Tabel 4. 12 Deskriptif data pembacaan kedalaman retak miring

Variasi Kemiringan Retak	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
90°	5	0,0808	0,00526	0,00235	0,07427	0,08733	0,072	0,086
60°	5	0,1094	0,00483	0,00216	0,10341	0,11539	0,105	0,115
45°	5	0,1818	0,01018	0,00455	0,16916	0,19444	0,171	0,198
Total	15	0,124	0,0445	0,01149	0,09936	0,14864	0,072	0,198

Sumber: *Software SPSS*

Dalam Tabel 4.13 pada kolom *Mean* terdapat nilai rata-rata dari data penelitian ini yaitu pembacaan atau pengujian kedalaman retak miring dengan variasi beberapa sudut, bila disebutkan ulang nilai rata-rata pada tabel diatas sebagai berikut:

- Nilai rata-rata hasil pengujian kedalaman retak miring 45° adalah 0,0808 m
- Nilai rata-rata hasil pengujian kedalaman retak miring 60° adalah 0,1094m
- Nilai rata-rata hasil pengujian kedalaman retak miring 90° adalah 0,1818 m

Secara gamblang dapat dilihat dari hasil rata-rata diatas bahwa dengan nilai 0,0808 m, pembacaan retak miring dengan sudut 90° adalah pembacaan paling akurat dengan hasil yang hampir mendekati nilai aktualnya yaitu 0,08 m dibandingkan dengan variasi sudut lainnya yang memiliki rata-rata jauh dari nilai aktualnya.

4.4.3 Uji Homogenitas

Sebelum menganalisis data dengan ANOVA adapun syarat yang harus dipenuhi salah satunya homogenitas data kelompok. Uji homogenitas ini bertujuan untuk mengetahui tingkat keberagaman atau varian data. Salah satu metode pengujian homogenitas data adalah *Levene Test*, secara sederhana dalam metode ini hasil nilai signifikansi menjadi tolok ukur homogenitas data, kaidah pengambilan keputusan tersebut adalah sebagai berikut:

- Jika nilai signifikansi atau sig. $< 0,05$, maka data tidak homogen
- Jika nilai signifikansi atau sig. $> 0,05$, maka data homogen

Tabel 4. 13_Uji Homogenitas dengan metode *Levene Statistic*

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
0,883	2	12	0,439

Sumber: *Software SPSS*

Berdasarkan pengolahan *Software SPSS* dengan metode *Levene Statistic* didapatkan nilai signifikansi sebesar 0,439 yang berarti data pada setiap kelompok memiliki varian yang seragam. Hal ini mengacu pada syarat homogenitas di atas bahwa syarat data yang homogen adalah nilai signifikansi (Sig.) lebih dari 0,05.

4.4.4 Uji ANOVA (*Analysis of Variance*)

Tabel 4. 14 Hasil Uji ANOVA

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
<i>Between Groups</i>	0,027	2	.014		
<i>Within Groups</i>	0,001	12	.000	262.778	.000
Total	0,028	14			

Sumber: *Software SPSS*

Berdasarkan pengolahan untuk uji ANOVA yang dapat dilihat pada Tabel 4.15 untuk kolom Sig. atau nilai signifikansi yang mempunyai nilai 0,000. Dengan syarat uji ANOVA bahwa nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 rata-rata data antar kelompok berbeda secara signifikan, begitu juga sebaliknya dengan nilai signifikansi yang lebih besar daripada 0,05 maka rata-rata data antar kelompok akan sama.

Sehingga dengan nilai signifikansi sebesar 0,000 pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan dari uji ANOVA bahwa rata-rata data yang dimiliki oleh masing-masing variabel berbeda secara signifikan.

4.4.5 Uji *Post-Hoc* Metode *Tukey*

Uji *Post-Hoc* adalah uji lanjutan dari uji ANOVA dengan tujuan untuk mengetahui lebih dalam terkait pada kelompok atau variabel mana yang mempunyai rata-rata yang menyimpang secara signifikan dari keseluruhan data kelompok. Pada penelitian ini uji *Post-hoc* yang digunakan adalah metode *Tukey* atau HSD (*Honestly Significant Different*).

Tabel 4. 15 *Multiple Comparison* metode *Tukey HSD*

(I) Variasi Kemiringan Retak	(J) Variasi Kemiringan Retak	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
90°	60°	-0,0286	0,00454	0,000	-0,0407	-0,0165
	45°	-0,101	0,00454	0,000	-0,1131	-0,0889
60°	90°	0,0286	0,00454	0,000	0,01648	0,04072
	45°	-0,0724	0,00454	0,000	-0,0845	-0,0603
45°	90°	0,101	0,00454	0,000	0,08888	0,11312
	60°	0,0724	0,00454	0,000	0,06028	0,08452

Sumber: *Software SPSS*

Pada Tabel 4.16 terdapat pengolahan data penelitian ini dengan uji *Post-Hoc* dengan metode *tukey HSD* untuk mengetahui pada variasi sudut kemiringan retak mana yang memiliki perbedaan signifikan terhadap variabel yang lain. Berdasarkan data tersebut nilai signifikansi (Sig.) memiliki nilai yang indentik yaitu sebesar 0,000 pada keseluruhan variasi kemiringan retak. Sehingga dengan nilai signifikansi yang kurang dari 0,05, maka kesimpulan yang dapat diambil pada uji *Post-Hoc* ini adalah terdapat perbedaan pada semua variasi kemiringan retak.

Perbedaan tersebut dapat dilihat secara detail dalam nilai rata-rata pada setiap variasi kemiringan retak yang telah ditabulasikan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 16 *Homogeneous Subset*

Variasi Kemiringan Retak	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
90°	5	0,0808		
60°	5		0,1094	
45°	5			0,1818
Sig.		1	1	1

Sumber: *Software SPSS*

Pada Tabel 4.17 terdapat rata-rata hasil pembacaan kedalaman retak miring pada setiap variasi kemiringan retak yang dibedakan berdasarkan kolom *subset* yang menginterpretasikan perbedaan rata-rata yang dimiliki oleh masing-masing variasi kemiringan retak. Sehingga berdasarkan pengujian statistik, kesimpulan yang dapat dipetik adalah adanya perbedaan yang signifikan pada keseluruhan variasi kemiringan retak baik 90° terhadap 60° dan 45° begitu juga sebaliknya dengan variasi kemiringan retak 60° serta 45° terhadap masing-masing variasi kemiringan retak.

4.5 Analisa Waktu Gelombang Terhadap Kemiringan Retak

Sebagaimana diketahui dari hasil pembacaan kedalaman retak miring dengan menggunakan UPV dan beberapa analisa yang ada pada pembahasan sebelumnya, maka kesimpulan awal yang dapat diambil yaitu validitas UPV dalam mengestimasi kedalaman retak bersudut terutama pada retak yang terlalu kecil sudut kemiringannya akan mengurangi kevalidan alat UPV. Akan tetapi jauh lebih baik apabila terdapat beberapa analisa yang mungkin dapat menjadi informasi tambahan untuk mengetahui bentuk retak yang ada pada

beton, salah satunya adalah analisa terkait waktu tempuh gelombang pertama maupun kedua (t_1, t_2).

Dalam memperkirakan kedalaman retak pada alat UPV, nilai waktu tempuh gelombang merupakan faktor utama dalam memberikan estimasi kedalaman retak, karena hal ini kembali kepada teori bahwa untuk mengetahui jarak tempuh gelombang maka perlu adanya nilai kecepatan gelombang beserta waktu tempuh gelombangnya. Maka dari itu perlunya menyelidiki pada variabel waktu tempuh gelombang pada masing-masing variasi sudut kemiringan retak.

4.5.1 Hasil Waktu Tempuh Gelombang tiap Variasi Kemiringan Retak

4.5.1.1 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90

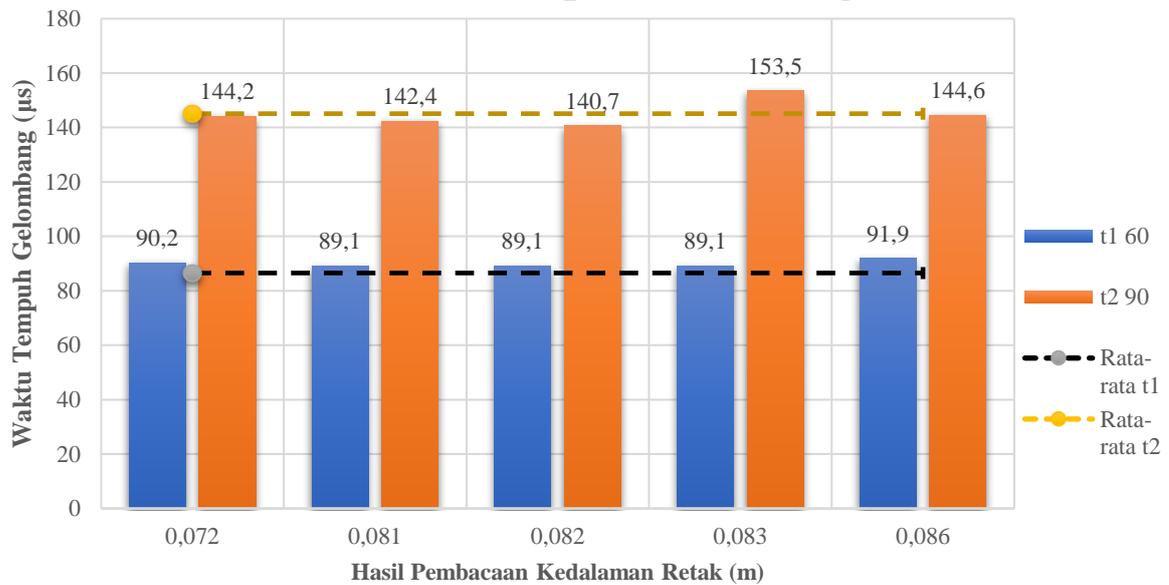
Dalam Tabel 4.17 dan Gambar 4.19 dapat dilihat data yang didapatkan dari hasil pembacaan kedalaman retak pada benda uji retak miring 90° .

Tabel 4. 17 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90

Benda Uji	b	Hasil Pembacaan Kedalaman Retak	t_1	t_2	t_1/t_2
RM90	(m)	(m)	(μ s)	(μ s)	
	0,1	0,072	83,7	144,2	0,580
	0,1	0,081	84,9	142,4	0,596
	0,1	0,082	84,2	140,7	0,598
	0,1	0,083	92,1	153,5	0,600
	0,1	0,086	87,7	144,6	0,607
Rata-Rata		0,0808	86,52	145,08	0,596

Sumber: Hasil Penelitian

Grafik Waktu Tempuh Gelombang R90



Gambar 4.19 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM90

Dalam pemamaparan data waktu tempuh gelombang pada gambar 4.19 dapat diketahui bahwa waktu tempuh gelombang maksimum baik $t1$ maupun $t2$ menghasilkan estimasi kedalaman retak 0,083 m, dengan nilai $t1$ sebesar 92,1 μs dan nilai $t2$ sebesar 153,5 μs . Sedangkan untuk nilai minimum $t1$ dengan nilai sebesar 83,7 μs yang diiringi dengan hasil $t2$ sebesar 144,2 μs menghasilkan nilai estimasi kedalaman retak sebesar 0,072 padahal nilai $t2$ tersebut tidak berada pada posisi terbawah atau minimum dari keseluruhan hasil pembacaan kedalaman retak miring 90°.

Dari pernyataan diatas maka pada benda uji dengan sudut retak 90° perolehan data waktu gelombang maksimum dan minimum tidak konsisten terjadi pada satu kali pembacaan serta tidak dapat menjadi patokan dengan waktu gelombang yang minimum dapat menghasilkan perkiraan kedalaman retak minimum, begitu juga sebaliknya dengan waktu gelombang maksimum. Namun dari hasil perbandingan antara $t1$ dengan $t2$ dapat dilihat bahwa terdapat keseragaman data dengan rentang yang tidak begitu berbeda secara signifikan yaitu 0,580 – 0,607 dengan rata-rata sebesar 0,596.

4.5.1.2 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60

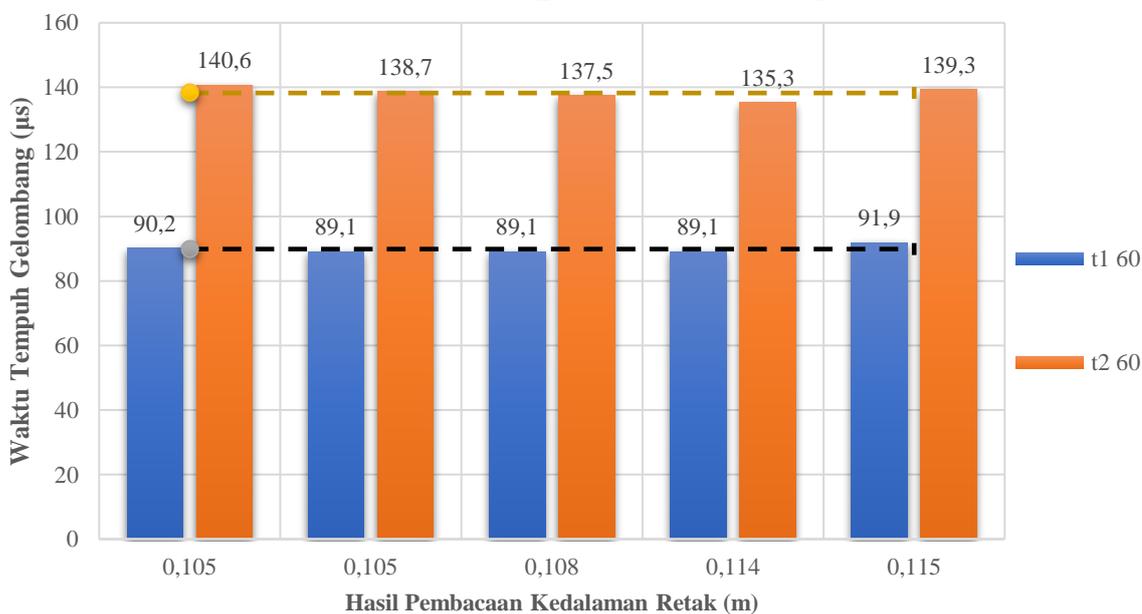
Dari hasil pengujian UPV untuk kedalaman retak miring 60° dapat dilihat pada Tabel 4.18 beserta grafiknya pada Gambar 4.20.

Tabel 4.18 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60

Benda Uji	b	Hasil Pembacaan Kedalaman Retak	$t1$	$t2$	$t1/t2$
	(m)	(m)	(μ s)	(μ s)	
RM60	0,1	0,105	90,2	140,6	0,642
	0,1	0,105	89,1	138,7	0,642
	0,1	0,108	89,1	137,5	0,648
	0,1	0,114	89,1	135,3	0,659
	0,1	0,115	91,9	139,3	0,660
Rata-Rata		0,1094	89,88	138,28	0,650

Sumber: Hasil Penelitian

Grafik Waktu Tempuh Gelombang RM60



Gambar 4.20 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM60

Pada benda uji RM60 untuk analisa waktu gelombang dapat dilihat dalam tabel maupun grafik pada gambar 4.20 bahwa data $t1$ maksimum dan $t2$ maksimum tidak berada pada satu pembacaan. Nilai $t1$ maksimum sebesar 91,9 μ s berada dalam pengujian yang menghasilkan hasil pembacaan kedalaman retak 0,115 m serta untuk

nilai t_2 maksimum didapatkan sebesar 140,6 μs pada pengujian yang menghasilkan estimasi kedalaman retak 0,105 m. Sedangkan untuk nilai t_1 dan t_2 minimum berada pada satu rangkaian pengujian yang menghasilkan kedalaman retak sebesar 0,114 m dengan nilai t_1 minimum sebesar 0,108 μs dan t_2 minimum sebesar 135,3 μs . Dalam hal ini sama halnya dengan benda uji RM90 yang mana tidak terdapat korelasi antara nilai waktu tempuh gelombang maksimum maupun minimum terhadap hasil pembacaan kedalaman retak.

Sehingga dari pembahasan di atas dapat dipastikan bahwa waktu tempuh gelombang maksimum tidak menjamin pembacaan kedalaman retak yang besar. Sedangkan untuk nilai waktu tempuh gelombang apabila dirata-rata akan mendapat nilai t_1 sebesar 89,88 μs dan t_2 sebesar 138,28 μs . Selain itu terdapat pula dalam Tabel 4.18 pada kolom t_1/t_2 yang menyediakan hasil perbandingan waktu tempuh gelombang yang didapati dengan hasil rata-rata sebesar 0,650.

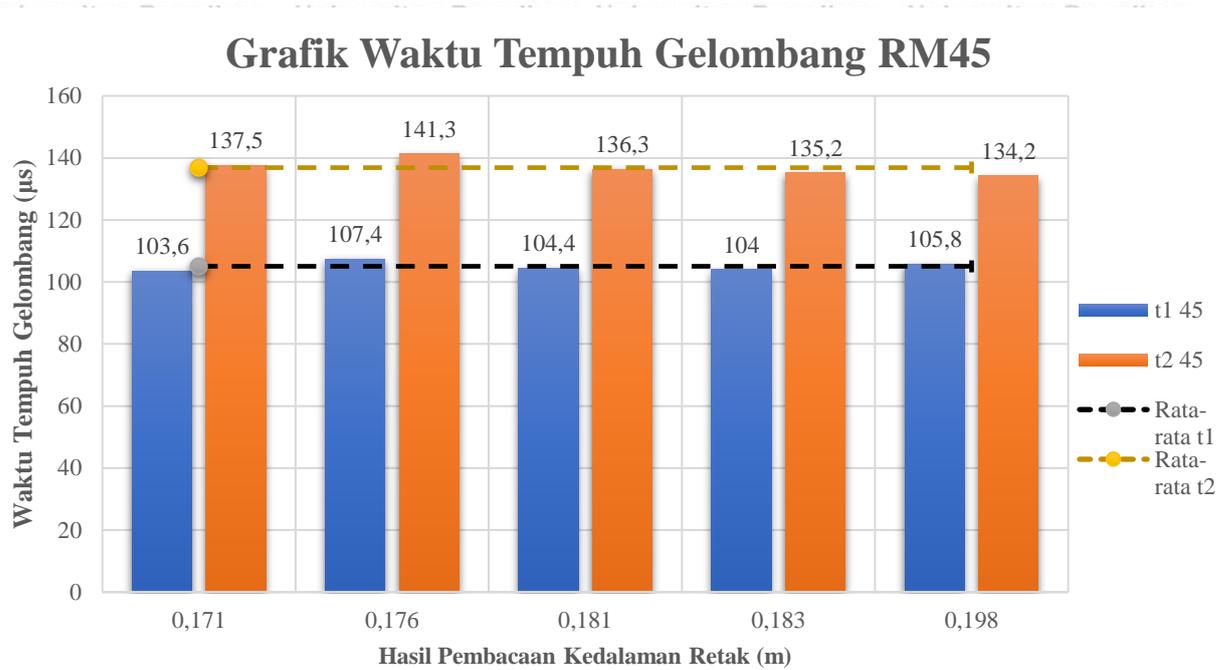
4.5.1.3 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45

Analisa waktu tempuh gelombang pada benda uji retak miring 45° dapat dilihat dalam tabel 4.19 beserta penggambaran data dalam grafik yang ada pada Gambar 4.21.

Tabel 4. 19 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45

Benda Uji	b	Hasil Pembacaan Kedalaman Retak	t_1	t_2	t_1/t_2
	(m)	(m)	(μs)	(μs)	
RM45	0,1	0,171	103,6	137,5	0,753
	0,1	0,176	107,4	141,3	0,760
	0,1	0,181	104,4	136,3	0,766
	0,1	0,183	104	135,2	0,769
	0,1	0,198	105,8	134,2	0,788
Rata-Rata		0,1818	105,04	136,9	0,767

Sumber: Hasil Penelitian



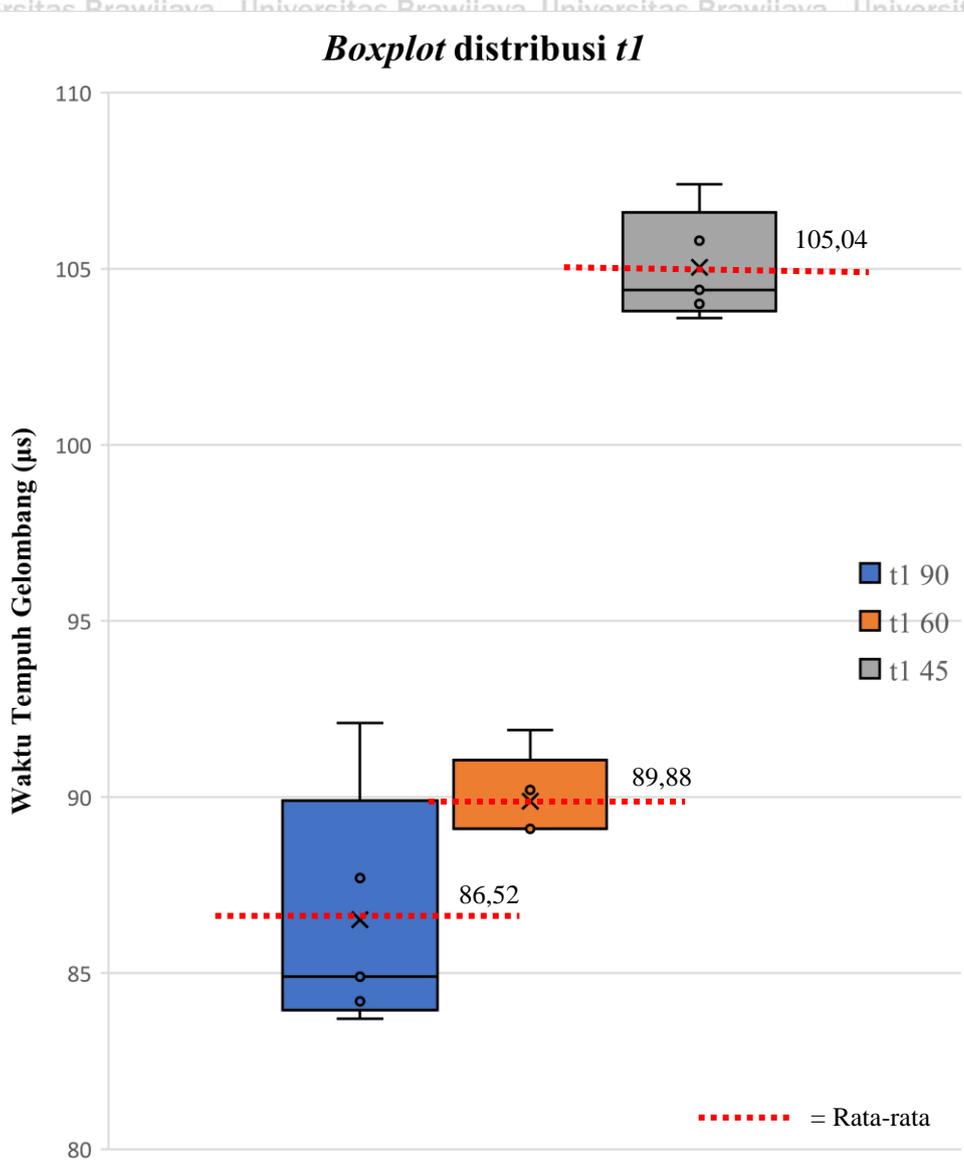
Gambar 4. 21 Hasil Waktu Tempuh Gelombang RM45

Dari data yang telah ditampilkan terkait waktu tempuh gelombang pada benda uji RM45 dapat diketahui bahwa waktu tempuh gelombang maksimum baik $t1$ maupun $t2$ menghasilkan estimasi kedalaman retak 0,176 m, dengan nilai $t1$ sebesar 107,4 μs dan nilai $t2$ sebesar 141,3 μs . Sedangkan untuk nilai minimum $t1$ dengan nilai sebesar 103,6 μs yang didampingi dengan hasil $t2$ sebesar 137,5 μs menghasilkan nilai estimasi kedalaman retak sebesar 0,171 padahal nilai $t2$ tersebut bukan nilai minimum dari hasil waktu tempuh gelombang RM45, melainkan $t2$ minimum didapatkan dengan nilai 134,2 μs pada hasil pembacaan kedalaman retak terbesar yaitu 0,198 m.

Dari pernyataan sebelumnya maka pada benda uji dengan sudut retak 45° perolehan data waktu gelombang maksimum dan minimum tidak konsisten terjadi pada satu kali pembacaan serta tidak dapat menjadi patokan dengan waktu gelombang yang minimum dapat menghasilkan perkiraan kedalaman retak minimum, begitu juga sebaliknya dengan waktu gelombang maksimum. Selain itu untuk nilai waktu tempuh gelombang apabila dirata-rata akan mendapat nilai $t1$ sebesar 105,04 μs dan $t2$ sebesar 136,9 μs . Selain itu terdapat pula dalam Tabel 4.18 pada kolom $t1/t2$ yang memaparkan hasil perbandingan waktu tempuh gelombang yang didapati dengan perolehan hasil yang berada dalam rentang 0,753 sampai 0,788 dengan rata-rata 0,767.

4.5.2 Perbandingan Hasil Waktu Tempuh Gelombang

Dari hasil analisa waktu tempuh gelombang terdapat beberapa poin yang menjadi perbedaan pada tiap-tiap variasi kemiringan retak. Yang pertama dapat dilihat dalam Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 mengenai perbandingan distribusi waktu tempuh gelombang.



Gambar 4. 22 *Boxplot* distribusi t_l

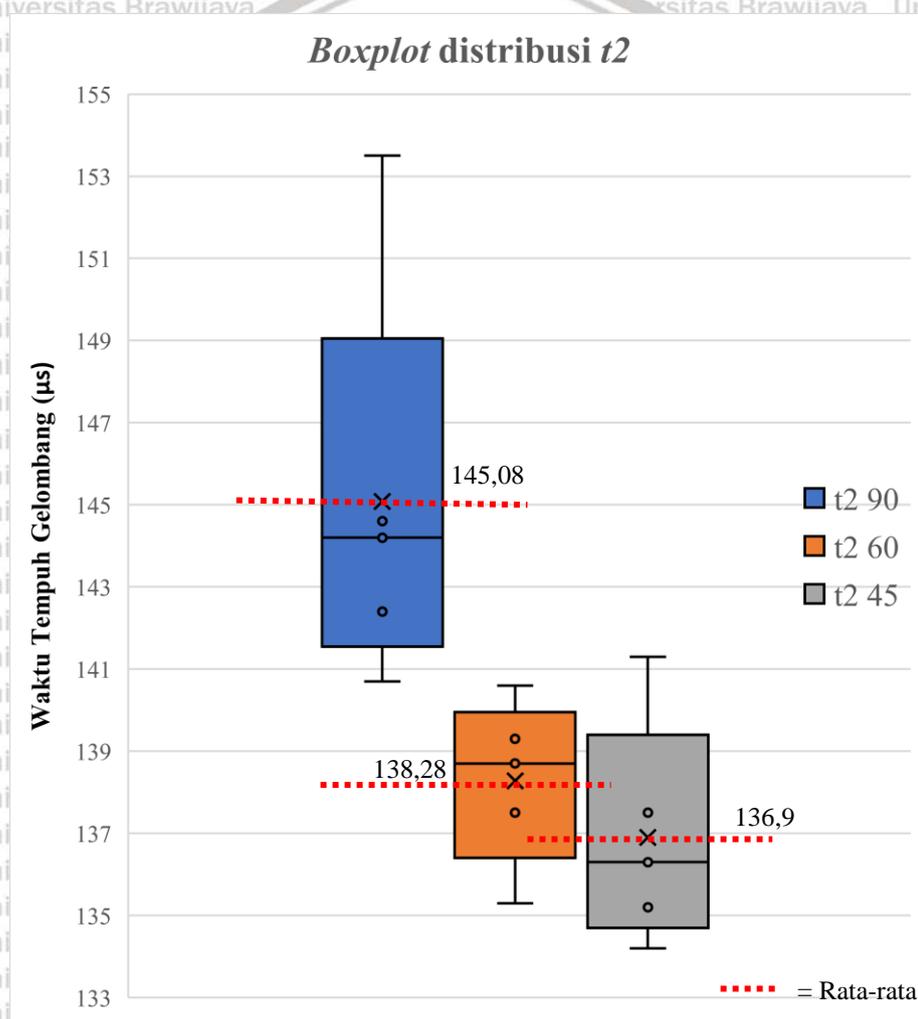
Setelah melihat dari hasil distribusi yang ada pada Gambar 4.22 terlihat bahwa hasil rata-rata dari setiap variasi sudut kemiringan retak berbeda secara signifikan. Yang mana rata-rata dari t_l RM90 mempunyai nilai terendah dengan hasil 86,52 μ s yang mengindikasikan bahwa waktu tempuh gelombang t_l RM90 adalah tercepat dibandingkan variasi lainnya. Pada benda uji RM60 perolehan rata-rata t_l sebesar 89,88

us yang sedikit lebih besar daripada RM90, sedangkan pada benda uji RM45 terlihat perbedaan yang besar dari hasil rata-rata $t1$ yaitu sebesar $105,4 \mu\text{s}$ yang berarti dalam proses mencapainya gelombang $t1$ dari *transmitter* ke *receiver* benda uji RM45 membutuhkan waktu yang paling lama.

Sebagaimana dari hasil perbandingan perolehan nilai waktu gelombang pada $t1$ dapat dikatakan bahwa semakin kecil sudut kemiringan retak yang ada dalam beton, nilai perolehan $t1$ akan semakin besar atau waktu tempuh gelombang akan semakin lama.

Tetapi hal ini hanya terjadi pada nilai rata-rata $t1$, beda halnya dengan rata-rata $t2$.

Perbandingan distribusi waktu $t2$ dapat dilihat dalam *boxplot* yang tertera dalam Gambar 4.23.



Gambar 4. 23 Boxplot distribusi $t2$

Dengan hasil rata-rata $t2$ yang dapat ditinjau pada gambar 4.23 terlihat bahwa nilai rata-rata $t2$ berkebalikan dengan rata-rata $t1$. Sehingga penarikan kesimpulan pada

perbandingan t_2 juga berbeda dengan t_1 , yang berarti semakin landai kemiringan retak justru menjadikan waktu tempuh gelombang semakin cepat, sebaliknya semakin curam atau bahkan tegak membuat t_2 semakin besar atau waktu tempuh gelombang semakin lama.

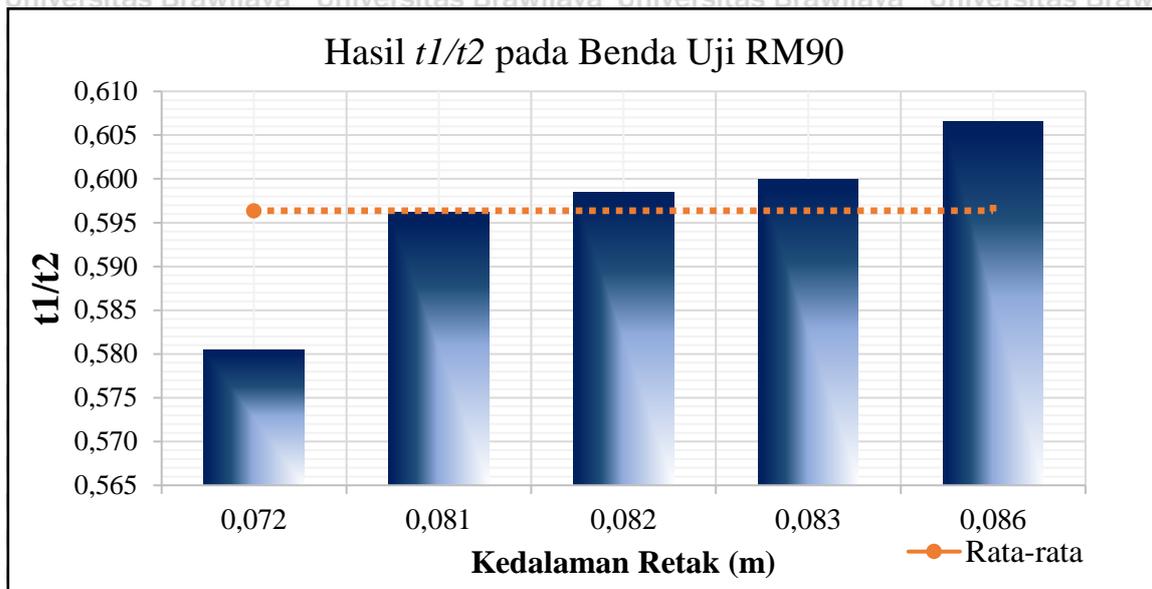
Perhitungan rata-rata hasil perolehan t_2 pada benda uji RM90 sebesar 145,08 μ s. Pada benda uji RM60 rata-rata yang diperoleh sebesar 138,28 μ s yang berbeda signifikan lebih rendah daripada benda uji RM90, sedangkan pada benda uji RM45 rata-rata nilai t_2 lebih cepat daripada RM60 dengan hasil sebesar 136,9 μ s.

Sebagaimana telah dipaparkan sebelumnya bahwa terdapat ketidak-konsistenan nilai waktu tempuh gelombang yang terjadi dalam satu kali pengujian yaitu nilai t_1 dan t_2 pada masing-masing variasi retak miring. Contohnya dapat dilihat dalam gambar 4.22 – 4.23 pada benda uji RM90 yang mana pada rata-rata nilai t_1 didapatkan hasil yang paling kecil dibandingkan dengan variasi lainnya, sedangkan pada rata-rata nilai t_2 mendapatkan hasil yang paling besar.

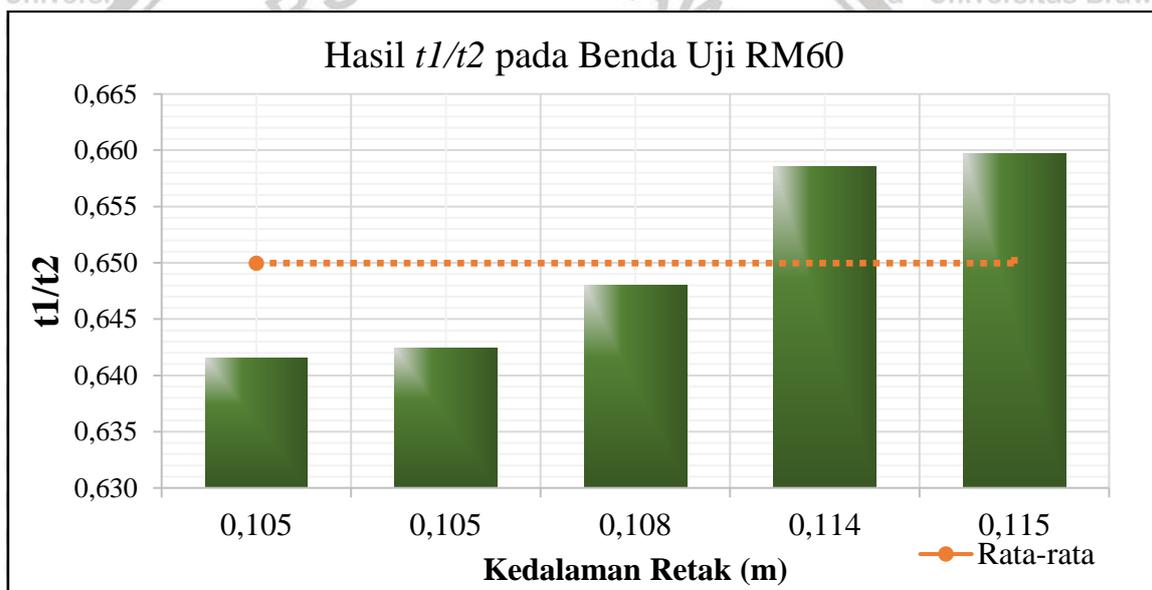
Sehingga diperlukan analisa terhadap perbandingan t_1 dengan t_2 pada setiap kali pengujian, sebab dengan mengetahui nilai t_1/t_2 disinyalir dapat mengetahui penyebab adanya ketidak-konsistenan waktu tempuh gelombang, selain itu juga berfungsi untuk mengetahui perbedaan waktu tempuh gelombang yang disorotkan pada masing-masing variasi retak miring. Dalam hal ini nilai rasio antara t_1 dengan t_2 dapat dilihat dalam Tabel 4.20 yang telah diilustrasikan dalam grafik yang ada pada Gambar 4.24 – 4.25.

Tabel 4. 20 Rekapitulasi nilai t_1/t_2

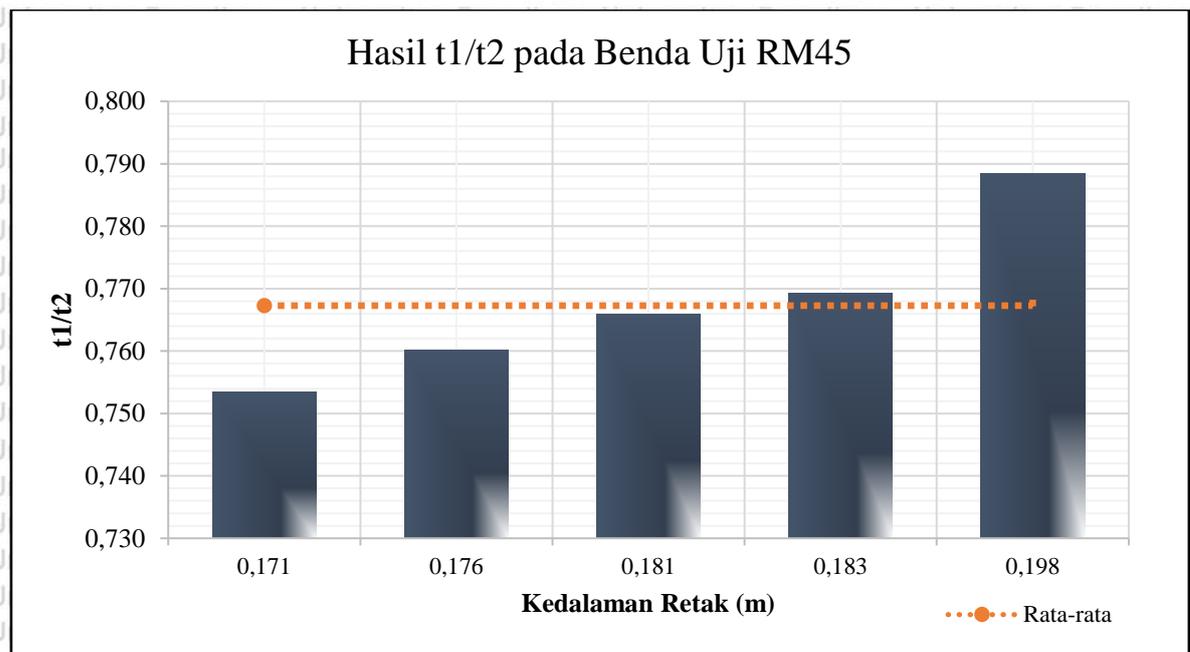
Benda Uji	Hasil Pembacaan Kedalaman Retak (m)	t_1/t_2	rata-rata t_1/t_2
RM90	0,072	0,580	0,596
	0,081	0,596	
	0,082	0,598	
	0,083	0,600	
	0,086	0,607	
RM60	0,105	0,642	0,650
	0,105	0,642	
	0,108	0,648	
	0,114	0,659	
	0,115	0,660	
RM45	0,171	0,753	0,767
	0,176	0,760	
	0,181	0,766	
	0,183	0,769	
	0,198	0,788	



Gambar 4.24 Grafik Hasil $t1/t2$ pada Benda Uji RM90



Gambar 4. 25 Grafik Hasil $t1/t2$ pada Benda Uji RM60



Gambar 4. 26 Grafik Hasil $t1/t2$ pada Benda Uji RM90

Setelah memvisualisasikan data $t1/t2$ pada masing-masing variasi kemiringan retak, terdapat hasil $t1/t2$ yang berbeda akibat adanya retak bersudut atau retak miring. Pada benda uji RM90 rata-rata yang didapatkan dalam perhitungan sebesar 0,596, untuk benda uji RM60 nilai rata-rata $t1/t2$ didapatkan sebesar 0,650, sedangkan pada benda uji dengan kemiringan retak 45° didapatkan nilai rata-rata $t1/t2$ sebesar 0,767.

Dari identifikasi hasil $t1/t2$ yang mana didapatkan hasil rata-rata yang berbeda dalam setiap variasi kemiringan retak. Maka dengan begitu perbandingan nilai $t1$ dengan $t2$ dapat dijadikan salah satu tolok ukur yang membedakan antara retak bersudut dengan retak vertikal, dengan catatan pada bab-bab sebelumnya bahwa kedalaman vertikal pada masing-masing variasi adalah sama yaitu 0,8 m.

Adanya perbedaan waktu tempuh gelombang tersebut disebabkan oleh perbedaan sudut pancaran gelombang yang dipengaruhi oleh sudut kemiringan retak. Sudut tersebut otomatis akan mempengaruhi jalur gelombang yang mana semakin kecil sudut pancaran gelombang maka semakin panjang jalur gelombangnya. Dalam kasus ini pada benda uji 45° memiliki sudut pancaran gelombang paling kecil diantara benda uji lainnya, sehingga waktu tempuh gelombang yang didapatkan semakin besar. Sudut pancaran gelombang tersebut juga berpengaruh terhadap kedua nilai waktu tempuh gelombang $t1$ dan $t2$. Hal tersebut dapat menjadi alasan mengenai timbulnya perbedaan nilai $t1/t2$ terhadap variasi sudut kemiringan retak.

Selain sudut pancaran gelombang, ada juga faktor yang mempengaruhi perbedaan waktu tempuh gelombang, yaitu keadaan fisik benda uji seperti adanya rongga-rongga yang dapat berdampak pada waktu tempuh gelombang. Sebab adanya rongga memaksa gelombang untuk merambat disekeliling rongga tersebut sehingga proses tersebut menjadikan jalur gelombang bertambah panjang dari yang seharusnya.



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisa pada bab sebelumnya, maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* dengan menggunakan alat *PUNDIT PL-200*, yang mana pada fitur *crack depth* mengacu pada kaidah BS 1881 dapat dikatakan bahwa pada fitur ini tidak dapat mengestimasi adanya retak bersudut atau miring. Hal tersebut didukung oleh adanya hasil kesalahan relatif sebagai berikut:
 - Kesalahan relatif rata-rata pada benda uji retak miring 90° terhadap retak vertikal aktual adalah 5%
 - Kesalahan relatif rata-rata pada benda uji retak miring 60° terhadap retak vertikal aktual adalah 37%, sedangkan terhadap retak miring aktual adalah 14%
 - Kesalahan relatif rata-rata pada benda uji retak miring 45° terhadap retak vertikal aktual adalah 127%, sedangkan terhadap retak miring aktual adalah 61%

Berdasarkan hasil kesalahan relatif dapat diambil kesimpulan bahwa pada retak yang tegak lurus terhadap permukaan (90°) hanya menghasilkan kesalahan relatif sebesar 5%. Sedangkan pada beton dengan retak miring mempunyai hasil yang tergantung pada sudut kemiringannya, semakin kecil sudut kemiringan retak maka akan semakin tidak valid pembacaan kedalaman retak pada UPV.

2. Berdasarkan hasil analisa statistik terhadap hasil pembacaan kedalaman retak miring dengan menggunakan analisa *One Way Anova* beserta nilai α yang digunakan 0,05, didapatkan hasil analisa yang mengutarakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok. Selanjutnya dengan analisa menggunakan uji *Post-Hoc* kesemua kelompok memiliki perbedaan rata-rata hasil pembacaan kedalaman retak miring secara signifikan, dengan rata-rata sebagai berikut:

- Rata-rata pembacaan kedalaman retak 90° sebesar 0,0808 m

– Rata-rata pembacaan kedalaman retak 60° sebesar 0,1094 m

– Rata-rata pembacaan kedalaman retak 45° sebesar 0,1818 m

3. Berdasarkan hasil analisa waktu tempuh gelombang, terdapat perbedaan waktu tempuh gelombang yang dipengaruhi oleh adanya retak bersudut atau miring dalam beton. Perbedaan tersebut terjadi dalam beberapa kasus, antara lain:

– Adanya perbedaan dari hasil rata-rata waktu tempuh gelombang pertama (t_1) pada masing-masing variasi kemiringan retak, begitu juga dengan rata-rata pada waktu tempuh gelombang kedua (t_2).

– Adanya perbedaan antar variasi kemiringan retak terhadap nilai t_1/t_2 .

Dengan adanya perbedaan waktu tempuh gelombang yang dipengaruhi kemiringan retak pada beton dapat membantu dalam mencitrakan pola retak yang terjadi. Namun dengan catatan bahwa apabila pola retak itu miring maka akan terjadi kegalatan pada pembacaan kedalaman retak, sehingga berimbas pada ketidakakuratannya hasil pembacaan kedalaman retak pada UPV.

5.2 Saran

Setelah melakukan penelitian beserta beberapa analisa data, terdapat beberapa saran yang muncul untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Dalam penelitian ini memiliki keterbatasan berupa jumlah benda uji dikarenakan suatu kondisi, maka untuk penelitian selanjutnya perlu adanya penambahan jumlah benda uji pada masing-masing variasi untuk mengurangi peluang terjadinya kesalahan dalam penelitian.

2. Pada penelitian selanjutnya perlu untuk meneliti adanya perbedaan yang dihasilkan dalam berbagai sudut yang lebih bervariasi dan penggunaan metode pembacaan kedalaman retak miring yang berbeda.

3. Lakukan proses pengecoran dengan cermat dan kondusif agar mengurangi terjadinya ketidaksesuaian hasil benda uji dengan perencanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bachaki, 2019. *Experimental study of Crack Depth Measurement of Concrete with Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*. IOP Publishing.
- BS 1881: Bagian 203. *1986 Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete*. BSI. UK.
- Dwi, T. 2018. *Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak Pada Balok Beton dengan UPE dan UPV*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Jack C. McCormac. 2001. *Desain Beton Bertulang edisi kelima*, Jakarta: Erlangga
- Linggasari, D. 2019. *Memperkirakan Kedalaman Retak Pada Beton Menggunakan Gelombang Ultrasonik*. Tidak dipublikasikan. Jakarta: Universitas Tarumanegara Jakarta.
- Malhotra, V.M. & Carino, N.J. 2004. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- Mulyono, T. 2004. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Andi
- Nawy, Edward. G. 1990. *Reinforce Concrete a Fundamental Approach*. Terjemahan Bambang Suryoatmono. Bandung : PT. Eresco
- Nugraha, P & Antoni, 2004. *Teknologi Beton Dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi*. Yogyakarta: ANDI OFFSET
- Prima, A. 2013. *Akurasi Pengukuran Kedalaman Retak Pada Balok Beton Bertulang Menggunakan UPV dengan Variasi Tebal Selimut*. Tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- PROCEQ. 2014. *Pundit PL-200 and PE Ultrasonic Training*. Switzerland: Proceq.
- Tjokrodimuljo, K. 2007. *Teknologi Beton*. Yogyakarta: Biro Penerbit.
- Wijaya, U. 2019. *Petunjuk Dasar Pemeriksaan Bangunan Existing Metode Non-Destructive Test: Studi Kasus Bangunan Industrial Struktur Baja*. Buletin Profesi Insinyur 2(2) 063-068
- Wang, C & C.G Salmon. 1995. *Desain Beton Bertulang*. Erlangga: Jakarta.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Pembuatan Benda Uji



Gambar 1. Persiapan pengecoran (Penimbangan Material)



Gambar 2. Proses *Mixing* Material



Gambar 3. Pengujian *Slump*



(a)

(b)

Gambar 4. Proses Pemadatan beton segar (a) Pada benda uji balok; (b) Pada benda uji silinder



(a)

(b)

Gambar 5. Proses *Curing* (a) Pada benda uji balok; (b) Pada benda uji silinder



Gambar 6. Proses pelepasan bekisting

Lampiran 2. PENGUJIAN KUAT TEKAN

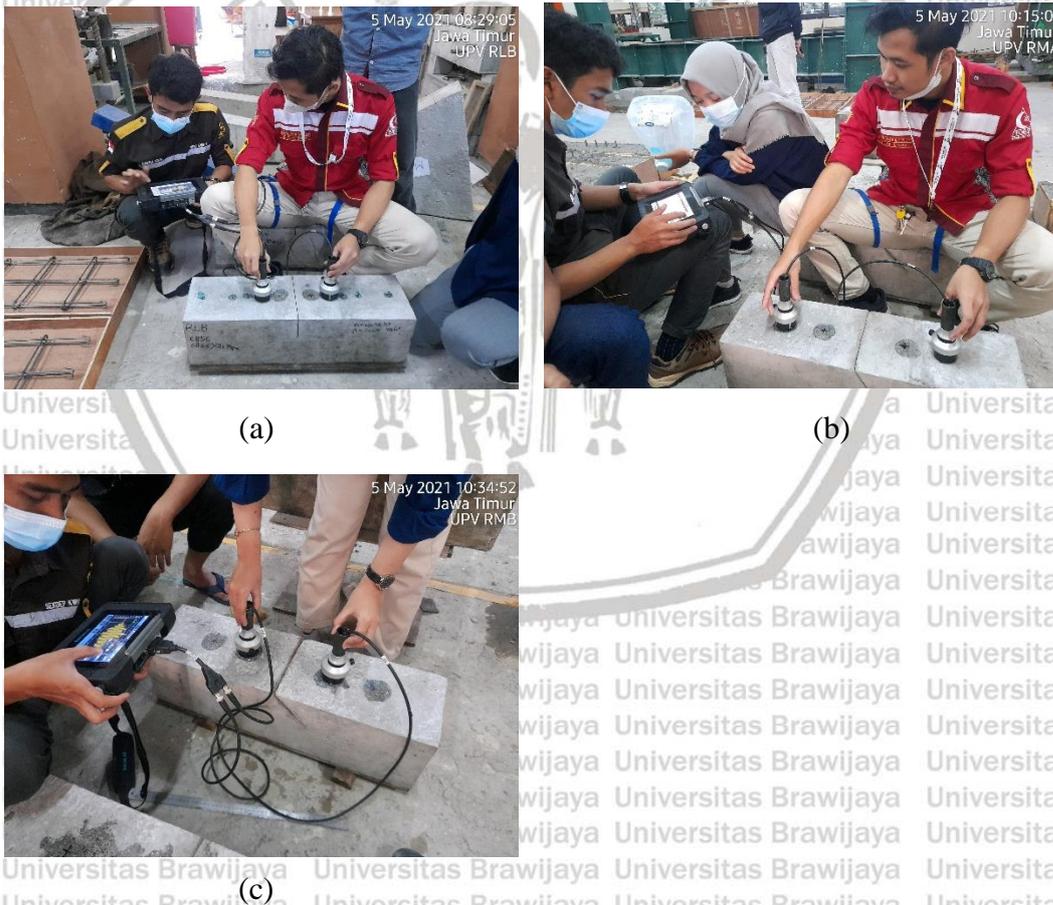


(a)

(b)

Gambar 7. Pengujian Kuat Tekan (a) Compressive Test; (b) Hammer Test

Lampiran 3. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)



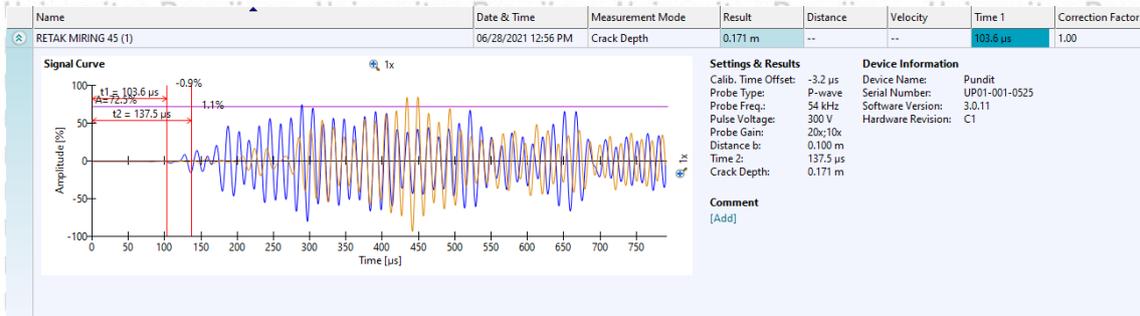
(a)

(b)

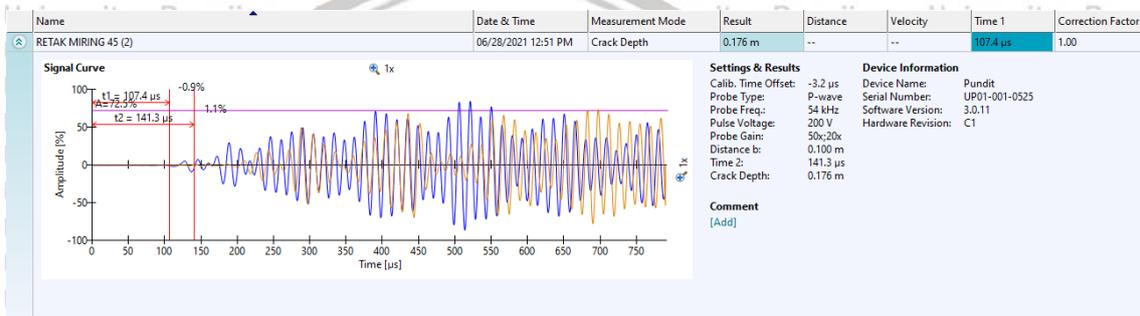
(c)

Gambar 8. Pengujian UPV *crack depth*; (a) pada benda uji RM 90; (b) pada benda uji RM 60; (c) pada benda uji RM 45

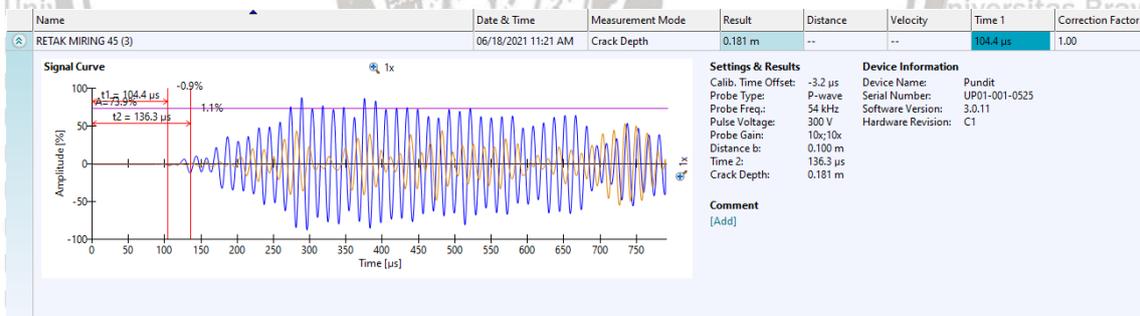
Lampiran 4. Hasil Pengujian pada PROCEQ



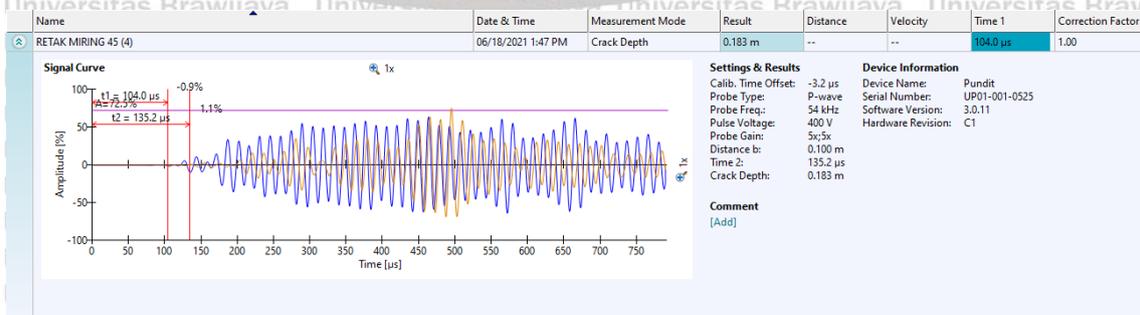
Gambar 9. Hasil Pengujian RM45 (1)



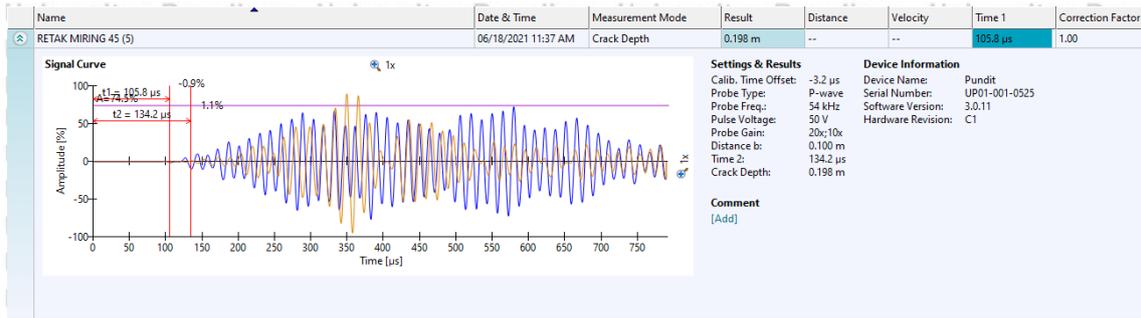
Gambar 10. Hasil Pengujian RM45 (2)



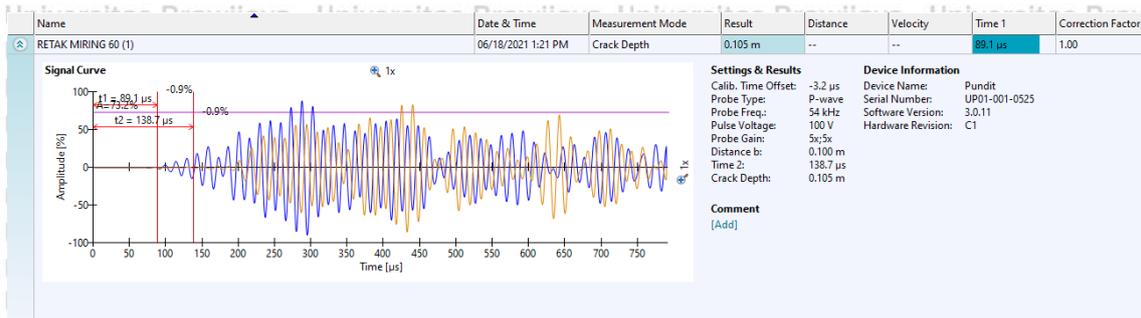
Gambar 11. Hasil Pengujian RM45 (3)



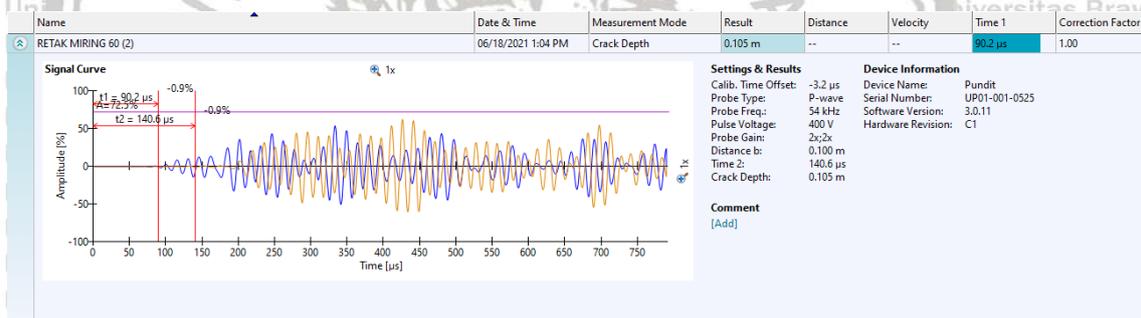
Gambar 12. Hasil Pengujian RM45 (4)



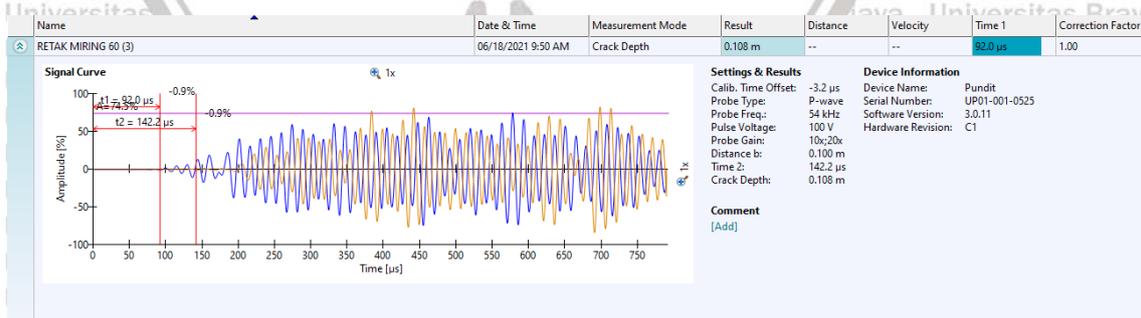
Gambar 13. Hasil Pengujian RM45 (5)



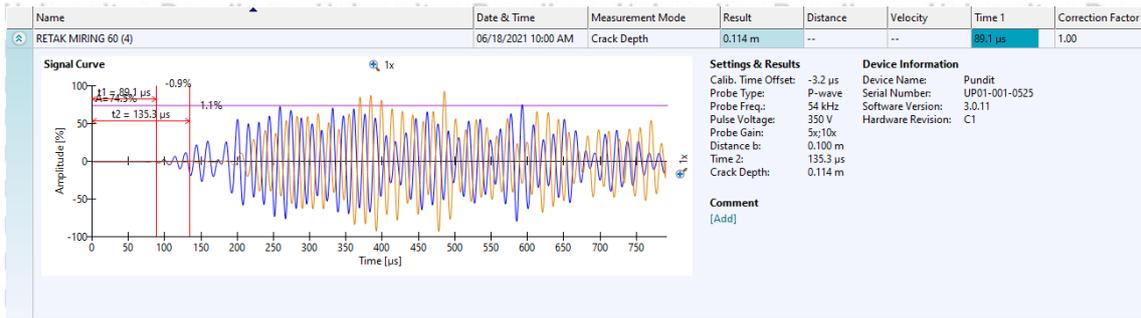
Gambar 14. Hasil Pengujian RM60 (1)



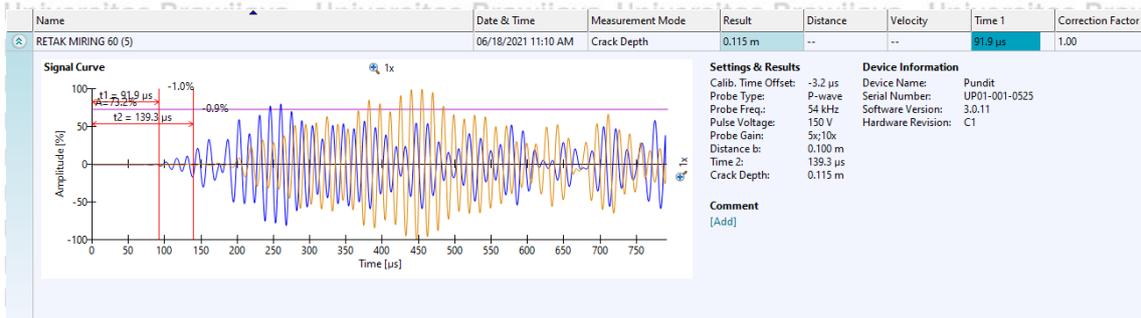
Gambar 15. Hasil Pengujian RM60 (2)



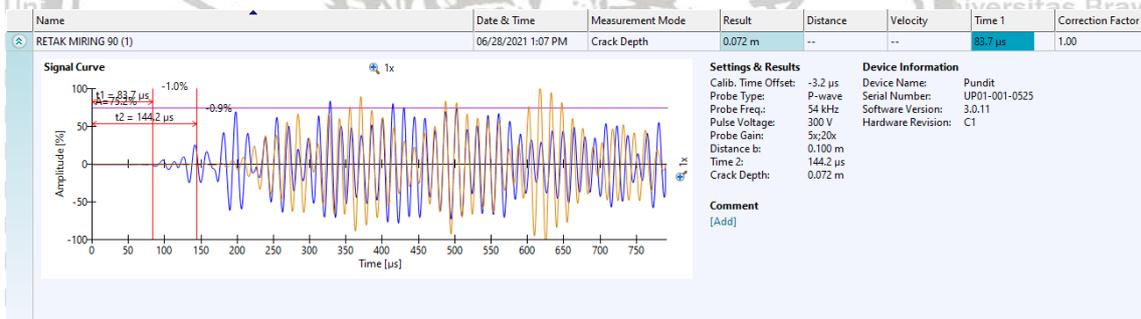
Gambar 16. Hasil Pengujian RM60 (3)



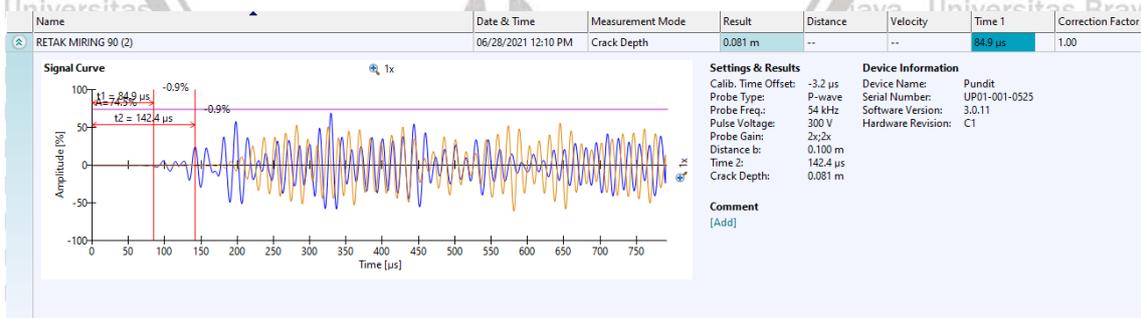
Gambar 17. Hasil Pengujian RM60 (4)



Gambar 18. Hasil Pengujian RM60 (5)

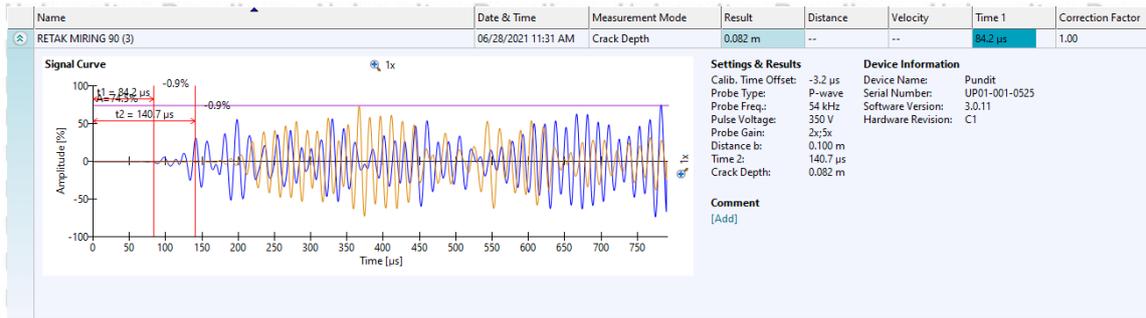


Gambar 19. Hasil Pengujian RM90 (1)

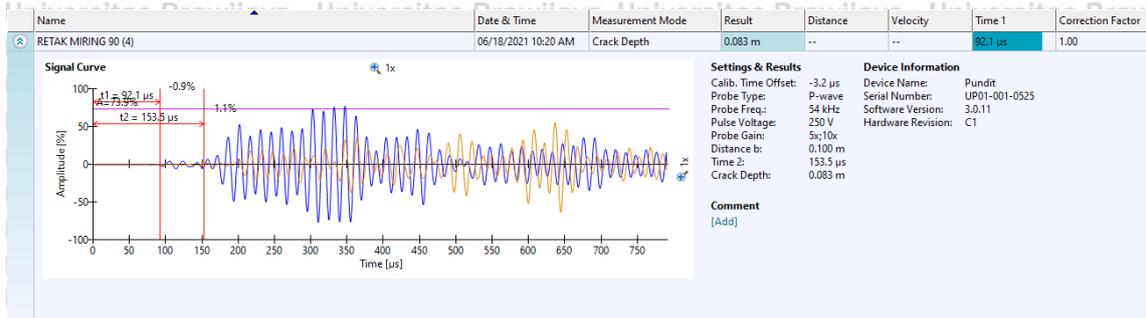


Gambar 20. Hasil Pengujian RM90 (2)

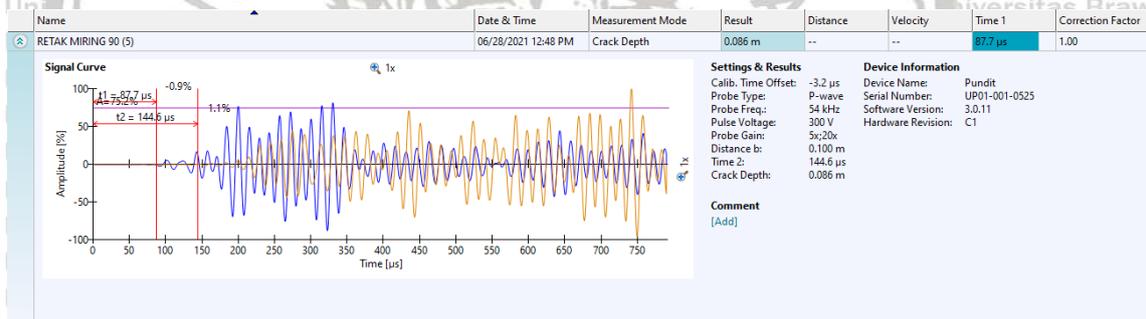




Gambar 21. Hasil Pengujian RM90 (3)



Gambar 22. Hasil Pengujian RM90 (4)



Gambar 23. Hasil Pengujian RM90 (5)