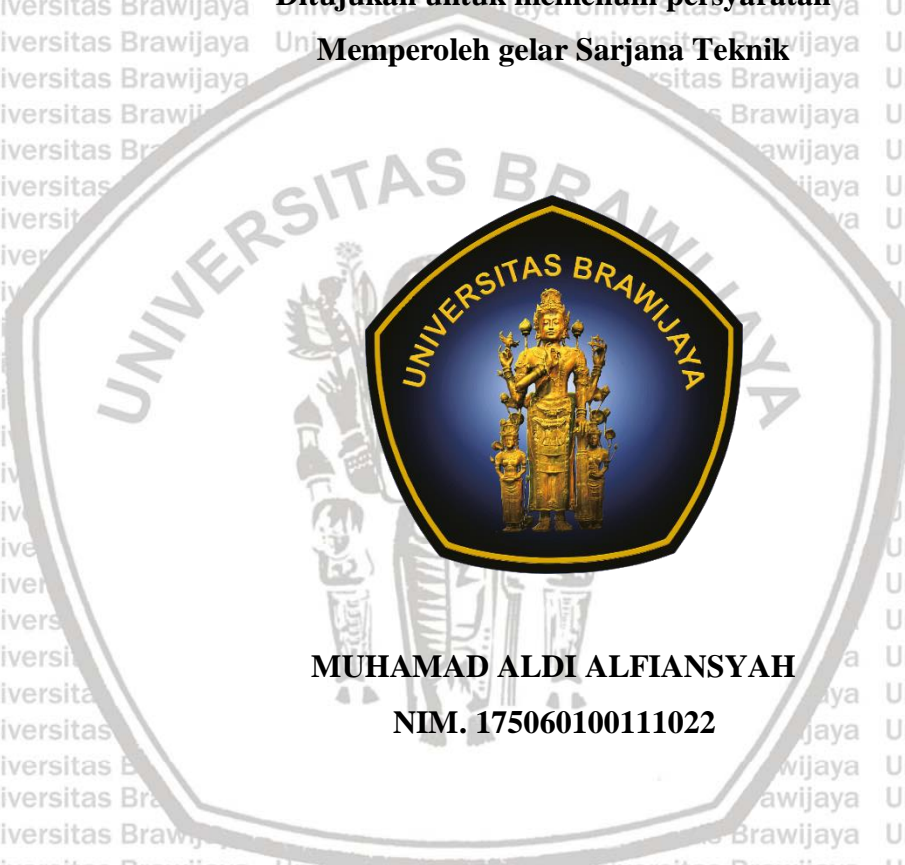


**PENGARUH KERETAKAN DAN INTRUSI AIR PADA BETON
TERHADAP MODULUS ELASTISITAS MENGGUNAKAN METODE
UPV (ULTRASONIC PULSE VELOCITY)**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

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



**MUHAMAD ALDI ALFIANSYAH
NIM. 175060100111022**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG**

2021





LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH KERETAKAN DAN INTRUSI AIR PADA BETON TERHADAP MODULUS ELASTISITAS MENGGUNAKAN METODE UPV (*ULTRASONIC PULSE VELOCITY*)

SKRIPSI TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



MUHAMAD ALDI ALFIANSYAH

NIM. 175060100111022

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 11 Agustus 2021

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Christin Remayanti N., ST., MT.
NIP. 19840325 201504 2 001

Ir. Ari Wibowo ST., MT., Ph.D
NIP. 197740619 200012 1 002

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:**

Pengaruh Keretakan dan Intrusi Air pada Beton Terhadap Modulus Elastisitas Menggunakan Metode UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Nama Mahasiswa : Muhamad Aldi Alfiansyah

NIM : 175060100111022

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

TIM DOSEN PENGUJI

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

Dosen Penguji II : Ir. Christin Remayanti Nainggolan, ST., MT.

Dosen Penguji III : Ir. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D

Tanggal Ujian : 28 Juli 2021

SK Penguji : 1298/UN10.F07/KP/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, 14 Agustus 2021

Muhamad Aldi Alfiansyah

175060100111022

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





*Kupersembahkan Karya Sederhana ini
untuk Bapak, Ibu dan Kakak atas semua
doa dan dukungan yang selalu
menyertai setiap langkahku.*





DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR..... **i**

DAFTAR ISI..... **iii**

DAFTAR TABEL..... **vii**

DAFTAR GAMBAR..... **ix**

DAFTAR LAMPIRAN..... **xiii**

RINGKASAN..... **xv**

SUMMARY..... **xvii**

BAB I PENDAHULUAN..... **1**

1.1 Latar Belakang..... **1**

1.2 Identifikasi Masalah..... **2**

1.3 Rumusan Masalah..... **2**

1.4 Batasan Masalah..... **2**

1.5 Tujuan..... **3**

1.6 Manfaat..... **3**

BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... **5**

2.1 Beton..... **5**

2.1.1 Agregat kasar..... **5**

2.1.2 Agregat halus..... **6**

2.1.3 Semen..... **6**

2.1.4 Air..... **7**

2.2 Perawatan Beton (*Curing*)..... **7**

2.3 Kuat Tekan Beton..... **8**

2.4 Keretakan pada Beton..... **9**

2.5 Intrusi Air pada Beton..... **9**

2.6 Modulus Elastisitas Beton..... **10**



2.6.1	Modulus Elastisitas Statis	10
2.6.2	Modulus Elastisitas Dinamis	11
2.6.3	<i>Poisson Ratio</i> Beton	12
2.7	<i>Non-Destructive Test</i> (NDT)	12
2.8	Pengujian Kuat Tekan dengan Metode <i>Schmidt Hammer Test</i>	13
2.9	<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	14
2.10	Metode Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	14
2.11	Gelombang Mekanik	15
2.12	Analisis Regresi	17
2.13	Hubungan Modulus Elastisitas dan Kecepatan Rambat Gelombang	19
2.14	Penelitian Terdahulu	20
BAB III METODE PENELITIAN		23
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	23
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	23
3.2.1	Alat Penelitian	23
3.2.2	Bahan Penelitian	24
3.3	Variabel Penelitian	24
3.4	Analisis Bahan	24
3.4.1	Agregat Kasar	24
3.4.2	Agregat Halus	24
3.4.3	Semen	25
3.4.4	Air	25
3.5	Tahap Penelitian	25
3.6	Rancangan Penelitian	26
3.7	Prosedur Penelitian	29
3.7.1	Pengujian Bahan Dasar	29
3.7.2	Pengujian Beton Segar	29



3.7.3	Pembuatan Benda Uji	30
3.7.4	Perawatan Benda Uji	30
3.7.5	Pengujian Kuat Tekan.....	31
3.7.6	Pengujian UPV (<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>).....	32
3.8	Metode Analisis Data.....	34
3.8.1	Metode Pengumpulan Data.....	34
3.8.2	Metode Pengolahan Data.....	35
3.9	Hipotesis.....	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		39
4.1	Pembuatan Benda Uji	39
4.1.1	Perencanaan Campuran Benda Uji	39
4.1.2	Proses Pembuatan Benda Uji	40
4.1.3	<i>Curing</i> Benda Uji.....	41
4.2	Pengujian Kuat Tekan.....	42
4.2.1	<i>Compression Testing Machine</i> (CTM)	43
4.2.2	<i>Rebound Schmidt Hammer Test</i>	45
4.3	Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis dengan <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	47
4.3.1	Balok Beton Normal.....	50
4.3.2	Balon Beton dengan Variasi Kedalaman Retak	52
4.3.3	Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Tanpa Air).....	57
4.3.4	Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Berisi Air).....	61
4.3.5	Perbandingan Modulus Elastisitas Dinamis Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	66
4.4	Hubungan antara Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik dan Modulus Elastisitas Dinamis.....	67
4.4.1	Balok Beton Normal.....	68
4.4.2	Balok Beton dengan Variasi Kedalaman Retak	70

4.4.3 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Tanpa Air) .	72
4.4.4 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Berisi Air) .	74
4.5 Hubungan antara Waktu Transmisi dan Amplitudo Gelombang.....	77
4.5.1 Gelombang Longitudinal (<i>P-Wave</i>).....	77
4.5.2 Gelombang Transversal (<i>S-Wave</i>).....	80
BAB V PENUTUP.....	83
5.1 Kesimpulan.....	83
5.2 Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA.....	87
LAMPIRAN.....	89



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Bahan baku pembuatan semen.....	6
Tabel 2.2	Penelitian Terdahulu.....	21
Tabel 3.1	Rancangan Benda Uji.....	27
Tabel 3.2	Hasil Pengujian Modulus Elastisitas dengan Alat UPV.....	35
Tabel 4.1	Kebutuhan material untuk setiap variasi benda uji.....	39
Tabel 4.2	Kode untuk setiap variasi benda uji.....	42
Tabel 4.3	Rekapitulasi hasil uji kuat tekan <i>Compression Testing Machine</i> (CTM).....	45
Tabel 4.4	Rekapitulasi hasil uji kuat tekan Hammer Test.....	46
Tabel 4.5	Perhitungan rapat massa (<i>Density</i>).....	48
Tabel 4.6	Hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB).....	50
Tabel 4.7	Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal (BNB) ..	52
Tabel 4.8	Hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak	53
Tabel 4.9	Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi kedalaman retak	55
Tabel 4.10	Hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air).....	57
Tabel 4.11	Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)	59
Tabel 4.12	Hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air).....	62
Tabel 4.13	Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi diameter lubang (berisi air).....	63
Tabel 4.14	Persentase kenaikan nilai modulus elastisitas dinamis benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) kondisi tanpa air dan berisi air	65
Tabel 4.15	Persentase selisih nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal terhadap nilai modulus elastisitas dinamis setiap benda uji.....	66
Tabel 4.16	Hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal.....	68
Tabel 4.17	Hasil pengujian UPV benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak ..	70
Tabel 4.18	Hasil pengujian UPV benda uji balok beton intrusi air dengan variasi diameter lubang (lubang tanpa air).....	72
Tabel 4.19	Hasil pengujian UPV benda uji balok beton intrusi air dengan variasi diameter lubang (lubang berisi air)	74

Tabel 4.20 Rekapitulasi hasil analisis regresi linier hubungan antara cepat rambat gelombang ultrasonik dan modulus elastisitas dinamis..... 76

Tabel 4.21 Rekapitulasi parameter gelombang P setiap benda uji dari *software* PL-Link . 79

Tabel 4.22 Rekapitulasi parameter gelombang S setiap benda uji dari *software* PL-Link . 81



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Benda uji (silinder) kuat tekan beton.....	8
Gambar 2.2	Pola keretakan pada beton.....	9
Gambar 2.3	Mekanisme kerja dari alat <i>hammer test</i>	13
Gambar 2.4	Metode UPV (a) <i>Direct method</i> ; (b) <i>Semi-direct method</i> ; (c) <i>Indirect method</i>	15
Gambar 2.5	Ilustrasi gerak gelombang longitudinal (<i>P-wave</i>).....	16
Gambar 2.6	Ilustrasi gerak gelombang transversal (<i>S-wave</i>).....	16
Gambar 2.7	Ilustrasi gerak (a) Gelombang <i>Love</i> , (b) Gelombang <i>Reyleigh</i>	17
Gambar 2.8	Grafik regresi linier sederhana (a) nilai b positif; (b) nilai b negatif.....	18
Gambar 2.9	Skema Perhitungan modulus elastisitas dinamis	19
Gambar 3.1	Flowchart Penelitian	26
Gambar 3.2	Benda uji balok normal tanpa variasi	27
Gambar 3.3	Benda uji balok dengan variasi keretakan menggunakan akrilik dengan kedalaman retak (a) 4 cm; (b) 8 cm; (c) 12 cm.	28
Gambar 3.4	Benda uji balok dengan lubang (intrusi air) dengan variasi diameter lubang (a) 2 inci; (b) 3 inci; (c) 4 inci.....	28
Gambar 3.5	Benda uji silinder.....	29
Gambar 3.6	<i>Vertical Cylinder Capping Concrete</i> (Alat untuk proses capping).....	31
Gambar 3.7	<i>Compression Testing Machine</i>	32
Gambar 3.8	Pengujian UPV dengan metode langsung (<i>direct method</i>)	32
Gambar 3.9	Proses kalibrasi pada alat UPV.....	33
Gambar 3.10	Gel ultrasonik untuk transduser standar.....	33
Gambar 3.11	Transduser standar.....	33
Gambar 3.12	Gel echo ultrasonik untuk transduser <i>S-wave</i>	34
Gambar 3.13	Transduser <i>S-wave</i>	34
Gambar 3.14	Tampilan data hasil pengujian UPV dari <i>Software PL-Link</i>	35
Gambar 3.15	Grafik hubungan modulus elastisitas (E) dan cepat rambat gelombang P (V_p)	36
Gambar 3.16	Grafik hubungan modulus elastisitas (E) dan cepat rambat gelombang S (V_s)	36

Gambar 4.1 Proses pembuatan benda uji (a) Persiapan bekisting; (b) Pengadukan campuran beton dengan <i>concrete mixer</i> ; (c) Pengujian <i>Slump</i>	40
Gambar 4.2 Benda uji (a) Beton normal; (b) Beton dengan variasi kedalaman retak; (c) Beton dengan variasi diameter lubang; (d) Beton berbentuk silinder	41
Gambar 4.3 <i>Curing</i> benda uji (a) Balok; (b) Silinder.....	42
Gambar 4.4 <i>Capping</i> benda uji silinder.....	43
Gambar 4.5 Uji kuat tekan menggunakan <i>Compression Testing Machine</i>	44
Gambar 4.6 Uji Kuat Tekan <i>Hammer Test</i>	46
Gambar 4.7 Skema pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV (a) Transducer standar (<i>P-Wave</i>); (b) <i>S-Wave transducer</i>	47
Gambar 4.8 Contoh pengambilan V_p dan V_s pada software PL-Link.....	49
Gambar 4.9 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton normal (a) Transducer standar (<i>P-wave</i>); (b) <i>Transducer S-wave</i>	50
Gambar 4.10 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)	51
Gambar 4. 11 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)	51
Gambar 4.12 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)	52
Gambar 4.13 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi kedalaman retak (a) Transducer standar (<i>P-wave</i>); (b) <i>Transducer S-wave</i>	53
Gambar 4.14 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak	54
Gambar 4.15 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak	54
Gambar 4.16 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak.....	56
Gambar 4.17 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi diameter lubang (tanpa air), (a) Transducer standar (<i>P-wave</i>); (b) <i>Transducer S-wave</i>	57
Gambar 4.18 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air).....	58
Gambar 4.19 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air).....	58

Gambar 4.20 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)	60
Gambar 4.21 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi diameter lubang (berisi air), (a) Transducer standar (<i>P-wave</i>); (b) <i>Transducer S-wave</i>	61
Gambar 4.22 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)	62
Gambar 4.23 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)	62
Gambar 4.24 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)	64
Gambar 4.25 Gelombang ultrasonik ketika melewati rongga pada beton	65
Gambar 4.26 Grafik perbandingan nilai rata-rata modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV pada setiap benda uji	67
Gambar 4.27 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton normal	69
Gambar 4.28 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton normal	69
Gambar 4.29 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak	71
Gambar 4.30 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak	71
Gambar 4.31 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air	73
Gambar 4.32 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air	73
Gambar 4.33 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air	75
Gambar 4.34 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air	75
Gambar 4.35 Contoh pengambilan parameter t_0 pada gelombang P	77
Gambar 4.36 Contoh pengambilan parameter t_1 dan A_1 pada gelombang P	78
Gambar 4.37 Contoh pengambilan parameter t_{maks} dan A_{maks} pada gelombang P	78
Gambar 4.38 Contoh pengambilan parameter t_2 dan A_2 pada gelombang P	78

Gambar 4.39 Contoh pengambilan parameter t_1 dan A_1 pada gelombang S 80

Gambar 4.40 Contoh pengambilan parameter t_{maks} dan A_{maks} pada gelombang S 80



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Pembuatan Benda Uji.....	89
Lampiran 2.	<i>Curing</i> Benda Uji.....	93
Lampiran 3.	Pengujian Kuat Tekan.....	94
Lampiran 4.	Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis Menggunakan Metode <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	95
Lampiran 5.	<i>Waveform</i> Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	99



(halaman ini sengaja dikosongkan)



RINGKASAN

Muhamad Aldi Alfiansyah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Pengaruh Keretakan dan Intrusi Air pada Beton Terhadap Modulus Elastisitas Menggunakan Metode UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)*, Dosen Pembimbing : Ir. Christin Remayanti N., ST., MT. dan Ir. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D.

Beton merupakan material yang sangat umum digunakan di dunia konstruksi bangunan gedung, transportasi maupun bangunan air. Beton dipilih karena memiliki kekuatan tekan lebih tinggi dibanding dengan material konstruksi lainnya, namun kuat tariknya rendah sehingga mudah retak. Selain mudah retak, sifat alamiah beton yaitu menyerap air melalui pori-porinya (intrusi air) sehingga dapat merusak beton atau menurunkan kekuatan beton. Salah satu cara dalam mengetahui kualitas dan kekuatan beton adalah dengan pengujian modulus elastisitas.

Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan cara *Non-Destructive Test* (bersifat tidak merusak) yaitu metode UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) yang menghasilkan nilai modulus elastisitas dinamis. Penelitian ini menggunakan 7 benda uji balok beton tidak bertulang dimensi 20 cm x 20 cm x 70 cm dengan rincian 1 balok beton normal, 3 balok beton dengan keretakan (retak 4 cm, 8 cm, 12 cm) dan 3 balok beton dengan lubang intrusi air (diameter 2 inci, 3 inci, 4 inci). Pengujian UPV menggunakan metode langsung (*Direct*) dengan jarak antar transduser 70 cm. Untuk benda uji dengan lubang intrusi air, pengujian dilakukan pada 2 kondisi yaitu lubang tanpa air dan berisi air.

Dari pengujian UPV diperoleh data-data yaitu waktu tempuh, cepat rambat gelombang, rasio poisson dan modulus elastisitas dinamis. Nilai modulus elastisitas dinamis tertinggi diperoleh dari benda uji beton normal sebesar 24910,02 MPa dan terendah pada benda uji beton intrusi air dengan lubang 4 inci (kondisi tanpa air) sebesar 22042,84 MPa. Pada benda uji beton dengan keretakan dan benda uji intrusi air menunjukkan nilai modulus elastisitas semakin rendah seiring dengan bertambahnya panjang retak dan diameter lubang. Modulus elastisitas pada benda uji intrusi air (kondisi tanpa air) mengalami kenaikan sebesar 1,5% sampai 1,94% setelah diuji pada kondisi lubang berisi air.

Kata kunci : Cepat Rambat Gelombang, Intrusi Air, Modulus elastisitas dinamis, Retak, *Ultrasonic Pulse Velocity*.

(halaman ini sengaja dikosongkan)



SUMMARY

Muhamad Aldi Alfiansyah, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, July 2021, *The Effect of Crack and Water Intrusion in Concrete on the Modulus of Elasticity Using the UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) Method*, Supervisor : Ir. Christin Remayanti N., ST., MT. and Ir. Ari Wibowo, ST., MT., Ph.D.

Concrete is a very common material used in the world of building construction, transportation and water construction. Concrete was chosen because it has a higher compressive strength than other construction materials, but has low tensile strength so it is easy to crack. In addition to cracking easily, the natural nature of concrete is to absorb water through its pores (water intrusion) so that it can damage the concrete or reduce the strength of the concrete. One way to determine the quality and strength of concrete is by testing the modulus of elasticity.

The modulus of elasticity is tested by means of a Non-destructive test, namely the UPV (Ultrasonic Pulse Velocity) method, which produces a dynamic modulus of elasticity. This study used 7 specimens of reinforced concrete beams with dimensions of 20 cm x 20 cm x 70 cm with details of 1 normal concrete block, 3 concrete blocks with cracks (4 cm, 8 cm, 12 cm) and 3 concrete blocks with water intrusion holes (2 inches, 3 inches, 4 inches in diameter). UPV testing using the direct method with a distance between the transducers 70 cm. For specimens with water intrusion holes, the test was carried out under 2 conditions, namely holes without water and filled with water.

From the UPV test, the data obtained are travel time, wave propagation speed, Poisson's ratio and dynamic modulus of elasticity. The highest value of dynamic modulus of elasticity was obtained from normal concrete specimens of 24910.02 MPa and the lowest was obtained from water intrusion concrete specimens with 4 inch holes (without water) of 22042.84 MPa. The concrete specimen with cracks and the water intrusion test specimen showed a lower modulus of elasticity with increasing crack length and hole diameter. The modulus of elasticity in the water intrusion test object (without water) increased by 1.5% to 1.94% after being tested in the condition of the hole filled with water.

Keywords : Waves Propagation Speed, Water Intrusion, Dynamic Modulus of Elasticity, Cracks, Ultrasonic Pulse Velocity.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Material beton merupakan material yang sangat umum digunakan di dunia konstruksi bangunan gedung, transportasi maupun bangunan air. Terbuat dari campuran agregat kasar seperti kerikil, agregat halus seperti pasir, air dan semen. Beton dipilih karena memiliki kekuatan tekan lebih tinggi dibanding dengan material konstruksi lainnya. Selain itu beton juga memiliki daya tahan yang tinggi terhadap api tetapi kuat tariknya rendah sehingga mudah retak. Retak pada beton diakibatkan karena terjadinya proses kimia antara semen dan agregat pada proses pengecoran. Selain mudah retak, sifat alamiah beton yaitu menyerap air melalui pori-porinya dapat merusak beton atau menurunkan kekuatan beton.

Diperlukan perencanaan konstruksi beton yang baik untuk dapat menghasilkan beton dengan kualitas yang tinggi meliputi kekuatan dan daya tahan yang tinggi. Kualitas suatu beton dapat dilihat dari kuat tekan dan modulus elastisitas dari beton tersebut. Modulus elastisitas merupakan tolak ukur yang umum untuk sifat elastis suatu material. Selain perencanaan konstruksi beton yang harus direncanakan dengan baik, perencanaan pengujian juga menjadi salah satu faktor dalam meningkatkan kualitas kekuatan beton. Pengujian modulus elastisitas beton ada 2 macam cara yaitu *destructive test* dan *non-destructive test* (NDT). Cara *Destructive test* merupakan pengujian yang bersifat merusak benda uji, harus dilakukan di laboratorium dan memakan waktu. Sedangkan cara *Non-Destructive Test* (NDT) merupakan pengujian yang dilakukan tanpa merusak benda uji, sehingga pengujiannya dapat dilakukan di tempat kerja (*insitu*).

Salah satu metode pengujian modulus elastisitas dengan cara *Non-Destructive Test* (NDT) yaitu metode UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) adalah metode pengujian yang menggunakan gelombang ultrasonik yang disalurkan dalam struktur beton. Cara kerja dari alat UPV yaitu sensor *Transmitter Transducer* akan ditempatkan pada permukaan beton yang telah ditentukan, gelombang ultrasonik akan membaca ke dalam material beton dan menuju sensor *Receiver Transducer*, kemudian akan dihitung waktu tempuh antara gelombang ultrasonik *Transmitter* ke *Receiver*. Nilai waktu tempuh tersebut dapat dibaca pada alat PUNDIT (*Portable Unit Non-Destructive Indicator*

Test). Dari alat UPV juga didapatkan perhitungan kecepatan rambat gelombang yang akan dijadikan sebagai parameter dalam penentuan kualitas beton. Dari penelitian-penelitian sebelumnya, belum diketahui apakah keretakan dan intrusi air pada beton mempengaruhi nilai modulus elastisitas beton yang merupakan salah satu tolak ukur dalam penentuan kualitas beton lewat pengujian dengan metode UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).

1.2 Identifikasi Masalah

Ada beberapa cara dalam menentukan kualitas suatu beton, salah satunya dengan pengujian modulus elastisitas beton. Metode pengujian juga mempengaruhi kualitas beton, maka perlu dilakukan pengujian *Non-Destructive Test* (tidak merusak) yaitu menggunakan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Keretakan dan intrusi air pada beton merupakan faktor-faktor yang dapat menurunkan kekuatan dan kualitas beton. Maka dari itu perlu adanya penelitian tentang pengaruh keretakan dan intrusi air pada beton terhadap modulus elastisitas beton.

1.3 Rumusan Masalah

Berikut beberapa rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini, antara lain :

1. Bagaimana nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan oleh alat UPV pada beton normal dengan adanya keretakan ?
2. Bagaimana nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan oleh alat UPV pada beton normal dengan adanya intrusi air ?
3. Bagaimana pengaruh keretakan dan intrusi air pada beton terhadap cepat rambat gelombang yang dihasilkan oleh alat UPV?

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini menggunakan sampel beton tak bertulang yaitu benda uji balok berdimensi 20 cm x 20 cm x 70 cm
2. Proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4.
3. Menggunakan 3 macam benda uji yaitu 1 benda uji beton normal, 3 benda uji keretakan dengan variasi kedalaman retak 4 cm, 8 cm, 12 cm dan 3 benda uji yang diberi lubang dengan variasi diameter 2 inch, 3 inch dan 4 inch (3 lubang pada setiap 1 benda uji).

4. Menggunakan 1 sampel balok untuk setiap variasinya, jumlah sampel tersebut diambil dengan mempertimbangkan kondisi pandemi.
5. Pengujian NDT menggunakan *Schmidt Hammer* dan alat UPV Test yaitu PUNDIT PL-200 dengan merek Proceq.
6. Metode pengujian *direct method* (metode langsung).
7. Laju aliran air pada beton tidak diperhitungkan.
8. Pengujian dilakukan setelah beton berumur 28 hari.

1.5 Tujuan

Berikut beberapa tujuan dilakukannya penelitian ini, antara lain :

1. Untuk menganalisis nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan oleh alat UPV pada beton dengan adanya keretakan.
2. Untuk menganalisis nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan oleh alat UPV pada beton dengan adanya intrusi air.
3. Untuk mengetahui pengaruh keretakan dan intrusi air pada beton terhadap cepat rambat gelombang yang dihasilkan oleh alat UPV.

1.6 Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan beberapa manfaat, antara lain :

1. Dapat memberi pengetahuan tentang pengujian modulus elastisitas dinamis beton dengan metode NDT (*Non-Destructive Test*) menggunakan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).
2. Dapat mengetahui hasil pengujian dari alat UPV yaitu pengaruh keretakan dan intrusi air pada beton terhadap modulus elastisitas dinamis beton.
3. Dapat menjadi acuan atau referensi bagi pembaca untuk penelitian selanjutnya.

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Beton

Beton (*Concrete*) adalah campuran dari semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), dan air dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*) (SNI 2847:2019). Material yang terbentuk dari bahan tersebut mempunyai kekuatan tekan yang tinggi dan ketahanan terhadap tarik yang rendah. Sesaat setelah campuran beton selesai dicetak, beton tersebut bersifat plastis dan mudah dibentuk.

Dalam proses pembuatan beton, ada beberapa sifat yang harus dipenuhi dalam jangka waktu lama setelah beton mengeras yaitu kekuatan, keawetan, dan kestabilan volume. Beton dalam kondisi plastis (*workability*) atau mudah dalam pengerjaan tanpa adanya *segregation* dan *bleeding*, sifat tersebut harus dipenuhi dalam jangka waktu pendek.

2.1.1 Agregat kasar

Disebut sebagai agregat kasar apabila memiliki ukuran butiran melebihi 4,75 mm atau batas bawah saringan no. 4 (ASTM). Dalam *mix design* beton, agregat kasar menempati sebagian besar volume di dalam beton. Maka dalam pemilihan agregat kasar perlu diperhatikan secara khusus karena dibandingkan dengan material lain, agregat kasar memiliki pengaruh yang besar terhadap sifat mekanik beton. Karakteristik agregat kasar harus cukup keras, menghindari adanya retakan, permukaan bersih atau tidak tertutup lapisan.

Sifat-sifat fisik agregat kasar akan mempengaruhi daya lekat antara agregat dan mortar. Apabila permukaan agregat kasar semakin luas dan heterogen, maka akan menghasilkan lekatan yang lebih kuat. Beberapa pemeriksaan karakteristik agregat kasar (ASTM, 1993) yaitu :

- a) Gradasi (ASTM C33-92a)
- b) *Spesific grafiti* dan *absorpsi* (ASTM C127-88)
- c) *Unit weight* (ASTM C92-91a)
- d) Kadar air (ASTM C566-89)

2.1.2 Agregat halus

Agregat halus mempunyai ukuran butiran kurang dari 4,75 mm atau batas atas saringan No.4 (ASTM). Sama dengan agregat kasar, karakteristik seperti bentuk butiran dan permukaan agregat halus sangat berpengaruh pada kebutuhan permukaan air dan sifat mekanik beton. Beberapa pemeriksaan karakteristik agregat halus (ASTM, 1993) yaitu :

- a) Gradasi (ASTM C33-92a)
- b) *Spesific grafiti* dan *absorpsi* (ASTM C127-88)
- c) *Unit weight* (ASTM C92-91a)
- d) Kadar air (ASTM C566-89)
- e) *Fines Modulus* (ASTM C33-92a)

2.1.3 Semen

Semen *Portland* adalah bahan pengikat hidrolis yaitu butiran-butiran halus dari hasil penghalusan klinker dengan batu gips untuk bahan tambahan. Semen jenis ini merupakan bahan konstruksi yang umum digunakan dalam campuran beton. Dalam pemilihan jenis semen harus memperhatikan dan menyesuaikan dengan perencanaan kekuatan dan spesifikasi campuran beton yang diinginkan. Campuran semen dan air akan cepat mengeras dalam beberapa waktu. Reaksi akibat dicampurnya semen dengan air bersifat *irreversible* yaitu tidak bisa kembali pada kondisi awal. Adapun beberapa bahan baku yang digunakan dalam pembuatan semen terdapat pada *Tabel 2.1*.

Tabel 2.1

Bahan baku pembuatan semen

Jenis Bahan	Nama Kimia	Persentase (%)
Batu Kapur (CaO)	Kalsium dioksida	60 – 65
Pasir Silikat (SiO ₂)	Silikon dioksida	17 – 25
Tanah Liat (Al ₂ O ₃)	Aluminium dioksida	3 – 8
Bijih Besi (Fe ₂ O ₃)	Besi (III) dioksida	0,5 – 6
Magnesia (MgO)	Magnesium dioksida	0,5 – 4
Sulfur (SO ₃)	Sulfur trioksida	1 – 2

Sumber : SNI 15-2049-2004

2.1.4 Air

Air dalam campuran beto memiliki fungsi untuk memicu proses kimiawi atau bereaksi dengan semen. Selain itu, air juga berfungsi sebagai pelumas agregat agar mudah untuk dipadatkan. Pada proses hidrasi beton, dibutuhkan air $\pm 25\%$ dari berat semen, apabila nilai faktor air semen (FAS) kurang dari 35% beton tidak dapat dikerjakan dan setelah mengeras akan menghasilkan beton yang keropos dan mempunyai kekuatan yang rendah. Agar mencapai suatu kelecakan (*workability*) diperlukan air yang lebih dari proses hidrasi sebagai syarat kekentalan (*consistency*). Kemudian di dalam beton yang sudah mengeras, kelebihan air tersebut akan menguap dalam beton dan akan mengakibatkan adanya pori-pori (*capillary poreous*) (Slamet, 2008). Adapun beberapa syarat pemakaian air pada beton antara lain (Tjokrodimuljo, 1992) :

- a) Kandungan lumpur kurang dari 2 gr/liter
- b) Kandungan garam yang dapat merusak beton kurang dari 15 gr/liter
- c) Kandungan klorida kurang dari 0,5 gr/liter
- d) Kandungan senyawa sulfat kurang dari 1 gr/liter

2.2 Perawatan Beton (*Curing*)

Perawatan beton (*Curing*) merupakan proses menjaga tingkat kelembaban dan suhu ideal guna meminimalisir hidrasi yang berlebihan. Tujuan dari proses *curing* ini adalah mencegah kehilangan air pada beton karena penguapan, mencegah terjadinya keretakan, agar menghasilkan mutu beton yang direncanakan, mencegah terjadinya susut yang berlebihan dan menjaga beton dari perbedaan pada suhu beton dengan suhu lingkungan sekitar. Perawatan beton (*curing*) dilaksanakan pada saat memasuki fase *hardening* (untuk permukaan beton yang terbuka) atau setelah pelepasan pelepasan bekisting. Durasi *curing* selama 7 hari berturut-turut terhitung setelah pembukaan bekisting. Ada beberapa metode perawatan beton (*curing*), yaitu :

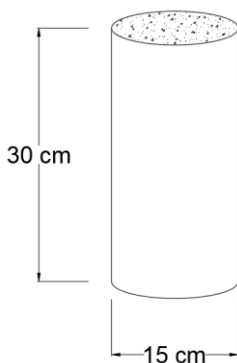
- a) Perawatan beton dengan air yaitu dengan menyelimuti permukaan beton menggunakan karung goni basah
- b) Perawatan dengan membran (*membrane curing*) yaitu melapisi permukaan beton dengan membran agar air pada beton tidak cepat menguap secara langsung
- c) Perawatan dengan penguapan (*application of heat curing*) diawali dengan mempertahankan suhu beton pada suhu 10° - 30° C kemudian membasahi permukaan beton selama 7 hari pertama. Proses penguapan terdiri dari 2 cara yaitu dengan tekanan rendah dan tekanan tinggi.

d) Perawatan lainnya yaitu dengan menggunakan sinar infra merah, hidrotermal, karbonasi dan pelapisan dengan kalsium klorida.

2.3 Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah nilai besarnya beban per satuan luas yang mengakibatkan benda uji beton hancur apabila menerima gaya tekan tertentu dari mesin tekan atau *Compression Testing Machine* (CTM). Dibandingkan dengan sifat-sifat lain, kuat tekan beton menjadi salah satu sifat terpenting dalam penentuan kualitas beton. Kuat tekan beton direncanakan dari komposisi *mix design* atau perbandingan material campuran beton (semen, agregat kasar, agregat halus dan air). Kekuatan tekan beton dipengaruhi oleh kualitas material penyusun, perbandingan campuran, kerapatan, faktor air semen (FAS), jenis semen dan umur beton.

Fungsi air dalam *mix design* yaitu agar terjadi aksi kimiawi dalam pengerasan beton ketika bereaksi dengan semen. Apabila campuran beton kelebihan air maka akan memudahkan dalam pencampurannya tetapi akan menurunkan kekuatan beton tersebut (Wang dan Salmon, 1990). Metode dalam pencampuran (*mixing*), penuangan, perbedaan dalam persiapan, pengecoran beton, *curing* (perawatan) dan pengujian akan menyebabkan adanya variasi kuat tekan. Sampel yang digunakan berbentuk silinder seperti yang terdapat pada *Gambar 2.1*.



Gambar 2.1 Benda uji (silinder) kuat tekan beton

Nilai kuat tekan beton didapatkan dengan rumus sebagai berikut.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad \text{.....(2-1)}$$

Keterangan :

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

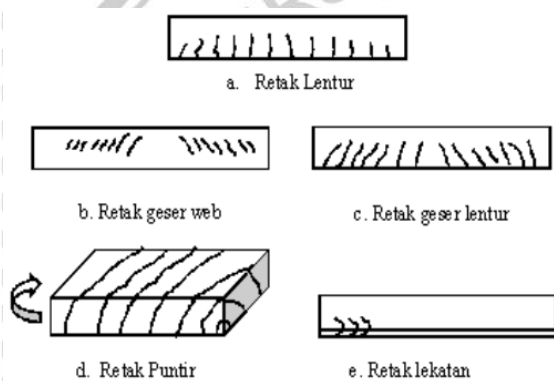
P = beban aksial tekan (N)

A = luas penampang benda uji (mm²)

2.4 Keretakan pada Beton

Beton memiliki kelebihan yaitu mudah dalam pembuatannya, tahan terhadap suhu yang tinggi dan memiliki kekuatan tekan yang tinggi tetapi lemah kuat tariknya sehingga beton mudah retak. Retak adalah salah satu kerusakan yang paling umum terjadi pada struktur beton. Keretakan bisa terjadi sebelum maupun setelah beton mengeras. Jika ada sebuah beban maka retak terjadi ketika beton mulai mengeras. Pada musim dingin, beton akan mengeras, susut (*shrinkage*), penurunan (*settlement*) dan penurunan acuan (*formwork*).

Keretakan dibedakan menjadi dua yaitu keretakan struktural dan keretakan non-struktural. Keretakan struktural bisa terjadi karena dalam perencanaan terdapat adanya kesalahan atau beban yang diperhitungkan melebihi kapasitas. Keretakan non-struktural umumnya terjadi karena pada awal fase umur beton terjadi proses kimiawi fisik. Umumnya keretakan non-struktural tidak langsung mengakibatkan struktur beton melemah. *Gambar 2.2* menunjukkan beberapa macam pola keretakan yang terjadi pada beton.



Gambar 2.2 Pola keretakan pada beton

Sumber : Gilbert (1990)

2.5 Intrusi Air pada Beton

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), arti kata intrusi adalah proses penyusupan atau perembesan air ke dalam tanah. Dalam hal ini intrusi air pada beton didefinisikan sebagai proses masuknya air ke dalam beton. Salah satu sifat alamiah beton yaitu menyerap air melalui pori-porinya. Pada bangunan air seperti bendungan, keberadaan air sangat mempengaruhi kekuatan dan kualitas bangunan tersebut. Adanya intrusi air ke dalam pori-pori beton dapat mengakibatkan terjadinya korosi pada tulangan beton tersebut. Intrusi air pada beton dapat menjadi faktor terjadinya kegagalan struktur bangunan. Perlu adanya proses identifikasi pada struktur beton agar dapat meminimalisir terjadinya kegagalan struktur tersebut.

Faktor-faktor yang mempengaruhi air merembes pada beton yaitu :

- a) Faktor air semen (FAS)
- b) Agregat yang digunakan
- c) Pemadatan adukan semen
- d) Perawatan beton
- e) Umur beton

2.6 Modulus Elastisitas Beton

Modulus elastisitas merupakan perbandingan dari tegangan normal terhadap regangan, baik tegangan tarik maupun tekan di bawah batas proporsional material (SNI 2847:2019). Semakin besar nilai modulus elastisitas suatu material maka semakin kecil regangan elastisnya dan dapat disimpulkan bahwa material tersebut semakin kaku (*Stiff*). Nilai modulus elastisitas dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2-2)$$

Keterangan :

- E = Modulus elastisitas (N/mm²)
- σ = Tegangan aksial (N/mm²)
- ε = Regangan aksial

Nilai modulus elastisitas beton bisa berbeda-beda tergantung dari beberapa faktor, salah satunya yaitu kuat tekan beton. Semakin besar nilai kuat tekannya maka nilai modulus elastisitasnya juga makin besar, dimana perubahan panjang yang disebabkan oleh beban tekan akan semakin kecil. Hal ini karena kondisi beton semakin keras sehingga dengan besar gaya beban yang sama, maka menghasilkan perpendekan dan regangan yang lebih kecil bila dibandingkan beton yang kuat tekannya kecil (Sukoyo, 2008).

2.6.1 Modulus Elastisitas Statis

Beton mempunyai nilai modulus elastisitas yang bervariasi. Nilainya bervariasi tergantung dari kekuatan, umur beton, jenis pembebanan, karakteristik serta proporsi semen dan agregat (McCormac, 2004). Sebagai tambahan, ada beberapa definisi mengenai modulus elastisitas :

- a) Modulus awal yaitu kemiringan diagram tegangan-regangan pada titik asal dari kurva.

- b) Modulus tangen yaitu kemiringan salah satu garis singgung (tangen) dari kurva pada titik tertentu di sepanjang kurva, misalnya 50% dari beban maksimum yang mampu ditahan beton.
- c) Modulus sekan yaitu kemiringan dari garis yang ditarik dari titik asal kurva ke suatu titik pada kurva tersebut di suatu tempat di antara 25% sampai 50% dari kekuatantekan maksimumnya.
- d) Modulus semu (*apparent modulus*) yang ditentukan menggunakan tegangan dan regangan yang diperoleh setelah pembebanan selama beberapa saat.

Berdasarkan persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung (SNI 2847 : 2013), modulus elastisitas beton dengan berat isi (w_c) 1440-2560 kg/m³ dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$E_c = w_c^{1.5} 0,043 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(2-3)$$

Keterangan :

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

w_c = berat isi beton (kg/m³)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

Sedangkan untuk beton normal, modulus elastisitasnya dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut :

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots(2-4)$$

Keterangan :

E_c = modulus elastisitas beton (MPa)

f'_c = kuat tekan beton (MPa)

2.6.2 Modulus Elastisitas Dinamis

Nilai modulus elastisitas dinamis didapatkan dari pengujian NDT (*Non-Destructive Test*) seperti UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Keuntungan pengujian menggunakan metode NDT adalah dapat dilakukan secara langsung di lapangan, biaya operasional lebih murah, mobilisasi di lapangan lebih mudah, dan waktu yang dibutuhkan relatif singkat. Sedangkan kelemahan metode NDT adalah nilai modulus elastisitas yang dihasilkan lebih besar dari pengujian statis. Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV menghasilkan 2 macam kecepatan rambat gelombang yaitu kecepatan rambat gelombang longitudinal (gelombang P) dan kecepatan rambat gelombang transversal (gelombang S).

Modulus elastisitas dinamis didapatkan dari perhitungan dengan menggunakan nilai cepat rambat gelombang. Nilai modulus elastisitas dinamis lebih besar 20% sampai 40% dibandingkan nilai modulus elastisitas statis. Modulus elastisitas dinamis ini digunakan untuk analisa struktur dengan beban gempa. Nilai modulus elastisitas dinamis akan bertambah besar seiring dengan bertambahnya umur beton. Selain itu, akan terjadi penurunan nilai modulus elastisitas dinamis seiring dengan meningkatnya faktor air semen.

2.6.3 Poisson Ratio Beton

Ketika benda uji beton menerima gaya aksial atau beban tekan, benda uji tersebut tidak hanya mengalami perpendekan tetapi juga mengalami pemuaihan (ekspansi) ke arah lateral. Rasio pemuaihan (ekspansi) lateral dengan pendekatan longitudinal ini disebut sebagai *Poisson Ratio*. *Poisson Ratio* dilambangkan dengan “ ν ” (nu).

$$\nu = - \frac{\epsilon'}{\epsilon} \dots\dots\dots (2-5)$$

Keterangan :

ν = Rasio Poisson

ϵ' = Regangan transversal

ϵ = Regangan aksial

Belum diketahui dengan pasti hubungan langsung antara harga *poisson ratio* ini dengan ukuran agregat, rasio air semen, lamanya *curing* dan lain sebagainya. Rasio antara regangan lateral dan regangan longitudinal pada beton adalah konstan. Nilai *Poisson Ratio* beton berkisar antara 0,15 sampai dengan 0,25. Apabila regangan di suatu bahan menjadi besar, maka *Poisson Rationya* berubah (Gere, Timoshenko, 1997).

2.7 Non-Destructive Test (NDT)

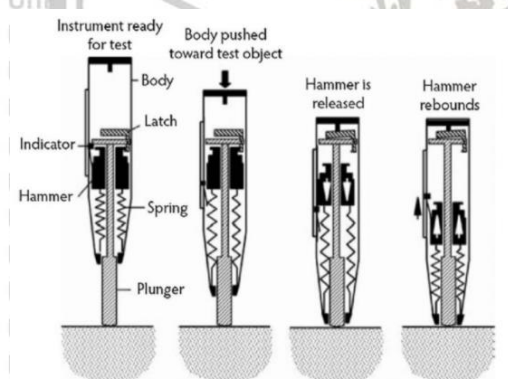
Untuk mengetahui kualitas suatu beton perlu adanya pengujian struktur beton. Terdapat dua metode untuk mengetahui kualitas mutu beton yaitu metode *Destructive Test* (DT) dan *Non-Destructive Test* (NDT). Metode *Destructive Test* (DT) adalah metode uji mutu beton dengan cara merusak benda uji, mutu beton yang dihasilkan bersifat aktual berdasarkan kuat tekan di laboratorium. Sedangkan metode *Non-Destructive Test* (NDT) adalah metode uji mutu beton yang sifatnya tidak merusak benda uji, penggunaan metode ini umumnya untuk struktur beton yang sudah mulai aktif atau masih aktif penggunaannya. Metode NDT dinilai sangat tepat karena tidak mempengaruhi fungsi dari struktur beton yang ingin diuji.

Metode *Non-Destructive Test* (NDT) biasanya digunakan untuk menentukan atau mengetahui kualitas struktur beton secara langsung di lapangan. Metode ini juga sering berhubungan dengan kekuatan beton yang dibutuhkan oleh tim forensik. Beberapa metode NDT yang sering digunakan untuk mengetahui kualitas struktur beton yaitu *Hammer Test* dan *Ultrasonic Pulse*.

2.8 Pengujian Kuat Tekan dengan Metode *Schmidt Hammer Test*

Schmidt Hammer test merupakan alat yang digunakan untuk mengetahui homogenitas suatu beton. Alat ini ditemukan oleh ahli dari Swiss yaitu *Ernst Schmidt* yang merupakan alat untuk menguji kekerasan (*surface hardness*) permukaan benda keras, sebagaimana halnya beton. Pada dasarnya, terdapat dua jenis *hammer test* yang terbagi berdasarkan fungsinya. Di antaranya adalah sebagai berikut.

- a) Type N dan type NR, digunakan dalam pengujian kuat tekan beton bermutu tinggi ($100 \text{ kg/cm}^2 - 500 \text{ kg/cm}^2$) pada kolom, balok dan pelat.
- b) Type P dan tipe PT, digunakan dalam pengujian kuat tekan beton bermutu rendah misalnya pekerjaan dinding.



Gambar 2.3 Mekanisme kerja dari alat *hammer test*

Sumber : Xu, T. and Lie, J. (2018)

Terlihat pada *Gambar 2.3* setelah alat *Hammer Test* mengenai permukaan beton, hammer akan memantul (*rebound*) dan besaran *rebound* inilah yang digunakan menjadi ukuran kekerasan permukaannya. Bacaan nilai *rebound* selanjutnya dikonversikan pada skala menjadi kuat tekan. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi nilai pantul (*rebound*) pada alat *hammer test* ini sebagai berikut :

- a) Tekstur permukaan beton
- b) Dimensi dan bentuk sampel beton
- c) Usia beton

- d) Kelembaban bagian permukaan dan dalam beton
- e) Agregat kasar
- f) Jenis beton
- g) Bekisting yang digunakan
- h) Karbonasi

2.9 *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) yaitu pengujian *Non-Destructive* struktur bangunan yang menggunakan konsep gelombang ultrasonik yaitu nilai kecepatan rambat gelombang longitudinal yang melalui beton (SNI ASTM C597 : 2012). Metode *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* pada dasarnya terdiri dari transmisi *pulse* (rambat gelombang) yang dihasilkan secara mekanis (dalam rentang frekuensi 20-150 / dtk) melalui beton dengan bantuan transduser elektro-akustik dan mengukur kecepatan gelombang longitudinal yang dihasilkan oleh *pulse* yang diterapkan.

Metode UPV dapat digunakan untuk mengetahui beberapa sifat-sifat beton antara lain modulus elastisitas, kuat tekan, keseragaman, ketebalan lapisan, keretakan, *honeycombing* dan kerusakan pada beton. Beberapa kelebihan dari metode UPV adalah sebagai berikut :

- a) Tes *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* ini bersifat tidak merusak benda uji dan dapat dilakukan di laboratorium maupun langsung di lapangan.
- b) Alat ini dapat digunakan untuk mendeteksi kerusakan di dalam material beton.
- c) Peralatan UPV Test yang bersifat modern menunjukkan hasil yang akurat dan mudah dioperasikan.

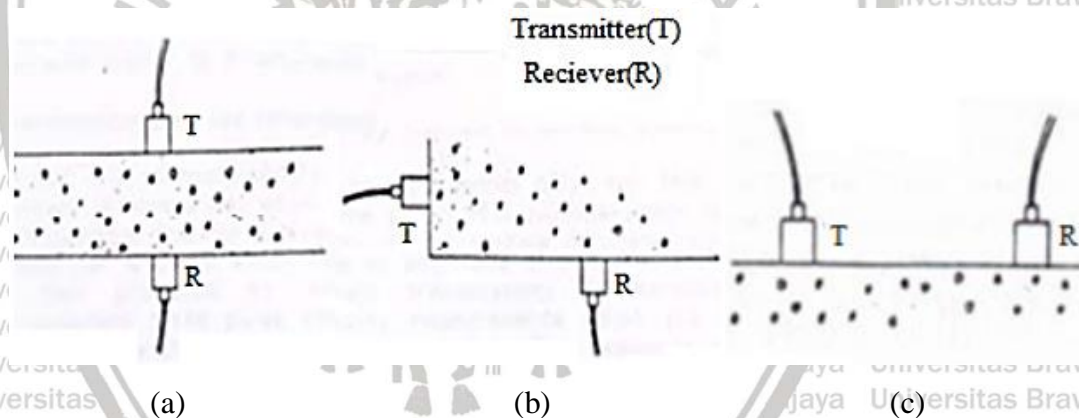
2.10 Metode Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

Alat *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* terdiri dari beberapa bagian yaitu :

- a) Pundit
- b) Dua *transducer (receiver dan transmitter)* berkapasitas 54 khz
- c) *Jell ultrasound*
- d) *Reference bar / calibration bar*
- e) Kabel dan konektor

Terdapat 3 metode yang biasa digunakan dalam pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) yaitu :

- Direct Method* (metode langsung) adalah pengujian yang dilakukan dengan meletakkan *receiver* dan *transmitter* pada posisi yang saling berhadapan seperti pada *Gambar 2.4* (a). Metode ini dinilai cukup baik karena transmisi gelombang yang dihasilkan lebih besar daripada metode lainnya, hal ini disebabkan posisi *transducer* yang diletakkan secara parallel.
- Semi Direct Method* (metode semi langsung) adalah pengujian dimana *receiver* dan *transmitter* diletakkan pada posisi axial yaitu satu pada bidang tegak lurus dan satu pada bidang mendatar seperti pada *Gambar 2.4* (b). Apabila jarak antar *transducer* tidak terlalu jauh, maka hasil yang diperoleh akan memuaskan.
- Indirect Method* (metode tidak langsung) adalah pengujian dimana *receiver* dan *transmitter* diletakkan pada satu bidang datar seperti pada *Gambar 2.4* (c). Dibandingkan dengan metode langsung (*direct method*), hasil metode pengujian ini kurang baik karena amplitudo dari gelombang yang diterima lebih kecil.



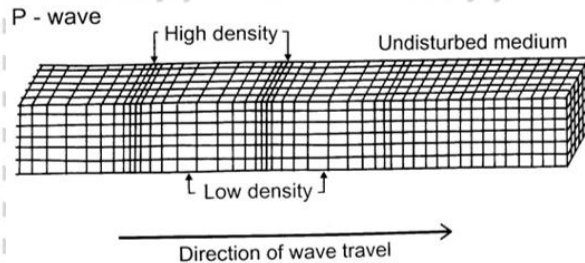
Gambar 2.4 Metode UPV (a) *Direct method*; (b) *Semi-direct method*; (c) *Indirect method*

Sumber : Mahdi Shariati (2010)

2.11 Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan gelombang yang dalam perambatannya memerlukan perantara (medium). Gelombang mekanik menyalurkan energi partikel dalam perantara (medium) rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Terdapat 3 jenis gelombang mekanis yang akan terjadi apabila suatu permukaan material padat elastis menerima beban dinamis maupun getaran, yaitu :

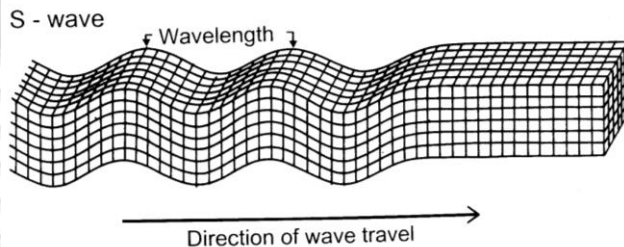
- a) Gelombang longitudinal (*P-wave*) adalah gelombang yang memberikan tegangan tekan dan tarik (searah dengan arah rambatnya) pada medium rambatnya seperti ilustrasi pada *Gambar 2.5*. Gelombang ini memiliki kecepatan rambat paling cepat, tetapi amplitudonya paling kecil diantara gelombang-gelombang lainnya. Gelombang ini dapat merambat pada perantara (medium) zat padat, cair dan gas.



Gambar 2.5 Ilustrasi gerak gelombang longitudinal (*P-wave*)

Sumber : Hidayati (2010)

- b) Gelombang transversal (*S-wave*) adalah gelombang yang menimbulkan tegangan geser pada partikel dalam medium rambatnya seperti ilustrasi pada *Gambar 2.6*. Partikel gelombang ini bergerak secara tegak lurus terhadap arah rambatannya (transversal), sehingga gerak gelombang ini dibagi menjadi 2 yaitu gerak horizontal dan vertikal.

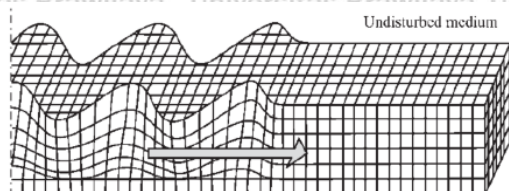


Gambar 2.6 Ilustrasi gerak gelombang transversal (*S-wave*)

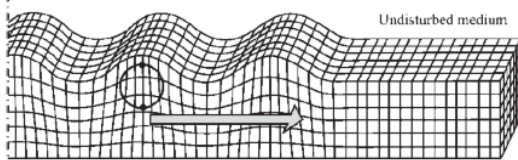
Sumber : Hidayati (2010)

- c) Gelombang Permukaan (*surface wave*) adalah gelombang yang merambat melalui permukaan perantara dan amplitudonya akan semakin kecil seiring dengan gelombang yang merambat masuk ke dalam perantara. Gelombang ini biasanya terjadi pada gelombang yang memiliki frekuensi kurang dari 500 Khz. Tipe gelombang permukaan yaitu *Love Wave* dan *Rayleigh Wave*. *Love wave* hanya merambat pada lapisan permukaan saja, sehingga gelombang ini mirip seperti

gelombang transversal (*S-wave*) tetapi bergerak pada bidang horizontal seperti pada ilustrasi pada *Gambar 2.7 (a)*. Sedangkan *rayleigh wave* yaitu gelombang yang merambat pada permukaan saja dan merambat pada medium padat. Arah getaran gelombang ini berlawanan dengan arah perambatannya seperti ilustrasi pada *Gambar 2.7 (b)*.



(a)



(b)

Gambar 2.7 Ilustrasi gerak (a) Gelombang *Love*, (b) Gelombang *Reyleigh*

Sumber : Elnashai and Sarno (2008)

2.12 Analisis Regresi

Analisis regresi adalah metode analisis yang bertujuan untuk mengetahui besar pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain. Variabel yang dimaksud yaitu variabel bebas (*Independent*) dan variabel terikat (*Dependent*). Analisis regresi ini bersifat kausal atau hubungan sebab-akibat. Analisis regresi adalah cara sederhana dalam melakukan investigasi terkait relasi fungsional antara variabel-variabel berbeda (Nawari, 2010). Terdapat 2 jenis regresi yaitu regresi linier dan regresi non linier. Regresi linier adalah bentuk hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat yang masing-masing berpangkat satu. Adapun macam-macam model regresi linier yaitu :

- a) Regresi linier sederhana adalah analisis regresi yang hanya terdiri dari satu variabel *Independent* dan satu variabel *Dependent*. Bentuk umum dari regresi linier sederhana yaitu :

$$y = a + bx \dots\dots\dots(2-6)$$

Dimana :

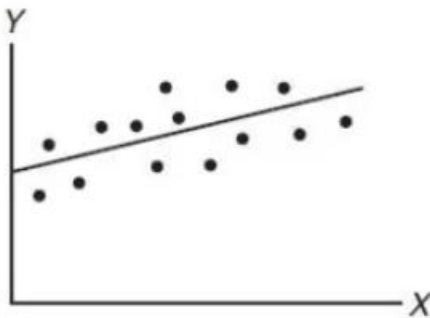
y = variabel terikat (*Dependent*)

x = variabel bebas (*Independent*)

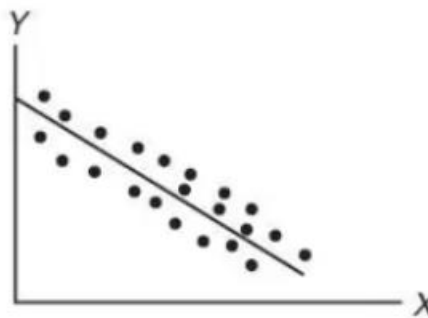
a = konstanta

b = kemiringan

Nilai b dapat bernilai positif (+) atau negatif (-) digambarkan pada grafik di bawah ini :



(a)



(b)

Gambar 2.8 Grafik regresi linier sederhana (a) nilai b positif; (b) nilai b negatif

b) Regresi linier berganda adalah analisis regresi yang menggunakan lebih dari satu variabel *Independent*. Bentuk umum dari regresi linier berganda yaitu :

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \dots\dots\dots(2-7)$$

Dimana :

y = variabel terikat

a = konstanta

x₁ = variabel bebas ke-1

b₁ = kemiringan ke-1

x₂ = variabel bebas ke-2

b₂ = kemiringan ke-2

x_n = variabel bebas ke-n

b_n = kemiringan ke-n

Regresi non linier adalah bentuk hubungan variabel terikat dan variabel bebas yang dinyatakan dalam model non linier. Adapun macam-macam model regresi non linier yaitu :

a) Eksponensial

Bentuk umum : $y = ae^{bx} \dots\dots\dots(2-8)$

b) Pangkat

Bentuk umum : $y = ax^b \dots\dots\dots(2-9)$

c) Pertumbuhan jenuh

Bentuk umum : $y = \frac{ax}{b+x} \dots\dots\dots(2-10)$

d) Polinomial

Bentuk umum : $y = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n \dots\dots\dots(2-11)$

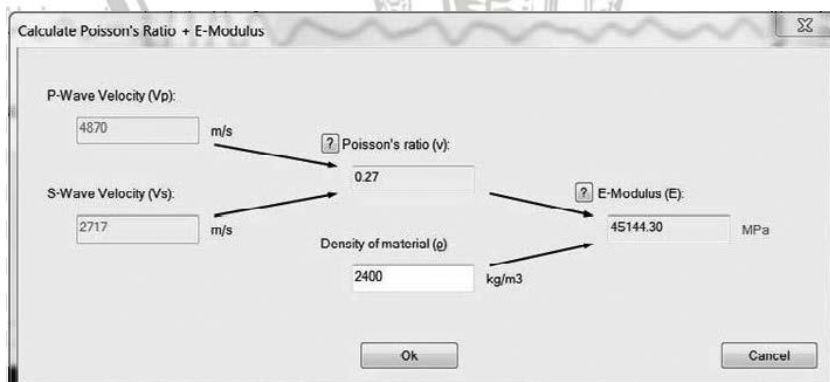
Selain persamaan regresi, pada analisis ini juga dicari koefisien determinasi (R^2) yaitu koefisien yang menunjukkan sejauh mana tingkat hubungan antara variabel terikat dan variabel bebas. Adapun syarat atau nilai koefisien determinasi (R^2) antara lain :

- $0 \leq R^2 \leq 1$
- Nilai R^2 mendekati 1 atau sama dengan 1 menunjukkan hubungan sempurna atau perubahan variabel terikat dipengaruhi oleh variabel bebas.
- Nilai R^2 mendekati 0 atau sama dengan 0 menunjukkan tidak ada hubungan atau perubahan dari variabel terikat tidak dipengaruhi oleh variabel bebas.

Contoh : nilai koefisien determinasi (R^2) = 0,95 artinya 95% perubahan variabel terikat dipengaruhi atau ditentukan oleh variabel bebas, 5% dipengaruhi atau ditentukan oleh faktor lain.

2.13 Hubungan Modulus Elastisitas dan Kecepatan Rambat Gelombang

Kekakuan elastis beton akan mempengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat pada beton. Modulus elastisitas (E) dan *poisson ratio* (ν) merupakan sifat-sifat elastis beton yang saling berkaitan satu sama lain. Kecepatan gelombang UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) bisa mengalami penurunan karena proses pemadatan beton yang kurang baik atau terjadi kerusakan pada butiran agregat. Selain kecepatan rambat gelombang, *poisson ratio* dan *density* (rapat massa) juga mempengaruhi nilai modulus elastisitas beton. Hubungan antara kecepatan gelombang UPV, rasio poisson, rapat massa dan modulus elastisitas dapat dilihat dari skema perhitungan pada *Gambar 2.9*.



Gambar 2.9 Skema Perhitungan modulus elastisitas dinamis

Sumber : Proceq (2017)

Rumus yang digunakan dalam perhitungan modulus elastisitas dinamis adalah sebagai berikut.

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2-12)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-13)$$

$$G = V_s^2 \times \rho \quad (2-14)$$

$$E = 2 \times V_s^2 \times \rho (1 + \nu) \quad (2-15)$$

Keterangan :

ν = Rasio Poisson

V_p = Kecepatan rambat *P-wave* (m/s)

V_s = Kecepatan rambat *S-wave* (m/s)

ρ = Rapat massa (kg/m³)

m = Massa (Kg)

V = Volume (m³)

G = Modulus geser (GPa)

E = Modulus elastisitas (GPa)

2.14 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu merupakan referensi atau rujukan dalam melaksanakan penelitian terbaru. Dari kesimpulan penelitian terdahulu, Dapat diketahui kekurangan maupun kelebihan dari penelitian sebelumnya yang dapat digunakan untuk menyempurnakan penelitian sebelumnya atau sebagai sumber acuan untuk memulai penelitian yang baru.

Beberapa kesimpulan atau hasil penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi untuk menyusun penelitian ini terdapat pada *Tabel 2.2*.

Tabel 2.2

Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Julian Carillo, Julieth Ramirez, Juan Lizarazo-Marriaga (2019)	Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hasil pengujian modulus elastisitas dan rasio poisson beton bertulang menggunakan UPV <i>semi-direct</i> memiliki perbedaan rata-rata nilai statis dan dinamisnya sebesar 13%, perbedaan tersebut dinilai sama karena relatif kecil 2. Menggunakan persamaan yang sama dengan hasil pengujian menggunakan UPV <i>semi-direct</i>, modulus elastisitas dan rasio poisson dari pengujian destruktif dapat dihitung.
2	Fatimah Azzahra Fitri, Eva Arifi, Roland Martin S. (2018)	Analisis Modulus Elastisitas Beton dengan Menggunakan Alat PUNDIT PL-200	Pengujian modulus elastisitas menggunakan alat PUNDIT PL-200 berpengaruh pada ketidaksejajaran transduser, gelombang yang diterima transduser tidak terbaca dengan baik.



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan dimulai dari Maret 2021 sampai selesai.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- a) Satu set ayakan agregat kasar dan halus
- b) Timbangan dengan kapasitas 150 kg dan 5 kg
- c) Piknometer kapasitas 500 ml
- d) Kerucut terpancung dan tongkat penusuk
- e) *Concrete mixer* (mesin pengaduk campuran beton)
- f) Gerobak pengangkut
- g) Sendok semen
- h) Talam
- i) Kerucut abrams
- j) Bekisting balok beton berukuran 20 cm x 20 cm x 70 cm
- k) Bekisting silinder berukuran 15 cm x 30 cm
- l) Mistar atau meteran
- m) Kain lap penyerap air
- n) *Rebound Hammer*
- o) Satu set alat UPV test (modulus elastisitas)
- p) Mesin uji tekan beton (*Compression Testing Machine*)
- q) Vibrator
- r) Pipa air PVC dengan diameter 2 inci, 3 inci dan 4 inci
- s) Akrilik

3.2.2 Bahan Penelitian

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji penelitian ini antara lain :

- a) Agregat kasar (kerikil)
- b) Agregat halus (pasir)
- c) Semen jenis PCC (*Portland Composite Cement*)
- d) Air

3.3 Variabel Penelitian

Adapun jenis-jenis variabel yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- a) Variabel Bebas (*Independent Variable*) adalah variabel yang faktornya bebas ditentukan oleh peneliti dan akan mempengaruhi variabel lain. Variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah kedalaman keretakan dan diameter lubang (intrusi air) pada benda uji beton.
- b) Variabel Terikat (*Dependent Variable*) adalah variabel yang dipengaruhi oleh adanya variabel bebas. Variabel terikat yang digunakan pada penelitian ini adalah modulus elastisitas beton dengan variasi keretakan dan diameter lubang.
- c) Variabel Kontrol (*Control Variable*) adalah variabel yang memiliki fungsi mengendalikan variabel bebas terhadap variabel terikat. Variabel kontrol ini tidak dipengaruhi oleh variabel luar yang tidak diteliti. Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah modulus elastisitas beton normal tanpa ada variasi.

3.4 Analisis Bahan

3.4.1 Agregat Kasar

Kerikil yang berasal dari batu pecah adalah agregat kasar yang digunakan pada penelitian ini. Sebelum dilakukan proses pengecoran atau pencampuran beton, agregat kasar akan diuji karakteristiknya terlebih dahulu. Uji karakteristik agregat kasar yang dilakukan terdiri dari analisis gradasi, kadar air, berat isi, berat jenis dan penyerapan air.

3.4.2 Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir alam. Sebelum dilakukan proses pengecoran atau pencampuran beton, agregat halus akan diuji karakteristiknya terlebih dahulu. Uji karakteristik agregat halus sama dengan uji karakteristik agregat kasar.

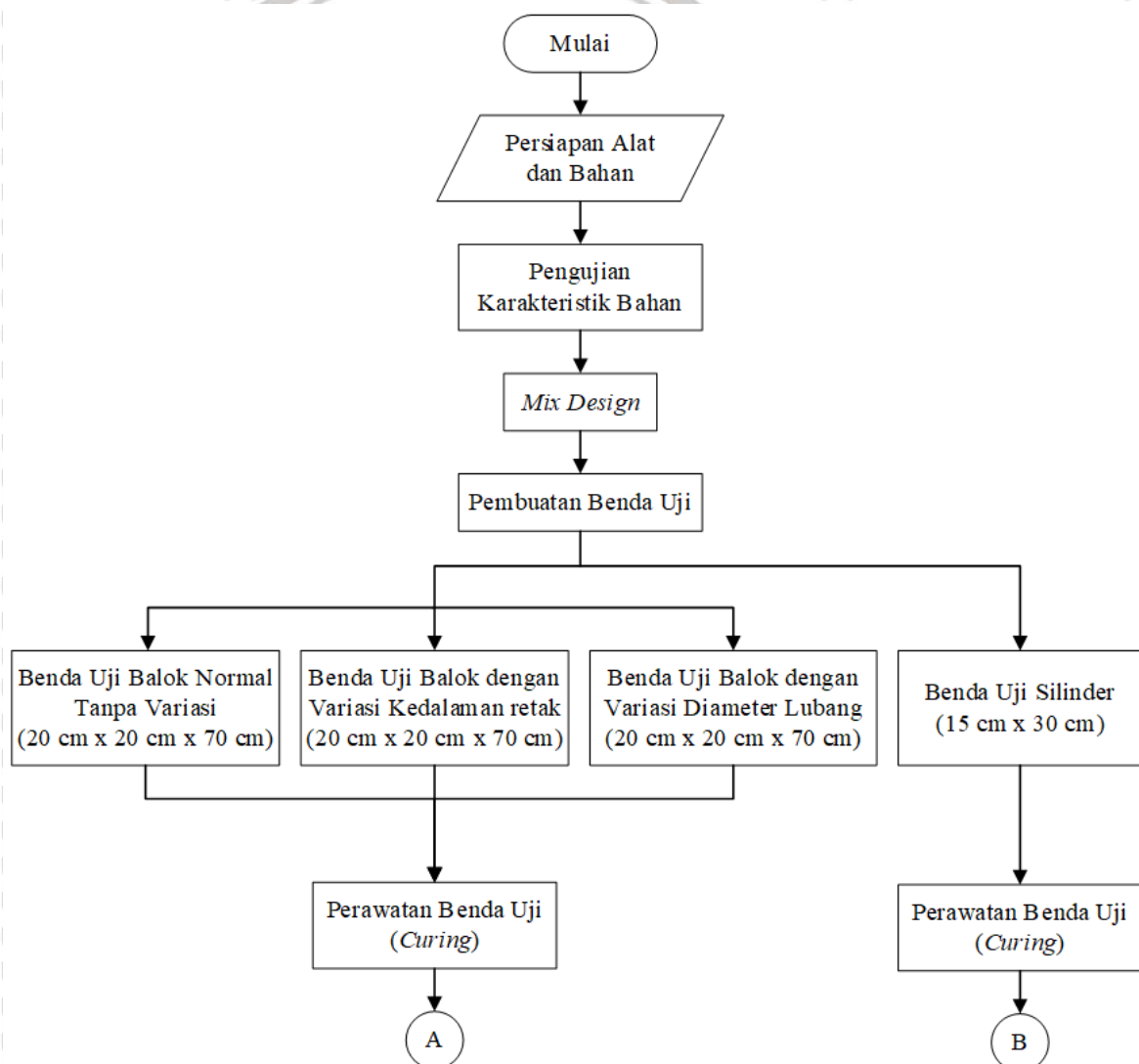
3.4.3 Semen

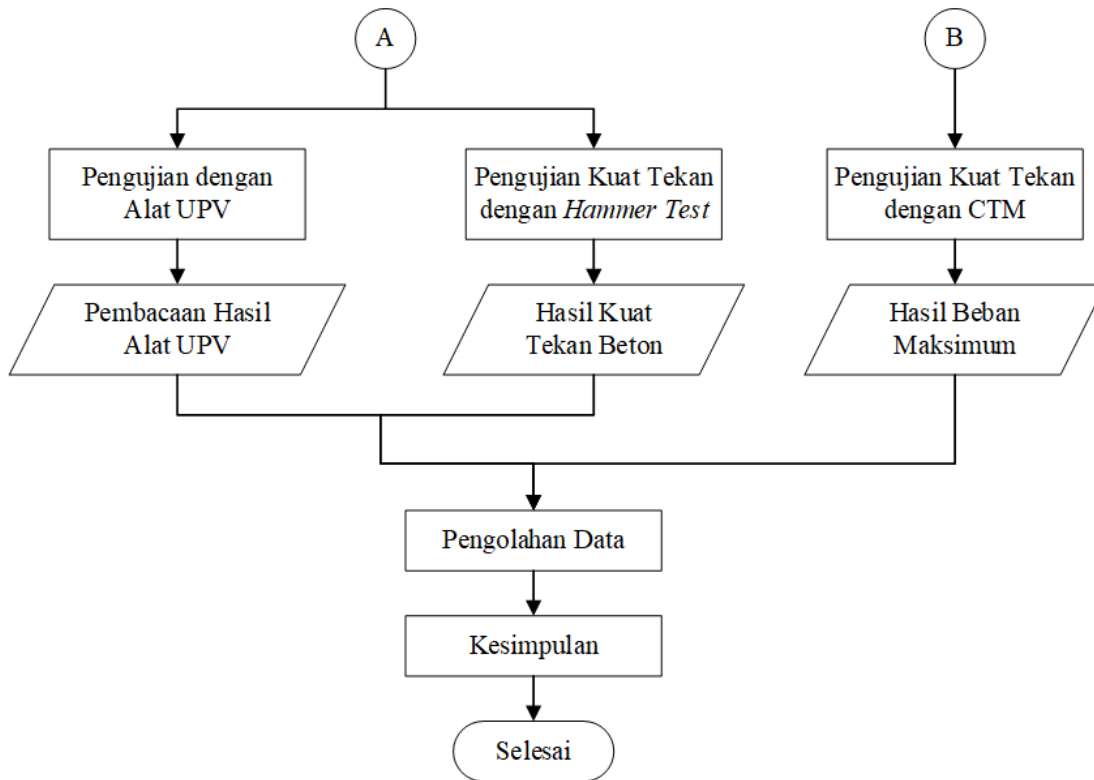
Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen jenis PCC (*Portland Composite Cement*) tipe I dengan merk Semen Gresik. Sebagai bahan campuran beton, semen harus dalam keadaan baik dan layak. Dilihat secara fisik semen dalam keadaan tidak menggumpal dan tidak mengeras.

3.4.4 Air

Air yang digunakan dalam penelitian ini adalah air bersih yang berasal dari PDAM Kota Malang yang tidak berbau dan tidak berwarna.

3.5 Tahap Penelitian





Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

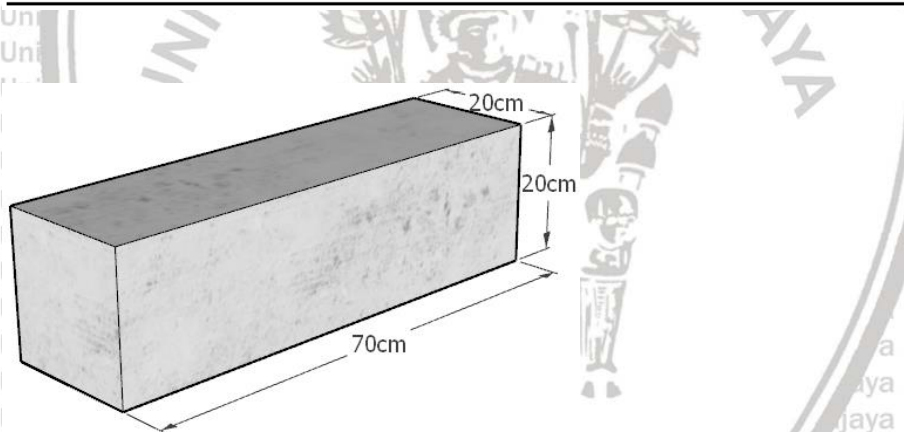
3.6 Rancangan Penelitian

Terdapat 2 macam bentuk benda uji beton yang digunakan pada penelitian ini yaitu berbentuk balok dan silinder. Benda uji balok beton terbagi menjadi 3 jenis yaitu variasi keretakan dengan ukuran 20 cm x 20 cm x 70 cm, variasi lubang (intrusi air) dengan ukuran 20 cm x 20 cm x 70 cm dan balok beton normal dengan ukuran 20 cm x 20 cm x 70 cm seperti pada Gambar 3.2. Benda uji keretakan dibuat retak menggunakan akrilik dengan kedalaman 4 cm, 8 cm dan 12 cm seperti pada Gambar 3.3. Sedangkan benda uji dengan adanya intrusi air dibuat lubang menggunakan pipa PVC diameter 2 inci, 3 inci dan 4 inci seperti pada Gambar 3.4. Untuk benda uji silinder menggunakan diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm seperti pada Gambar 3.5. Proporsi campuran beton yang digunakan untuk seluruh benda uji yaitu 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4.

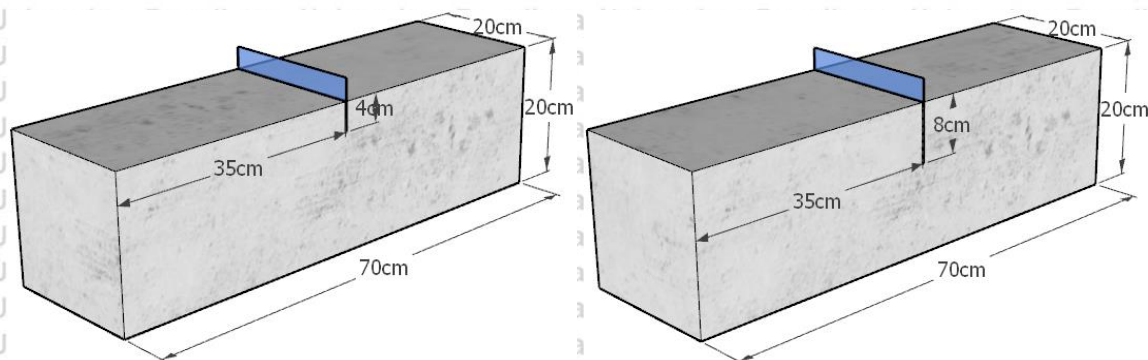
Rancangan benda uji terdapat pada Tabel 3.1. Penempatan pipa pada arah transversal benda uji balok yaitu pada bidang penampang 20 cm x 70 cm sebanyak 3 pipa (diameter sama). Dengan jumlah setiap variasi lubang (intrusi air) sebanyak 1 sampel benda uji. Untuk penempatan akrilik pada benda uji keretakan yaitu pada tengah bentang 70 cm. Dengan jumlah setiap variasi kedalaman retak sebanyak 1 sampel benda uji. Pada setiap batch pengecoran dibuat benda uji silinder sebanyak 3 sampel.

Tabel 3.1
Rancangan Benda Uji

Sampel	Benda Uji	Jenis Benda Uji	Volume (m ³)	Jumlah Benda Uji
BNB	Beton Normal Tanpa Variasi	Balok	0,028	1
RLA	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 4 cm	Balok	0,028	1
RLB	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 8 cm	Balok	0,028	1
RLC	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 12 cm	Balok	0,028	1
PTA	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 2 inci	Balok	0,028	1
PTB	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 3 inci	Balok	0,028	1
PTC	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 4 inci	Balok	0,028	1
A	Beton Normal	Silinder	0,0053	3

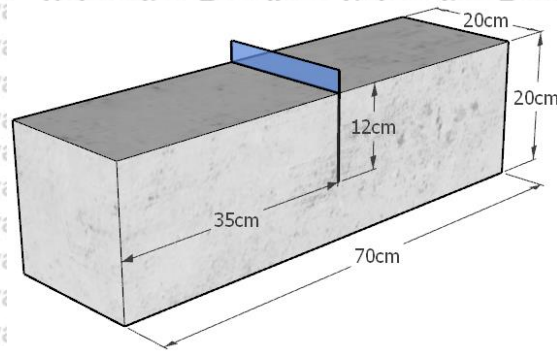


Gambar 3.2 Benda uji balok normal tanpa variasi



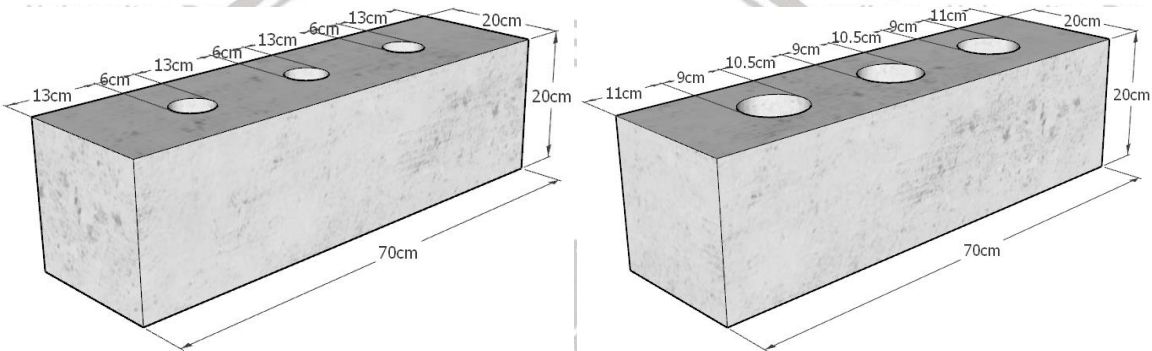
(a)

(b)



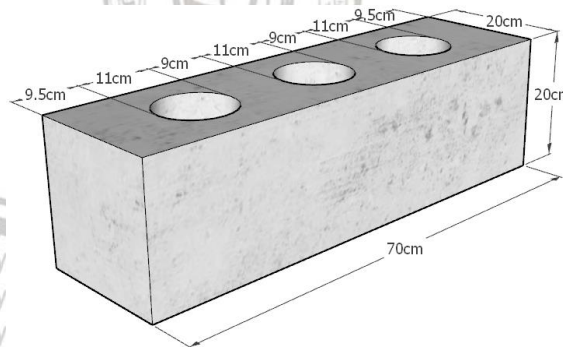
(c)

Gambar 3.3 Benda uji balok dengan variasi keretakan menggunakan akrilik dengan kedalaman retak (a) 4 cm; (b) 8 cm; (c) 12 cm.



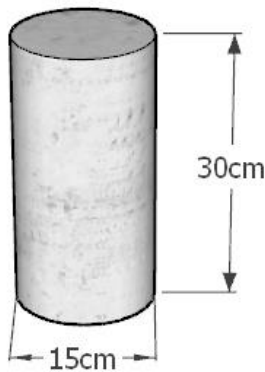
(a)

(b)



(c)

Gambar 3.4 Benda uji balok dengan lubang (intrusi air) dengan variasi diameter lubang (a) 2 inci; (b) 3 inci; (c) 4 inci.



Gambar 3.5 Benda uji silinder

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Pengujian Bahan Dasar

Tujuan dari pengujian bahan yaitu mengetahui karakteristik agregat kasar dan halus. Pengujian bahan dasar yang dilakukan pada penelitian ini yaitu analisis butiran agregat, kadar air, berat isi, berat jenis dan penyerapan air. Pengujian ini dilakukan berdasarkan buku petunjuk praktikum teknologi beton Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya yang mengacu pada SNI di bawah ini, antara lain :

- a) SNI ASTM C136-2012 tentang Metode Uji untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar
- b) SNI 1971-2011 tentang Cara Uji Kadar Air Total Agregat dengan Pengeringan
- c) SNI 1969-2008 tentang Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar
- d) SNI 1970-2008 tentang Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus
- e) SNI 03-4808-1998 tentang Metode Pengujian Berat Isi Agregat

3.7.2 Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar atau uji *slump* merupakan pengujian kekentalan campuran beton segar agar beton yang diproduksi mencapai kekuatan mutu beton yang baik. Tujuan dari uji *slump* adalah untuk mengetahui tingkat *workability* dari campuran beton segar. *Workability* (kelecekan) merupakan tingkat kemudahan suatu campuran beton segar untuk dikerjakan dan dipadatkan serta tidak terjadi *segregasi* (pemisahan agregat). Pengujian beton segar atau uji *slump* pada penelitian ini mengacu pada peraturan SNI 4433-2016 tentang Spesifikasi Beton Segar Siap Pakai.

3.7.3 Pembuatan Benda Uji

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam pembuatan benda uji adalah sebagai berikut :

- a) Menyiapkan bahan-bahan untuk campuran beton dengan komposisi atau berat masing-masing bahan sesuai *mix design* yang direncanakan.
- b) Menyiapkan alat pengaduk campuran beton (*mixer concrete*) dan memasukkan bahan-bahan ke dalam alat pengaduk secara berurutan (agregat kasar, semen, agregat halus, air) kemudian biarkan alat tersebut mengaduk selama ± 15 menit atau hingga campuran beton menjadi homogen.
- c) Setelah proses pengadukan selesai, dilakukan pengujian slump dengan mengambil sebagian campuran beton segar.
- d) Menyiapkan bekisting balok dan silinder sesuai ukuran yang telah direncanakan kemudian mengolesi bagian permukaan dalam dengan oli agar mudah dilepas dari bekisting ketika beton sudah mengeras.
- e) Mengolesi pipa PVC (lubang intrusi air) atau akrilik (keretakan) dengan oli agar tidak menempel atau agar mudah dilepas dari beton.
- f) Menyusun pipa PVC (lubang intrusi air) atau akrilik (keretakan) pada bekisting balok sesuai posisi atau ukuran yang telah direncanakan. Digunakan benang untuk menahan pipa PVC agar tidak berubah posisi ketika campuran beton dituangkan ke dalam bekisting balok.
- g) Menuang campuran beton ke dalam bekisting balok dan silinder, serta melakukan pemadatan menggunakan tongkat penusuk atau menggunakan alat *vibrator*.
- h) Setelah 24 jam (beton telah mengeras), dilakukan pelepasan bekisting, pipa PVC dan akrilik dari beton kemudian dilakukan *curing*.

3.7.4 Perawatan Benda Uji

Setelah beton telah mengeras (kurang lebih 24 jam) dan bekistingnya dilepas, dilakukan perawatan benda uji atau disebut dengan *curing*. Tujuan dari *curing* adalah untuk mencegah kehilangan air pada beton karena penguapan, mencegah terjadinya keretakan, mencegah terjadinya susut yang berlebihan dan menjaga suhu beton selama fase *hardening* agar menghasilkan mutu beton sesuai dengan yang direncanakan. Perawatan benda uji balok dengan menyelimuti seluruh permukaan beton menggunakan karung goni yang dibasahi setiap hari. Sedangkan untuk benda uji silinder, perawatan dilakukan dengan merendam benda uji di dalam bak air hingga seluruh permukaan masuk dalam air.

Pada penelitian ini perawatan benda uji balok dilakukan setiap hari selama 28 hari terhitung dari waktu pengecoran. Sedangkan untuk benda uji silinder, perawatan dilakukan selama 6 hari terhitung dari waktu pengecoran, kemudian benda uji dikeluarkan dan diletakkan pada suhu ruangan. Dilakukan pengujian kuat tekan untuk benda uji silinder pada hari ke-7.

3.7.5 Pengujian Kuat Tekan

Tujuan dari pengujian kuat tekan adalah untuk mengetahui nilai kuat tekan dari benda uji silinder yang akan digunakan untuk mendapatkan nilai mutu beton dari benda uji tersebut.

Pada penelitian ini pengujian kuat tekan dilakukan saat beton berumur 7 hari. Pada pengolahan data, nilai kuat tekan akan dikonversikan ke umur beton 28 hari untuk mendapatkan nilai mutu beton. Adapun langkah-langkah dalam melakukan pengujian kuat tekan antara lain :

- a) Menimbang benda uji silinder untuk mengetahui berat dan kerapatan
- b) Melapisi permukaan benda uji yang tidak rata dengan mortar belerang atau biasa disebut capping. Tujuan dari proses capping adalah agar tegangan dari mesin penguji (*Compression Testing Machine*) dapat tersalurkan secara merata pada permukaan benda uji.



Gambar 3.6 Vertical Cylinder Capping Concrete (Alat untuk proses capping)

- c) Meletakkan benda uji pada mesin penguji (*Compression Testing Machine*) seperti pada Gambar 3.7 secara sentris.

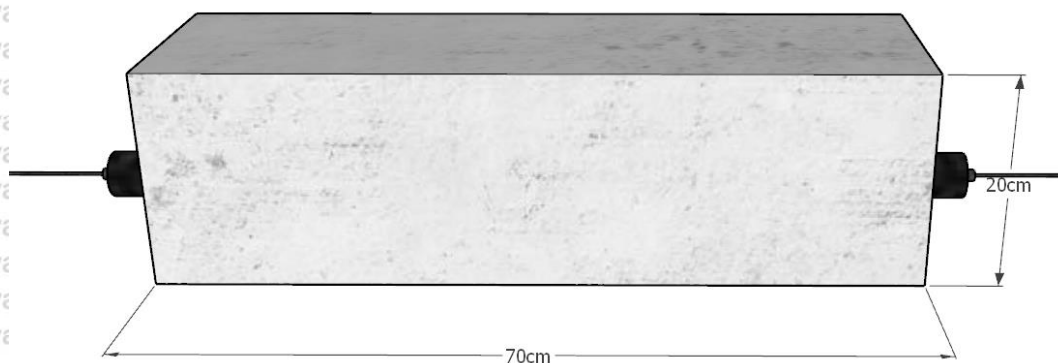


Gambar 3.7 Compression Testing Machine

- d) Mesin dijalankan dan mencatat beban maksimum yang mampu ditahan hingga benda uji hancur.

3.7.6 Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) dilakukan pada benda uji balok dengan menggunakan alat yang disebut PUNDIT PL-200 setelah benda uji berumur 28 hari. Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk pengambilan data yaitu metode langsung (*direct method*), yaitu dengan meletakkan kedua *transducer* pada 2 permukaan yang berbeda secara parallel seperti pada Gambar 3.8. Pada penelitian ini digunakan *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz dan *S-Wave transducer* 250 kHz. Hasil yang didapatkan dari pengujian ini berupa nilai modulus elastisitas dalam satuan GPa.



Gambar 3.8 Pengujian UPV dengan metode langsung (*direct method*)

Beberapa hal yang dilakukan dalam prosedur pengujian UPV antara lain :

- Meratakan dan membersihkan permukaan beton yang akan diuji.
- Mengkalibrasi alat uji UPV dengan cara menempatkan kedua *transducer* di kedua sisi *calibration rod* seperti pada Gambar 3.9. Proses ini dilakukan agar hasil pembacaan waktu transmisi pada *transmitter* dan *receiver* sama.



Gambar 3.9 Proses kalibrasi pada alat UPV

Sumber : Bahtiar (2013)

- c) Menentukan jarak antar *transducer* dan *density* pada layar PUNDIT PL-200.
- d) Mengoleskan gel ultrasonik (*couplant*) seperti Gambar 3.10 pada titik permukaan beton yang akan diuji sesuai dengan jenis transduser.



Gambar 3.10 Gel ultrasonik untuk transduser standar

- e) Melakukan pengujian pertama yaitu dengan menggunakan transduser standar seperti Gambar 3.11 yang menghasilkan waktu transmisi *P-wave*.



Gambar 3.11 Transduser standar

- f) Mengoleskan *echo ultrasonic gel* (*Echo Shear Wave Couplant*) seperti Gambar 3.12 pada permukaan *transducer S-wave* (Gambar 3.13), kemudian melakukan pengujian kedua yaitu dengan menggunakan *transducer S-wave* yang menghasilkan waktu transmisi *S-wave*.



Gambar 3.12 Gel echo ultrasonik untuk transduser S-wave



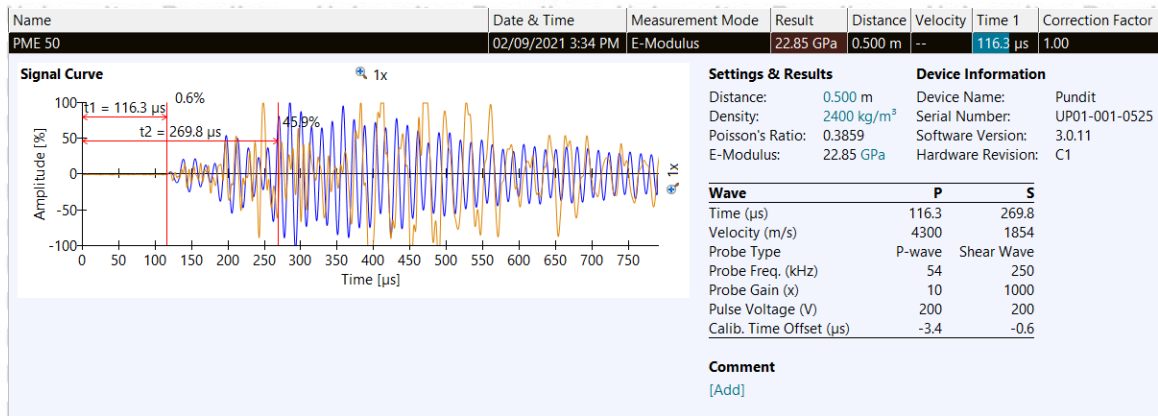
Gambar 3.13 Transduser S-wave

- g) Setelah pengujian selesai, akan didapatkan nilai rasio poisson dan modulus elastisitas berdasarkan selisih waktu transmisi *P-wave* dan *S-wave*.

3.8 Metode Analisis Data

3.8.1 Metode Pengumpulan Data

Dari beberapa pengujian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa data yang diperlukan untuk kemudian akan dianalisis. Pada pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) benda uji balok didapatkan data berupa *waveform* yaitu dari pancaran gelombang ultrasonik yang merambat melalui beton. Data tersebut kemudian diolah menggunakan *Software PL-Link*. Dari data *waveform* tersebut akan didapatkan parameter gelombang yaitu waktu transmisi *P-wave* dan *S-wave* yang kemudian akan menghasilkan nilai modulus elastisitas dinamis dalam satuan Gpa seperti pada Gambar 3.14. Sedangkan pada pengujian benda uji silinder menggunakan mesin kuat tekan (*Compression Testing Machine*), didapatkan data beban maksimum (P_{max}) yang mampu ditahan oleh benda uji silinder. Data beban maksimum tersebut akan digunakan untuk menghitung nilai kuat tekan.



Gambar 3.14 Tampilan data hasil pengujian UPV dari *Software* PL-Link

3.8.2 Metode Pengolahan Data

Dari alat UPV didapatkan data nilai waktu transmisi, cepat rambat gelombang dan rasio poisson yang akan digunakan untuk menganalisis modulus elastisitas beton. Pada penelitian ini parameter-parameter gelombang didasarkan pada perlakuan atau variasi yang diberikan pada benda uji balok beton. Perlakuan atau variasi tersebut yaitu keretakan (retak menggunakan akrilik) dan lubang intrusi (lubang menggunakan pipa PVC). Dari data-data yang diperoleh akan dilakukan pengolahan data menggunakan *Software* PL-Link. Kemudian dari data tersebut dibuat perbandingan apakah variasi kedalaman retak dan lubang (intrusi air) akan mempengaruhi cepat rambat gelombang. Dari data-data yang diperoleh tersebut juga akan dilakukan perbandingan nilai modulus elastisitas antara benda uji beton normal (tanpa variasi), benda uji dengan variasi kedalaman retak dan benda uji dengan lubang (intrusi air) seperti pada *Tabel 3.2*.

Tabel 3.2

Hasil Pengujian Modulus Elastisitas dengan Alat UPV

Benda Uji	t1 (µs)	Vp (m/s)	t2 (µs)	Vs (m/s)	ν	E (GPa)
BNB						
RLA						
RLB						
RLC						
PTA						
PTB						
PTC						

Keterangan :

t_1 = Waktu gelombang P pertama terdeteksi (μs)

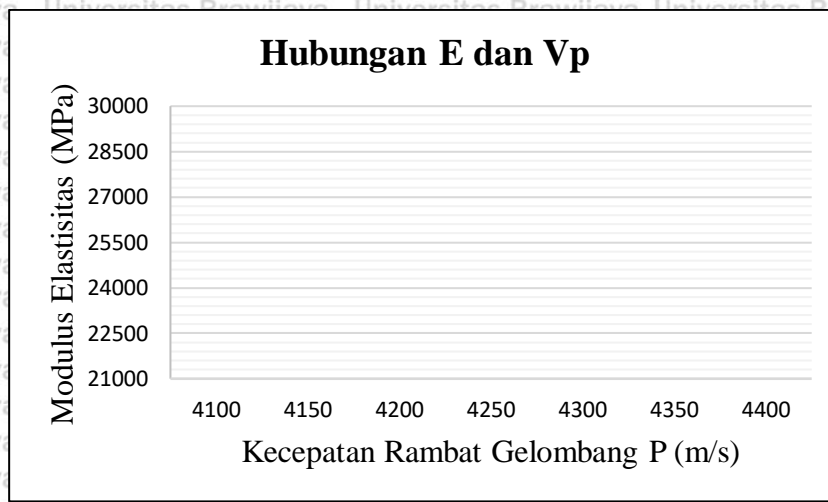
t_2 = Waktu gelombang S pertama terdeteksi (μs)

V_p = Kecepatan rambat gelombang P (m/s)

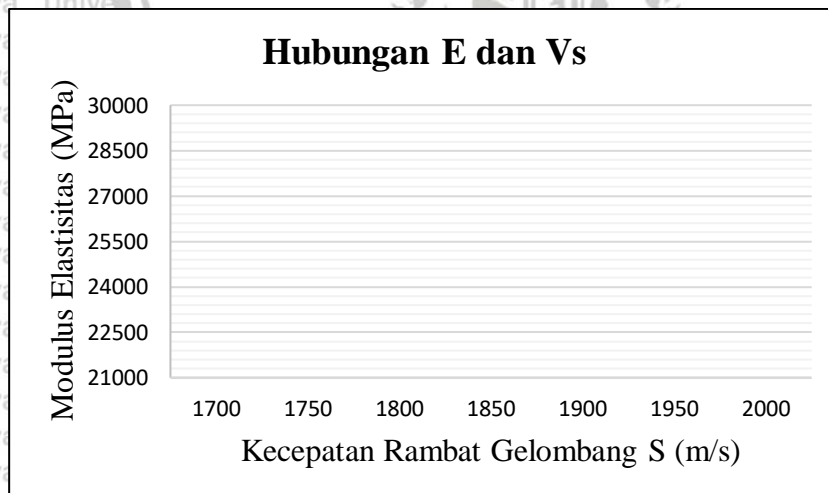
V_s = Kecepatan rambat gelombang S (m/s)

ν = Rasio poisson

E = Modulus elastisitas dinamis (GPa)



Gambar 3.15 Grafik hubungan modulus elastisitas (E) dan cepat rambat gelombang P (V_p)



Gambar 3.16 Grafik hubungan modulus elastisitas (E) dan cepat rambat gelombang S (V_s)

3.9 Hipotesis

Berdasarkan hasil kajian pustaka, maka hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a) Terdapat pengaruh dari adanya keretakan pada beton terhadap nilai modulus elastisitas dari hasil pembacaan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).
- b) Terdapat pengaruh dari adanya lubang intrusi (tanpa atau dengan air) pada beton terhadap nilai modulus elastisitas dari hasil pembacaan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).
- c) Terdapat pengaruh dari keretakan dan lubang intrusi air pada beton terhadap nilai cepat rambat gelombang yang dihasilkan dari alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*).



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Benda Uji

4.1.1 Perencanaan Campuran Benda Uji

Pada penelitian ini menggunakan 7 benda uji yang terbagi menjadi 3 macam yaitu 1 benda uji beton normal tanpa variasi, 3 benda uji beton dengan variasi kedalaman retak (4 cm, 8 cm, dan 12 cm) dan 3 benda uji beton dengan variasi diameter lubang (2 inci, 3 inci, dan 4 inci). Benda uji tersebut berupa balok beton dengan dimensi 20 cm x 20 cm x 70 cm.

Perbandingan material yang direncanakan pada campuran adukan beton adalah 1 : 1,6 : 2,6 dengan keterangan semen : agregat halus (pasir) : agregat kasar (kerikil). Adapun hasil perhitungan proporsi kebutuhan material setiap variasi terdapat pada *Tabel 4.1*.

Tabel 4.1

Kebutuhan material untuk setiap variasi benda uji

Benda Uji	Kebutuhan Material			
	Semen (Kg)	Air (Kg)	Pasir (Kg)	Kerikil (Kg)
Beton Normal Tanpa Variasi	11,48	4,61	18,08	29,531
Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 4 cm	11,48	4,61	18,08	29,531
Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 8 cm	11,48	4,61	18,08	29,531
Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 12 cm	11,48	4,61	18,08	29,531
Beton dengan Variasi Diameter Lubang 2 inci	10,96	4,40	17,26	28,189
Beton dengan Variasi Diameter Lubang 3 inci	10,96	4,40	17,26	28,189
Beton dengan Variasi Diameter Lubang 4 inci	10,96	4,40	17,26	28,189
Jumlah	78,795	31,613	124,119	202,689

4.1.2 Proses Pembuatan Benda Uji

Proses pembuatan benda uji dimulai dengan menyiapkan material yang telah ditimbang sesuai dengan *Tabel 4.1*. Proses pencampuran adukan beton menggunakan bantuan alat pengaduk atau pencampur beton (*concrete mixer*). Menyiapkan bekisting balok berdimensi 20 cm x 20 cm x 70 cm seperti pada *Gambar 4.1 (a)* dan bekisting silinder berdimensi 15 cm x 30 cm yang telah diolesi oli pada permukaan dalam bekisting. Fungsi oli adalah agar benda uji beton tidak melekat dan mudah dilepas dari bekisting ketika beton sudah mengeras.

Untuk bekisting benda uji dengan variasi kedalaman retak, akrilik yang telah diolesi oli dipasang tepat ditengah bentang sesuai dengan yang direncanakan. Sedangkan bekisting benda uji variasi diameter lubang, pipa PVC yang telah diolesi oli disusun sesuai posisi atau ukuran yang telah direncanakan. Digunakan benang kasur untuk menahan pipa PVC agar tidak berubah posisi ketika campuran beton dituangkan ke dalam bekisting.

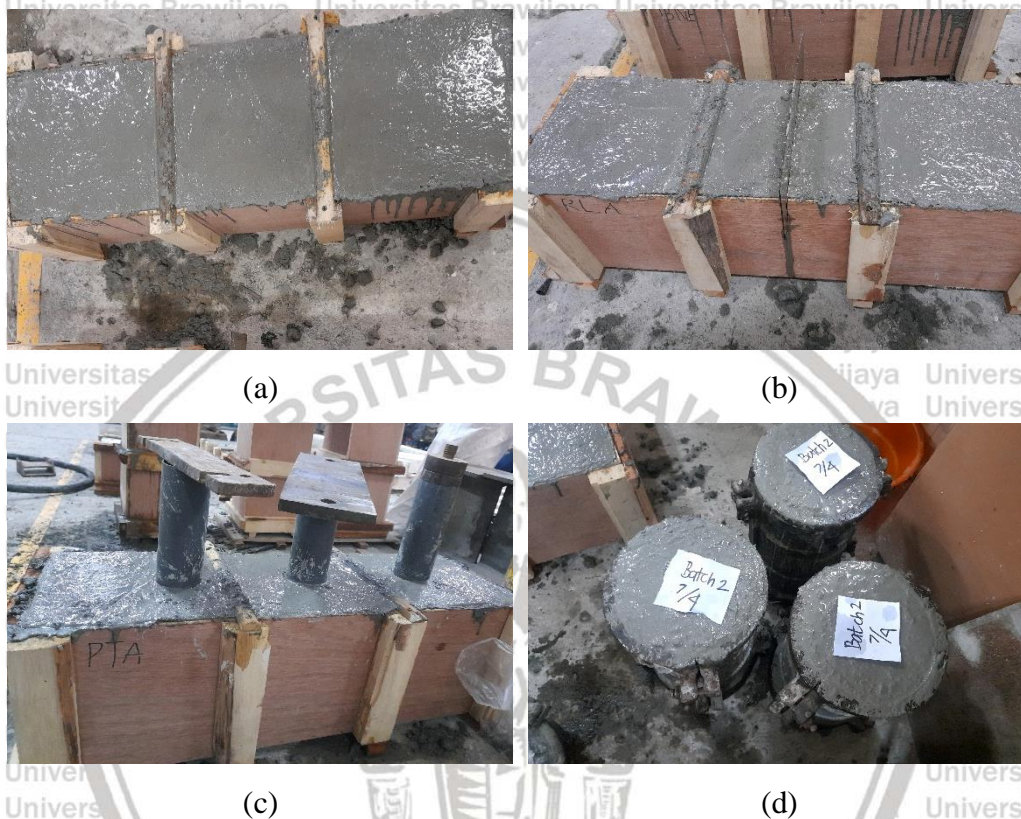
Material-material yang telah ditimbang, dimasukkan ke dalam alat pengaduk campuran beton (*concrete mixer*) secara berurutan (agregat kasar, semen, agregat halus, air) seperti pada *Gambar 4.1 (b)*. Tunggu alat tersebut mengaduk selama 15 menit atau hingga campuran beton menjadi homogen. Setelah itu dilakukan pengujian *slump* dengan mengambil sebagian campuran beton segar untuk mengetahui tingkat *workability* atau kelecakan dari campuran beton segar seperti pada *Gambar 4.1 (c)*. Pengujian beton segar atau uji *slump* mengacu pada peraturan SNI 4433-2016. Setelah lolos uji *slump*, campuran beton dituangkan ke dalam bekisting balok dan silinder, kemudian dilakukan pemadatan menggunakan *vibrator*.



Gambar 4.1 Proses pembuatan benda uji (a) Persiapan bekisting; (b) Pengadukan campuran beton dengan *concrete mixer*; (c) Pengujian Slump

Sumber : Penelitian

Untuk benda uji dengan variasi kedalaman retak dan variasi diameter lubang, pada saat menuangkan campuran beton akrilik dan pipa PVC tetap ditahan seperti pada *Gambar 4.2* (c) agar tidak berubah posisi dan kedalaman sesuai dengan yang direncanakan. Menunggu kurang lebih 4 jam, kemudian dilakukan pencabutan pipa PVC dari benda uji. Setelah 24 jam, dilakukan pencabutan akrilik dan pelepasan bekisting dari benda uji.



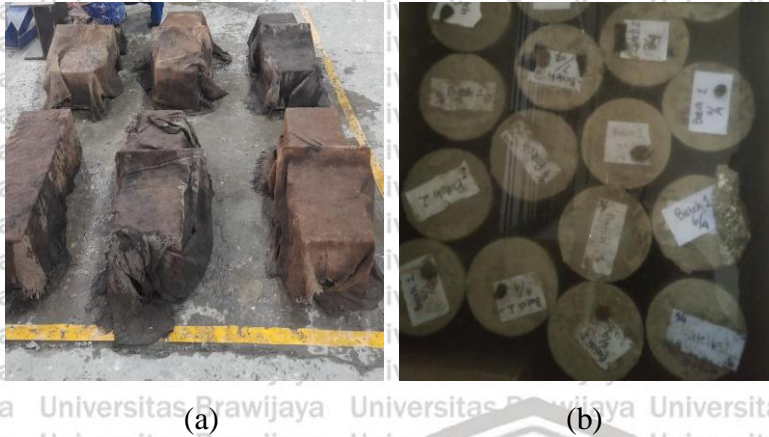
Gambar 4.2 Benda uji (a) Beton normal; (b) Beton dengan variasi kedalaman retak; (c) Beton dengan variasi diameter lubang; (d) Beton berbentuk silinder

Sumber : Penelitian

4.1.3 Curing Benda Uji

Setelah bekisting benda uji balok dilepas, dilakukan perawatan benda uji (*Curing*) yaitu dengan menyelimuti seluruh permukaan beton menggunakan karung goni yang telah dibasahi seperti pada *Gambar 4.3* (a). Tujuan dari *curing* adalah mencegah kehilangan air pada beton karena penguapan, mencegah terjadinya susut beton dan menjaga suhu beton selama fase *hardening* agar menghasilkan mutu beton sesuai dengan yang direncanakan. *Curing* dilakukan setiap hari selama 7 hari terhitung setelah pelepasan bekisting dari benda uji. Setelah beton berumur 28 hari maka beton siap untuk diuji. Sedangkan untuk benda uji silinder, *Curing* dilakukan dengan cara merendam benda uji sampai seluruh permukaan

terendam air seperti pada *Gambar 4.3 (b)* selama 14 hari. Setelah 14 hari benda uji silinder di diamkan pada suhu ruangan selama 24 jam untuk kemudian akan di uji kuat tekan.



Gambar 4.3 Curing benda uji (a) Balok; (b) Silinder

Sumber : Penelitian

4.2 Pengujian Kuat Tekan

Tujuan dari pengujian kuat tekan yaitu mengetahui mutu dari benda uji beton. Dibandingkan dengan sifat-sifat lain, kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam penentuan kualitas beton. Pada penelitian ini, dilakukan 2 jenis pengujian kuat tekan yaitu menggunakan mesin tekan atau *Compression Testing Machine (CTM)* untuk benda uji silinder dan *Rebound Schmidt Hammer Test* untuk benda uji balok. Kode untuk setiap benda uji terdapat pada *Tabel 4.2*.

Tabel 4.2

Kode untuk setiap variasi benda uji

Kode Benda Uji	Keterangan	Dimensi (m)	Volume (m ³)
BNB	Beton Normal Tanpa Variasi		0,028
RLA	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 4 cm		0,028
RLB	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 8 cm		0,028
RLC	Beton dengan Variasi Kedalaman Retak 12 cm	0,2 x 0,2 x 0,7	0,028
PTA	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 2 inci		0,027
PTB	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 3 inci		0,025
PTC	Beton dengan Variasi Diameter Lubang 4 inci		0,024

4.2.1 Compression Testing Machine (CTM)

Kuat tekan beton adalah nilai besarnya beban per satuan luas yang mengakibatkan benda uji beton hancur apabila menerima gaya tekan tertentu dari mesin tekan atau *Compression Testing Machine* (CTM). Kekuatan tekan beton dipengaruhi oleh kualitas material penyusun, perbandingan campuran, kerapatan, faktor air semen (FAS), jenis semen dan umur beton. Adanya perbedaan kuat tekan disebabkan oleh metode dalam pencampuran (*mixing*), pemindahan, pengecoran beton, perbedaan dalam persiapan, *curing* (perawatan) dan pengujian sampel benda uji. Benda uji silinder di uji kuat tekan setelah beton berumur 7 hari. Sebelum menguji kuat tekan pada *Compression Testing Machine* (CTM), dilakukan proses *Capping* pada benda uji seperti pada *Gambar 4.4*. Hal ini bertujuan agar permukaan benda uji yang akan menerima beban menjadi rata dan beban dapat diterima pada seluruh permukaan benda uji.



(a)

(b)

Gambar 4.4 Capping benda uji silinder

Sumber : Penelitian

Digunakan benda uji berbentuk silinder diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Setelah proses *Capping* selesai, benda uji diletakkan pada mesin kuat tekan atau *Compression Testing Machine* (CTM) seperti pada *Gambar 4.5*. Nilai kuat tekan beton dihitung menggunakan rumus berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (4-1)$$

Keterangan :

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

P = beban aksial tekan (N)

A = luas penampang benda uji (mm²)



Gambar 4.5 Uji kuat tekan menggunakan *Compression Testing Machine*

Sumber : Penelitian

Untuk setiap *batch* pengecoran dibuat minimal 3 benda uji silinder. Benda uji BNB dan RLA dibuat dalam 1 *batch* pengecoran sehingga memiliki kuat tekan yang sama. Selain BNB dan RLA, RLB dan RLC serta PTB dan PTC juga dibuat dalam 1 *batch* pengecoran, sehingga memiliki kuat tekan yang sama. Berikut merupakan contoh perhitungan kuat tekan dari hasil pengujian menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM).

Contoh perhitungan :

Benda uji : Beton dengan variasi kedalaman retak 8 cm (RLB)

Diameter : 15 cm

Beban maksimum : 42000 kg

Umur beton : 14 hari (faktor = 0,88)

Luas :

$$A = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \pi 15^2 = 176,625 \text{ cm}^2$$

Kuat tekan benda uji :

$$f'_c = \frac{42000}{176,625} = 237,792 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_c (28 \text{ hari}) = \frac{237,792}{0,88} = 270,218 \text{ kg/cm}^2 = 26,499 \text{ MPa}$$

Rekapitulasi hasil uji kuat tekan *Compression Testing Machine* (CTM) setiap benda uji terdapat pada *Tabel 4.3*. Proporsi campuran beton untuk seluruh benda uji direncanakan sama, namun ada perbedaan hasil kuat tekan pada setiap *batch* pengecoran. Nilai kuat tekan (f'_c) tertinggi yaitu benda uji PTB dan PTC sebesar 34,116 MPa dan kuat tekan terendah yaitu benda uji beton normal (BNB) dan RLA sebesar 24,322 MPa.

Tabel 4.3

Rekapitulasi hasil uji kuat tekan *Compression Testing Machine* (CTM)

Benda Uji	Berat (Kg)	Beban Maksimum (N)	f'c (28 hari) (Mpa)	Standar Deviasi	Rata-Rata (Mpa)
BNB	12,19	272000	17,303	6,130	24,322
	11,82	425000	27,036		
	11,98	450000	28,627		
RLA	12,19	272000	17,303	6,130	24,322
	11,82	425000	27,036		
	11,98	450000	28,627		
RLB	12,34	420000	27,022	1,875	24,963
	12,2	381000	24,513		
	12,05	363000	23,355		
RLC	12,34	420000	27,022	1,875	24,963
	12,2	381000	24,513		
	12,05	363000	23,355		
PTA	12,03	380000	24,448	4,836	27,494
	12,34	388000	24,963		
	11,98	514000	33,070		
PTB	12,35	513000	35,669	4,615	34,116
	12,27	543000	37,755		
	11,96	416000	28,924		
PTC	12,35	513000	35,669	4,615	34,116
	12,27	543000	37,755		
	11,96	416000	28,924		

4.2.2 Rebound Schmidt Hammer Test

Sebelum melakukan pengujian UPV, dilakukan pengujian *Hammer Test* pada setiap benda uji balok. Karena jika *Hammer Test* dilakukan setelah pengujian UPV, permukaan beton menjadi lembab akibat penggunaan gel ultrasonik (*Couplant Gel*). Konsep kerja dari alat *Rebound Schmidt Hammer Test* adalah menguji kekerasan permukaan beton. Terlihat pada Gambar 4.6 setelah mengenai permukaan beton, alat ini akan memantul dan besaran yang dihasilkan akan menjadi ukuran kekerasannya. Nilai besaran yang dihasilkan akan dikonversikan pada skala menjadi kuat tekan.



Gambar 4.6 Uji Kuat Tekan *Hammer Test*

Sumber : Penelitian

Hasil uji kuat tekan setiap benda uji menggunakan alat *Rebound Schmidt Hammer Test* terdapat pada *Tabel 4.4*.

Tabel 4.4

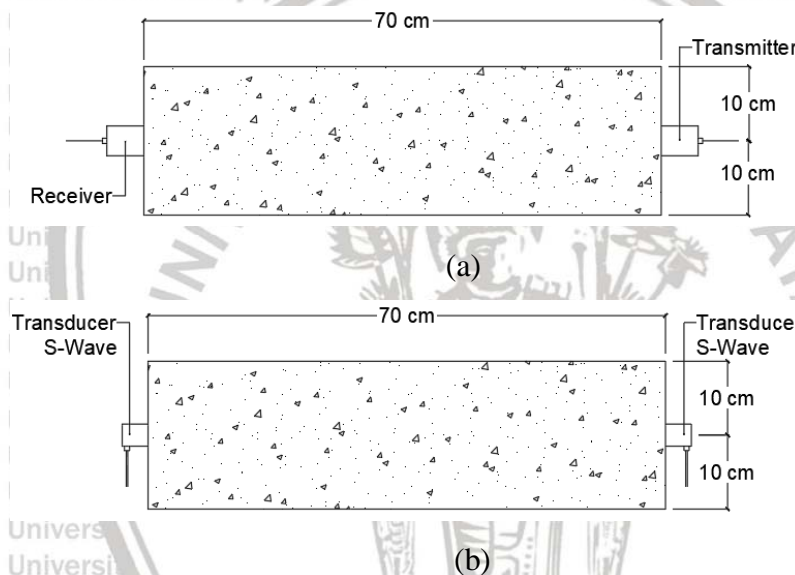
Rekapitulasi hasil uji kuat tekan *Hammer Test*

Benda Uji	f'c Hammer Test (Mpa)	Rata-Rata Hammer Test (Mpa)
BNB	26	25,5
	25	
RLA	27	26,5
	26	
RLB	25,5	26,8
	28	
RLC	26,5	26,5
	26,5	
PTA	27	27,0
PTB	25,5	25,5
PTC	28	28

Hasil pengujian *Hammer Test* diperoleh nilai kuat tekan tertinggi yaitu pada benda uji variasi diameter lubang 4 inci (PTC) sebesar 28 MPa. Sedangkan nilai kuat tekan terendah diperoleh dari benda uji beton normal (BNB). Hasil pengujian *Hammer Test* dipengaruhi oleh kondisi kelembaban dari permukaan beton tersebut, oleh karena itu pastikan sebelum melakukan pengujian permukaan beton dalam keadaan kering atau tidak lembab. Pengujian dilakukan pada beberapa sisi balok untuk kemudian akan diambil rata-rata kuat tekannya.

4.3 Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Alat yang digunakan pada pengujian UPV adalah PUNDIT PL-200 dari PROCEQ. Pengujian modulus elastisitas dinamis dengan UPV dilakukan pada setiap benda uji balok. Pengujian dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari. Pada penelitian ini, digunakan metode langsung (*direct method*) yaitu dengan meletakkan kedua *transducer* pada 2 permukaan yang berbeda secara paralel seperti pada *gambar 4.7* yaitu pada sisi 20 cm x 20 cm dengan bentang atau jarak antar *transducer* 70 cm. Ada 2 macam *transducer* yang digunakan yaitu *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz menghasilkan kecepatan rambat gelombang longitudinal (gelombang P) dan *S-Wave Transducer* dengan frekuensi 250 kHz menghasilkan kecepatan rambat gelombang transversal (gelombang S). Selain *transducer*, juga digunakan 2 gel yang berbeda untuk masing-masing *transducer*.



Gambar 4.7 Skema pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV (a) Transducer standar (P-Wave); (b) S-Wave transducer

Sumber : Penelitian

Sebelum melakukan pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV, benda uji akan ditimbang untuk mendapatkan berat serta menghitung volumenya untuk menghitung rapat massa (*Density*) untuk dimasukkan pada alat PUNDIT PL-200. Nilai rapat massa (*Density*) didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus berikut.

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

Keterangan :

ρ = rapat massa (Kg/m³)

m = massa benda uji (Kg)

V = Volume benda uji (m³)

Adapun hasil perhitungan rapat massa (*Density*) dari setiap benda uji terdapat pada

Tabel 4.5.

Tabel 4.5

Perhitungan rapat massa (*Density*)

Benda Uji	Berat (Kg)	Volume (m ³)	Rapat Massa (Kg/m ³)
BNB	62,85	0,028	2245
RLA	62,28	0,028	2224
RLB	63,42	0,028	2265
RLC	63,7	0,028	2275
PTA-TA	60,91	0,027	2279
PTB-TA	58,59	0,025	2331
PTC-TA	54,6	0,024	2302
PTA-A	62	0,027	2320
PTB-A	61,04	0,025	2428
PTC-A	58,83	0,024	2480

Keterangan :

BNB = Beton normal

RLA = Beton dengan variasi kedalaman retak 4 cm

RLB = Beton dengan variasi kedalaman retak 8 cm

RLC = Beton dengan variasi kedalaman retak 12 cm

PTA-TA = Beton dengan variasi diameter lubang 2 inci (Tanpa air)

PTB-TA = Beton dengan variasi diameter lubang 3 inci (Tanpa air)

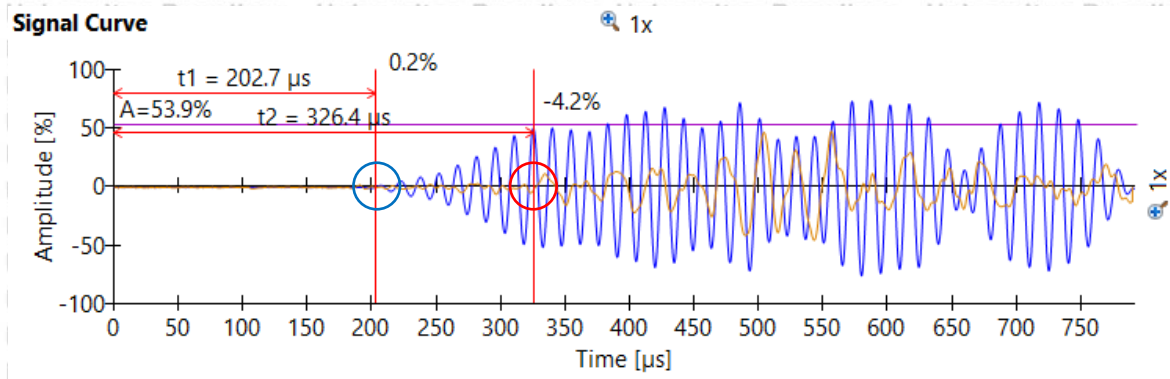
PTC-TA = Beton dengan variasi diameter lubang 4 inci (Tanpa air)

PTA-A = Beton dengan variasi diameter lubang 2 inci (Berisi air)

PTB-A = Beton dengan variasi diameter lubang 3 inci (Berisi air)

PTC-A = Beton dengan variasi diameter lubang 4 inci (Berisi air)

Dari alat PUNDIT PL-200 didapatkan nilai cepat rambat gelombang P (V_p), cepat rambat gelombang S (V_s), waktu transmisi dan rasio poisson. Kemudian data-data tersebut akan dianalisis menggunakan *software* PL-Link. Gambar 4.8 merupakan Contoh pengambilan V_p dan V_s pada *software* PL-Link.



Gambar 4.8 Contoh pengambilan V_p dan V_s pada software PL-Link

Pada Gambar 4.8 terdapat 2 macam gelombang ultrasonik yaitu gelombang P (warna biru) dan gelombang S (warna jingga). Letak pengambilan kecepatan rambat gelombang P (V_p) yaitu pada awal gelombang P yang pertama (lingkaran biru). Pada dasarnya pengambilan V_p secara otomatis ditentukan oleh alat PUNDIT PL-200. Sedangkan penentuan letak pengambilan V_s dilakukan secara manual yaitu pada awal gelombang tertinggi pertama (lingkaran merah). Modulus elastisitas dinamis dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$v = \frac{L}{t} \dots \dots \dots (4-3)$$

$$v = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \dots \dots \dots (4-4)$$

$$G = V_s^2 \times \rho \dots \dots \dots (4-5)$$

$$E = 2 \cdot \rho \cdot V_s^2 (1 + \nu) \dots \dots \dots (4-6)$$

Keterangan :

v = Kecepatan rambat (m/s)

L = Panjang lintasan beton/jarak antar transduser (m)

t = Waktu tempuh gelombang sepanjang L (s)

V_p = Kecepatan rambat P -wave (m/s)

V_s = Kecepatan rambat S -wave (m/s)

ν = Rasio poisson

G = Modulus geser (GPa)

ρ = Rapat massa (kg/m^3)

E = Modulus elastisitas dinamis (GPa)

4.3.1 Balok Beton Normal

Dari hasil pengujian UPV metode langsung (*Direct method*) pada benda uji beton normal diperoleh nilai waktu pertama gelombang longitudinal (*P-wave*) dan transversal (*S-wave*) terdeteksi, cepat rambat gelombang P dan S serta rasio poisson. Pengujian dilakukan dengan jarak antar *transducer* 70 cm atau posisi *transducer* terletak pada sisi 20 cm x 20 cm seperti pada *Gambar 4.9*.



(a)

(b)

Gambar 4.9 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton normal (a) Transducer standar (*P-wave*); (b) *Transducer S-wave*

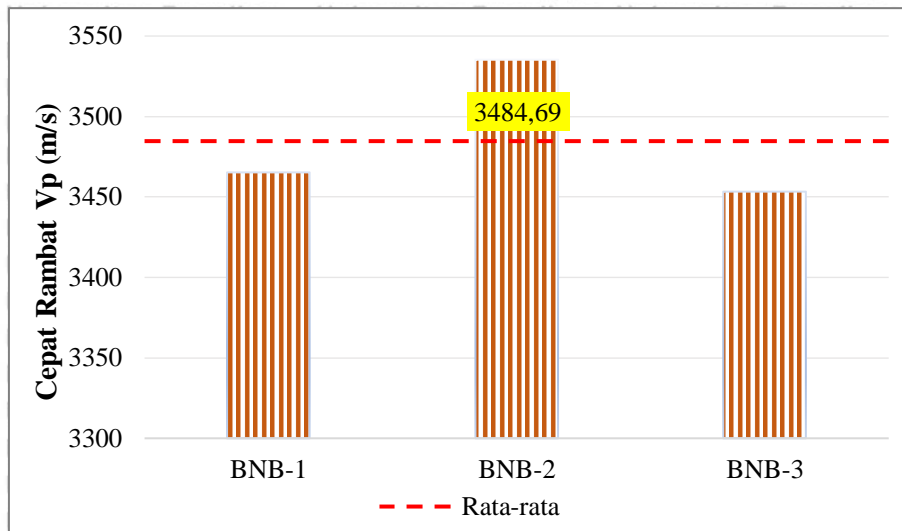
Sumber : Penelitian

Untuk benda uji beton normal, pengujian dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian UPV benda uji beton normal terdapat pada *Tabel 4.6*. Rata-rata cepat rambat gelombang P dan S tersaji dalam diagram batang yang terdapat pada *Gambar 4.10* untuk rata-rata cepat rambat gelombang P (V_p) dan *Gambar 4.11* untuk rata-rata cepat rambat gelombang S (V_s).

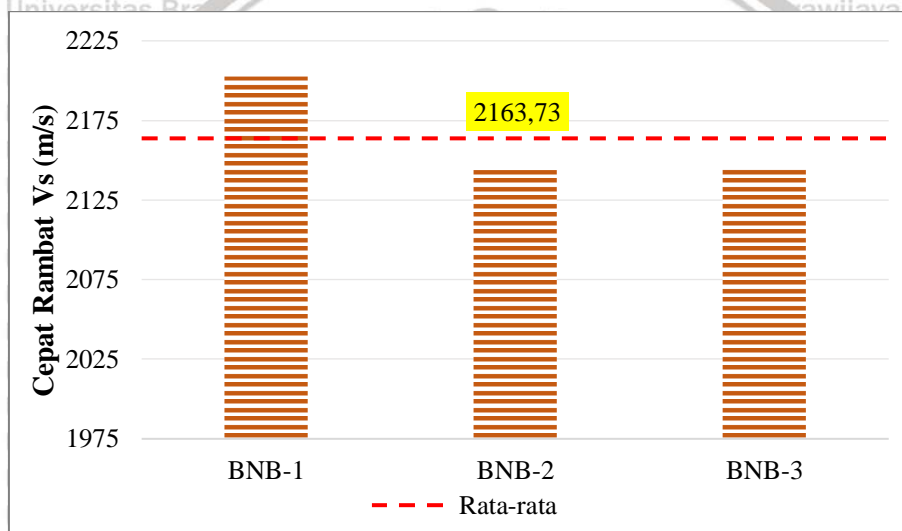
Tabel 4.6

Hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)

Benda Uji	t1 (μ s)	Vp (m/s)	t2 (μ s)	Vs (m/s)	Poisson's Ratio
BNB	202	3465,35	317,8	2202,64	0,1611
	198	3535,35	326,5	2143,95	0,2092
	202,7	3453,38	326,4	2144,61	0,1861



Gambar 4.10 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)



Gambar 4.11 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)

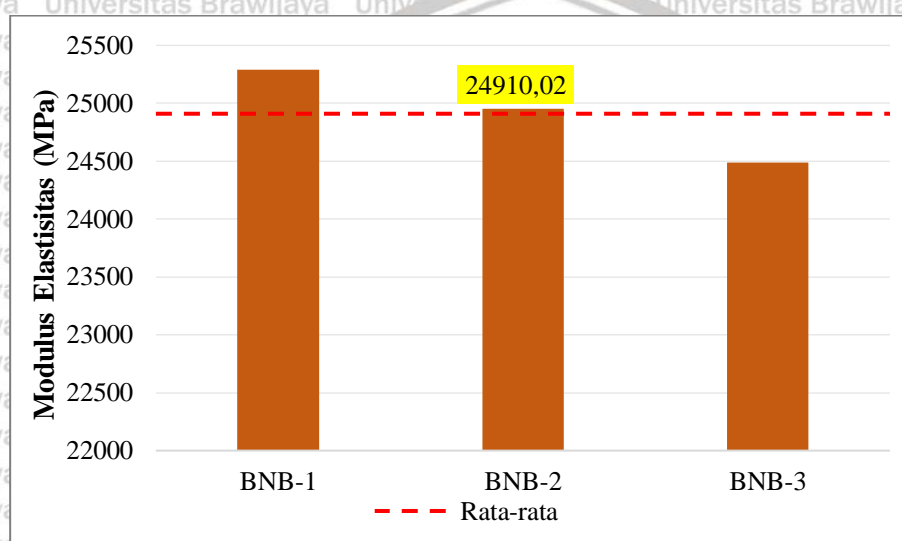
Dari beberapa pengujian UPV metode langsung (*Direct*) pada benda uji beton normal didapatkan kecepatan rambat gelombang P antara 3400 m/s sampai dengan 3550 m/s dan kecepatan rambat gelombang S antara 2000 m/s sampai dengan 2200 m/s. Pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11 menunjukkan nilai cepat rambat gelombang hasil pengujian UPV. Pada Gambar 4.10 didapatkan hasil cepat rambat gelombang P rata-rata dari 3 kali pengujian yaitu sebesar 3484,69 m/s. sedangkan pada Gambar 4.11 didapatkan hasil cepat rambat gelombang S rata-rata dari 3 kali pengujian yaitu sebesar 2163,73 m/s.

Hasil dari pengujian UPV kemudian dianalisis menggunakan *software PL-Link* untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamis. Perhitungan rasio poisson menggunakan rumus 4-4 dan nilai modulus elastisitas dinamis didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus 4-6. Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis terdapat pada *Tabel 4.7*.

Tabel 4.7

Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal (BNB)

Benda Uji	Vs (m/s)	Poisson's Ratio	Rapat Massa (kg/m ³)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)
BNB	2202,64	0,1611	2245	25288,25	24910,02
	2143,95	0,2092		24951,19	
	2144,61	0,1861		24490,63	



Gambar 4.12 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)

Dari hasil perhitungan beberapa pengujian UPV pada benda uji beton normal didapatkan nilai modulus elastisitas dinamis antara 24400 MPa sampai dengan 25300 MPa. Nilai rata-rata modulus elastisitas benda uji beton normal tersaji dalam bentuk diagram batang pada *Gambar 4.12* sebesar 24910,02 MPa.

4.3.2 Balon Beton dengan Variasi Kedalaman Retak

Terdapat 3 benda uji variasi kedalaman retak yaitu benda uji dengan kedalaman retak 4 cm (RLA), 8 cm (RLB) dan 12 cm (RLC). Dari hasil pengujian UPV metode langsung (direct) pada benda uji variasi kedalaman retak diperoleh nilai waktu pertama gelombang longitudinal (*P-wave*) dan transversal (*S-wave*) terdeteksi, cepat rambat gelombang P dan S serta rasio poisson. Pengujian dilakukan dengan jarak antar *transducer* 70 cm atau posisi *transducer* terletak pada sisi 20 cm x 20 cm seperti pada *Gambar 4.13*.



(a)

(b)

Gambar 4.13 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi kedalaman retak (a) *Transducer* standar (*P-wave*); (b) *Transducer S-wave*

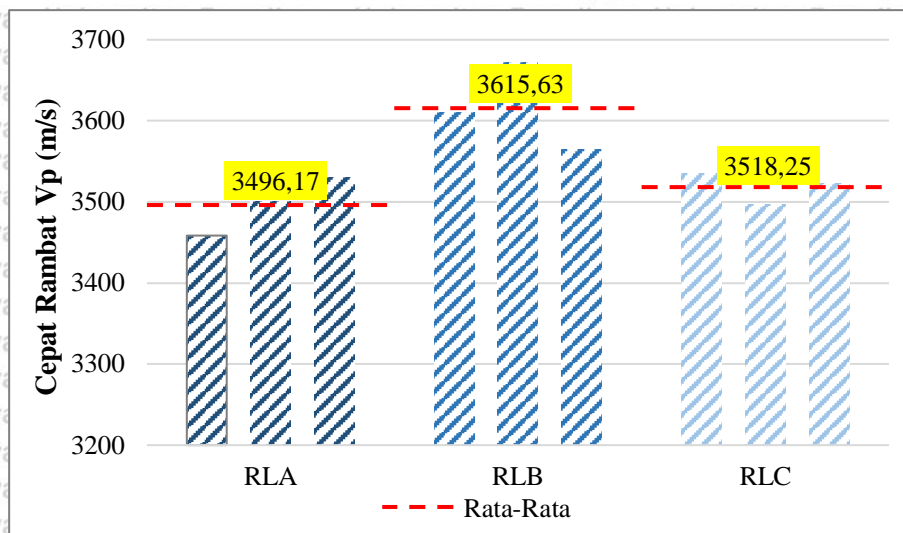
Sumber : Penelitian

Untuk benda uji variasi kedalaman retak, pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pada setiap variasi kedalaman retak. Hasil pengujian UPV benda uji dengan variasi kedalaman retak terdapat pada *Tabel 4.8*. Rata-rata cepat rambat gelombang P dan S tersaji dalam diagram batang yang terdapat pada *Gambar 4.14* untuk rata-rata cepat rambat gelombang P (V_p) dan *Gambar 4.15* untuk rata-rata cepat rambat gelombang S (V_s).

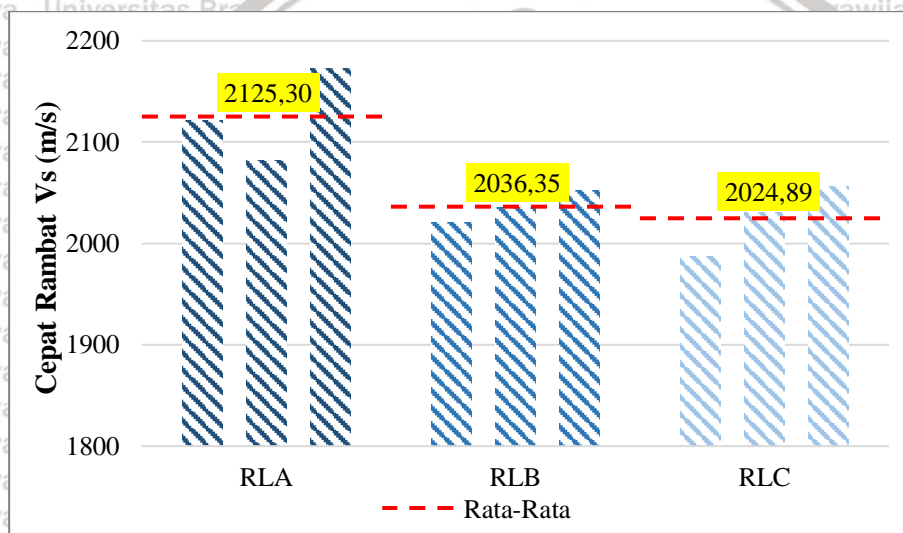
Tabel 4.8

Hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak

Benda Uji	t1 (μ s)	V_p (m/s)	t2 (μ s)	V_s (m/s)	Poisson's Ratio
RLA	202,4	3458,50	329,9	2121,86	0,1982
	200	3500,00	336,3	2081,47	0,2264
	198,3	3530,01	322,2	2172,56	0,1951
RLB	193,9	3610,11	346,4	2020,79	0,2718
	190,6	3672,61	343,9	2035,48	0,2783
	196,4	3564,15	341	2052,79	0,2518
RLC	198	3535,35	352,2	1987,51	0,2690
	200,2	3496,50	344,7	2030,75	0,2455
	198,7	3522,90	340,4	2056,40	0,2416



Gambar 4.14 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak



Gambar 4.15 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak

Dari beberapa pengujian UPV metode langsung (*Direct*) pada benda uji variasi kedalaman retak didapatkan kecepatan rambat gelombang P antara 3400 m/s sampai dengan 3700 m/s. Pada Gambar 4.14 didapatkan hasil cepat rambat gelombang P rata-rata dari 3 kali pengujian untuk benda uji RLA sebesar 3496,17 m/s, benda uji RLB sebesar 3615,63 m/s dan benda uji RLC sebesar 3518,25 m/s. Dari 3 benda uji variasi kedalaman retak yang memiliki kecepatan rambat gelombang P (V_p) tertinggi yaitu benda uji RLB (retak 8 cm). Berdasarkan rumus 4-3 nilai kecepatan rambat gelombang (v) berbanding terbalik dengan waktu tempuh gelombang (t), artinya semakin kecil nilai waktu tempuh (t) maka semakin besar kecepatan rambatnya (v). Seperti yang terjadi pada hasil cepat rambat gelombang P

dari ketiga benda uji variasi kedalaman retak, benda uji RLB (retak 8 cm) memiliki waktu tempuh paling kecil sehingga nilai kecepatan rambatnya tertinggi. RLC (retak 12 cm) berada pada urutan kedua dan RLA memiliki kecepatan rambat terendah karena waktu tempuhnya paling lama dari ketiga benda uji tersebut.

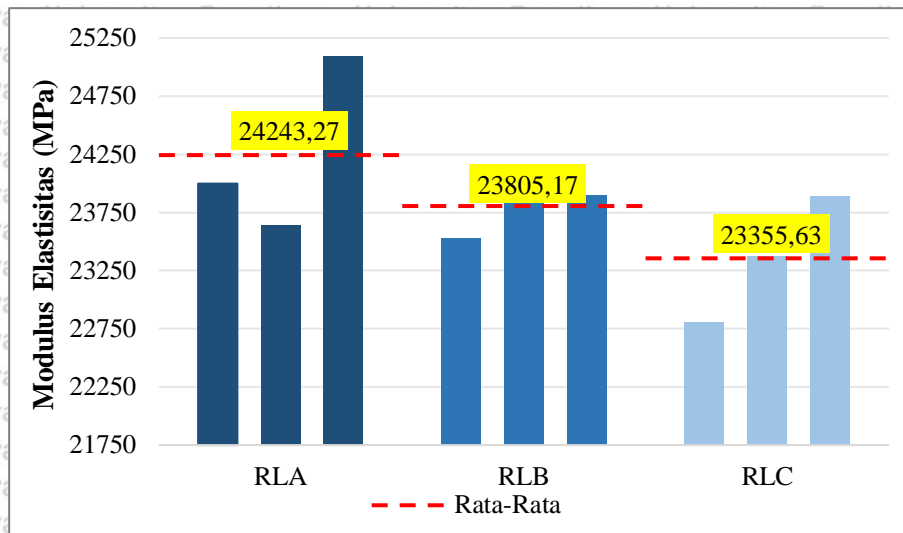
Sedangkan dari kecepatan rambat gelombang S didapatkan nilai cepat rambat antara 1900 m/s sampai dengan 2200 m/s. Pada *Gambar 4.15* didapatkan hasil cepat rambat gelombang S (V_s) rata-rata dari 3 kali pengujian untuk benda uji RLA sebesar 2125,3 m/s, benda uji RLB sebesar 2036,35 m/s dan benda uji RLC sebesar 2024,89 m/s. Sedangkan yang memiliki kecepatan rambat gelombang S (V_s) tertinggi yaitu benda uji RLA (retak 4 cm). Dapat disimpulkan bahwa semakin dalam keretakan pada beton maka kecepatan rambat gelombang S (V_s) akan semakin rendah.

Hasil dari pengujian UPV kemudian dianalisis menggunakan *software PL-Link* untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamis. Perhitungan rasio poisson menggunakan rumus 4-4 dan nilai modulus elastisitas dinamis didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus 4-6. Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis terdapat pada *Tabel 4.9*.

Tabel 4.9

Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi kedalaman retak

Benda Uji	V_s (m/s)	Poisson's Ratio	Rapat Massa (kg/m^3)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)
RLA	2121,86	0,1982	2224	23998,28	24243,27
	2081,47	0,2264		23637,02	
	2172,56	0,1951		25094,50	
RLB	2020,79	0,2718	2265	23527,42	23805,17
	2035,48	0,2783		23992,17	
	2052,79	0,2518		23895,90	
RLC	1987,51	0,2690	2275	22807,37	23355,63
	2030,75	0,2455		23370,25	
	2056,40	0,2416		23889,28	



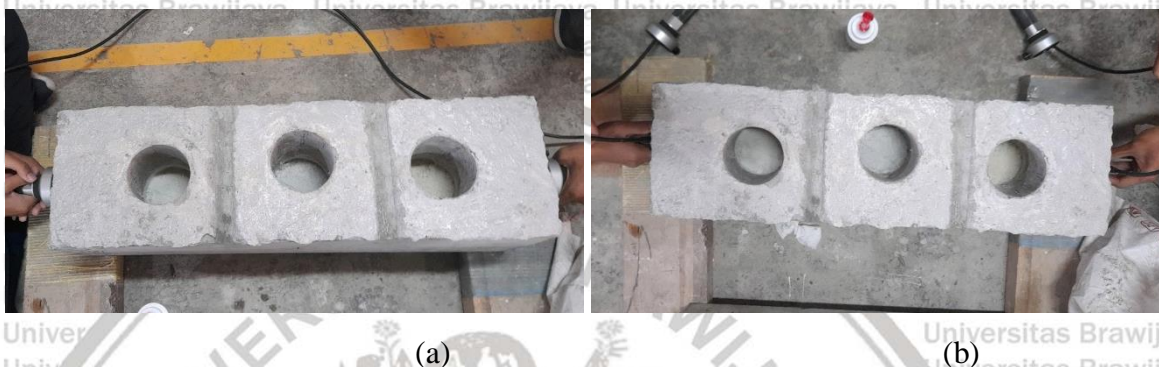
Gambar 4.16 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi kedalaman retak

Dari hasil perhitungan beberapa pengujian UPV pada benda uji beton dengan variasi kedalaman retak didapatkan nilai modulus elastisitas dinamis antara 22800 MPa sampai dengan 25100 MPa. Pada Gambar 4.16 yang merupakan diagram hasil rata-rata modulus elastisitas dinamis pada setiap benda uji variasi keretakan didapatkan nilai rata-rata modulus elastisitas dinamis benda uji RLA sebesar 24243,27 MPa, benda uji RLB sebesar 23805,17 MPa dan benda uji RLC sebesar 23355,63 MPa. Terdapat penurunan nilai modulus elastisitas dinamis benda uji RLB sebesar 1,84% terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji RLA. Sama halnya dengan benda uji RLB, pada benda uji RLC juga mengalami penurunan nilai modulus elastisitas sebesar 1,92% terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji RLB.

Dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh kedalaman retak terhadap nilai modulus elastisitas dari pengujian UPV yaitu semakin dalam retak pada beton, maka akan semakin rendah nilai modulus elastisitas dinamisnya. Hal ini karena berdasarkan rumus 4-6 nilai kecepatan gelombang S (V_s) berbanding lurus dengan nilai modulus elastisitas artinya semakin besar kecepatan gelombang S (V_s) maka akan semakin besar pula modulus elastisitas dinamisnya.

4.3.3 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Tanpa Air)

Terdapat 3 benda uji variasi diameter lubang yaitu benda uji dengan diameter lubang 2 inci (PTA-TA), 3 inci (PTB-TA) dan 4 inci (PTC-TA). Pengujian UPV dilakukan pada benda uji dalam kondisi lubang tanpa air. Dari hasil pengujian UPV metode langsung (direct) pada benda uji variasi diameter lubang diperoleh nilai waktu pertama gelombang longitudinal (*P-wave*) dan transversal (*S-wave*) terdeteksi, cepat rambat gelombang P dan S serta rasio poisson. Pengujian dilakukan dengan jarak antar *transducer* 70 cm atau posisi *transducer* terletak pada sisi 20 cm x 20 cm seperti pada *Gambar 4.17*.



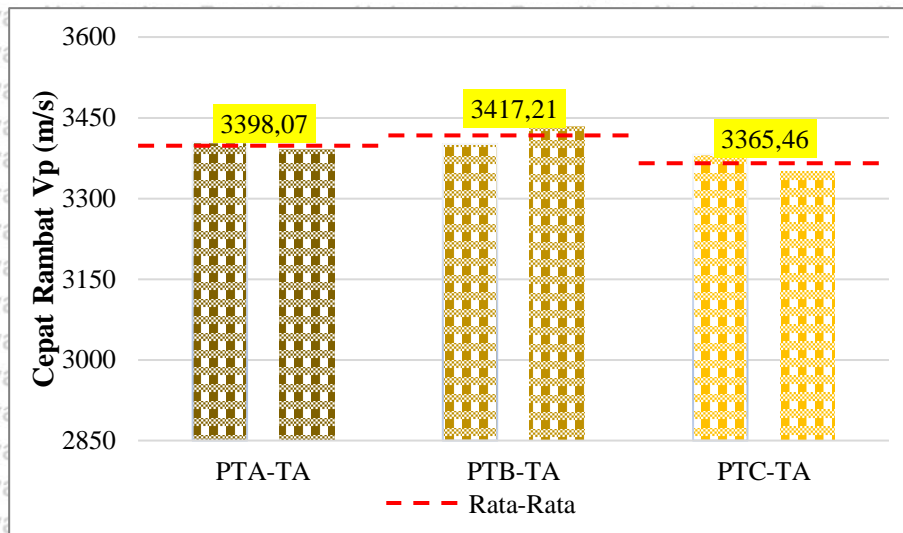
Gambar 4.17 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi diameter lubang (tanpa air), (a) *Transducer* standar (*P-wave*); (b) *Transducer S-wave*

Sumber : Penelitian

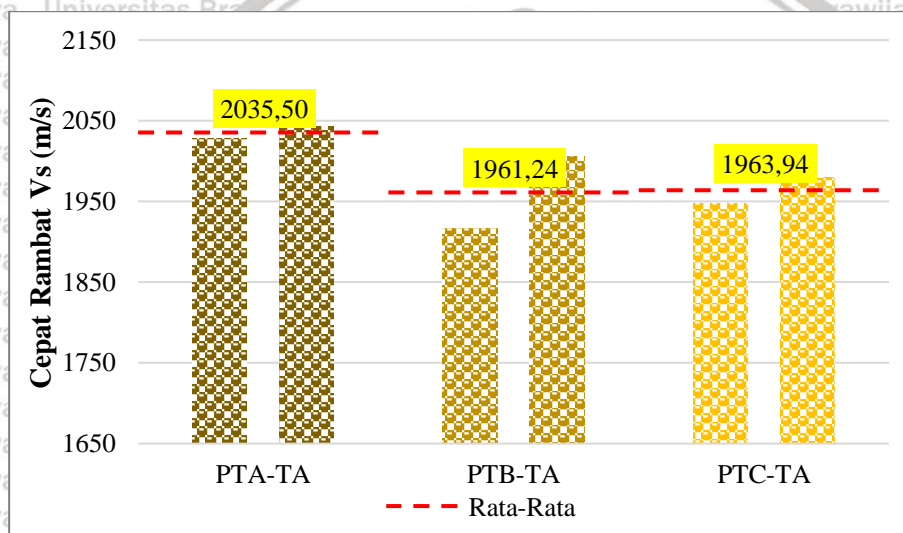
Untuk benda uji variasi diameter lubang (kondisi lubang tanpa adanya air), pengujian dilakukan sebanyak 2 kali pada setiap variasi. Hasil pengujian UPV benda uji dengan variasi diameter lubang (tanpa air) terdapat pada *Tabel 4.10*. Rata-rata cepat rambat gelombang P dan gelombang S tersaji dalam diagram batang yang terdapat pada *Gambar 4.18* untuk rata-rata cepat rambat gelombang P (V_p) dan *Gambar 4.19* untuk rata-rata cepat rambat gelombang S (V_s).

Tabel 4.10 Hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)

Benda Uji	t1 (μ s)	V_p (m/s)	t2 (μ s)	V_s (m/s)	Poisson's Ratio
PTA-TA	205,6	3404,67	345,2	2027,81	0,2251
	206,4	3391,47	342,6	2043,20	0,2151
PTB-TA	205,8	3401,36	365,2	1916,76	0,2673
	203,9	3433,06	349	2005,73	0,2409
PTC-TA	207	3381,64	359,4	1947,69	0,2518
	209	3349,28	353,5	1980,20	0,2313



Gambar 4.18 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)



Gambar 4.19 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)

Dari beberapa pengujian UPV metode langsung (*Direct*) pada benda uji diameter lubang (tanpa air) didapatkan kecepatan rambat gelombang P (V_p) antara 3300 m/s sampai dengan 3450 m/s. Pada Gambar 4.18 didapatkan hasil cepat rambat gelombang P rata-rata dari 2 kali pengujian untuk benda uji PTA-TA sebesar 3398,07 m/s, benda uji PTB-TA sebesar 3417,21 m/s dan benda uji PTC-TA sebesar 3365,46 m/s. Dari 3 benda uji variasi diameter lubang (tanpa air) yang memiliki kecepatan rambat gelombang P (V_p) tertinggi yaitu benda uji PTB-TA (diameter lubang 3 inci). Berdasarkan rumus 4-3 nilai kecepatan rambat gelombang (v) berbanding terbalik dengan waktu tempuh gelombang (t), artinya semakin kecil nilai waktu tempuh (t) maka semakin besar kecepatannya (v). Seperti yang

terjadi pada hasil cepat rambat gelombang P dari ketiga benda uji variasi diameter lubang (tanpa air), benda uji PTB-TA (diameter lubang 3 inci) memiliki waktu tempuh paling kecil sehingga nilai kecepatan rambatnya tertinggi. PTA-TA (diameter lubang 2 inci) berada pada urutan kedua dan PTC-TA (diameter lubang 4 inci) memiliki kecepatan rambat terendah karena waktu tempuhnya paling lama dari ketiga benda uji tersebut.

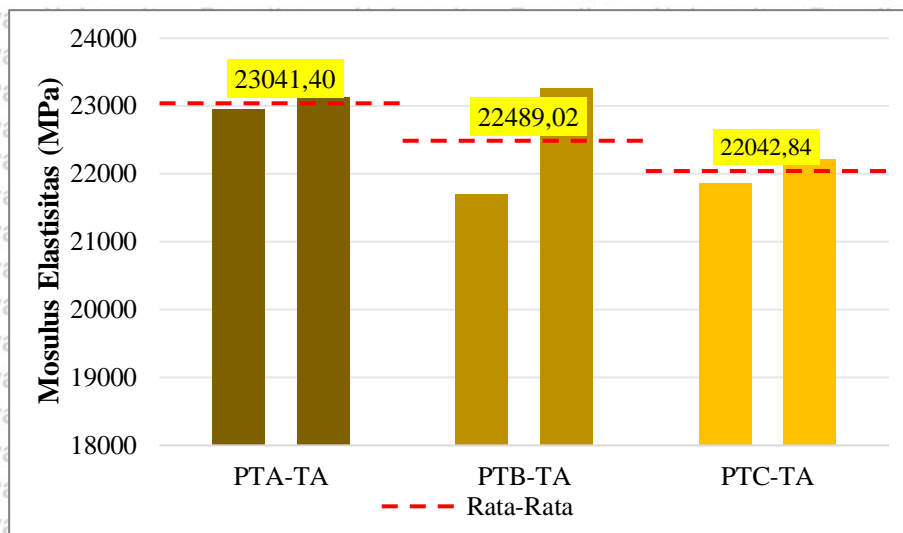
Sedangkan hasil kecepatan rambat gelombang S (Vs) berkisar antara 1900 m/s sampai dengan 2050 m/s. Pada *Gambar 4.19* didapatkan hasil cepat rambat gelombang S rata-rata dari 2 kali pengujian untuk benda uji PTA-TA sebesar 2035,5 m/s, benda uji PTB-TA sebesar 1961,24 m/s dan benda uji PTC-TA sebesar 1963,94 m/s. Dari 3 benda uji variasi diameter lubang (tanpa air) yang memiliki kecepatan rambat gelombang S (Vs) tertinggi yaitu benda uji PTA-TA (diameter 2 inci). Sedangkan cepat rambat terendah yaitu pada benda uji PTB-TA (diameter 4 inci) dikarenakan waktu tempuhnya paling lama dari ketiga benda uji tersebut.

Hasil dari pengujian UPV kemudian dianalisis menggunakan *software PL-Link* untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamis. Perhitungan rasio poisson menggunakan rumus 4-4 dan nilai modulus elastisitas dinamis didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus 4-6. Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis terdapat pada *Tabel 4.11*.

Tabel 4.11

Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)

Benda Uji	Vs (m/s)	Poisson's Ratio	Rapat Massa (kg/m ³)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)
PTA-TA	2027,81	0,2251	2279	22961,52	23041,40
	2043,20	0,2151		23121,27	
PTB-TA	1916,76	0,2673	2331	21706,06	22489,02
	2005,73	0,2409		23271,98	
PTC-TA	1947,69	0,2518	2302	21859,99	22042,84
	1980,20	0,2313		22225,70	



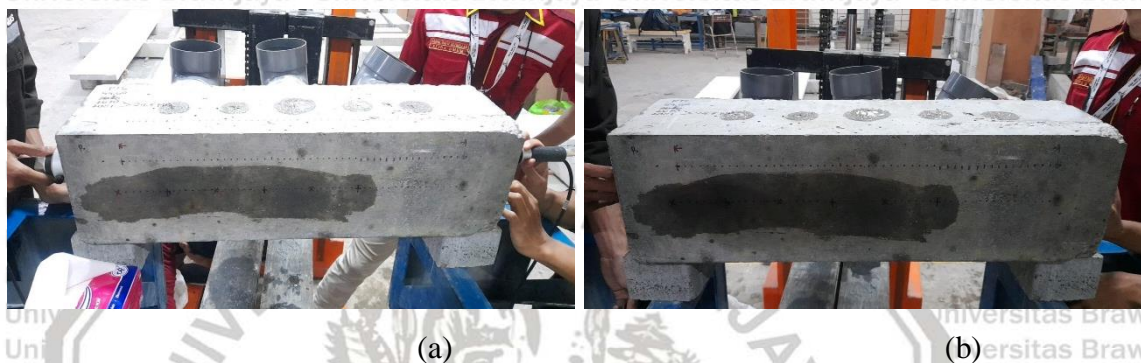
Gambar 4.20 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (tanpa air)

Dari hasil perhitungan beberapa pengujian UPV pada benda uji beton dengan variasi diameter lubang (tanpa air) didapatkan nilai modulus elastisitas dinamis antara 21700 MPa sampai dengan 23300 MPa. Pada Gambar 4.20 yang merupakan diagram hasil rata-rata modulus elastisitas dinamis pada setiap benda uji variasi diameter lubang didapatkan nilai rata-rata modulus elastisitas dinamis benda uji PTA-TA sebesar 23041,4 MPa, benda uji PTB-TA sebesar 22489,02 MPa dan benda uji PTC-TA sebesar 22042,84 MPa. Terdapat penurunan nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTB-TA sebesar 2,46 % terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTA-TA. Pada benda uji PTC-TA juga mengalami penurunan nilai modulus elastisitas sebesar 2,02 % terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTB-TA.

Dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh besarnya lubang pada beton terhadap nilai modulus elastisitas dari pengujian UPV yaitu semakin besar diameter lubang pada beton, maka akan semakin rendah nilai modulus elastisitas dinamisnya. Berdasarkan rumus 4-6 nilai kecepatan gelombang S (V_s) berbanding lurus dengan nilai modulus elastisitas artinya semakin besar kecepatan gelombang S (V_s) maka akan semakin besar pula modulus elastisitas dinamisnya. Selain kecepatan rambat gelombang S (V_s), nilai rapat massa (Density) juga mempengaruhi nilai modulus elastisitas dinamis. Seperti pada benda uji PTB-TA dan PTC-TA, dimana nilai cepat rambat gelombang S (V_s) PTB-TA lebih rendah dari PTC-TA namun memiliki rapat massa (*Density*) yang lebih tinggi, sehingga hasil modulus elastisitas benda uji PTB-TA lebih tinggi dari benda uji PTC-TA.

4.3.4 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Berisi Air)

Terdapat 3 benda uji variasi diameter lubang (berisi air) yaitu benda uji dengan diameter lubang 2 inci (PTA-A), 3 inci (PTB-A) dan 4 inci (PTC-A). Pengujian UPV dilakukan pada benda uji dalam kondisi lubang berisi air. Dari hasil pengujian UPV metode langsung (direct) pada benda uji variasi diameter lubang (berisi air) diperoleh nilai waktu pertama gelombang longitudinal (*P-wave*) dan transversal (*S-wave*) terdeteksi, cepat rambat gelombang P (V_p) dan gelombang S (V_s) serta rasio poisson. Pengujian dilakukan dengan jarak antar *transducer* 70 cm atau posisi *transducer* terletak pada sisi 20 cm x 20 cm seperti yang terdapat pada *Gambar 4.21*.



Gambar 4.21 Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan UPV benda uji beton dengan variasi diameter lubang (berisi air), (a) *Transducer standar (P-wave)*; (b) *Transducer S-wave*

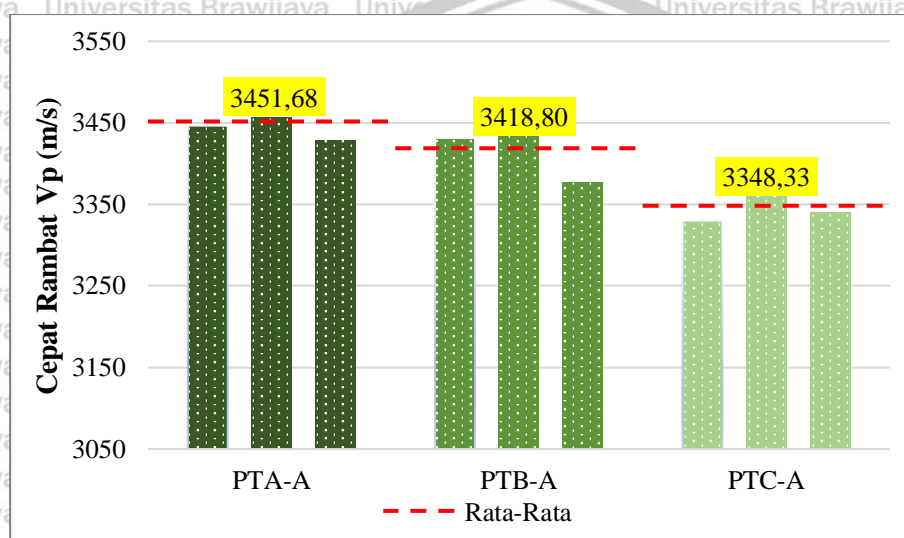
Sumber : Penelitian

Untuk benda uji variasi diameter lubang (berisi air), pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pada setiap variasi. Hasil pengujian UPV benda uji dengan variasi diameter lubang (berisi air) terdapat pada *Tabel 4.12*. Rata-rata cepat rambat gelombang P (V_p) dan S (V_s) tersaji dalam diagram batang yang terdapat pada *Gambar 4.22* untuk rata-rata cepat rambat gelombang P (V_p) dan *Gambar 4.23* untuk rata-rata cepat rambat gelombang S (V_s).

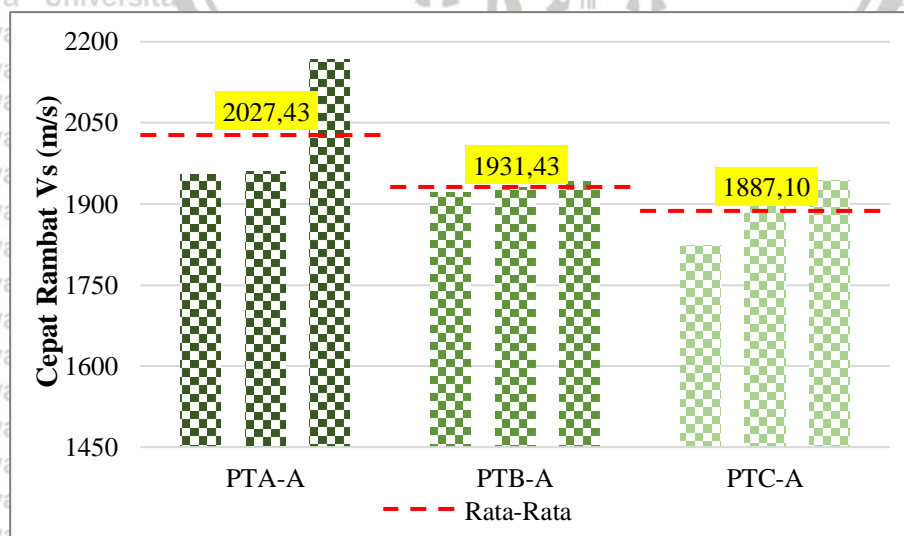
Tabel 4.12

Hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)

Benda Uji	t1 (μ s)	Vp (m/s)	t2 (μ s)	Vs (m/s)	Poisson's Ratio
PTA-A	203,1	3446,58	358,2	1954,22	0,2631
	202,5	3456,79	357,1	1960,24	0,2630
	204,2	3428,01	322,9	2167,85	0,1668
PTB-A	204	3431,37	364,3	1921,49	0,2716
	203	3448,28	362,5	1931,03	0,2716
	207,3	3376,75	360,5	1941,75	0,2530
PTC-A	210,2	3330,16	384,1	1822,44	0,2862
	207,4	3375,12	369,4	1894,96	0,2698
	209,6	3339,69	360,1	1943,90	0,2438



Gambar 4.22 Diagram cepat rambat gelombang P (V_p) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)



Gambar 4.23 Diagram cepat rambat gelombang S (V_s) hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)

Dari beberapa pengujian UPV metode langsung (*Direct*) pada benda uji diameter lubang (berisi air) didapatkan kecepatan rambat gelombang P (V_p) antara 3300 m/s sampai dengan 3460 m/s. Pada *Gambar 4.22* didapatkan hasil cepat rambat gelombang P (V_p) rata-rata dari 3 kali pengujian untuk benda uji PTA-A sebesar 3451,68 m/s, benda uji PTB-A sebesar 3418,8 m/s dan benda uji PTC-A sebesar 3348,33 m/s. Dapat disimpulkan bahwa semakin besar lubang (berisi air) pada beton maka kecepatan rambat gelombang P (V_p) akan semakin rendah karena adanya perbedaan panjang lintasan rambat gelombang (beton) dan waktu tempuh gelombangnya.

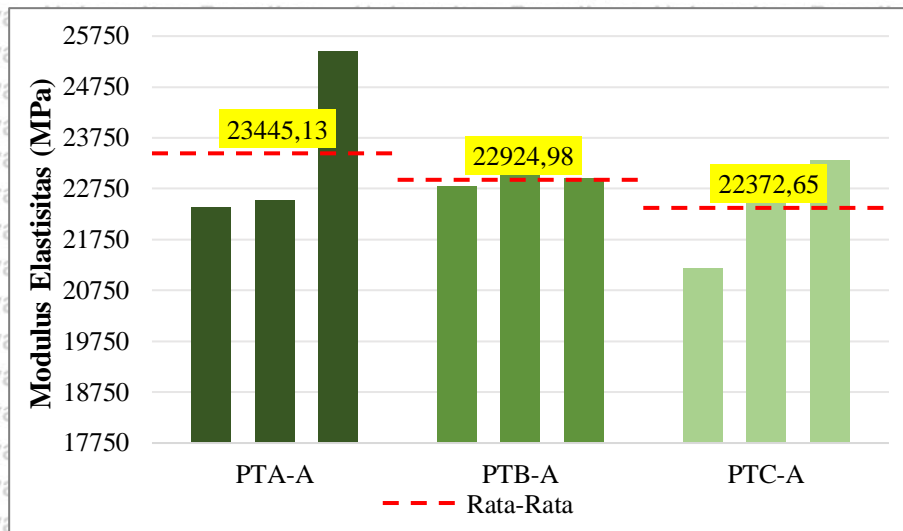
Sedangkan hasil kecepatan rambat gelombang S (V_s) berkisar antara 1800 m/s sampai dengan 2200 m/s. Pada *Gambar 4.23* didapatkan hasil cepat rambat gelombang S (V_s) rata-rata dari 3 kali pengujian untuk benda uji PTA-A sebesar 2027,43 m/s, benda uji PTB-A sebesar 1931,43 m/s dan benda uji PTC-A sebesar 1887,1 m/s. Dari 3 benda uji variasi diameter lubang (berisi air) yang memiliki kecepatan rambat gelombang S (V_s) tertinggi yaitu benda uji PTA-A (diameter 2 inci). Sedangkan cepat rambat terendah yaitu pada benda uji PTC-A (diameter 4 inci). Dapat disimpulkan bahwa semakin besar lubang (yang berisi air) pada beton maka kecepatan rambat gelombangnya akan semakin rendah karena adanya perbedaan panjang lintasan rambat gelombang (beton) dan waktu tempuh gelombangnya.

Hasil dari pengujian UPV kemudian dianalisis menggunakan *software PL-Link* untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamis. Perhitungan rasio poisson menggunakan rumus 4-4 dan nilai modulus elastisitas dinamis didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus 4-6. Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis terdapat pada *Tabel 4.13*.

Tabel 4.13

Hasil perhitungan modulus elastisitas dinamis benda uji variasi diameter lubang (berisi air)

Benda Uji	V_s (m/s)	Poisson's Ratio	Rapat Massa (kg/m^3)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)
PTA-A	1954,22	0,2631	2320	22379,40	23445,13
	1960,24	0,2630		22516,03	
	2167,85	0,1668		25439,95	
PTB-A	1921,49	0,2716	2428	22801,91	22924,98
	1931,03	0,2716		23028,45	
	1941,75	0,2530		22944,59	
PTC-A	1822,44	0,2862	2480	21188,99	22372,65
	1894,96	0,2698		22616,72	
	1943,90	0,2438		23312,23	



Gambar 4.24 Diagram nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV benda uji variasi diameter lubang (berisi air)

Dari hasil perhitungan beberapa pengujian UPV pada benda uji beton dengan variasi diameter lubang (berisi air) didapatkan nilai modulus elastisitas dinamis antara 21100 MPa sampai dengan 25450 MPa. Pada Gambar 4.24 yang merupakan diagram hasil rata-rata modulus elastisitas dinamis pada setiap benda uji variasi diameter lubang (berisi air) didapatkan nilai rata-rata modulus elastisitas dinamis benda uji PTA-A sebesar 23445,13 MPa, benda uji PTB-A sebesar 22924,98 MPa dan benda uji PTC-A sebesar 22372,65 MPa. Terdapat penurunan nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTB-A sebesar 2,27 % terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTA-A. Pada benda uji PTC-A juga mengalami penurunan nilai modulus elastisitas sebesar 2,47 % terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji PTB-A.

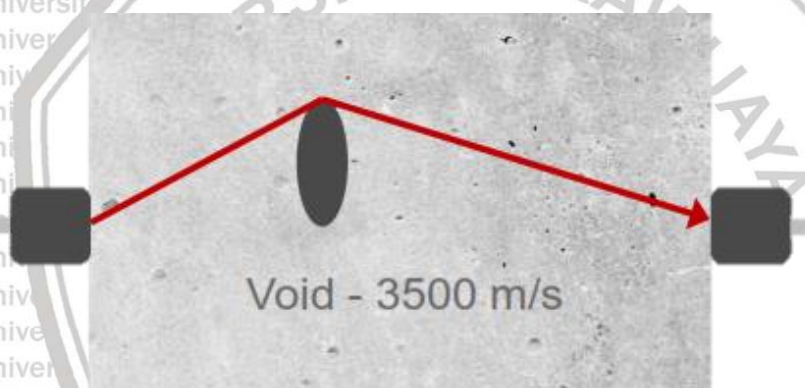
Dapat disimpulkan bahwa adanya pengaruh besarnya lubang pada beton terhadap nilai modulus elastisitas dari pengujian UPV yaitu semakin besar diameter lubang pada beton, maka akan semakin rendah nilai modulus elastisitas dinamisnya. Berdasarkan rumus 4-6 nilai kecepatan gelombang S (Vs) berbanding lurus dengan nilai modulus elastisitas artinya semakin besar kecepatan gelombang S (Vs) maka akan semakin besar pula modulus elastisitas dinamisnya.

Tabel 4.14

Persentase kenaikan nilai modulus elastisitas dinamis benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) kondisi tanpa air dan berisi air

Benda Uji	Lubang Tanpa Air (MPa)	Lubang Dengan Air (MPa)	Persentase Kenaikan
PTA	23041,40	23445,13	1,75%
PTB	22489,02	22924,98	1,94%
PTC	22042,84	22372,65	1,50%

Pada Tabel 4.14 benda uji intrusi air (kondisi lubang berisi air) yaitu benda uji PTA-A, PTB-A dan PTC-A (variasi diameter lubang berisi air) memiliki nilai modulus elastisitas dinamis yang lebih tinggi pada setiap variasi yang sama dibanding benda uji PTA-TA, PTB-TA dan PTC-TA (variasi diameter lubang tanpa air). Hal ini menunjukkan adanya air pada beton akan berpengaruh pada pembacaan UPV yaitu nilai modulus elastisitas dinamisnya lebih tinggi.



Gambar 4.25 Gelombang ultrasonik ketika melewati rongga pada beton

Sumber : Proceq (2017)

Beberapa faktor yang mempengaruhi nilai modulus elastisitas yaitu kecepatan rambat gelombang ultrasonik dan rapat massa beton. Gambar 4.25 menunjukkan bentuk gelombang ultrasonik ketika melewati rongga pada beton, gelombang ultrasonik akan mencari rambatan benda padat (beton) agar sampai pada transmitter. Pada SNI ASTM C597 tahun 2012 tentang metode uji kecepatan rambat melalui beton terdapat pernyataan bahwa kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air dapat mencapai 5 % lebih tinggi daripada beton yang kering. Rapat massa benda uji beton dengan lubang berisi air lebih besar dibandingkan beton dengan lubang tanpa adanya air. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan berat (berat beton dengan lubang berisi air lebih besar) pada benda uji yang menjadi faktor untuk mencari rapat massa (*density*).

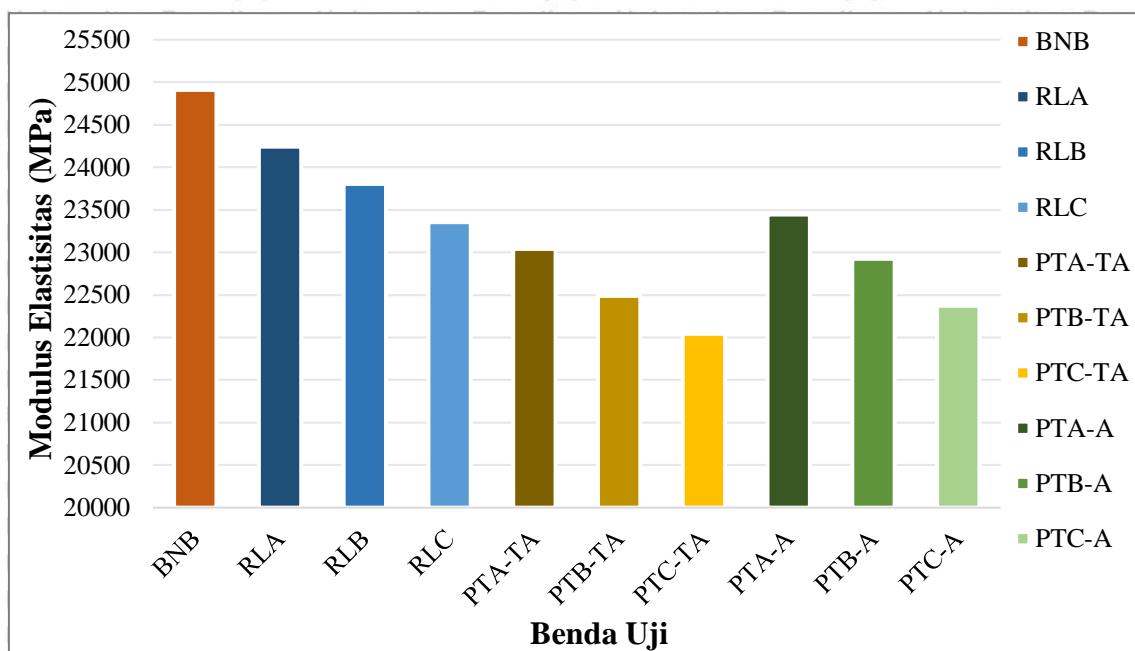
4.3.5 Perbandingan Modulus Elastisitas Dinamis Hasil Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Grafik perbandingan modulus elastisitas dinamis pada setiap benda uji yang didapatkan dari hasil pengujian UPV terdapat pada *Gambar 4.26* dan persentase selisih nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal terhadap nilai modulus elastisitas dinamis setiap benda uji terdapat pada *Tabel 4.15*. Dapat dilihat pada grafik dan tabel tersebut nilai modulus elastisitas dinamis tertinggi adalah benda uji BNB (beton normal) sebesar 24910,02 MPa. Sedangkan nilai modulus elastisitas dinamis terendah adalah benda uji PTC-TA (diameter lubang 4 inci tanpa adanya air) sebesar 22042,84 MPa. Meskipun proporsi campuran beton dan perawatan (*curing*) sama pada setiap benda uji, namun hasil modulus elastisitas dinamisnya berbeda secara signifikan. Hal ini berarti perlakuan atau adanya variasi keretakan dan adanya lubang pada benda uji berpengaruh pada nilai modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV.

Tabel 4.15

Persentase selisih nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal terhadap nilai modulus elastisitas dinamis setiap benda uji

Benda Uji	E (MPa)	Benda Uji	E (MPa)	Persentase Selisih
		RLA	24243,27	2,75%
		RLB	23805,17	4,64%
		RLC	23355,63	6,66%
		PTA-TA	23041,40	8,11%
BNB	24910,02	PTB-TA	22489,02	10,77%
		PTC-TA	22042,84	13,01%
		PTA-A	23445,13	6,25%
		PTB-A	22924,98	8,66%
		PTC-A	22372,65	11,34%



Gambar 4.26 Grafik perbandingan nilai rata-rata modulus elastisitas dinamis hasil pengujian UPV pada setiap benda uji

Keterangan :

BNB = Balok normal

RLA = Balok variasi kedalaman retak 4 cm

RLB = Balok variasi kedalaman retak 8 cm

RLC = Balok variasi kedalaman retak 12 cm

PTA-TA = Balok variasi diameter lubang 2 inci (Tanpa air)

PTB-TA = Balok variasi diameter lubang 3 inci (Tanpa air)

PTC-TA = Balok variasi diameter lubang 4 inci (Tanpa air)

PTA-A = Balok variasi diameter lubang 2 inci (Berisi air)

PTB-A = Balok variasi diameter lubang 3 inci (Berisi air)

PTC-A = Balok variasi diameter lubang 4 inci (Berisi air)

4.4 Hubungan antara Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik dan Modulus Elastisitas Dinamis

Pada penelitian ini, analisis yang digunakan untuk mengetahui hubungan antara cepat rambat gelombang ultrasonik dan modulus elastisitas dinamis yaitu analisis regresi linier sederhana. Hal ini dikarenakan data yang digunakan pada analisis ini memiliki satu variabel bebas (cepat rambat gelombang) dan jumlah sampel yang digunakan sama yang merupakan syarat dari regresi linier sederhana. Selain itu, digunakannya analisis regresi linier sederhana karena sebaran data yang digunakan mendekati garis lurus.

4.4.1 Balok Beton Normal

Pada benda uji balok beton normal, pengujian UPV dilakukan sebanyak 3 kali dengan menggunakan metode langsung (*direct method*). Pengujian dilakukan pada permukaan balok 20 cm x 20 cm atau jarak antar transduser 70 cm. Pada pengujian modulus elastisitas dinamis ini digunakan 2 macam transduser yaitu transduser standar yang menghasilkan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan transduser *Shear wave* yang menghasilkan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s). Data-data yang didapatkan dari hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal yaitu cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p), cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis yang terdapat pada *Tabel 4.16*.

Tabel 4.16

Hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal

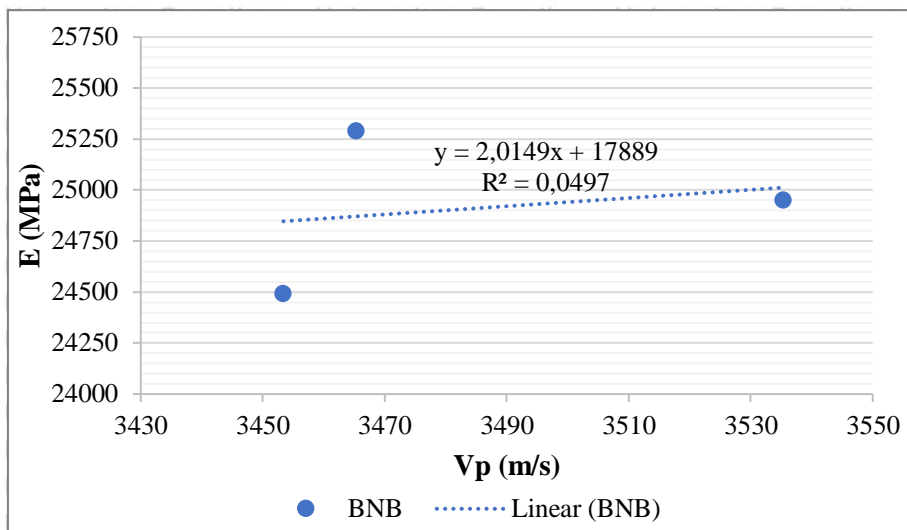
Benda Uji	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Modulus Elastisitas (Mpa)
BNB	3465,35	2202,64	25288,25
	3535,35	2143,95	24951,19
	3453,38	2144,61	24490,63

Dari hasil pengujian UPV yang terdapat pada *Tabel 4.16* kemudian dicari hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis.

Hubungan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada *Gambar 4.27*.

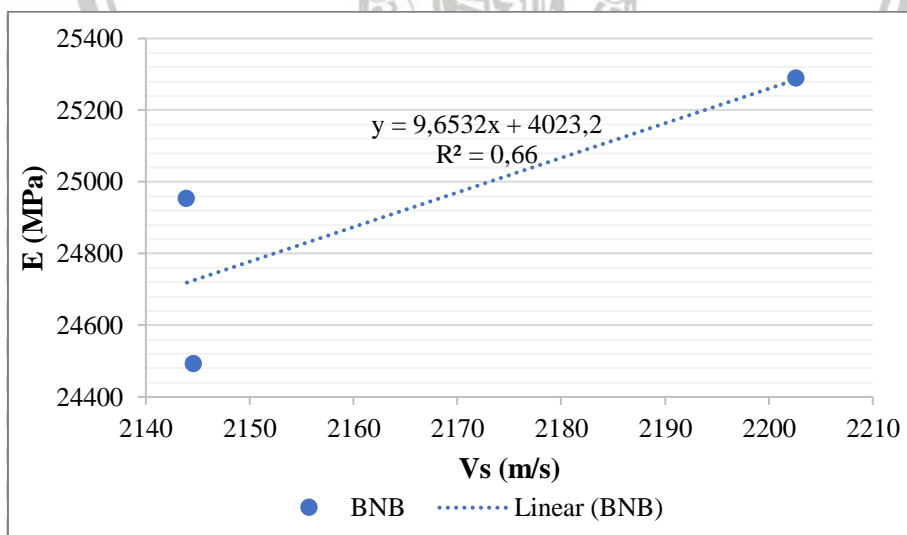
Sedangkan Hubungan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada

Gambar 4.28.



Gambar 4.27 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton normal

Pada *Gambar 4.27* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan persamaan regresi yaitu $E = 2,0149V_p + 17899$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0497. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 0 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang kurang berkaitan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis atau cepat rambat gelombang P (V_p) tidak terlalu (kecil) berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal.



Gambar 4.28 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton normal

Pada *Gambar 4.28* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan

persamaan regresi yaitu $E = 9,6532V_s + 4023,2$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,66.

Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang cukup berkaitan antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis atau nilai cepat rambat gelombang S (V_s) cukup berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal.

4.4.2 Balok Beton dengan Variasi Kedalaman Retak

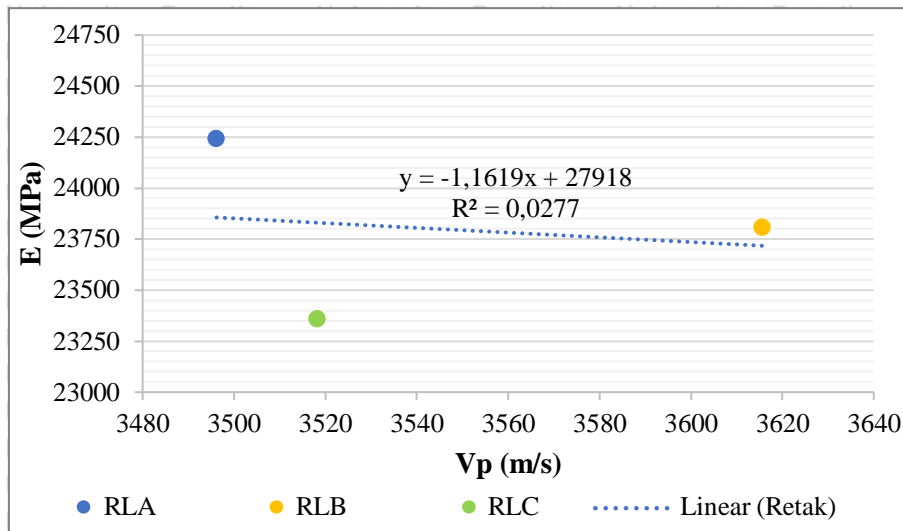
Pada benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak, pengujian UPV menggunakan metode langsung (*direct method*) dilakukan sebanyak 3 kali pada setiap variasinya untuk kemudian diambil rata-ratanya. Pengujian dilakukan pada permukaan balok 20 cm x 20 cm atau jarak antar transduser 70 cm. Pada pengujian modulus elastisitas dinamis ini digunakan 2 macam transduser yaitu transduser standar yang menghasilkan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan transduser *Shear wave* yang menghasilkan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s). Data-data yang didapatkan dari hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal yaitu cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p), cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis yang terdapat pada *Tabel 4.17*.

Tabel 4.17

Hasil pengujian UPV benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak

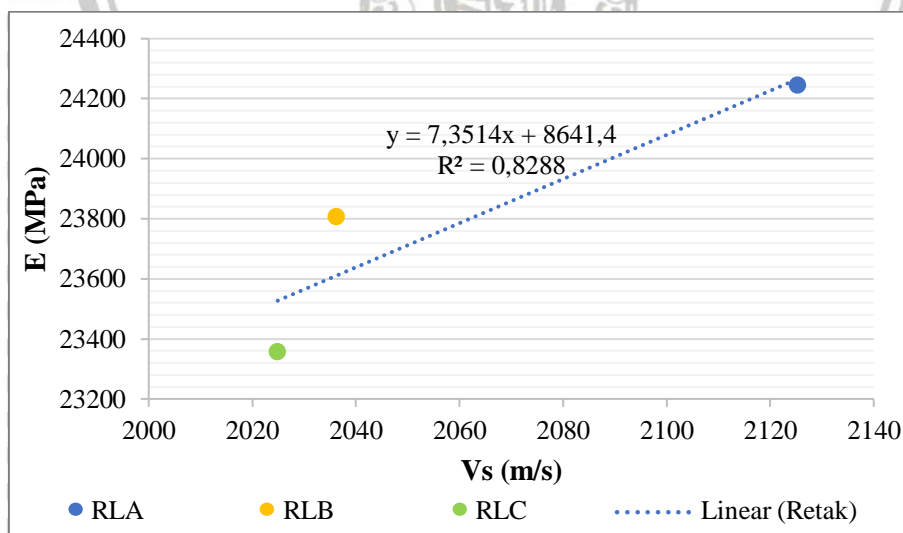
Benda Uji	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Modulus Elastisitas (Mpa)
RLA	3496,17	2125,30	24243,27
RLB	3615,63	2036,35	23805,17
RLC	3518,25	2024,89	23355,63

Dari hasil pengujian UPV yang terdapat pada *Tabel 4.17* kemudian dicari hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis. Hubungan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada *Gambar 4.29*. Sedangkan Hubungan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada *Gambar 4.30*.



Gambar 4.29 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak

Pada *Gambar 4.29* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan persamaan regresi yaitu $E = -1,1619V_p + 27918$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,0277. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 0 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang kurang berkaitan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis atau cepat rambat gelombang P (V_p) tidak terlalu (kecil) berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton dengan variasi kedalaman retak.



Gambar 4.30 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton dengan variasi kedalaman retak

Pada *Gambar 4.30* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan

persamaan regresi yaitu $E = 7,3514V_s + 8641,4$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8288. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang berkaitan antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis atau nilai cepat rambat gelombang S (V_s) berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton dengan variasi kedalaman retak.

4.4.3 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Tanpa Air)

Pada benda uji intrusi air (variasi diameter lubang), pengujian UPV dilakukan pada kondisi lubang tidak berisi air dengan metode langsung (*direct method*). Pengujian dilakukan sebanyak 2 kali pada setiap variasinya untuk kemudian diambil rata-ratanya. Letak transduser pada permukaan balok 20 cm x 20 cm atau jarak antar transduser 70 cm. Pada pengujian modulus elastisitas dinamis ini digunakan 2 macam transduser yaitu transduser standar yang menghasilkan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan transduser *Shear wave* yang menghasilkan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s). Data-data yang didapatkan dari hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal yaitu cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p), cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis yang terdapat pada *Tabel 4.18*.

Tabel 4.18

Hasil pengujian UPV benda uji balok beton intrusi air dengan variasi diameter lubang (lubang tanpa air)

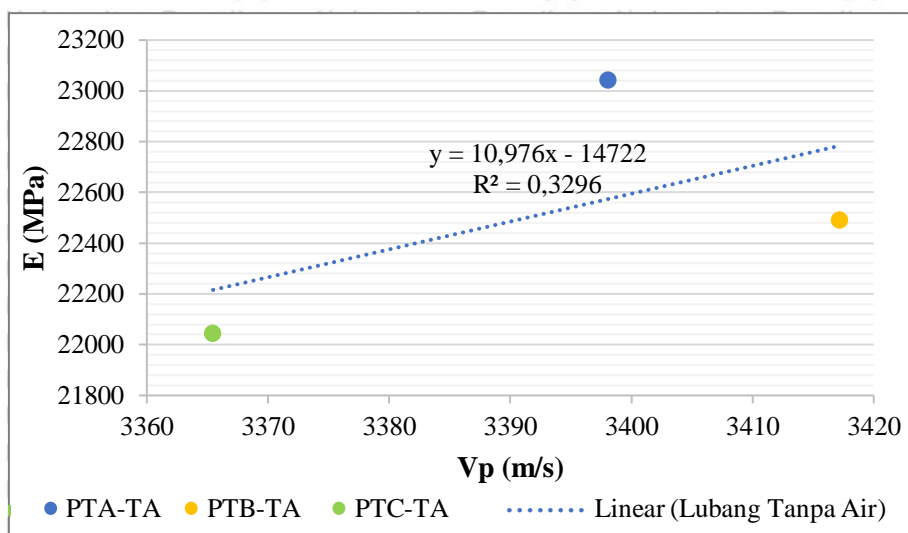
Benda Uji	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Modulus Elastisitas (Mpa)
PTA-TA	3398,07	2035,50	23041,40
PTB-TA	3417,21	1961,24	22489,02
PTC-TA	3365,46	1963,94	22042,84

Dari hasil pengujian UPV yang terdapat pada *Tabel 4.18* kemudian dicari hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis.

Hubungan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada *Gambar 4.31*.

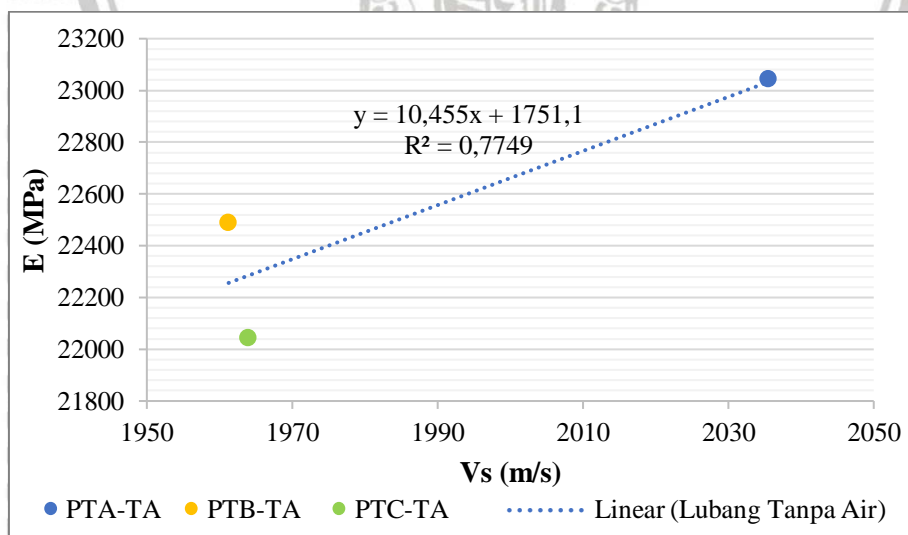
Sedangkan Hubungan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada

Gambar 4.32.



Gambar 4.31 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air

Pada *Gambar 4.31* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan persamaan regresi yaitu $E = 10,976V_p - 14722$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,3296. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 0 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang kurang berkaitan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis atau cepat rambat gelombang P (V_p) kecil pengaruhnya terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton intrusi air (kondisi lubang tanpa air).



Gambar 4.32 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air

Pada *Gambar 4.32* terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan

persamaan regresi yaitu $E = 10,455V_s + 1751,1$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7749. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang berkaitan antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis atau nilai cepat rambat gelombang S (V_s) berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton intrusi air (kondisi lubang tanpa air).

4.4.4 Balok Beton Intrusi Air dengan Variasi Diameter Lubang (Berisi Air)

Pada benda uji intrusi air (variasi diameter lubang), pengujian UPV dilakukan pada kondisi lubang berisi air dengan metode langsung (*direct method*). Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pada setiap variasinya untuk kemudian diambil rata-ratanya. Letak transduser pada permukaan balok 20 cm x 20 cm atau jarak antar transduser 70 cm. Pada pengujian modulus elastisitas dinamis ini digunakan 2 macam transduser yaitu transduser standar yang menghasilkan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan transduser *Shear wave* yang menghasilkan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s). Data-data yang didapatkan dari hasil pengujian UPV benda uji balok beton normal yaitu cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p), cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis yang terdapat pada *Tabel 4.19*.

Tabel 4.19

Hasil pengujian UPV benda uji balok beton intrusi air dengan variasi diameter lubang (lubang berisi air)

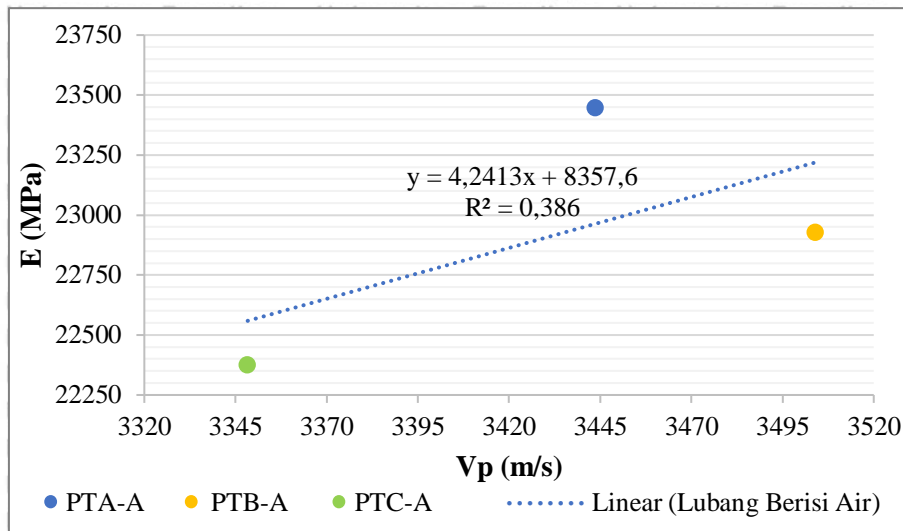
Benda Uji	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Modulus Elastisitas (Mpa)
PTA-A	3443,79	2027,43	23445,13
PTB-A	3504,13	1931,43	22924,98
PTC-A	3348,33	1887,10	22372,65

Dari hasil pengujian UPV yang terdapat pada *Tabel 4.19* kemudian dicari hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis.

Hubungan cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada *Gambar 4.33*.

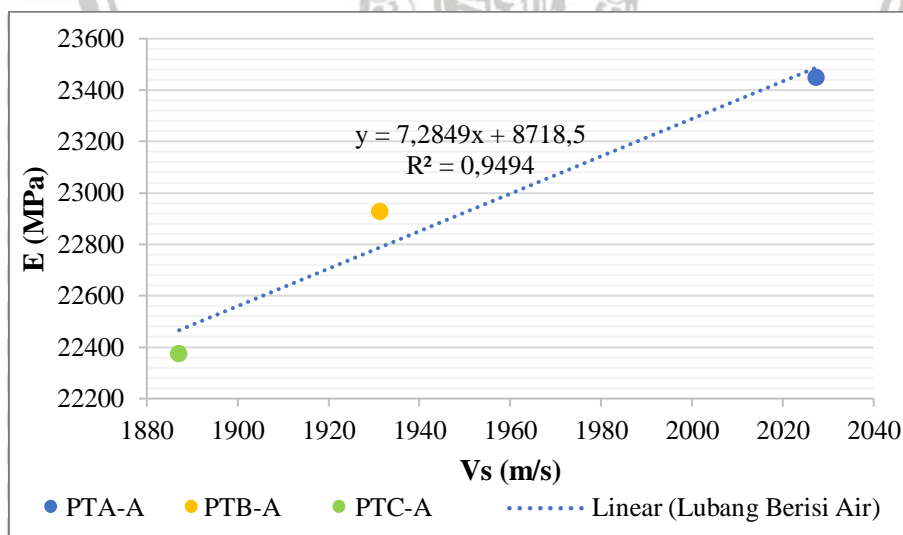
Sedangkan Hubungan cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis tersebut tersaji dalam bentuk grafik persamaan regresi yang terdapat pada

Gambar 4.34.



Gambar 4.33 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air

Pada Gambar 4.33 terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang P atau longitudinal (V_p) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan persamaan regresi yaitu $E = 4,2413V_p - 8357,6$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,386. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 0 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang kurang berkaitan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis atau cepat rambat gelombang P (V_p) kecil pengaruhnya terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton intrusi air (kondisi lubang berisi air).



Gambar 4.34 Grafik hubungan antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis benda uji balok beton intrusi air

Pada Gambar 4.34 terdapat grafik hubungan linier antara cepat rambat gelombang S atau transversal (V_s) dan modulus elastisitas dinamis. Dari grafik tersebut didapatkan

persamaan regresi yaitu $E = 7,2849V_s + 8718,5$ dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9494. Dengan nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 maka dapat disimpulkan adanya hubungan yang berkaitan (baik atau mendekati sempurna) antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis atau nilai cepat rambat gelombang S (V_s) sangat berpengaruh terhadap nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton intrusi air (kondisi lubang berisi air).

Tabel 4.20

Rekapitulasi hasil analisis regresi linier hubungan antara cepat rambat gelombang ultrasonik dan modulus elastisitas dinamis

Benda Uji	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Modulus Elastisitas (Mpa)	Vp dan E		Vs dan E	
				y	R ²	y	R ²
BNB	3465,35	2202,64	25288,25	2,0149x + 17889	0,0497	9,6532x + 4023,2	0,66
	3535,35	2143,95	24951,19				
	3453,38	2144,61	24490,63				
RLA	3496,17	2125,30	24243,27	-1,1619x + 27918	0,0277	7,3514x + 8641,4	0,8288
RLB	3615,63	2036,35	23805,17				
RLC	3518,25	2024,89	23355,63				
PTA-TA	3398,07	2035,50	23041,40	10,976x - 14722	0,3296	10,455x + 1751,1	0,7749
PTB-TA	3417,21	1961,24	22489,02				
PTC-TA	3365,46	1963,94	22042,84				
PTA-A	3443,79	2027,43	23445,13	4,2413x + 8357,6	0,386	7,2849x + 8718,5	0,9494
PTB-A	3504,13	1931,43	22924,98				
PTC-A	3348,33	1887,10	22372,65				

Dapat dilihat pada tabel 4.20, rata-rata koefisien determinasi (R^2) hubungan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis (E) mendekati nol (0). Hal tersebut berarti perubahan nilai modulus elastisitas dinamis (E) tidak terlalu dipengaruhi oleh nilai cepat rambat gelombang P (V_p). Sebaliknya, rata-rata koefisien determinasi (R^2) hubungan antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis (E) mendekati satu (1). Hal tersebut berarti perubahan nilai modulus elastisitas dinamis (E) dipengaruhi oleh nilai cepat rambat gelombang S (V_s). Hasil penelitian yang dilakukan oleh Jerome Carrete *et al.* (2014) menunjukkan perambatan gelombang P kurang sensitif terhadap waktu pengikatan campuran beton dibandingkan dengan gelombang S karena waktu pengikatan campuran beton berkaitan dengan modulus elastisitas dan modulus geser atau berkaitan dengan Cepat rambat gelombang S (V_s). Dapat disimpulkan bahwa nilai modulus elastisitas lebih dipengaruhi oleh cepat rambat gelombang S (V_s) daripada cepat rambat gelombang P (V_p).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hailong Wang dan Qingbin Li (2006) menunjukkan modulus elastisitas dan rasio poisson beton jenuh meningkat dibandingkan dengan sampel kering. Hal tersebut sesuai dengan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan oleh Mehta dan Nonteiro (1997). Pada SNI-ASTM C597 tahun 2012 tentang metode uji kecepatan rambat melalui beton terdapat pernyataan bahwa kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air dapat mencapai 5 % lebih tinggi daripada beton yang kering. Seiring dengan meningkatnya nilai modulus elastisitas dan cepat rambat gelombang, maka koefisien determinasi yang dihasilkan juga semakin besar. Hal ini berarti nilai hubungan dari sampel beton yang berisi air lebih tinggi daripada sampel beton tanpa adanya air.

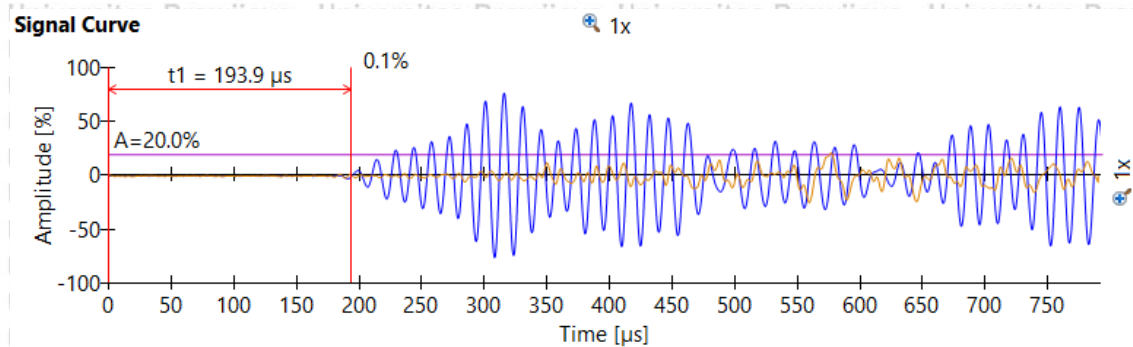
4.5 Hubungan antara Waktu Transmisi dan Amplitudo Gelombang

Pengujian UPV menggunakan alat PUNDIT PL-200 dilakukan pada setiap benda uji sebanyak 2-3 kali pengujian. Hasil pengujian UPV kemudian dianalisis menggunakan *software* PL-Link. Dari *software* tersebut terdapat *waveform* dan parameter-parameter gelombang seperti waktu transmisi dan amplitudo gelombang. Data waktu transmisi dan amplitudo gelombang yang diambil meliputi :

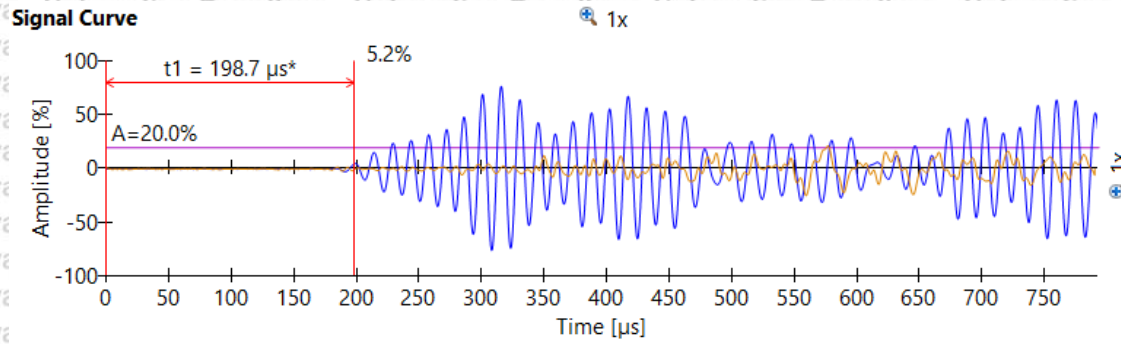
- t_0 yaitu waktu gelombang pertama terdeteksi
- t_1 dan A_1 yaitu waktu dan amplitudo gelombang pertama
- t_{maks} dan A_{maks} yaitu waktu dan amplitudo ketika maksimum
- t_2 dan A_2 yaitu waktu dan amplitudo ketika terjadi pergantian fase gelombang pertama

4.5.1 Gelombang Longitudinal (P-Wave)

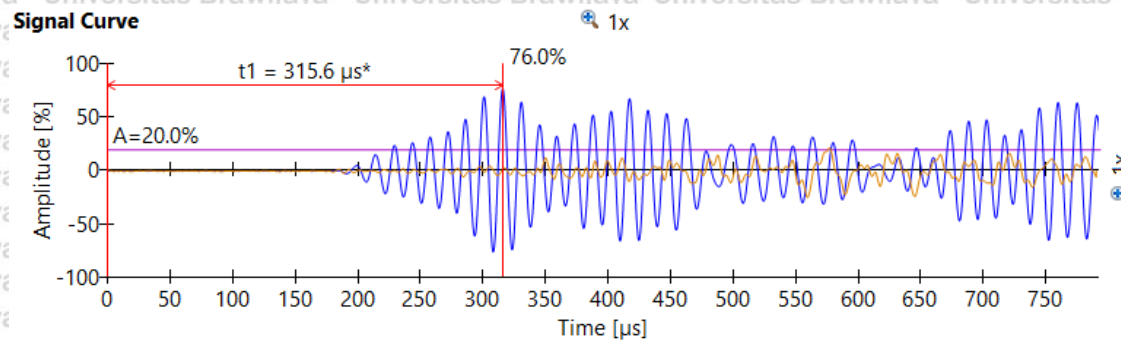
Gambar 4.35, Gambar 4.36 Gambar 4.37 dan Gambar 4.38 merupakan contoh pengambilan parameter gelombang P yaitu waktu transmisi (t_0 , t_1 , t_{maks} , t_2) dan amplitudo gelombang (A_1 , A_{maks} , A_2).



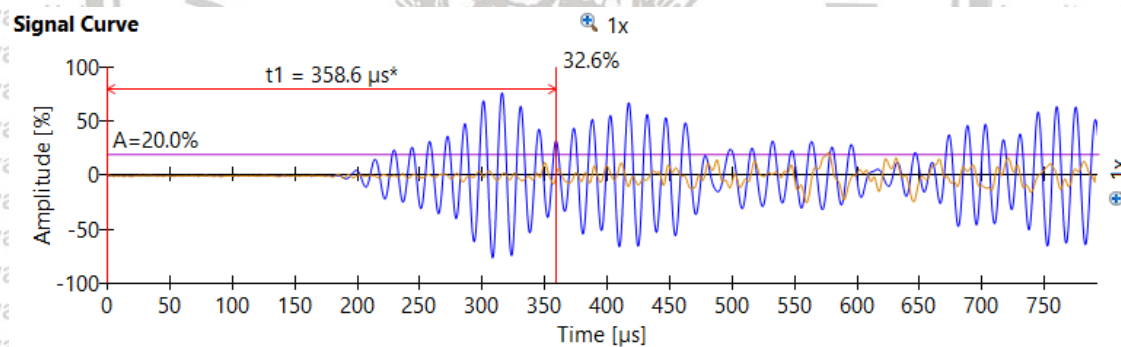
Gambar 4.35 Contoh pengambilan parameter t_0 pada gelombang P



Gambar 4.36 Contoh pengambilan parameter t_1 dan A_1 pada gelombang P



Gambar 4.37 Contoh pengambilan parameter t_{maks} dan A_{maks} pada gelombang P



Gambar 4.38 Contoh pengambilan parameter t_2 dan A_2 pada gelombang P

Tabel 4.21

Rekapitulasi parameter gelombang P setiap benda uji dari *software* PL-Link

Benda Uji	E (MPa)	Waktu (μ s)				Amplitudo (%)		
		t0	t1	tmaks	t2	A1	Amaks	A2
BNB (Beton Normal)	25288,25	202	206,3	483,6	455,4	2,6	64,6	36,3
	24951,19	198	202,5	480,4	523,8	1,6	77,3	51,1
	24490,63	202,7	206,5	587,1	515	1,9	74,5	40,9
RLA (Retak Lurus 4 cm)	23998,28	202,4	207,2	353,4	326,1	8,3	29	4,3
	23637,02	200	204,6	426,8	397,2	13	97,7	43,9
	25094,50	198,3	203,1	425,4	411	5,5	72,7	34,3
RLB (Retak Lurus 8 cm)	23527,42	193,9	198,7	315,6	358,6	5,2	76	32,6
	23992,17	190,6	195,4	639,9	381,7	3,3	49,2	4,5
	23895,90	196,4	201,2	466,5	393,7	13	100,1	17,1
RLC (Retak Lurus 12 cm)	22807,37	198	202,5	522,4	363,2	2,3	12,4	2,1
	23370,25	200,2	204,4	667,5	366,5	2,5	15,7	2,1
	23889,28	198,7	203,5	687,2	377,4	9	49,8	10
PTA (Diameter Lubang 2" Tanpa Air)	22961,52	205,6	210,4	569,8	394,8	11,5	94,3	8,1
	23121,27	206,4	210,6	570,4	378,5	2,4	30,9	3,9
PTB (Diameter Lubang 3" Tanpa Air)	21706,06	205,8	210,8	769,7	516,1	3,1	54,2	16,1
	23271,98	203,9	208,7	754,3	500,7	2,8	43,7	10,1
PTC (Diameter Lubang 4" Tanpa Air)	21859,99	207	211,5	537	494	2,6	44,6	3,9
	22225,70	209	213,8	655,5	481	1,1	25,7	5,5
PTA (Diameter Lubang 2" Berisi Air)	22379,40	203,1	208,1	750	380,5	10,2	83,3	3,7
	22516,03	202,5	207,3	728,5	486,3	6,5	84,2	10,5
	25439,95	204,2	208,7	734	504	6,4	58,6	12,7
PTB (Diameter Lubang 3" Berisi Air)	22801,91	204	209,3	755,4	397	4,4	60,2	11,1
	23028,45	203	208,3	650,6	374,9	5,3	64,8	2,8
	22944,59	207,3	212	758,7	333	6,9	68,7	2,9
PTC (Diameter Lubang 4" Berisi Air)	21188,99	210,2	215,2	752,1	350,7	5,3	54,2	2,3
	22616,72	207,4	212,4	748,9	331,9	7,1	59,8	6,7
	23312,23	209,6	214,6	752,1	337	3,6	47,1	5,4

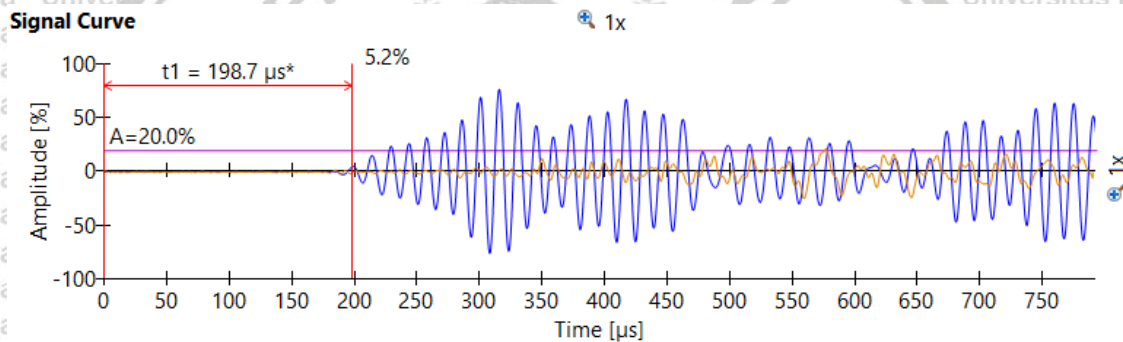
Dari Tabel 4.21, dapat dilihat bahwa nilai waktu transmisi yang semakin besar artinya gelombang tersebut semakin lambat. Pada benda uji dengan keretakan memiliki waktu transmisi yang lebih kecil (lebih cepat) dibandingkan dengan benda uji beton normal. Seperti pada nilai waktu transmisi terbesar (t_0) benda uji beton normal yaitu 202,7 μ s lebih besar (lambat) dibandingkan dengan waktu transmisi terbesar (t_0) pada benda uji RLA (retak 4 cm) yaitu 202,4 μ s. Hal ini sesuai dengan nilai rata-rata cepat rambat dari benda uji keretakan yang lebih besar dari cepat rambat benda uji beton normal, karena waktu transmisi berbanding terbalik dengan cepat rambat gelombang. Ketika gelombang tersebut memiliki waktu transmisi yang semakin kecil maka nilai cepat rambatnya akan semakin besar. Beberapa faktor yang mempengaruhi besar kecilnya waktu transmisi yaitu kerapatan atau homogenitas beton, adanya pori dan kondisi kelembaban beton.

Pada benda uji intrusi air (lubang berisi air) memiliki waktu transmisi yang lebih kecil (lebih cepat) dibandingkan dengan benda uji intrusi air (lubang tanpa air). Seperti pada nilai

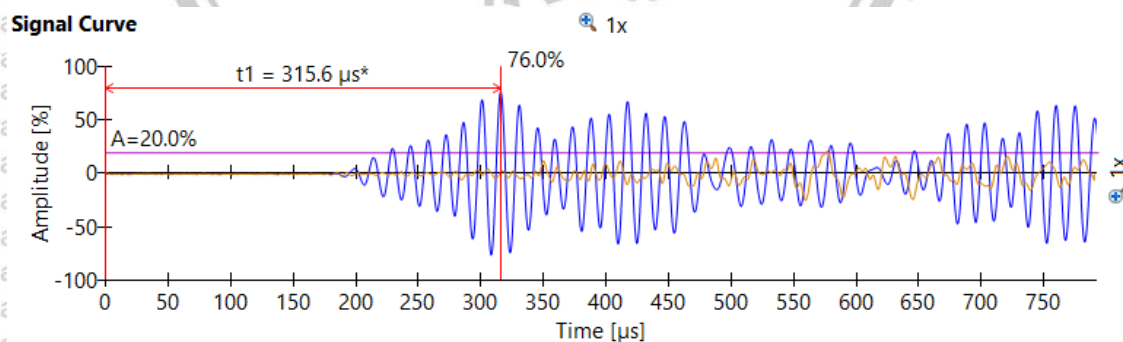
waktu transmisi terbesar (t_0) pada benda uji PTA-A (lubang 2 inci) kondisi lubang berisi air yaitu 204,2 μs lebih kecil (cepat) dibandingkan dengan waktu transmisi terbesar (t_0) pada benda uji PTA-TA (lubang 2 inci) kondisi lubang berisi air yaitu 206,4 μs . Sama seperti waktu transmisi, nilai amplitudo terbesar (A_1) pada benda uji PTA-A (lubang 2 inci) kondisi lubang berisi air yaitu 10,2% lebih kecil dibandingkan dengan nilai amplitudo terbesar (A_1) pada benda uji PTA-TA (lubang 2 inci) kondisi lubang berisi air yaitu 11,5%. Benda uji beton normal dan benda uji dengan retakan memiliki rata-rata nilai t_0 lebih kecil dibandingkan nilai t_0 benda uji intrusi air dengan atau tanpa air. Hal tersebut berarti adanya lubang intrusi air berpengaruh pada pembacaan gelombang yaitu waktu gelombang pertama yang terdeteksi semakin lambat.

4.5.2 Gelombang Transversal (S-Wave)

Gambar 4.39 dan Gambar 4.40 merupakan contoh pengambilan parameter gelombang S yaitu waktu transmisi (t_1 , t_{maks}) dan amplitudo gelombang (A_1 , A_{maks}).



Gambar 4.39 Contoh pengambilan parameter t_1 dan A_1 pada gelombang S



Gambar 4.40 Contoh pengambilan parameter t_{maks} dan A_{maks} pada gelombang S

Tabel 4.22

Rekapitulasi parameter gelombang S setiap benda uji dari *software* PL-Link

Benda Uji	E (MPa)	Waktu (μ s)		Amplitudo (%)	
		t1	tmaks	A1	Amaks
BNB (Beton Normal)	25288,25	322,9	513,5	3,8	29,5
	24951,19	335,5	556,4	4,3	43,1
	24490,63	334	504,5	8,2	41
RLA (Retak Lurus 4 cm)	23998,28	338,2	688	3,2	12,9
	23637,02	344,6	540,5	2,3	10,4
	25094,50	325,5	565,9	6,1	30,5
RLB (Retak Lurus 8 cm)	23527,42	349,9	578,5	4,5	21,4
	23992,17	352,2	487,5	0,7	14,5
	23895,90	350,2	490,1	2,5	15,7
RLC (Retak Lurus 12 cm)	22807,37	359,6	584,3	1,5	4,5
	23370,25	355,1	587,7	2	5,3
	23889,28	346,6	535,9	3,5	19,1
PTA (Diameter Lubang 2" Tanpa Air)	22961,52	348,9	502,5	1,4	12
	23121,27	345,5	436,8	0,7	10
PTB (Diameter Lubang 3" Tanpa Air)	21706,06	373,5	703,7	3,3	10
	23271,98	350,7	674,2	1,4	21,4
PTC (Diameter Lubang 4" Tanpa Air)	21859,99	366	495,6	0,8	8,9
	22225,70	365,5	518,6	1,8	8,9
PTA (Diameter Lubang 2" Berisi Air)	22379,40	361,3	487	4	18,9
	22516,03	361,3	483,8	0,4	15,6
	25439,95	328,5	485,2	5,3	15,3
PTB (Diameter Lubang 3" Berisi Air)	22801,91	369,7	570,5	2,6	19,7
	23028,45	368,1	597,8	5,4	20,1
	22944,59	366,7	596,2	2,4	13
PTC (Diameter Lubang 4" Berisi Air)	21188,99	389,2	508,2	1,6	7,2
	22616,72	372,9	456,4	0,7	4,5
	23312,23	364,4	499	2,7	19,1

Dari Tabel 4.22, dapat dilihat bahwa nilai waktu transmisi yang semakin besar artinya gelombang tersebut semakin lambat. Berbanding terbalik dari gelombang P, pada gelombang S untuk benda uji dengan keretakan memiliki waktu transmisi yang lebih besar (lebih lambat) dibandingkan dengan benda uji beton normal. Seperti pada nilai waktu transmisi terbesar (t_0) benda uji beton normal yaitu 335,5 μ s lebih kecil (cepat) dibandingkan dengan waktu transmisi terbesar (t_0) pada benda uji RLA (retak 4 cm) yaitu 344,6 μ s. Hal ini sesuai dengan nilai rata-rata cepat rambat dari benda uji keretakan yang lebih kecil dari cepat rambat benda uji beton normal, karena waktu transmisi berbanding terbalik dengan cepat rambat gelombang. Ketika gelombang tersebut memiliki waktu transmisi yang semakin kecil maka nilai cepat rambatnya akan semakin besar. Hal ini berhubungan dengan sifat perambatan gelombang S ketika ada halangan (retak) yang merupakan rambatan

panjang (tegak luruh arah rambat) sehingga rambatannya naik turun pada benda uji. Tidak seperti gelombang P yang ketika ada retak atau lubang akan mencari rambatan beton, pada gelombang S Penyesuaian atau perubahan arah (geser) ketika menemui retak atau lubang sangat sedikit.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan adalah sebagai berikut :

1. Pada pengujian modulus elastisitas statis (uji mekanik) beton tak bertulang menerima beban berupa tekan, sedangkan retak terjadi pada beton yang menerima beban tarik. Maka pada pengujian statis adanya retak tidak berpengaruh pada modulus elastisitasnya. Karena modulus elastisitas berhubungan dengan sifat bahan atau material (beton). Retak bisa berpengaruh pada modulus elastisitas pada kasus-kasus tertentu misalnya pada uji tarik. Pada penelitian ini atau dalam kasus ini adanya retak berpengaruh pada modulus elastisitas dinamis karena menggunakan pengujian *Non-Destructive Test* yaitu metode *Ultrasonic pulse velocity* (UPV). Pengujian ini menggunakan prinsip pemantulan gelombang ultrasonik dimana *transmitter* (pemancar gelombang) akan mengirimkan sinyal gelombang ultrasonik melalui rambatnya (beton) dan akan diterima oleh *receiver*. Dengan adanya keretakan maka akan mempengaruhi cepat rambat gelombangnya. Dimana semakin dalam retak maka akan semakin kecil cepat rambatnya karena jalur tempuh gelombangnya semakin panjang dan nilai modulus elastisitas yang dihasilkan juga semakin kecil.
2. Pada benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) dengan kondisi lubang tanpa air, diperoleh nilai modulus elastisitas dinamis dari yang tertinggi hingga terendah berturut turut yaitu benda uji PTA-TA (diameter 2 inci), PTB-TA (diameter 3 inci) dan PTC-TA (diameter 4 inci). Dibandingkan benda uji beton normal dengan proporsi yang sama (1 : 1,6 : 2,6), pada benda uji intrusi air menunjukkan pengaruh adanya lubang (tanpa air) terhadap nilai modulus elastisitas dinamisnya. Presentase selisih nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal dan benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) dengan kondisi lubang tanpa air berturut-turut yaitu 8.11% terhadap benda uji PTA-TA, 10.77% terhadap benda uji PTB-TA, dan 13.01% terhadap benda uji PTC-TA. Sedangkan pada benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) dengan kondisi lubang berisi air, diperoleh nilai modulus elastisitas dinamis dari yang tertinggi hingga

terendah berturut-turut yaitu benda uji PTA-A (diameter 2 inci), PTB-A (diameter 3 inci) dan PTC-A (diameter 4 inci). Dibandingkan benda uji beton normal dengan proporsi yang sama (1 : 1,6 : 2,6), pada benda uji intrusi air menunjukkan pengaruh adanya lubang (berisi air) terhadap nilai modulus elastisitas dinamisnya. Presentase selisih nilai modulus elastisitas dinamis benda uji beton normal dan benda uji intrusi air (variasi diameter lubang) dengan kondisi lubang berisi air berturut-turut yaitu 6.25% terhadap benda uji PTA-A, 8.66% terhadap benda uji PTB-A, dan 11.34% terhadap benda uji PTC-A. Modulus elastisitas dinamis benda uji intrusi air (lubang berisi air) lebih besar dari modulus elastisitas benda uji intrusi air (lubang tanpa air). Hal ini karena dari hasil penelitian didapatkan cepat rambat gelombang pada benda uji dengan lubang berisi air lebih tinggi.

3. Hubungan antara cepat rambat gelombang P (V_p) dan modulus elastisitas dinamis dinilai kurang berkaitan atau kurang baik, ditunjukkan pada grafik regresi yang menghasilkan koefisien determinasi (R^2). Rata-rata nilai koefisien determinasi (R^2) pada grafik hubungan tersebut untuk semua benda uji mendekati nilai 0, artinya tidak ada keterkaitan atau pengaruh dari 2 variabel tersebut. Sebaliknya, pada hubungan antara cepat rambat gelombang S (V_s) dan modulus elastisitas dinamis dinilai sangat berkaitan atau sangat baik, ditunjukkan pada grafik regresi yang menghasilkan koefisien determinasi (R^2). Rata-rata nilai koefisien determinasi (R^2) pada grafik hubungan tersebut untuk semua benda uji mendekati nilai 1, artinya ada keterkaitan atau pengaruh dari cepat rambat gelombang S (V_s) terhadap nilai modulus elastisitas dinamis.

5.2 Saran

Berdasarkan pengalaman melakukan penelitian di laboratorium dan hasil penelitian, terdapat beberapa saran untuk penelitian selanjutnya yaitu :

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terhadap adanya kondisi retak atau lubang yang lebih umum.
2. Perlu dilakukan penelitian pendukung tentang uji *Destructive Test* sebagai pengontrol hasil pengujian UPV.
3. Pengecoran benda uji dalam satu variasi sebaiknya dilakukan pada satu *batch* pengecoran yang sama.
4. Dilakukan beberapa kali pengujian untuk meminimalisir adanya data yang kurang valid atau tidak bisa digunakan pada pengolahan data.
5. Memperhatikan penggunaan *gel ultrasonic* karena akan mempengaruhi pembacaan alat UPV.
6. Diperlukan kestabilan transduser agar pembacaan alat dan hasil cepat rambat lebih akurat.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



(halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional. 2012. Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton (ASTM C 597- 02, IDT). Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Badan Standarisasi Nasional. 2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD). Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.
- Carette, Jerome., Lambrette, Nicolas., Meskens, Benjamin., Viaene, Xander., & Staquet, Stephanie. 2014. *Ultrasonic Monitoring of P-Wave and S-Wave Transmission Velocity for Setting Time Determination of Mortar*. BATir Department, Brussels. Belgium : University Libre de Bruxelles (ULB).
- Carillo, J., Ramirez, J. & Lizarazo Marriaga, J. 2019. *Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Fiber-Reinforced Concrete in Colombia from Ultrasonic Pulse Velocities*. Journal of Building Engineering 23 (2019) 18-26.
- Carino, N.J. & Malhora, V.M. 2004. *Handbook On Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton : RCR Press.
- Fitri, Fatimah Azzahra., Arifi, Eva. dan Simatupang, Roland Martin. 2018. Analisis Modulus Elastisitas Beton Menggunakan Alat Pundit PL-200. Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Malang : Universitas Brawijaya.
- International Atomic Energy Agency. 2002. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17*. Vienna: IAEA.
- Nawy, Edward. G. 1990. *Reinforce Concrete a Fundamental Approach*. Terjemahan Bambang Suryoatmono. Bandung : PT. Eresco.
- PROCEQ. 2014. *Pundit PL-200 and PE Ultrasonic Training*. Switzerland : Proceq.
- PROCEQ. 2015. *Pundit Operating Instructions*. Switzeland : Proceq.
- PROCEQ. 2017. *Pundit UPV Cue Cards*. Switzeland : Proceq.
- Purwanto, Amanda dan Rouf, Abdul. 2018. Sistem Pengukuran Modulus Elastisitas Beton Menggunakan Metode Ultrasonic Pulse Velocity. *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation System)*, Vol. 8, No. 1, pp.25-26, 2018.

Wang, Hailong & Li, Qingbin. 2006. *Prediction of elastic modulus and Poisson's ratio for unsaturated concrete*. International Journal of Solids and Structures 44 (2007). 1370-1379.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Pembuatan Benda Uji



Gambar 1. Menimbang kebutuhan material campuran beton



Gambar 2. Persiapan bekisting balok (mengolesi oli pada permukaan dalam)



Gambar 3. Persiapan bekisting/cetakan silinder (mengolesi oli pada permukaan dalam)



(a)

(b)

Gambar 4. (a) Pengadukan campuran beton menggunakan *concrete mixer* ; (b) Uji Slump



(a)

(b)

Gambar 5. Proses penuangan beton segar pada bekisting (a) Benda uji beton normal dan benda uji dengan retak; (b) Benda uji intrusi air (dengan lubang)



(a)



(b)

Gambar 6. Proses pemadatan (a) Benda uji balok menggunakan vibrator; (b) Benda uji silinder menggunakan tongkat penusuk



(a)

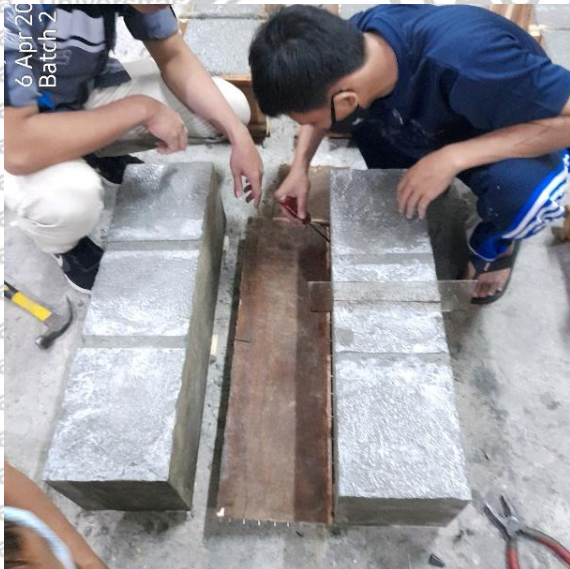


(b)

Gambar 7. Benda uji pada bekisting (a) beton normal dan beton dengan retak; (b) beton intrusi air (dengan lubang)



Gambar 8. Benda uji pada bekisting/cetakan silinder



Gambar 9. Pelepasan bekisting pada benda uji setelah 24 jam

Lampiran 2. Curing Benda Uji



(a)

(b)

Gambar 10. Curing benda uji (a) balok; (b) Silinder



Lampiran 3. Pengujian Kuat Tekan



(a)

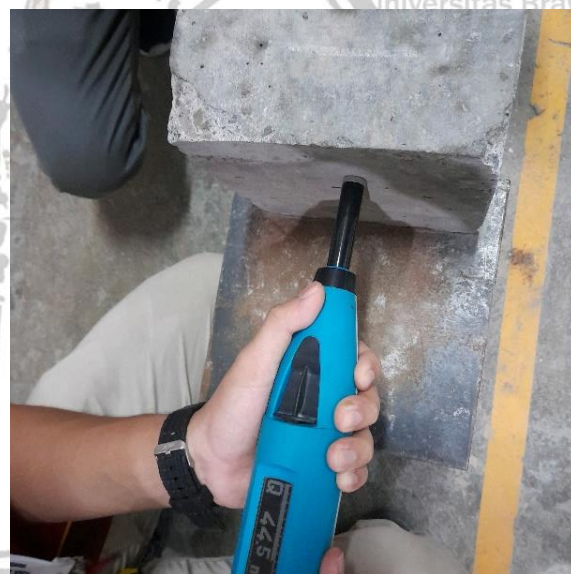


(b)

Gambar 11. (a) Menimbang benda uji silinder; (b) *Caping* benda uji silinder



(a)

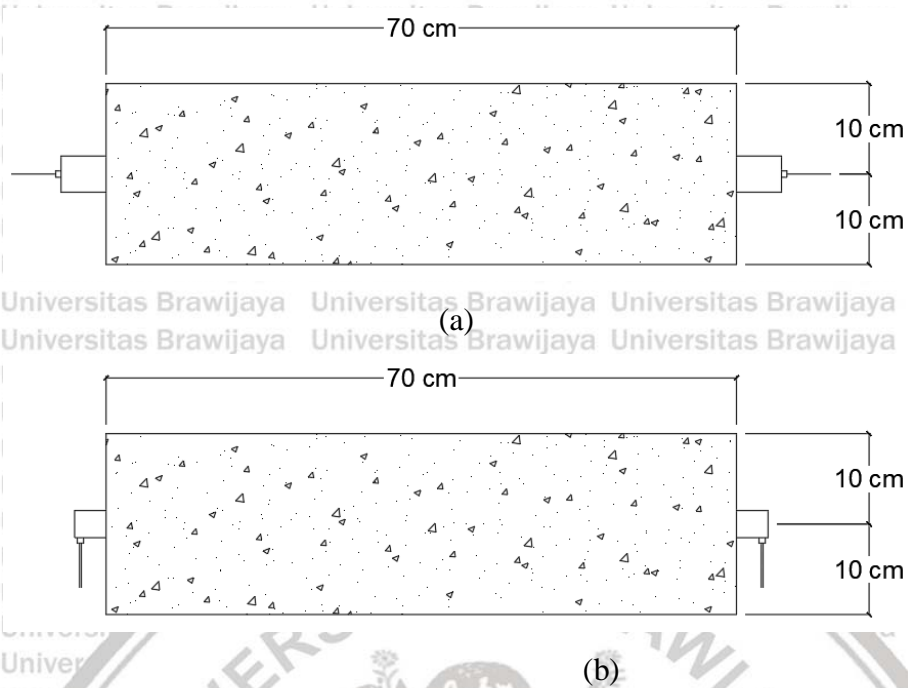


(b)

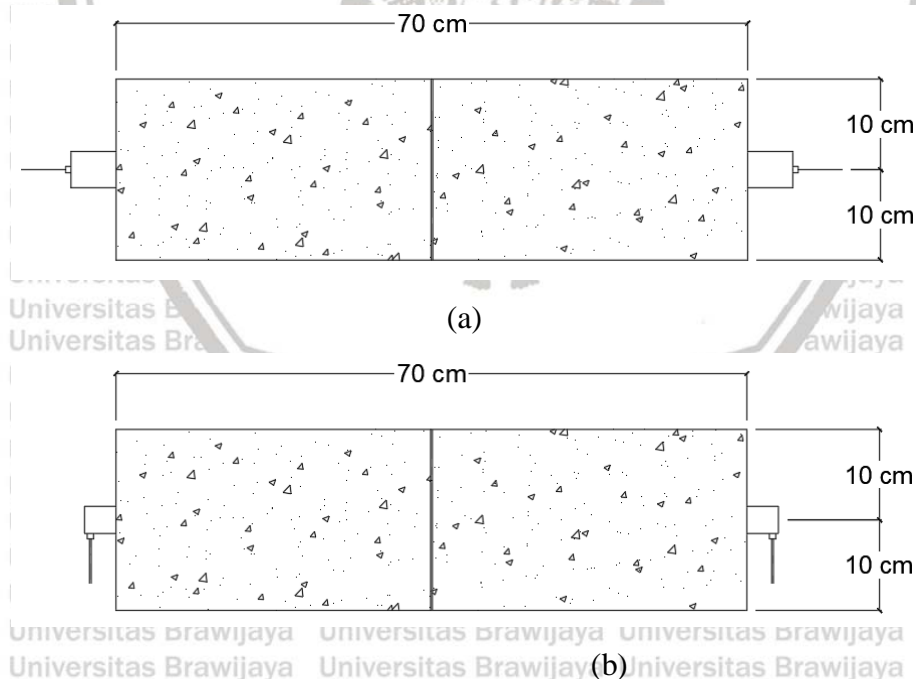
Gambar 12. Pengujian kuat tekan (a) Benda uji silinder menggunakan *Compression Testing Machine*;

(b) Benda uji balok menggunakan *Rebound Schmidt Hammer Test*

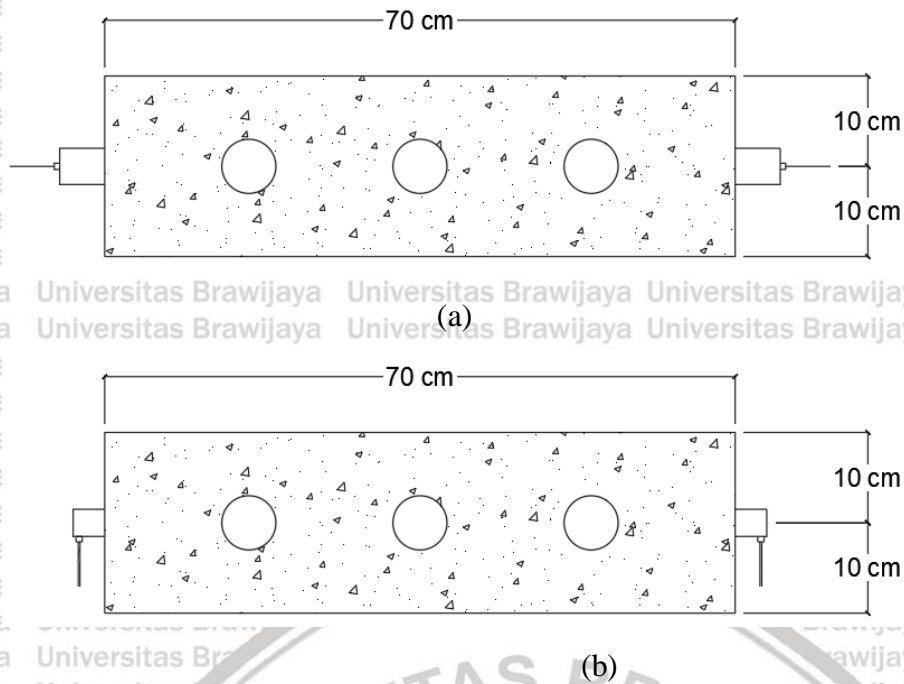
Lampiran 4. Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis Menggunakan Metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)



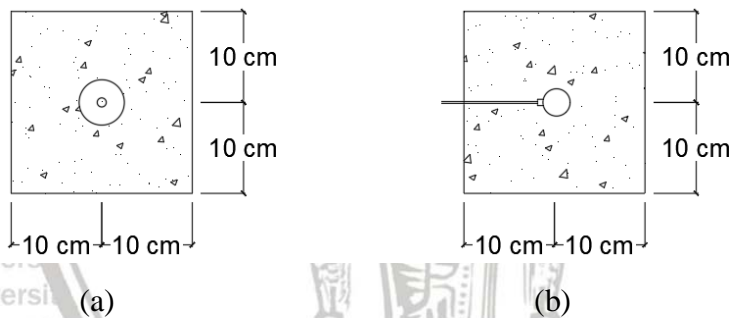
Gambar 13. Skema pengujian UPV tampak atas benda uji beton normal (a) Transduser Standar (*P-wave*); (b) Transduser *S-wave*



Gambar 14. Skema pengujian UPV tampak atas benda uji keretakan (a) Transduser Standar (*P-wave*); (b) Transduser *S-wave*



Gambar 15. Skema pengujian UPV tampak atas benda uji intrusi air (dengan lubang) (a) Transduser Standar (*P-wave*); (b) Transduser *S-wave*



Gambar 16. Skema pengujian UPV tampak sisi melintang benda uji (a) Transduser standar (*P-wave*); (b) Transduser *S-wave*



Gambar 17. Pengujian UPV benda uji beton normal (BNB)



Gambar 18. Pengujian UPV benda uji keretakan



Gambar 19. Pengujian UPV benda uji intrusi air (kondisi lubang tanpa air)

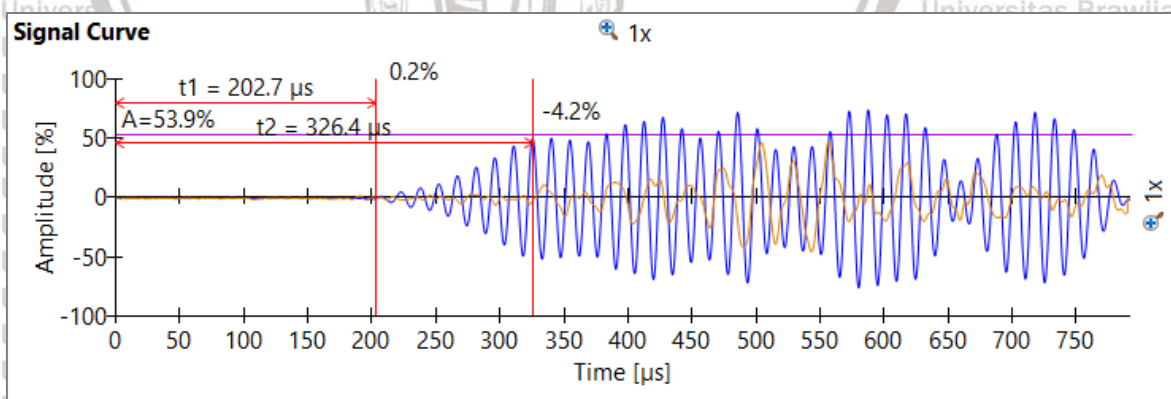
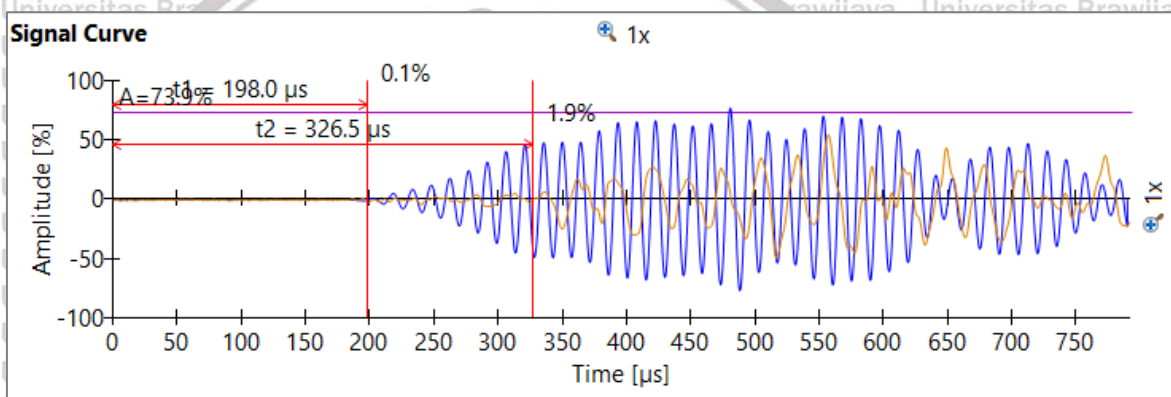
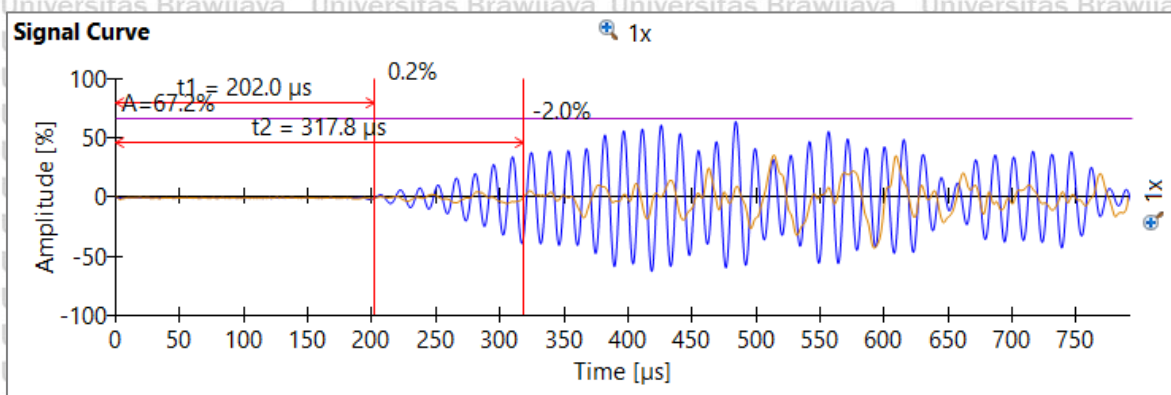


Gambar 20. Pengujian UPV benda uji dengan lubang (kondisi lubang berisi air)



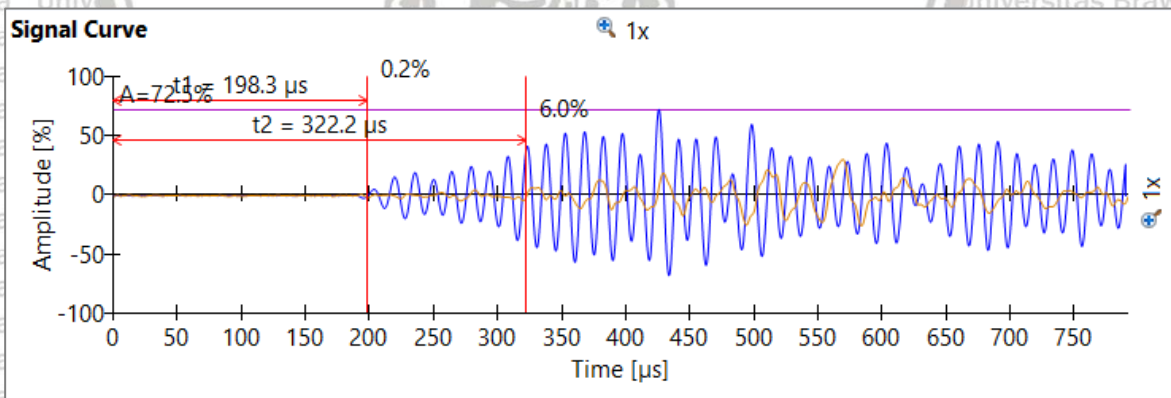
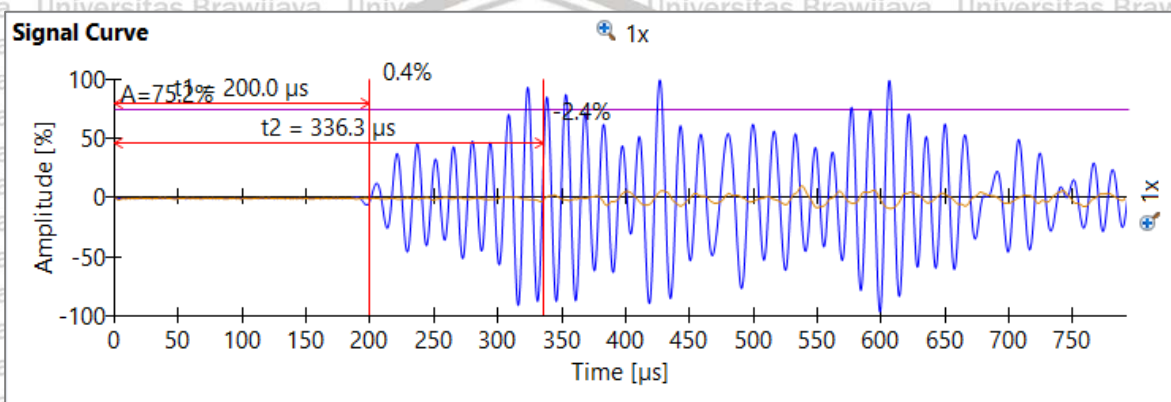
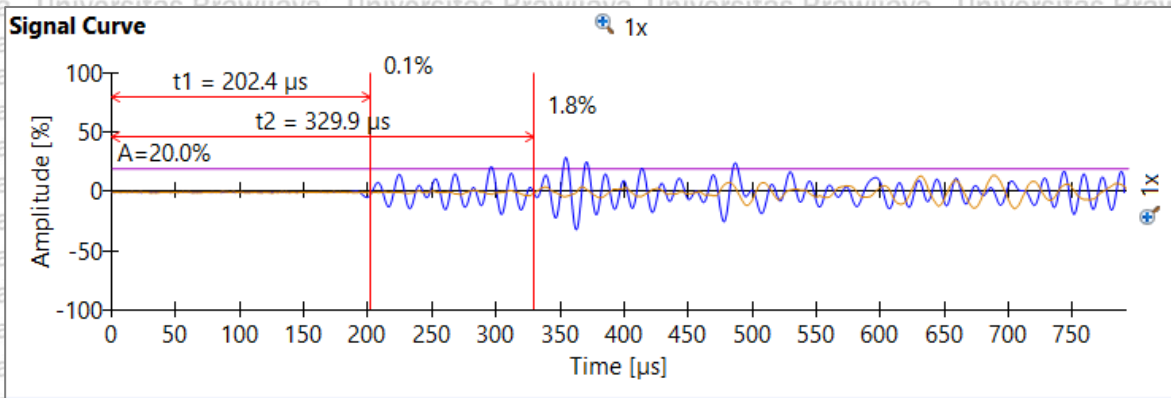
Lampiran 5. Waveform Hasil Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

- Benda Uji Beton Normal (BNB)



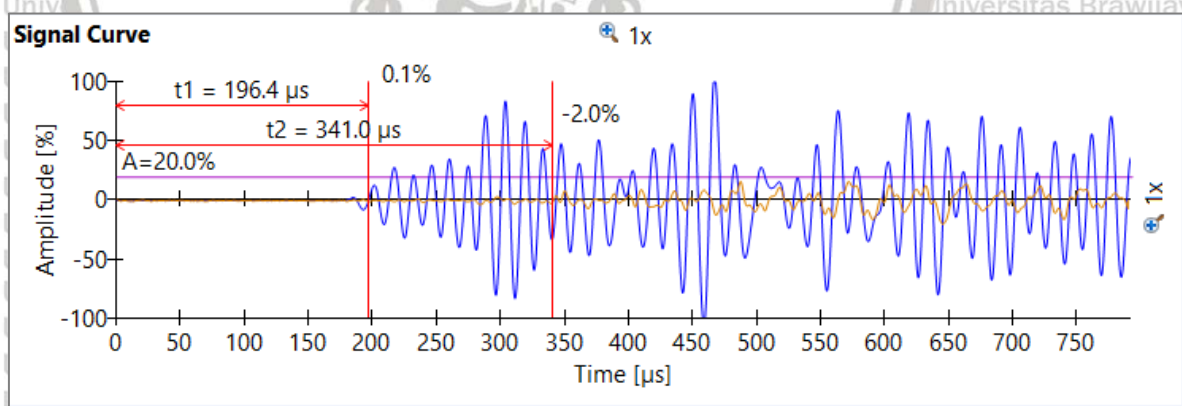
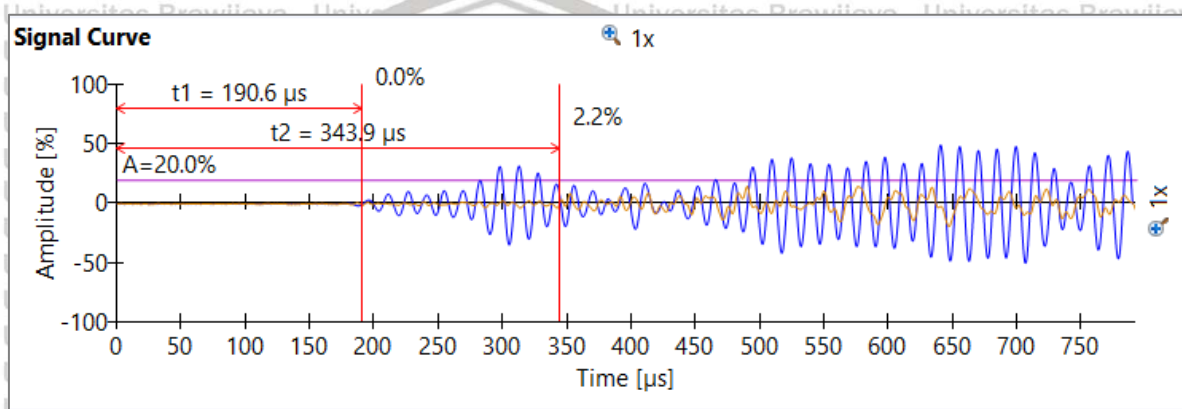
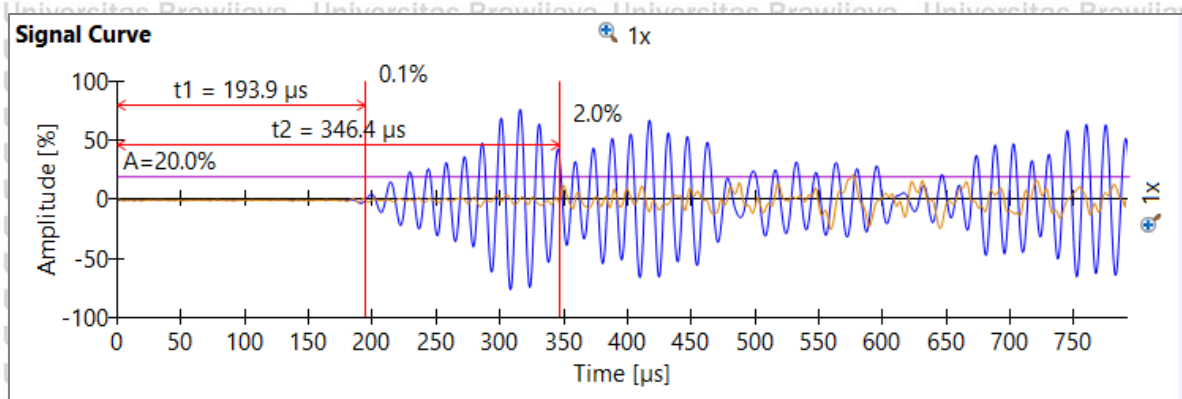
Gambar 21. Waveform pada benda uji beton normal (BNB)

- **Benda Uji dengan Kedalaman Retak 4 cm (RLA)**



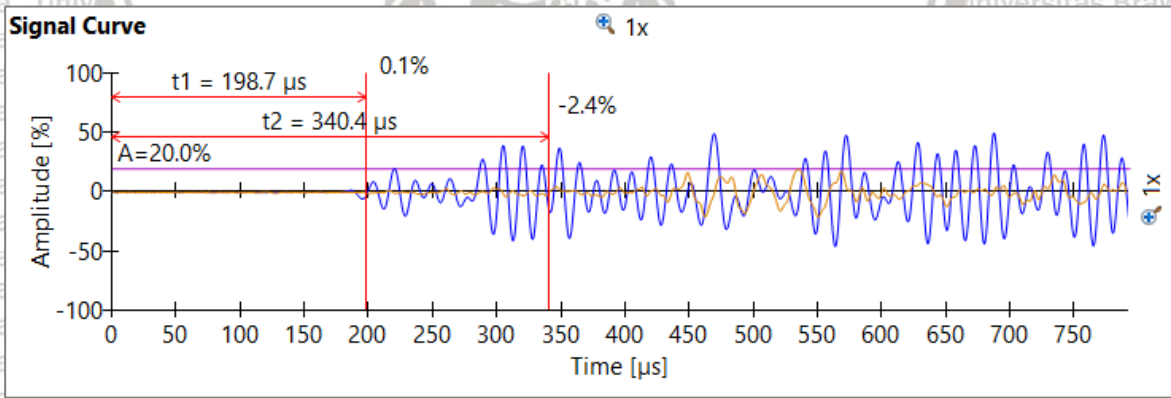
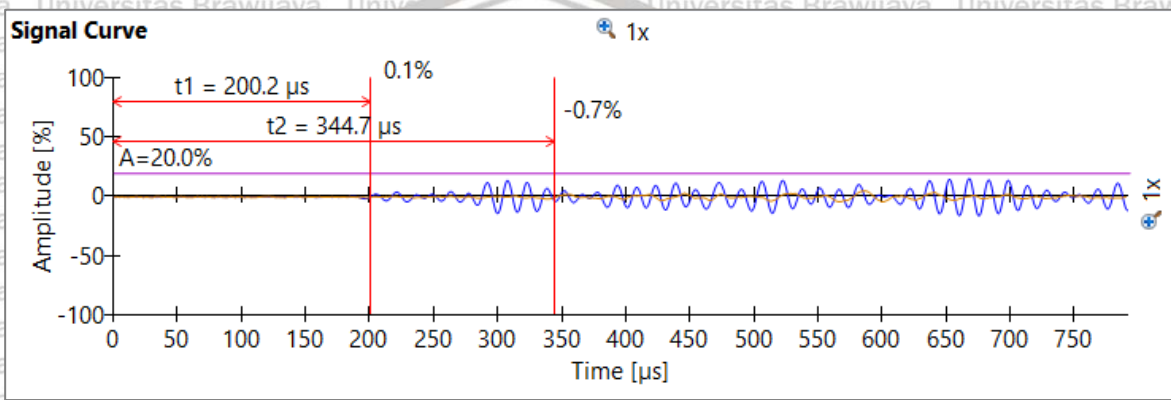
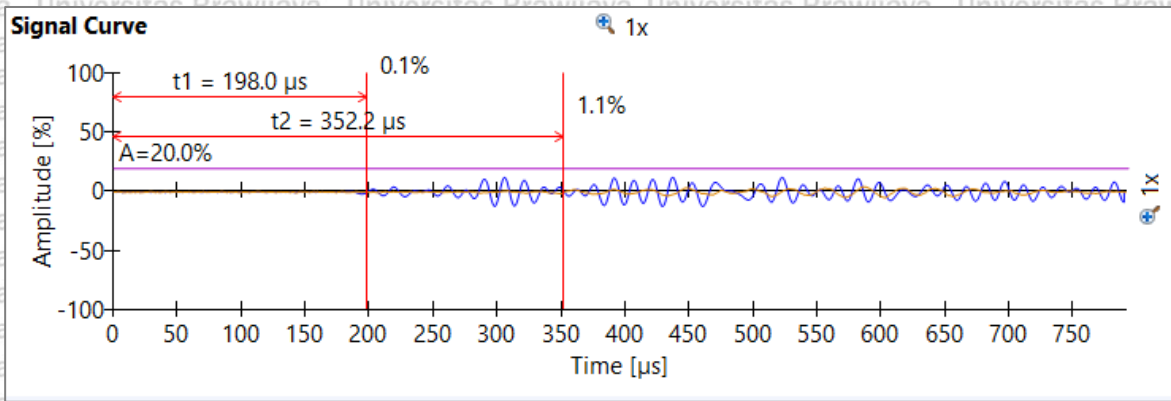
Gambar 22. Waveform pada benda uji dengan kedalaman retak 4 cm (RLA)

- **Benda Uji dengan Kedalaman Retak 8 cm (RLB)**



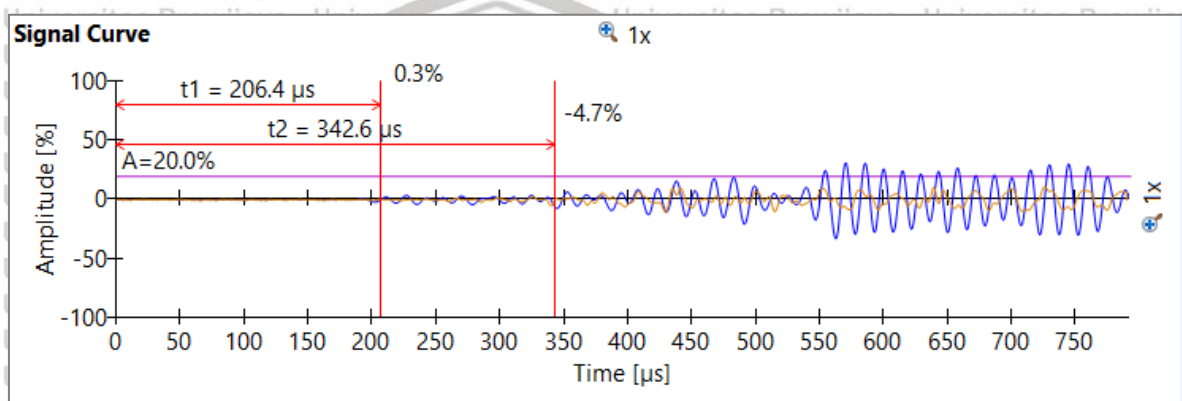
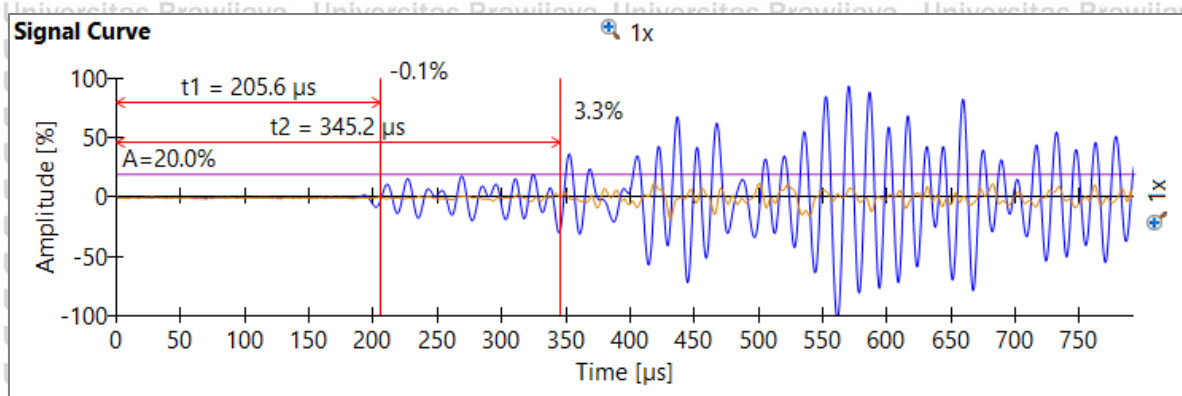
Gambar 23. Waveform pada benda uji dengan kedalaman retak 8 cm (RLB)

- **Benda Uji dengan Kedalaman Retak 12 cm (RLC)**



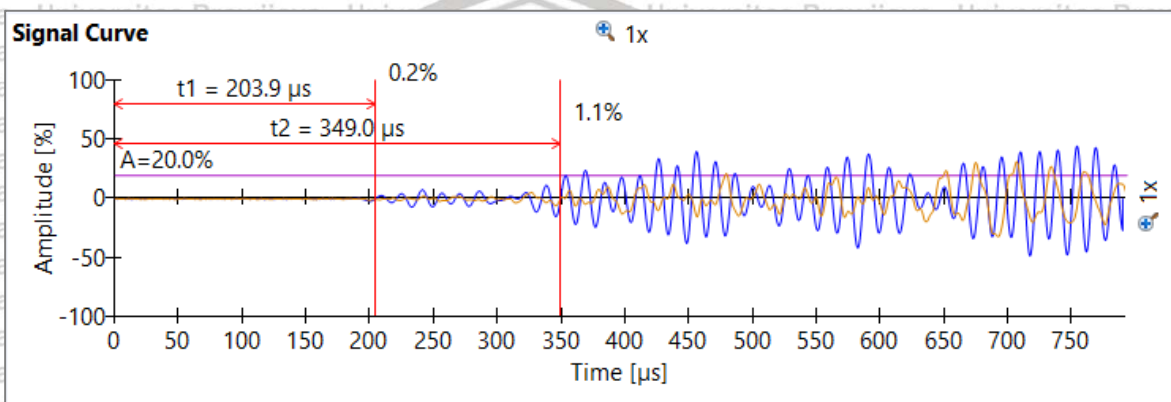
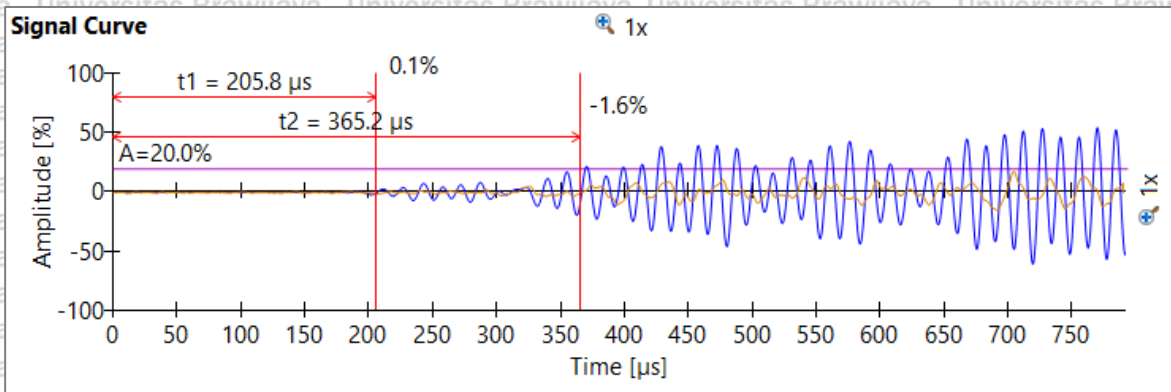
Gambar 24. Waveform pada benda uji dengan kedalaman retak 12 cm (RLC)

- **Benda Uji dengan Lubang Diameter 2 Inchi – Tanpa Air (PTA-TA)**



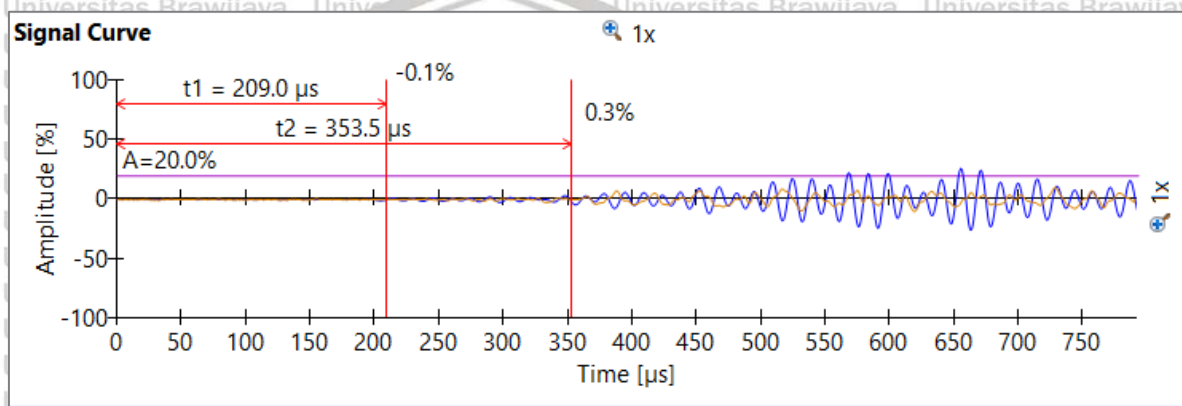
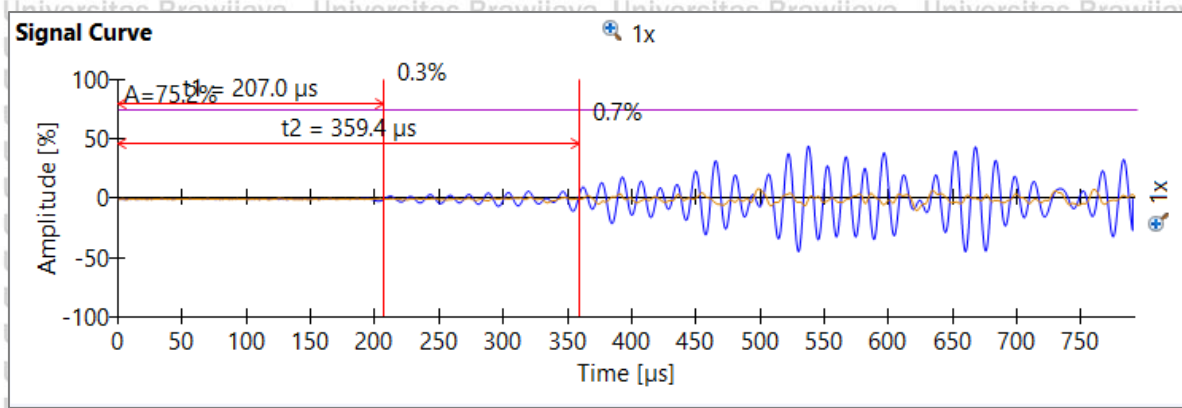
Gambar 25. Waveform pada benda uji dengan lubang diameter 2 inci – Tanpa air (PTA-TA)

- **Benda Uji dengan Lubang Diameter 3 Inchi – Tanpa Air (PTB-TA)**



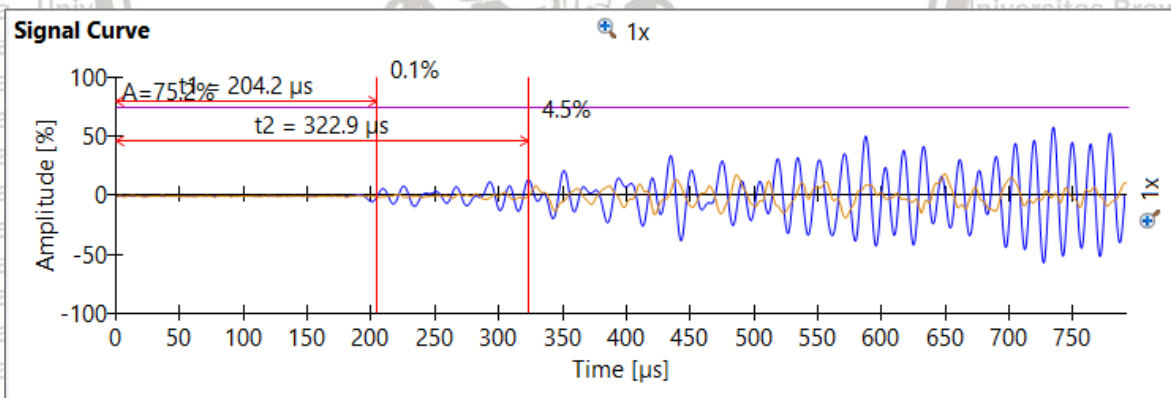
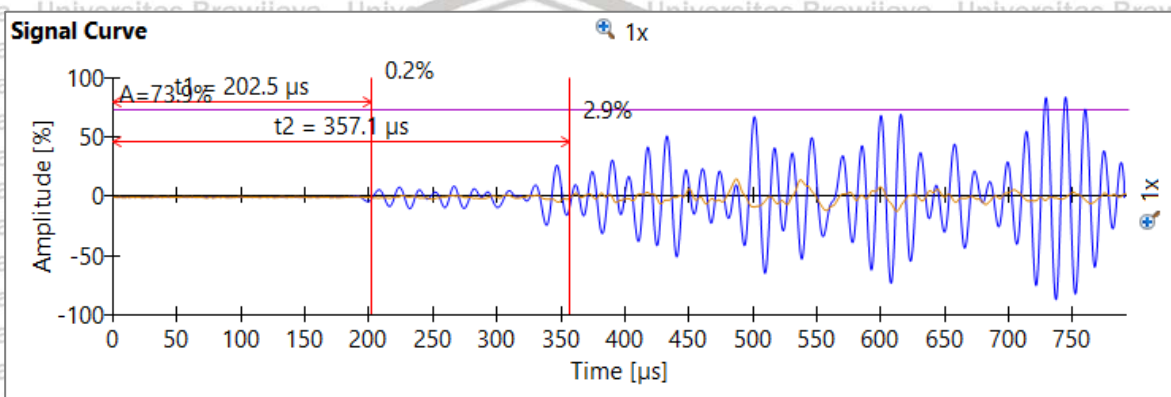
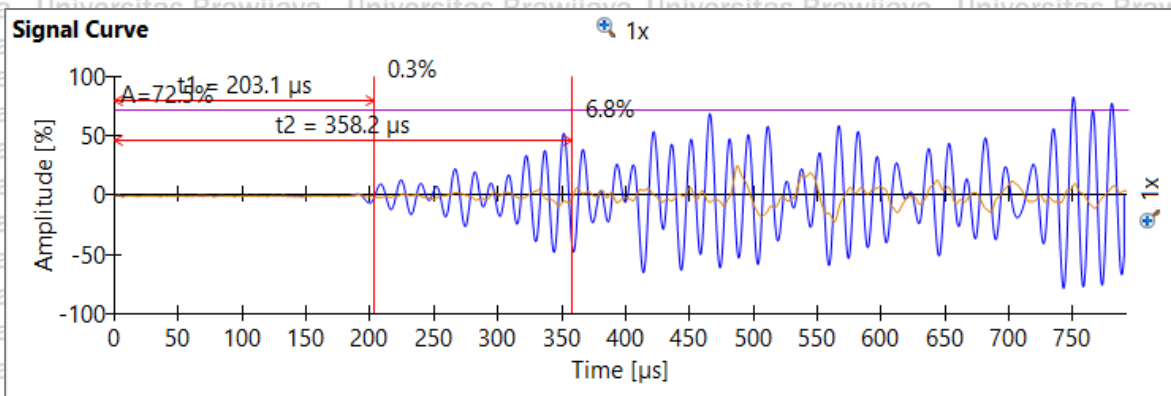
Gambar 26. Waveform pada benda uji dengan lubang diameter 3 inci – Tanpa air (PTB-TA)

- **Benda Uji dengan Lubang Diameter 4 Inci – Tanpa Air (PTC-TA)**



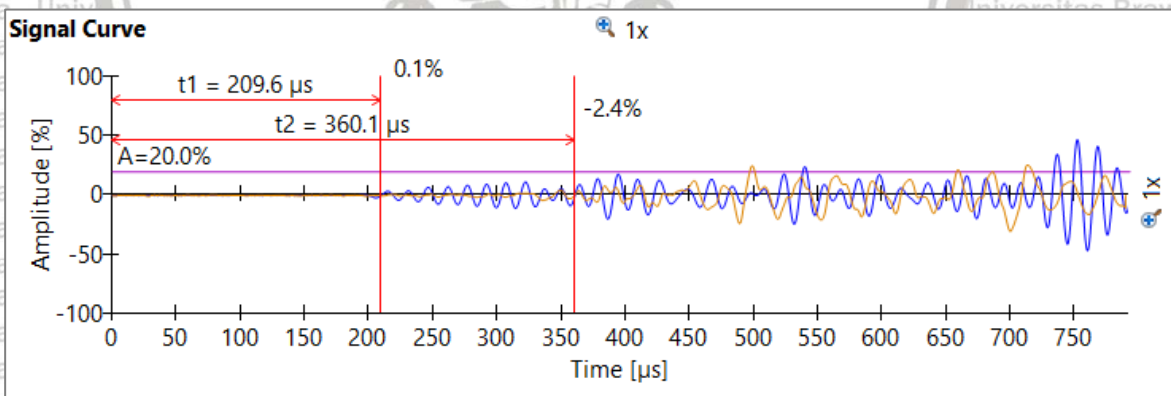
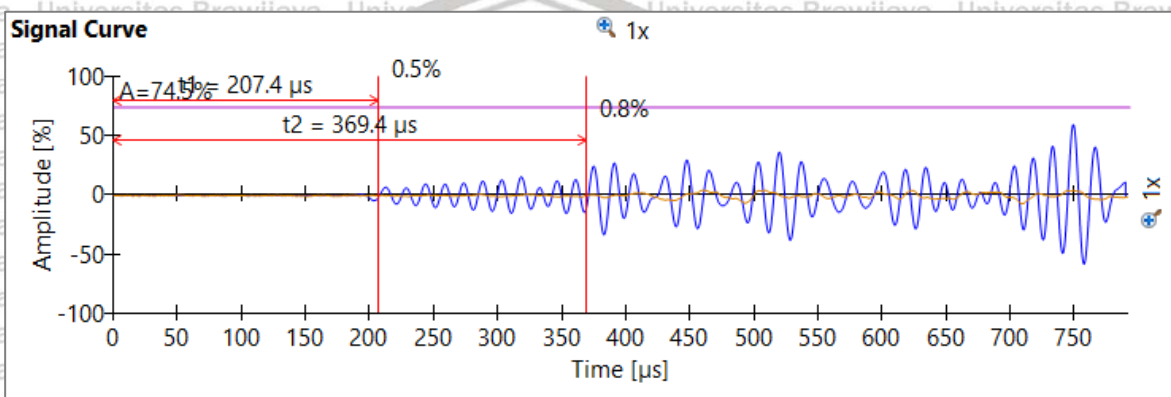
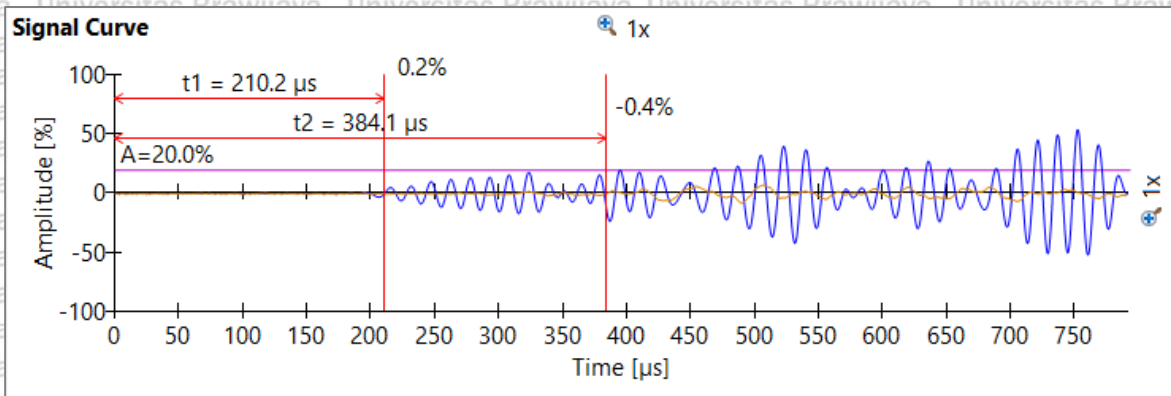
Gambar 27. Waveform pada benda uji dengan lubang diameter 4 inci – Tanpa air (PTC-TA)

- **Benda Uji dengan Lubang Diameter 2 Inchi – Berisi Air (PTA-A)**



Gambar 28. Waveform pada benda uji dengan lubang diameter 2 inci – Berisi air (PTA-A)

- **Benda Uji dengan Lubang Diameter 4 Inchi – Berisi Air (PTC-A)**



Gambar 30. Waveform pada benda uji dengan lubang diameter 4 inchi – Berisi air (PTC-A)