PENGARUH INTRUSI AIR PADA BETON NORMAL TERHADAP CEPAT RAMBAT GELOMBANG DENGAN METODE *ULTRASONIC PULSE VELOCITY* (UPV)

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Diajukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik

YUSTISYA MADANI

NIM. 175060100111030

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2021

repository.ub.ac.id

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH INTRUSI AIR PADA BETON NORMAL TERHADAP CEPAT RAMBAT GELOMBANG DENGAN METODE *ULTRASONIC PULSE VELOCITY* (UPV)

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan

Memperoleh gelar Sarjana Teknik

YUSTISYA MADANI

NIM. 175060100111030

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing

pada tanggal 4 Agustus 2021

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II
Ir. Christin Remayanti N., ST., MT	Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU
NIP. 19840325 201504 2 001	NIP. 19610125 198601 1 001

Mengetahui,

Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Pract.)

NIP. 19810220 200604 1 002

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI

JUDUL SKRIPSI :

Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal terhadap Cepat Rambat Gelombang dengan Metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Nama Mahasiswa	: Yustisya Madani
NIM	: 175060100111030
Program Studi	: Teknik Sipil
Minat	: Struktur

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I	: Ir. Siti Nurlina, MT., IPP
Dosen Penguji II	: Ir. Christin Remayanti Nainggolan, ST., MT
Dosen Penguji III	: Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU
Tanggal Ujian	: 28 Juli 2021
SK Penguji	: 1287/UN10.F07/KP/2021

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

PERNYATAAN ORISINALITAS 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 ini 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 dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 6 Agustus 2021

Yustisya Madani

175060100111030

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

TURNITIN

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA

SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 010/UN10.F07.11.11/PP/2021

Sertifikat ini diberikan kepada :

YUSTISYA MADANI

Dengan Judul Skripsi :

PENGARUH INTRUSI AIR PADA BETON NORMAL TERHADAP CEPAT RAMBAT GELOMBANG DENGAN METODE ULTRASONIC PULSE VELOCITY (UPV)

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq$ 20 %, dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 9 Agustus 2021

Jurusan Teknik Sipil

Ir. Alwafi Pujiraharjo,ST,MT
NIP. 19700829 200012 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

Dr. Eng. Indradi Wijatmiko,ST.,M.Eng [Prac]
NIP. 19810220 200604 1 002

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

RIWAYAT HIDUP

Yustisya Madani, lahir di Tulungagung pada tanggal 24 Januari 1999. Anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Edy Susanto dan Ibu Endah Sriwinarti. Penulis memulai pendidikan dengan duduk di bangku sekolah TK Al Irsyad Tulungagung pada tahun 2003 dan lulus pada tahun 2005. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan pendidikan di SD Negeri 10 Kampung Dalem dan lulus pada tahun 2011. Kemudian melanjutkan ke jenjang berikutnya, yaitu menuntut ilmu di SMP Negeri 3 Tulungagung dan lulus pada tahun 2014. Selanjutnya, penulis bersekolah di SMA Negeri 1 Kedungwaru hingga lulus pada tahun 2017. Pada tahun 2017, penulis diterima di Perguruan Tinggi Negeri yaitu Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan menyelesaikan kuliah strata satu (S1) pada tahun 2021.

Selama menjalani perkuliahan di Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, penulis aktif berpartisipasi dalam berbagai kegiatan, organisasi, maupun kepanitiaan. Adapun organisasi yang pernah diikuti adalah Himpunan Mahasiswa Sipil selama 3 periode pada tahun 2018 hingga 2021. Sedangkan untuk kepanitiaan, penulis pernah menjadi anggota dan panitia inti pada beberapa kegiatan seperti PROBINMABA, Civil Camp, Civil Fiesta, Asia Bridge Competition, Kompetisi Jembatan Indonesia, dan beberapa kegiatan lainnya. Selain itu, penulis juga pernah menjadi Asisten Tugas Besar pada mata kuliah Perpetaan dan SIG dan Analisis Struktur I pada tahun 2020 serta menjadi Asisten Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya selama 2 periode, yaitu pada tahun 2019 dan 2020.

Malang, 6 Agustus 2021

Penulis

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Kupersembahkan Karya Sederhana ini

to people I love the most in the whole world

Bapak, Ibu, Elsya, dan Amay

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur dipanjatkan atas kehadirat Allah Yang Maha Esa karena atas segala rahmat dan karunia-Nya, penyusunan skripsi yang berjudul "Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal terhadap Cepat Rambat Gelombang dengan Metode *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)" dapat terselesaikan dengan baik dan lancer.

Penyusunan skripsi ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar sarjana (S1) yang harus ditempuh oleh seluruh mahasiswa Universitas Brawijaya, khususnya saya dalam usaha mendapatkan gelar Sarjana Teknik (ST) di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik. Saya menyadari bahwa selama penyusunan skripsi ini sangat erat dengan bantuan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak.

Pada kesempatan ini, saya ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan setinggi – tingginya kepada :

1. Keluarga tercinta, yaitu Bapak, Ibu, dan kedua Adik saya Elsya dan Amay yang tidak pernah berhenti memberi semangat dan dukungan dalam bentuk apapun dari awal saya kuliah hingga tersusunnya skripsi ini.
2. Bapak Dr. Eng. Ir. Alwafi Pujiraharjo, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Ibu Dr. Eng. Ir. Eva Arifi, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya dan Dosen Penguji Komprehensif.
4. Bapak Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng. (Pract) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing.
5. Ibu Ir. Christin Remayanti Nainggolan, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing 1 Skripsi.
6. Bapak Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU selaku Dosen Pembimbing 2 Skripsi.
7. Ibu Ir. Siti Nurlina, MT., IPP selaku Ketua Majelis Penguji.
8. Ibu Dr. Eng. Desy Setyowulan, ST., M.Sc. selaku Dosen Penasehat Akademik.
9. Bapak Dr. Ir. Wisnumurti, MT. selaku KKJF Bidang Struktur.
10. Segenap dosen dan karyawan di Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
11. Bapak Sugeng, Mas Dino, Mas Joko, dan Bapak Hadi sebagai Laboran Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Brawijaya yang telah membantu penelitian skripsi ini.

12. Teman – teman seperjuangan penelitian skripsi, yaitu Nungki, Abid, Candra, Naufal, dan Aldi yang sudah bersedia berbagi suka dan duka selama kurang lebih 6 bulan dan sangat berjasa membantu saya dalam menyelesaikan skripsi.
13. Tsania Cantika Fadillah, M. Ainur Rofik, Ida Fitri, dan (Almh.) Reni Kurniasari yang sudah bersedia mendengarkan cerita saya dalam kondisi apapun.
14. Teman – teman AmerA 2017, yaitu Aldo, Qisthi, Dini, Dewi, Nugi, Ibnu, Dicky Hamdani, Mila, Armanda, Dito, Khalda, Adiwena yang senantiasa bekerja sama dalam program kerja ataupun kompetisi yang ada.
15. Teman – teman Badan Pengurus Inti HMS FT-UB Periode 2020/2021 yang mengajarkan kreativitas dalam berorganisasi selama pandemic.
16. Teman – teman, Mas, Mbak, dan Adik – Adik Departemen AmerA Periode 2018/2019, 2019/2020, dan 2020/2021 yang telah banyak membantu saya dalam belajar berorganisasi.
17. Teman – teman Teknik Sipil Angkatan 2017 Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang selalu membantu perkuliahan saya dan mengukir banyak kenangan indah bersama.
18. Mas Kushariyanto yang sering memberikan semangat dan hiburan recehnya.
19. Saudara – saudara tercinta, baik dari keluarga Bapak maupun Ibu, yang selalu mendukung dan selalu ada kapanpun dan bagaimanapun kondisi saya.
20. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu – persatu yang telah membantu kelancaran penyusunan skripsi ini.

Saya menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi menyempurnakan skripsi ini. Akhir kata, saya berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Malang, 4 Agustus 2021

Yustisya Madani

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR i
DAFTAR ISI iii
DAFTAR GAMBAR vii
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR LAMPIRAN xv
RINGKASAN xvii
SUMMARY xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Identifikasi Masalah 2
1.3. Rumusan Masalah 2
1.4. Batasan Masalah 3
1.5. Tujuan 3
1.6. Manfaat 3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1. Beton 5
2.1.1. Semen 5
2.1.2. Agregat Kasar 6
2.1.3. Agregat Halus 7
2.1.4. Air 7
2.2. Kegagalan pada Beton (Intrusi Air pada Beton) 8
2.3. *Non-Destructive Test* (NDT) 8
2.4. Pengujian Kuat Tekan dengan *Hammer Test* 9
2.5. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) 10
2.5.1. Sistem Kerja Alat 10
2.5.2. Metode Pengujian 12
2.6. Gelombang Mekanik 13
2.7. Perambatan Gelombang 16
2.8. Hubungan Intrusi Air dengan Cepat Rambat Gelombang 17
2.8.1. Prinsip Analisis Bentuk Gelombang (*Waveform*) 18
2.9. Penelitian Terdahulu 20
BAB III METODE PENELITIAN 23

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian 23
3.2. Peralatan dan Bahan Penelitian 23
3.2.1. Peralatan Penelitian 23
3.2.2. Bahan Penelitian 24
3.3. Variabel Penelitian 24
3.4. Analisa Bahan 24
3.4.1. Semen 24
3.4.2. Agregat Kasar 25
3.4.3. Agregat Halus 25
3.4.4. Air 25
3.5. Tahapan Penelitian 25
3.6. Rancangan Penelitian 27
3.7. Prosedur Penelitian 30
3.7.1. Pengujian Bahan Dasar 30
3.7.2. Pengujian *Fresh Concrete* 30
3.7.3. Pembuatan Benda Uji 30
3.7.4. Perawatan Benda Uji 31
3.7.5. Pengujian Kuat Tekan 31
3.7.6. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) 33
3.8. Metode Analisis 37
3.8.1. Pengumpulan Data 37
3.8.2. Pengolahan Data 37
3.9. Hipotesis 39
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 41
4.1. Pembuatan Benda Uji 41
4.1.1. Perencanaan Campuran (*Mix Design*) Benda Uji 41
4.1.2. Proses Pembuatan Benda Uji 42
4.1.3. Proses Perawatan Benda Uji (*Curing*) 43
4.2. Pengujian Kuat Tekan Menggunakan *Compressive Test* 44
4.3. Pengujian Kuat Tekan Menggunakan *Hammer Test* 46
4.4. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) 47
4.4.1. Balok Normal 48
4.4.1.1. Metode Langsung (*Direct Method*) 48
4.4.1.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) 50

4.4.1.3. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung 51
4.4.2. Balok Lubang Arah Transversal 53
4.4.2.1. Metode Langsung (*Direct Method*) 53
4.4.2.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Lubang 57
4.4.2.3. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Beton 61
4.4.2.4. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung 65
4.4.3. Balok Lubang Arah Longitudinal 68
4.4.3.1. Metode Langsung (*Direct Method*) 68
4.4.3.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Lubang 72
4.4.3.3. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Beton 76
4.4.3.4. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung 80
4.5. Hubungan antara Intrusi Air pada Beton dengan Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik 84
4.6. Analisis Waktu Transmisi dan Amplitudo Gelombang 87
4.6.1. Balok Normal 88
4.6.2. Balok dengan Lubang Arah Transversal 90
4.6.2.1. Metode Langsung (*Direct Method*) 90
4.6.2.2. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Lubang 92
4.6.2.3. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton 94
4.6.3. Balok dengan Lubang Arah Longitudinal 95
4.6.3.1. Metode Langsung (*Direct Method*) 96
4.6.3.2. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Lubang 98
4.6.3.3. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton 100
BAB V PENUTUP 103
5.1. Kesimpulan 103
5.2. Saran 105
DAFTAR PUSTAKA 107
LAMPIRAN 109

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prinsip Kerja dan Bagian – bagian Alat Uji *Hammer* 9
Gambar 2.2 Diagram Skematik dari Instrument UPV 11
Gambar 2.3 Metode Pengujian pada Tes UPV 13
Gambar 2.4 Pergerakan Partikel pada Gelombang Primer (*P-wave*) 14
Gambar 2.5 Pergerakan Partikel pada Gelombang Sekunder (*S-wave*) 15
Gambar 2.6 Pergerakan Partikel pada Gelombang Permukaan: *Love Wave* dan Rayleigh Wave 15
Gambar 2.7 Perambatan Gelombang pada Alat Pembaca Gelombang 16
Gambar 2.8 Bentuk Gelombang dari Beton Acuan 18
Gambar 2.9 Perbandingan Parameter Bentuk Gelombang Beton yang Diuji dengan Beton Acuan. (1) Beton dengan kualitas baik dan kekuatan tinggi, (2) Beton dengan jumlah pasir yang tinggi dan kerikil yang rendah, (3) Beton dengan jumlah kerikil tinggi dan pasir rendah, (4) Beton dengan retak permukaan atau pemberian *couplant* yang buruk. 19
Gambar 2.10 Perbandingan Parameter Bentuk Gelombang Beton yang Diuji dengan Beton Acuan. (5) Pengujian melalui tulangan beton, (6) Beton dengan retak, *honeycomb*, atau rongga. 20
Gambar 3.1 Flowchart Penelitian 26
Gambar 3.2 Dimensi Benda Uji Balok dengan Lubang Transversal 28
Gambar 3.3 Dimensi Benda Uji Balok dengan Lubang Longitudinal 28
Gambar 3.4 Detail Perletakan Pipa Arah Longitudinal. (a) Pipa berdiameter 2 inch, (b) Pipa berdiameter 3 inch, (c) Pipa berdiameter 4 inch. 28
Gambar 3.5 Detail Perletakan Pipa Arah Transversal. (a) Pipa berdiameter 2 inch, (b) Pipa berdiameter 3 inch, (c) Pipa berdiameter 4 inch. 29
Gambar 3.6 Dimensi Benda Uji Silinder 29
Gambar 3.7 Compression Test Machine 32
Gambar 3.8 Rebound Schmidt Hammer 33
Gambar 3.9 Pengujian UPV dengan Metode *Indirect* dengan *transmitter* tepat pada lubang. (a) Balok Lubang Transversal Diameter 2 inch, (b) Balok Lubang Transversal Diameter 3 inch, (c) Balok Lubang Transversal Diameter 4 inch, (d) Balok Lubang Arah Longitudinal. 34
Gambar 3.10 Pengujian UPV dengan Metode *Indirect* dengan *transmitter* tidak tepat pada lubang. (a) Balok Lubang Transversal Diameter 2 inch, (b) Balok Lubang Transversal

Diameter 3 inch, (c) Balok Lubang Transversal Diameter 4 inch, (d) Balok Lubang Arah Longitudinal. 34
Gambar 3.11 Pengujian UPV dengan Metode *Direct* 35
Gambar 3.12 Penggambaran 3D Metode *Indirect* pada Balok dengan Lubang Longitudinal 35
Gambar 3.13 Penggambaran 3D Metode *Indirect* pada Balok dengan Lubang Transversal 35
Gambar 3.14 Penggambaran 3D Metode *Direct* 36
Gambar 3.15 Proses Kalibrasi pada Alat Pengujian UPV 36
Gambar 3.16 Tampilan Data Hasil Pengujian UPV menggunakan *Software* PL-Link 37
Gambar 3.17 Grafik Hubungan Cepat Rambat dan Kuat Tekan Beton 39
Gambar 4.1 Penyusunan Pipa pada Bekisting Balok 42
Gambar 4.2 Pembuatan Benda Uji. (a) Pengujian *slump*, (b) Pemadatan beton menggunakan vibrator 42
Gambar 4.3 Benda Uji. (a) Balok beton normal, (b) Balok dengan lubang arah transversal, (c) Balok dengan lubang arah longitudinal, (d) Silinder. 43
Gambar 4.4 Pengujian Kuat Tekan menggunakan *Compression Test Machine* 44
Gambar 4.5 Pengujian Kuat Tekan menggunakan *Hammer Test* 46
Gambar 4.6 Pengujian UPV. (a) *Direct Method* (metode langsung), (b) *Indirect Method* (metode tidak langsung). 48
Gambar 4.7 Contoh Hasil Cepat Rambat Gelombang pada software PL-Link 48
Gambar 4.8 Contoh Pengujian Metode Langsung pada Balok Normal 49
Gambar 4.9 Diagram Batang Hasil Pengujian Metode Langsung Balok Normal – B 50
Gambar 4.10 Metode Pengujian Metode Tidak Langsung pada Balok Beton Normal 50
Gambar 4.11 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung pada Balok Normal 50
Gambar 4.12 Diagram Batang Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung Balok Normal.. 51
Gambar 4.13 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Normal 52
Gambar 4.14 Contoh Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok lubang tanpa air, (b) Balok lubang berisi air. 53
Gambar 4.15 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung pada Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air 55
Gambar 4.16 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung pada Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air 55

Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal ... 56
Gambar 4.18 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air. 57
Gambar 4.19 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air 59
Gambar 4.20 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air 59
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Transversal 60
Gambar 4.22 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air. 61
Gambar 4.23 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air 63
Gambar 4.24 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air 63
Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Transversal 64
Gambar 4.26 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Tanpa Air 65
Gambar 4.27 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Berisi Air 66
Gambar 4.28 Contoh Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air. 68
Gambar 4.29 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air 70
Gambar 4.30 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air 70
Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Metode Langsung Balok Lubang Arah Longitudinal . 71
Gambar 4.32 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air. 72

Gambar 4.33 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air 74
Gambar 4.34 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air 74
Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Longitudinal 75
Gambar 4.36 Pengujian Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton pada Balok Lubang Arah Longitudinal 76
Gambar 4.37 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Longitudinal 77
Gambar 4.38 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air 78
Gambar 4.39 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air 79
Gambar 4.40 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Longitudinal 79
Gambar 4.41 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air 81
Gambar 4.42 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Berisi Air 82
Gambar 4.43 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Langsung 85
Gambar 4.44 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) 86
Gambar 4.45 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) 86
Gambar 4.46 Contoh Pengambilan Parameter T_0 87
Gambar 4.47 Contoh Pengambilan Parameter T_1 dan A_1 87
Gambar 4.48 Contoh Pengambilan Parameter T_{maks} dan A_{maks} 88
Gambar 4.49 Contoh Pengambilan Parameter T_2 dan A_2 88
Gambar 4.50 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung pada Balok Normal 89
Gambar 4.51 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung pada Balok Normal 89

Gambar 4.52 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal 91
Gambar 4.53 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal 91
Gambar 4.54 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Lubang) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal 93
Gambar 4.55 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Lubang) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal 93
Gambar 4.56 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Beton) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal 95
Gambar 4.57 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Beton) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal 95
Gambar 4.58 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 97
Gambar 4.59 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 97
Gambar 4.60 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 99
Gambar 4.61 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 99
Gambar 4.62 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 101
Gambar 4.63 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal 101

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jenis Gelombang Mekanik Longitudinal berdasarkan Frekuensi 13
Tabel 2.2 Kualifikasi Kualitas Beton berdasarkan Cepat Rambat Gelombang..... 17
Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu..... 21
Tabel 3.1 Rancangan Benda Uji 27
Tabel 3.2 Hasil Perhitungan Kecepatan pada Alat UPV 38
Tabel 3.3 Hasil Perhitungan Waktu Transmisi dan Amplitudo pada Alat UPV 38
Tabel 4.1 Kebutuhan Bahan untuk Campuran Benda Uji 41
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Silinder menggunakan *Compressive Test* 45
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton menggunakan *Hammer Test* 47
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Balok Normal dengan Metode Langsung 49
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Balok Normal dengan Metode Tidak Langsung 51
Tabel 4.6 Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Normal 52
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal 54
Tabel 4.8 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal..... 56
Tabel 4.9 Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal..... 58
Tabel 4.10 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Transversal 60
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal 62
Tabel 4.12 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Transversal 64
Tabel 4.13 Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Tanpa Air 65
Tabel 4.14 Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Berisi Air 66
Tabel 4.15 Hasil Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal.... 69
Tabel 4.16 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Longitudinal..... 71

Tabel 4.17 Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal 73
Tabel 4.18 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Longitudinal 75
Tabel 4.19 Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Longitudinal 77
Tabel 4.20 Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Longitudinal 80
Tabel 4.21 Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air 80
Tabel 4.22 Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Berisi Air 82
Tabel 4.23 Data Parameter *Waveform* pada Balok Normal 88
Tabel 4.24 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal 90
Tabel 4.25 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal 92
Tabel 4.26 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal 94
Tabel 4.27 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal 96
Tabel 4.28 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal 98
Tabel 4.29 Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal 100

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Pembuatan Benda Uji 109
Lampiran 2. Pengujian Kuat Tekan 111
Lampiran 3. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) 112
Lampiran 4. *Waveform* Pengujian pada Balok Normal 114
Lampiran 5. *Waveform* Pengujian pada Balok Lubang Arah Transversal 116
Lampiran 6. *Waveform* pada Balok Lubang Arah Longitudinal 128

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

repository.ub.ac.id

RINGKASAN

Yustisya Madani, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Pengaruh Intrusi Air pada Beton Normal terhadap Cepat Rambat Gelombang dengan Metode Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*, Dosen Pembimbing : Ir. Cristin Remayanti Nainggolan, ST., MT. dan Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU.

Pada era Revolusi Industri 4.0 ini, teknologi telah berkembang pesat seiring dengan berjalannya waktu, contohnya yaitu semakin beragamnya material dan teknologi untuk mempermudah suatu pekerjaan konstruksi. Beton merupakan material utama yang sering digunakan dalam dunia konstruksi yang berfungsi menahan dan mendistribusikan beban dalam suatu struktur bangunan. Bendungan beton merupakan salah satu contoh bangunan air yang termasuk ke dalam *heavy construction* dimana menyimpan potensi bahaya yang besar dan memiliki resiko kerusakan fisik serta kegagalan fungsi. Potensi ini dapat terjadi apabila terdapat rembesan yang memasuki bendungan yang akan berdampak besar dan bahaya dan dapat menyebabkan keruntuhan pada tubuh bendungan. Mengantisipasi adanya kegagalan tersebut, diperlukannya suatu pengujian untuk melihat kualitas struktur beton dalam masa kontruksi maupun pasca konstruksi. Pengujian dapat dilakukan dengan cara *non destructive test* atau pengujian tanpa merusak, salah satu alat yang digunakan adalah *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV).

Penelitian ini menggunakan alat PUNDIT PL-200 yang berfungsi dalam proses analisis kerapatan beton berdasarkan parameter yang dihasilkan alat UPV. Parameter yang diambil dalam penelitian ini adalah cepat rambat gelombang. Dalam penelitian ini digunakan benda uji balok dengan panjang 70 cm, lebar 20 cm, dan tinggi 20 cm. Benda uji dibedakan menjadi 3 variasi, yaitu balok normal, balok dengan lubang arah transversal, dan balok dengan lubang arah longitudinal. Pengujian dilakukan dengan metode langsung (*direct*) dan metode tidak langsung (*indirect*) dengan 2 kondisi pengujian, yaitu kondisi beton berlubang tanpa air dan berisi air (intrusi air).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan adanya intrusi air pada beton memberikan pengaruh pada cepat rambat gelombang yang dihasilkan, yaitu kecepatan rambatnya akan semakin lebih cepat jika dibandingkan dengan pengujian kondisi lubang tanpa air. Pada metode langsung terjadi kenaikan nilai cepat rambat sekitar 2,5% - 4,5%, sedangkan pada kenaikan pada metode tidak langsung sebesar 8% - 17%. Hubungan antar hasil pengujian masing – masing metode menunjukkan bahwa nilai cepat rambat gelombang metode tidak langsung pada kondisi balok dengan intrusi air memiliki nilai yang lebih besar daripada hasil pengujian metode langsung. Dalam penelitian ini dapat disimpulkan bahwa intrusi air pada beton normal dapat mempengaruhi pembacaan dari alat UPV. Hal ini dibuktikan dengan perbedaan hasil cepat rambat dan *waveform* antara balok beton normal, balok berlubang, dan balok berlubang dengan intrusi air.

Kata kunci : Beton Berlubang, Intrusi Air, Cepat Rambat, *Ultrasonic Pulse Velocity*.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id

SUMMARY

Yustisya Madani, *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, July 2021, Effect of Water Intrusion on Plain Concrete to Pulse Velocity Measurement using Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Method, Academic Supervisor*: Ir. Cristin Remayanti Nainggolan, ST., MT. *and* Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU.

In this era of The Fourth Industrial Revolution, technology has developed rapidly over time, for example, the increasing variety of materials and technology to simplify a construction work. Concrete is the main material that is often used in the construction which functions to hold and distribute loads in a building structure. Concrete dam is an example of a water structure that is included in heavy construction which has a large potential for danger and has the risk of physical damage and malfunction. This potential can occur if there is seepage that enters the dam which will have a large and dangerous impact and can cause collapse of the dam body. Anticipating these failures, a test is needed to see the quality of the concrete structure during construction and post construction. Testing can be done using a non destructive test, which one of the tools that can be used is Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).

This research uses PUNDIT PL-200 which functions in the process of analyzing the density of concrete based on the parameters generated by the UPV devices. The parameter taken in this study is pulse velocity. This research uses a beam specimen with a length of 70 cm, a width of 20 cm and a height of 20 cm. The test specimens were divided into 3 variations, namely normal beams, beams with transverse holes, and beams with longitudinal holes. The test was carried out using the direct method and the indirect method with 2 test conditions, namely the condition of hollow concrete without water and filled with water (water intrusion).

The results showed that the presence of water intrusion in the concrete had an effect on the velocity of the waves produced, namely the velocity would be faster when compared to testing the condition of the hole without water. In the direct method, there is an increase in the value of the pulse velocity of about 2.5% - 4.5%, while the increase in the indirect method is about 8% - 17%. The relationship between the test results of each method shows that the value of pulse velocity of the indirect method in beam conditions with water intrusion has a greater value than the results of the direct method. From this research, it can be concluded that water intrusion in plain concrete can affect the readings of the UPV devices. This is evidenced by the difference in the results of pulse velocity and waveform between plain concrete beams, hollow beams, and hollow beams with water intrusion.

Key words : Perforated Concrete, Water Intrusion, Pulse Velocity, Ultrasonic Pulse Velocity

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada era Revolusi Industri 4.0 ini, teknologi telah berkembang pesat seiring dengan berjalannya waktu, contohnya yaitu semakin beragamnya material dan teknologi untuk mempermudah suatu pekerjaan konstruksi. Beton sering digunakan dalam dunia konstruksi sebagai material utama yang memiliki kegunaan untuk menahan dan mendistribusikan beban yang ada pada suatu struktur bangunan. Beton didapatkan melalui pencampuran semen, air, agregat halus, dan agregat kasar, yang telah ditentukan perbandingannya melalui *mix design*. Penambahan bahan lain sebagai bahan aditif beton juga mulai digunakan dalam bidang ini. Pemilihan beton sebagai bahan konstruksi ini dikarenakan keunggulannya dalam menahan kuat tekan yang lebih tinggi dibanding bahan lainnya. Dalam proses pembangunan, terdapat banyak faktor yang mempengaruhi hasil akhirnya. Oleh karena itu diperlukan suatu pengujian yang dapat menunjukkan apakah bangunan dapat menahan keseluruhan beban yang diterima atau masih diperlukan perkuatan pada struktur bangunan tersebut.

Bendungan beton merupakan salah satu contoh bangunan air yang termasuk ke dalam *heavy construction* dimana menyimpan potensi bahaya yang besar dan memiliki resiko kerusakan fisik serta kegagalan fungsi. Potensi ini dapat terjadi apabila terdapat rembesan yang memasuki bendungan. Rembesan terjadi dikarenakan adanya perbedaan tinggi muka air yang mana jika aliran yang disebabkannya meresap masuk ke dalam tanah di sekitar bangunan. Rembesan yang terjadi pada bendungan ini berdampak besar dan bahaya yang dapat mengakibatkan keruntuhan pada tubuh bendungan. Pengawasan dan pemeliharaan bangunan bendungan pasca konstruksi sangat diperlukan terutama untuk menghindari terjadinya rembesan yang terlalu beresiko.

Metode pengujian beton pada dunia konstruksi terdapat dua jenis, yaitu *destructive test* dan *non-destructive test*. Metode *non-destructive test* atau NDT merupakan metode pengujian suatu objek tanpa merusak bagian ataupun struktur dari objek tersebut. Metode ini digunakan untuk penyelidikan pada saat masa konstruksi dan pasca konstruksi. *Non-destructive test* dijadikan komponen pengendali jaminan mutu.

Contoh pengujian *non destructive test* adalah pengujian menggunakan cepat rambat gelombang ultrasonik atau *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). Peralatan yang digunakan pada pengujian UPV disebut dengan PUNDIT atau *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester*. Gelombang ultrasonik yang dihasilkan oleh transduser akan melewati sepanjang material dan kembali diterima oleh transduser yang lain (*receiver*). Hasil dari cepat rambat gelombang tersebut akan terbaca di PUNDIT dan dari data tersebut ditunjukkan bagaimana homogenitas, kerapatan, serta ada tidaknya rongga pada beton. Dari penelitian – penelitian sebelumnya, belum dibahas secara jelas mengenai pengaruh intrusi air pada beton normal terhadap hasil pembacaan UPV.

1.2. Identifikasi Masalah

Adanya suatu kegagalan yang terjadi pada produk beton harus segera diatasi untuk mengurangi adanya kegagalan struktur. Salah satu permasalahan yang dapat terjadi yaitu intrusi air pada beton. Hal ini dapat menyebabkan adanya pengurangan sifat material beton itu sendiri. Pada bangunan air seperti bendungan, rembesan yang memasuki beton haruslah dicegah untuk menghindari terjadinya kegagalan yang fatal.

Salah satu metode pengujian beton *non-destructive test* adalah *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). Hasil pengujian ini diperoleh data cepat rambat gelombang pada beton. Cepat rambat gelombang tersebut perlu diinterpretasikan guna menentukan apakah di dalam beton tersebut terdapat intrusi air. Sehingga diperlukan penelitian mengenai kecepatan rambat gelombang yang dihasilkan dari alat UPV untuk dapat mengidentifikasikan adanya intrusi air pada beton normal.

1.3. Rumusan Masalah

Berikut rincian rumusan masalah yang akan ditinjau dalam penelitian ini, yaitu :

1. Bagaimana pengaruh beton berlubang terhadap cepat rambat gelombang yang dihasilkan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)?
2. Bagaimana pengaruh intrusi air pada beton terhadap cepat rambat gelombang yang dihasilkan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)?
3. Bagaimana perbandingan hasil cepat rambat gelombang antara metode langsung dan metode tidak langsung pada pengujian menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)?

1.4. Batasan Masalah

1. Penelitian dilakukan pada beton tak bertulang, dimana dimensi balok berukuran 20 x 20 x 70 cm.
2. Penelitian ini menggunakan proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,4
3. Parameter kerapatan yang dianalisis pada penelitian ini adalah berdasarkan pengujian UPV.
4. Metode pengujian UPV yang digunakan untuk penelitian ini adalah metode langsung (*direct*) dan metode tidak langsung (*indirect*).
5. Variasi yang digunakan adalah variasi ukuran lubang pada beton yang dibuat menggunakan Pipa PVC dengan 3 ukuran diameter yang berbeda serta variasi pada arah perletakan lubang secara transversal dan longitudinal.
6. Sampel balok yang diuji berjumlah 1 buah setiap variasinya. Jumlah sampel ini diambil dengan mempertimbangkan kondisi pandemi Covid-19.
7. Laju aliran air pada beton tidak diperhitungkan.
8. Pengujian UPV dilakukan saat beton berumur 28 hari.

1.5. Tujuan

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini, antara lain :

1. Untuk menganalisis pengaruh beton berlubang terhadap pembacaan hasil cepat rambat gelombang pada alat pengujian UPV.
2. Untuk menganalisis pengaruh intrusi air pada beton terhadap pembacaan hasil cepat rambat gelombang pada alat pengujian UPV.
3. Untuk membandingkan hasil cepat rambat gelombang antara pengujian dengan metode langsung dan metode tidak langsung.

1.6. Manfaat

Terdapat beberapa manfaat yang tertuang dalam penelitian ini, antara lain :

1. Bagi Penulis :
   - Dapat mengetahui pengaruh intrusi air pada beton normal dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV).
2. Bagi Pembaca :
   - Dapat dijadikan acuan para pembaca dalam mengetahui gambaran hasil pembacaan alat UPV terhadap pengaruh intrusi air pada beton normal.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton

Beton merupakan bahan konstruksi komposit yang didapatkan dari hasil pencampuran antara agregat kasar dan halus dengan pasta semen. Melalui reaksi kimia yang disebut dengan hidrasi, pasta semen yang melapisi permukaan agregat akan mengalami pengerasan dan membentuk material seperti batu. Kualitas dari pasta sangat ditentukan oleh karakteristik beton yang akan dibuat, namun sebaliknya, kekuatan dari pasta bergantung pada nilai rasio air dan semen (FAS). Beton dengan kualitas yang tinggi dihasilkan dari menurunkan angka FAS sebisa mungkin tanpa mengurangi nilai *workability* dari beton segar.

Komposisi material penyusun beton harus direncanakan sebaik mungkin dengan menggunakan panduan *mix design* berdasarkan SNI 03-2834-2000. Perencanaan ini bertujuan untuk memudahkan pencapaian mutu beton yang direncanakan. Umumnya, campuran beton terdiri dari 15% semen, 60-75% agregat, dan 15-20% air.

Beton digunakan sebagai bahan konstruksi karena kekuatannya dalam menahan tekan. Umur beton sangat mempengaruhi nilai kuat tekannya. Umur beton dihitung setelah pengecoran selesai dilakukan. Beton akan mendapatkan kekuatan optimumnya ketika sudah mencapai umur 28 hari (Dipohusodo, 1996). Namun dibalik kelebihannya dalam menahan tekan, beton sangat lemah terhadap tarik. Kuat tarik beton biasanya hanya sekitar 9% hingga 15% dari kuat tekannya.

2.1.1. Semen

Semen merupakan suatu campuran senyawa kimia yang bersifat hidrolis yang dapat merekatkan material atau agregat dan membentuk sebuah material baru yang keras seperti batu. Semen ini dikembangkan dari hasil industri paduan bahan baku berupa batu kapur atau gamping sebagai bahan utamanya dan lempung atau tanah liat dengan hasil akhir berupa padatan yang berbentuk bubuk (*bulk*). Reaksi semen dengan air akan berlangsung secara *irreversible*, yang artinya kondisi ini tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula.

Dalam buku Bahan Bangunan (Hendro Suseno, 2010), semen merupakan bahan yang memiliki beragam kegunaan pada bangunan, baik dari segi struktural maupun non struktural seperti :

a. Sebagai bahan baku utama beton.
b. Sebagai bahan baku produk semen berserat.
c. Sebagai bahan perbaikan tanah.
d. Sebagai bahan penambal retakan maupun keropos.
e. Sebagai bahan baku produk mortar seperti plester, plamir, acian, pipa, *paving block*, atap dan lain-lain.

Penelitian ini menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) dimana jenis semen yang sama penggunaannya dengan Semen Portland Tipe I, yaitu cocok untuk berbagai jenis aplikasi beton yang mana tidak membutuhkan syarat khusus. Semen jenis ini memiliki panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan, sehingga memudahkan pengerjaannya dan dapat memperoleh permukaan beton yang lebih rapat dan halus.

2.1.2. Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 1970-2008, agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu yang mempunyai ukuran butir antara 5 mm (Ayakan No.4) sampai 40 mm (Ayakan No. 1½ inch). Ketentuan agregat kasar yang dapat digunakan untuk beton dengan mutu tinggi adalah sebagai berikut :

i. Dilarang mengandung lumpur melebihi 1% dalam berat keringnya. Jika melampauinya harus dicuci kembali.
ii. Butiran agregat kasar yang pipih hanya boleh digunakan jika secara keseluruhannya tidak melebihi 20% dari berat agregat.
iii. Ukiran butir terbesar dari agregat tidak boleh melebihi dari 1/5 jarak terkecil antara bidang – bidang samping cetakan, 1/3 dari tebal pelat beton atau 3/4 dari jarak bersih antar tulangan.
iv. Terdiri dari butiran keras dan tidak berpori serta mempunyai indeks kekerasan ≤ 5% bila diujikan menggunakan Los Angeles atau bejana Rudeloff.
v. Dilarang mengandung zat seperti zat relatif alkali karena dapat merusak beton.
vi. Angka kehalusan (*Fineness Modulus*) dari agregat kasar adalah diantara 7,49 – 9,55 (ASTM C 35 – 37)

2.1.3. Agregat Halus

Agregat halus, berdasarkan SNI 02-6820-2002, adalah agregat dengan besar butir maksimum 4,75 mm. Agregat halus merupakan bahan pengisi diantara agregat kasar sehingga menghasilkan ikatan yang lebih kuat. Dalam pembuatan beton, gradasi agregat dapat menjadi sangat krusial. Apabila beton mempunyai penyebaran butiran agregat yang homogen, maka volume pori akan tinggi. Berbeda dengan disribusi butiran agregat yang heterogen, maka volume pori akan rendah. Sehingga tingkat kemampatannya akan tinggi dan dibutuhkan lebih sedikit bahan pengait. Menurut SK SNI T-15-1990-03, berdasarkan gradasinya, kekasaran dapat diklasifikasikan menjadi 4 kelompok, antara lain :

- Zona I : Pasir Kasar
- Zona II : Pasir Agak Kasar
- Zona III : Pasir Agak Halus
- Zone IV : Pasir Halus

Adapun persyaratan agregat halus secara umum adalah sebagai berikut :

i. Lumpur harus kurang dari 5% terhadap berat keringnya. Agregat halus harus dicuci kembali jika kadar lumpurnya melampaui 5%.

ii. Gradasi agregat harus memenuhi syarat :

1. Sisa diatas ayakan 4 mm, berjumlah minimum 2% berat.
2. Sisa diatas ayakan 1 mm, berjumlah minimum 10% berat.
3. Sisa diatas ayakan 0,25 mm, berjumlah sekitar antara 80% hingga 95% berat.

iii. Angka kehalusan (*Fineness Modulus*) untuk agregat halus berkisar antara 2,3 – 3,1 (ASTM C 35 – 37)

2.1.4. Air

Secara ilmiah, air dapat diartikan sebagai senyawa kimia yang terdiri dari dua unsur, yaitu unsur hidrogen yang berkaitan dengan unsur oksigen. Di dalam proses pembuatan beton, air merupakan salah satu bagian penting yaitu sebagai campuran semen agar terjadi reaksi kimiawi yang mengakibatkan adanya pengerasan antara semen dan bahan penyusun lainnya. Jumlah air dalam campuran beton perlu diperhitungkan, penambahan jumlah air yang tidak sesuai dengan FAS yang telah ditentukan dapat mengurangi kekuatan beton setelah mengeras. Untuk jumlah air yang dibutuhkan dalam proses hidrasi umumnya hanya sekitar 35% dari berat semennya.

Berdasarkan SNI 03-2847-2002 mengenai Tata Cara Perhitungan Standar Beton untuk Bangunan Gedung, dalam pembuatan beton, air setidaknya terpenuhi syaratnya sebagai air minum tawar, tidak berbau, serta tidak mengandung zat – zat yang dapat merusak beton, contohnya garam, minyak, asam, ataupun bahan organik lainnya.

2.2. Kegagalan pada Beton (Intrusi Air pada Beton)

Salah satu kelemahan beton sebagai bahan konstruksi adalah beton tidak mudah untuk dapat kedap air secara sempurna, sehingga ada kemungkinan untuk dapat dimasuki oleh air. Penggunaan beton untuk struktur bangunan yang langsung berhubungan dengan air, seperti contohnya plat beton untuk atap, bangunan air, dan dinding *basement*, harus kedap air atau beton dengan permeabilitas yang kecil.

Dikutip dari Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), intrusi merupakan perembesan air ke dalam lapisan tanah. Jika dikondisikan pada beton, maka intrusi bermakna sebagai perembesan air ke dalam beton. Intrusi terjadi karena adanya pori – pori dalam beton sehingga menyebabkan air dapat masuk ke dalamnya. Penggunaan beton sebagai bahan konstruksi di daerah agresif, aliran air ini dapat menimbulkan adanya serangan sulfat dan klorida pada baja tulangan. Terjadinya korosi pada baja tulangan berdampak buruk karena mengurangi kualitas dari kekuatan beton tersebut.

2.3. *Non-Destructive Test* (NDT)

Pengujian kualitas maupun pengecekan kualitas dari sebuah beton dapat dilakukan menggunakan *destructive test* (DT) maupun *non destructive test* (NDT). *Destructive test* merupakan pengujian beton dengan cara merusak benda uji dan diambil sampelnya untuk kemudian diujikan pada laboratorium. Pada kondisi lapangan, pengujian ini dinilai kurang praktis, oleh karena itu digunakan pengujian *non destructive test* dimana dapat dilakukan secara langsung di lapangan (*insitu*).

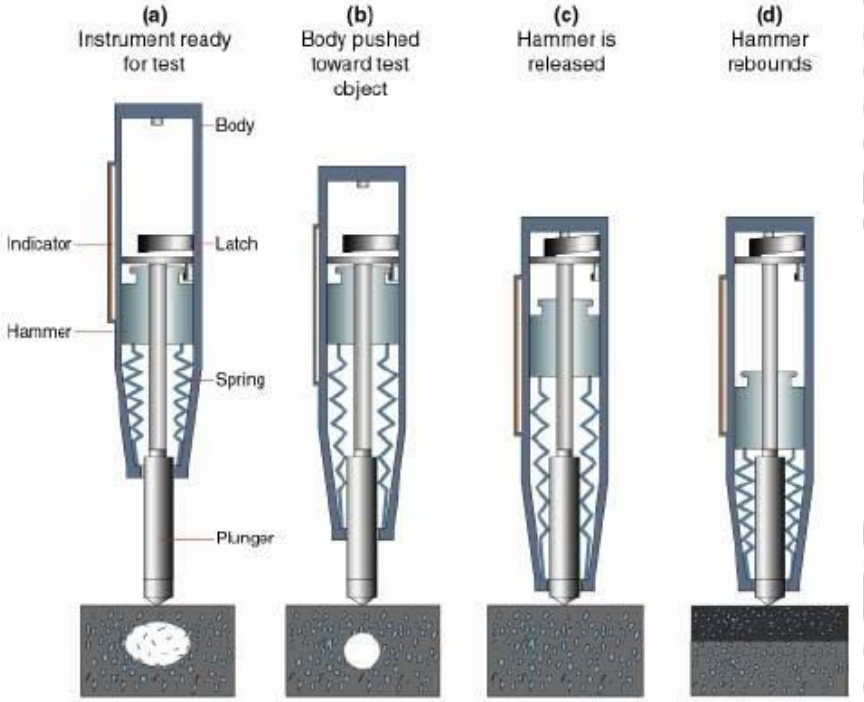
Non destructive test bermakna bahwa pengujian beton dilakukan tanpa merusak benda uji tersebut. Pengujian ini dinilai lebih efisien karena dapat mengurangi adanya kegagalan struktur yang dapat terjadi karena dilakukannya *destructive test*. Biasanya *non destructive test* digunakan untuk memeriksa bangunan eksisting yang akan dievaluasi. Dalam pelaksanaan pengujiannya, NDT memiliki berbagai macam metode. Untuk memeriksa kualitas beton struktural, metode yang sering digunakan adalah *Hammer Test* dan *Ultrasonic Testing* (UPV dan UPE).

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

2.4. Pengujian Kuat Tekan dengan *Hammer Test*

Salah satu metode dalam *non destructive test* adalah *hammer test*. Pada dasarnya, metode ini digunakan untuk meneliti homogenitas beton. Alat yang digunakan untuk *hammer test* adalah *Rebound Schmidt Hammer*, yang mana ditemukan oleh seorang ahli dari Swiss yang bernama Ernst Schmidt.

Prinsip kerja dari alat ini yaitu dengan memberikan beban *impact* (tumbukan) pada permukaan beton menggunakan suatu massa yang diaktifkan melalui energi dengan besaran tertentu. Timbulnya tumbukan antara massa dengan permukaan beton, maka massa tersebut akan terpantulkan kembali. Indikasi kekerasan permukaan beton dapat diukur melalui jarak pantulan massa. Kekerasan beton ini mengindikasikan nilai kuat tekannya.



Gambar 2.1 Prinsip Kerja dan Bagian – bagian Alat Uji *Hammer*

Sumber: V.M Malhotra dan N.J Carino (2004)

Prosedur penggunaan alat dan prinsip kerja yang relatif mudah, menjadikan alat ini sering digunakan dalam mengidentifikasi mutu beton, utamanya pada struktur bangunan yang sudah jadi (tanpa merusak). Pada proses pengujian yang cepat, alat ini pun secara praktis dan efisien menguji seluruh struktur bangunan atau bagian struktur tertentu untuk dapat member indikasi keseragaman kualitas beton.

2.5. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) adalah metode *non destructive test* berfungsi dalam mengidentifikasi kerapatan beton berdasarkan hubungan cepat rambat gelombang yang merambat pada medium beton dengan kuat tekan beton tersebut (*Internasional Atomic Energy Agency*, Vienna, 2002). Pengujian ini mencakup penentuan dari cepat rambat gelombang ultrasonik longitudinal yang melewati media beton (SNI ASTM C597 : 2012).

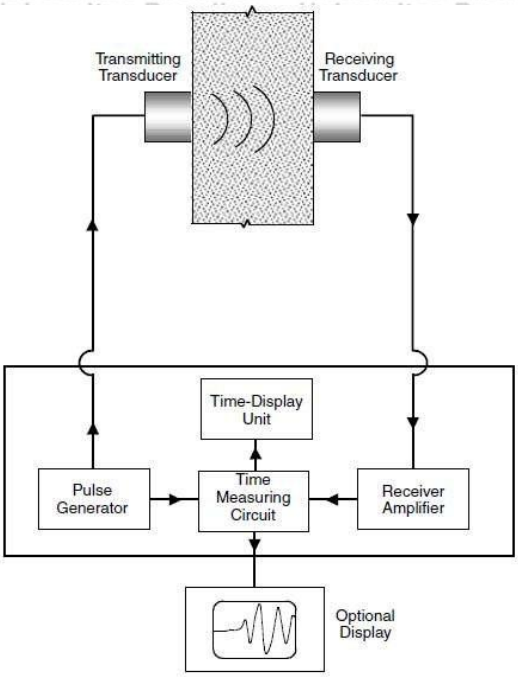
Metode pengujian UPV sudah sering berhasil dalam evaluasi kualitas beton selama lebih dari 60 tahun. Pengujian ini sering digunakan sebagai pendeteksi keretakan internal atau cacat lainnya termasuk perubahan dari beton, contohnya penurunan kualitas beton yang diakibatkan terlalu agresifnya suatu lingkungan kimia (V.M. Malhotra dan N.J. Carino, 2004).

2.5.1. Sistem Kerja Alat

Alat *Ultrasonic Pulse Velocity* terdiri dari dua *transducer* yang mana masing-masingnya mempunyai fungsi sebagai *transmitter* dan *receiver*. Gelombang yang dihasilkan akan tersalurkan melalui *transmitter* yang selanjutnya merambat ke dalam beton dan gelombang tersebut akan diterima *receiver*. Kecepatan waktu tempuh gelombang ultrasonic merupakan hasil pembacaan dari pengujian ini yang diukur oleh alat *Portable Unit Non Destructive Indicator Tester* (PUNDIT) dalam satuan *micro second*.

Alat pengujian UPV terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

a) Sepasang *transducer*, yaitu *transmitting transducer* dimana berfungsi mengolah gelombang listrik yang diubah menjadi gelombang ultrasonic dan selanjutnya merambatkannya, dan *receiving transducer* berfungsi sebagai penerima gelombang tersebut.
b) Generator gelombang (*pulse generator*), dimana berisikan sirkuit penghasil gelombang listrik yang akan dikirimkan oleh *transmitter*.
c) Pengukur waktu (*time measuring circuit*) memiliki fungsi untuk mencatat waktu transmisi gelombang yang melewati beton.
d) Osiloskop merupakan layar tambahan sebagai pemantau perilaku osilasi atau vibrasi gelombang yang diterima oleh *receiver*.



Gambar 2.2 Diagram Skematik dari Instrument UPV

Sumber: V.M Malhotra dan N.J Carino (2004)

Prinsip kerja pada alat *Ultrasonic Pulse Velocity* adalah dengan memberikan getaran gelombang ultrasonik longitudinal melalui transduser elektro akustik, yang merambat melalui *gel couplant* atau cairan pasta. Kegunaan dari *gel couplant* adalah untuk mencegah adanya rongga antara permukaan beton yang diuji dengan *transducer* supaya sinyal dari gelombang merambat dengan baik dan sempurna. Ketika perambatan gelombang melewati medium berbeda, yaitu permukaan beton dan *gel couplant*, sehingga akan menimbulkan pantulan gelombang yang merambat berupa gelombang longitudinal (*P-wave*) dan geser (*S-wave*). Arah rambatan gelombang longitudinal adalah sejajar lintasan sedangkan arah rambatan gelombang geser adalah tegak lurus lintasan. Gelombang longitudinal adalah gelombang pertama yang mencapai *receiver*. Kemudian *transducer* akan mengubah gelombang ini menjadi sinyal gelombang elektro akustik agar terdeteksi *receiver*, sehingga dapat terukur waktu tempuh gelombangnya (*transmission time*).

Waktu tempuh atau T yang diperlukan dalam perambatan gelombang pada lintasan beton sepanjang L dapat diketahui, dan cepat rambat gelombang dapat pula diketahui menggunakan Persamaan (2-1) (Lawson, 2011)

$$v = L / T \quad \text{.....} \quad (2\text{-}1)$$

Dimana :

v = kecepatan rambat gelombang longitudinal (m/detik atau km/detik)

L = panjang lintasan beton yang dilalui (km atau m)

T = waktu tempuh gelombang longitudinal ultrasonik sepanjang lintasan L (detik)

Hasil perhitungan tersebut juga dapat menginterprestasikan kualitas beton, antara lain :

a) Homogenitas beton
b) Mendeteksi rongga
c) Mendeteksi keretakan
d) Menentukan modulus elastisitas dinamis serta rasio poisson dinamis
e) Mengidentifikasi kuat lentur beton
f) Mengidentifikasi modulus elastisitas beton

2.5.2. Metode Pengujian

Pengukuran cepat rambat gelombang dapat dilakukan dengan 3 metode, antara lain:

a) Metode Langsung (*Direct Method*)

Pengujian dilaksanakan dengan cara meletakkan kedua *transducer* dengan arah berhadapan secara tegak lurus pada dua lapisan benda uji beton yang berseberangan. Panjang lintasan gelombang diukur dari jarak antara 2 sisi beton yang akan diuji. Apabila posisi *transducer* diletakkan benar-benar paralel, maka akan menghasilkan transmisi energi gelombang terbesar diantara lainnya. Oleh karena itu, hasil pengujian UPV menggunakan metode langsung akan memberikan hasil yang baik dan mendekati dengan keadaan aktualnya.

b) Metode Semi Langsung (*Semi-direct Method*)

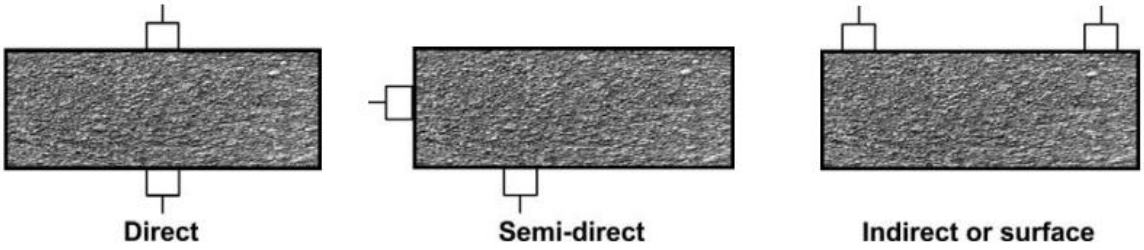
Metode ini dilakukan dengan meletakkan kedua *transducer* saling tegak lurus pada kedua lapisan beton yang berbeda. Jarak miring dari *transmitter* dan *receiver* dapat diperoleh berdasarkan panjang lintasan gelombang ultrasonik. Cepat rambat pada metode ini tidak seakurat jika dibandingkan metode langsung, hanya saja masih dapat dinyatakan baik jika dari *transmitter* dan *receiver* diletakkan tidak terlalu jauh.

c) Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Metode tak langsung lebih sering digunakan saat berada di lapangan. Hal ini dikarenakan keterbatasan lokasi untuk melakukan pengujian, oleh karena itu hanya satu sisi dari beton yang mudah untuk dilakukan pengujian UPV. Metode ini dilakukan dengan meletakkan kedua *transducer* sejajar pada lapisan beton yang sama. Panjang lintasan gelombang ultrasonik dapat diketahui berdasarkan jarak dari *transmitter* dan *receiver*. Hasil yang didapatkan dari pengujian UPV menggunakan

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

metode tidak langsung dapat dikatakan tidak sebaik kedua metode lainnya, karena jauh dari kuat tekan aktual apabila dibandingkan menggunakan metode *Compressive Test*. Jarak harus ditentukan terlebih dahulu jika menggunakan metode ini. Oleh karena itu, faktor pengali dibutuhkan untuk membuat hasil statistik dari metode ini mendekati hasil pengujian *direct method*.



Gambar 2.3 Metode Pengujian pada Tes UPV
Sumber: PROCEQ (2017)

2.6. Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan gelombang yang dalam perambatannya membutuhkan medium untuk menyalurkan energi dalam proses penjalaran sebuah gelombang. Media yang bisa digunakan berupa zat padat, zat cair, maupun gas. Menurut arah getarnya, gelombang mekanik dibagi menjadi dua jenis :

i. Gelombang Longitudinal

Arah getar gelombangnya sejajar arah rambat gelombangnya. Karakteristik gelombang ini adalah adanya rapatan dan regangan pada gelombang. Menurut frekuensinya, gelombang longitudinal dibedakan menjadi gelombang infrasonik, gelombang audiosonik, dan gelombang ultrasonik seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1
Jenis Gelombang Mekanik Longitudinal berdasarkan Frekuensi

Jenis Gelombang	Frekuensi	Keterangan
Infrasonik	< 20 Hz	Didengar jangkrik dan anjing
Audiosonik	20 - 20.000 Hz	Didengar manusia
Ultrasonik	> 20.000 Hz	Didengar kelelawar

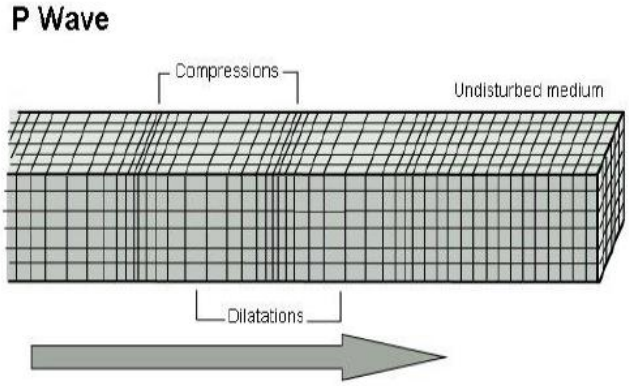
ii. Gelombang Transversal

Arah getar dari gelombang transversal adalah tegak lurus terhaadap arah rambat gelombangnya. Karakteristik pada gelombang ini adalah adanya lembah dan puncak gelombang.

Gelombang mekanik menyalurkan energi pada partikel dalam medium rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Oleh karena itu, akan timbul gelombang mekanis ketika suatu permukaan dari media padat elastik yang besar diberikan beban dinamis maupun getaran. Gelombang mekanik memiliki 3 jenis gelombang, diantaranya adalah :

1) Gelombang Primer (*P-wave*)

Dapat disebut juga dengan *Push-Pull Wave* atau *Compressional Wave*. Perambatan gelombang ini terjadi terlebih dahulu sebelum gelombang sekunder. Pada gelombang ini partikel berosilasi maju dan mundur dari titik ekuilibriumnya. Gelombang primer akan merambat pada kecepatan tertentu yang mana didasarkan pada kekerasan atau kerapatan medium yang dilaluinya. Nilai kecepatan rambat gelombang akan semakin cepat apabila melalui medium yang lebih padat (keras). Semakin cepat rambat gelombangnya, maka amplitudo (simpangan) akan semakin kecil. Gelombang ini dapat merambat melalui segala jenis medium, baik padat, cair, maupun gas. *P-wave* merupakan gelombang longitudinal.

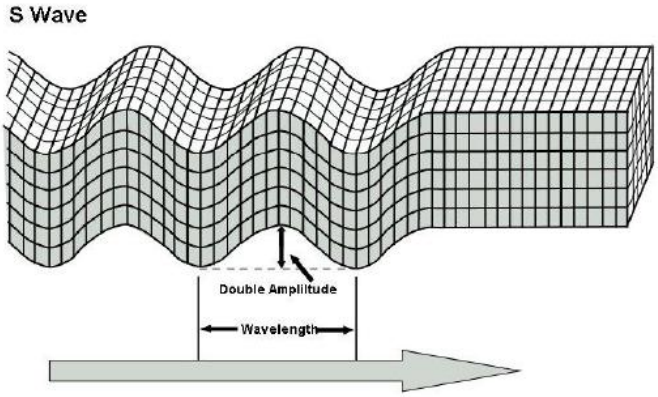


Gambar 2.4 Pergerakan Partikel pada Gelombang Primer (*P-wave*)
Sumber: Bahan Ajar Ari Wibowo (2020)

2) Gelombang Sekunder (*S-wave*)

Merupakan gelombang yang muncul setelah gelombang primer. Termasuk ke dalam jenis gelombang transversal yang mana menimbulkan tegangan geser karena partikelnya berosilasi searah tegak lurus terhadap arah rambatnya. Karena

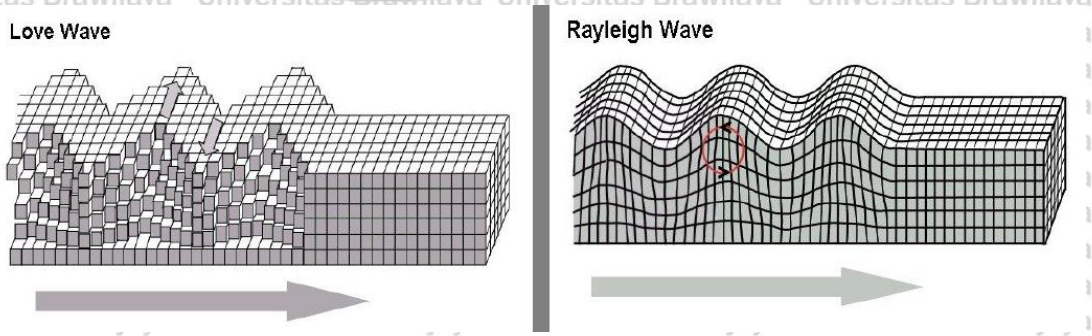
merambat melalui medium ruang, gelombang ini juga diklasifikasikan menjadi gerak horizontal (SH) dan gerak vertikal (SV). Cepat rambat gelombang tidak secepat gelombang primer dan tidak dapat merambat melalui medium zat cair.



Gambar 2.5 Pergerakan Partikel pada Gelombang Sekunder (*S-wave*)
Sumber: Bahan Ajar Ari Wibowo (2020)

3) Gelombang Permukaan (*Surface Wave*)

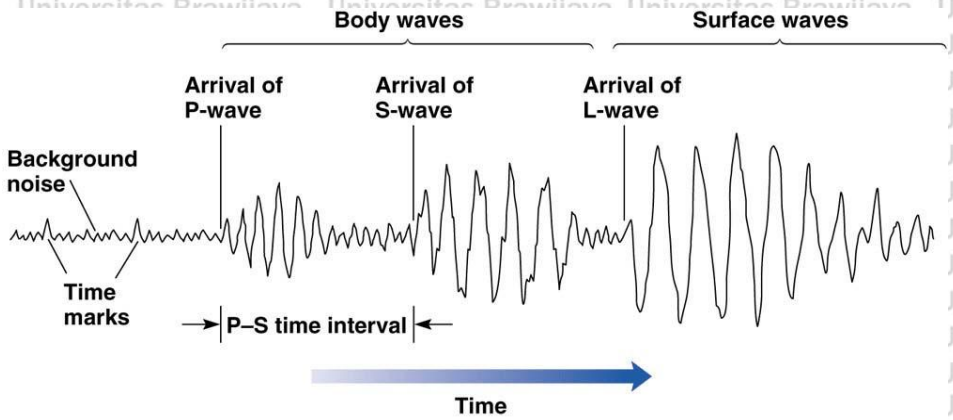
Gelombang yang merambat melewati permukaan medium dan amplitudonya akan semakin kecil jika perambatan gelombangnya semakin menjauhi permukaan. Gelombang permukaan merambat lebih lambat dan frekuensinya lebih rendah dari gelombang badan (*P-wave* dan *S-wave*), tetapi memiliki amplitude yang lebih besar. Gelombang ini lebih banyak terjadi pada gelombang yang memiliki frekuensi di bawah 500 kHz. Terdapat 2 jenis gelombang permukaan, yaitu *Love Wave* dan *Rayleigh Wave*. *Love Wave* adalah gelombang yang merambat hanya pada lapisan permukaan saja yang mana serupa dengan gelombang transversal namun bergerak hanya pada bidang horizontal. Sedangkan *Rayleigh Wave* memiliki gerakan partikel yang *eliptik retrograde*, yaitu bergerak menggulung medium yang dilalui dan terlihat seperti gerakan gelombang air di laut.



Gambar 2.6 Pergerakan Partikel pada Gelombang Permukaan: *Love Wave* dan Rayleigh Wave
Sumber: Bahan Ajar Ari Wibowo (2020)

2.7. Perambatan Gelombang

Setiap jenis gelombang mempunyai karakteristik cepat rambat yang berbeda – beda. Seperti contohnya, pada benda padat, gelombang primer merambat paling cepat sedangkan yang paling lambat adalah gelombang permukaan. Pada beton, menurut ASTM, kecepatan rambat *S-wave* dan *surface wave* berturut – turut adalah 60% dan 55% dari kecepatan rambat *P-wave*.



Gambar 2.7 Perambatan Gelombang pada Alat Pembaca Gelombang

Sumber: Brooks/Cole – Thomson Learning (2001)

Kecepatan rambat gelombang dipengaruhi oleh sifat elastic dan kerapatan dari mediumnya. Pada medium padat elastis yang homogen, cepat rambat *P-wave* adalah sebagai berikut :

$$V = \sqrt{\frac{K\,E}{\rho}} \quad \text{.....} \quad (2\text{-}2)$$

dimana :

V = kecepatan rambat

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

E = modulus elastis dinamis

ρ = kerapatan beton

μ = *poisson ratio* dinamis

Interval pada variasi K bernilai sangat kecil, yaitu sekitar 1,06 hingga 1,20. Namun, variasi pada nilai E dan ρ dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *V*. Biasanya kecepatan rambat gelombang (*V*) beton adalah pada interval 3000 sampai 5000 m/s.

Pada saat bagian yang mempunyai sifat material tidak sama ditemukan oleh perambatan gelombang, sebagian energinya menyebar luas dari lintasan awal gelombang.

Semisal terdepat kerusakan beton seperti adanya keretakan maka akan mengakibatkan beberapa energi gelombang kompresi tersebar dari lintasan awal gelombang tersebut. Besaran tingkat penyebaran dapat semakin bertambah jika besarnya panjang gelombang yang merambat lebih rendah atau sama seperti ukuran bagian penyebarnya, dimana menyebabkan gelombang mengalami redaman yang lebih cepat. Penggunaan frekuensi pada beton tidak boleh lebih dari 500 kHz yang mana terkait dengan panjang gelombang berkisar 10 mm.

Tabel 2.2
Kualifikasi Kualitas Beton berdasarkan Cepat Rambat Gelombang

Cepat Rambat Gelombang Longitudinal		Kualitas
km/detik	ft/ detik	
> 4,5	> 15	Sangat Baik
3,5 - 4,5	12 - 15	Baik
3,0 - 3,5	10 - 12	Diragukan
2,0 - 3,0	7 - 10	Jelek
< 2,0	< 7	Sangat Jelek

(Sumber : *International Atomic Energy Agency*, 2002)

2.8. Hubungan Intrusi Air dengan Cepat Rambat Gelombang

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) *Test* berfungsi utama untuk menguji kualitas beton yang didasarkan pada cepat rambat gelombang berdasarkan kerapatan betonnya. Cepat rambat gelombang terikat dengan sifat elastik dan kerapatan dari mediumnya. Saat gelombang merambat dan menemukan bagian yang bersifat atau memiliki karakteristik yang berbeda, sebagian energinya akan menyebar keluar dari lintasan pertama gelombang. Seperti contohnya, terdapat rongga, keretakan, serta partikel agregat pada beton dapat menyebabkan beberapa energi dari gelombang kompresi menyebar dari lintasan pertama gelombang tersebut. Besaran tingkat penyebaran akan bertambah seiring dengan besarnya panjang gelombang yang merambat lebih rendah atau sama dengan ukuran bagian penyebabnya, yang menyebabkan terjadinya redaman pada gelombang menjadi lebih cepat. Diketahui dari Tabel 2.2 bahwasanya semakin tinggi nilai kecepatan rambat gelombang maka akan semakin baik pula kualitas beton tersebut.

Salah satu contoh kegagalan pada struktur beton adalah adanya keropos pada beton yang dapat menyebabkan air dapat masuk ke dalam beton tersebut. Intrusi air pada beton akan mengurangi kualitas dari beton. Oleh karena itu, adanya partikel air di dalam beton

dapat mempengaruhi kerapatannya. Hal ini dapat diketahui dari adanya perbedaan cepat rambat gelombang yang akan dihasilkan oleh alat pengujian UPV.

Besarnya nilai cepat rambat gelombang ultrasonik yang merambat pada beton yang telah diukur juga dapat dilakukan guna mencari tahu hal lainnya (*International Atomic Energy Agency*, 2002), seperti berikut :

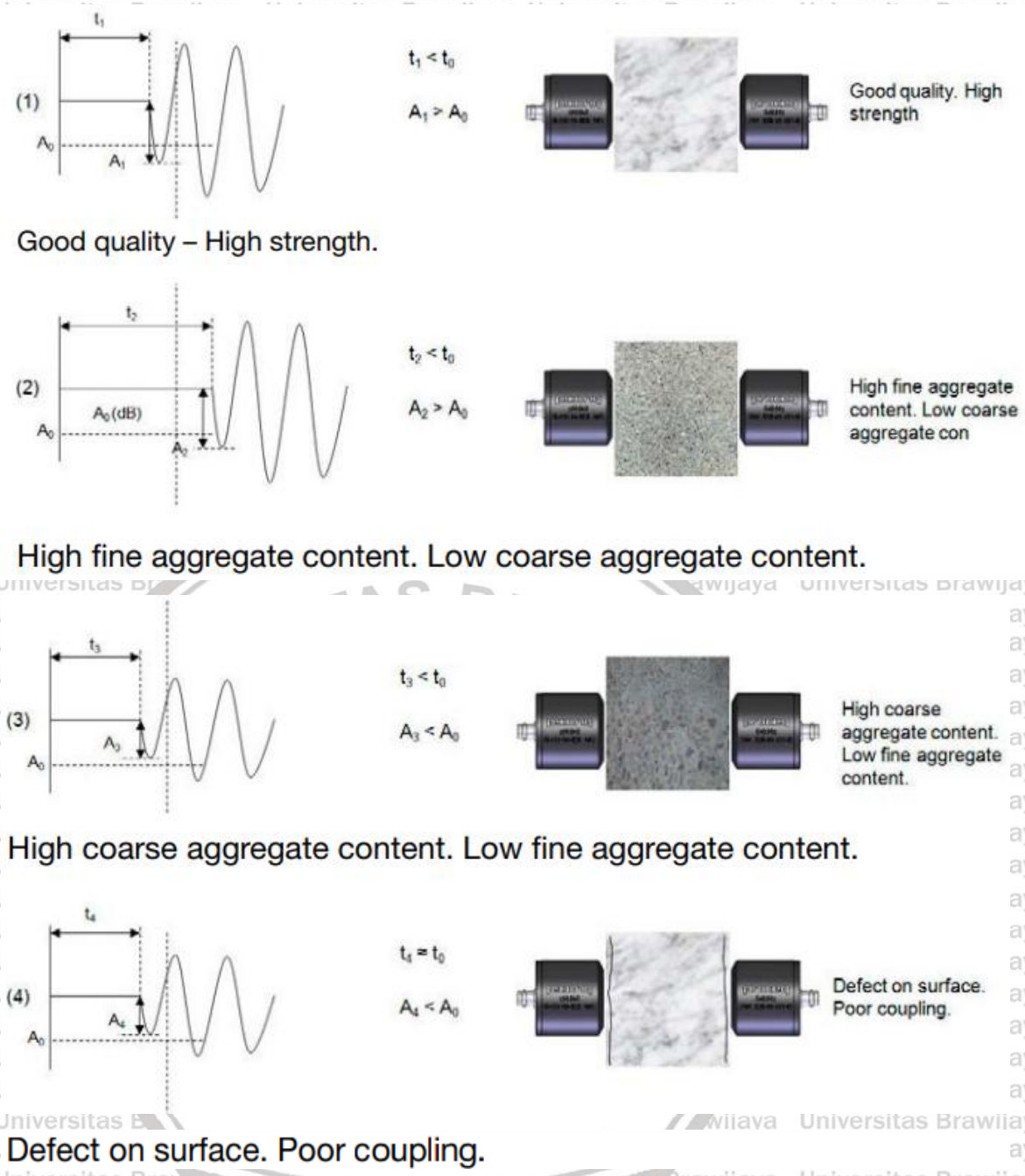
a) Mengukur perubahan yang terjadi seiring waktu ke waktu pada suatu struktur.
b) Mengetahui keseragaman dari beton pada suatu struktur maupun antar struktur.
c) Mengetahui modulus elastisitas dan *poisson ratio* dari beton.
d) Mengidentifikasi mutu beton melalui korelasi cepat rambat gelombang ultrasonik dengan kuat tekan beton.

2.8.1. Prinsip Analisis Bentuk Gelombang (*Waveform*)

Analisis bentuk gelombang dilakukan setelah mendapatkan hasil dari pengujian UPV. Analisis ini menggunakan prinsip yang direkomendasikan oleh *PROCEQ* (2015) yaitu dengan cara membandingkan *waveform* hasil dari pengujian beton eksisting dengan beton yang mutunya yang telah diketahui sebelumnya dan akan dijadikan sebagai acuan. Awal pengujian dilakukan pada beton yang akan menjadi acuan. Parameter yang akan diambil dari pengujian ini adalah waktu transmisi (t_0) dan tingkat penerimaan *receiver* berdasarkan besar amplitudo dari puncak pertama gelombang (A_0).

Setelah itu, pengujian akan dilakukan pada bagian struktur yang ingin diketahui kualitasnya dengan tujuan didapatkan parameter t_0 dan A_0. Parameter tersebut akan dilakukan perbandingan dengan hasil dari pengujian beton acuan, jadi didapatkan kesimpulan terkait kualitas beton eksisting yang diuji. Terdapat beberapa gambaran data hasil pengujian yang mana dapat dilihat pada *Gambar 2.8* hingga *2.10*.

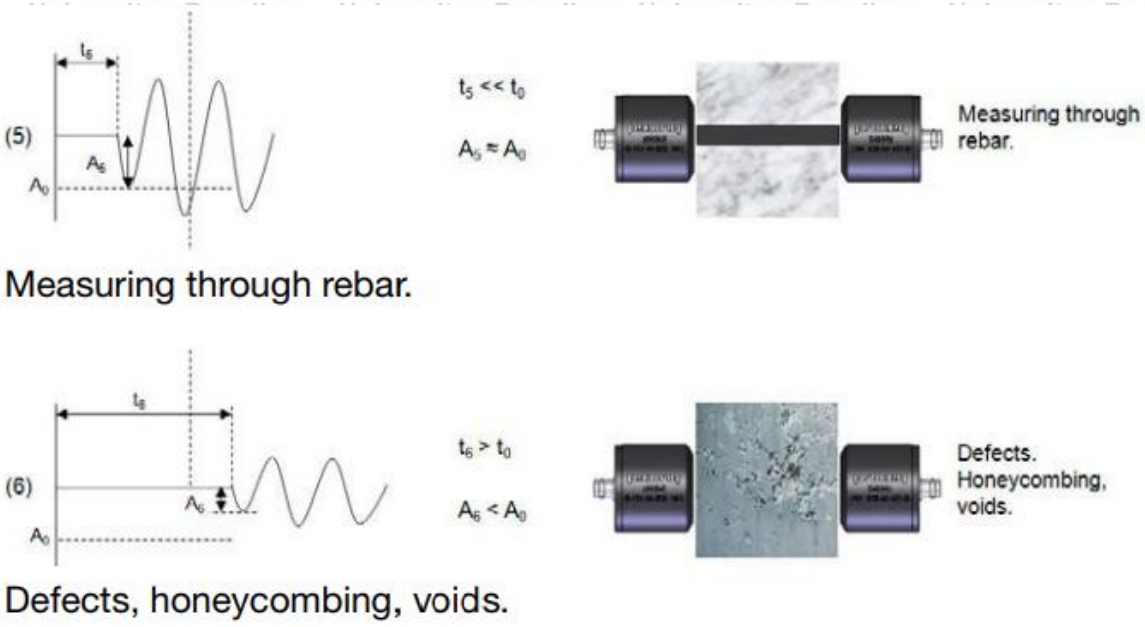
Gambar 2.8 Bentuk Gelombang dari Beton Acuan
Sumber: PROCEQ (2015)



Gambar 2.9 Perbandingan Parameter Bentuk Gelombang Beton yang Diuji dengan Beton Acuan. (1) Beton dengan kualitas baik dan kekuatan tinggi, (2) Beton dengan jumlah pasir yang tinggi dan kerikil yang rendah, (3) Beton dengan jumlah kerikil tinggi dan pasir rendah, (4) Beton dengan retak permukaan atau pemberian *couplant* yang buruk.

(Sumber : PROCEQ, 2015)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 2.10 Perbandingan Parameter Bentuk Gelombang Beton yang Diuji dengan Beton Acuan. (5) Pengujian melalui tulangan beton, (6) Beton dengan retak, *honeycomb*, atau rongga.

(Sumber : PROCEQ, 2015)

Kerapatan dan homogenitas pada beton dapat ditinjau melalui hasil yang didapatkan dari waktu transmisi. Gelombang yang lebih cepat merambat menandakan bahwa gelombang tersebut melalui bagian yang memiliki kerapatan tinggi. Sedangkan sebaliknya, amplitudo akan memperlihatkan tingkat kehilangan energi berdasarkan penerimaan gelombang oleh *receiver* yang dipengaruhi adanya perubahan kerapatan dan ukuran partikel yang dilewati. Beton yang terbentuk dari butiran yang relatif homogen, kehilangan energinya relatif lebih rendah sehingga besar amplitudo akan bernilai lebih tinggi.

2.9. Penelitian Terdahulu

Dalam melakukan penelitian ini, penulis membutuhkan beberapa acuan, salah satunya adalah dari penelitian terdahulu. Mengacu pada hasil penelitian terdahulu, dapat diketahui beberapa kelebihan dan kekurangannya sehingga dapat dijadikan referensi sebagai tambahan bahan kajian pustaka pada penulisan ini. Berikut uraian singkat terkait hasil penelitian terdahulu yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini.

Tabel 2.3
Penelitian Terdahulu

No.	Nama Peneliti, Tahun	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Amike Nur Latifah, Sugeng P. Budio, Ming Narto Wijaya (2020)	Pengaruh Variasi *Coating* terhadap Kerapatan Beton Keropos dengan Menggunakan *Pulse Velocity* pada Alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)	Variasi coating dan tambahan acian dapat mempengaruhi pembacaan scan dari alat UPV yang dibuktikan dengan adanya perbedaan nilai cepat rambat, amplitudo, dan *waveform*.
2	Teguh Dwi Saputra, Sugeng P. Budio, Indra Waluyohadi (2017)	Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beton dengan UPE dan UPV	1) Alat UPE dapat secara akurat dan konsisten dalam melakukan pembacaan rongga di dalam beton. Faktor *human error* dan inhomogenitas dalam beton dapat mempengaruhi hasil pembacaan alat UPE. 2) Alat UPV dapat secara akurat dan konsisten dalam melakukan pembacaan kedalaman retak. Faktor penggambaran retak yang tidak sempurna dan jarak antar retak yang terlalu dekat dapat mempengaruhi hasil pembacaan alat UPV.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat yang digunakan untuk penelitian adalah Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dan dilaksanakan pada bulan Maret sampai dengan Juni 2021.

3.2. Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan di dalam penelitian, antara lain :

a) Satu set ayakan untuk agregat kasar dan halus
b) Piknometer kapasitas 500 ml
c) Kerucut terpancung dan batang penumbuk
d) Timbangan dengan kapasitas ≥ 1 kg
e) Talam
f) Alat Meteran
g) Kerucut Abrahm
h) Tongkat penusuk baja atau *vibrator*
i) *Concrete mixer* (alat pencampur bahan beton)
j) Bekisting silinder 15 × 30 cm
k) Bekisting balok beton ukuran 20 × 20 × 70 cm
l) Pipa PVC diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch
m) Penutup pipa diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch
n) *Compression Test Machine* (CTM)
o) *Rebound Hammer*
p) Satu set alat pengujian UPV

3.2.2. Bahan Penelitian

Bahan yang dibutuhkan untuk penelitian ini, antara lain :

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

3.3. Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan terukur, diantaranya sebagai berikut :

a) Variabel Bebas (*Interpendent Variable*), merupakan variabel dengan faktor-faktornya tidak dibatasi dan ditentukan oleh peneliti dan nantinya akan memberikan dampak pada variabel lainnya. Pada penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah variasi perletakan dan penentuan diameter pipa PVC yang digunakan.
b) Variabel Terikat (*Dependent Variable*), merupakan variabel dimana nilainya bergantung pada variabel bebas. Peneliti menggunakan variabel terikat guna mengetahui ada tidaknya pengaruh yang dihasilkan dari faktor – faktor yang ada pada variabel bebas. Penelitian ini menggunakan hasil dari pengujian UPV yang berupa nilai cepat rambat dan *waveform* sebagai variabel terikatnya.
c) Variabel Kontrol (*Control Variable*), yaitu variabel yang umumnya dijaga nilainya agar tetap konstan dalam penelitian. Variabel kontrol digunakan oleh peneliti untuk melihat dan menganalisis pengaruh dari variabel bebas terhadap variabel terikat. Pada penelitian ini, variabel kontrol yang digunakan adalah balok beton normal dan balok beton dengan lubang tanpa air.

3.4. Analisa Bahan

3.4.1. Semen

Penelitian ini menggunakan semen berjenis *Portland Composite Cement* (PCC) tipe I. Sebelum digunakan untuk penelitian, semen harus dipastikan terlebih dahulu apakah kondisinya cukup baik atau tidak dengan cara melihat secara visual semen tersebut. Dalam penelitian ini, semen yang digunakan adalah semen dengan merk Semen Gresik.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

3.4.2. Agregat Kasar

Pada penelitian ini digunakan material kerikil dari batu pecah, dimana sebelum proses pengecoran diuji terlebih dahulu. Pengujiannya terdiri dari analisis gradasi, pengujian kadar air, pengujian berat jenis dan penyerapan air, serta pengujian berat isi agregat kasar.

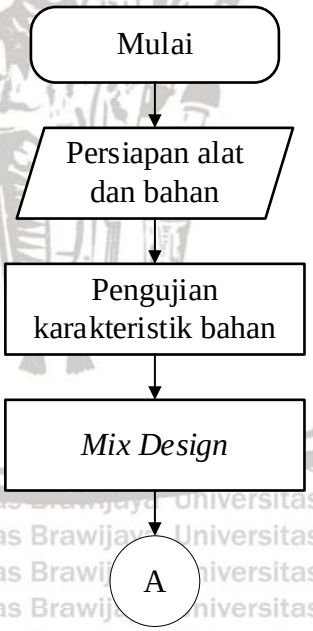
3.4.3. Agregat Halus

Agregat halus berupa pasir alam yang telah diuji terlebih dahulu sebelum proses pengecoran akan digunakan pada penelitian ini. Metode pengujian agregat halus dilakukan persis halnya dengan pengujian pada agregat kasar.

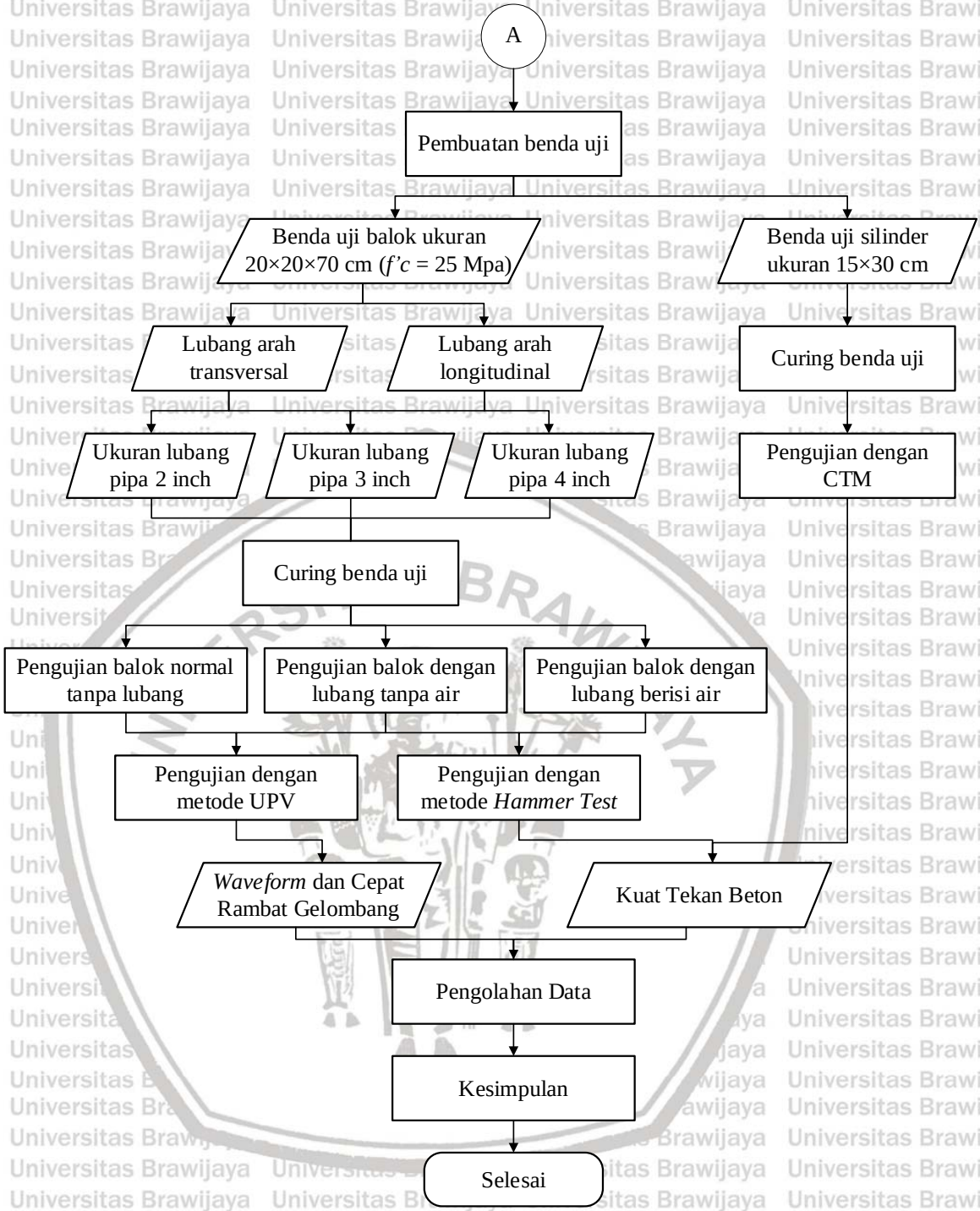
3.4.4. Air

Dalam penelitian ini menggunakan air bersih dari saluran PDAM Kota Malang dimana bersifat tidak berbau dan tidak berwarna.

3.5. Tahapan Penelitian



repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

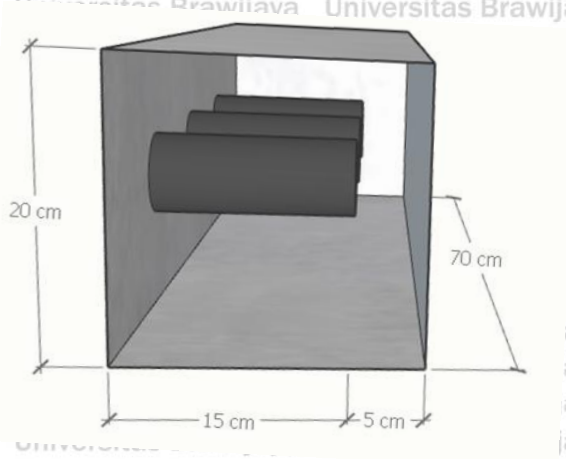
3.6. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini digunakan benda uji balok normal sebagai benda uji utama dan benda uji silinder sebagai pengontrol kuat tekan. Untuk benda uji silinder menggunakan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Benda uji balok normal yang digunakan adalah balok dengan ukuran 20 × 20 × 70 cm. Untuk balok dibagi menjadi 2 jenis, yaitu balok normal dan balok dengan lubang yang dibuat dengan pipa PVC. Diameter pipa yang digunakan memiliki 3 jenis variasi, diantaranya adalah pipa dengan diameter 2 inch, 3 inch, dan 4 inch.

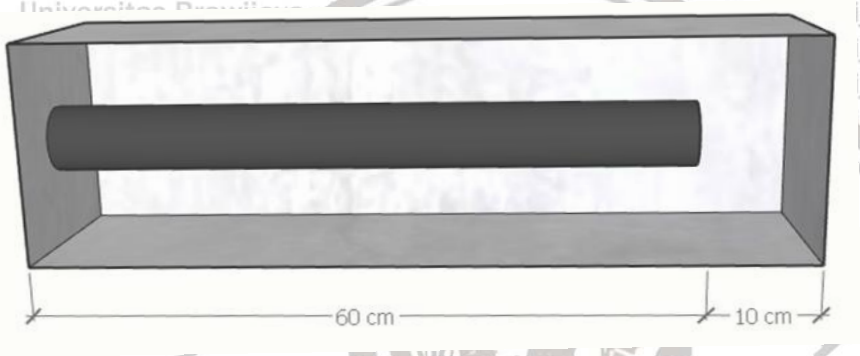
Penempatan pipa pada benda uji balok dilakukan dengan 2 arah, yaitu arah transversal dan longitudinal. Untuk arah transversal, pipa PVC disusun sebanyak 3 pipa pada balok dengan luas penampang 20 × 70 cm. Sedangkan untuk arah longitudinal, hanya digunakan 1 pipa PVC yang diletakkan pada balok dengan luas penampang 20 × 20 cm. Masing – masing variasi dibuat benda uji sebanyak 1 sampel. Sedangkan benda uji silinder minimal sebanyak 3 sampel pada setiap *batch* pengecoran. Keseluruhan benda uji direncanakan dengan proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai FAS sebesar 0,4.

Tabel 3.1
Rancangan Benda Uji

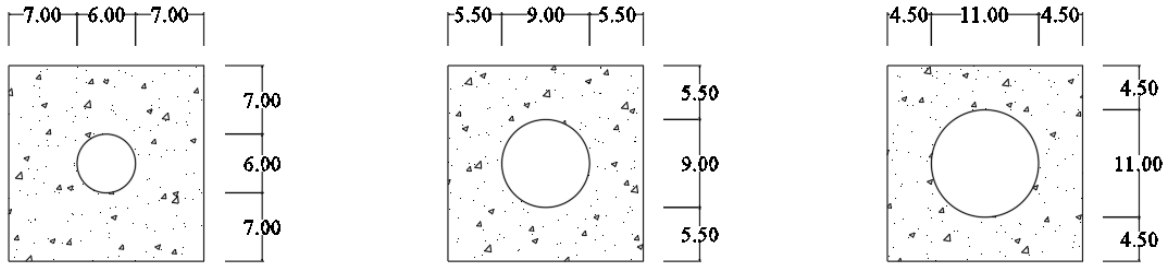
Benda Uji	Jumlah dan Letak Pipa	Jenis Benda Uji	Volume Benda Uji (m3)	Total Benda Uji
Beton Berlubang Diameter 2 inch	3 buah pipa dipasang transversal	Balok	0.0280	1
	1 buah pipa dipasang longitudinal	Balok	0.0280	1
Beton Berlubang Diameter 3 inch	3 buah pipa dipasang transversal	Balok	0.0280	1
	1 buah pipa dipasang longitudinal	Balok	0.0280	1
Beton Berlubang Diameter 4 inch	3 buah pipa dipasang transversal	Balok	0.0280	1
	1 buah pipa dipasang longitudinal	Balok	0.0280	1
Beton Normal (tidak berlubang)	tanpa pipa	Balok	0.0280	1
Beton Normal (tidak berlubang)	tanpa pipa	Silinder	0.0053	3



Gambar 3.2 Dimensi Benda Uji Balok dengan Lubang Transversal

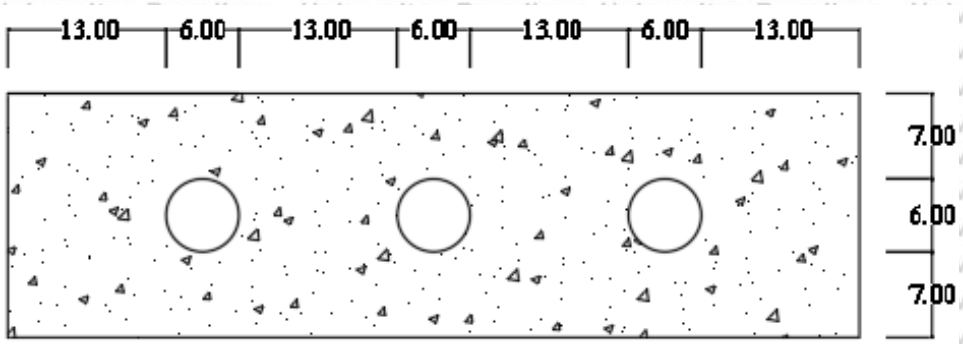


Gambar 3.3 Dimensi Benda Uji Balok dengan Lubang Longitudinal

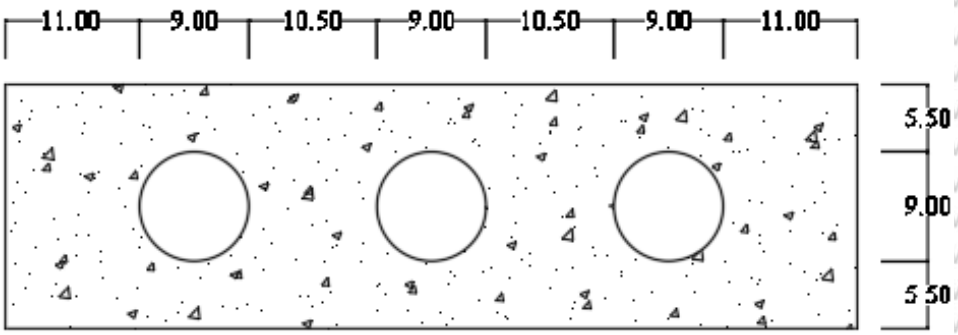


(a) (b) (c)

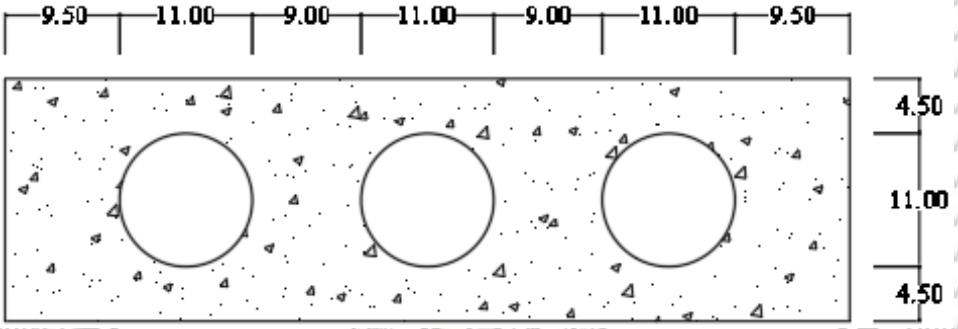
Gambar 3.4 Detail Perletakan Pipa Arah Longitudinal. (a) Pipa berdiameter 2 inch, (b) Pipa berdiameter 3 inch, (c) Pipa berdiameter 4 inch.



(a)

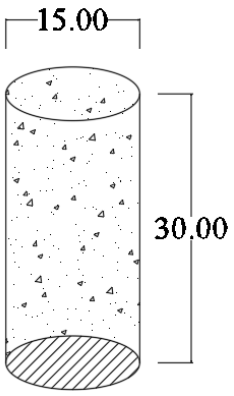


(b)



(c)

Gambar 3.5 Detail Perletakan Pipa Arah Transversal. (a) Pipa berdiameter 2 inch, (b) Pipa berdiameter 3 inch, (c) Pipa berdiameter 4 inch.



Gambar 3.6 Dimensi Benda Uji Silinder

3.7. Prosedur Penelitian

3.7.1. Pengujian Bahan Dasar

Bahan – bahan dasar harus dilakukan pengujian karakteristik untuk menentukan analisis butiran, kadar air, berat isi, serta berat jenis dan penyerapan air. Pengujian ini dilakukan seuai dengan pedoman yang ada pada buku petunjuk praktikum teknologi beton dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Dilakukan pengujian dengan berdasarkan panduan SNI yang tertera pada buku pedoman, diantaranya adalah :

- SNI ASTM C136-2012 untuk metode pengujian analisis saringan agregat halus dan agregat kasar.
- SNI 1971 : 2011 untuk metode pengujian kadar air agregat.
- SNI 1969 dan SNI 1970 tahun 2008 untuk metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar dan agregat halus.
- SNI 03-4804-1998 untuk metode pengujian berat isi agregat.

3.7.2. Pengujian *Fresh Concrete*

Pengujian ini juga disebut dengan uji *slump* yang dilakukan setelah proses pengadukan campuran beton selesai. Uji *slump* dilakukan guna mengetahui tingkat *workability* suatu campuran beton segar. Kelecakan atau *workability* adalah istilah yang menggambarkan seberapa mudahnya *fresh concrete* untuk dapat dikerjakan dan dipadatkan serta tidak terjadi pemisahan atau *segregasi*.

3.7.3. Pembuatan Benda Uji

Prosedur dalam pembuatan benda uji diantaranya adalah :

1) Mempersiapkan material penyusun beton yang mana kuantitasnya sesuai *mix design* yang telah direncanakan.
2) Memasukkan material – material yang telah ditimbang sebelumnya ke dalam *concrete mixer* dan selanjutnya dilakukan pengadukan dalam waktu kurang lebih 15 menit sampai campuran menjadi homogen.
3) Jika proses pengadukan telah selesai, mengambil beberapa campuran beton segar untuk kemudian dilakukan uji *slump*.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4) Menyiapkan bekisting balok beton yang sesuai dengan ukuran yang telah direncanakan dan mengolesi bagian dalamnya dengan oli. Pengolesan oli dilakukan agar beton mudah dilepaskan dari bekisting ketika sudah mengeras.
5) Mengolesi pipa PVC dengan oli agar tidak menempel dengan beton.
6) Menyusun letak pipa PVC yang telah diolesi oli pada bekisting balok sesuai dengan ukuran – ukuran yang telah ditentukan. Dalam menyusun pipa ini, digunakan benang tali kasur untuk menahan agar pipa tidak bergoyang saat beton dituangkan ke dalam bekisting.
7) Menuang campuran beton ke dalam bekisting balok dan melakukan pemadatan menggunakan tongkat penusuk baja atau *vibrator*.
8) Menuang campuran beton ke dalam bekisting silinder dan melakukan pemadatan menggunakan tongkat penusuk baja. Benda uji silinder ini nantinya digunakan sebagai pengontrol kuat tekan beton.
9) Setelah 24 jam dan campuran beton telah mengeras, melepas bekisting dan pipa dari beton untuk kemudian dilakukan *curing*.

3.7.4. Perawatan Benda Uji

Setelah dibiarkan selama 24 jam, benda uji dilepaskan dari bekisting untuk kemudian dilakukan proses perawatan benda uji. Dilakukannya perawatan (*curing*) ini bertujuan agar proses hidrasi senyawa semen tidak mengalami masalah yang dapat menyebabkan beton mudah kehilangan air. Proses *curing* ini dilakukan dengan cara menyelimuti balok dengan karung goni basah yang setiap harinya dibasahi secara terus – menerus menggunakan air. Sedangkan untuk proses *curing* benda uji silinder, perawatan dilaksanakan dengan cara merendam di dalam bak air.

Waktu perawatan benda uji disamakan untuk setiap variasi benda uji balok beton dan disesuaikan dengan waktu pengecorannya. Dalam penelitian ini, perawatan balok beton dilakukan terus menerus selama 28 hari dari waktu pengecoran. Sedangkan perawatan benda uji silinder dilakukan selama 6 hari untuk kemudian diletakkan pada suhu ruangan dan pada hari ke-7 dilakukan pengujian kuat tekan.

3.7.5. Pengujian Kuat Tekan

Dilakukannya pengujian ini berguna untuk mendapatkan nilai kekuatan tekan beton pada benda uji silinder dan mendapatkan nilai mutu beton. Pada penelitian ini, uji kuat

tekan dilakukan saat beton telah berumur 7 hari. Namun dalam pengolahan datanya akan dikonversikan ke dalam 28 hari untuk memperoleh nilai mutu beton.

Langkah – langkah dalam melakukan uji kuat tekan silinder diantaranya adalah :

1) Terlebih dahulu menimbang benda uji silinder untuk dapat mengetahui berat dan kerapatan benda uji yang digunakan sebagai data tambahan.
2) Melakukan proses pelapisan (*caping*) pada permukaan benda uji yang tidak rata dengan menggunakan mortar belerang. Hal ini bertujuan agar tegangan yang diberikan oleh *Compression Test Machine* dapat terdistribusikan secara merata pada permukaan benda uji.

Gambar 3.7 Compression Test Machine

Sumber : Dokumentasi Penelitian (2021)

3) Meletakkan silinder pada mesin CTM dengan sesentris mungkin.
4) Mesin penguji dijalankan dengan penambahan beban yang konstan hingga mencapai nilai maksimum dan benda uji hancur.
5) Mencatat nilai beban ketika benda uji hancur sebagai data beban maksimum yang dapat ditahan oleh beton.

Pengujian kuat tekan juga dilakukan dengan menggunakan metode *non-destructive test*. Pengujian ini dilakukan pada benda uji balok menggunakan alat *Rebound Schmidt Hammer*. *Hammer test* dilakukan dengan cara menekan secara tegak lurus pada elemen struktur yang akan diuji. Guna untuk memperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat, maka dalam sekali pengujian atau satu titik uji dilakukan 10 pukulan pada luasan sekitar 5 × 5 cm. Dalam penelitian ini, diambil sebanyak tiga titik uji dengan permukaan yang halus.

Gambar 3.8 Rebound Schmidt Hammer

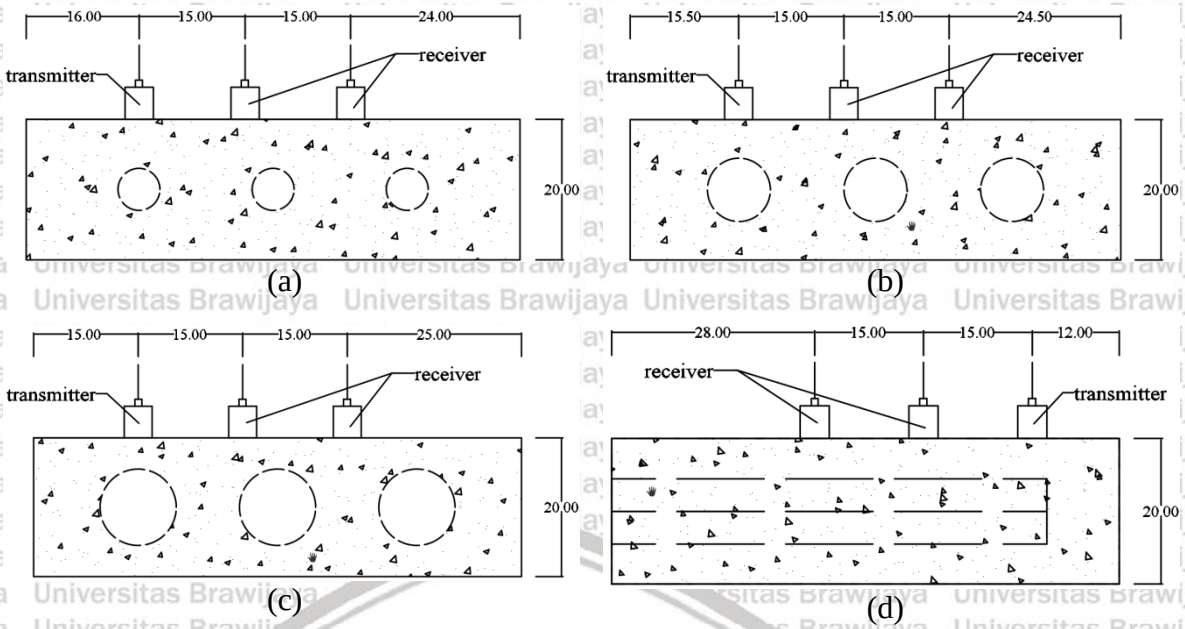
Sumber : PROCEQ (2021)

3.7.6. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

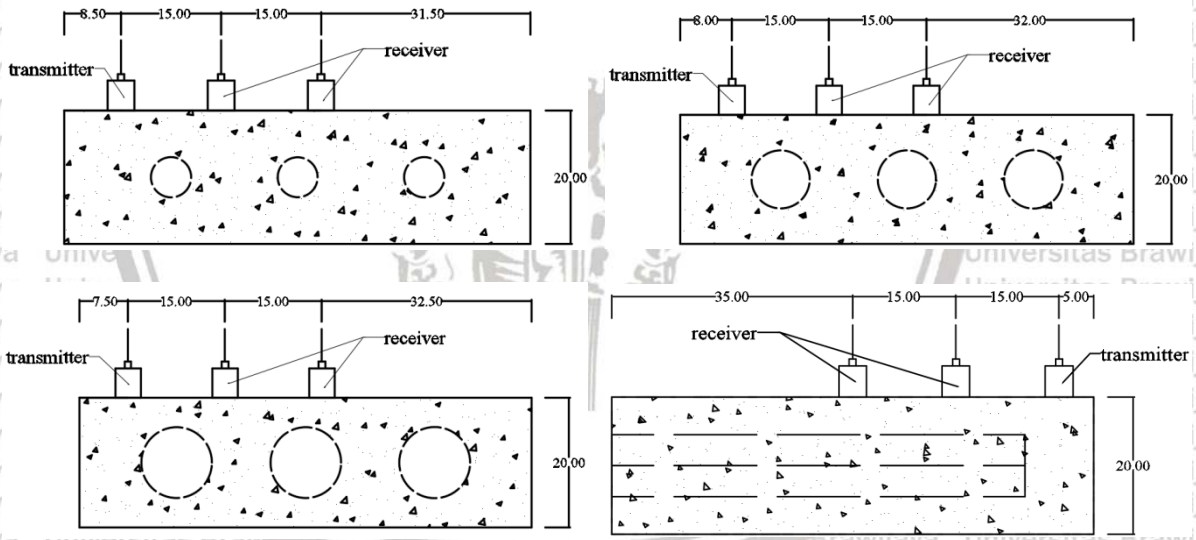
Pada penelitian ini, pengujian UPV dilakukan pada benda uji yang setidaknya berumur minimal 28 hari. Pada pengujian UPV ini digunakan peralatan yang disebut dengan Pundit PL-200. Pengambilan data dilakukan dengan metode *indirect* dan *direct*. *Transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz digunakan pada penelitian ini.

Pada metode *indirect*, *transmitter* dan *receiver* diletakkan pada sisi permukaan balok dengan luas penampang 20 × 70 cm yang sejajar dengan sisi balok berlubang. Pengujian dilakukan dengan 2 variasi perletakkan *transducer*. Untuk yang pertama, *transmitter* akan diletakkan tepat sejajar dengan lubang, sedangkan cara yang kedua adalah *transmitter* diletakkan sejajar pada bagian yang tidak tepat dengan lubang. Kemudian *receiver* akan berpindah sebanyak 2 kali sesuai dengan jarak yang telah ditentukan, yaitu 15 cm dan 30 cm dari *transmitter*. Penggambaran sketsa pengujian dapat dilihat detailnya pada *Gambar 3.9* dan *3.10*.

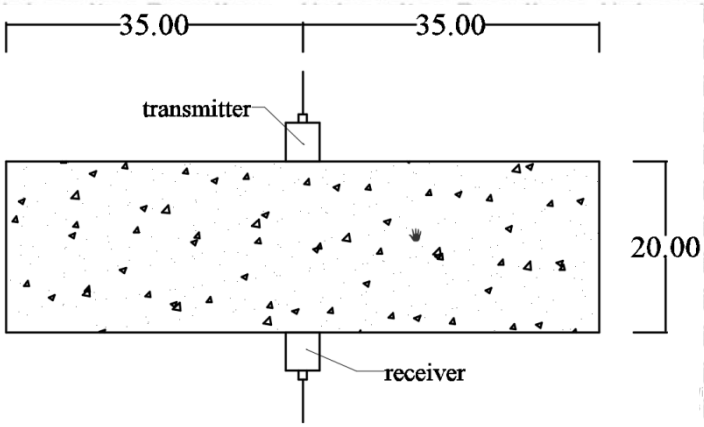
Pengujian dengan metode *direct*, *transmitter* dan *receiver* akan diletakkan berseberangan di titik tengah dari luas penampang balok seperti yang terlihat pada *Gambar 3.11*. Pada metode ini luasan yang digunakan adalah sisi balok yang mengapit lubang yang ada. Dari pengujian UPV ini didapatkan hasil berupa cepat rambat gelombang ultrasonik, amplitudo, waktu transmisi, serta bentuk dari gelombang (*waveform*) yang diterima oleh *receiver transducer*.



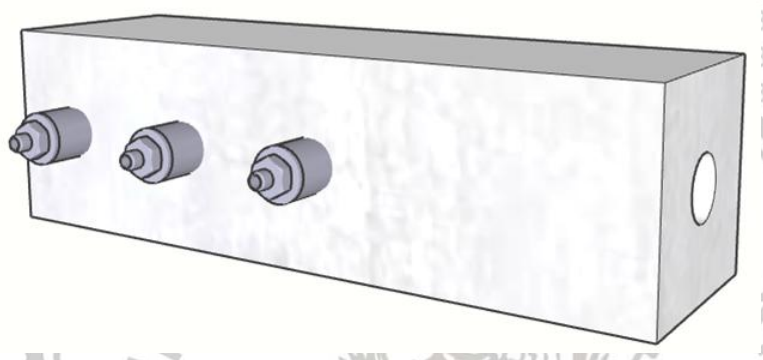
Gambar 3.9 Pengujian UPV dengan Metode *Indirect* dengan *transmitter* tepat pada lubang. (a) Balok Lubang Transversal Diameter 2 inch, (b) Balok Lubang Transversal Diameter 3 inch, (c) Balok Lubang Transversal Diameter 4 inch, (d) Balok Lubang Arah Longitudinal.



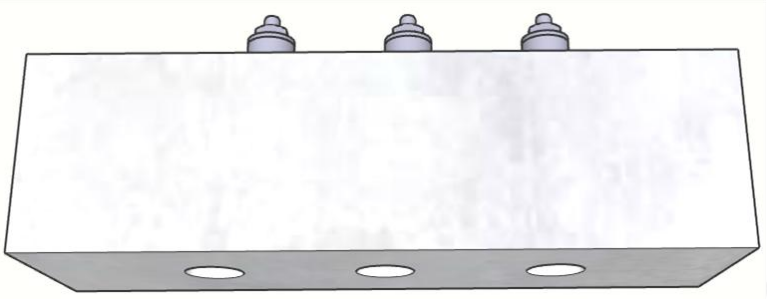
Gambar 3.10 Pengujian UPV dengan Metode *Indirect* dengan *transmitter* tidak tepat pada lubang. (a) Balok Lubang Transversal Diameter 2 inch, (b) Balok Lubang Transversal Diameter 3 inch, (c) Balok Lubang Transversal Diameter 4 inch, (d) Balok Lubang Arah Longitudinal.



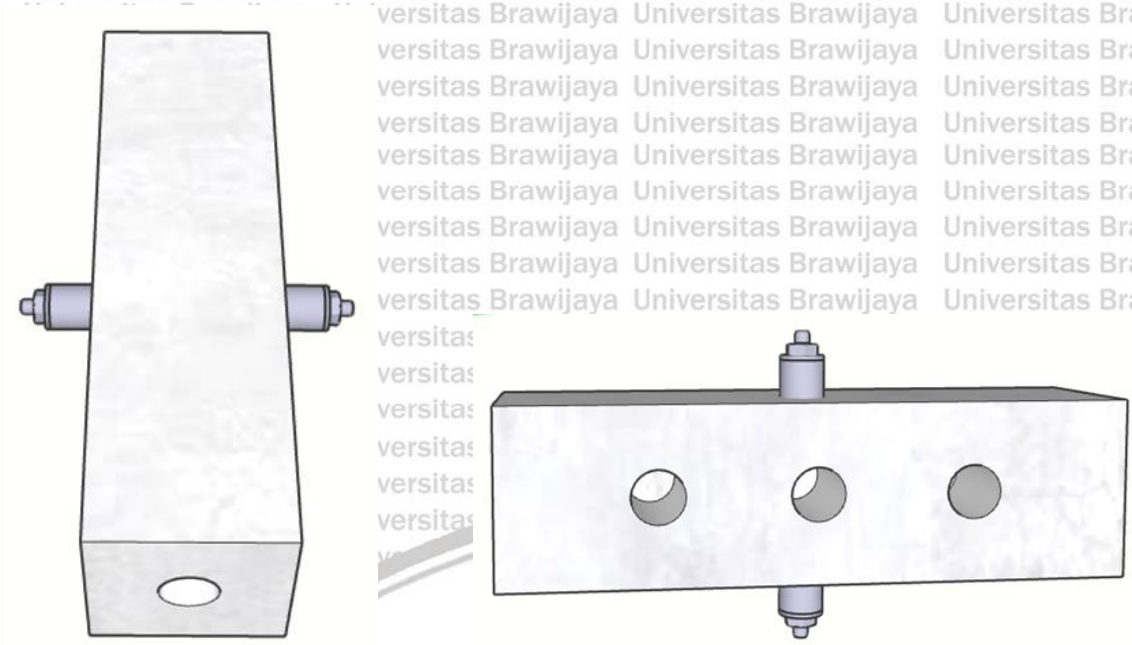
Gambar 3.11 Pengujian UPV dengan Metode *Direct*



Gambar 3.12 Penggambaran 3D Metode *Indirect* pada Balok dengan Lubang Longitudinal



Gambar 3.13 Penggambaran 3D Metode *Indirect* pada Balok dengan Lubang Transversal



Gambar 3.14 Penggambaran 3D Metode *Direct*

Prosedur dalam pengujian UPV terinci sebagai berikut :

1) Meratakan dan membersihkan permukaan beton dimana digunakan sebagai titik pengujian.
2) Memberikan tanda pada titik yang akan diuji.
3) Mengkalibrasi alat pengujian UPV supaya waktu tempuh terbaca sama pada kedua *transducer*, seperti yang ditunjukkan *Gambar 3.15*. Kedua *transducer* diletakkan pada sisi kanan kiri *calibration rod* yang telah disediakan.

Gambar 3.15 Proses Kalibrasi pada Alat Pengujian UPV

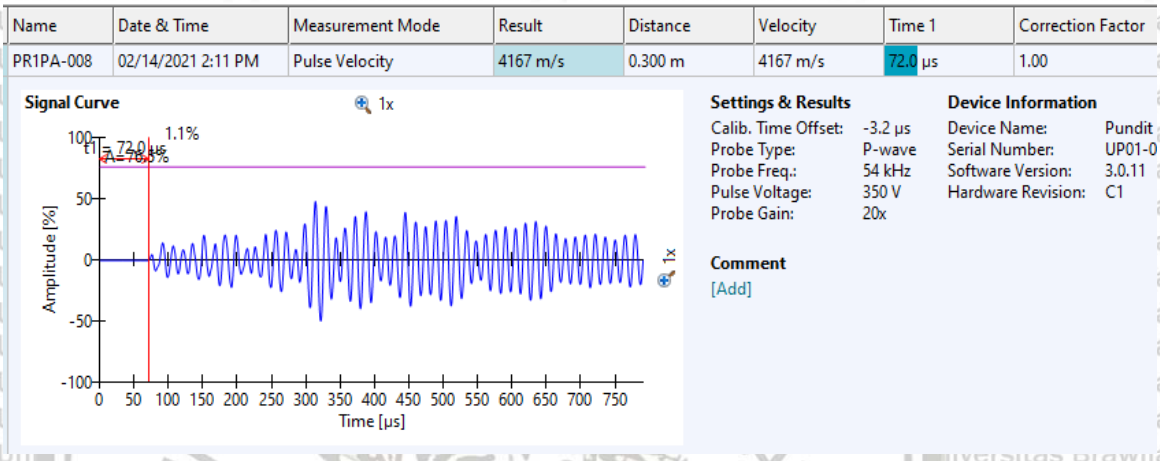
Sumber : PROCEQ (2015)

4) Menentukan jarak *transmitter* dan *receiver* pada layar Pundit PL-200.
5) Memberikan *gel couplant* pada titik yang akan diuji pada permukaan beton.
6) Melakukan pengujian pada titik – titik tersebut.
7) Pengujian UPV telah selesai dan diperoleh suatu *waveform* (bentuk gelombang) ultrasonik beserta waktu transmisi dan cepat rambatnya.

3.8. Metode Analisis

3.8.1. Pengumpulan Data

Setelah seluruh pengujian selesai dilakukan, sebagian data yang sekiranya dibutuhkan dikumpulkan. Pengujian UPV akan menghasilkan data berupa *waveform* yang mana hasil pembacaan gelombang ultrasonik yang diterima oleh *receiver*. Kemudian dilakukan pengolahan data pada *software* PL-Link yang ada di komputer. Parameter – parameter cepat rambat gelombang didapatkan dari setiap *waveform*.



Name	Date & Time	Measurement Mode	Result	Distance	Velocity	Time 1	Correction Factor
PR1PA-008	02/14/2021 2:11 PM	Pulse Velocity	4167 m/s	0.300 m	4167 m/s	72.0 µs	1.00

Gambar 3.16 Tampilan Data Hasil Pengujian UPV menggunakan *Software* PL-Link

3.8.2. Pengolahan Data

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis kerapatan dari beton yang dilihat dari hasil cepat rambat dan waktu transmisi menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity*. Parameter kerapatan beton dalam penelitian ini didasarkan pada ada tidaknya intrusi air pada balok beton. Parameter dan data gelombang yang telah dikumpulkan dari hasil pengujian akan dilakukan penyeleksian data menggunakan standar deviasi yang dapat menyingkirkan data – data menyimpang. Untuk mendapatkan korelasi antara parameter – parameter gelombang dengan intrusi air yang ada pada beton, maka disusun tabel dan grafik dari data – data yang telah diseleksi sebelumnya.

Tabel 3.2
Hasil Perhitungan Kecepatan pada Alat UPV

No.	Metode		Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-Rata (m/s)	Standar Deviasi (m/s)	Kualifikasi Beton
1	Direct					
2						
3						
4	Indirect	15 cm				
5		30 cm				
6		15 cm				
7		30 cm				
8		15 cm				
9		30 cm				

Tabel 3.3
Hasil Perhitungan Waktu Transmisi dan Amplitudo pada Alat UPV

No.	Metode		Waktu (μs)				Amplitudo (%)		
			To	T1	Tmaks	T2	A1	Amaks	A2
1	Direct								
2									
3									
4	Indirect	15 cm							
5		30 cm							
6		15 cm							
7		30 cm							
8		15 cm							
9		30 cm							

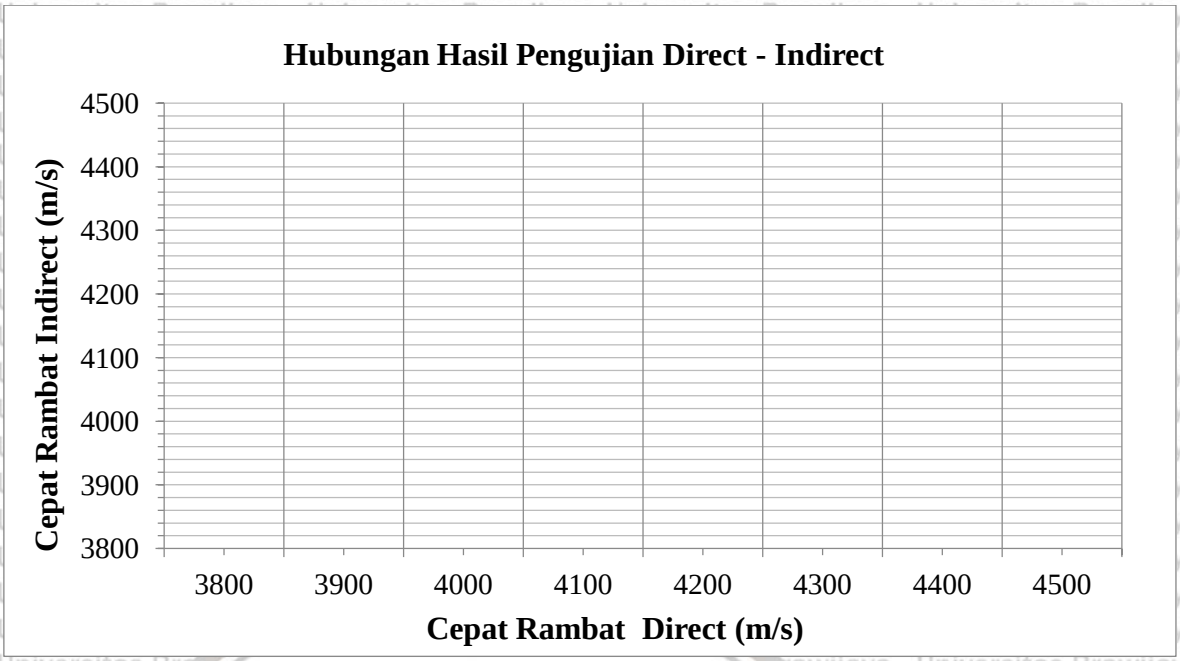
Keterangan :

T_0 : waktu terdeteksinya gelombang pertama

T_1 dan A_1 : waktu dan amplitudo gelombang pertama

T_2 dan A_2 : amplitudo saat pergantian fase gelombang pertama

T_{maks} dan A_{maks} : waktu dan amplitudo gelombang yang mencapai maksimum



Gambar 3.17 Grafik Hubungan Cepat Rambat dan Kuat Tekan Beton

3.9. Hipotesis

Dari tinjauan pustaka yang telah dikumpulkan, diharapkan penelitian ini dapat memberikan hasil sebagai berikut :

1) Terdapat pengaruh intrusi air pada beton terhadap cepat rambat gelombang dan *waveform* yang dihasilkan pada alat pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV).

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB IV
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan Benda Uji

4.1.1. Perencanaan Campuran (*Mix Design*) Benda Uji

Pada penelitian ini digunakan benda uji berupa balok dan silinder. Benda uji silinder hanya digunakan sebagai variabel kontrol kualitas balok beton yang dibuat. Sedangkan untuk benda uji balok terdiri dari 3 jenis, yaitu: 1) Balok beton normal, 2) Balok dengan lubang arah transversal, 3) Balok dengan lubang arah longitudinal. Ketiga benda uji balok ini berdimensi 20 cm × 20 cm × 70 cm sedangkan untuk benda uji silinder berdimensi 15 cm × 30 cm. Perencanaan proporsi campuran beton dilakukan dengan acuan pada SNI-03-2834-2000 mengenai Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Proporsi campuran adukan beton yang digunakan adalah 1 : 1,6 : 2,6 dengan nilai FAS sebesar 0,4. Hasil perhitungan kebutuhan bahan untuk campuran beton dari setiap variasinya tertera pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1
Kebutuhan Material untuk Campuran Benda Uji

Benda Uji	Kebutuhan			
	Semen (kg)	Air (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
Balok Normal	11,48	4,61	18,08	29,53
Balok dengan Lubang Transversal	32,88	13,19	51,79	84,57
Balok dengan Lubang Longitudinal	32,88	13,19	51,79	84,57

Sumber : Hasil Perhitungan

4.1.2. Proses Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan dengan bantuan alat *concrete mixer* yang mana kapasitasnya 0,5 m^3. Bersamaan dengan menyiapkan kebutuhan material, bekisting balok dan cetakan silinder diolesi oli agar nantinya beton tidak lengket dan mudah dilepas. Pada bekisting balok disusun beberapa pipa sesuai dengan desain perencanaan menggunakan paku dan benang kasur seperti pada *Gambar 4.1*.

Gambar 4.1 Penyusunan Pipa pada Bekisting Balok

Setelah kebutuhan seluruh material ditimbang sesuai dengan tabel perencanaan, material dimasukkan ke dalam alat pengaduk beton dan dilihat hingga material tercampur seluruhnya. Kemudian dilakukan uji *slump* guna mengetahui kelecakan campuran beton tersebut. Nilai *slump* pada penelitian ini digunakan interval antara 60 hingga 180 mm. Jika campuran beton telah lolos uji *slump*, selanjutnya campuran beton tersebut akan dimasukkan ke dalam bekisting balok dan cetakan silinder yang telah disiapkan.

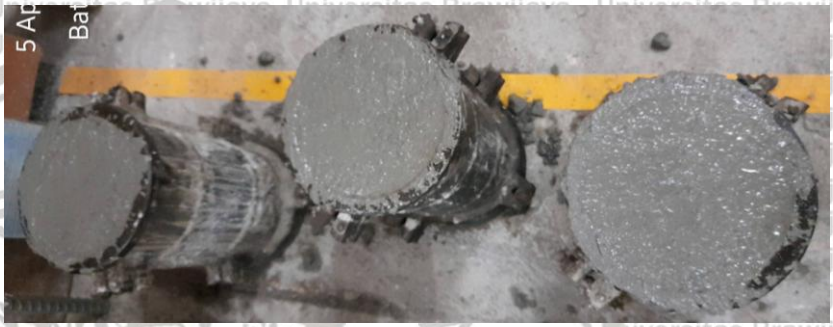
(a) (b)

Gambar 4.2 Pembuatan Benda Uji. (a) Pengujian *slump*, (b) Pemadatan beton menggunakan vibrator

(a)

(b)

(c)



(d)

Gambar 4.3 Benda Uji. (a) Balok beton normal, (b) Balok dengan lubang arah transversal, (c) Balok dengan lubang arah longitudinal, (d) Silinder.

Bekisting benda uji balok dan silinder akan dilepaskan 24 jam setelah pengecoran. Namun untuk benda uji balok dengan pipa, pencabutan pipa akan dilakukan setelah menunggu kurang lebih 4 – 5 jam setelah pengecoran.

4.1.3. Proses Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Curing dilakukan dengan tujuan mencegah terjadinya keretakan awal pada beton yang disebabkan oleh panas hidrasi akibat reaksi kimiawi semen. *Curing* dilakukan setelah pelepasan bekisting beton. Benda uji silinder akan direndam dalam bak air. Proses *curing* benda uji balok dilakukan menggunakan cara menutupi balok dengan karung yang telah dibasahi. Waktu yang dibutuhkan untuk proses *curing* adalah selama 7 hari untuk beton normal.

4.2. Pengujian Kuat Tekan Menggunakan *Compressive Test*

Benda uji silinder dilakukan uji kuat tekan bertujuan sebagai pengontrol mutu beton pada balok. Pengujian ini menggunakan alat *Compression Test Machine* (CTM) yang berfungi untuk memperoleh beban maksimum yang dapat diterima benda uji silinder, sehingga nantinya dapat dilakukan perhitungan kuat tekan dari beton tersebut. Pengujian dilaksanakan saat umur beton telah melewati 28 hari, sehingga tidak dibutuhkan faktor koreksi kuat tekan sebagai pengali terhadap umur beton. Adapun rumusan dalam menghitung kuat tekan benda uji silinder (f'c) yaitu menggunakan rumus (4-1).

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

Dimana :

f'c = kuat tekan (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas penampang benda uji (mm^2)

Gambar 4.4 Pengujian Kuat Tekan menggunakan *Compression Test Machine*

Benda uji silinder yang dibuat menyesuaikan dengan proses pengecoran yang dilakukan. Setiap *batch* pengecoran minimal terdapat 3 benda uji silinder. Pengujian kuat tekan aktual yang dilakukan pada benda uji silinder akan menghasilkan beberapa variasi nilai yang kemudian akan di rata-rata. Hasil *compressive test* dari kuat tekan beton normal, beton dengan lubang transversal, dan beton dengan lubang longitudinal dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2

Hasil Pengujian Kuat Tekan Benda Uji Silinder menggunakan *Compressive Test*

Benda Uji	Berat (kg)	Beban Maksimum (kg)	Umur Pengujian (hari)	f'c (kg/cm²)	Faktor Koreksi	f'c (28 hari) (kg/cm²)	f'c (28 hari) (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	Rata-Rata (MPa)
BNB	12,19	27200	15	153,859	0,89	172,875	16,95	6,01	23,83
	11,82	42500	15	240,404	0,89	270,117	26,49		
	11,98	45000	15	254,545	0,89	286,006	28,05		
PTA	12,03	38000	14	214,949	0,88	244,261	23,95	4,74	26,94
	12,34	38800	14	219,475	0,88	249,403	24,46		
	11,98	51400	14	290,747	0,88	330,395	32,40		
PTB dan PTC	12,35	51300	12	290,182	0,81	356,364	34,95	4,53	33,43
	12,27	54300	12	307,152	0,81	377,204	36,99		
	11,96	41600	12	235,313	0,81	288,981	28,34		
PLA	12,46	33800	7	191,192	0,65	294,141	28,85	2,62	32,37
	12,34	39200	7	221,737	0,65	341,134	33,45		
	12,52	41000	7	231,919	0,65	356,799	34,99		
PLB dan PLC	12,44	37700	7	213,253	0,65	328,081	32,17	7,34	29,83
	12,62	42900	7	242,667	0,65	373,333	36,61		
	12,12	26700	7	151,030	0,65	232,354	22,79		
	12,33	28300	7	160,081	0,65	246,278	24,15		
	12,47	41900	7	237,010	0,65	364,631	35,76		

Sumber : Hasil Penelitian

Keterangan :

BNB : Balok Normal Proporsi Campuran B (1 : 1,6 : 2,6)

PTA : Balok dengan Lubang Arah Transversal ukuran 2 inch

PTB : Balok dengan Lubang Arah Transversal ukuran 3 inch

PTC : Balok dengan Lubang Arah Transversal ukuran 4 inch

PLA : Balok dengan Lubang Arah Longitudinal ukuran 2 inch

PLB : Balok dengan Lubang Arah Longitudinal ukuran 3 inch

PLC : Balok dengan Lubang Arah Longitudinal ukuran 4 inch

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan hasil beberapa variasi mutu beton dari ketujuh sampel benda uji. Dapat dilihat dari tabel diatas bahwa terdapat benda uji yang memiliki kuat tekan yang sama yaitu PTB dan PTC serta PLB dan PLC, yang mana memiliki arti bahwasanya kedua benda uji tersebut dibuat dalam satu *batch* pengecoran. Balok dengan lubang arah transversal berdiameter 3 inch dan 4 inch memiliki kuat tekan tertinggi, yaitu sebesar 33,43 MPa. Sementara benda uji balok normal memiliki kuat tekan terendah sebesar 23,83 MPa.

Pada Tabel 4.2 terdapat standar deviasi yang mana digunakan untuk menentukan bagaimana persebaran data dalam sampel penelitian dan dilihat seberapa dekat data – data tersebut terhadap nilai *mean* atau rata – rata dari sampel tersebut. Setelah didapatkan nilai

standar deviasi, maka dilanjutkan menghitung *range* data yang dapat digunakan. *Range* yang dimaksud adalah pada interval (x_i – Sr) sampai dengan (x_i + Sr), dimana x_i adalah rata – rata sampel dan Sr merupakan standar deviasi. Setelah nilai *range* telah dihitung, maka data kuat tekan diseleksi apakah masuk ke dalam interval atau tidak.

4.3. Pengujian Kuat Tekan Menggunakan *Hammer Test*

Hammer test ini dilakukan pada setiap benda uji balok. Pengujian ini dilakukan sebelum pengujian UPV, dengan maksud menghindari adanya kelembapan pada permukaan balok yang disebabkan oleh penggunaan *couplant gel*. Dari pengujian *hammer test* ini didapatkan *rebound number* atau angka pantul yang dihasilkan dari adanya benturan antara ujung *plunger* dengan permukaan beton. Angka pantul tersebut terbaca oleh *rebound hammer* untuk mengidentifikasikan kekuatan struktur beton. Dalam pengujian ini digunakan alat yang dinamakan *Silver Schmidt Hammer* dari PROCEQ.

Gambar 4.5 Pengujian Kuat Tekan menggunakan *Hammer Test*

Hasil dari *hammer test* dapat dilihat melalui *software Hammer Link*. Pada software tersebut, dapat diketahui Q-values dari setiap benda uji. Dari Q-values akan didapatkan *mean value* yang mana merupakan kuat tekan rata-rata dari setiap benda uji. Berikut hasil dari pengujian kuat tekan menggunakan *hammer test*.

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

No.	Benda Uji	Mutu Beton (MPa)	Mutu Beton Rata-rata (MPa)
1	Balok Normal - B	25 26	25,5
2	Balok Lubang Transversal - A	27	27
3	Balok Lubang Transversal - B	25,5	25,5
4	Balok Lubang Transversal - C	28	28
5	Balok Lubang Longitudinal - A	27,5 27,5	27,5
6	Balok Lubang Longitudinal - B	25,5 25,5	25,5
7	Balok Lubang Longitudinal - C	25 24,5	24,75

Sumber : Hasil Penelitian

Data yang disajikan pada Tabel 4.3 diatas menunjukkan bahwa kuat tekan setiap benda uji yang dihasilkan dari alat *hammer test* memiliki perbedaan hasil dari pengujian kuat tekan menggunakan *compressive test*. Hal ini terjadi dikarenakan adanya beberapa faktor yang mempengaruhi hasil pembacaan *nondestructive test*. Oleh karena itu, diperlukan adanya faktor pengali atau konstanta untuk mengetahui nilai kuat tekan beton.

4.4. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

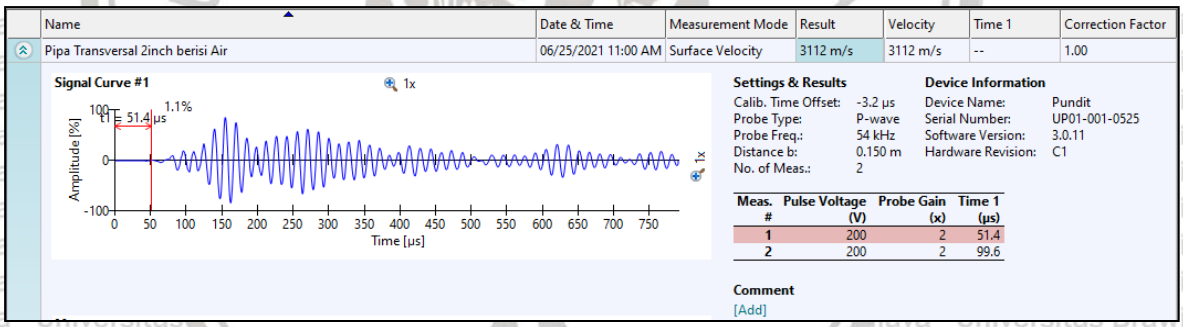
Pengujian UPV dilakukan pada ketiga jenis benda uji, yaitu balok beton normal, balok dengan lubang arah transversal, dan balok dengan lubang arah longitudinal. Pengujian ini dilakukan saat beton sudah mencapai umur 28 hari yang mana telah mencapai kuat tekan optimum sebesar 100% dari perencanaan. Alat yang digunakan adalah PUNDIT PL-200 dan 54 kHz *transducers* dengan menggunakan 2 metode pengujian, yaitu metode langsung (*direct*) dan metode tidak langsung (*indirect*). Kedua metode tersebut dilakukan pada setiap sampel benda uji balok yang mana dengan 2 kondisi. Kondisi pertama adalah lubang tidak diisi dengan air, sedangkan untuk kondisi kedua, lubang diisi dengan air memenuhi volume lubang tersebut.

(a)

(b)

Gambar 4.6 Pengujian UPV. (a) *Direct Method* (metode langsung), (b) *Indirect Method* (metode tidak langsung).

Pada pengujian ini akan didapatkan hasil berupa cepat rambat gelombang. Untuk mendapatkan nilai tersebut, data yang harus dimasukkan pada alat PUNDIT adalah jarak antara kedua *transducer*. Jarak yang digunakan pada pengujian metode langsung yaitu sebesar 20 cm atau lebar dari benda uji, sedangkan jarak pada metode tidak langsung sebesar 15 cm. Data kecepatan yang dihasilkan dari keseluruhan metode kemudian dianalisis menggunakan *software* PL-Link.



Gambar 4.7 Contoh Hasil Cepat Rambat Gelombang pada software PL-Link

4.4.1. Balok Normal

4.4.1.1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Pada pengujian ini, jarak antar *transducer* adalah 20 cm yang mana merupakan lebar benda uji balok. Pengujian metode langsung ini dilakukan beberapa kali pengujian yang kemudian diperoleh nilai cepat rambat rata-ratanya.

Gambar 4.8 Contoh Pengujian Metode Langsung pada Balok Normal

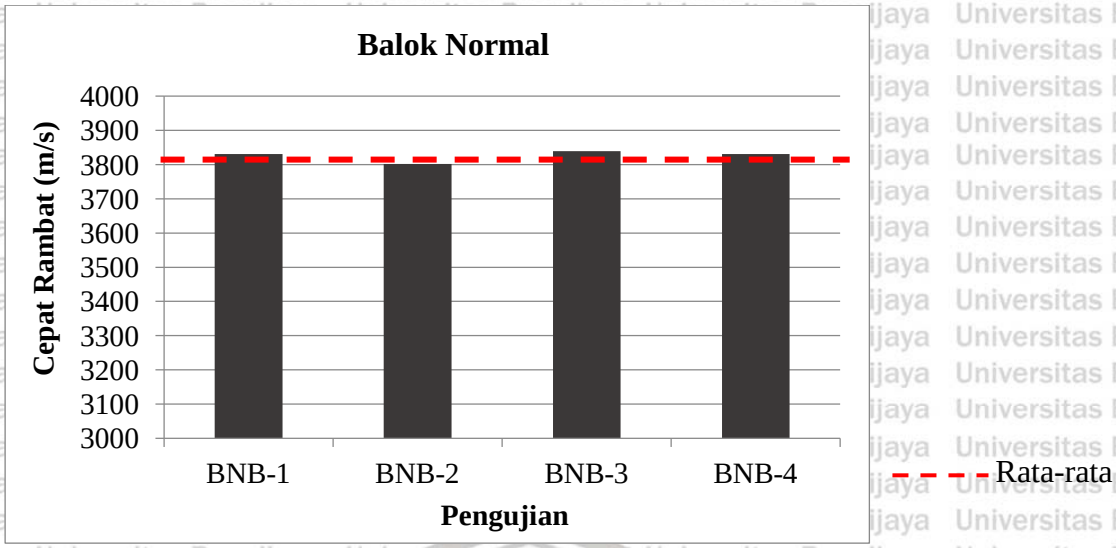
Hasil cepat rambat dari balok beton normal dengan menggunakan metode langsung memiliki nilai antara 3800 m/s sampai dengan 3850 m/s. Hasil pengujian menggunakan metode langsung pada benda uji balok beton normal dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4
Hasil Pengujian Balok Normal dengan Metode Langsung

Benda Uji	**Cepat Rambat (m/s)**	**Cepat Rambat Rata-rata (m/s)**	**St. Dev (m/s)**	**Kualifikasi Beton**
BNB (Balok Normal - B)	3831	3825,75	16,28	Baik
	3802			
	3839			
	3831			

Sumber : Hasil Penelitian

Hasil pengujian UPV dengan menggunakan metode langsung pada balok normal menunjukkan bahwa pada pengujian ke-3 didapatkan nilai cepat rambat tertinggi, yaitu sebesar 3839 m/s. Sedangkan pada pengujian ke-2 didapatkan nilai terendah sebesar 3802 m/s. Pengujian pertama dan ke-4 menghasilkan cepat rambat gelombang yang sama sebesar 3831 m/s. Maka, dapat disimpulkan, balok beton normal memiliki nilai cepat rambat rata – rata sebesar 3825,75 m/s dengan standar deviasi 16,28 m/s.

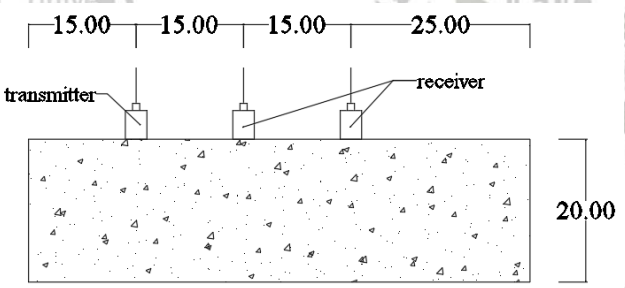


Gambar 4.9 Diagram Batang Hasil Pengujian Metode Langsung Balok Normal – B

Pada *Gambar 4.9* disajikan diagram batang hasil dari pengujian metode langsung pada balok normal yang didapatkan nilai cepat rambat rata – rata sebesar 3825,75 m/s.

4.4.1.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Jarak *transducer* yang digunakan pada pengujian ini adalah 15 cm dengan 2 titik pengukuran (n = 2). Alat *transmitter* dan *receiver* diletakkan sesuai dengan gambar perencanaan dibawah ini. Hasil dari pengujian balok normal dengan menggunakan metode tidak langsung dapat dilihat pada Tabel 4.5.



Gambar 4.10 Metode Pengujian Metode Tidak Langsung pada Balok Beton Normal

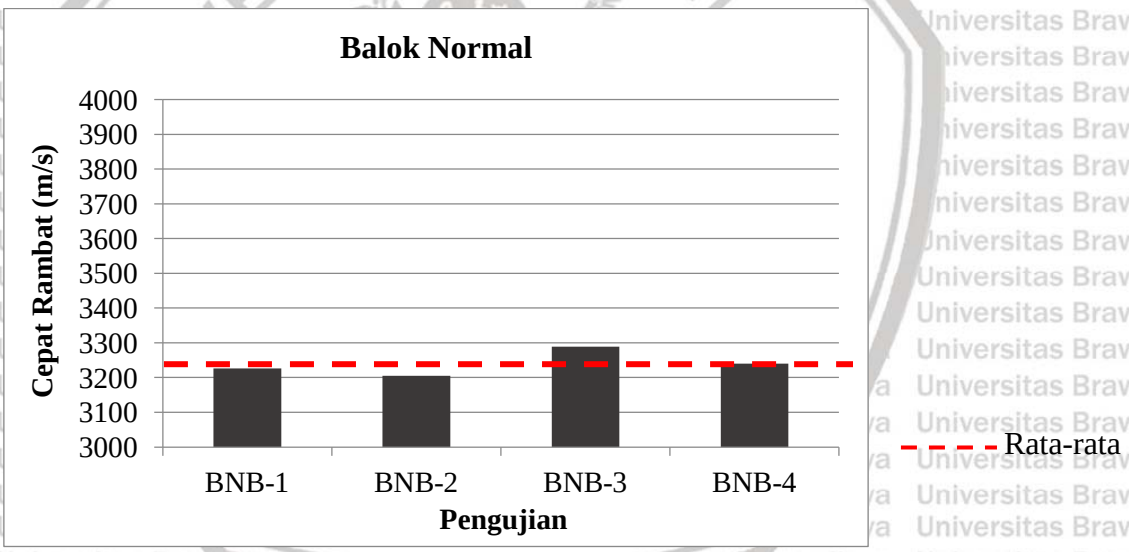
Gambar 4.11 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung pada Balok Normal

Tabel 4.5
Hasil Pengujian Balok Normal dengan Metode Tidak Langsung

Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
BNB (Balok Normal - B)	3226	3240	35,69	Diragukan
	3205			
	3289			
	3240			

Sumber : Hasil Penelitian

Cepat rambat yang dihasilkan dari pengujian *surface velocity* pada balok normal adalah sekitar 3200 m/s sampai dengan 3300 m/s. Seperti yang dapat dilihat pada tabel, didapatkan nilai rata – rata cepat rambat sebesar 3240 m/s untuk benda uji balok normal. Hasil cepat rambat balok normal yang didapatkan pada metode tidak langsung lebih kecil jika dibandingkan dengan metode langsung.



Gambar 4.12 Diagram Batang Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung Balok Normal

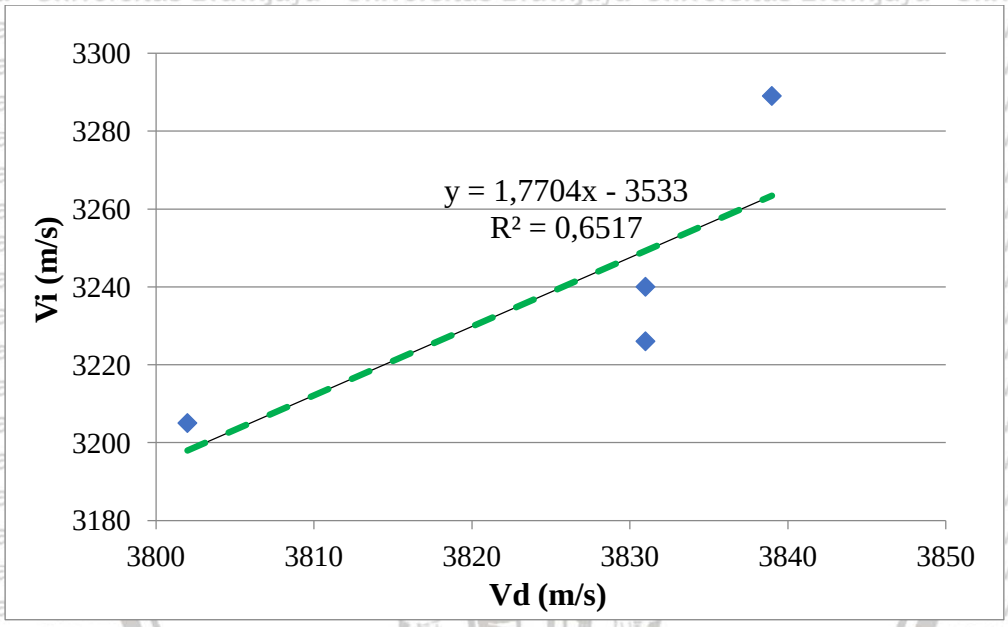
Pada *Gambar 4.12* disajikan diagram batang hasil dari pengujian metode tidak langsung pada balok normal yang didapatkan nilai cepat rambat rata – rata sebesar 3240 m/s.

4.4.1.3. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung

Data – data cepat rambat gelombang yang didapatkan dari pengujian akan dicari korelasi antara metodenya. Pada sub bab ini akan dijelaskan korelasi antara metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok normal.

Tabel 4.6
Persentase Cepat Rambat Metode Tidak Langsung terhadap Metode Langsung pada Balok Normal

Benda Uji	Metode Langsung	Metode Tidak Langsung	Persentase Vi terhadap Vd	Rata-Rata
BNB-1	3831	3226	84,21%	
BNB-2	3802	3205	84,30%	84,69%
BNB-3	3839	3289	85,67%	
BNB-4	3831	3240	84,57%	



Gambar 4.13 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Normal

Keterangan :

V_d = Cepat Rambat Gelombang Metode Langsung (*Direct Method*)

V_i = Cepat Rambat Gelombang Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

Pada Tabel 4.6, didapatkan persentase perbandingan cepat rambat metode tidak langsung terhadap metode langsung pada benda uji balok normal, yaitu V_i = 84,69% V_d. Persentase ini dapat digunakan sebagai acuan pada benda uji lainnya, yaitu balok lubang arah transversal dan longitudinal.

Dari *Gambar 4.13* didapatkan hubungan linier antara nilai cepat rambat gelombang metode langsung dan tidak langsung yang menghasilkan persamaan V_i = 1,7704 V_d - 3533 dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,6517.

4.4.2. Balok Lubang Arah Transversal

Pengujian yang dilakukan pada benda uji balok lubang arah transversal memiliki 2 variasi, yaitu pengujian dilakukan ketika lubang tidak diisi air dan ketika lubang diisi air. Kedua keadaan ini dilakukan metode pengujian yang sama. Terdapat 3 sampel benda uji balok lubang arah transversal. Ketiga sampel tersebut memiliki variasi pada diameter lubangnya, yaitu berukuran 2 inch, 3 inch, dan 4 inch.

4.4.2.1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Pengujian dengan metode langsung pada benda uji balok lubang arah transversal dilakukan pada sisi melintang dari permukaan beton yang berlubang. Metode pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada *Gambar 4.14*.

(a) (b)

Gambar 4.14 Contoh Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok lubang tanpa air, (b) Balok lubang berisi air.

Hasil pengujian metode langsung pada balok lubang arah transversal dengan lubang tanpa air didapatkan rata – rata cepat rambat antara 3100 m/s sampai dengan 3600 m/s. Sedangkan untuk kondisi balok dengan lubang berisi air didapatkan nilai antara 3200 m/s sampai dengan 3650 m/s. Hasil cepat rambat gelombang dengan menggunakan metode langsung pada benda uji balok lubang arah transversal dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7
Hasil Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal

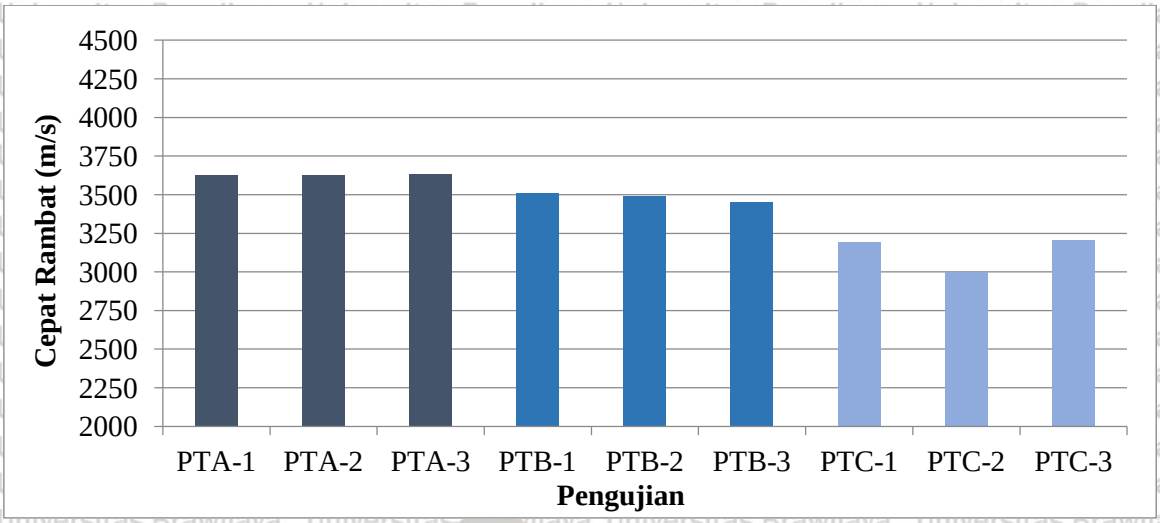
Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3623	3625,33	4,04	Baik
		3623			
		3630			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3509	3482,33	31,21	Diragukan
		3490			
		3448			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3195	3133,00	116,16	Diragukan
		2999			
		3205			
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3643	3634,33	21,36	Baik
		3610			
		3650			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3540	3569,33	28,54	Baik
		3597			
		3571			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3289	3287,67	8,08	Diragukan
		3279			
		3295			

Sumber : Hasil Penelitian

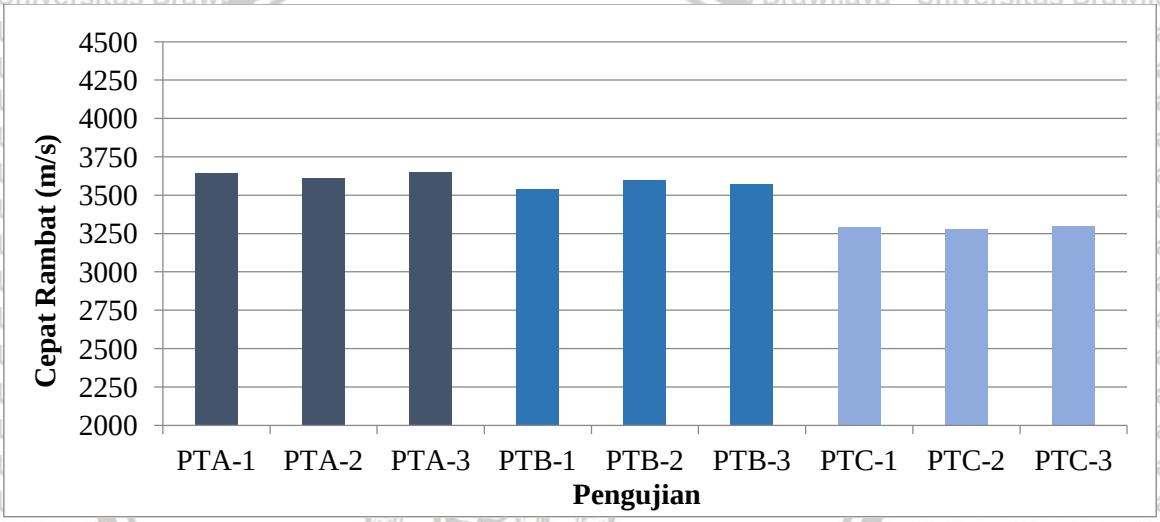
Dari Tabel 4.7, diperoleh data cepat rambat pada kondisi lubang tanpa air dan lubang berisi air. Dari kedua kondisi pengujian, dapat dilihat bahwa nilai cepat rambat terbesar didapatkan dari benda uji dengan lubang berdiameter terkecil, yaitu 2 inch. Hasil cepat rambat rata - rata benda uji PTA dengan lubang tanpa air adalah sebesar 3625,33 m/s dan PTA dengan lubang berisi air sebesar 3634,33 m/s. Terjadi kenaikan nilai cepat rambat pada kondisi pengujian lubang berisi air meskipun tidak signifikan. Nilai cepat rambat terendah diperoleh dari benda uji dengan lubang berdiameter terbesar, yaitu 4 inch. Benda uji PTC dengan lubang tanpa air memiliki cepat rambat sebesar 3133 m/s, sedangkan cepat rambat benda uji PTC dengan lubang berisi air sebesar 3287,67 m/s. Sama halnya dengan benda uji PTA, terjadi kenaikan nilai cepat rambat pada kondisi pengujian lubang berisi air.

Pada pengujian ini didapatkan hasil bahwa cepat ramabat gelombang bernilai lebih besar pada kondisi pengujian balok lubang berisi air. Selain itu, juga didapatkan hasil bahwa semakin besar diameter lubang pada beton, maka nilai cepat rambat dengan menggunakan metode langsung akan semakin kecil.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

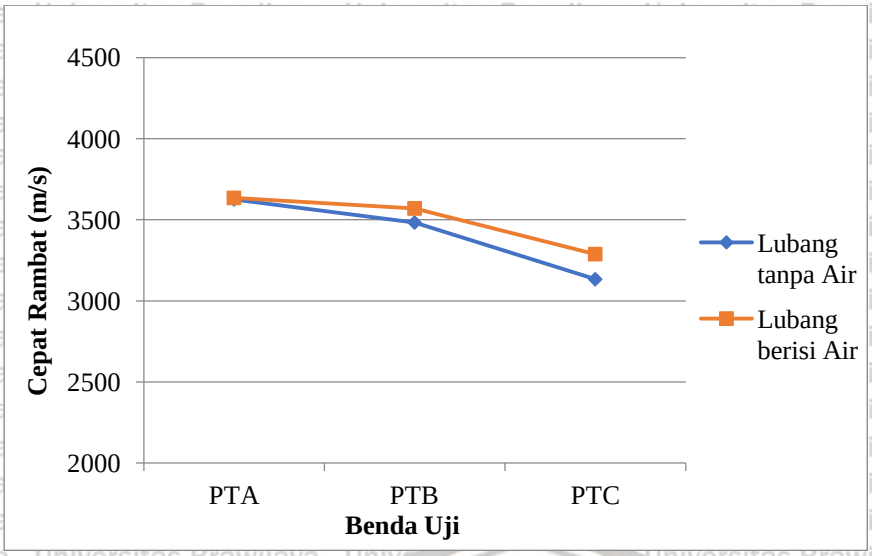


Gambar 4.15 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung pada Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air



Gambar 4.16 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung pada Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.15* dan *Gambar 4.16* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah transversal dengan pengujian metode langsung akan bernilai semakin rendah saat diameter lubang semakin besar.



Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal

Pada *Gambar 4.17*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode langsung benda uji balok lubang arah transversal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 2,56% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Transversal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang Tanpa Air	Lubang Berisi Air		
Direct	PTA	3625,33	3634,33	0,25%	2,56%
	PTB	3482,33	3569,33	2,50%	
	PTC	3133,00	3287,67	4,94%	

Sumber : Hasil Penelitian

4.4.2.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Lubang

Pengujian metode tidak langsung pada balok lubang arah transversal dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *transmitter* berada tepat pada lubang dan *transmitter* berada pada beton. Pengujian ini dilakukan dengan jumlah 2 titik (n = 2) yang mana jarak *transducer* adalah sebesar 15 cm.

(a) (b)

Gambar 4.18 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air.

Pada pengujian dengan *transmitter* tepat pada lubang diperoleh hasil cepat rambat rata – rata sekitar 2200 m/s sampai dengan 3800 m/s untuk kondisi lubang tanpa air. Sedangkan pada kondisi lubang berisi air didapatkan cepat ramabat rata – rata sebesar 2800 m/s sampai dengan 4000 m/s. Rincian lengkap hasil pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang pada balok lubang arah transversal dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9
Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal

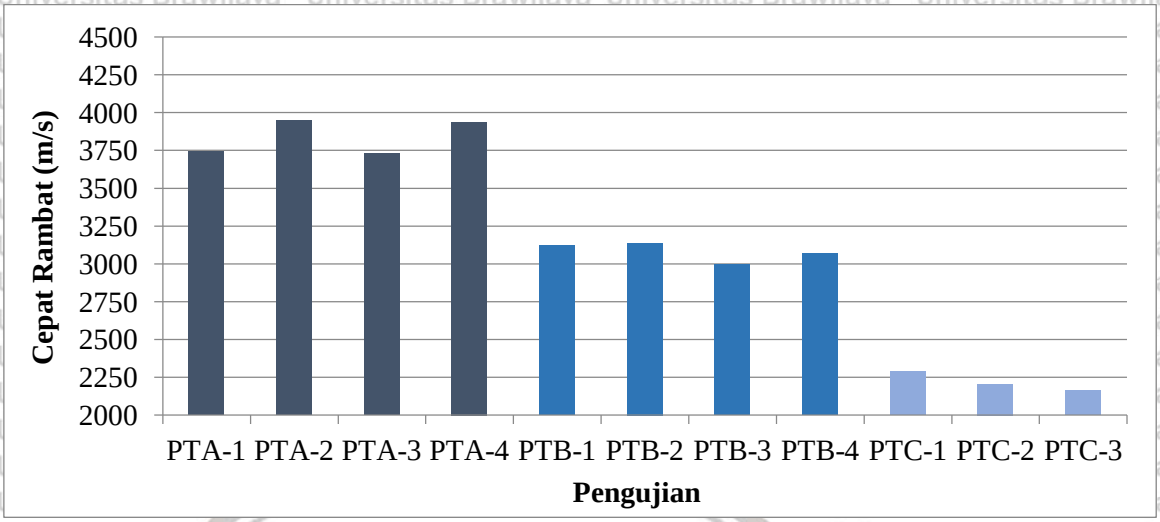
Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3741	3839,00	119,07	Baik
		3947			
		3731			
		3937			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3119	3079,50	64,42	Diragukan
		3138			
		2994			
		3067			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	2287	2218,00	63,85	Buruk
		2206			
		2161			
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3827	4074,25	252,63	Baik
		4298			
		3886			
		4286			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3597	3648,00	43,93	Baik
		3650			
		3641			
		3704			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	2747	2800,25	44,17	Buruk
		2852			
		2814			
		2788			

Sumber : Hasil Penelitian

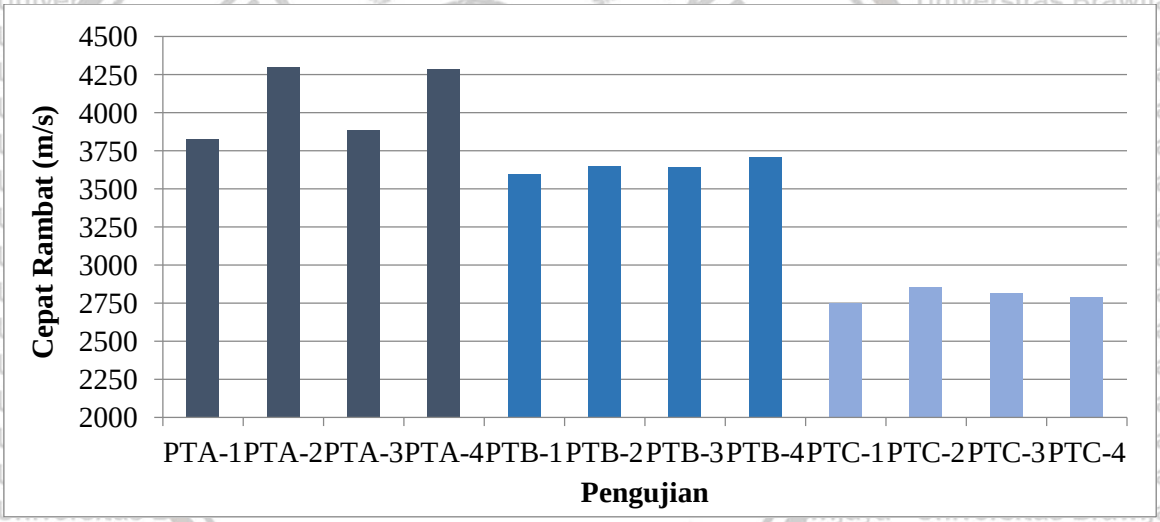
Cepat rambat rata - rata tertinggi didapatkan dari benda uji dengan lubang berdiameter terkecil, yaitu 2 inch, sebesar 3839 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 4074, 25 m/s pada kondisi lubang berisi air. Sedangkan nilai cepat rambat terendah didapatkan dari benda uji dengan lubang berdiameter 4 inch. Pada kondisi lubang tanpa air, didapatkan cepat rambat rata – rata sebesar 2218 m/s dan 2800,25 m/s pada kondisi lubang berisi air. Nilai cepat rambat benda uji dengan lubang berdiameter 3 inch berada diantara kedua diameter lainnya, yaitu sebesar 3079,5 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3648 m/s pada kondisi lubang berisi air.

Kesimpulan dari hasil pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat pada lubang tidak jauh berbeda dari hasil pada pengujian metode langsung. Semakin besar diameter lubang pada beton, maka akan didapatkan nilai cepat rambat yang semakin

rendah. Demikian pula, pada kondisi pengujian lubang tanpa air didapatkan nilai yang lebih rendah daripada pengujian dengan kondisi lubang berisi air.

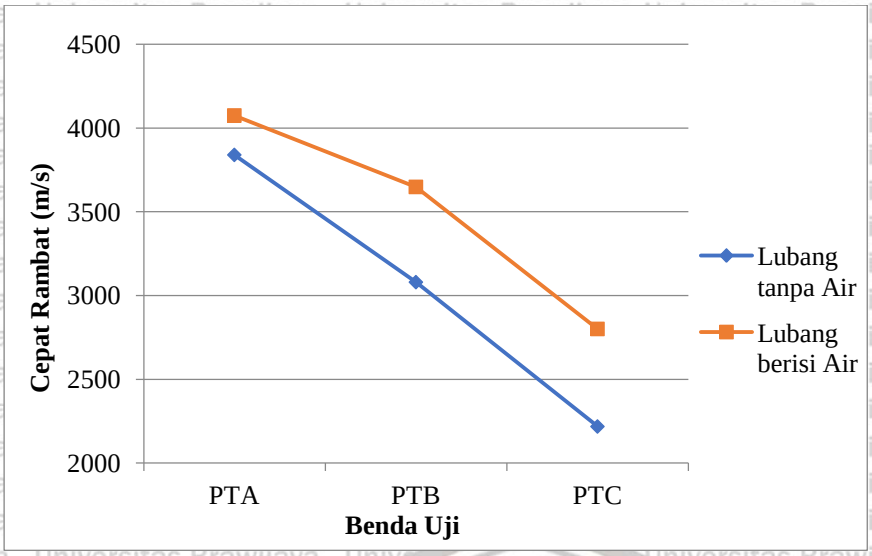


Gambar 4.19 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air



Gambar 4.20 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.19* dan *Gambar 4.20* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah transversal dengan pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat lubang) akan bernilai semakin rendah saat diameter lubang semakin besar.



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Transversal

Pada *Gambar 4.21*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat lubang) benda uji balok lubang arah transversal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 16,95% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Transversal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang Tanpa Air	Lubang Berisi Air		
Indirect (Transmitter berada tepat pada lubang)	PTA	3839,00	4074,25	6,13%	16,95%
	PTB	3079,50	3648,00	18,46%	
	PTC	2218,00	2800,25	26,25%	

Sumber : Hasil Penelitian

4.4.2.3. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Beton

Pengujian ini merupakan variasi dari metode tidak langsung. Pada metode ini, *transmitter* diletakkan tidak tepat lubang melainkan tepat pada daerah beton. Jarak *transducer* yang digunakan sama seperti sebelumnya, yaitu sebesar 15 cm, dengan 2 titik pengujian (n = 2). Pengujian juga dilakukan pada 2 kondisi, yaitu lubang tanpa air dan lubang berisi air. Berikut contoh pelaksanaan dari pengujian metode ini.

(a) (b)

Gambar 4.22 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air.

Hasil pengujian dari metode ini adalah bernilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan hasil pengujian metode tidak langsung saat *transmitter* berada tepat lubang. Cepat rambat rata – rata tertinggi didapatkan dari benda uji dengan diameter terkecil baik pada kondisi lubang tanpa air maupun berisi air. Nilai cepat rambat tertinggi pada pengujian ini mencapai nilai antara 3700 m/s sampai dengan 4200 m/s. Sedangkan untuk nilai cepat rambat terendah bernilai sebesar 3100 m/s sampai 3400 m/s. Hasil pengujian pada metode ini dapat dilihat lebih detail pada Tabel 4.11.

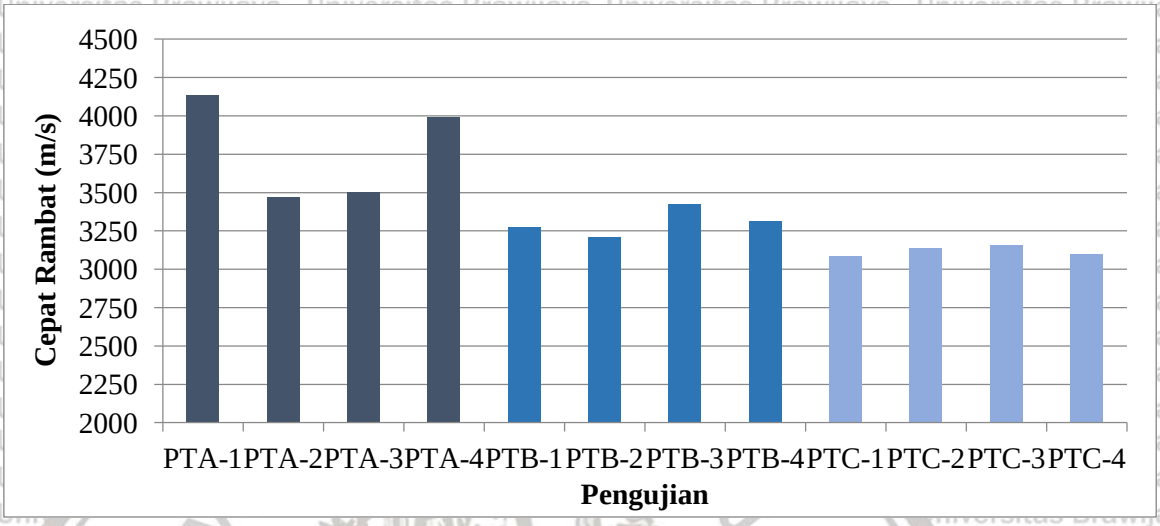
Tabel 4.11
Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	4132	3774,50	335,64	Baik
		3472			
		3505			
		3989			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3275	3305,75	89,41	Diragukan
		3212			
		3425			
		3311			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3086	3120,25	33,49	Diragukan
		3138			
		3158			
		3099			
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	4087	4136,50	92,18	Baik
		4032			
		4225			
		4202			
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3472	3648,25	162,30	Baik
		3563			
		3722			
		3836			
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3378	3436,00	132,70	Diragukan
		3597			
		3480			
		3289			

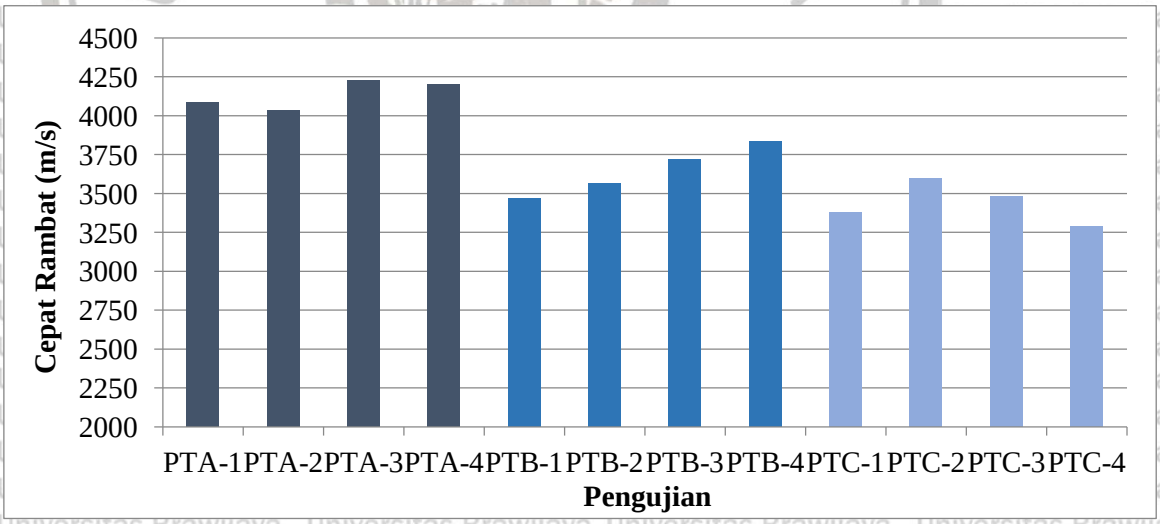
Sumber : Hasil Penelitian

Pada pengujian ini juga didapatkan kesimpulan yang sama dengan pengujian metode tidak langsung sebelumnya. Dari Tabel 4.11, dapat dilihat bahwa nilai cepat rambat rata – rata tertinggi diperoleh dari benda uji balok dengan lubang berdiameter terkecil baik pada kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, yaitu berturut – turut sebesar 3774,5 m/s dan 4136,5 m/s. Benda uji PTB memiliki nilai cepat rambat diantara benda uji PTA dan PTC, yaitu sebesar 3305,75 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3648,25 m/s pada kondisi lubang berisi air. Nilai cepat rambat pada benda uji PTC bernilai terendah diantara kedua benda uji lainnya, yaitu sebesar 3120,25 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3436 m/s pada kondisi lubang berisi air.

Hasil pengujian pada metode ini menunjukkan bahwa pada kondisi pengujian lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air. Cepat rambat yang dihasilkan pada pengujian pada balok lubang arah transversal ini juga bernilai lebih tinggi daripada metode langsung dan tidak langsung saat *transmitter* tepat pada lubang.

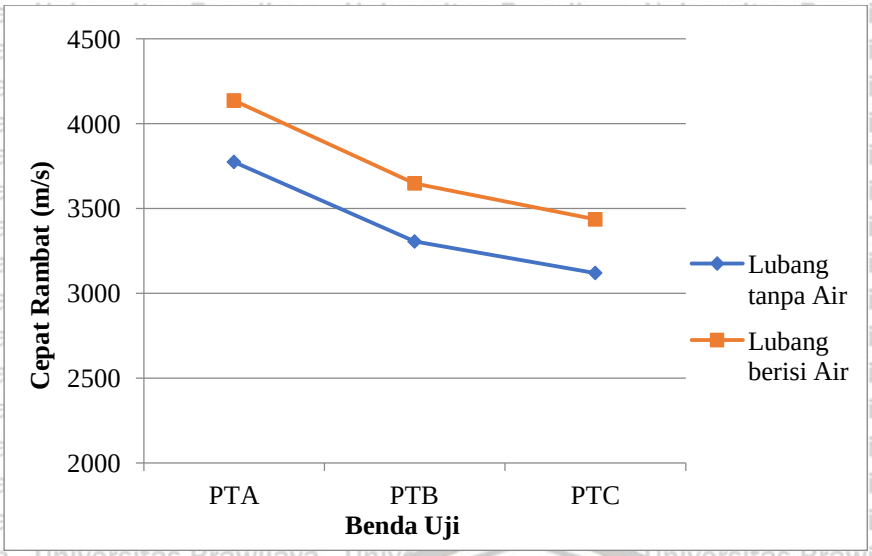


Gambar 4.23 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Transversal Tanpa Air



Gambar 4.24 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Transversal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.23* dan *Gambar 4.24* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah transversal dengan pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat beton) akan bernilai semakin rendah saat diameter lubang semakin besar.



Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Transversal

Pada *Gambar 4.25*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat beton) benda uji balok lubang arah transversal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 10,02% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Transversal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang Tanpa Air	Lubang Berisi Air		
Indirect (Transmitter berada tidak pada lubang)	PTA	3774,50	4136,50	9,59%	10,02%
	PTB	3305,75	3648,25	10,36%	
	PTC	3120,25	3436,00	10,12%	

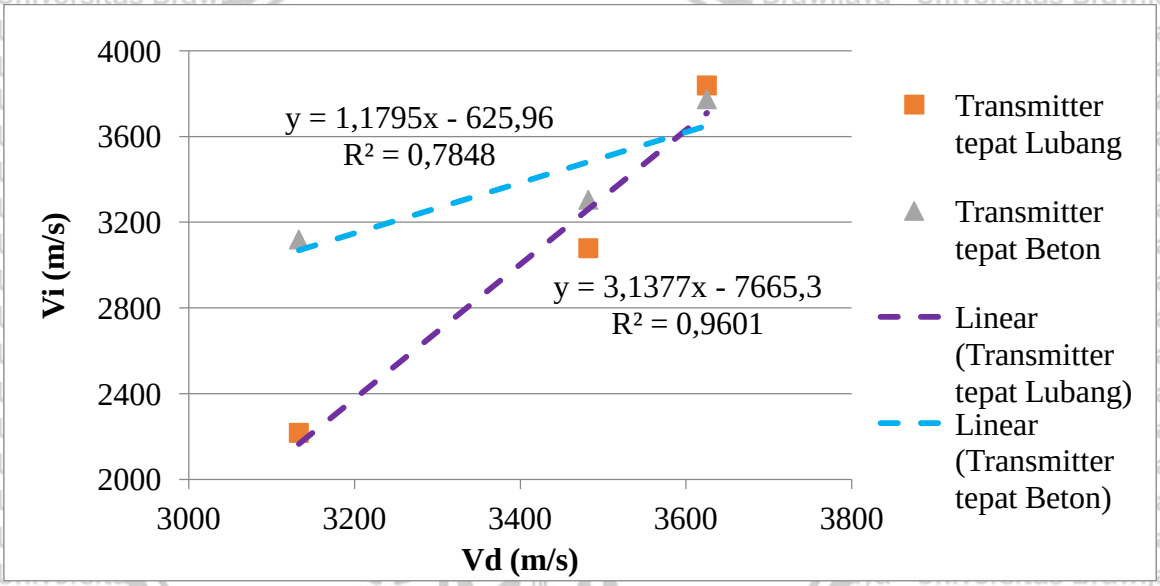
Sumber : Hasil Penelitian

4.4.2.4. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung

Data – data cepat rambat gelombang yang didapatkan dari pengujian akan dicari korelasi antara metodenya. Pada sub bab ini akan dijelaskan korelasi antara metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok dengan lubang arah transversal.

Tabel 4.13
Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Tanpa Air

Benda Uji	Metode Langsung	*Transmitter* tepat Lubang	*Transmitter* tepat Beton	Persentase ViL terhadap Vd	Rata-Rata	Persentase ViB terhadap Vd	Rata-Rata
PTA	3625,33	3839,00	3774,50	105,89%		104,11%	
PTB	3482,33	3079,50	3305,75	88,43%	88,37%	94,93%	99,55%
PTC	3133,00	2218,00	3120,25	70,79%		99,59%	



Gambar 4.26 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Tanpa Air

Keterangan :

V_d = Cepat Rambat Gelombang Metode Langsung (*Direct Method*)

V_{iL} = Cepat Rambat Gelombang Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat Lubang

V_{iB} = Cepat Rambat Gelombang Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat Beton

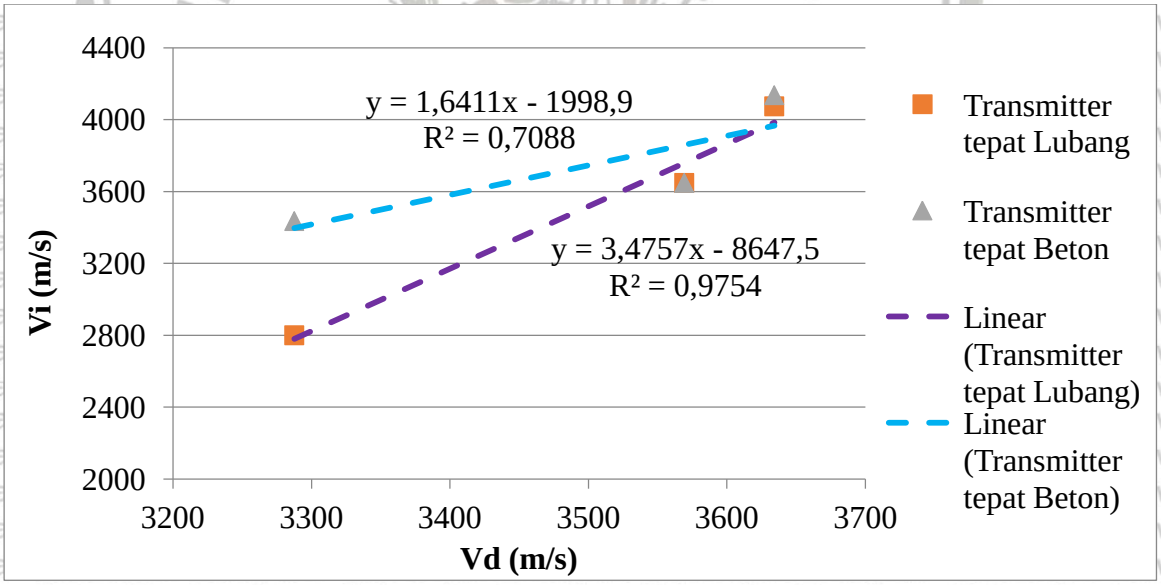
Pada Tabel 4.13, didapatkan persentase perbandingan cepat rambat gelombang metode tidak langsung terhadap metode langsung pada benda uji balok lubang arah transversal tanpa air. Perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang

terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iL} = 88,37% V_d. Sedangkan perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat beton terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iB} = 99,55% V_d. Persentase ini dapat digunakan sebagai acuan untuk umum.

Dari *Gambar 4.26*, didapatkan hubungan linier antara nilai cepat rambat gelombang metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok lubang arah transversal tanpa air. Persamaan yang dihasilkan ada 2 jenis yaitu terhadap jenis metode tidak langsung ketika *transmitter* tepat lubang dan *transmitter* tepat beton, yang mana berturut – turut persamaannya adalah V_{iL} = 3,1377V_d – 7665,3 dan V_{iB} = 1,1795V_d – 625,96 dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,9601 dan 0,7848.

Tabel 4.14
Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Berisi Air

Benda Uji	Metode Langsung	*Transmitter* tepat Lubang	*Transmitter* tepat Beton	Persentase ViL terhadap Vd	Rata-Rata	Persentase ViB terhadap Vd	Rata-Rata
PTA_Air	3634,33	4074,25	4136,50	112,10%		113,82%	
PTB_Air	3569,33	3648,00	3648,25	102,20%	99,83%	102,21%	106,85%
PTC_Air	3287,67	2800,25	3436,00	85,17%		104,51%	



Gambar 4.27 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal Berisi Air

Pada Tabel 4.14, didapatkan persentase perbandingan cepat rambat gelombang metode tidak langsung terhadap metode langsung pada benda uji balok lubang arah transversal berisi air. Perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iL} = 99,83% V_d. Sedangkan perbandingan

metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat beton terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iB} = 106,85% V_d. Persentase ini dapat digunakan sebagai acuan untuk umum.

Dari *Gambar 4.27*, didapatkan hubungan linier antara nilai cepat rambat gelombang metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok lubang arah transversal berisi air. Persamaan yang dihasilkan ada 2 jenis yaitu terhadap jenis metode tidak langsung ketika *transmitter* tepat lubang dan *transmitter* tepat beton, yang mana berturut – turut persamaannya adalah V_{iL} = 3,4757V_d – 8647,5 dan V_{iB} = 1,6411V_d – 1998,9 dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,9754 dan 0,7088.

Kesimpulan dari pengujiaan balok lubang arah transversal adalah dapat dilihat pada *Gambar 4.26* dan *Gambar 4.27*, bahwa grafik hubungan hasil pengujian metode langsung dengan metode tidak langsung baik saat *transmitter* tepat lubang maupun *transmitter* tepat beton memiliki garis linier yang naik. Hal ini dikarenakan pengujian pada balok lubang arah transversal dengan metode tidak langsung memiliki kesimpulan yang sama, yaitu semakin besar diameter lubang pada balok akan menyebabkan nilai cepat rambat semakin kecil. Sehingga meskipun *transmitter* diletakkan tepat pada lubang maupun beton, nilai cepat rambat yang dihasilkan oleh masing – masing variasi benda uji memiliki kesimpulan yang sama. Balok dengan diameter lubang terkecil mendapatkan nilai cepat rambat terbesar dibandingkan variasi diameter lubang lainnya. Namun pengujian dengan metode tidak langsung saat *transmitter* tepat beton menghasilkan nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan saat *transmitter* berada tepat lubang yang dapat dilihat hasilnya pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14. Hal ini sesuai dengan prinsip kerja *transducer* UPV yang mana ketika gelombang dipancarkan oleh *transmitter* mengenai daerah beton dengan kepadatan atau homogenitas yang baik, maka akan menghasilkan cepat rambat yang semakin tinggi (PROCEQ, 2015). Oleh karena itu, pengujian metode tidak langsung pada balok lubang arah transversal saat *transmitter* diletakkan tepat pada lubang, cepat rambat gelombang yang dihasilkan tidak sebesar saat *transmitter* diletakkan tepat pada beton.

4.4.3. Balok Lubang Arah Longitudinal

Sama halnya dengan balok lubang arah transversal, pengujian yang dilakukan pada benda uji balok lubang arah longitudinal juga memiliki 2 variasi, yaitu pengujian dilakukan ketika lubang tidak diisi air dan ketika lubang diisi air. Kedua keadaan ini dilakukan metode pengujian yang sama. Terdapat 3 sampel benda uji balok lubang arah longitudinal. Ketiga sampel tersebut memiliki variasi pada diameter lubangnya, yaitu berukuran 2 inch, 3 inch, dan 4 inch.

4.4.3.1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Pengujian dengan metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal dilakukan dengan jarak *transducer* selebar penampang balok, yaitu 20 cm. Pengujian juga dilakukan dengan 2 kondisi, yaitu lubang tanpa air dan lubang berisi air.

(a)

(b)

Gambar 4.28 Contoh Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air.

Hasil pengujian pada metode ini sama halnya dengan pengujian pada balok lubang arah transversal. Hanya saja nilai cepat rambat rata – rata yang diperoleh pada benda uji ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan balok lubang arah transversal. Cepat rambat rata – rata tertinggi diperoleh oleh benda uji dengan lubang berdiameter terkecil, yaitu bernilai antara 3700 m/s sampai dengan 3850 m/s. Sedangkan cepat rambat terendah diperoleh oleh benda uji dengan lubang berdiameter terbesar, yaitu sekitar 3000 m/s sampai dengan 3300 m/s. Hasil pengujian metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal dapat dilihat pada Tabel 4.15.

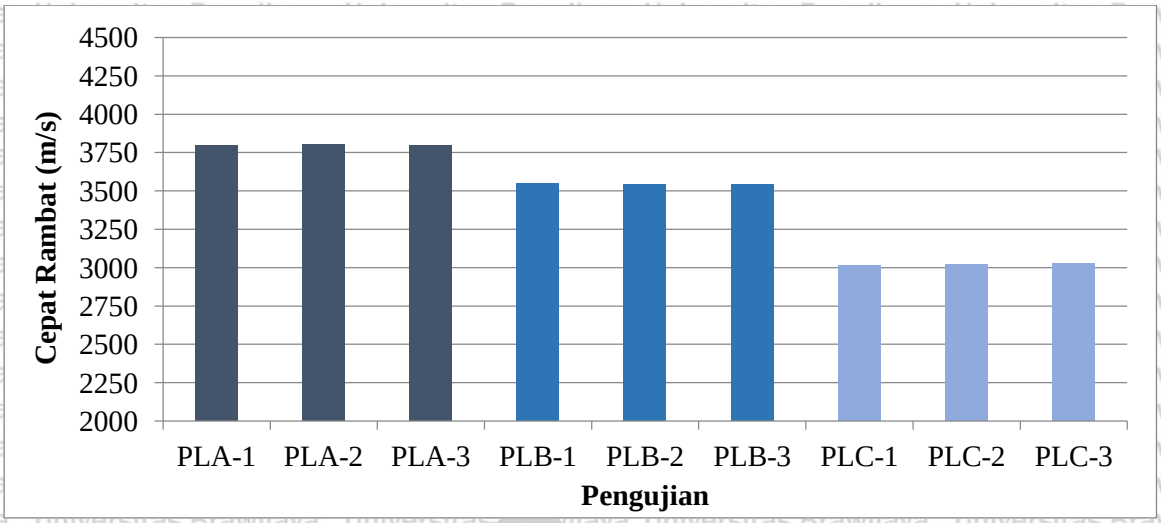
Tabel 4.15
Hasil Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3795	3797,33	4,04	Baik
		3802			
		3795			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3546	3542,00	3,46	Baik
		3540			
		3540			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3012	3018,33	7,09	Diragukan
		3017			
		3026			
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3824	3826,33	4,04	Baik
		3831			
		3824			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3584	3599,33	13,61	Baik
		3610			
		3604			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3333	3335,00	3,46	Diragukan
		3339			
		3333			

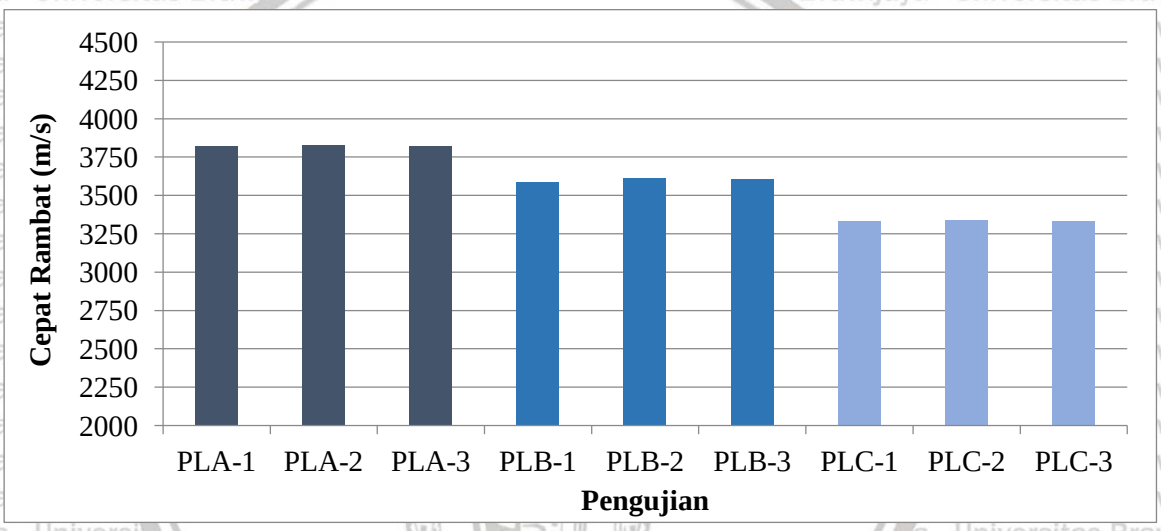
Sumber : Hasil Penelitian

Dari Tabel 4.15 dapat dilihat bahwa pada kondisi pengujain dengan lubang berisi air didapatkan kenaikan nilai cepat rambat. Cepat rambat rata – rata yang diperoleh oleh benda uji PTA merupakan hasil tertinggi dibandingkan benda uji balok lubang arah longitudinal lainnya, yaitu sebesar 3797,33 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3826,33 pada kondisi lubang berisi air. Sedangkan benda uji PTC memiliki cepat rambat rata – rata terendah, yaitu sebesar 3018,33 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3335 m/s pada kondisi lubang berisi air. Selain itu, dari benda uji PTB didapatkan hasil cepat rambat rata – rata sebesar 3542 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3599,33 m/s pada kondisi lubang berisi air.

Kesimpulan dari pengujian metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal adalah semakin besar diameter lubang pada beton maka akan didapatkan nilai cepat rambat yang semakin rendah. Pada kondisi pengujian lubang berisi air juga didapatkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengujian lubang tanpa air.

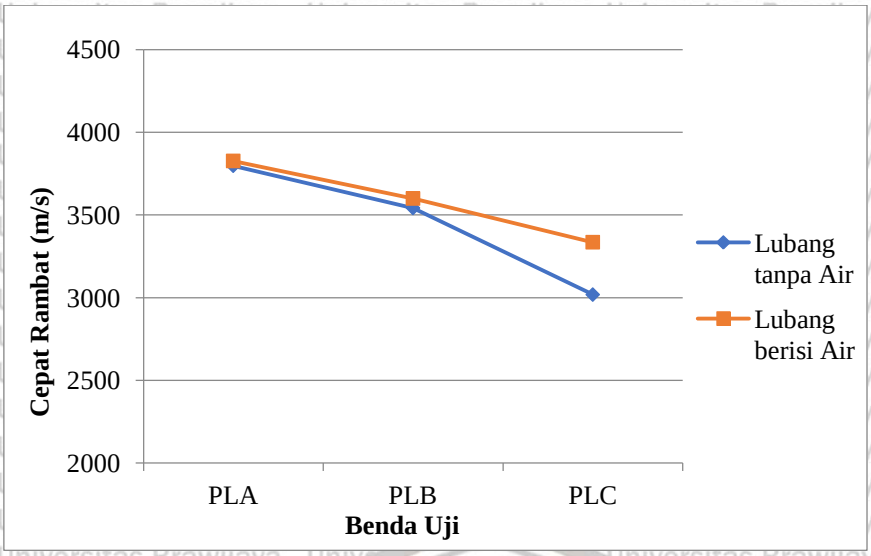


Gambar 4.29 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air



Gambar 4.30 Diagram Cepat Rambat Metode Langsung Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.29* dan *Gambar 4.30* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah longitudinal dengan pengujian metode langsung akan bernilai semakin rendah saat diameter lubang semakin besar.



Gambar 4.31 Grafik Perbandingan Metode Langsung Balok Lubang Arah Longitudinal

Pada *Gambar 4.31*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode langsung benda uji balok lubang arah longitudinal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 4,29% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.16.

Tabel 4.16
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Langsung Balok Lubang Arah Longitudinal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang tanpa Air	Lubang berisi Air		
Direct	PLA	3797,33	3826,33	0,76%	4,29%
	PLB	3542,00	3599,33	1,62%	
	PLC	3018,33	3335,00	10,49%	

Sumber : Hasil Penelitian

4.4.3.2. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Lubang

Pengujian metode tidak langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal dilakukan juga dengan 2 variasi pengujian, yaitu *transmitter* tepat lubang dan *transmitter* tepat beton. Untuk pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang dapat dilihat pada *Gambar 4.32*.

(a) (b)

Gambar 4.32 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal. (a) Balok Lubang tanpa Air, (b) Balok Lubang berisi Air.

Hasil pengujian pada benda uji balok lubang arah longitudinal dengan menggunakan metode ini didapatkan hasil cepat rambat yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan pengujian pada balok lubang arah transversal. Nilai cepat rambat tertinggi diperoleh dari benda uji dengan diameter lubang 2 inch, yaitu sekitar 4000 m/s sampai dengan 4200 m/s. Berikut hasil pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat pada lubang pada balok lubang arah longitudinal.

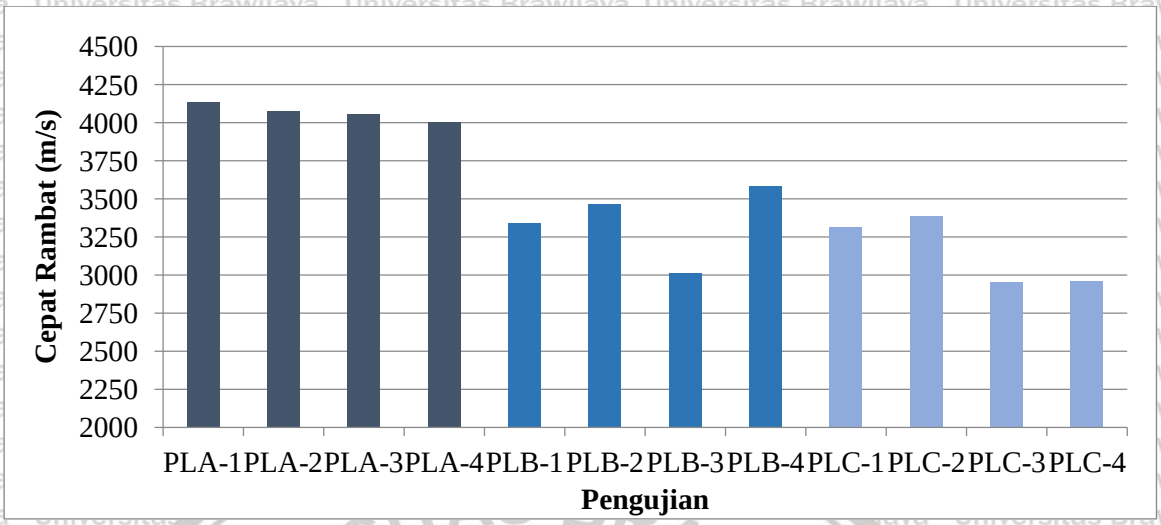
Tabel 4.17
Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	4132	4065,50	54,64	Baik
		4076			
		4054			
		4000			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3341	3349,25	245,10	Diragukan
		3464			
		3012			
		3580			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3311	3152,25	228,68	Diragukan
		3386			
		2953			
		2959			
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	4225	4202,00	50,59	Baik
		4237			
		4144			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3769	3743,25	35,88	Baik
		3704			
		3722			
		3778			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3151	3439,75	221,74	Diragukan
		3425			
		3497			
		3686			

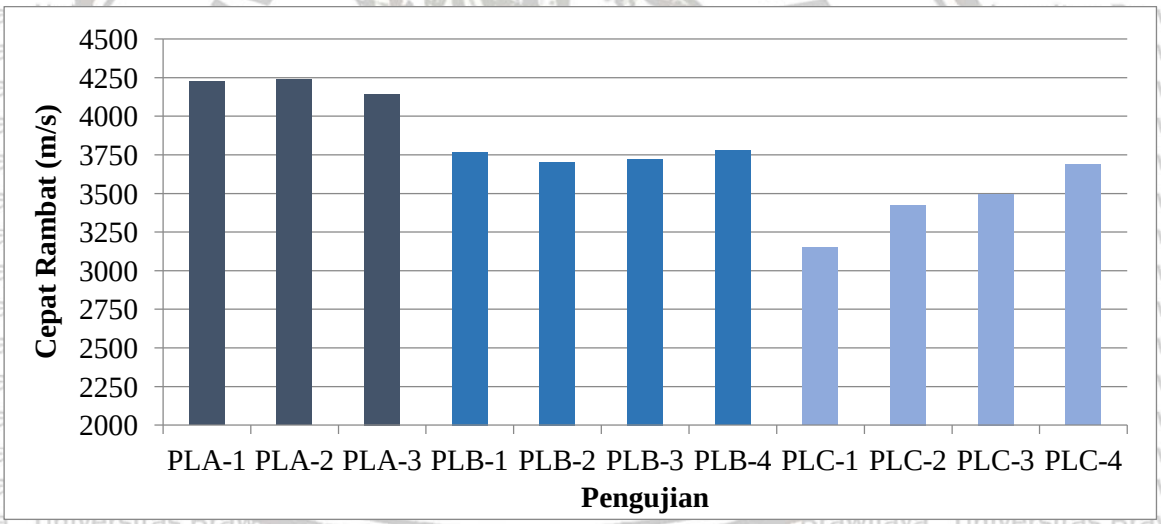
Sumber : Hasil Penelitian

Dapat dilihat dari Tabel 4.17, bahwasanya pada kedua kondisi pengujian memiliki hasil yang tidak jauh berbeda dengan balok lubang arah transversal. Namun, secara keseluruhan, benda uji balok lubang arah longitudinal memiliki cepat rambat yang lebih tinggi daripada balok lubang arah transversal. Pada benda uji PLA diperoleh nilai cepat rambat rata – rata sebesar 4065,5 m/s untuk kondisi lubang tanpa air dan 4202 m/s untuk kondisi lubang berisi air. Sedangkan pada benda uji PLC diperoleh nilai cepat rambat terendah diantara benda uji lubang arah longitudinal lainnya, yaitu sebesar 3152,25 m/s untuk kondisi lubang tanpa air dan 3439,75 m/s untuk kondisi lubang berisi air. Benda uji PLB memiliki nilai cepat rambat diantara PLA dan PLB, yaitu sebesar 3349,25 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3743,25 pada kondisi lubang berisi air.

Dapat disimpulkan pada pengujian ini bahwa pada kondisi pengujian lubang berisi air diperoleh nilai cepat rambat yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air.

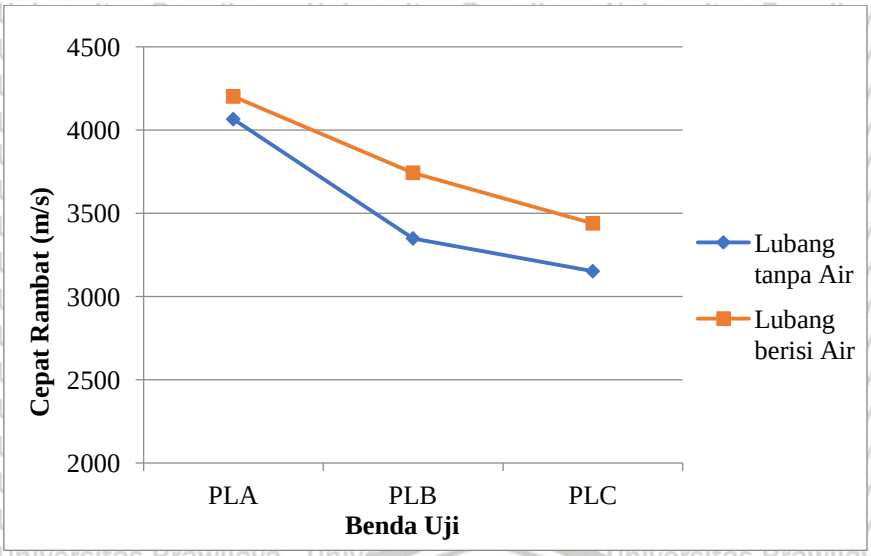


Gambar 4.33 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air



Gambar 4.34 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.33* dan *Gambar 4.34* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah longitudinal dengan pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat lubang) akan bernilai semakin rendah saat diameter lubang semakin besar.



Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Longitudinal

Pada *Gambar 4.35*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat lubang) benda uji balok lubang arah longitudinal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 8,08% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.18.

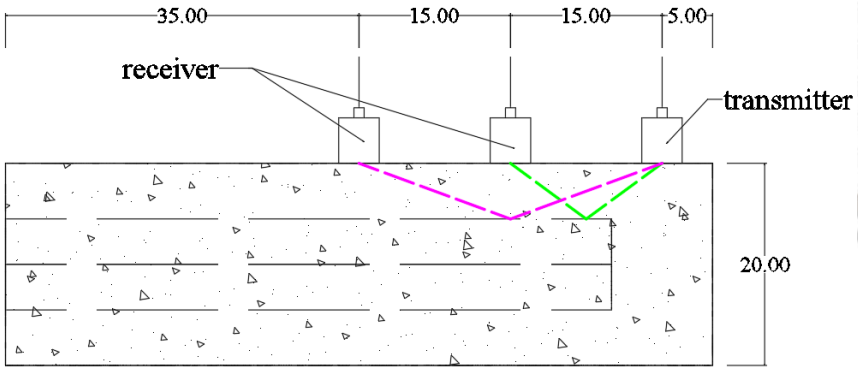
Tabel 4.18
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) Balok Lubang Arah Longitudinal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang Tanpa Air	Lubang Berisi Air		
Indirect (Transmitter berada tepat pada lubang)	PLA	4065,50	4202,00	3,36%	8,08%
	PLB	3349,25	3743,25	11,76%	
	PLC	3152,25	3439,75	9,12%	

Sumber : Hasil Penelitian

4.4.3.3. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat pada Beton

Metode pengujian ini dilakukan sama halnya dengan balok lubang arah transversal. Hasil pengujian dari metode ini berbeda dengan hasil pengujian lainnya. Nilai cepat rambat tertinggi didapatkan dari benda uji balok dengan lubang berdiameter terbesar, yaitu 4 inch (11 cm). Hal ini dikarenakan metode pengujian yang mana letak *transmitter* berada pada daerah beton dan kemudian gelombang akan dipantulkan dan diterima oleh *receiver* yang berada pada daerah balok berlubang. Untuk detail penggambaran metode pengujian dapat dilihat pada *Gambar 4.36*.



Gambar 4.36 Pengujian Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Dari *Gambar 4.36*, dapat dilihat terdapat garis putus – putus yang merepresentasikan pantulan gelombang yang dipancarkan *transmitter* dan diterima oleh *receiver*. Jika dilihat dari pantulan gelombang tersebut, jika diameter lubang yang ada di dalam beton semakin besar, maka daerah beton yang dilalui gelombang akan semakin kecil. Oleh karena itu, nilai cepat rambat gelombang yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini juga dipengaruhi oleh semakin kecilnya daerah beton di atas lubang yang dilalui oleh gelombang, maka semakin kecil resiko gelombang menemui bagian beton yang berongga atau berlubang yang akan membuat kecepatan rambat gelombang semakin baik.

Cepat rambat yang diperoleh oleh benda uji balok lubang arah longitudinal berdiameter 4 inch adalah sebesar 3400 m/s sampai dengan 3700 m/s. Detail hasil pengujian pada metode ini dapat dilihat pada Tabel 4.19.

Gambar 4.37 Contoh Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Tabel 4.19

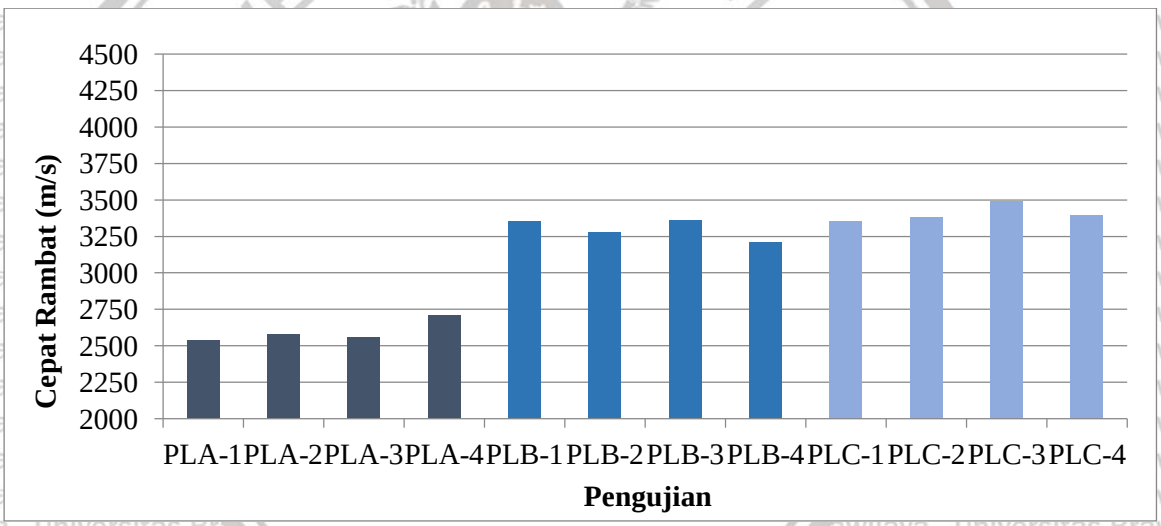
Hasil Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Cepat Rambat Rata-rata (m/s)	St. Dev (m/s)	Kualifikasi Beton
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	2538	2596,75	78,47	Buruk
		2577			
		2560			
		2712			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3356	3301,50	71,80	Diragukan
		3275			
		3363			
		3212			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3356	3404,00	58,13	Diragukan
		3378			
		3488			
		3394			
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3448	3470,25	36,97	Diragukan
		3513			
		3488			
		3432			
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3713	3626,00	59,64	Baik
		3580			
		3614			
		3597			
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3704	3665,75	36,28	Baik
		3623			
		3650			
		3686			

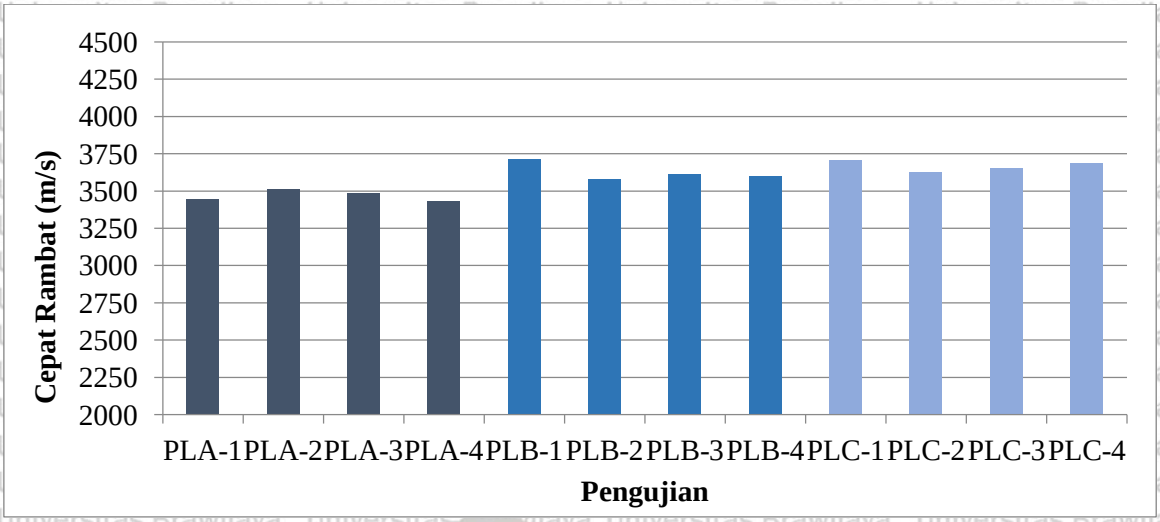
Sumber : Hasil Penelitian

Terdapat sedikit perbedaan pada hasil pengujian metode tidak langsung variasi *transmitter* tepat beton pada benda uji balok lubang arah longitudinal ini jika dibandingkan dengan pengujian lainnya. Dari Tabel 4.19, dapat dilihat bahwa cepat rambat rata – rata tertinggi didapatkan dari benda uji PLC, yaitu balok dengan diameter lubang terbesar. Nilai cepat rambat rata – rata PLC adalah sebesar 3404 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3665,75 pada kondisi lubang berisi air. Sedangkan pada benda uji PLA, balok dengan diameter terkecil, memiliki cepat rambat rata – rata terendah, yaitu sebesar 2596,75 m/s untuk kondisi lubang tanpa air dan 340,25 m/s untuk kondisi lubang berisi air. Dari benda uji PLB didapatkan nilai cepat rambat diantara kedua benda uji lainnya, yaitu sebesar 3301,5 m/s pada kondisi lubang tanpa air dan 3626 m/s pada kondisi lubang berisi air.

Pada pengujian metode ini meskipun nilai cepat rambat pada kondisi lubang berisi air memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan kondisi pengujian lubang tanpa air, namun berbeda dengan pengujian lain yang mana pada pengujian ini semakin besar diameter lubang pada balok didapatkan nilai cepat rambat yang semakin tinggi pula.

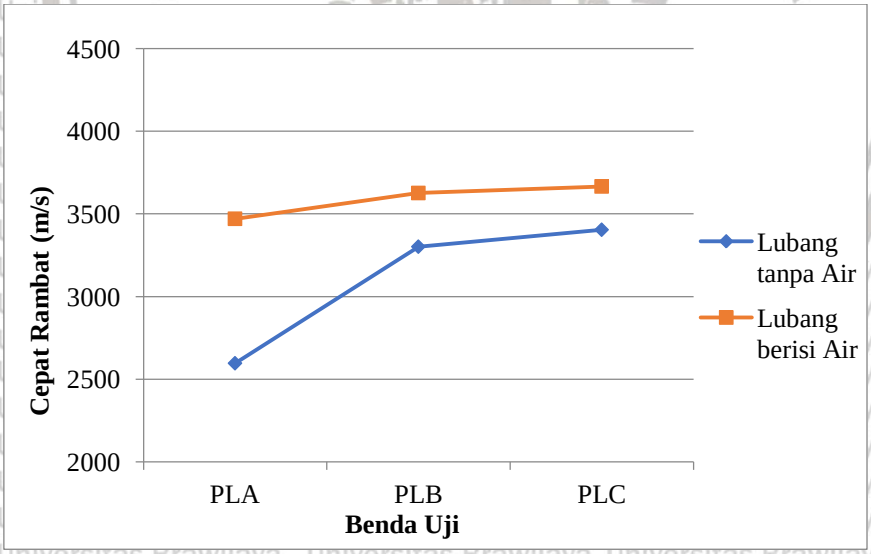


Gambar 4.38 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air



Gambar 4.39 Diagram Cepat Rambat Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok dengan Lubang Arah Longitudinal Berisi Air

Dapat dilihat dari *Gambar 4.38* dan *Gambar 4.39* bahwasanya baik pada pengujian dengan kondisi lubang tanpa air maupun berisi air, nilai cepat rambat pada balok lubang arah longitudinal dengan pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat beton) akan bernilai semakin tinggi saat diameter lubang semakin besar. Kesimpulan pada pengujian ini berbeda dengan pengujian lainnya.



Gambar 4.40 Grafik Perbandingan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Longitudinal

Pada *Gambar 4.40*, disajikan grafik perbandingan antara 2 kondisi pengujian yang diambil dari hasil cepat rambat rata – rata setiap benda uji. Dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat beton) benda uji balok lubang arah longitudinal dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi lubang tanpa air. Pada pengujian metode ini terjadi kenaikan cepat rambat rata – rata sekitar 17,05% pada kondisi lubang berisi air. Persentase kenaikan nilai cepat rambat pada masing – masing benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.20.

Tabel 4.20
Persentase Kenaikan Nilai Cepat Rambat pada Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) Balok Lubang Arah Longitudinal

Metode	Benda Uji	Jenis Pengujian		Persentase Kenaikan	Rata - Rata
		Lubang Tanpa Air	Lubang Berisi Air		
Indirect (Transmitter berada tidak pada lubang)	PLA	2596,75	3470,25	33,64%	17,05%
	PLB	3301,50	3626,00	9,83%	
	PLC	3404,00	3665,75	7,69%	

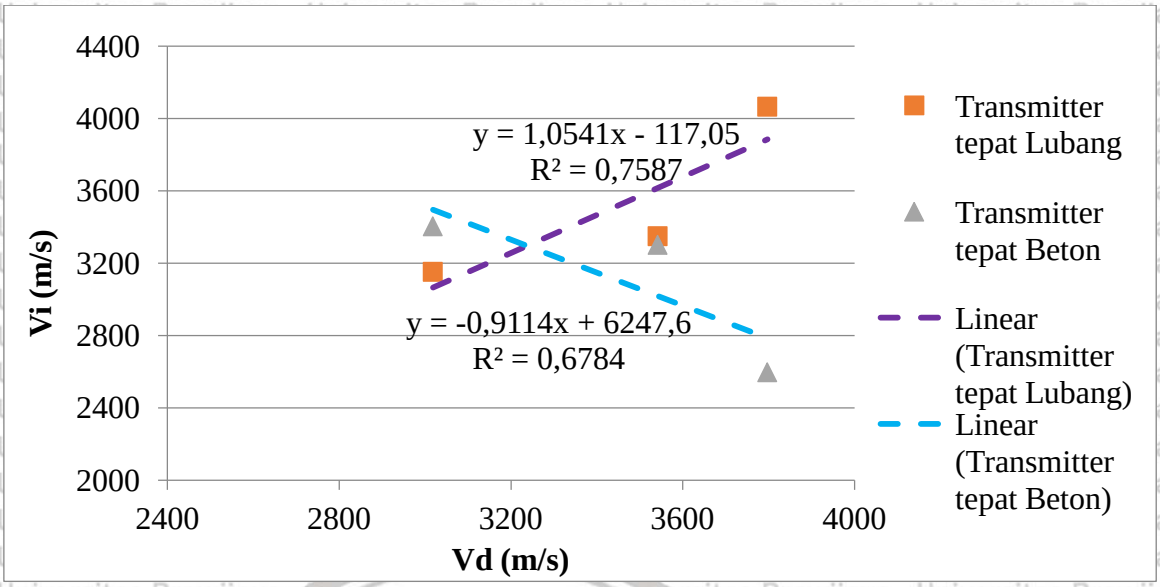
Sumber : Hasil Penelitian

4.4.3.4. Korelasi antara Metode Langsung dan Metode Tidak Langsung

Data – data cepat rambat gelombang yang didapatkan dari pengujian akan dicari korelasi antara metodenya. Pada sub bab ini akan dijelaskan korelasi antara metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok dengan lubang arah longitudinal.

Tabel 4.21
Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air

Benda Uji	Metode Langsung	*Transmitter* tepat Lubang	*Transmitter* tepat Beton	Persentase ViL terhadap Vd	Rata-Rata	Persentase ViB terhadap Vd	Rata-Rata
PLA	3797,33	4065,50	2596,75	107,06%	102,02%	68,38%	91,46%
PLB	3542,00	3349,25	3301,50	94,56%		93,21%	
PLC	3018,33	3152,25	3404,00	104,44%		112,78%	



Gambar 4.41 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Tanpa Air

Keterangan :

V_d = Cepat Rambat Gelombang Metode Langsung (*Direct Method*)

V_{iL} = Cepat Rambat Gelombang Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat Lubang

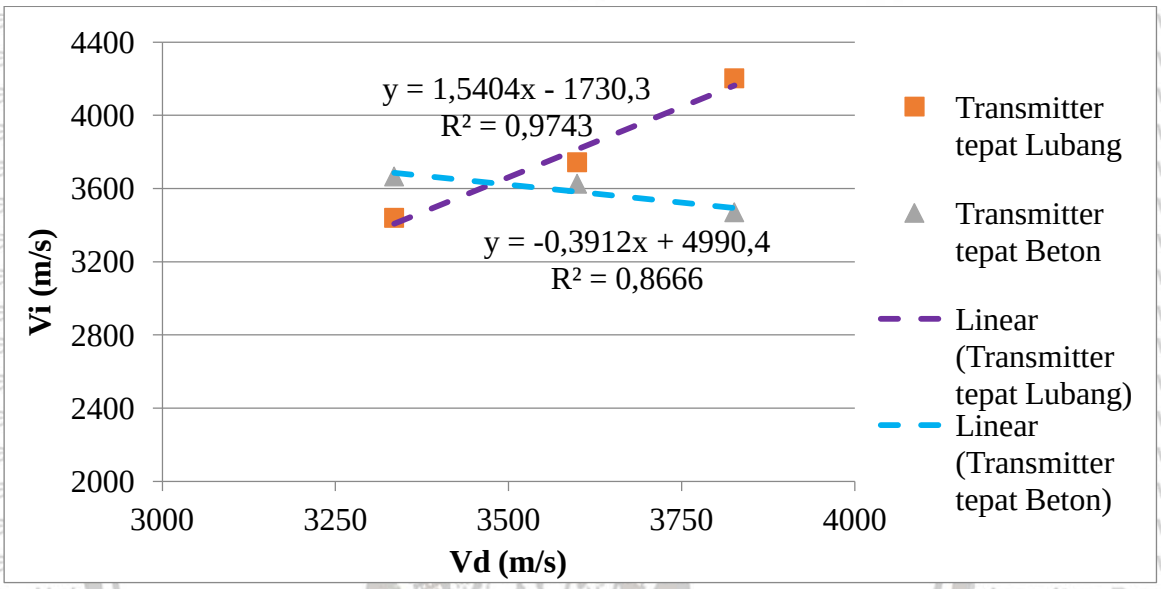
V_{iB} = Cepat Rambat Gelombang Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*) dengan *Transmitter* tepat Beton

Pada Tabel 4.21, didapatkan persentase perbandingan cepat rambat gelombang metode tidak langsung terhadap metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal tanpa air. Perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iL} = 102,02% V_d. Sedangkan perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat beton terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iB} = 91,46% V_d. Persentase ini dapat digunakan sebagai acuan untuk umum.

Dari *Gambar 4.41*, didapatkan hubungan linier antara nilai cepat rambat gelombang metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal tanpa air. Persamaan yang dihasilkan ada 2 jenis yaitu terhadap jenis metode tidak langsung ketika *transmitter* tepat lubang dan *transmitter* tepat beton, yang mana berturut – turut persamaannya adalah V_{iL} = 1,0541V_d – 117,05 dan V_{iB} = -0,9114V_d – 6247,6 dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,7587 dan 0,6784.

Tabel 4.22
Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Berisi Air

Benda Uji	Metode Langsung	*Transmitter* tepat Lubang	*Transmitter* tepat Beton	Persentase ViL terhadap Vd	Rata-Rata	Persentase ViB terhadap Vd	Rata-Rata
PLA_Air	3826,33	4202,00	3470,25	109,82%		90,69%	
PLB_Air	3599,33	3743,25	3626,00	104,00%	105,65%	100,74%	100,45%
PLC_Air	3335,00	3439,75	3665,75	103,14%		109,92%	



Gambar 4.42 Grafik Hubungan antara Cepat Rambat Metode Langsung dan Tidak Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal Berisi Air

Pada Tabel 4.22, didapatkan persentase perbandingan cepat rambat gelombang metode tidak langsung terhadap metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal berisi air. Perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iL} = 105,65% V_d. Sedangkan perbandingan metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat beton terhadap metode langsung adalah sebesar V_{iB} = 100,45% V_d. Persentase ini dapat digunakan sebagai acuan untuk umum.

Dari *Gambar 4.42*, didapatkan hubungan linier antara nilai cepat rambat gelombang metode langsung dan tidak langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal berisi air. Persamaan yang dihasilkan ada 2 jenis yaitu terhadap jenis metode tidak langsung ketika *transmitter* tepat lubang dan *transmitter* tepat beton, yang mana berturut – turut persamaannya adalah V_{iL} = 1,5404V_d – 1730,3 dan V_{iB} = -0,3912V_d – 4990,4 dan mempunyai nilai R^2 sebesar 0,9743 dan 0,8666.

Kesimpulan dari pengujian balok lubang arah longitudinal sedikit berbeda dari benda uji balok lubang arah transversal. Dapat dilihat dari *Gambar 4.41* dan *Gambar 4.42*, grafik hubungan hasil pengujian antara metode langsung dan metode tidak langsung terlihat bersilangan antara metode saat *transmitter* tepat lubang dengan *transmitter* tepat beton. Hal ini dikarenakan cepat rambat yang dihasilkan dari pengujian saat *transmitter* tepat lubang memiliki kesimpulan bahwa semakin besar diameter lubang pada balok maka akan semakin kecil nilai cepat rambatnya. Sedangkan sebaliknya, pada pengujian saat *transmitter* tepat beton, semakin besar diameter lubang pada balok maka akan semakin besar pula nilai cepat rambatnya. Pada pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat beton pada benda uji balok lubang arah longitudinal, seperti yang telah digambarkan melalui *Gambar 4.36*, menunjukkan bahwa semakin besar diameter lubang maka akan mempersempit daerah beton yang mengelilingi lubang tersebut. Sehingga akan menyebabkan gelombang yang dipancarkan *transducer* hanya akan merambat melalui daerah beton tersebut. Selain itu, semakin sempit daerah beton yang mengelilingi lubang dapat meminimalisir adanya rongga atau pori – pori yang terdapat pada beton. Hal inilah yang menyebabkan adanya sedikit perbedaan pada hasil pengujian balok lubang arah longitudinal dengan menggunakan metode tidak langsung saat *transmitter* berada tepat pada beton.

Sebaliknya, saat *transmitter* berada tepat lubang, *transducer* dan *receiver* berada pada daerah yang sama sehingga memungkinkan untuk gelombang mendeteksi adanya lubang yang ada pada balok. Sehingga ketika diameter lubang pada balok semakin besar maka akan menghasilkan cepat rambat gelombang yang semakin kecil yang dikarenakan kualitas dari kepadatan atau homogenitas balok tersebut. Hal inilah yang menyebabkan garis linier yang ditunjukkan pada *Gambar 4.41* dan *Gambar 4.42* saling berpotongan.

4.5. Hubungan antara Intrusi Air pada Beton dengan Cepat Rambat Gelombang Ultrasonik

Dari seluruh hasil pengujian yang dilakukan pada ketujuh sampel benda uji, dapat disimpulkan bahwa pengujian dengan kondisi lubang berisi air memiliki nilai cepat rambat yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air. Hal ini terjadi pada metode pengujian baik metode langsung (*direct method*) maupun metode tidak langsung (*indirect method*).

Terdapat teori acuan dari SNI ASTM C597 : 2012 tentang metode uji kecepatan rambat gelombang melalui beton yang dapat mendukung hasil penelitian yang telah ada. Dalam SNI tersebut, terdapat suatu persamaan kecepatan rambat gelombang dari gelombang longitudinal dalam suatu massa beton berhubungan dengan sifat elastisitas dan kerapatan. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut :

$$v = \sqrt{\frac{K \cdot E}{\rho}} \quad \text{.....} \quad (4\text{-}2)$$

Dimana : v = kecepatan rambat

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

E = modulus elastisitas dinamis

ρ = kerapatan

μ = rasio poisson dinamis

Berdasarkan jurnal penelitian *Nordic Concrete Research* yang ditulis oleh Lamis Ahmed, Ph.D (2018), beton memiliki rasio poisson senilai antara 0,15 sampai dengan 0,25. Sedangkan modulus elastisitas beton pada umumnya bernilai 20.000 MPa dan kerapatan beton sebesar 2200 kg/m^3. Maka didapatkan kecepatan rambat gelombang beton sebagai berikut :

$$v = \sqrt{\frac{K \cdot E}{\rho}}$$

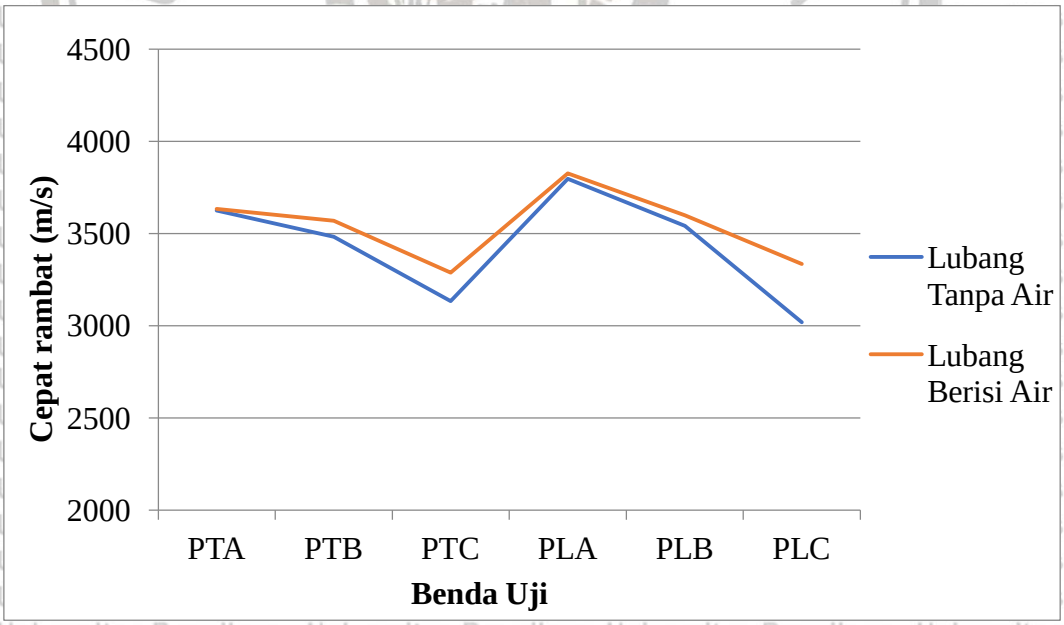
$$v = \sqrt{\frac{\frac{(1-0,2)}{(1+0,2)(1-2.0,2)} \times 20000}{2,2 \times 10^{-5}}} = 31,78 \text{ m/s}$$

Selain itu didapatkan referensi dari jurnal *Science Direct* yang ditulis oleh Hailong Wang dan Qingbin Li pada tahun 2006 yang menyatakan bahwa nilai modulus elastisitas dan rasio poisson dari beton yang basah (*wet concrete*) akan bernilai lebih tinggi jika dibandingkan dengan beton yang sudah mengeras (*hardened concrete*). Yang dimaksud dengan *wet concrete* disini adalah beton dengan pori – pori yang berisi air didalamnya. Maka dicoba untuk perhitungan kecepatan rambat gelombang pada beton yang basah atau berisi air dengan nilai rasio poisson sebesar 0,3 dan kerapatan beton sebesar 2400 kg/m^3.

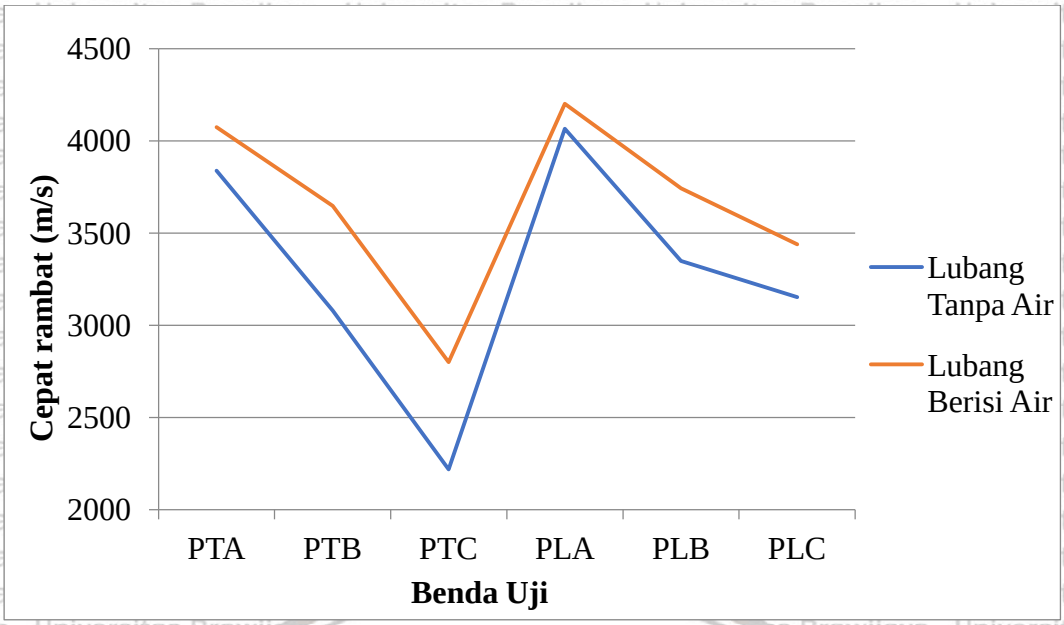
$$v = \sqrt{\frac{K \cdot E}{\rho}}$$

$$v = \sqrt{\frac{\frac{(1-0,3)}{(1+0,3)(1-2.0,3)} \times 20000}{2,4 \times 10^{-5}}} = 35,13 \text{ m/s}$$

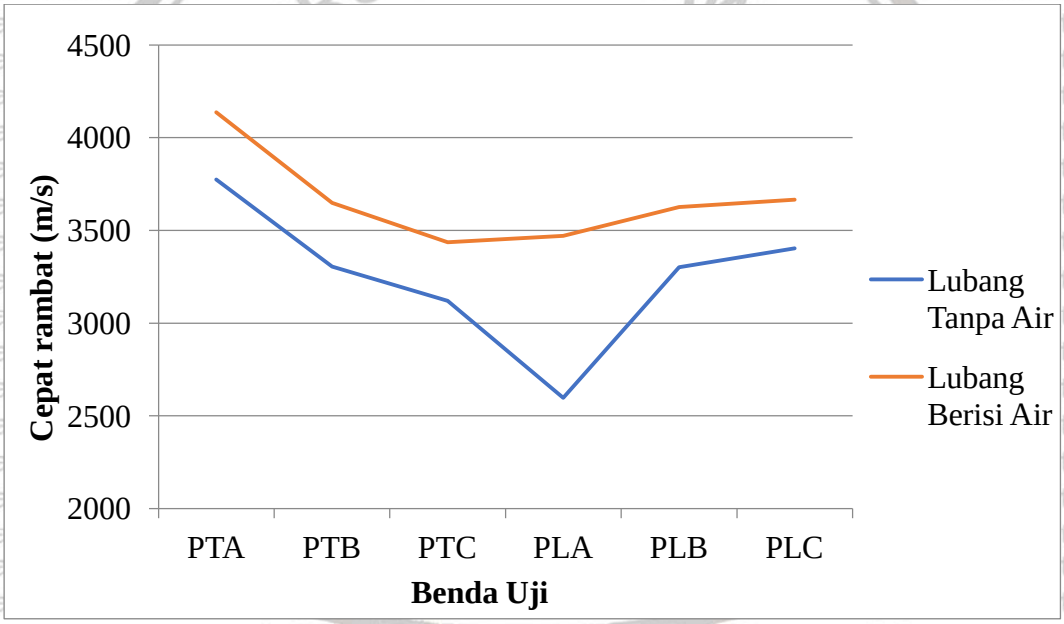
Dari kedua perhitungan diatas dapat disimpulkan bahwasanya ketika terdapat intrusi air di dalam beton maka kecepatan rambat gelombang akan bernilai lebih tinggi. Hal ini dapat mendukung hasil penelitian yang telah dilakukan. Berikut grafik perbandingan pengujian pada kondisi lubang tanpa air dan lubang berisi air dari hasil yang telah didapatkan.



Gambar 4.43 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Langsung



Gambar 4.44 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang)

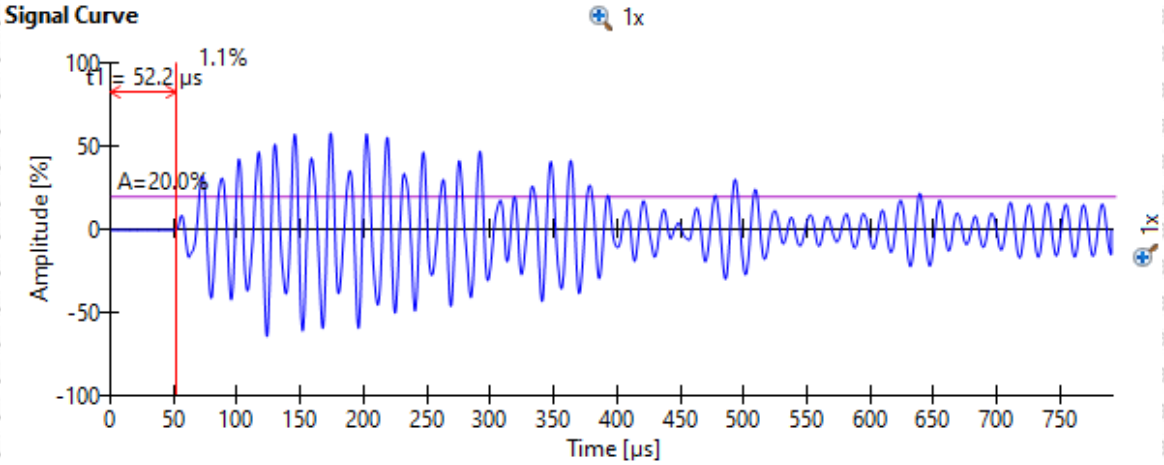


Gambar 4.45 Grafik Perbandingan 2 Kondisi Pengujian dengan Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton)

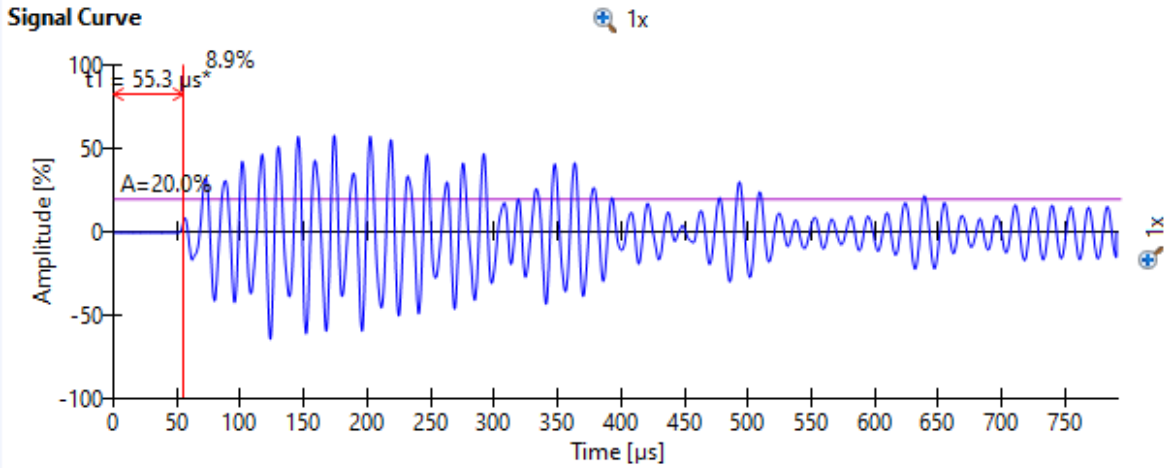
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

4.6. Analisis Waktu Transmisi dan Amplitudo Gelombang

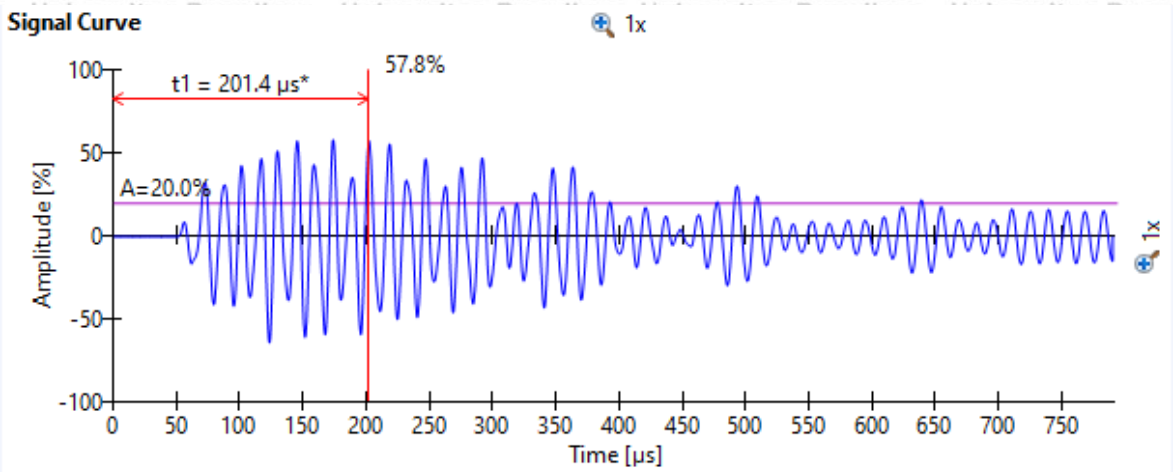
Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilakukan menggunakan alat PUNDIT PL-200 dari PROCEQ. Pada penggunaan umum, output dari pengujian UPV dengan mode pengukuran *pulse velocity* (PV) dan *surface velocity* (SV) adalah cepat rambat gelombang. Dari pengujian yang dilakukan juga akan didapatkan output asli berupa *waveform* yang kemudian dianalisis menggunakan *software* PL-Link untuk memperoleh parameter – parameter gelombang, seperti waktu transmisi dan amplitude gelombang. Parameter ini diambil pada keseluruhan pengujian yang dilakukan. Untuk data parameter – parameter yang diambil dapat dilihat pada *Gambar 4.46* sampai dengan *Gambar 4.49*.



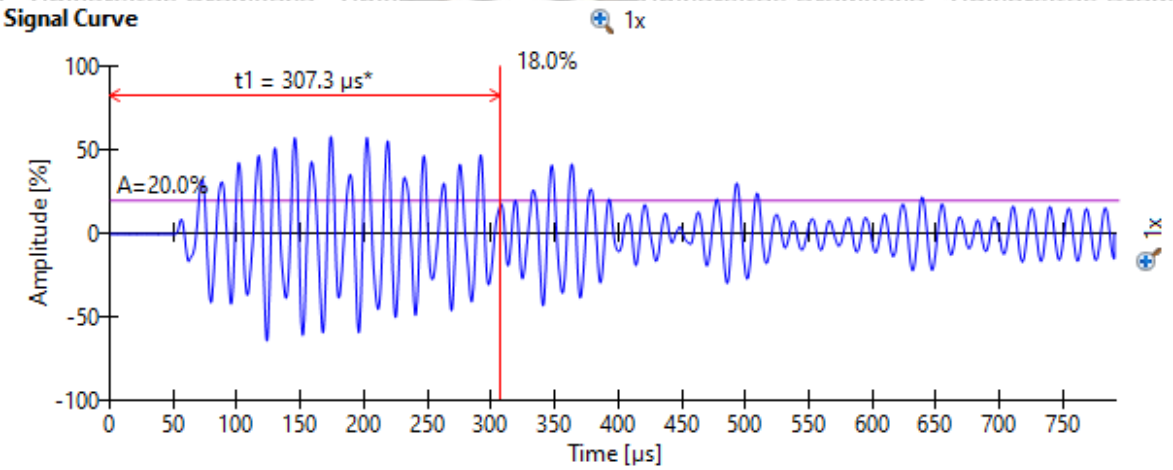
Gambar 4.46 Contoh Pengambilan Parameter T_0



Gambar 4.47 Contoh Pengambilan Parameter T_1 dan A_1



Gambar 4.48 Contoh Pengambilan Parameter T_{maks} dan A_{maks}



Gambar 4.49 Contoh Pengambilan Parameter T_2 dan A_2

4.6.1. Balok Normal

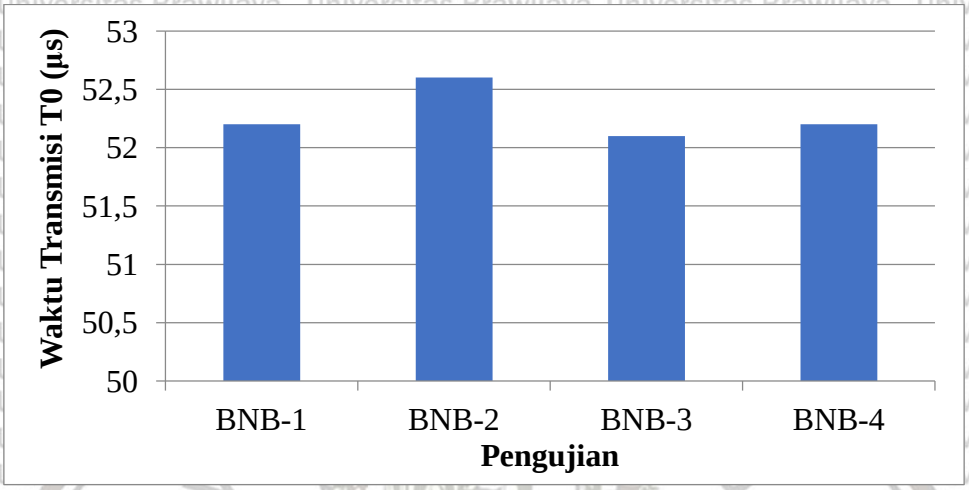
Pengujian pada balok normal dilakukan dengan 2 metode, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*). Data parameter *waveform* pada balok normal dapat dilihat pada Tabel 4.23.

Tabel 4.23
Data Parameter *Waveform* pada Balok Normal

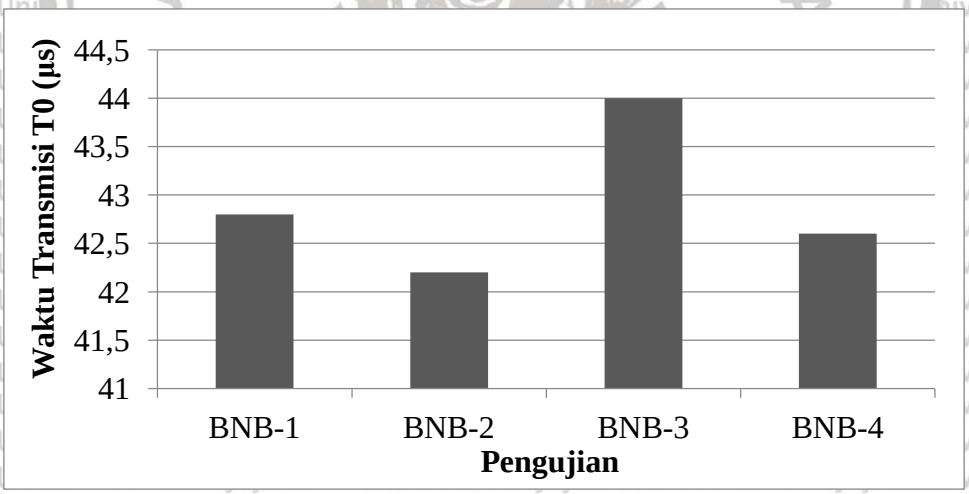
Benda Uji	Metode	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
BNB (Balok Normal - B)	Direct	3831	52,2	55,3	201,4	307,3	8,9	57,8	18
		3802	52,6	56	219	320	9,7	60	12,1
		3839	52,1	55,9	130,5	101,7	11,3	53,3	16,4
		3831	52,2	55,9	145,8	102,1	10	44,5	15,2
	Indirect	3226	42,8	55	261,3	175,1	7,7	100,1	19,3
		3205	42,2	54	261,3	185,8	5,8	100,1	15
		3289	44	54,1	261,3	175,5	5,8	100,1	18,8
		3240	42,6	55	261,3	159,7	4,7	100,1	22,5

Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

Dapat dilihat dari Tabel 4.23, bahwa pengujian dengan metode tidak langsung memiliki waktu transmisi yang lebih cepat dibandingkan dengan metode langsung. Waktu transmisi tercepat pada metode tidak langsung diperoleh sebesar 42,2 µs dengan amplitudo maksimum sebesar 100,1%. Sedangkan pada metode langsung waktu transmisi tercepat diperoleh sebesar 52,1 µs. Amplitudo terbesar pada metode ini diperoleh pada saat nilai waktu transmisi terlambat, yaitu sebesar 52,6 µs dan amplitudo maksimum sebesar 60%.



Gambar 4.50 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung pada Balok Normal



Gambar 4.51 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung pada Balok Normal

Dari *Gambar 4.50* dan *Gambar 4.51*, dapat disimpulkan bahwa pada pengujian metode tidak langsung balok normal diperoleh waktu transmisi (T_0) yang bernilai lebih kecil dibandingkan metode langsung. Hal ini menunjukkan T_0 metode tidak langsung lebih cepat dibandingkan dengan metode langsung.

4.6.2. Balok dengan Lubang Arah Transversal

Pengujian pada balok dengan lubang arah transversal dilakukan dengan 2 metode, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*). Pada pengujian metode tidak langsung terdapat 2 variasi, yaitu saat *transmitter* berada tepat lubang dan saat *transmitter* berada tepat pada beton.

Pengujian pada balok berlubang ini juga dilakukan dengan 2 kondisi, yaitu pengujian dengan kondisi lubang tanpa air dan berisi air. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh intrusi air pada parameter *waveform*. Berikut data parameter *waveform* pada balok dengan lubang arah transversal.

4.6.2.1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Tabel 4.24

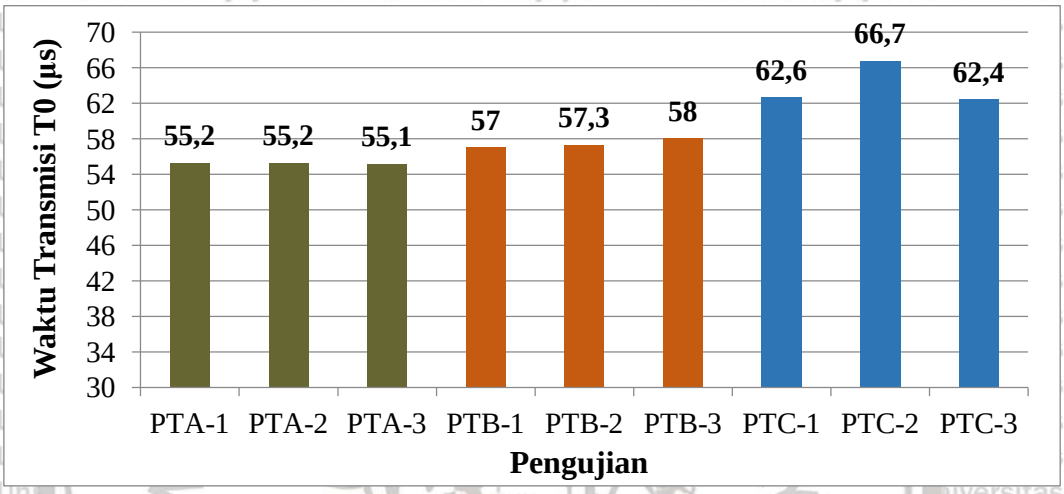
Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Transversal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (μs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3623	55,2	58,1	256,4	138,2	3,3	40,2	7,7
		3623	55,2	56,9	357,8	185,1	2	16,5	4,1
		3630	55,1	58,1	431,8	122,5	5,4	49,2	6,8
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3509	57	59,9	527,4	241,7	1,8	51	6,6
		3490	57,3	59,5	529,2	123,5	1,7	43,8	7,3
		3448	58	59,9	528,9	123,6	1,5	48,1	8,4
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3195	62,6	63,3	143,1	199,5	1,2	62	9,7
		2999	66,7	79	258,6	158,6	8,4	51,7	13,4
		3205	62,4	64	390	185,8	1,4	69,7	18,5
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3643	54,9	57,7	462,2	166,2	2,8	35,9	5,1
		3610	55,4	56,8	90,7	128,4	1,7	12,4	7,2
		3650	54,8	56,4	460,2	130,1	1,7	15,4	5,6
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3540	56,5	59	259,1	155	1,7	58,4	5,3
		3597	55,6	59,5	361,7	151,1	2,5	82,7	4,1
		3571	56	59,5	360,9	136,8	2,5	81,7	7,4
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3289	60,8	64,4	245,3	161,4	2,5	100,1	6,9
		3279	61	63,9	215,1	158,2	2,4	100,1	12,6
		3295	60,7	62,9	452,4	197,3	1,6	66,8	15,4

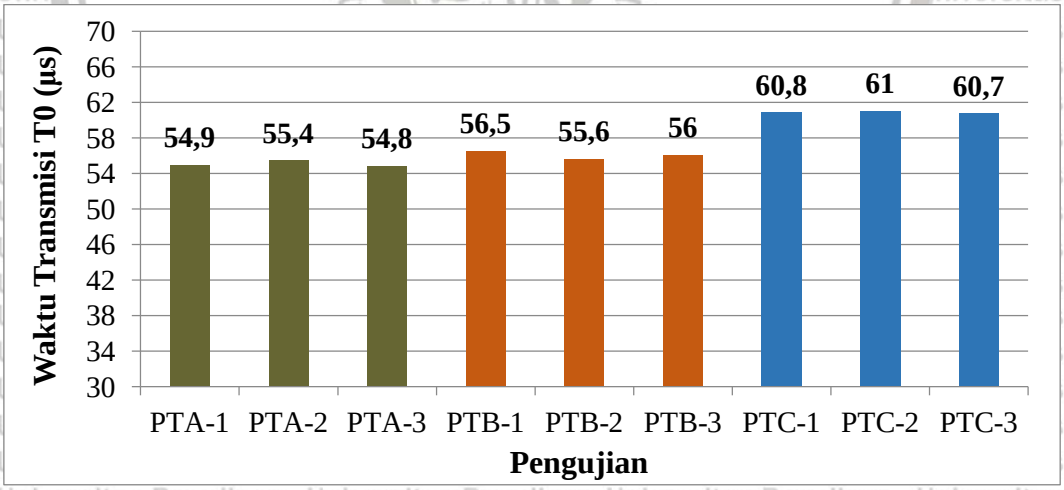
Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

Dari Tabel 4.24, dapat dilihat bahwa hasil dari pengujian metode langsung adalah semakin besar diameter lubang pada balok akan didapatkan waktu transmisi (T_0) yang semakin besar yang berarti memiliki makna semakin lambat. Hal ini berlaku baik pada kondisi pengujian lubang tanpa air maupun lubang berisi air. Kondisi pengujian lubang tanpa air didapatkan nilai waktu transmisi yang lebih lambat jika dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang berisi air.

Pada benda uji PTA, pada kondisi lubang tanpa air didapatkan waktu transmisi sebesar 55,1 µs dengan amplitudo maksimum sebesar 49,2%. Sedangkan pada kondisi lubang berisi air didapatkan waktu transmisi lebih cepat, yaitu sebesar 54,8 µs dengan amplitudo maksimum sebesar 15,4%. Pada benda uji PTC dengan diameter lubang yang lebih besar, didapatkan nilai waktu transmisi yang lebih lambat jika dibandingkan dengan benda uji PTA, yaitu sebesar 66,7 µs pada kondisi lubang tanpa air dan 61 µs pada kondisi lubang berisi air.



Gambar 4.52 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal



Gambar 4.53 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal

Dari hasil pengolahan data yang didapatkan, pada pengujian metode langsung pada benda uji balok dengan lubang arah transversal memiliki kesimpulan bahwasanya intrusi air pada balok berpengaruh pada waktu transmisi yang didapatkan yaitu akan menjadi semakin lebih cepat (bernilai lebih kecil). Selain itu, diameter lubang pada balok juga

memberikan pengaruh, yaitu nilai waktu transmisi menjadi semakin besar (lambat) ketika gelombang menempuh balok dengan diameter lubang yang lebih besar.

4.6.2.2. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Lubang

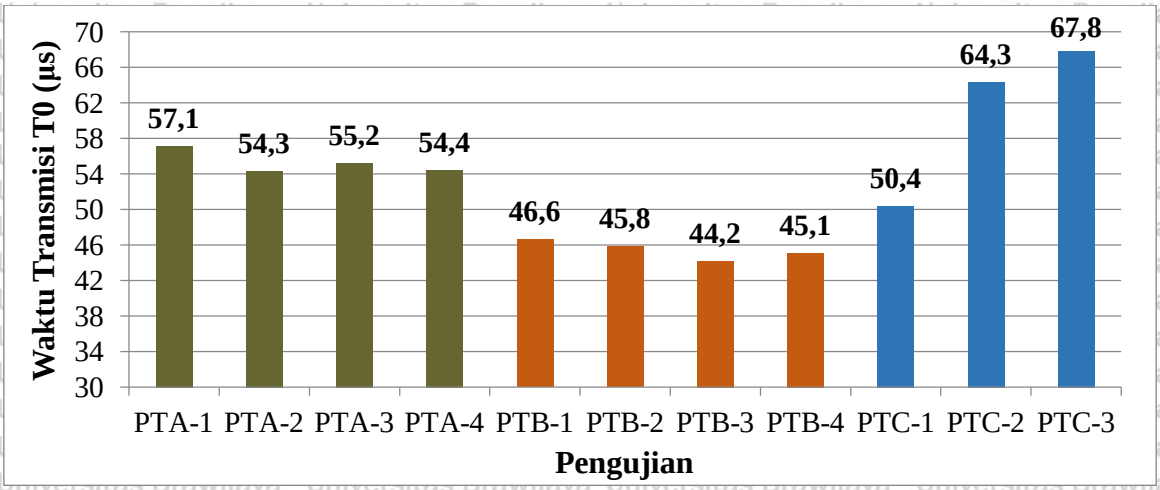
Tabel 4.25
Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Transversal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3741	57,1	59,6	199	148,3	1,4	34,4	14,3
		3947	54,3	55,2	226,2	171,1	1,4	66,4	16,1
		3731	55,2	56,1	131,9	147	1,2	47,6	14
		3937	54,4	55,2	145	196,5	1,4	61,4	17,1
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3119	46,6	56,9	218,6	159,5	2,3	93	28,6
		3138	45,8	56,9	202,6	161,3	2,2	100,1	20,4
		2994	44,2	56,5	129,8	160,4	2,1	100,1	27,3
		3067	45,1	55,2	148,9	132,8	3,3	85,5	31,5
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	2287	50,4	53,8	304,4	215,8	3,2	62,1	21,8
		2206	64,3	79,4	244,5	187,2	6,6	41	14,2
		2161	67,8	80,7	245,4	216,8	4,8	46,9	27
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	3827	51,7	54,3	140,4	193,8	2,4	100,1	48,5
		4298	48,1	52,1	138,7	196,4	2,6	100,1	22,4
		3886	52,2	53	156,4	186,7	1,3	54,9	10,3
		4286	49,5	54,3	122,7	167,5	1,6	100,1	23,6
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3597	45,6	56,9	219,5	162,6	3,4	66,3	15,5
		3650	45	56,1	133,3	175,1	3,9	100,1	35,7
		3641	43,6	54,7	230,2	186,2	4	76,7	13,4
		3704	45,7	56,1	204,4	176	2,9	100,1	43,9
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	2747	46,2	50,7	306,6	191,7	2,5	43,1	11,6
		2852	46,8	50,3	125,1	202,8	2,5	33,3	14,2
		2814	47,3	52	126,9	233,3	1,8	36,1	10,4
		2788	54,3	65,3	245,8	189,5	2	48,9	10,7

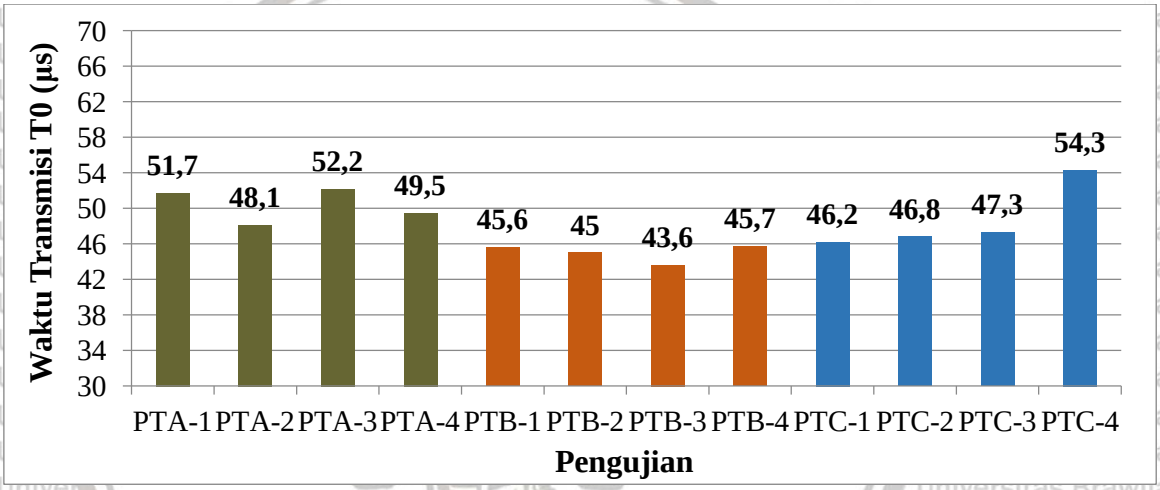
Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

Dari Tabel 4.25, dapat dilihat bahwa pada pengujian metode tidak langsung dengan *transmitter* tepat lubang pada balok lubang arah transversal menghasilkan nilai waktu transmisi (T_0) tercepat pada benda uji dengan diameter lubang 3 inch (PTB). Waktu transmisi tercepat yaitu sebesar 44,2 µs dan amplitudo maksimum sebesar 100,1% pada kondisi pengujian lubang tanpa air. Sedangkan pada kondisi pengujian lubang berisi air, didapatkan waktu transmisi tercepat 43,6 µs dan amplitudo maksimum sebesar 76,7%.

Waktu transmisi terlambat (terbesar) diperoleh oleh benda uji dengan diameter lubang terkecil, yaitu PTA. Nilai waktu transmisi terbesar bernilai 57,1 µs pada kondisi lubang tanpa air dan 52,2 µs pada kondisi pengujian lubang berisi air.



Gambar 4.54 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Lubang) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal



Gambar 4.55 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Lubang) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal

Dari *Gambar 4.54* dan *Gambar 4.55*, dapat disimpulkan bahwa dengan adanya intrusi air pada balok akan dihasilkan waktu transmisi yang lebih cepat dibandingkan dengan balok dengan kondisi lubang tanpa air.

4.6.2.3. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton

Tabel 4.26

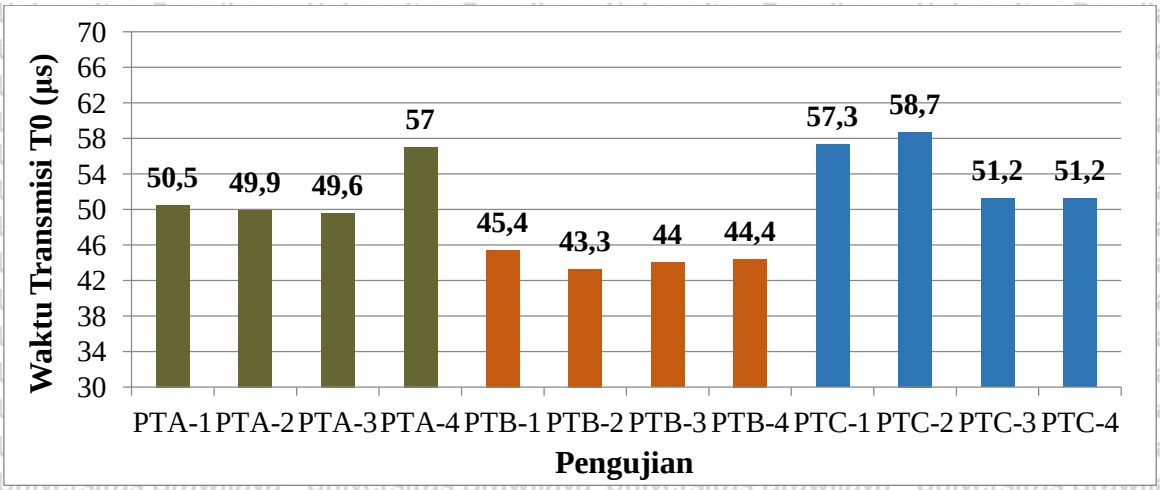
Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) pada Balok Lubang Arah Transversal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	4132	50,5	72,4	212,3	295,1	7,4	69,2	13,1
		3472	49,9	73,6	354,6	237,7	2,4	36,4	11
		3505	49,6	69,7	341,6	284,7	2,1	60,1	15
		3989	57	70,2	328,2	239,6	3,8	52	15,2
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3275	45,4	56,9	367,5	179,7	6,3	99,1	33,5
		3212	43,3	55,1	130,6	229,7	7,9	100,1	11,9
		3425	44	55,6	365,7	281,6	7	88,2	22,5
		3311	44,4	55,6	249,9	278,9	6,5	96,7	30
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3086	57,3	72,3	254,7	138,9	8,3	31,7	7,1
		3138	58,7	74,9	257,5	145	11,2	38,5	8,5
		3158	51,2	77,3	130,4	160,4	16,8	86,6	5,6
		3099	51,2	77,3	258,8	157,7	17,3	79	7
Lubang Berisi Air	PTA (Pipa Transversal dengan diameter 2inch)	4087	48,4	52,5	175	146,1	2,3	61,5	15,7
		4032	47,7	52	121,5	227,5	2,9	67,6	19,6
		4225	48,5	51,6	123,4	157,8	1,5	33,5	13,8
		4202	47,7	50,5	122,8	227,5	3,1	75,1	13,1
	PTB (Pipa Transversal dengan diameter 3inch)	3472	43,8	56,4	152,1	194,9	10,3	100,1	30,1
		3563	45,3	57,6	134	168	7,9	100,1	21,5
		3722	45,5	56,8	118,1	189,5	6,9	100,1	39,6
		3836	43,9	56,3	148,5	163	6,3	100,1	44,3
	PTC (Pipa Transversal dengan diameter 4inch)	3378	51,6	53,3	258,3	158,2	1,5	70,4	14,1
		3597	46,8	52,5	257	185,9	1,5	67,8	15,1
		3480	51,5	54,2	244,9	202,4	1,7	64,6	30,2
		3289	49,8	52,9	258,8	157,7	2,3	89,1	30,4

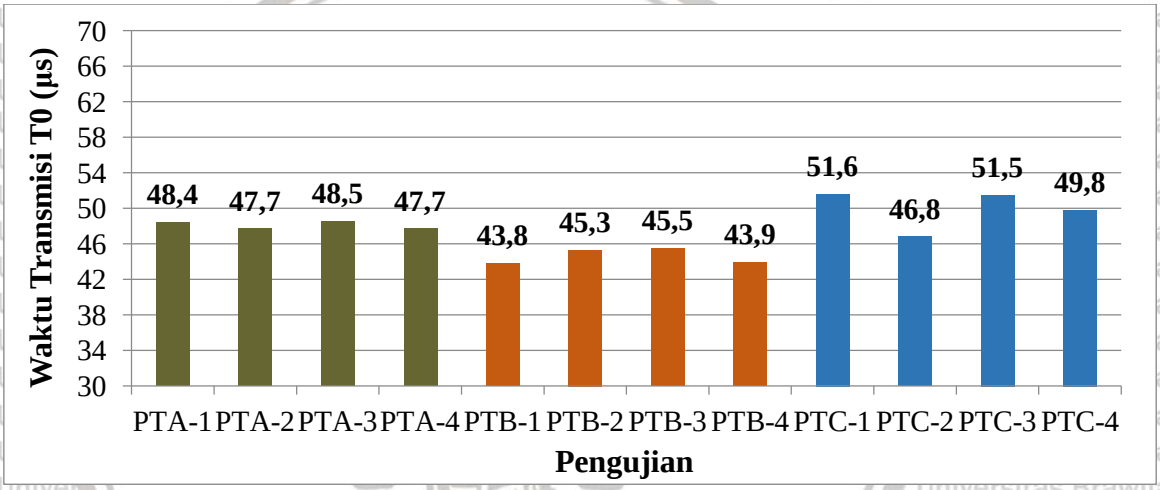
Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

Sama halnya dengan metode pengujian *transmitter* berada tepat lubang, pada pengujian ini nilai waktu transmisi tercepat juga didapatkan dari benda uji PTB, yaitu balok dengan lubang berdiameter sebesar 3 inch. Namun lain halnya pada perolehan nilai waktu transmisi terlambat (terbesar), yaitu diperoleh oleh benda uji dengan diameter lubang terbesar (PTC).

Dari Tabel 4.26, dapat dilihat bahwa waktu transmisi (T_0) terkecil yang berarti tercepat diperoleh oleh benda uji PTB, yaitu sebesar 45,4 µs pada kondisi lubang tanpa air dan 43,8 µs pada kondisi lubang berisi air. Sedangkan waktu transmisi terbesar yang diperoleh oleh benda uji PTC bernilai sebesar 58,7 µs pada kondisi lubang tanpa air dan 51,6 µs pada kondisi lubang berisi air.



Gambar 4.56 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Beton) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Transversal



Gambar 4.57 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (Transmitter tepat Beton) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Transversal

Dari hasil pengujian diatas dapat disimpulkan bahwa pada kondisi pengujian lubang berisi air akan diperoleh waktu transmisi yang lebih cepat (bernilai kecil) jika dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air.

4.6.3. Balok dengan Lubang Arah Longitudinal

Pengujian pada balok dengan lubang arah longitudinal dilakukan dengan 2 metode, yaitu metode langsung (*direct method*) dan metode tidak langsung (*indirect method*). Sama halnya dengan balok lubang arah transversal, pada pengujian metode tidak langsung terdapat 2 variasi, yaitu saat *transmitter* berada tepat lubang dan saat *transmitter* berada tepat pada beton.

Pengujian pada balok berlubang ini juga dilakukan dengan 2 kondisi, yaitu pengujian dengan kondisi lubang tanpa air dan berisi air. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh intrusi air pada parameter *waveform*. Berikut data parameter *waveform* pada balok dengan lubang arah longitudinal.

4.6.3.1. Metode Langsung (*Direct Method*)

Tabel 4.27
Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Langsung pada Balok Lubang Arah Longitudinal

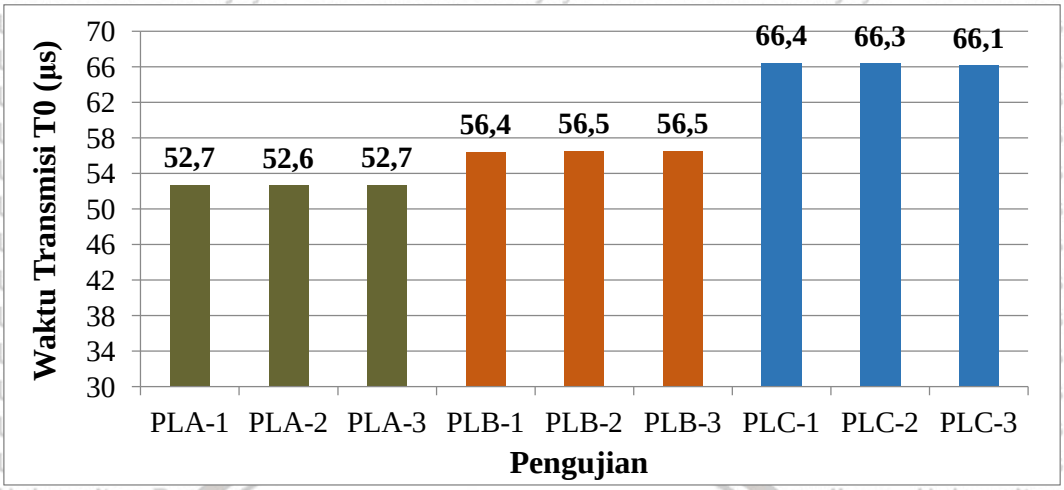
Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3795	52,7	56,4	134,4	330,4	3,8	68,4	8,7
		3802	52,6	56	135	165,5	3	49,4	7,1
		3795	52,7	55,3	133,9	165,9	2,4	43,6	6,8
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3546	56,4	58,3	467,9	600,4	1,7	63,5	8,3
		3540	56,5	58,3	350,4	599,9	1,7	81,4	15,3
		3540	56,5	58,5	291,1	618,1	1,9	87,8	4,7
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3012	66,4	79,1	460,6	403,9	4,5	53,4	18,6
		3017	66,3	79,5	491,1	404,8	6,3	62,6	21,3
		3026	66,1	79,5	391,9	282,2	6,2	65	13,7
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3824	52,3	55,9	136,2	355,2	4,5	69,1	19,1
		3831	52,2	55,7	136,2	166,8	4,5	60,8	9,7
		3824	52,3	54,8	134	354,4	2,6	43,4	4
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3584	55,8	57,4	363,7	596,9	2	85,5	26
		3610	55,4	57,4	261,1	595,4	2,5	95	38,6
		3604	55,5	58,3	203,5	595,9	2,8	101,1	20,7
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3333	60	62,3	140,7	408,7	1,9	101,1	12,4
		3339	59,9	61,7	154,9	408,8	1,5	71,7	10,2
		3333	60	60,5	225,7	413,2	1,4	63,1	20

Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

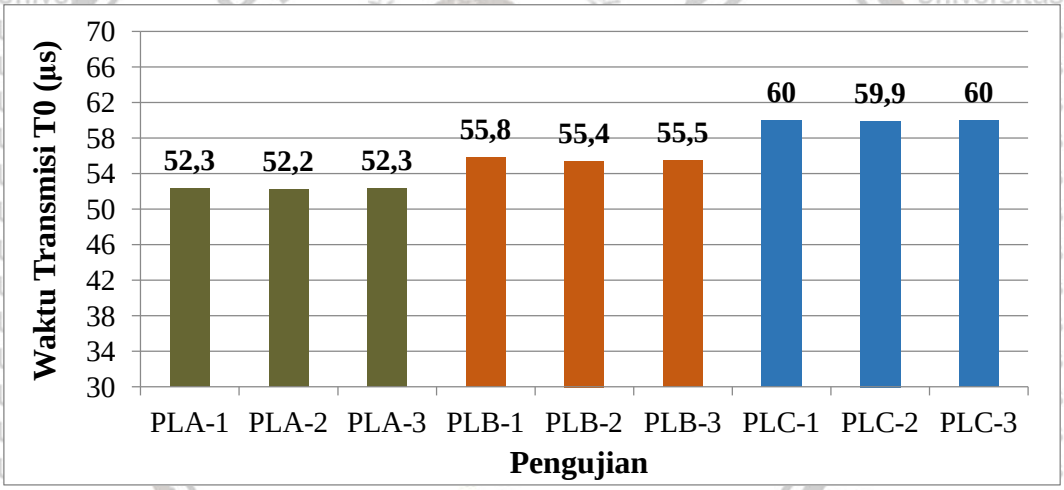
Dapat dilihat pada Tabel 4.27, hasil parameter pengujian metode langsung pada benda uji balok lubang arah longitudinal menunjukkan bahwa semakin besar diameter lubang pada balok maka akan menyebabkan waktu transmisi gelombang semakin lambat (bernilai lebih besar). Hal ini dapat ditunjukkan dari data yang didapatkan, yaitu benda uji PLA memiliki waktu transmisi sebesar 52,7 µs, PLB memiliki waktu transmisi sebesar 56,5 µs, dan PLC memiliki waktu transmisi sebesar 66,4 µs pada kondisi pengujian lubang tanpa air.

Adanya intrusi air pada benda uji juga memberikan pengaruh pada waktu transmisi dan amplitudo gelombang yang dihasilkan. Sebagai contoh, pada benda uji PLA, didapatkan waktu transmisi 52,7 µs dengan amplitudo maksimum sebesar 68,4% pada kondisi pengujian lubang tanpa air. Sedangkan pada kondisi pengujian lubang berisi air, didapatkan nilai waktu transmisi sebesar 52,3 µs dengan amplitudo maksimum sebesar

69,1%. Maka dapat disimpulkan bahwasanya intrusi air pada balok akan menyebabkan nilai waktu transmisi semakin cepat (bernilai kecil) dan amplitudo maksimum yang diperoleh akan semakin besar.



Gambar 4.58 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal



Gambar 4.59 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Langsung Lubang Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Dari *Gambar 4.58* dan *Gambar 4.59*, dapat disimpulkan bahwa waktu transmisi (T_0) yang diperoleh dari pengujian metode langsung pada balok lubang arah longitudinal menghasilkan nilai yang lebih cepat (bernilai kecil) saat kondisi pengujian lubang berisi air.

4.6.3.2. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Lubang

Tabel 4.28

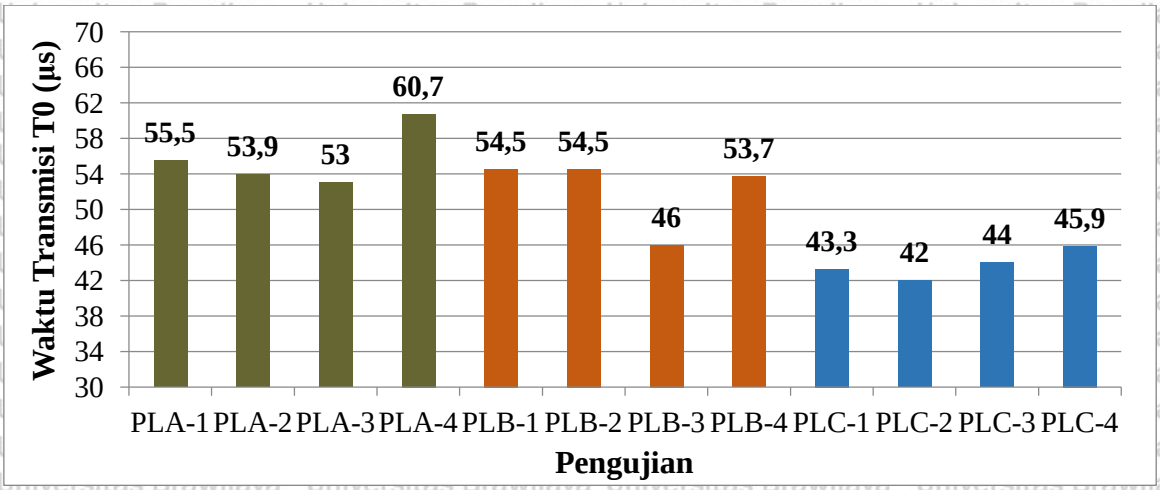
Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	4132	55,5	57,1	333,5	389,8	1,5	44,9	14,2
		4076	53,9	55,4	188,1	388,9	1,4	42,3	10,6
		4054	53	54,5	187,8	288,5	1,6	38,8	6
		4000	60,7	70,6	316,1	359,7	1,7	23,3	12,9
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3341	54,5	57,1	188,1	159,4	1,6	38,3	7,3
		3464	54,5	55,4	98,1	185,5	1,1	18,7	5,3
		3012	46	58,3	366,3	265,5	4,6	88,1	24,4
		3580	53,7	56,1	366,8	293,8	3,2	89,8	12,2
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3311	43,3	53,9	453,4	257,1	4,8	75,6	16,3
		3386	42	53	189,4	259,7	5,3	100,1	14,8
		2953	44	54,8	453,9	230,9	4,1	59,6	19,6
		2959	45,9	56,6	455,2	350,8	3,2	61,9	12
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	4225	51,5	54,8	186	382	3,3	43,3	7,8
		4237	53,1	55,7	186,7	374,7	3,7	78,6	11,2
		4144	54,5	56,6	416,7	373,4	2,6	60,1	14,4
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3769	53,2	55,2	420,8	200	2,1	33,5	9,3
		3704	52,2	54,8	182	271,1	2,9	46,2	4,4
		3722	43,1	54,8	97,3	286,7	8	100,1	26,5
		3778	45	55,2	403	242,5	5,7	100,1	10,7
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3151	53,2	54,9	183,4	241,8	1,4	28,8	8,5
		3425	55,1	57,1	560,1	139,7	1,4	30,3	6,9
		3497	56,4	58,3	227,8	154,8	1,4	51,3	7,6
		3686	63,6	75	240,1	208,3	2,3	29,5	11

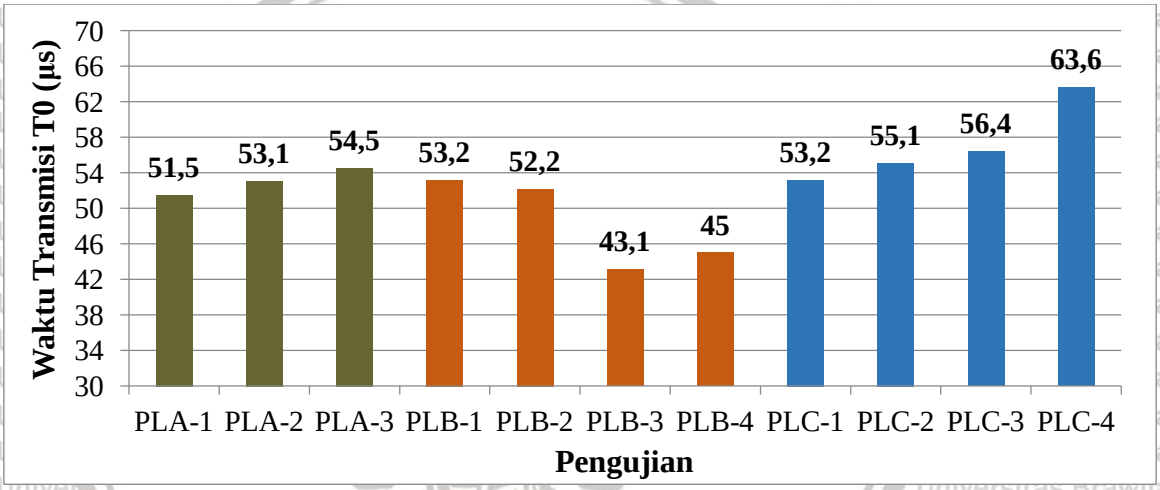
Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

Hasil data parameter yang didapatkan dari pengujian metode tidak langsung (*transmitter* tepat lubang) pada benda uji balok lubang arah longitudinal dapat dilihat pada Tabel 4.28. Dari tabel tersebut, berbeda halnya dengan hasil pengujian metode langsung, dapat disimpulkan bahwa semakin besar diameter lubang pada balok akan dihasilkan waktu transmisi yang lebih cepat (bernilai kecil). Dari benda uji PLA didapatkan hasil nilai waktu transmisi sebesar 55,5 µs, sedangkan benda uji PLC didapatkan hasil sebesar 42 µs.

Hal ini dikarenakan pengujian metode *indirect* pada benda uji balok lubang arah longitudinal, semakin kecil daerah beton di sekeliling lubang, maka akan menyebabkan gelombang merambat lebih cepat sehingga memiliki nilai waktu transmisi gelombang yang semakin cepat (bernilai kecil).



Gambar 4.60 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal



Gambar 4.61 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Adanya intrusi air juga berpengaruh pada hasil pengujian metode tidak langsung saat *transmitter* tepat lubang. Dari *Gambar 4.**60*** dan *Gambar 4.**61***, dapat dilihat bahwa pada kondisi pengujian lubang berisi air memiliki waktu transmisi (T_0) yang lebih cepat dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air.

4.6.3.3. Metode Tidak Langsung dengan *Transmitter* tepat Beton

Tabel 4.29

Data Parameter *Waveform* Pengujian Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) pada Balok Lubang Arah Longitudinal

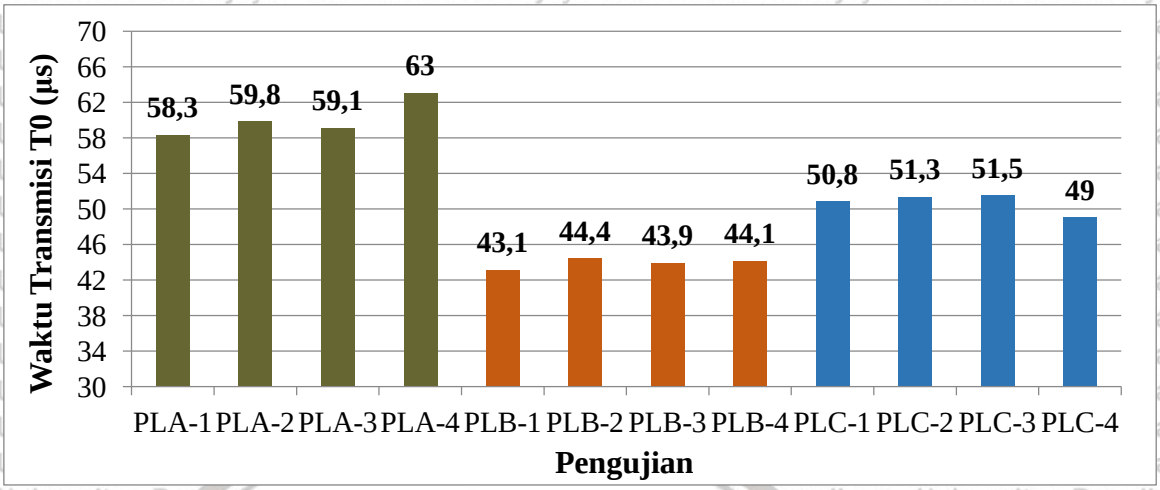
Bentuk Pengujian	Benda Uji	Cepat Rambat (m/s)	Waktu (µs)				Amplitudo (%)		
			T0	T1	Tmax	T2	A1	Amax	A2
Lubang Tanpa Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	2538	58,3	78,9	448,3	176,3	4	25,4	8,9
		2577	59,8	79,4	275	181,1	4,1	25,1	7
		2560	59,1	78	274,5	188,6	3,9	26,4	3,6
		2712	63	81,5	275,5	201,7	8,6	32,6	3,4
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3356	43,1	52,6	337,5	263,6	2,9	50,9	10,3
		3275	44,4	54,3	161,4	359,3	4,3	100,1	14,1
		3363	43,9	53	233,6	425,2	3,1	52,6	15,3
		3212	44,1	52,6	96,8	367,2	3,8	74,5	13,6
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3356	50,8	54,6	327,5	144,4	1,6	73,9	29
		3378	51,3	53,4	403,5	195,5	1,7	47,2	18,8
		3488	51,5	54,1	159,5	229,8	2,2	85	18,9
		3394	49	52,4	124,4	180,8	3	100,1	40,1
Lubang Berisi Air	PLA (Pipa Longitudinal dengan diameter 2inch)	3448	53,3	55,7	362,8	185,3	2,9	63,6	15
		3513	53,1	55,2	479,1	185,3	1,9	61,8	15,8
		3488	51,5	54,3	272,5	536,6	2,2	100,1	15,8
		3432	53,5	56,6	363,3	173,9	2,3	99,4	9,3
	PLB (Pipa Longitudinal dengan diameter 3inch)	3713	42,7	53,5	163,3	341,1	4,8	49,9	13
		3580	41,5	50,4	412,8	311,9	4,2	44,5	17
		3614	42,1	49,5	108	311,5	7	100,1	26,8
		3597	39,3	49,9	353,5	211	8,3	100,1	27,1
	PLC (Pipa Longitudinal dengan diameter 4inch)	3704	45,8	57,3	117,3	207,1	5,7	100,1	27,4
		3623	49,8	51,9	112	185,3	2,1	100,1	12,5
		3650	50,9	53	194,2	283,5	1,6	100	25,9
		3686	48,1	50,6	92,4	305,8	2,5	100,1	12,6

Sumber : Pengolahan Data melalui *Software* PL-Link

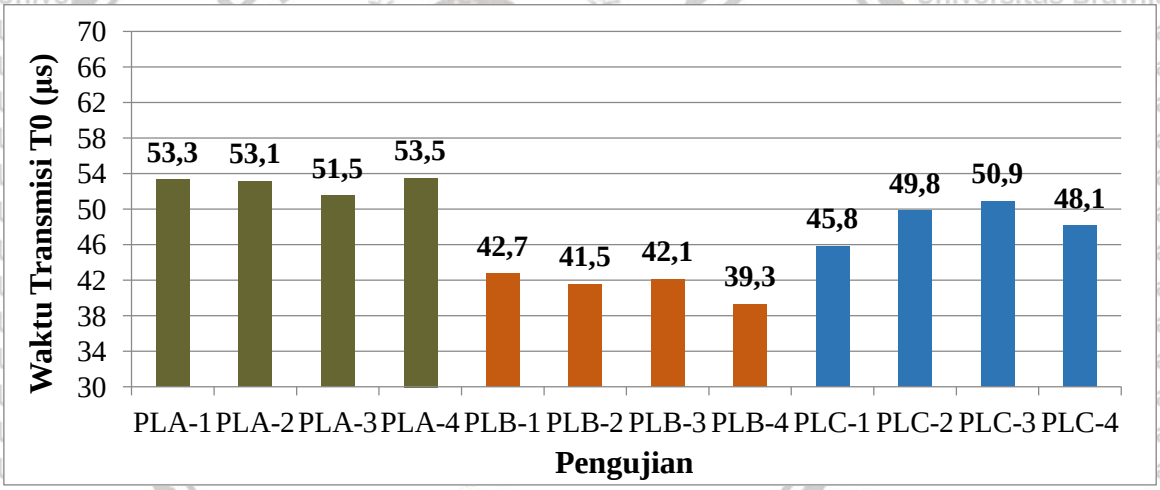
Sama halnya dengan pengujian metode *indirect* saat *transmitter* tepat lubang, pada pengujian meode ini juga didapatkan hasil bahwa nilai waktu transmisi akan bernilai lebih rendah pada benda uji dengan diameter lubang yang lebih besar. Dari Tabel 4.29, dapat dilihat bahwa waktu transmisi benda uji PLB lebih cepat dibandingkan dengan waktu transmisi benda uji PLA. Pada benda uji PLB didapatkan waktu transmisi sebesar 44,4 µs dan PLA sebesar 63 µs pada kondisi lubang tanpa air.

Pada kondisi pengujian lubang berisi air juga didapatkan kesimpulan yang sama, yaitu balok dengan diameter lubang lebih besar memiliki waktu transmisi yang lebih cepat. Sebagai contohnya, pada benda uji PLA didapatkan waktu transmisi sebesar 51,5 µs dan pada PLB sebesar 39,3 µs. Hal ini dikarenakan pada pengujian metode *indirect* saat *transmitter* berada tepat pada beton, semakin kecil atau sempit daerah beton yang mengelilingi lubang pada balok, maka akan menyebabkan gelombang yang dipancarkan *transmitter* bergerak lebih cepat dan menghasilkan waktu transmisi yang lebih kecil.

Semakin besar diameter lubang pada balok maka daerah beton yang mengelilingi lubang arah longitudinal akan semakin kecil sehingga meminimalisir gelombang menemui rongga pada beton.



Gambar 4.62 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Tanpa Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal



Gambar 4.63 Diagram Hasil Waktu Transmisi (T_0) Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Berisi Air pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Dari *Gambar 4.62* dan *Gambar 4.63*, dapat dilihat bahwa pada kondisi pengujian lubang berisi air memiliki waktu transmisi (T_0) yang lebih cepat dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air.

Intrusi air pada beton juga berpengaruh pada nilai waktu transmisi dan amplitudo gelombang yang dihasilkan. Dari data yang telah didapatkan, diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa kondisi pengujian dengan lubang berisi air akan memiliki waktu transmisi gelombang yang lebih kecil (cepat) dan amplitudo gelombang yang semakin besar dibandingkan dengan kondisi pengujian lubang tanpa air.

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

BAB V
PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Cepat rambat gelombang yang dihasilkan oleh beton berlubang bernilai lebih kecil dibandingkan cepat rambat gelombang pada balok normal. Hal ini berlaku hanya pada pengujian dengan menggunakan metode langsung (*direct method*). Sedangkan hasil pengujian dengan menggunakan metode tidak langsung (*indirect method*) pada benda uji balok berlubang cenderung lebih tinggi nilai cepat rambatnya jika dibandingkan dengan hasil pengujian balok normal. Hal ini terjadi dikarenakan pada metode tidak langsung pada balok berlubang terdapat 2 variasi pengujian, yaitu saat *transmitter* diletakkan tepat lubang dan diletakkan tepat pada daerah beton yang tidak terdapat lubang, yang mengakibatkan terjadinya perambatan gelombang hanya pada daerah beton yang tidak terdapat lubang. Diketahui bahwa gelombang yang dipancarkan oleh *transducer* tidak dapat merambat melalui udara. Oleh karena itu, ketika gelombang yang dipancarkan menemui lubang dalam beton dengan diameter yang cukup besar, maka gelombang akan langsung dipantulkan dan diterima oleh *receiver*. Hal inilah yang kemudian menghasilkan nilai cepat rambat gelombang beton berlubang yang lebih tinggi daripada balok normal pada pengujian dengan metode tidak langsung.

2. Adanya intrusi air pada beton memberikan pengaruh pada nilai cepat rambat gelombang yang dihasilkan oleh alat *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV). Pengujian yang dilakukan pada kondisi intrusi air, baik dengan menggunakan metode langsung maupun metode tidak langsung, diperoleh nilai cepat rambat yang lebih besar daripada beton berlubang. Pada benda uji balok lubang arah transversal, persentase rata – rata kenaikan nilai cepat rambat sebesar 2,56% dengan metode langsung dan 16,95% dengan metode tidak langsung variasi *transmitter* tepat lubang, serta 10,02% dengan metode tidak langsung variasi *transmitter* tepat beton. Sedangkan pada benda uji balok lubang arah longitudinal diperoleh persentase rata – rata kenaikan nilai cepat rambat sebesar 4,29%

dengan metode langsung, 8,08% dengan metode tidak langsung variasi *transmitter* tepat lubang, dan 17,05% dengan metode tidak langsung variasi *transmitter* tepat beton. Dari hasil yang telah didapatkan memberikan kesimpulan bahwa intrusi air pada beton berdampak pada kenaikan nilai cepat rambat gelombang yang dihasilkan oleh alat UPV.

3. Terdapat perbedaan pada perbandingan hasil cepat rambat gelombang yang dihasilkan dari kedua metode pada setiap benda ujinya. Pada balok normal didapatkan persentase perbandingan, yaitu V_i = 84,69% V_d. Sedangkan pada benda uji balok lubang arah transversal didapatkan persentase perbandingan antara metode langsung dengan metode tidak langsung saat *transmitter* tepat lubang, yaitu V_{iL} = 88,37% V_d pada kondisi balok berlubang dan V_{iL} = 99,83% V_d pada kondisi balok dengan intrusi air. Selain itu, didapatkan pula persentase perbandingan antara metode langsung dengan metode tidak langsung saat *transmitter* tepat beton, yaitu V_{iB} = 99,55% V_d pada kondisi balok berlubang dan V_{iB} = 106,85% V_d pada kondisi balok dengan intrusi air. Pada benda uji balok lubang arah longitudinal, didapatkan persentase perbandingan antara metode langsung dengan metode tidak langsung saat *transmitter* tepat lubang, yaitu V_{iL} = 102,02% V_d pada kondisi balok berlubang dan V_{iL} = 105,65% V_d pada kondisi balok dengan intrusi air. Sedangkan persentase perbandingan antara metode langsung dengan metode tidak langsung saat *transmitter* tepat beton, yaitu V_{iB} = 91,46% V_d pada kondisi balok berlubang dan V_{iB} = 100,45% V_d pada kondisi balok dengan intrusi air. Hasil cepat rambat gelombang pada kondisi balok dengan intrusi air menggunakan metode tidak langsung (*indirect*) relatif bernilai lebih cepat jika dibandingkan dengan metode langsung (*direct*).

5.2. Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yang ditinjau dari penelitian di laboratorium yang telah dilakukan dan hasil pengolahan data pengujian yang didapatkan. Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Pengujian dapat dilakukan pada variasi benda uji dengan posisi lubang yang miring atau arah perletakan lubang yang tidak simetris atau berada di tepi balok.
2. Dapat dilakukan kondisi pengujian lain seperti adanya perembesan air yang diperhitungkan sebagai variabel bebas.
3. Dilakukan pengujian pada balok dengan mutu tinggi, yaitu lebih dari 30 MPa.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, Lamis. 2018. *Dynamic Measurements for Determining Poisson's Ratio of Young Concrete*. Nordic Concrete Research. Sweden : KTH Royal Institute of Technology.

Badan Standarisasi Nasional. 2012. Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton (ASTM C 597 – 02, IDT). Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.

Badan Standarisasi Nasional. 2000. Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Jakarta : Badan Standarisasi Nasional.

Dipohusodo, Istimawan. 1993. Struktur Beton Bertulang. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.

International Atomic Energy Agency. 2002. *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17*. Vienna : Internatonal Atomic Energy Agency.

Latifah, Amike Nur, Sugeng P. Budio, dan Ming Narto Wijaya. 2020. Pengaruh Variasi *Coating* terhadap Kerapatan Beton Keropos dengan Menggunakan *Pulse Velocity* pada Alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Malang : Universitas Brawijaya.

Malhotra, V.M., dan N.J. Carino. 2004. *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton : CRC Press.

Nurlina, Siti. 2011. Teknologi Bahan I. Malang : Bargie Media.

PROCEQ. 2017. *SilverSchmidt & Hammerlink Operating Instructions*. Switzerland : Proceq.

PROCEQ. 2015. *Pundit PL-200 Operating Instructions*. Switzerland : Proceq.

PROCEQ. 2017. *Pundit Lab Operating Instructions*. Switzerland : Proceq.

Saputra, Teguh Dwi., Sugeng P. Budio, dan Indra Waluyohadi. 2017. Investigasi Rongga dan Kedalaman Retak pada Balok Beton dengan UPE dan UPV. Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Malang : Universitas Brawijaya.

Simatupang, R. Martin., Devi Nuralinah, dan Christin Remayanti. 2016. Korelasi Nilai Kuat Tekan Beton antara *Hammer Test*, *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dan *Compression Test*. Jurnal Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya (Rekayasa Sipil). Malang : Universitas Brawijaya.

Sukirman. 2014. Analisis Rembesan pada Bendung Tipe Urugan melalui Uji Hidrolik di Laboratorium Hidro FT UNSRI. Universitas Sriwijaya : Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan.

Suseno, Hendro. 2010. Bahan Bangunan untuk Teknik Sipil. Malang : Bergie Media.

Wang, Hailong., Qingbin Li. 2006. *Prediction of Elastic Modulus and Poisson's Ratio for Unsaturated Concrete*. International Journal of Solids and Structures, Science Direct. China : Tsinghua University.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN

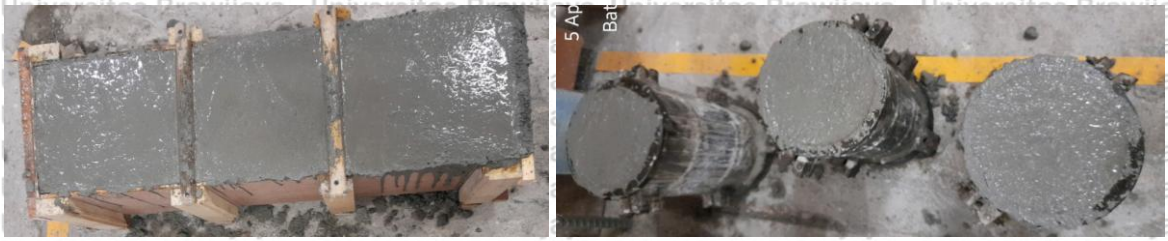
Lampiran 1. Pembuatan Benda Uji

(a) (b)

Gambar 1. Pemasangan Pipa PVC pada Bekisiting Balok. (a) Lubang Arah Transversal, (b) Lubang Arah Longitudinal.

(a) (b)

Gambar 2. (a) Pengadukan beton menggunakan *concrete mixer*, (b) Pengujian *slump*



(a) (b)

Gambar 3. Benda Uji. (a) Balok Normal, (b) Silinder.

Gambar 4. Benda Uji Balok dengan Lubang Arah Transversal dan Pemberian Beban pada Pipa agar tidak naik

Gambar 5. Benda Uji Balok dengan Lubang Arah Longitudinal dan Pemberian Beban pada Pipa agar tidak naik

(a)

(b)

Gambar 6. Proses *Curing* Benda Uji. (a) Balok, (b) Silinder.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Lampiran 2. Pengujian Kuat Tekan

(a)

(b)

(c)

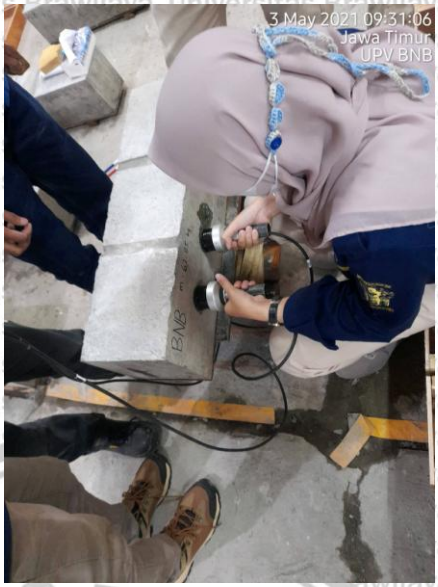
Gambar 7. *Compression Test*. (a) Menimbang Berat Benda Uji Silinder, (b) *Caping* Permukaan Silinder, (c) Uji Kuat Tekan menggunakan *Compression Test Machine*.

Gambar 8. Pengujian Kuat Tekan menggunakan *Hammer Test*

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

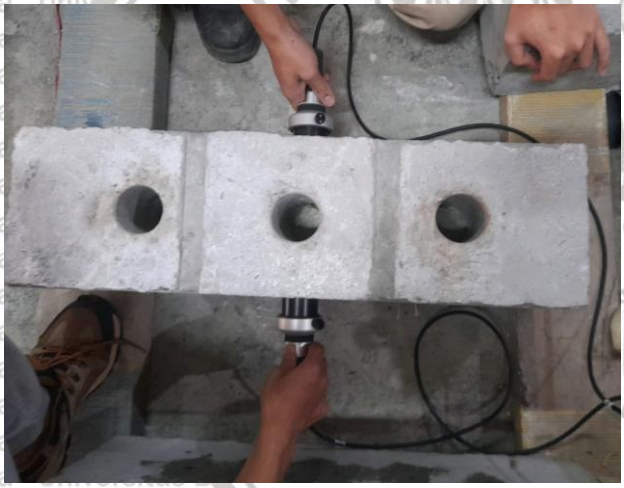
Lampiran 3. Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

(a)



(b)

Gambar 9. Pengujian Balok Normal. (a) Metode Langsung, (b) Metode Tidak Langsung.



(a)

(b)

Gambar 10. Pengujian Metode Langsung pada Kondisi Lubang Tanpa Air. (a) Balok Lubang Arah Transversal, (b) Balok Lubang Arah Longitudinal.

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(a) (b)

Gambar 11. Pengujian Metode Langsung pada Kondisi Lubang Berisi Air. (a) Balok Lubang Arah Transversal, (b) Balok Lubang Arah Longitudinal.

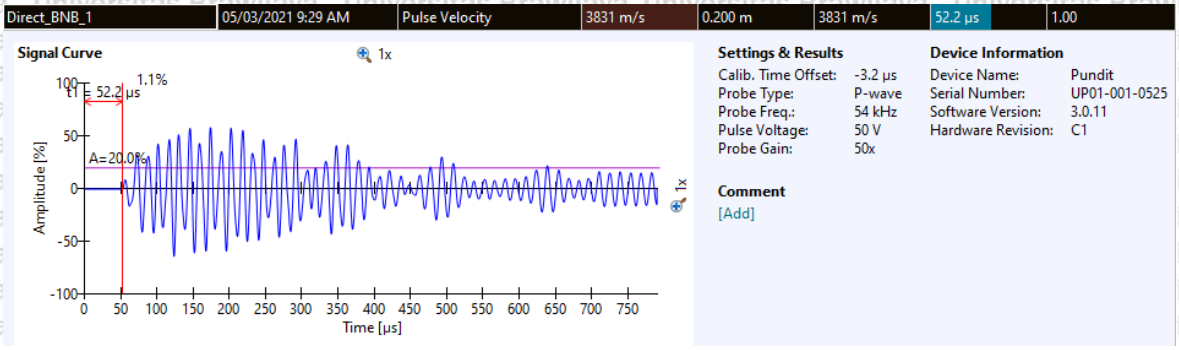
(a) (b)

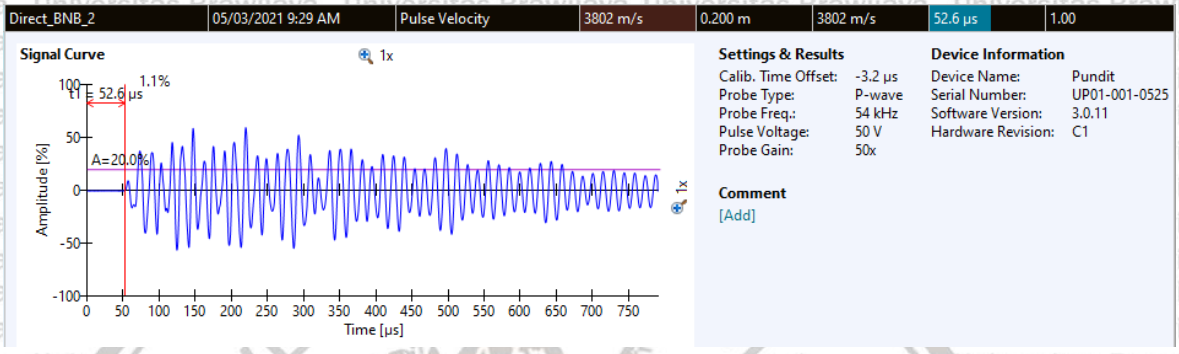
Gambar 12. Pengujian Metode Tidak Langsung pada Kondisi Lubang Tanpa Air. (a) Balok Lubang Arah Transversal, (b) Balok Lubang Arah Longitudinal.

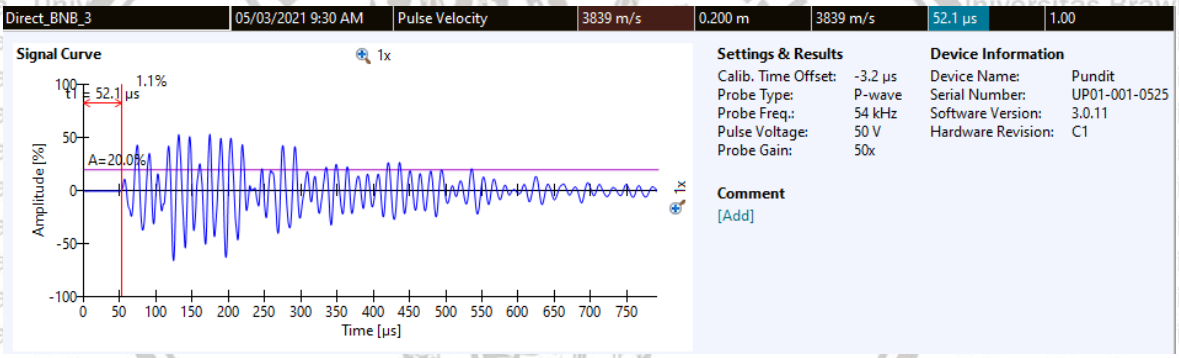
(a) (b)

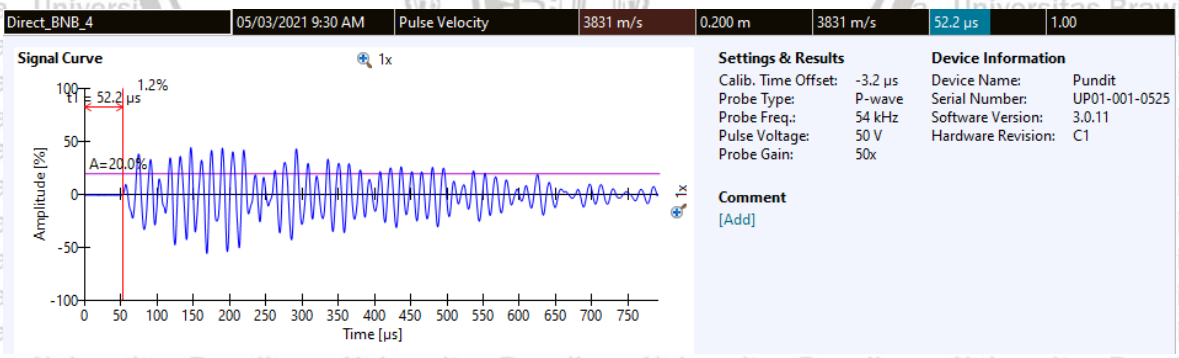
Gambar 13. Pengujian Metode Tidak Langsung pada Kondisi Lubang Berisi Air. (a) Balok Lubang Arah Transversal, (b) Balok Lubang Arah Longitudinal.

Lampiran 4. *Waveform* Pengujian pada Balok Normal



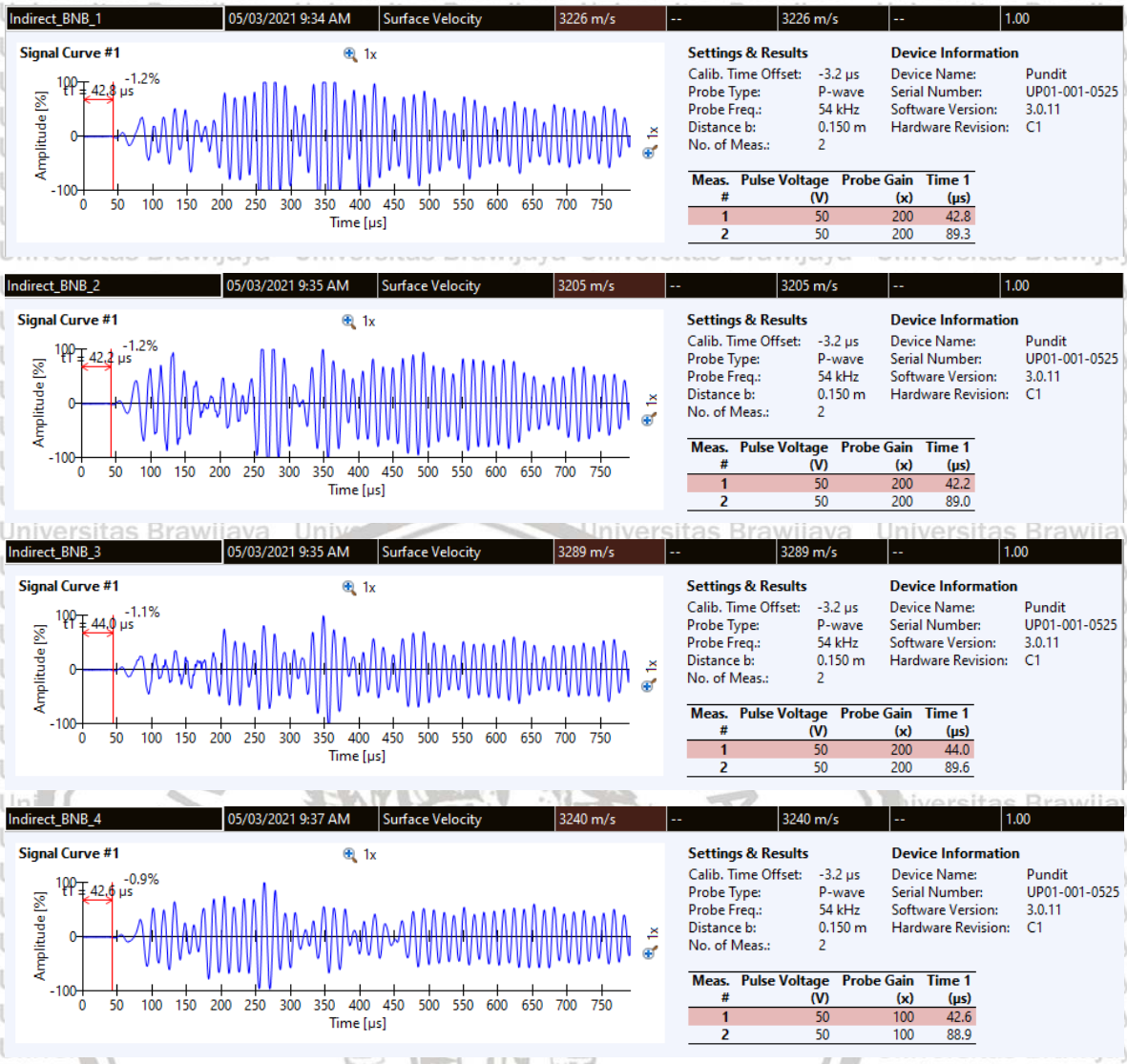






Gambar 14. Waveform pada Balok Normal Metode Langsung

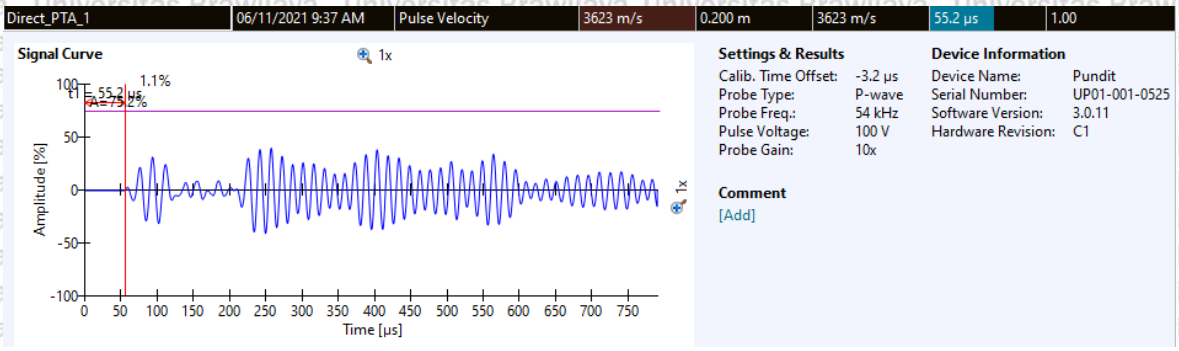
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

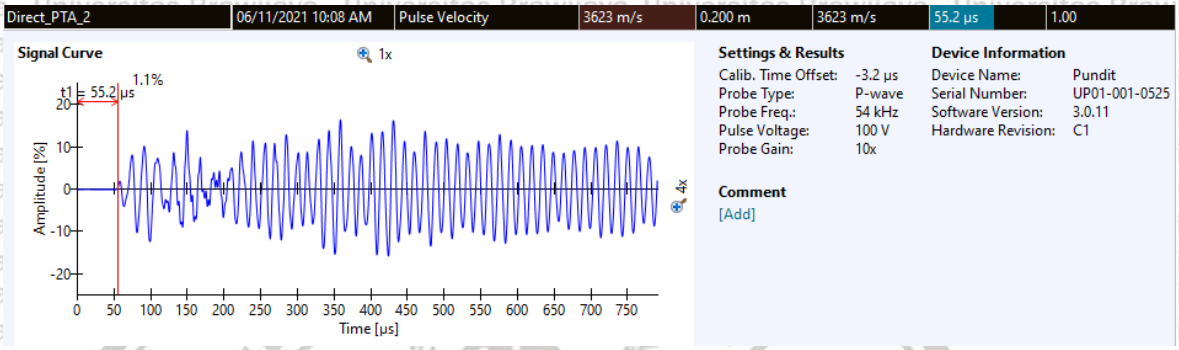


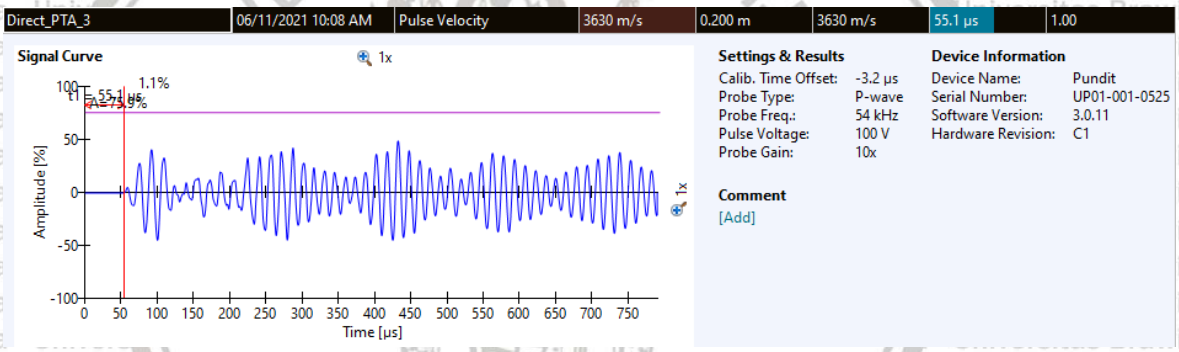
Gambar 15. Waveform pada Balok Normal Metode Tidak Langsung

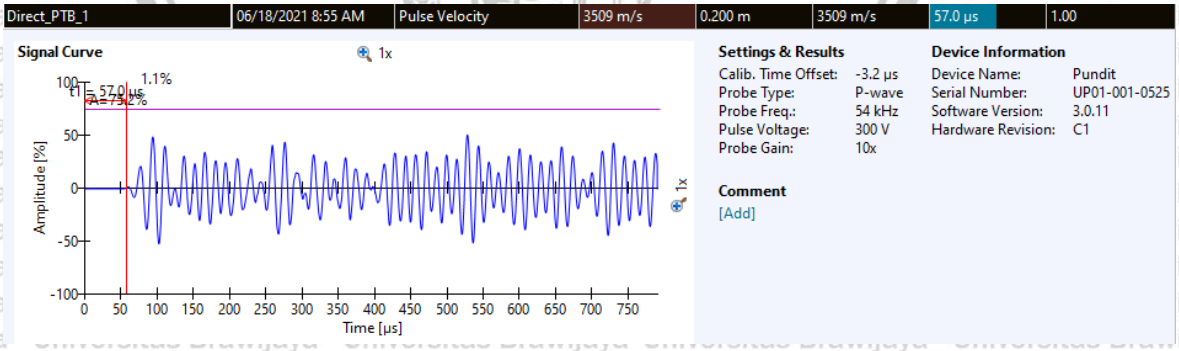
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

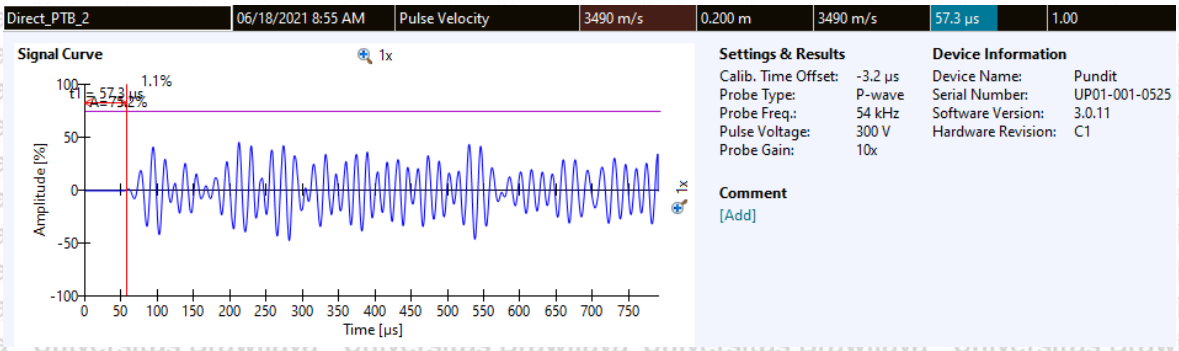
Lampiran 5. *Waveform* Pengujian pada Balok Lubang Arah Transversal

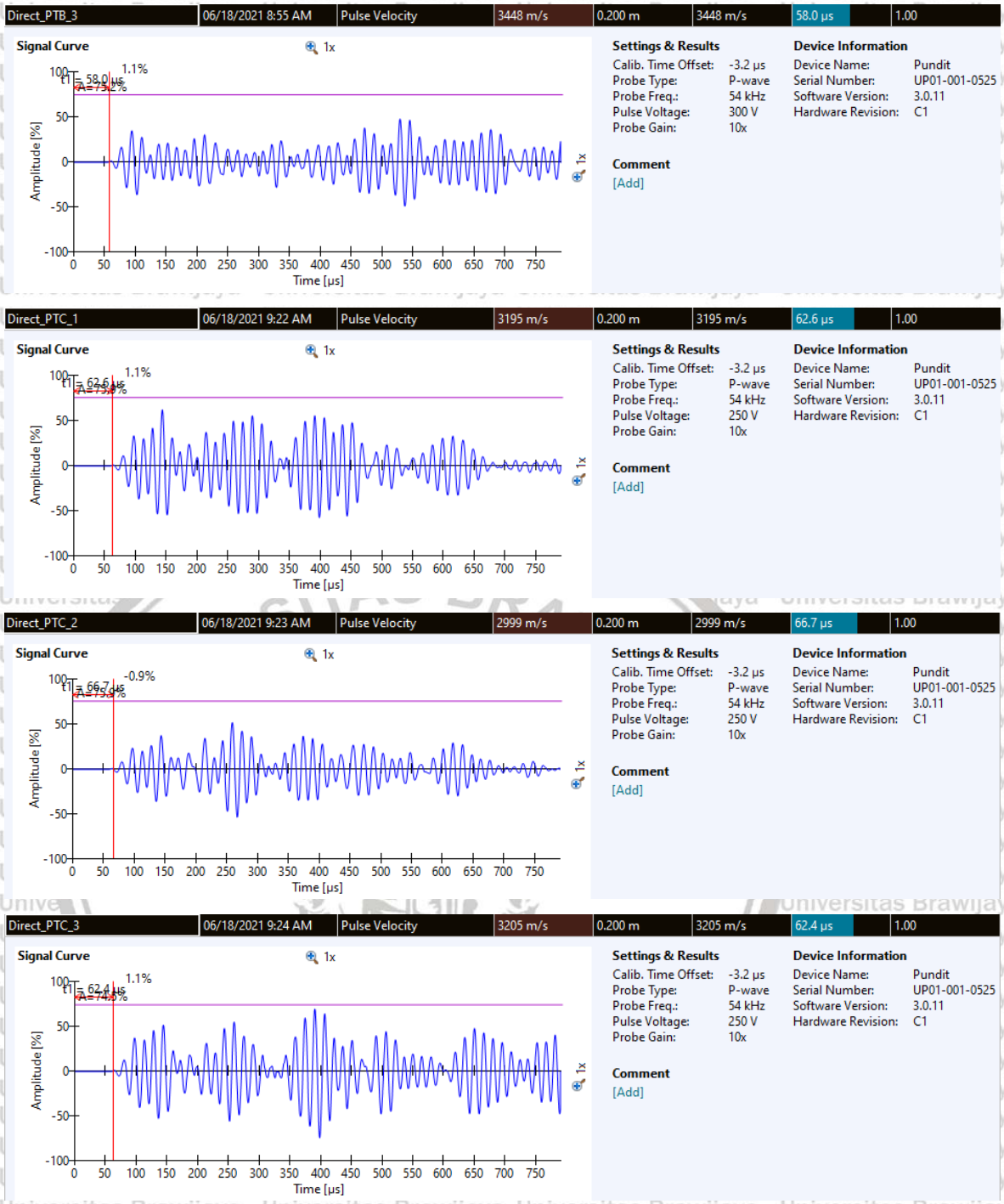






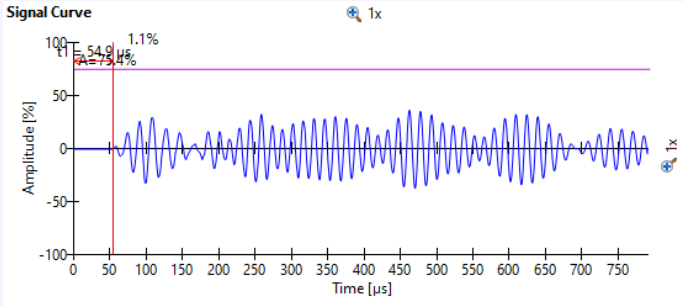






Gambar 16. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Langsung kondisi Lubang Tanpa Air

Direct_PTA_Air_1	06/25/2021 11:39 AM	Pulse Velocity	3643 m/s	0.200 m	3643 m/s	54.9 µs	1.00



Settings & Results

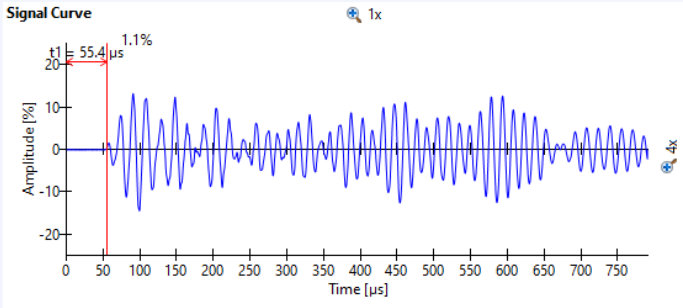
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	100 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PTA_Air_2	06/25/2021 11:39 AM	Pulse Velocity	3610 m/s	0.200 m	3610 m/s	55.4 µs	1.00



Settings & Results

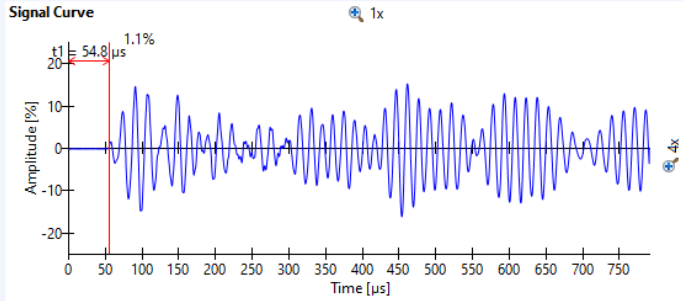
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	100 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PTA_Air_3	06/25/2021 11:39 AM	Pulse Velocity	3650 m/s	0.200 m	3650 m/s	54.8 µs	1.00



Settings & Results

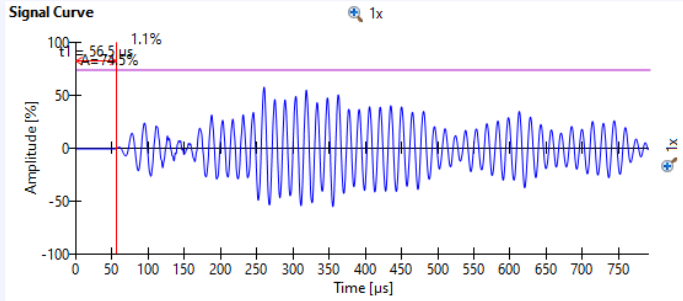
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	100 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PTB_Air_1	06/24/2021 1:03 PM	Pulse Velocity	3540 m/s	0.200 m	3540 m/s	56.5 µs	1.00



Settings & Results

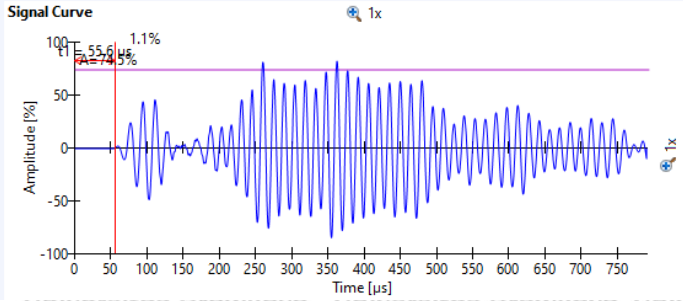
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PTB_Air_2	06/24/2021 1:03 PM	Pulse Velocity	3597 m/s	0.200 m	3597 m/s	55.6 µs	1.00



Settings & Results

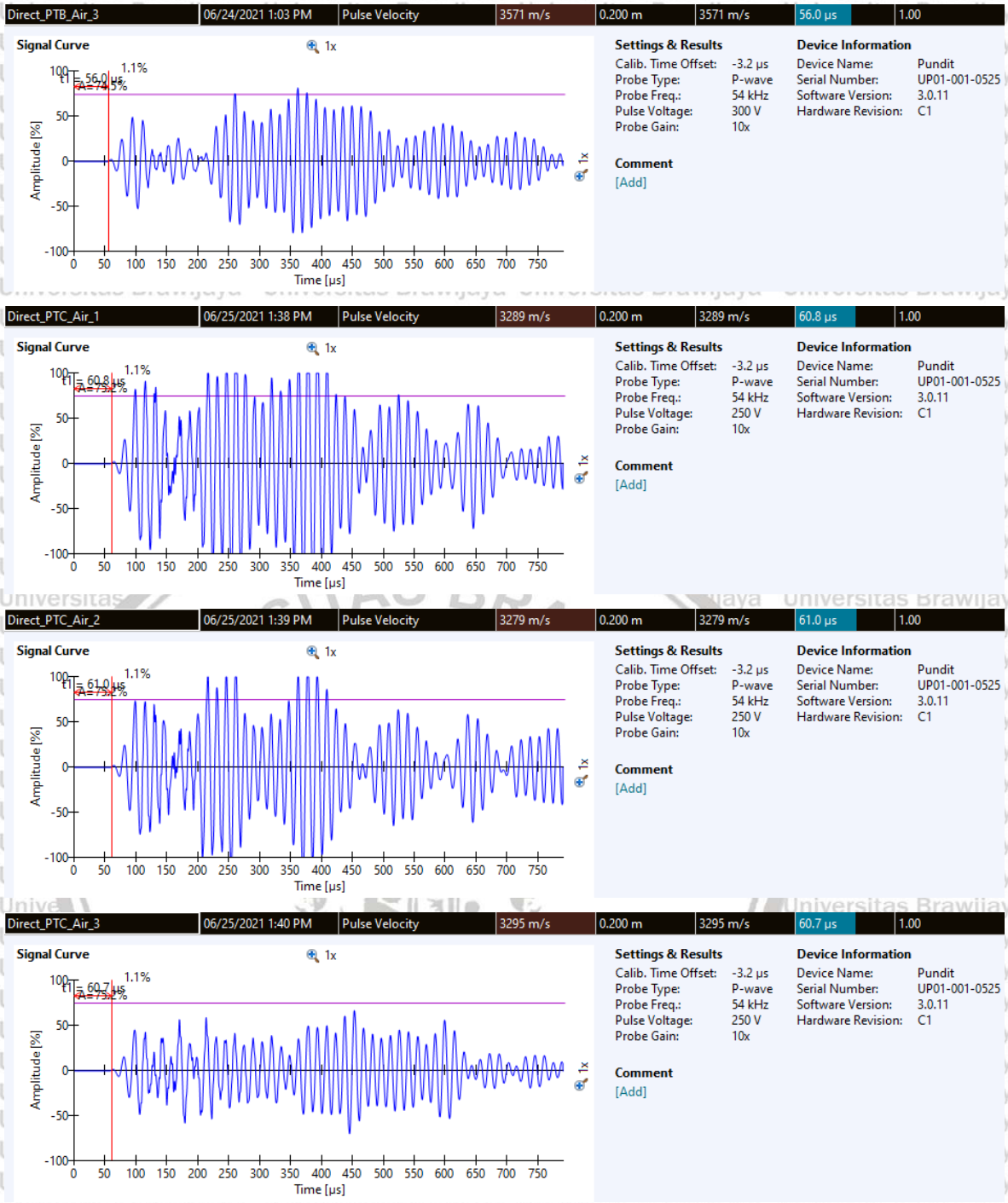
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

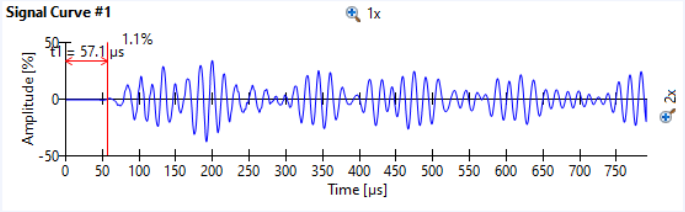
Comment
[Add]

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya



Gambar 17. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Langsung kondisi Lubang Berisi Air

Indirect_Lubang_PTA_1	06/11/2021 9:41 AM	Surface Velocity	3741 m/s	--	3741 m/s	--	1.00



Settings & Results

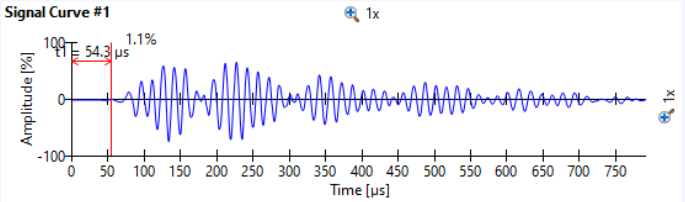
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	57.1
2	200	2	97.2

Indirect_Lubang_PTA_2	06/11/2021 10:03 AM	Surface Velocity	3947 m/s	--	3947 m/s	--	1.00



Settings & Results

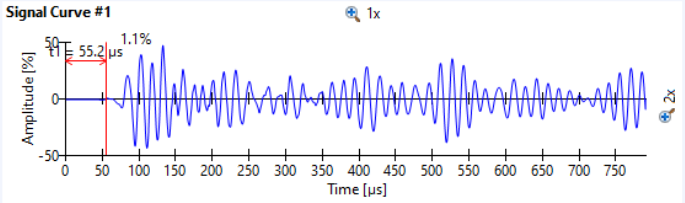
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	54.3
2	200	2	92.3

Indirect_Lubang_PTA_3	06/11/2021 10:05 AM	Surface Velocity	3731 m/s	--	3731 m/s	--	1.00



Settings & Results

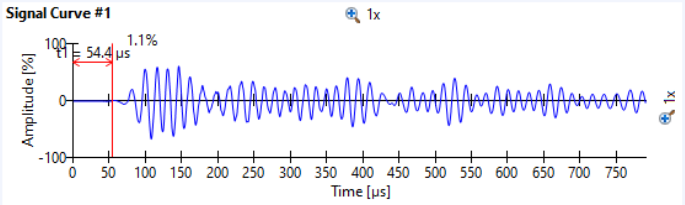
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	55.2
2	200	2	95.4

Indirect_Lubang_PTA_4	06/11/2021 10:07 AM	Surface Velocity	3937 m/s	--	3937 m/s	--	1.00



Settings & Results

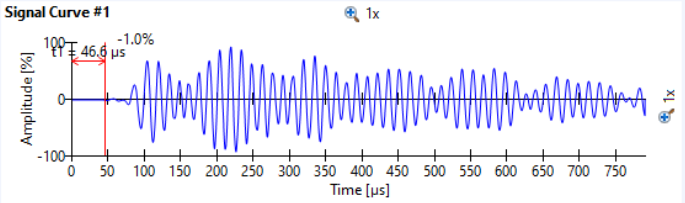
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	54.4
2	200	2	92.5

Indirect_Lubang_PTB_1	06/18/2021 9:02 AM	Surface Velocity	3119 m/s	--	3119 m/s	--	1.00



Settings & Results

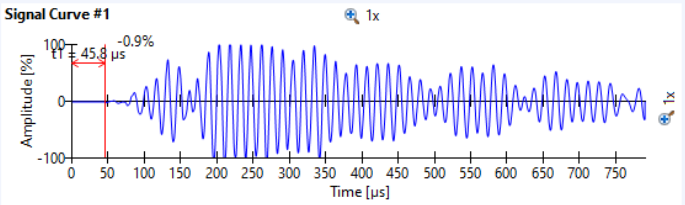
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	46.6
2	250	5	94.7

Indirect_Lubang_PTB_2	06/18/2021 9:02 AM	Surface Velocity	3138 m/s	--	3138 m/s	--	1.00



Settings & Results

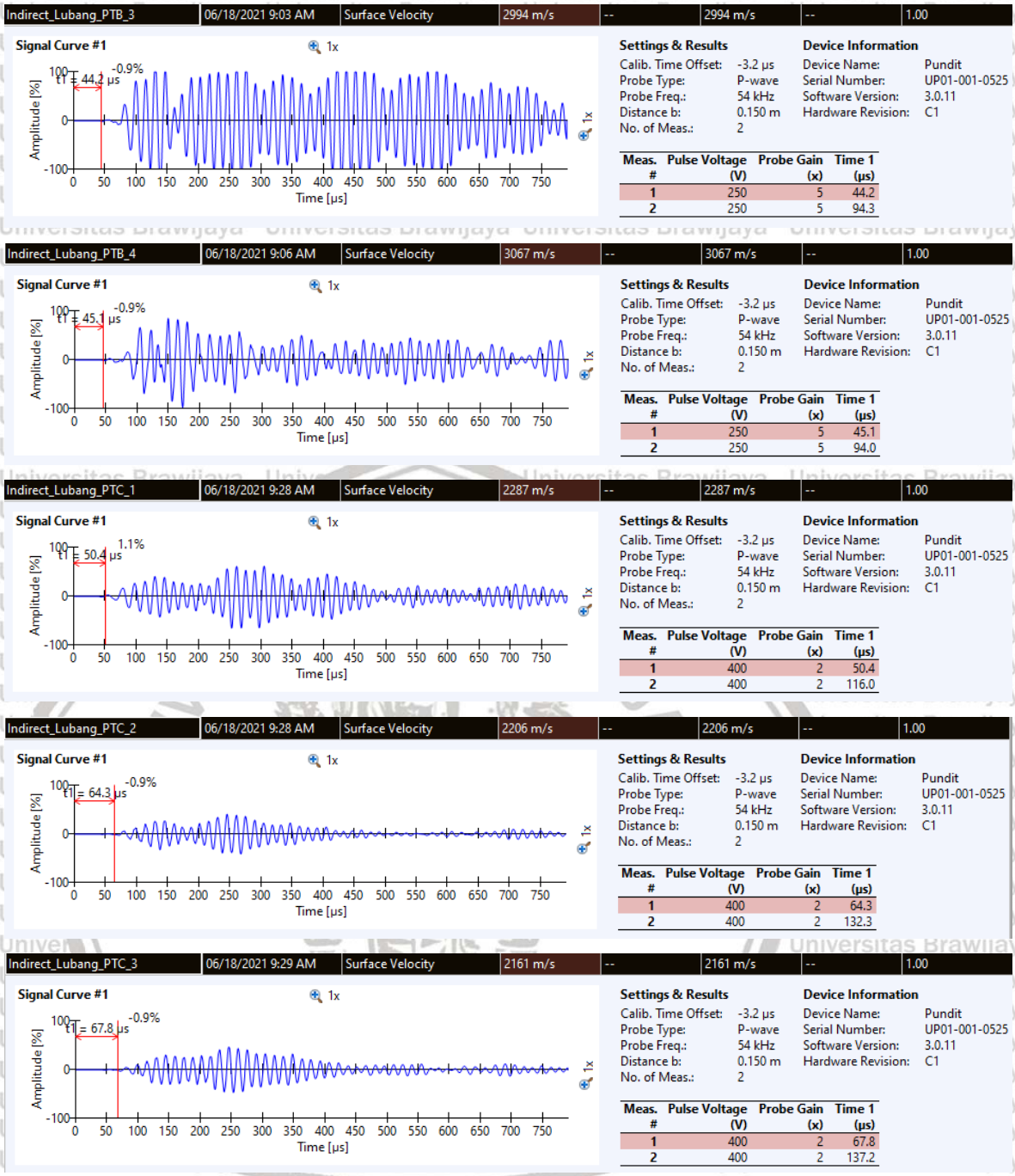
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	45.8
2	250	5	93.6

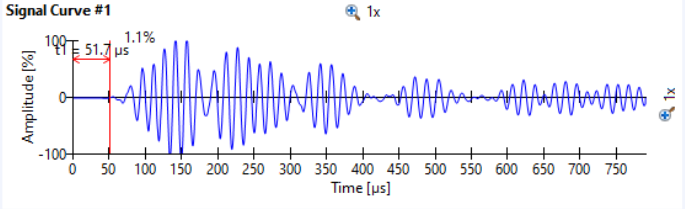
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 18. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Lubang Tanpa Air

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Indirect_Lubang_PTA_Air_1	06/25/2021 11:03 AM	Surface Velocity	3827 m/s	--	3827 m/s	--	1.00



Settings & Results

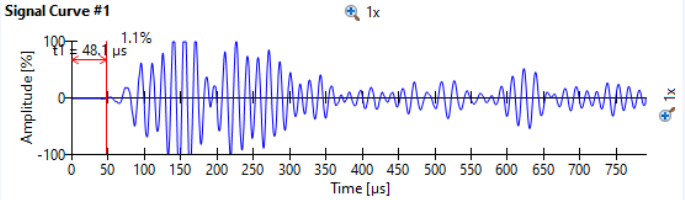
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	51.7
2	200	2	90.9

Indirect_Lubang_PTA_Air_2	06/25/2021 11:03 AM	Surface Velocity	4298 m/s	--	4298 m/s	--	1.00



Settings & Results

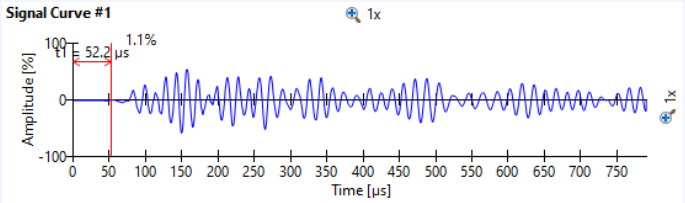
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	48.1
2	200	2	83.0

Indirect_Lubang_PTA_Air_3	06/25/2021 11:05 AM	Surface Velocity	3886 m/s	--	3886 m/s	--	1.00



Settings & Results

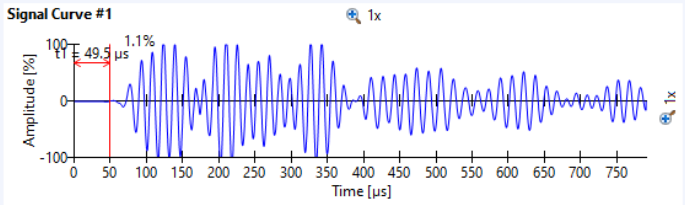
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	52.2
2	200	2	90.8

Indirect_Lubang_PTA_Air_4	06/25/2021 11:08 AM	Surface Velocity	4286 m/s	--	4286 m/s	--	1.00



Settings & Results

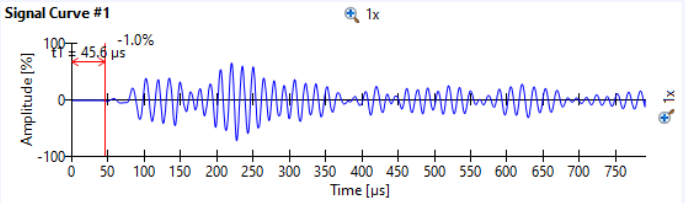
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	49.5
2	200	2	84.5

Indirect_Lubang_PTB_Air_1	06/24/2021 12:46 PM	Surface Velocity	3597 m/s	--	3597 m/s	--	1.00



Settings & Results

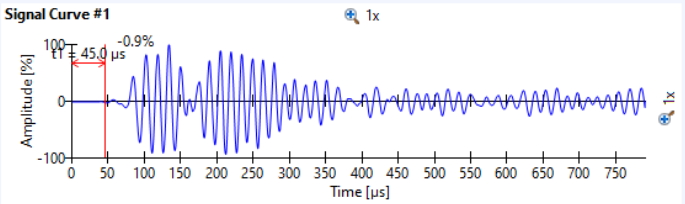
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	45.6
2	250	5	87.3

Indirect_Lubang_PTB_Air_2	06/24/2021 12:46 PM	Surface Velocity	3650 m/s	--	3650 m/s	--	1.00



Settings & Results

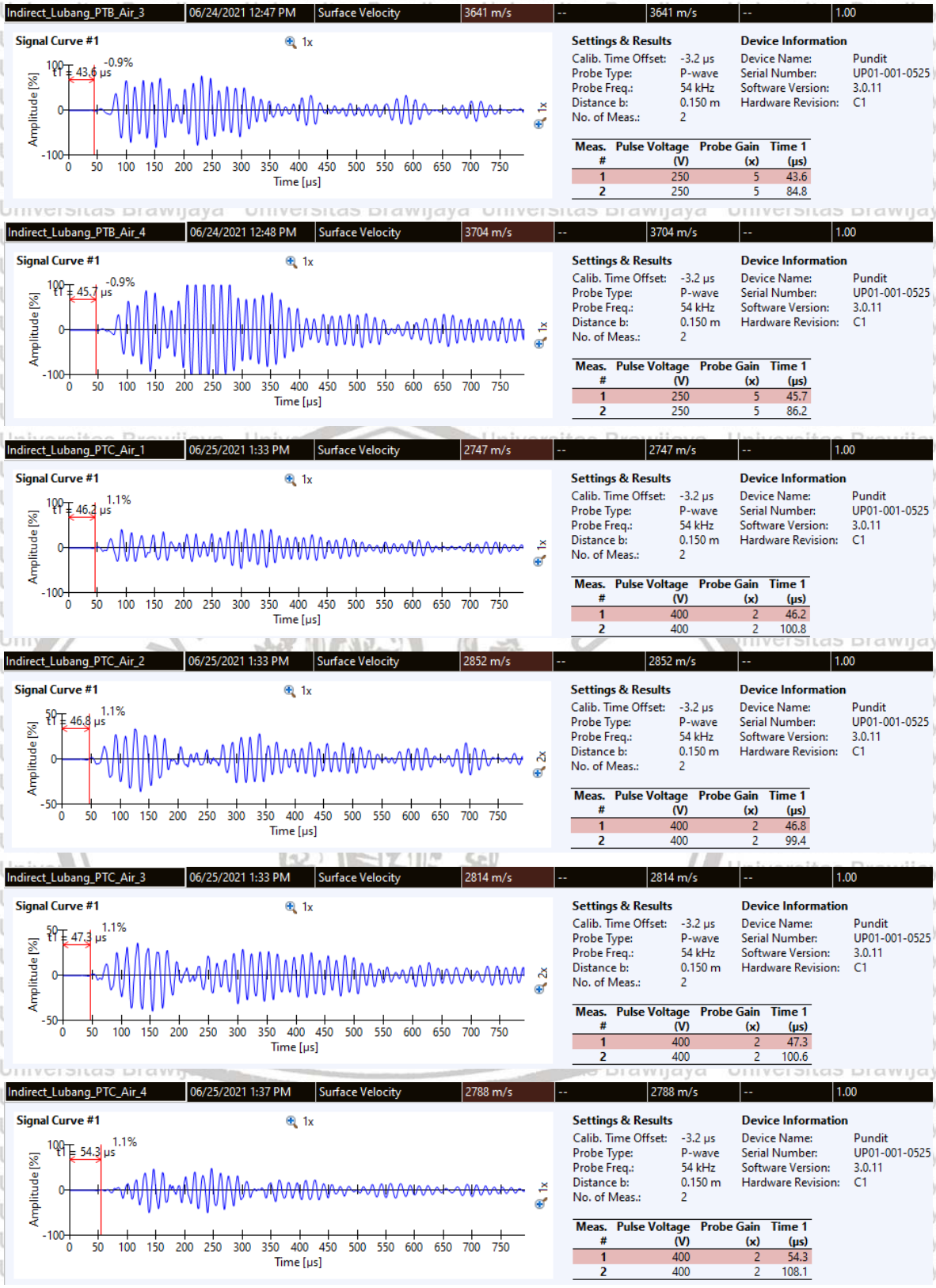
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	45.0
2	250	5	86.1

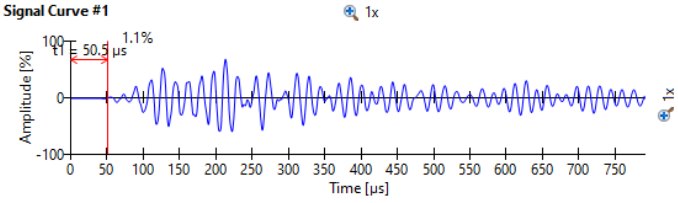
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 19. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Lubang Berisi Air

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Indirect_Beton_PTA_1	06/11/2021 9:42 AM	Surface Velocity	4132 m/s	--	4132 m/s	--	1.00



Settings & Results

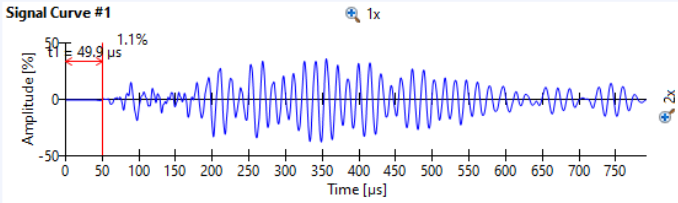
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	50.5
2	200	2	86.8

Indirect_Beton_PTA_2	06/11/2021 10:00 AM	Surface Velocity	3472 m/s	--	3472 m/s	--	1.00



Settings & Results

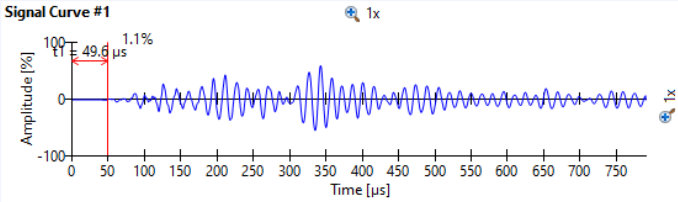
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	49.9
2	200	2	93.1

Indirect_Beton_PTA_3	06/11/2021 10:01 AM	Surface Velocity	3505 m/s	--	3505 m/s	--	1.00



Settings & Results

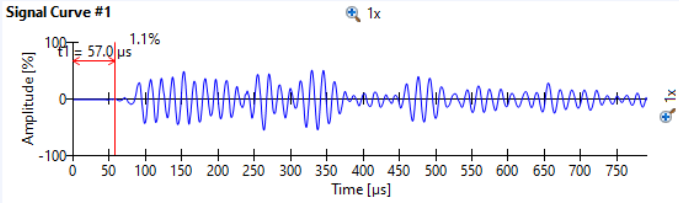
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	49.6
2	200	2	92.4

Indirect_Beton_PTA_4	06/11/2021 10:01 AM	Surface Velocity	3989 m/s	--	3989 m/s	--	1.00



Settings & Results

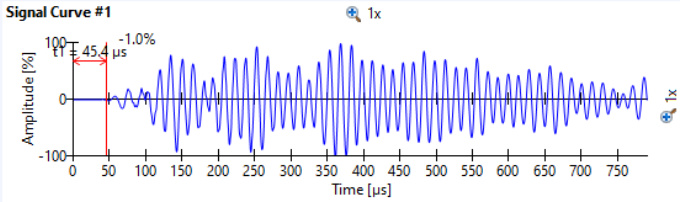
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	57.0
2	200	2	94.6

Indirect_Beton_PTB_1	06/24/2021 8:51 AM	Surface Velocity	3275 m/s	--	3275 m/s	--	1.00



Settings & Results

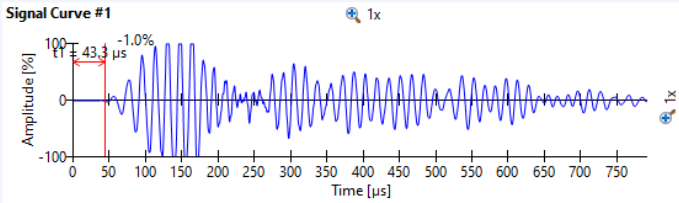
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	45.4
2	250	5	91.2

Indirect_Beton_PTB_2	06/24/2021 8:52 AM	Surface Velocity	3212 m/s	--	3212 m/s	--	1.00



Settings & Results

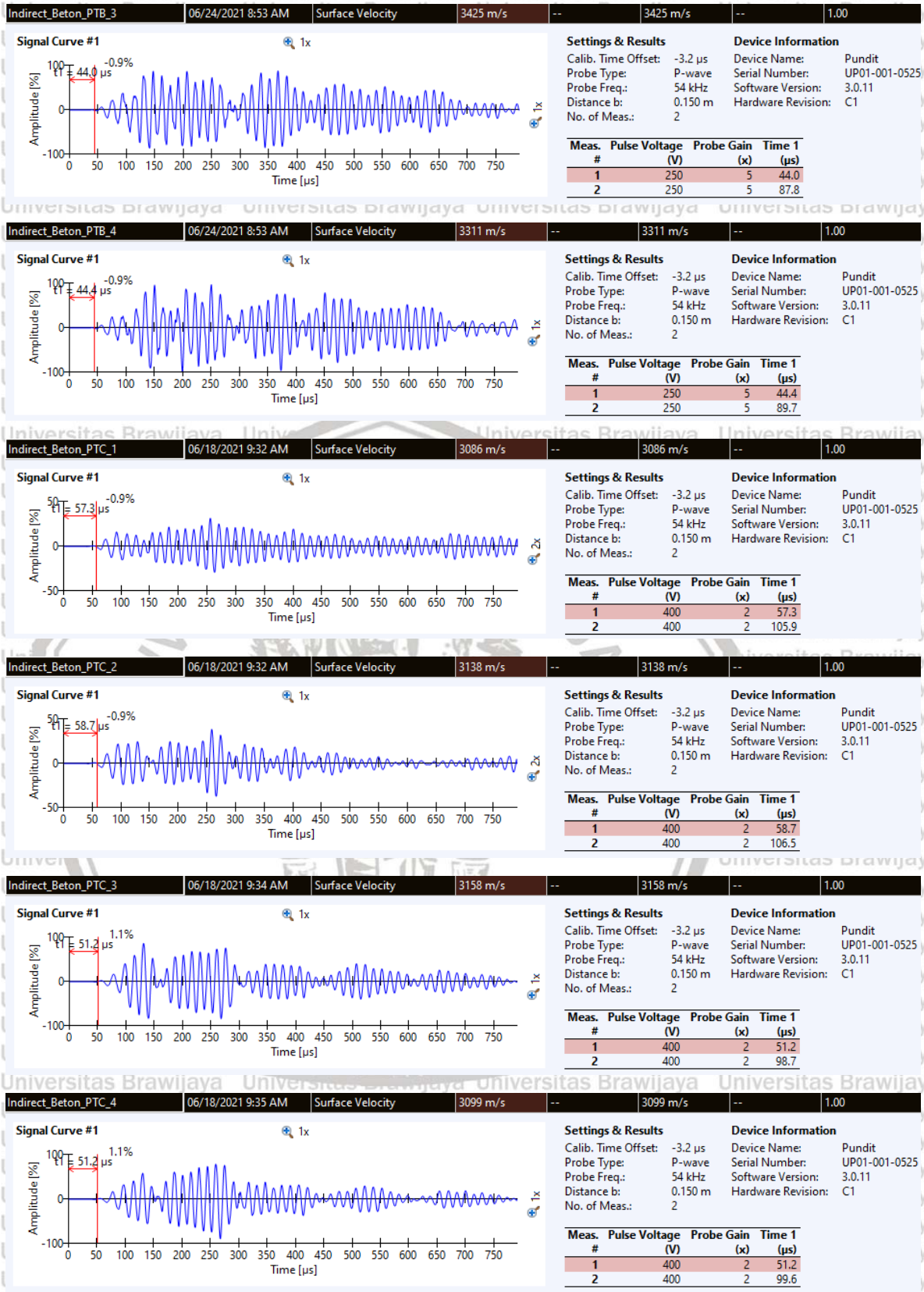
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	43.3
2	250	5	90.0

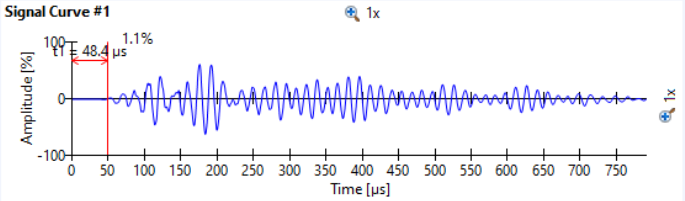
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya



Gambar 20. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Lubang Tanpa Air

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Indirect_Beton_PTA_Air_1	06/25/2021 11:23 AM	Surface Velocity	4087 m/s	--	4087 m/s	--	1.00



Settings & Results

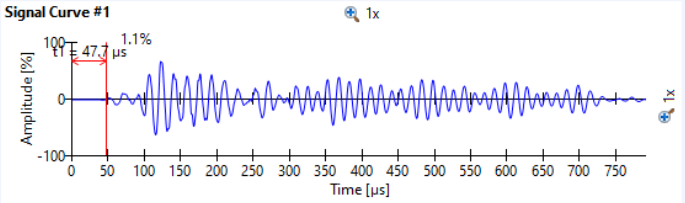
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	48.4
2	200	2	85.1

Indirect_Beton_PTA_Air_2	06/25/2021 11:23 AM	Surface Velocity	4032 m/s	--	4032 m/s	--	1.00



Settings & Results

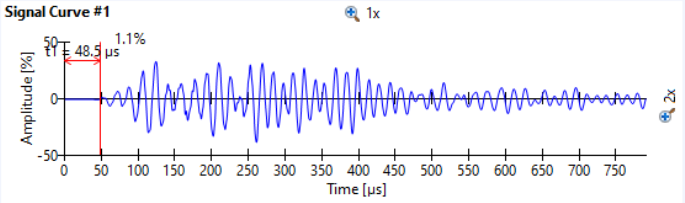
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	47.7
2	200	2	84.9

Indirect_Beton_PTA_Air_3	06/25/2021 11:24 AM	Surface Velocity	4225 m/s	--	4225 m/s	--	1.00



Settings & Results

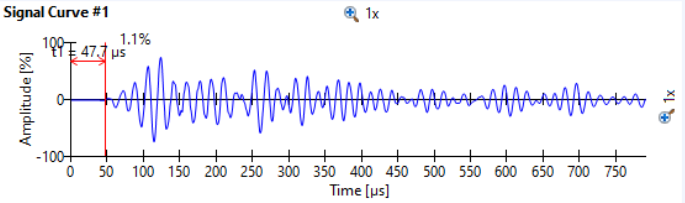
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	48.5
2	200	2	84.0

Indirect_Beton_PTA_Air_4	06/25/2021 11:26 AM	Surface Velocity	4202 m/s	--	4202 m/s	--	1.00



Settings & Results

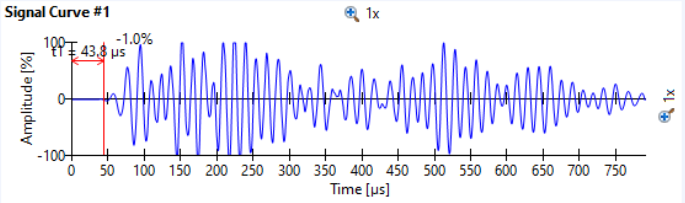
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	200	2	47.7
2	200	2	83.4

Indirect_Beton_PTB_Air_1	06/24/2021 12:52 PM	Surface Velocity	3472 m/s	--	3472 m/s	--	1.00



Settings & Results

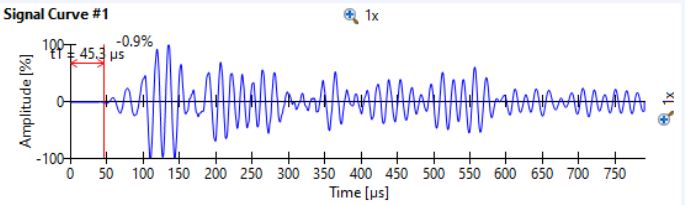
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	43.8
2	250	5	87.0

Indirect_Beton_PTB_Air_2	06/24/2021 12:52 PM	Surface Velocity	3563 m/s	--	3563 m/s	--	1.00



Settings & Results

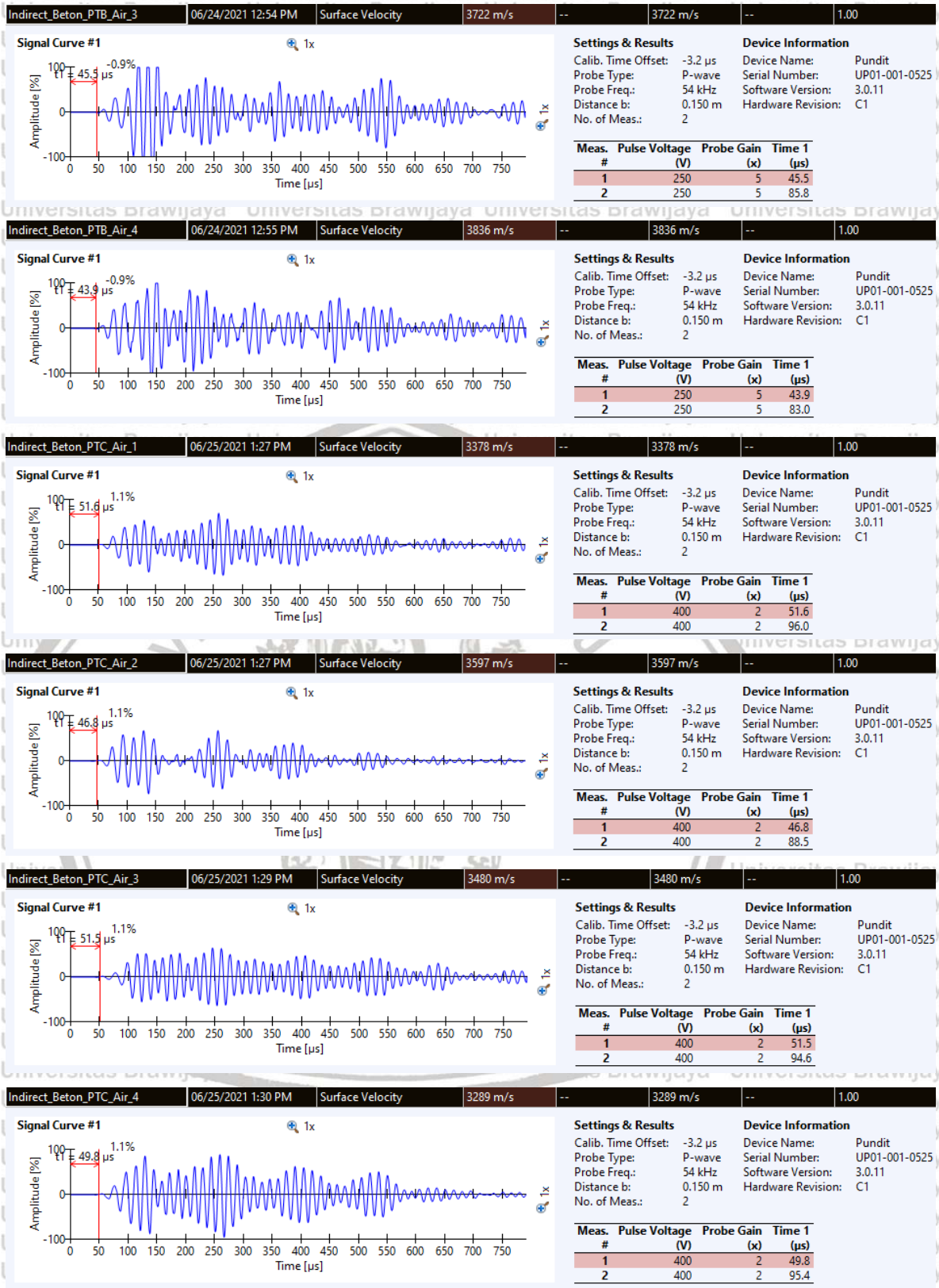
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	45.3
2	250	5	87.4

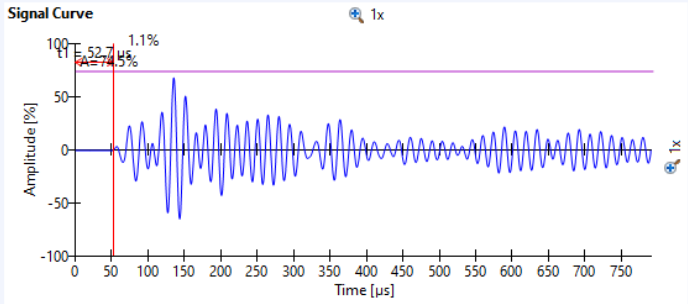
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 21. Waveform pada Balok Lubang Arah Transversal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Lubang Berisi Air

Lampiran 6. *Waveform* pada Balok Lubang Arah Longitudinal

Direct_PLA_1	06/11/2021 8:29 AM	Pulse Velocity	3795 m/s	0.200 m	3795 m/s	52.7 µs	1.00



Settings & Results

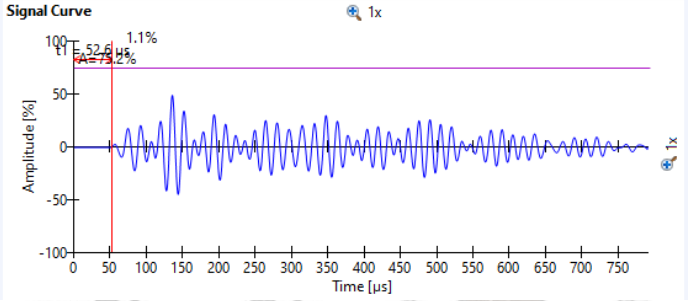
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLA_2	06/11/2021 8:30 AM	Pulse Velocity	3802 m/s	0.200 m	3802 m/s	52.6 µs	1.00



Settings & Results

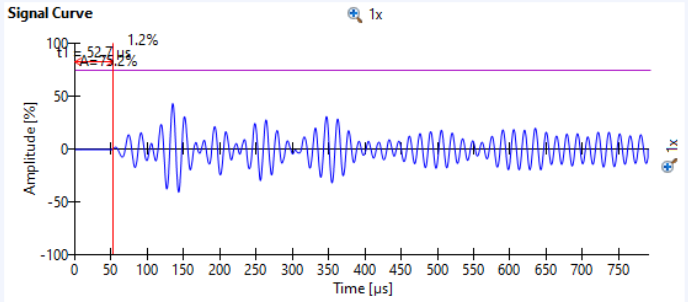
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLA_3	06/11/2021 8:30 AM	Pulse Velocity	3795 m/s	0.200 m	3795 m/s	52.7 µs	1.00



Settings & Results

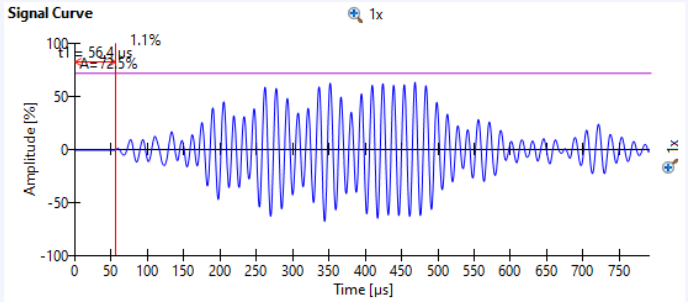
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLB_1	06/09/2021 11:20 AM	Pulse Velocity	3546 m/s	0.200 m	3546 m/s	56.4 µs	1.00



Settings & Results

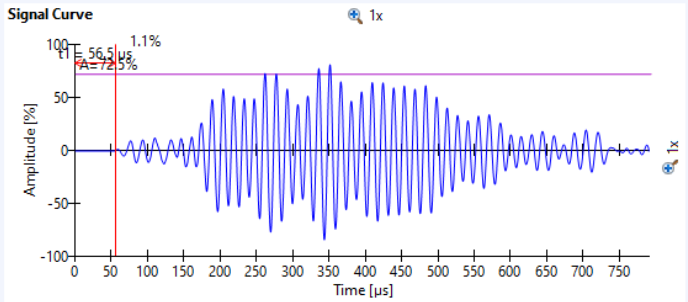
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLB_2	06/09/2021 11:20 AM	Pulse Velocity	3540 m/s	0.200 m	3540 m/s	56.5 µs	1.00



Settings & Results

Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

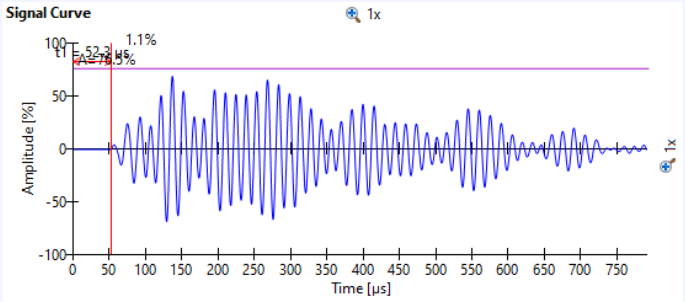
Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Gambar 22. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Langsung kondisi Lubang Tanpa Air

Direct_PLA_Air_1	06/11/2021 8:48 AM	Pulse Velocity	3824 m/s	0.200 m	3824 m/s	52.3 µs	1.00



Settings & Results

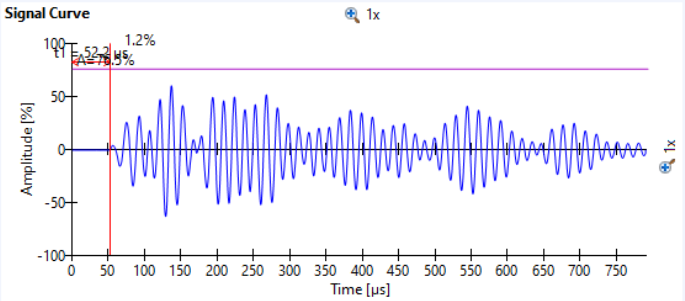
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLA_Air_2	06/11/2021 8:49 AM	Pulse Velocity	3831 m/s	0.200 m	3831 m/s	52.2 µs	1.00



Settings & Results

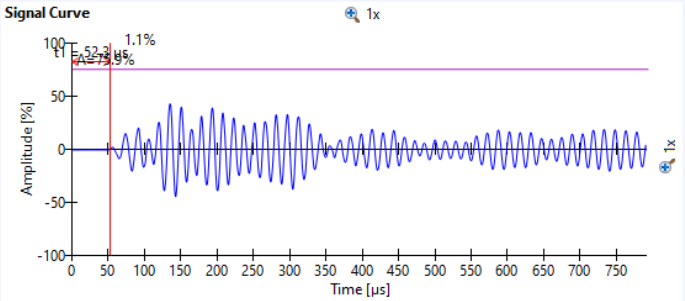
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLA_Air_3	06/11/2021 9:08 AM	Pulse Velocity	3824 m/s	0.200 m	3824 m/s	52.3 µs	1.00



Settings & Results

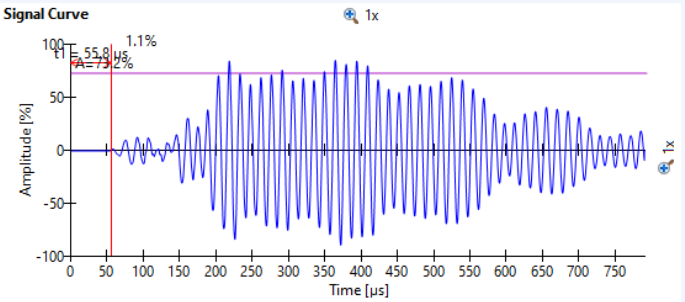
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	150 V
Probe Gain:	5x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLB_Air_1	06/10/2021 9:19 AM	Pulse Velocity	3584 m/s	0.200 m	3584 m/s	55.8 µs	1.00



Settings & Results

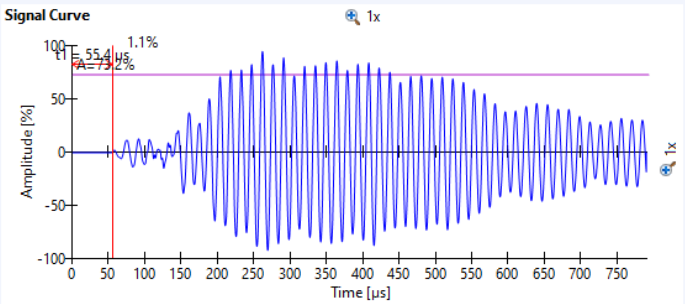
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Comment
[Add]

Direct_PLB_Air_2	06/10/2021 9:19 AM	Pulse Velocity	3610 m/s	0.200 m	3610 m/s	55.4 µs	1.00



Settings & Results

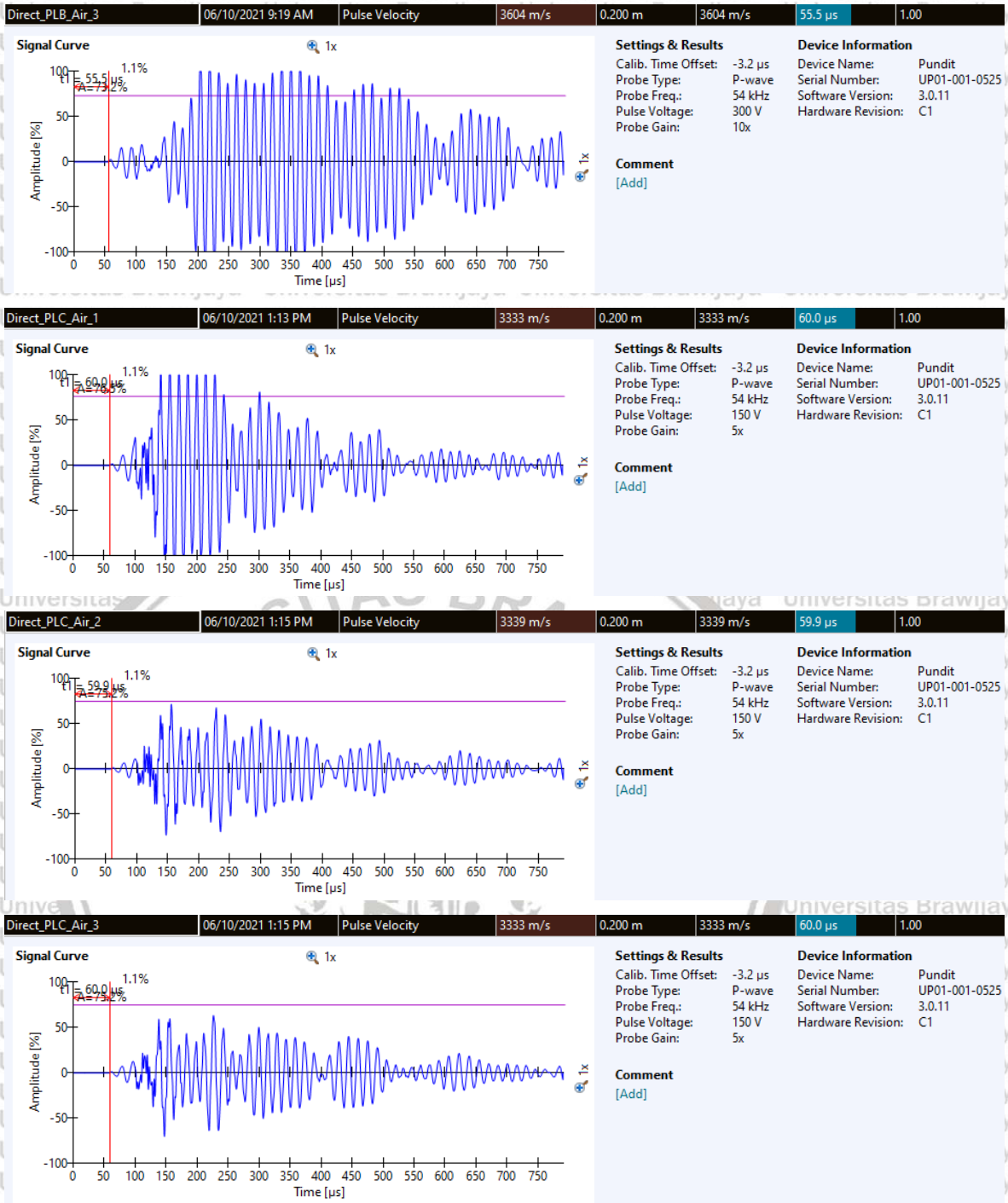
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Pulse Voltage:	300 V
Probe Gain:	10x

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

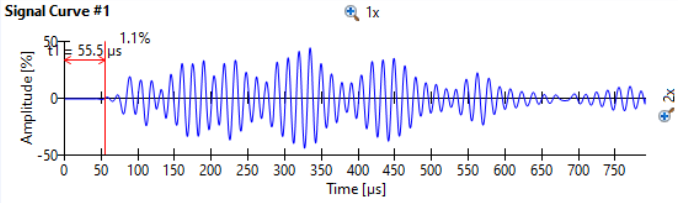
Comment
[Add]

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya



Gambar 23. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Langsung kondisi Lubang Berisi Air

Indirect_Lubang_PLA_1	06/11/2021 8:11 AM	Surface Velocity	4132 m/s	--	4132 m/s	--	1.00



Settings & Results

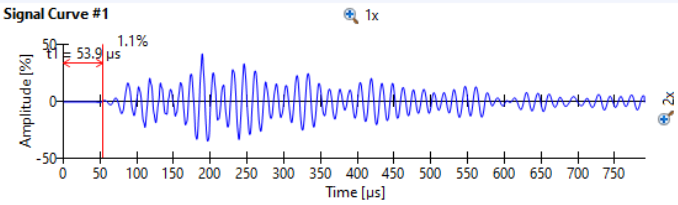
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	55.5
2	250	10	91.8

Indirect_Lubang_PLA_2	06/11/2021 8:14 AM	Surface Velocity	4076 m/s	--	4076 m/s	--	1.00



Settings & Results

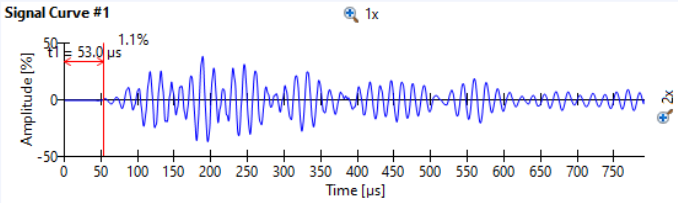
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.9
2	250	10	90.7

Indirect_Lubang_PLA_3	06/11/2021 8:16 AM	Surface Velocity	4054 m/s	--	4054 m/s	--	1.00



Settings & Results

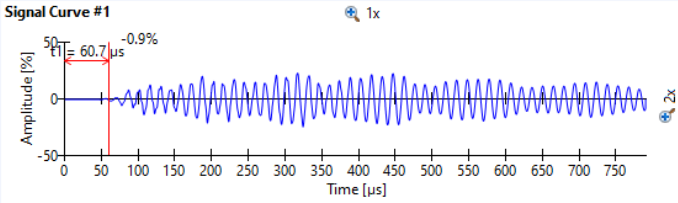
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.0
2	250	10	90.0

Indirect_Lubang_PLA_4	06/11/2021 8:23 AM	Surface Velocity	4000 m/s	--	4000 m/s	--	1.00



Settings & Results

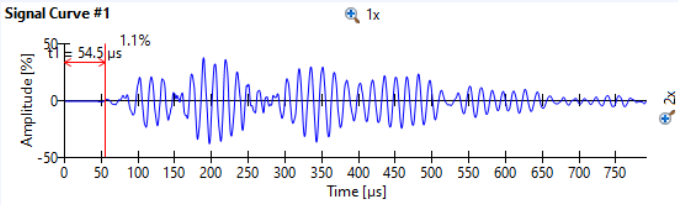
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	60.7
2	250	10	98.2

Indirect_Lubang_PLB_1	06/10/2021 8:52 AM	Surface Velocity	3341 m/s	--	3341 m/s	--	1.00



Settings & Results

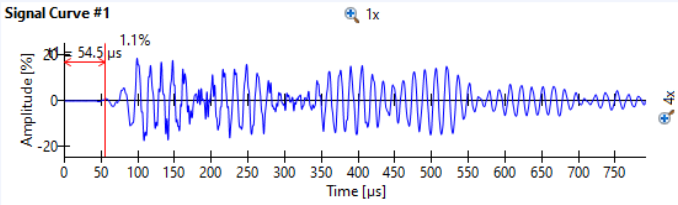
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	54.5
2	250	5	99.4

Indirect_Lubang_PLB_2	06/10/2021 8:52 AM	Surface Velocity	3464 m/s	--	3464 m/s	--	1.00



Settings & Results

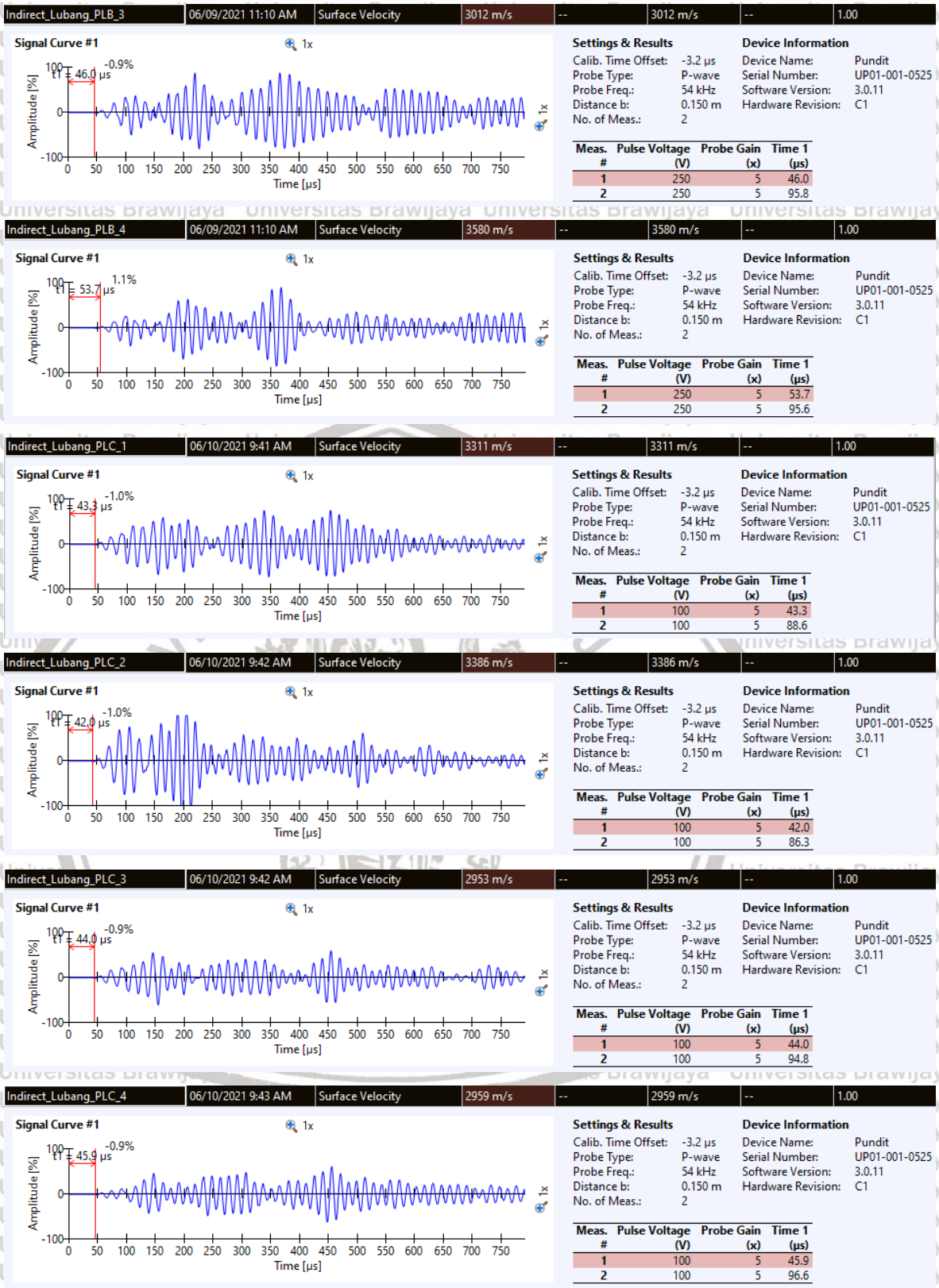
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

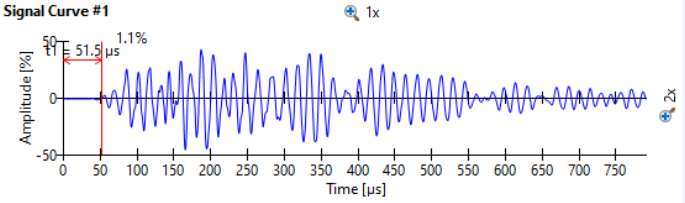
Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	54.5
2	250	5	97.8

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 24. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Lubang Tanpa Air

Indirect_Lubang_PLA_Air_1	06/11/2021 8:53 AM	Surface Velocity	4225 m/s	--	4225 m/s	--	1.00



Settings & Results

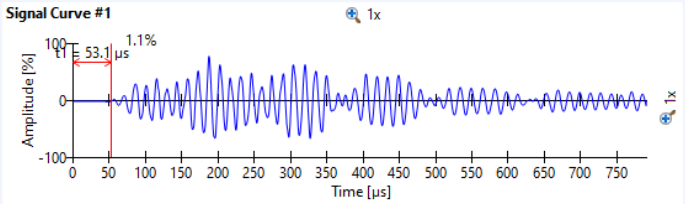
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	51.5
2	250	10	87.0

Indirect_Lubang_PLA_Air_2	06/11/2021 8:53 AM	Surface Velocity	4237 m/s	--	4237 m/s	--	1.00



Settings & Results

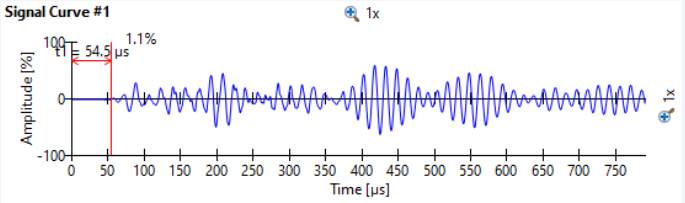
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.1
2	250	10	88.5

Indirect_Lubang_PLA_Air_3	06/11/2021 8:53 AM	Surface Velocity	4144 m/s	--	4144 m/s	--	1.00



Settings & Results

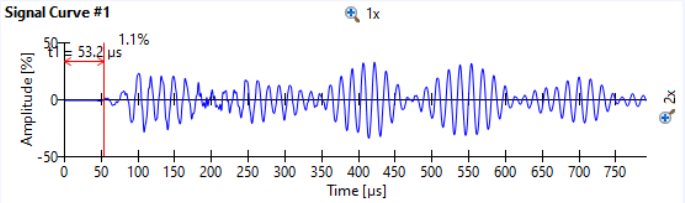
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	54.5
2	250	10	90.7

Indirect_Lubang_PLB_Air_1	06/24/2021 10:28 AM	Surface Velocity	3769 m/s	--	3769 m/s	--	1.00



Settings & Results

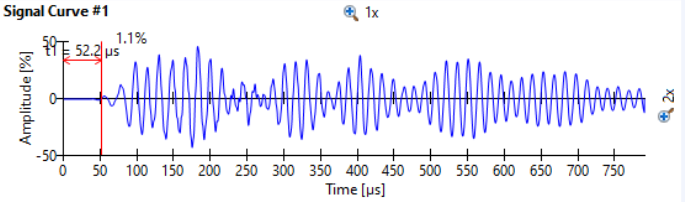
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	53.2
2	250	5	93.0

Indirect_Lubang_PLB_Air_2	06/24/2021 10:31 AM	Surface Velocity	3704 m/s	--	3704 m/s	--	1.00



Settings & Results

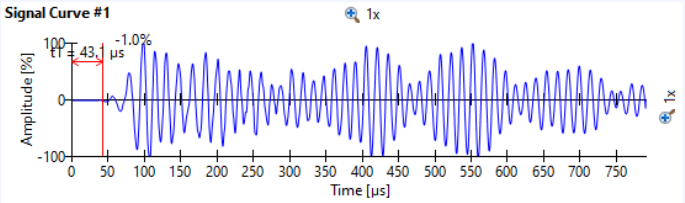
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	52.2
2	250	5	92.7

Indirect_Lubang_PLB_Air_3	06/24/2021 10:32 AM	Surface Velocity	3722 m/s	--	3722 m/s	--	1.00



Settings & Results

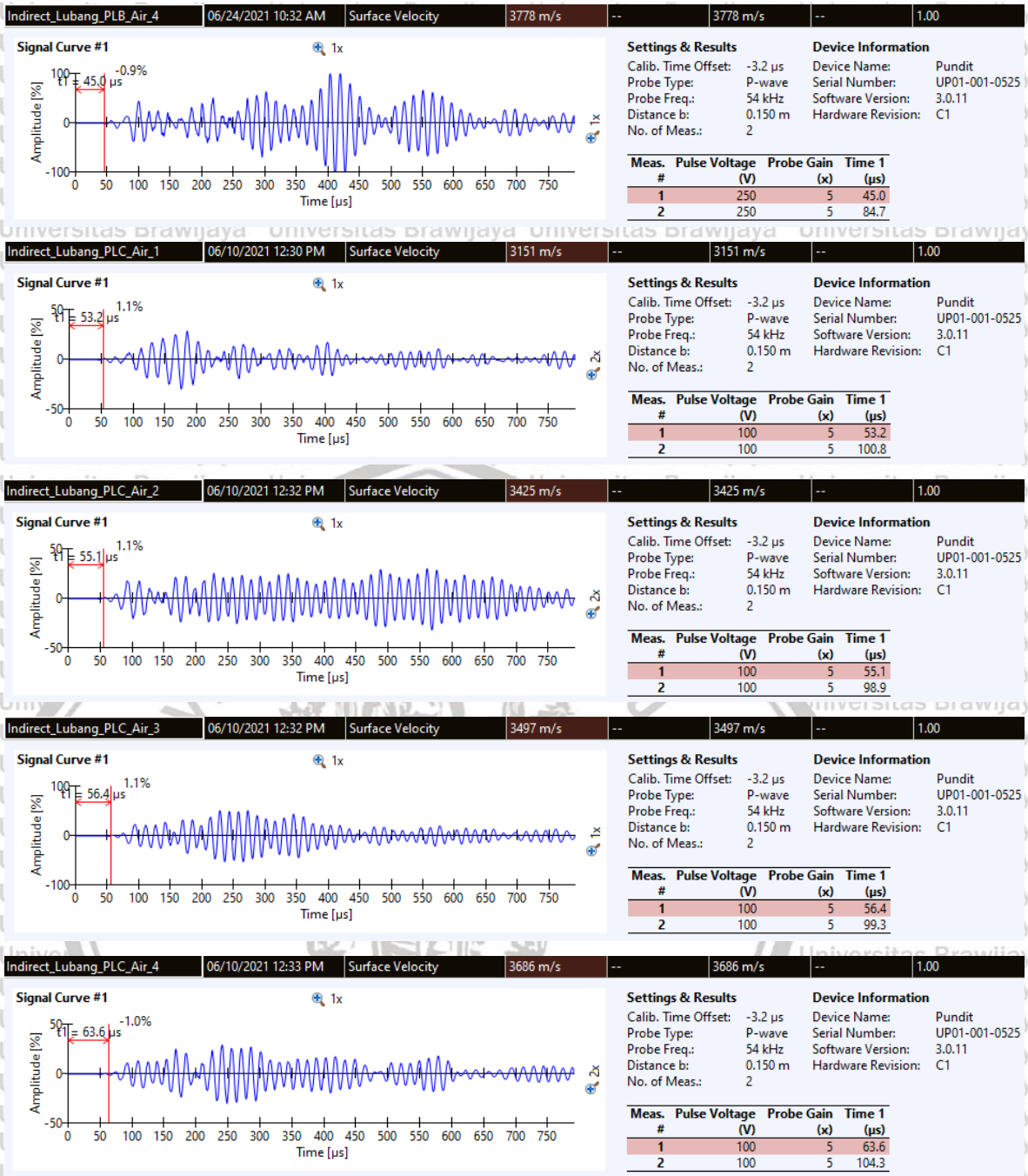
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	43.1
2	250	5	83.4

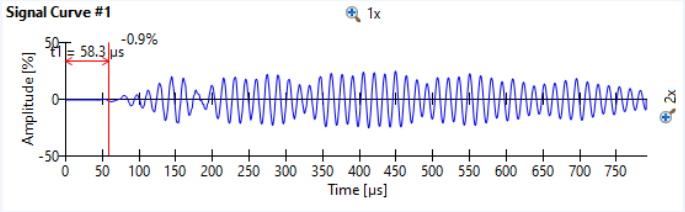
repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
Universitas Brawijaya



Gambar 25. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Lubang) kondisi Lubang Berisi Air

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Indirect_Beton_PLA_1	06/11/2021 8:21 AM	Surface Velocity	2538 m/s	--	2538 m/s	--	1.00



Settings & Results

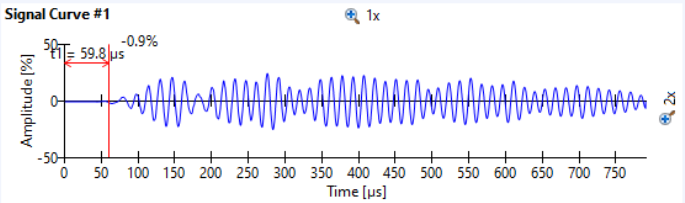
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	58.3
2	250	10	117.4

Indirect_Beton_PLA_2	06/11/2021 8:21 AM	Surface Velocity	2577 m/s	--	2577 m/s	--	1.00



Settings & Results

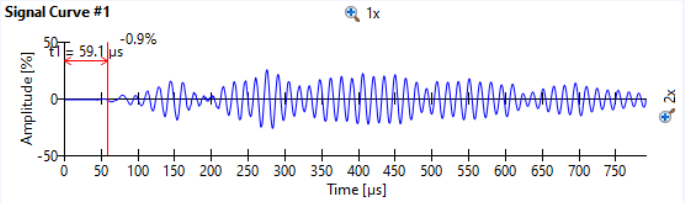
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	59.8
2	250	10	118.0

Indirect_Beton_PLA_3	06/11/2021 8:22 AM	Surface Velocity	2560 m/s	--	2560 m/s	--	1.00



Settings & Results

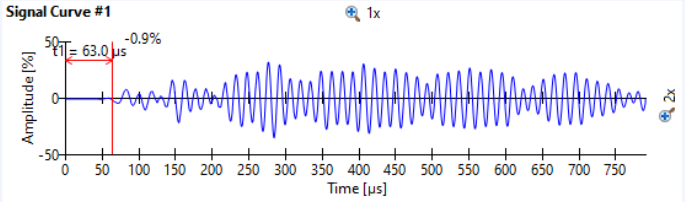
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	59.1
2	250	10	117.7

Indirect_Beton_PLA_4	06/11/2021 8:22 AM	Surface Velocity	2712 m/s	--	2712 m/s	--	1.00



Settings & Results

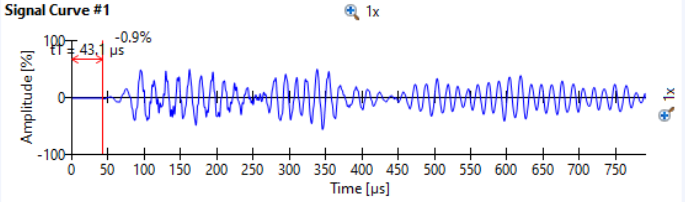
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	63.0
2	250	10	118.3

Indirect_Beton_PLB_1	06/24/2021 9:08 AM	Surface Velocity	3356 m/s	--	3356 m/s	--	1.00



Settings & Results

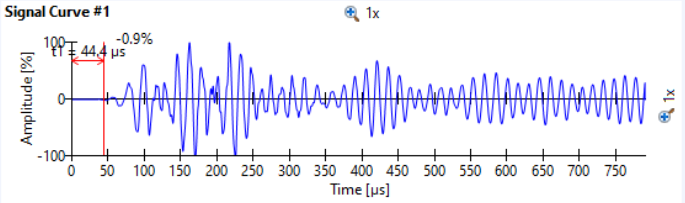
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	43.1
2	250	5	87.8

Indirect_Beton_PLB_2	06/24/2021 9:09 AM	Surface Velocity	3275 m/s	--	3275 m/s	--	1.00



Settings & Results

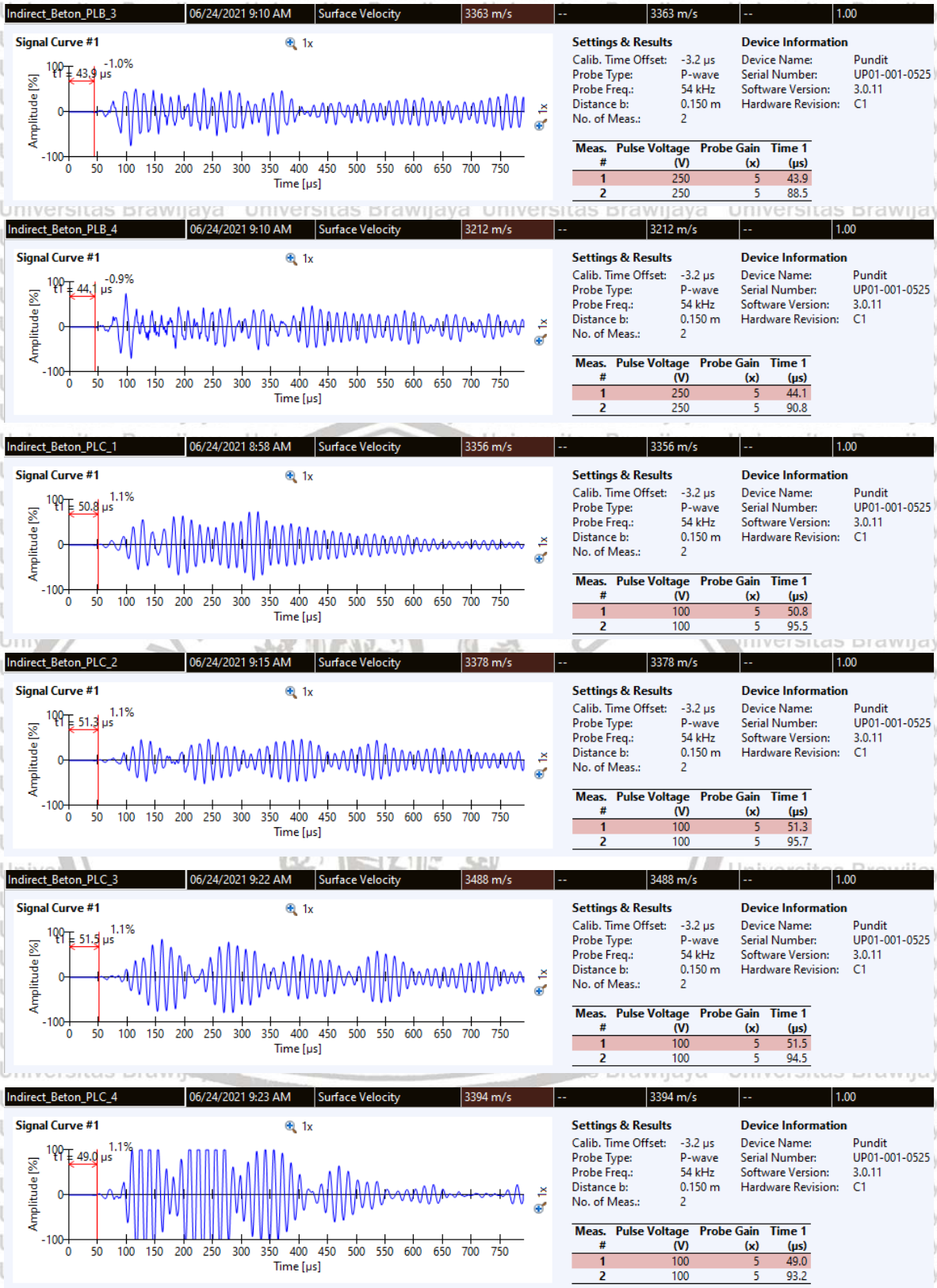
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

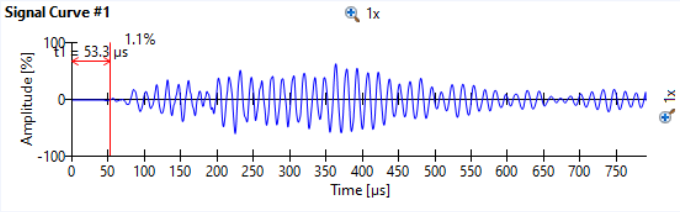
Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	44.4
2	250	5	90.2

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 26. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Lubang Tanpa Air

Indirect_Beton_PLA_Air_1	06/11/2021 9:03 AM	Surface Velocity	3448 m/s	--	3448 m/s	--	1.00



Settings & Results

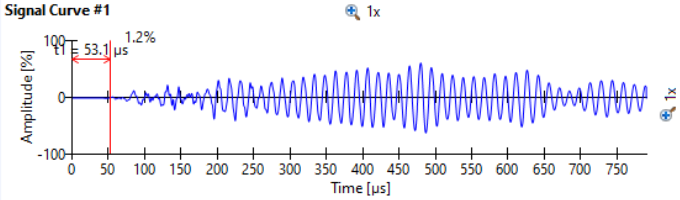
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.3
2	250	10	96.8

Indirect_Beton_PLA_Air_2	06/11/2021 9:03 AM	Surface Velocity	3513 m/s	--	3513 m/s	--	1.00



Settings & Results

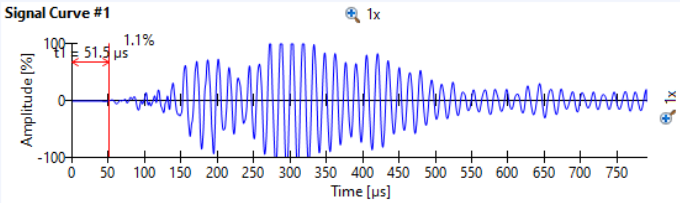
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.1
2	250	10	95.8

Indirect_Beton_PLA_Air_3	06/11/2021 9:05 AM	Surface Velocity	3488 m/s	--	3488 m/s	--	1.00



Settings & Results

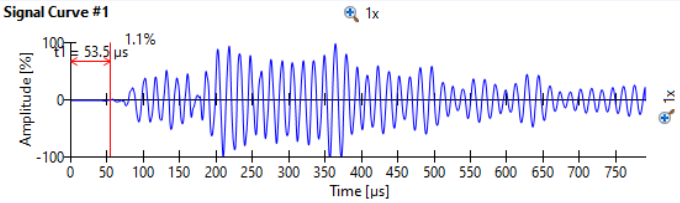
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	51.5
2	250	10	94.5

Indirect_Beton_PLA_Air_4	06/11/2021 9:06 AM	Surface Velocity	3432 m/s	--	3432 m/s	--	1.00



Settings & Results

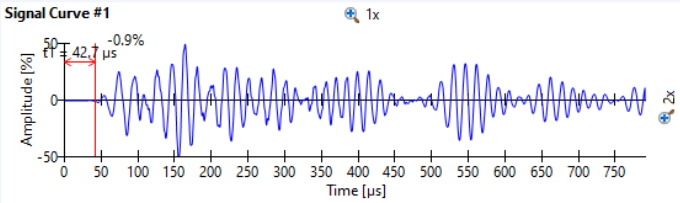
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	10	53.5
2	250	10	97.2

Indirect_Beton_PLB_Air_1	06/24/2021 10:22 AM	Surface Velocity	3713 m/s	--	3713 m/s	--	1.00



Settings & Results

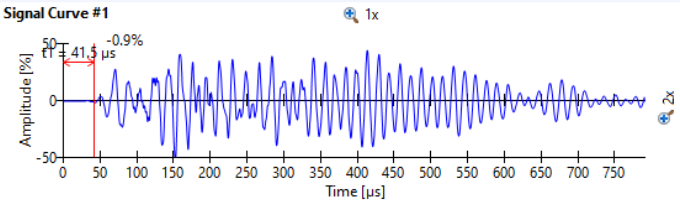
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	42.7
2	250	5	83.1

Indirect_Beton_PLB_Air_2	06/24/2021 10:22 AM	Surface Velocity	3580 m/s	--	3580 m/s	--	1.00



Settings & Results

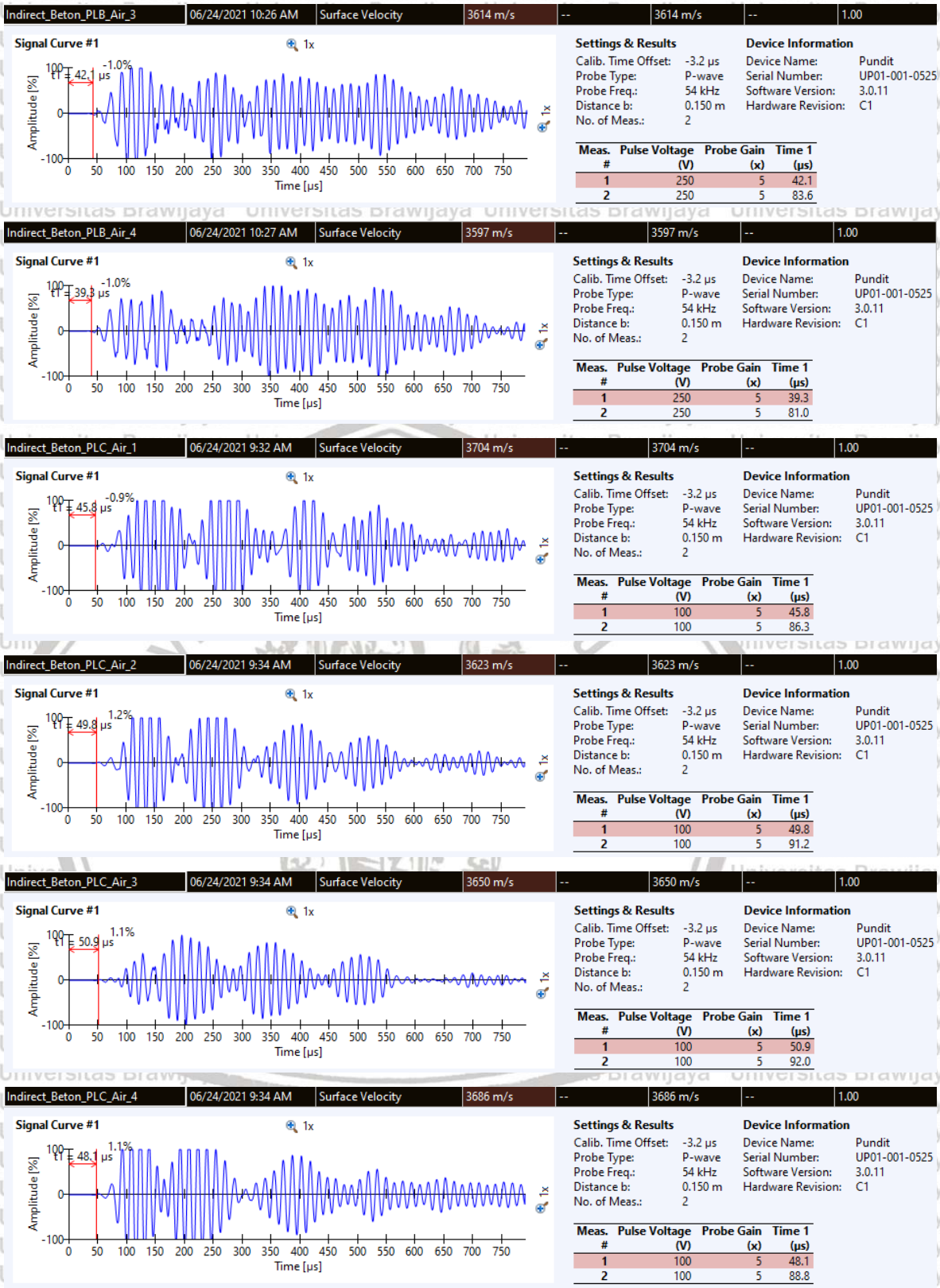
Calib. Time Offset:	-3.2 µs
Probe Type:	P-wave
Probe Freq.:	54 kHz
Distance b:	0.150 m
No. of Meas.:	2

Device Information

Device Name:	Pundit
Serial Number:	UP01-001-0525
Software Version:	3.0.11
Hardware Revision:	C1

Meas. #	Pulse Voltage (V)	Probe Gain (x)	Time 1 (µs)
1	250	5	41.5
2	250	5	83.4

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Gambar 27. Waveform pada Balok Lubang Arah Longitudinal Metode Tidak Langsung (*Transmitter* tepat Beton) kondisi Lubang Berisi Air

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(*halaman ini sengaja dikosongkan*)

repository.ub.ac.id
UNIVERSITAS BRAWIJAYA