

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI  
PEMROSESAN DATA *TIME OF FLIGHT* (TOF)  
PADA ALAT TOMOGRAFI AKUSTIK (TERAWANG)  
UNTUK MONITORING KONDISI INTERNAL POHON**

**TUGAS AKHIR**

**Karya tulis sebagai salah satu syarat  
untuk memperoleh gelar Sarjana dari  
Institut Teknologi Bandung**

**Oleh  
BAYU AJI NUGROHO  
NIM: 13221601  
(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)**



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
Februari 2025**

## **ABSTRAK**

# **DESAIN DAN IMPLEMENTASI PEMROSESAN DATA *TIME OF FLIGHT* (TOF) PADA ALAT TOMOGRAFI AKUSTIK (TERAWANG) UNTUK MONITORING KONDISI INTERNAL POHON**

Oleh  
**Bayu Aji Nugroho**  
**NIM: 13221601**  
**(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)**

Dalam proses pemeliharaan dan perawatan pohon di lingkungan Ruang Terbuka Hijau (RTH), beberapa instansi, seperti pemerintahan dan lembaga pendidikan, membutuhkan pihak ketiga untuk membantu melakukan pengamatan serta pengecekan kondisi kesehatan pohon yang ditanam. Dalam kegiatan tersebut, diperlukan konsultan pemeliharaan dan perawatan pohon, seperti peneliti pohon, *arborist*, dan dosen kehutanan, yang dapat menganalisis kondisi pohon dengan baik. Namun, hingga saat ini, peneliti pohon masih menggunakan metode penilaian visual (*visual assessment*) dan *Forest Health Monitoring* (FHM) dalam melakukan pengecekan kesehatan pohon. Metode tersebut memiliki keterbatasan karena peneliti tidak dapat mengamati kondisi internal batang pohon secara langsung. Padahal, struktur batang merupakan bagian utama yang menentukan kekuatan pohon agar tidak tumbang. Oleh karena itu, penulis dan tim mahasiswa tugas akhir merancang alat bernama Terawang, yang dapat menganalisis kondisi internal batang pohon berdasarkan citra tomografi dua dimensi yang dihasilkan oleh alat tersebut.

Citra tomografi pada alat Terawang dihasilkan dari pengolahan data kecepatan rambat gelombang akustik di dalam batang pohon, yang dideteksi oleh sensor. Kecepatan rambat gelombang akustik diperoleh dari hasil pembagian antara jarak antar sensor dengan waktu perambatan gelombang akustik di antara dua sensor. Penghitungan kecepatan rambat gelombang akustik dilakukan oleh aplikasi Terawang yang dipasang pada *smartphone* dengan mempertimbangkan data geometri pohon. Data geometri pohon diperoleh dari pengukuran manual menggunakan meteran pohon, kemudian data tersebut dimasukkan ke dalam aplikasi Terawang. Sementara itu, penghitungan waktu perambatan gelombang akustik (*Time of Flight/ToF*) diperoleh dari *timer* mikrokontroler berdasarkan pendeteksian sinyal digital dari delapan sensor yang dipasang mengelilingi pohon dengan jarak antar sensor yang telah ditentukan. ToF diperoleh dari perbedaan durasi waktu puncak sinyal akustik yang diterima oleh sensor penerima dibandingkan dengan sensor sumber sinyal akustik. Perbedaan waktu tersebut dihitung menggunakan *timer* pada mikrokontroler, yang memiliki ketelitian sebesar 1 mikrodetik. Hasil ToF yang diperoleh dari kedelapan sensor dikirimkan ke aplikasi melalui komunikasi nirkabel untuk diproses menjadi data kecepatan

rambat, yang kemudian ditampilkan pada aplikasi Terawang. Data kecepatan rambat di setiap sensor selanjutnya digunakan oleh aplikasi Terawang untuk membuat citra tomografi dua dimensi, yang merepresentasikan kondisi internal pohon.

Dari keseluruhan sistem alat Terawang, penulis melakukan desain dan implementasi pada bagian pemrosesan data *Time of Flight* (ToF). Terdapat tiga subsistem dalam bagian tersebut, yaitu subsistem data akuisisi dengan komponen utama sensor KY-037, subsistem kontrol dan pemrosesan data dengan komponen utama mikrokontroler Teensy 4.1, serta subsistem komunikasi nirkabel dengan komponen utama modul Bluetooth HC-05. Berdasarkan implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, pemrosesan data ToF dapat berjalan dengan baik, sehingga data ToF dapat diolah dan ditampilkan oleh aplikasi Terawang menjadi data kecepatan. Dari pengujian yang dilakukan pada media uji berupa potongan penampang batang kayu trembesi dengan diameter 50 cm, diperoleh nilai standar deviasi kurang dari 10 mikrodetik pada pengujian sensor acuan 1, 2, 3, 4, 6, 7, dan 8. Sementara itu, pada pengujian sensor acuan 5, diperoleh nilai standar deviasi sebesar 15–20 mikrodetik. Tingkat akurasi dan presisi hasil pengujian dipengaruhi oleh tingkat sensitivitas masing-masing sensor.

Kata kunci: gelombang akustik, *Time of Flight*, mikrokontroler Teensy 4.1, Sensor KY-03, komunikasi nirkabel, Bluetooth HC-05.

## **ABSTRACT**

### **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF TIME OF FLIGHT (TOF) DATA PROCESSING IN AN ACOUSTIC TOMOGRAPHY DEVICE (TERAWANG) FOR MONITORING THE INTERNAL CONDITION OF TREES**

By

**Bayu Aji Nugroho**

**NIM: 13221601**

**(Bachelor Program in Electrical Engineering)**

*In the process of maintaining and managing trees in Ruang Terbuka Hijau (RTH) environments, several institutions, such as government agencies and educational institutions, require third-party assistance to observe and assess the health condition of planted trees. This activity necessitates tree maintenance and management consultants, such as tree researchers, arborists, and forestry lecturers, who can effectively analyze tree conditions. However, to date, tree researchers primarily rely on visual assessment methods and Forest Health Monitoring (FHM) to evaluate tree health. These methods have limitations, as researchers cannot directly observe the internal condition of tree trunks. In fact, trunk structure is a crucial component that determines a tree's strength and stability, preventing it from collapsing. Therefore, the author and team have developed a device called Terawang, which can analyze the internal condition of tree trunks based on two-dimensional tomography images generated by the device.*

*The tomography images produced by the Terawang device are derived from processing the propagation speed of acoustic waves within the tree trunk, as detected by sensors. The acoustic wave propagation speed is obtained by dividing the distance between sensors by the propagation time of the acoustic wave between two sensors. The calculation of acoustic wave propagation speed is performed by the Terawang application, installed on a smartphone, while considering the tree's geometric data. The tree geometry data is manually measured using a tree diameter tape and then input into the Terawang application. Meanwhile, the calculation of acoustic wave propagation time (Time of Flight/ToF) is obtained from a microcontroller timer based on the detection of digital signals from eight sensors arranged around the tree at a predefined distance. The ToF value is determined by the time difference between the peak of the acoustic signal received by the receiving sensor and the source sensor. This time difference is measured using a microcontroller timer with a precision of 1 microsecond. The ToF data collected from all eight sensors is transmitted wirelessly to the application, where it is processed into propagation speed data and subsequently displayed in the Terawang application. The propagation speed data from each sensor is then used by the*

*application to generate a two-dimensional tomography image, representing the tree's internal condition.*

*Within the overall Terawang system, the author focused on the design and implementation of Time of Flight (ToF) data processing. This component consists of three subsystems: the data acquisition subsystem, which utilizes a KY-037 sensor as its main component; the control and data processing subsystem, which employs a Teensy 4.1 microcontroller; and the wireless communication subsystem, which incorporates a HC-05 Bluetooth module. Based on implementation and testing, the ToF data processing functions effectively, enabling the Terawang application to process and display propagation speed data. Testing conducted on a 50 cm diameter cross-section of Trembesi wood revealed that the standard deviation was less than 10 microseconds for reference sensors 1, 2, 3, 4, 6, 7, and 8. Meanwhile, for reference sensor 5, the standard deviation ranged between 15–20 microseconds. The accuracy and precision of the test results are influenced by the sensitivity level of each sensor.*

*Keywords: acoustic wave, Time of Flight, KY-037 Sensor, Teensy 4.1 microcontroller, wireless communication, HC-05 Bluetooth.*

**HALAMAN PENGESAHAN**

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI  
PEMROSESAN DATA *TIME OF FLIGHT* (TOF)  
PADA ALAT TOMOGRAFI AKUSTIK (TERAWANG)  
UNTUK MONITORING KONDISI INTERNAL POHON**

Oleh  
**Bayu Aji Nugroho**  
**NIM: 13221601**  
(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui  
Dosen Pembimbing

Tanggal 3 Februari 2025

Pembimbing 1



(Dr. Ir. Akhmadi Surawijaya, S.T,  
M.Eng.)

Pembimbing 2



(Indra Sihar, S.T., M.Sc., Ph.D.)

## **PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR**

Tugas Akhir Sarjana, yang tidak dipublikasikan, terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Sitasi hasil pekerjaan Tugas Akhir ini dapat di tulis dalam bahasa Indonesia sebagai berikut:

Nugroho, B.A. (2025): *Desain dan Implementasi Pemrosesan Data Time of Flight (ToF) pada Alat Tomografi Akustik (Terawang) untuk Monitoring Kondisi Internal Pohon*, Tugas Akhir Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Nugroho, B.A. (2025): *Design and Implementation of Time of Flight (ToF) Data Processing in an Acoustic Tomography Device (Terawang) for Monitoring Internal Tree Conditions*, Bachelor's Final Project, Institut Teknologi Bandung.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh Tugas Akhir haruslah seizin Ketua Program Studi Sarjana Teknik Elektro, Institut Teknologi Bandung.

*Dipersembahkan kepada orang tua saya yang sudah mencurahkan tenaga dan upayanya sehingga bisa membuat anaknya menjadi seorang sarjana.*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan pembuatan laporan tugas akhir dengan judul **Desain dan Implementasi Pemrosesan Data *Time of Flight* (ToF) pada Alat Tomografi Akustik (Terawang) untuk Monitoring Kondisi Internal Pohon**. Dalam proses pengerjaan tugas akhir hingga penulisan buku Tugas Akhir ini, penulis memperoleh bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis yaitu Hertina Tjandrawati, S.Pd (Ibu) dan Soepardi, S.Sos., M.Si. (Ayah) atas doa dan dukungan yang selalu diberikan tanpa henti sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Keluarga penulis yaitu Eva Rahmaya Dewi, S.Kep., NERS (istri), Adeena Nayla Hafsha (anak), dan Allena Liora Nusaiba (anak) atas segala perhatian, dukungan dan doa yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan di ITB.
3. Bapak Ir. Arief Syaichu Rohman, M.Eng.Sc., Ph.D, selaku dosen wali yang telah memberikan arahan, saran, bimbingan dan motivasi kepada penulis selama menempuh pendidikan di ITB.
4. Bapak Dr. Ir. Akhmadi Surawijaya, S.T, M.Eng. dan Bapak Indra Sihar, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing dari tim tugas akhir penulis yang senantiasa memberikan saran, arahan, motivasi, bimbingan, dan memfasilitasi proses pembelajaran sepanjang proses pengerjaan tugas akhir.
5. Bapak Dr. Rahadian Yusuf, S.T., M.T., sebagai dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir II sekaligus dosen penguji, yang telah membantu mengevaluasi presentasi kelompok penulis, serta seluruh tim dosen Tugas Akhir yang telah memberikan masukan serta waktunya dalam membantu proses penulisan tugas akhir selama setahun terakhir.
6. Bapak Dr. Yayat Hidayat, S.Hut., M.Si. selaku dosen Fakultas SITH-R Kehutanan ITB yang telah menjadi narasumber penting dalam pengerjaan tugas akhir ini.

7. Ibu Ambarwati Retno Wahyuningsih, SE. selaku kepala TU STEI ITB atas dedikasinya dalam memberikan informasi dan melayani proses administrasi mahasiswa STEI ITB.
8. Tiffany Saulina Nababan, Faris Jabar Nugrhadi, dan Rani Isramiharti sebagai rekan tim tugas akhir atas kerja sama, semangat, dedikasi, pengertian, dan kesabarannya dalam proses pengerjaan tugas akhir.
9. Semua pihak lainnya yang telah membantu serta memberi doa dan dukungan untuk penulis dalam menempuh studi dan mengerjakan tugas akhir, yang tidak dapat dituliskan satu per satu.

Melalui tugas akhir ini, penulis berharap pembaca dapat memperoleh informasi yang bermanfaat serta terinspirasi untuk mengembangkan lebih lanjut dan memberikan kritik serta saran terhadap solusi permasalahan yang telah disusun.

Bandung, 3 Februari 2025



Bayu Aji Nugroho

## DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
HALAMAN PENGESAHAN .....	v
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR.....	vii
KATA PENGANTAR .....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
Bab I PENDAHULUAN .....	1
I.1.    Masalah dan Tujuan .....	1
I.2.    Batasan dan Konstrain .....	3
I.3.    Bagian yang Dikerjakan .....	4
BAB II PENGETAHUAN DAN INFORMASI PENDUKUNG .....	9
II.1.    Karakteristik Cepat Rambat Gelombang Akustik di Kayu .....	9
II.2.    Survei dan Wawancara.....	10
BAB III PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI.....	11
III.1.    Spesifikasi Teknis .....	12
III.2.    Proses Perancangan .....	13
III.3.    Proses Implementasi .....	15
III.4.    Hasil Implementasi.....	26
BAB IV ANALISIS HASIL TUGAS AKHIR.....	32
IV.1.    Hasil Tugas Akhir .....	32
IV.2.    Pengetahuan yang Diperoleh.....	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	40
V.1.    Kesimpulan .....	40
V.2.    Saran .....	40
REFERENSI.....	42
DAFTAR LAMPIRAN .....	43

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Pemasangan 8 sensor pada sekeliling pohon	2
Gambar 2 Arsitektur desain sistem alat yang terbagi ke dalam 7 sub-sistem	6
Gambar 3 Arsitektur desain subsistem data akuisisi	5
Gambar 4 Arsitektur desain subsistem kontrol dan pemrosesan data	7
Gambar 5 Arsitektur desain subsistem komunikasi nirkabel	8
Gambar 6 Arah gelombang tegangan longitudinal ditunjukkan panah merah	9
Gambar 7 Arah gelombang tegangan radial ditunjukkan dengan panah merah	10
Gambar 8 Skema pemasangan sensor	13
Gambar 9 Perancangan paku baja dan sensor KY-037	14
Gambar 10 Skema pengkabelan sensor, mikrokontroler, komunikasi nirkabel	14
Gambar 11 Diagram blok pemrosesan data	15
Gambar 12 State diagram program utama	16
Gambar 13 Diagram alir program utama	16
Gambar 14 (a) Diagram alir proses idle	17
Gambar 14 (b) Diagram alir proses 1 sampai dengan 8	17
Gambar 15 Diagram <i>void pengukuranSensor1()</i>	18
Gambar 16 Diagram alir program interupsi eksternal	19
Gambar 17 Pemasangan 8 sensor pada sekeliling pohon	24
Gambar 18 (a) Media pengujian penampang batang pohon trembesi	26
Gambar 18 (b) Perakitan sensor KY-037, Teensy 4.1, dan Bluetooth HC-05	26
Gambar 19 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 1	27
Gambar 20 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 2	28
Gambar 21 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 3	28
Gambar 22 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 4	29
Gambar 23 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 5	29
Gambar 24 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 6	30
Gambar 25 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 7	30
Gambar 26 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 8	31
Gambar 27 (a) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 1	31
Gambar 27 (b) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 8	31
Gambar 28 Perbandingan gambar tomogram dengan media kayu uji asli	34
Gambar 29 (a) Setup untuk kayu berlubang 10%	35
Gambar 29 (b) Setup untuk kayu berlubang 20%	35
Gambar 30 (a) Hasil pembacaan ToF pada kayu berlubang 10%	35
Gambar 30 (b) Hasil pembacaan ToF pada kayu berlubang 20%	35
Gambar 31 Hasil pengujian sampling rate	37

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi subsistem data akuisisi	4
Tabel 2 Spesifikasi subsistem kontrol dan pemrosesan data	7
Tabel 3 Spesifikasi subsistem komunikasi nirkabel	8
Tabel 4 Karakteristik produk	12
Tabel 5 Spesifikasi teknis	12
Tabel 6 State pada program utama	15
Tabel 7 Nilai ToF pada pengujian sensor 1	27
Tabel 8 Nilai ToF pada pengujian sensor 2	27
Tabel 9 Nilai ToF pada pengujian sensor 3	28
Tabel 10 Nilai ToF pada pengujian sensor 4	28
Tabel 11 Nilai ToF pada pengujian sensor 5	29
Tabel 12 Nilai ToF pada pengujian sensor 6	29
Tabel 13 Nilai ToF pada pengujian sensor 7	30
Tabel 14 Nilai ToF pada pengujian sensor 8	30
Tabel 15 Analisis pengujian sensor 1	32
Tabel 16 Analisis pengujian sensor 2	32
Tabel 17 Analisis pengujian sensor 3	32
Tabel 18 Analisis pengujian sensor 4	32
Tabel 19 Analisis pengujian sensor 5	33
Tabel 20 Analisis pengujian sensor 6	33
Tabel 21 Analisis pengujian sensor 7	33
Tabel 22 Analisis pengujian sensor 8	33
Tabel 23 Rata-rata kecepatan dari 5 kali pengambilan data	34
Tabel 24 Rincian waktu tahapan pengukuran pohon	38

# BAB I PENDAHULUAN

## I.1. Masalah dan Tujuan

Dalam proses pemeliharaan dan perawatan pohon di lingkungan Ruang Terbuka Hijau (RTH), beberapa instansi, seperti pemerintahan dan lembaga pendidikan, membutuhkan pihak ketiga untuk membantu melakukan pengamatan serta pengecekan kondisi kesehatan pohon yang ditanam. Dalam kegiatan tersebut, diperlukan konsultan pemeliharaan dan perawatan pohon, seperti peneliti pohon, *arborist*, dan dosen kehutanan, yang dapat menganalisis kondisi pohon dengan baik. Namun, hingga saat ini, peneliti pohon masih menggunakan metode penilaian visual (*visual assessment*) dan *Forest Health Monitoring* (FHM) dalam melakukan pengecekan kesehatan pohon. Metode tersebut memiliki keterbatasan karena peneliti tidak dapat mengamati kondisi internal batang pohon secara langsung. Padahal, struktur batang merupakan bagian utama yang menentukan kekuatan pohon agar tidak tumbang. Oleh karena itu, penulis dan tim mahasiswa tugas akhir merancang alat bernama Terawang, yang dapat menganalisis kondisi internal batang pohon berdasarkan citra tomografi dua dimensi yang dihasilkan oleh alat tersebut.

Terawang merupakan alat yang dibuat untuk mengetahui kondisi internal batang pohon berkayu seperti pohon angsa, trembesi, mahoni, beringin, akasia, ciakrek dan flamboyan, yang jenisnya secara umum digunakan untuk tanaman penghijauan di kawasan Ruang Terbuka Hijau (RTH). Alat Terawang menghasilkan citra tomogram 2 dimensi penampang batang pohon dari data-data cepat rambat gelombang akustik yang melintas pada penampang tersebut. Untuk memperoleh data cepat rambat tersebut diperlukan dua buah data pendukung yaitu waktu rambat gelombang akustik (*Time of Flight/ToF*) dan jarak rambat antara 2 sensor. Sesuai dengan teori fisika, cepat rambat diperoleh dengan rumus (1) [1]:

$$v = \frac{d}{ToF} \times 1000 \quad (1)$$

Keterangan :

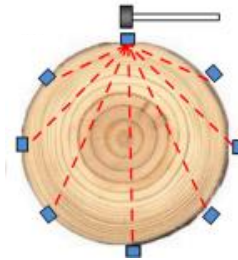
$v$  = cepat rambat gelombang akustik (m/s)

$d$  = jarak antar sensor (meter)

ToF = waktu rambat gelombang (mikrosekon)

Data jarak diperoleh dari geometri pohon berdasarkan pengukuran yang dimasukkan ke aplikasi Terawang\_v1 di *smartphone*. Sedangkan data ToF diperoleh dengan mengukur waktu rambat gelombang akustik antar sensor menggunakan *timer* dari sistem mikrokontroler.

Kecepatan rambat gelombang akustik didalam kayu secara radial memiliki nilai yang besar, berkisar antara 1000 s.d. 2000 m/s [2]. Dengan nilai kecepatan rambat yang tinggi, maka dibutuhkan *timer* dengan ketelitian dalam skala mikrodetik untuk menghitung nilai ToF pada penampang melintang pohon yang berdiameter 30-120 cm. Selain itu dibutuhkan juga pemrosesan data yang cepat agar mampu menangani pencatatan waktu dari delapan sensor yang dipasang mengelilingi bagian pohon seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 di bawah ini.



*Gambar 1 Pemasangan 8 sensor pada sekeliling pohon*

Setelah delapan data waktu diperoleh dari kedelapan sensor, kemudian data tersebut diproses menjadi data ToF dengan cara menghitung beda waktu antara sensor penerima dengan sensor yang menjadi sumber suara (suara ketukan) seperti pada rumus (2) berikut ini.

$$ToF_{sensor\ x} = t_{sensor\ x} - t_{sensor\ sumber} \quad (2)$$

Keterangan :

ToF sensor x = waktu antara sensor sumber sensor ke-x

$t_{sensor\ x}$  = waktu tercatat timer di sensor ke-x

$t_{sensor\ sumber}$  = waktu tercatat timer di sensor sumber suara

Selanjutnya data ToF dikirimkan ke ponsel melalui jaringan komunikasi nirkabel

yaitu bluetooth. Untuk pengiriman tersebut dibutuhkan alat yang dapat menghubungkan perangkat mikrokontroler dengan *smartphone* sehingga kedua perangkat tersebut dapat berkomunikasi secara nirkabel.

Pada bagian sumber gelombang akustik, digunakan paku baja dan palu besi sebagai pemicu gelombang akustik pada kayu. Gelombang akustik yang dihasilkan pukulan palu besi terhadap paku baja menghasilkan frekuensi audiosonik berkisar antara 20 Hz – 20 kHz. Pada rentang frekuensi audiosonik, kayu masih dapat melewati gelombang tersebut dan tidak terjadi redaman[3]. Oleh karena itu pada bagian penerima, dibutuhkan sensor yang dapat mendeteksi gelombang akustik pada rentang frekuensi audiosonik.

Berdasarkan uraian masalah di atas, dapat disimpulkan bahwa tujuan penulisan tugas akhir ini adalah merancang dan mengimplementasikan perangkat yang dapat memproses sinyal akustik yang merambat pada kayu pohon akibat pukulan palu ke paku menjadi data ToF. Selanjutnya, data ToF tersebut dapat dikirimkan ke *smartphone* secara nirkabel.

## **I.2. Batasan dan Konstrain**

Pada proyek tugas akhir ini, batasan masalah yang ditentukan adalah sebagai berikut.

1. Alat digunakan untuk jenis pohon berkayu dengan diameter minimal 30 cm dan maksimal 120 cm dengan bentuk penampang yang mendekati bulat.
2. Alat bekerja pada gelombang audiosonik dengan frekuensi 20 Hz sampai dengan 20.000 Hz.

Selain batasan, juga ditentukan beberapa konstrain seperti yang dijelaskan pada poin-poin berikut ini.

1. Alat dibuat untuk menyediakan peralatan akustik tomografi bagi peneliti pohon dengan harga terjangkau dan di bawah harga yang tersedia di pasar global. Oleh karena itu untuk menekan harga jualnya, perlu menekan biaya produksi dengan cara pembuatan alat menggunakan komponen-komponen yang tersedia di pasar lokal dalam negeri dan dengan harga yang terjangkau.



2. Alat dibuat dengan memperhatikan kesehatan, keamanan dan keselamatan pengguna serta pohon yang diamati sehingga dalam perancangannya alat harus beroperasi pada arus dan tegangan listrik yang aman bagi pengguna maupun pohon. Selain itu, pemasangan sensor alat pada pohon tidak merusak struktur dan kesehatan pohon (non destruktif)
3. Alat dioperasikan di luar ruangan sehingga alat yang dibuat harus tahan terhadap paparan sinar matahari serta percikan air.
4. Pembuatan alat menggunakan komponen-komponen dengan daya yang rendah sehingga tidak boros energi dan dapat dioperasikan dalam waktu yang lama lebih dari 1 jam.
5. Pembuatan alat ditujukan untuk para peneliti pohon sehingga pengguna alat harus berpendidikan minimal S1 serta memiliki pengetahuan dan wawasan yang cukup dalam bidang tanaman pohon.

### **I.3. Bagian yang Dikerjakan**

Secara keseluruhan sistem alat monitoring kondisi internal pohon (Terawang) terbagi menjadi 7 sub-sistem yaitu Sub-sistem Data Akuisisi, Kontrol dan Pemrosesan Data, Komunikasi Nirkabel, Daya, Aplikasi, Data Storage, serta Visualisasi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2. Bagian yang diberi tanda garis merah merupakan bagian sub-sistem yang dikerjakan oleh penulis tugas akhir. Pada bagian yang bertanda merah terdapat 3 sub-sistem yaitu sub-sistem Data Akuisisi, Kontrol dan Pemrosesan Data, serta Komunikasi Nirkabel.

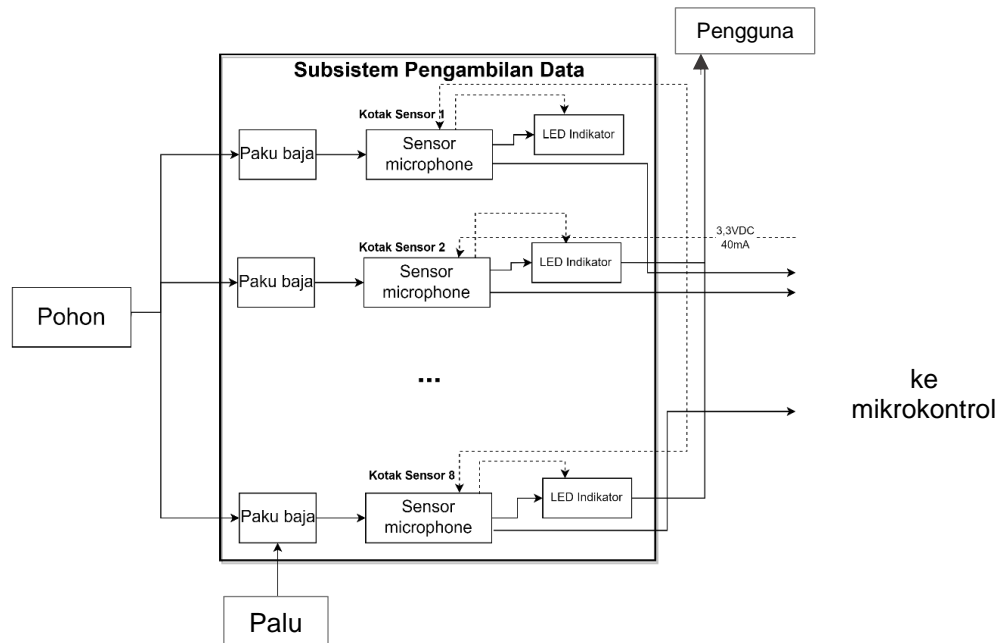
#### **I.3.a Sub-Sistem Data Akuisisi**

Sub-sistem ini memiliki spesifikasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 1 di bawah ini.

*Tabel 1 Spesifikasi sub-sistem data akuisisi*

<b>Spesifikasi</b>	<b>Keterangan</b>
Fungsi	Mendeteksi sinyal gelombang akustik jenis audiosonik dengan frekuensi 20 Hz – 20 kHz yang merambat pada kayu pohon dan mengubah sinyal tersebut menjadi sinyal digital
Masukan	Gelombang audiosonik (20 Hz – 20 kHz)
Luaran	Sinyal digital : terdeteksi suara → HIGH (3,3V) tidak terdeteksi suara → LOW (0V)

Pada Gambar 3, sub-sistem data akuisisi terdiri dari 3 komponen penyusun yaitu paku baja, sensor mikrofon dan led indikator.



*Gambar 3 Arsitektur desain sub-sistem data akuisisi*

Fungsi dari komponen penyusun sub-sistem data akuisisi adalah sebagai berikut:

#### 1) Paku Baja

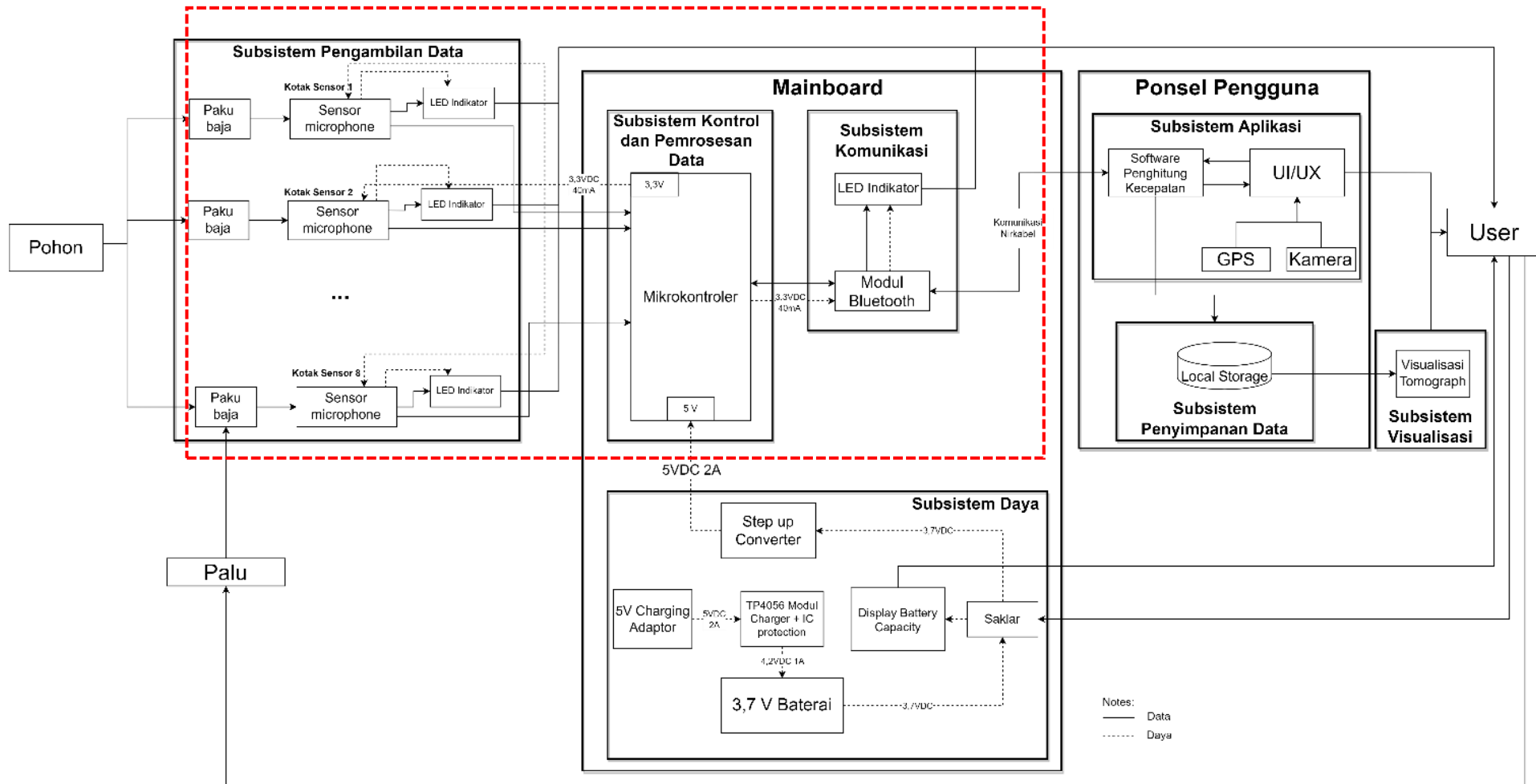
Paku baja yang telah dimodifikasi dan disambungkan dengan lempengan besi berfungsi untuk menyalurkan energi gelombang akustik dari paku ke pohon saat transmisi dan dari kayu pohon ke sensor mikrofon saat menerima sinyal gelombang akustik.

#### 2) Sensor Mikrofon

Mendeteksi sinyal gelombang akustik yang tmerambat di kayu pohon, kemudian mengubah sinyal akustik tersebut menjadi sinyal digital lalu mengirimkannya ke mikrokontroler.

#### 3) Led Indikator

Memberikan indikasi suplai daya dan indikasi terdeteksinya sinyal gelombang akustik yang tertangkap oleh sensor mikrofon.



Gambar 2 Arsitektur desain sistem alat yang terbagi ke dalam 7 sub-sistem

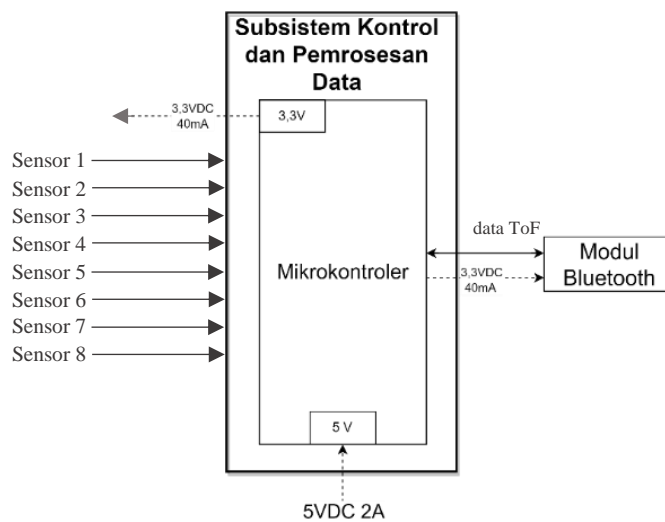
### I.3.b Sub-Sistem Kontrol dan Pemrosesan Data

Sub-sistem ini memiliki spesifikasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 di bawah ini.

*Tabel 2 Spesifikasi sub-sistem kontrol dan pemrosesan data*

Spesifikasi	Keterangan
Fungsi	Mendeteksi sinyal digital dari 8 sensor atas kejadian terdeteksinya suara, kemudian mencatat kejadian tersebut berdasarkan sistem waktu. Selanjutnya mengolah data waktu dari kedelapan sensor menjadi data ToF dan dikirimkan ke aplikasi melalui komunikasi nirkabel
Masukan	Sinyal digital : terdeteksi suara → HIGH (3,3V) tidak terdeteksi suara → LOW (0V)
Luaran	8 data ToF (mikrosekon) dari 7 sensor penerima dan 1 sensor acuan

Pada Gambar 4, sub-sistem kontrol dan pemrosesan data hanya terdiri dari 1 komponen penyusun yaitu mikrokontroler.



*Gambar 4 Arsitektur desain sub-sistem kontrol dan pemrosesan data*

Fungsi dari komponen penyusun sub-sistem kontrol dan pemrosesan data yaitu mikrokontroler adalah mendeteksi sinyal digital dari sensor mikrofon dan memproses sinyal tersebut menjadi data ToF, kemudian mengirimkan data ToF ke modul Bluetooth.

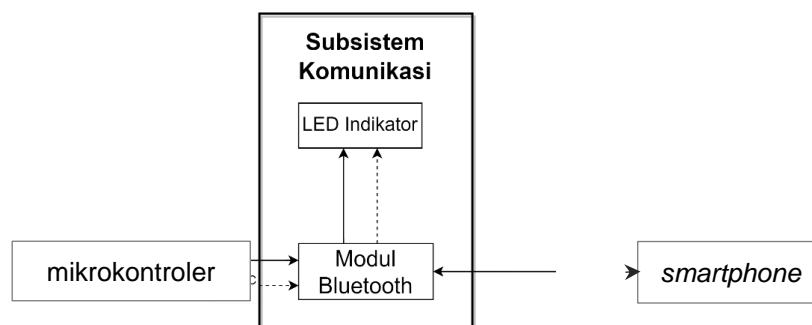
### I.3.c Sub-Sistem Komunikasi Nirkabel

Sub-sistem ini memiliki spesifikasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 3 di bawah ini.

*Tabel 3 Spesifikasi sub-sistem komunikasi nirkabel*

Spesifikasi	Keterangan
Fungsi	Menghubungkan perangkat mikrokontroler dengan <i>smartphone</i> secara nirkabel sehingga kedua perangkat tersebut dapat bertukar informasi dan mengakses sumber daya
Masukan	Dari mikrokontroler : data ToF Dari <i>smartphone</i> : perintah pemilihan sensor acuan
Luaran	Ke mikrokontroler : perintah pemilihan sensor acuan Ke <i>smartphone</i> : data ToF

Pada Gambar 5, sub-sistem komunikasi nirkabel terdiri dari 2 komponen penyusun yaitu modul bluetooth dan led indikator.



*Gambar 5 Arsitektur desain sub-sistem komunikasi nirkabel*

Fungsi dari komponen penyusun sub-sistem komunikasi nirkabel adalah sebagai berikut:

1) Modul Bluetooth

Membangun jaringan komunikasi antara mikrokontroler dengan *smartphone* pengguna sebagai jalur pengiriman data ToF dan penerimaan perintah aplikasi *smartphone*.

2) Led Indikator

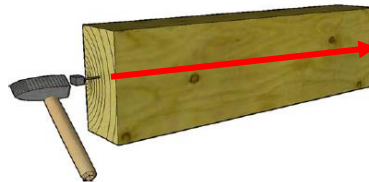
Memberikan indikasi tersambungny jaringan komunikasi Bluetooth antara mikrokontroler dengan *smartphone* pengguna.

## BAB II PENGETAHUAN DAN INFORMASI PENDUKUNG

Bagian ini berisi keilmuan yang didapatkan dan digunakan dalam proses perancangan subsistem yang dikerjakan. Selain itu, juga memuat survei dan informasi pendukung yang digunakan langsung dalam proses perancangan.

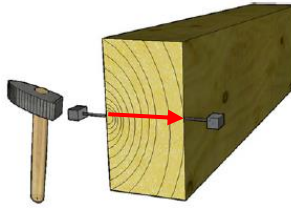
### II.1. Karakteristik Cepat Rambat Gelombang Akustik di Kayu

Perambatan gelombang akustik pada kayu yang disebabkan oleh pukulan termasuk kedalam gelombang tegangan (*stress wave*) [4]. Gelombang tegangan tersebut berdasarkan arah rambatan relatif terhadap serat kayu (arah pertumbuhan pohon) dibedakan menjadi 2 jenis yaitu gelombang longitudinal dan transversal [5]. Kedua jenis gelombang tersebut memiliki cepat rambat yang berbeda-beda dan dapat dihitung menggunakan sebuah persamaan matematika[6]. Gelombang longitudinal adalah gelombang yang merambat sejajar dengan orientasi serat kayu, sangat sensitif terhadap modulus elastis kayu dan memiliki kecepatan tertinggi karena hambatan rambatan minimum pada orientasi serat kayu. Kecepatan gelombang longitudinal memiliki rentang antara 3000 s.d. 5000 m/s. Arah gelombang tegangan longitudinal diilustrasikan pada Gambar 6 di bawah ini.



*Gambar 6 Arah gelombang tegangan longitudinal ditunjukkan dengan panah merah [5]*

Gelombang Transversal adalah gelombang yang merambat tegak lurus terhadap lingkaran tahunan. Karakteristik gelombang ini adalah memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan kecepatan gelombang longitudinal karena hambatan rambatannya lebih tinggi dengan menembus serat kayu. Kecepatan gelombang radial memiliki rentang kecepatan antara 600 s.d. 2000 m/s. Arah gelombang tegangan radial diilustrasikan pada gambar 7 di bawah ini.



*Gambar 7 Arah gelombang tegangan radial ditunjukkan dengan panah merah [5]*

Kecepatan rambat gelombang akustik pada kayu akan berbeda-beda karena dipengaruhi oleh beberapa faktor. Berikut merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi cepat rambat gelombang akustik pada kayu[5]:

1. Jenis kayu (spesies pohon)
2. Kadar air (*moisture content*)
3. Orientasi cincin pertumbuhan relatif terhadap arah ketukannya.

## **II.2. Survei dan Wawancara**

Survei dan wawancara dilakukan pada salah satu peneliti pohon dan juga dosen Fakultas SITH-R Kehutanan ITB, Dr. Yayat Hidayat, S.Hut., M.Si. Survei dilakukan pada hari Kamis tanggal 28 Februari 2024 dengan beberapa pertanyaan dan diskusi terkait metode yang digunakan untuk mengamati kondisi internal batang pohon. Beberapa informasi yang diperoleh dari narasumber terkait sub-sistem yang dikerjakan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Pengamatan kondisi kesehatan pohon dilakukan pada pohon berkayu yang telah memasuki usia tua (*mature*) dengan ciri diameter penampang batang lebih dari 30 cm dan diamati pada ketinggian di area seperempat dari tinggi batang pokok pohon.
2. Penggunaan sensor yang dipasang pada pohon dengan metode invasif-non destruktif (paku) tidak berbahaya bagi kesehatan pohon karena pohon dapat meregenerasi jaringannya, namun dengan catatan paku yang digunakan tidak berukuran besar melebihi ukuran sebuah pulpen.
3. Pengamatan kondisi kesehatan pohon menggunakan metode akustik tomograf dengan alat yang tersedia saat ini seperti Picus, ArborSonic dan Fakopp membutuhkan waktu pengukuran sekitar 1-2 jam.

### BAB III PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada kasus pengamatan kondisi internal batang pohon, dirumuskan karakteristik solusi produk yang dirangkum dari fitur dan sifat solusi yang diharapkan. Fitur-fitur dan sifat solusi yang diharapkan tersebut adalah:

- **Fitur Utama:**

Perangkat dapat melakukan pengukuran untuk mengetahui kondisi internal batang pohon berdasarkan distribusi densitas batang pohon sebagai parameter kesehatan pohon.

- **Fitur Dasar:**

- Mengukur distribusi densitas batang pohon untuk mendeteksi adanya pelapukan pada titik yang diukur
- Memberikan visualisasi pelapukan batang pohon kepada user
- Portable dan *splash resistant*

- **Fitur Tambahan:**

- Menyediakan penyimpanan data hasil pengukuran pada memory/database produk

- **Sifat solusi yang diharapkan**

- Perangkat yang dibuat memiliki harga yang relatif lebih murah dibanding produk lain yang sudah ada (estimasi dibawah 50 juta)
- Dapat dioperasikan dalam durasi waktu yang panjang dalam sehari dan tidak membutuhkan perawatan yang terlalu intensif
- Pengukuran tidak akan menyebabkan adanya potensi kerusakan tambahan pada pohon
- Waktu pengukuran per pohon tidak memakan waktu yang lama



Fitur dan sifat tersebut kemudian diturunkan menjadi beberapa karakteristik dari produk yang

dibuat. Karakteristik tersebut dijelaskan pada Tabel 4.

*Tabel 4 Karakteristik produk*

No	Karakteristik Produk
1	Dapat <b>mengukur distribusi densitas batang pohon</b> untuk <b>mendeteksi adanya pelapukan</b> pada titik yang diukur
2	Dapat memberikan <b>visualisasi</b> pelapukan batang pohon kepada user
3	Produk <b>portable</b> dan <i>splash resistant</i>
4	Menyediakan <b>penyimpanan data hasil pengukuran</b> pada <b>memory/database</b> produk
5	<b>Waktu pengukuran</b> per pohon tidak memakan waktu yang lama

### III.1. Spesifikasi Teknis

Berdasarkan karakteristik produk yang telah disampaikan di atas, alat Terawang di rancang dengan memiliki 8 spesifikasi teknis produk. Terdapat 3 spesifikasi yang menjadi target yang harus dicapai oleh sub-sistem yang dikerjakan oleh penulis. Berikut merupakan spesifikasi teknis yang harus dicapai oleh ditampilkan pada Tabel 5 di bawah ini.

*Tabel 5 Spesifikasi teknis*

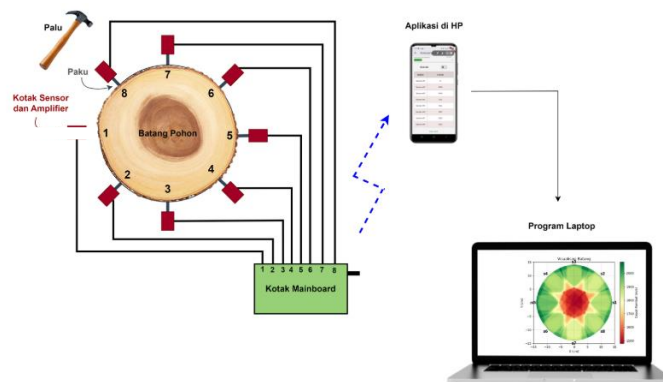
Spesifikasi	Uraian
Resolusi Pembacaan Kecepatan Gelombang	Mampu mendeteksi perubahan kecepatan maksimal 41,05 m/s dalam setiap pertambahan 10% kerusakan kayu pada jalur batang pohon yang dilewati rambatan gelombang akustik.
Sampling Rate	Kecepatan pencuplikan data mikrokontroler minimal 28600 Hz
Total waktu pengukuran	Total waktu pengukuran kurang dari 1 jam pada satu titik ketinggian pohon di mulai dari penyusunan alat hingga mendapatkan gambar tomogram

### III.2. Proses Perancangan

Sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah disampaikan, resolusi pembacaan kecepatan gelombang adalah minimal 41,05 m/s. Untuk mendapatkan resolusi tersebut dibutuhkan mikrokontroler yang memiliki *sampling rate* minimal 28600 Hz, dengan kata lain mikrokontroler mampu melakukan pencuplikan data sensor setiap 35 mikrosekon.

Mikrokontroler Teensy 4.1 memiliki *processing speed* sebesar 600 MHz, dengan kecepatan tersebut maka mikrokontroler Teensy 4.1 dapat melakukan pencuplikan data lebih dari kebutuhan spesifikasi teknis yaitu 28600 Hz. Untuk mengoptimalkan *processing speed* Teensy, maka pencuplikan data dari sensor menggunakan luaran sinyal digital sehingga dapat dilakukan pendeteksian sinyal dengan fungsi interupsi eksternal melalui pin digital mikrokontroler.

Pada alat Terawang dirancang dengan menggunakan 8 sensor untuk mendeteksi gelombang akustik yang merambat pada kayu batang pohon seperti yang ditampilkan pada Gambar 8.

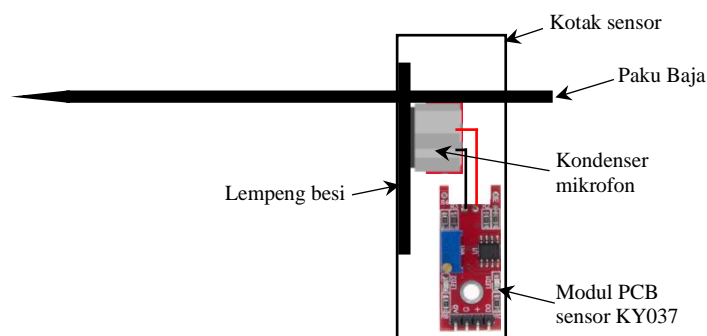


Gambar 8 Skema pemasangan sensor

Sensor-sensor mendeteksi sinyal pertama dari gelombang akustik yang merambat pada kayu. Gelombang akustik yang merambat tersebut merupakan gelombang audiosonik yang memiliki frekuensi 20 Hz - 20 kHz yang dihasilkan oleh ketukan palu ke paku baja yang terdapat pada kotak sensor. Ketika sensor acuan diketuk, kedelapan sensor akan menerima sinyal gelombang akustik, kemudian sensor mengubah sinyal tersebut menjadi sinyal digital *HIGH* lalu mengirimkannya ke mikrokontroler. Sinyal digital *HIGH* tersebut akan mengaktifkan fungsi interupsi eksternal mikrokontroler. Interupsi akan mencatat waktu penerimaan masing-

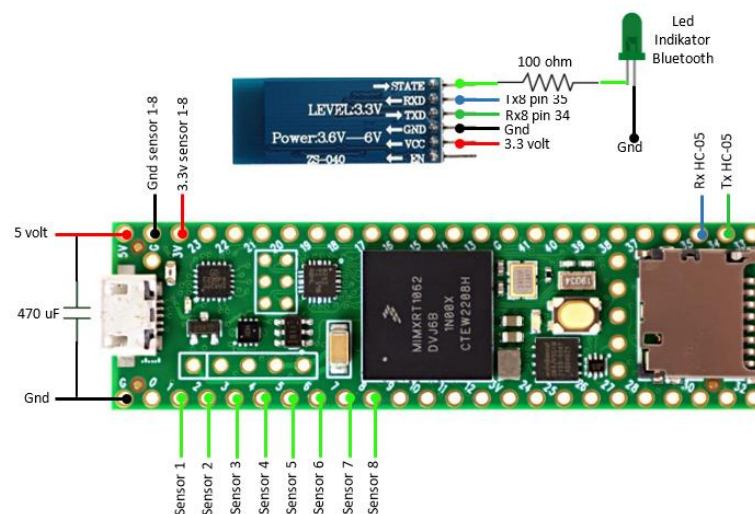
masing sensor berdasarkan waktu dari *timer*. Perbedaan waktu setiap sensor terhadap sensor acuan merupakan data ToF yang akan dikirimkan ke *smartphone* melalui komunikasi nirkabel.

Untuk mendeteksi gelombang audiosonik yang merambat pada kayu digunakan sensor KY-037. Selain itu digunakan paku baja yang telah dimodifikasi dengan lempengan besi untuk menyalurkan energi gelombang akustik yang merambat dari kayu ke sensor KY-037. Berikut merupakan perancangan paku baja pada kotak sensor dapat dilihat pada Gambar 9.



**Gambar 9 Perancangan paku baja dan sensor KY-037**

Kotak sensor dihubungkan ke mikrokontroler menggunakan kabel sepanjang minimal 3 meter. Kabel terdiri dari 3 inti kabel yang meliputi kabel Vcc, kabel Gnd dan kabel sinyal. Berikut merupakan perancangan skema pengkabelan dari sensor ke mikrokontroler dan modul komunikasi nirkabel (Modul Bluetooth HC-05) yang ditampilkan pada Gambar 10.



**Gambar 10 Skema pengkabelan sensor, mikrokontroler dan modul komunikasi nirkabel**

Agar mikrokontroler Teensy 4.1 dapat melakukan kontrol dan pemrosesan data, maka perlu dilakukan pembuatan kode program Teensy 4.1 dan mengunggah kode program tersebut ke papan mikrokontroler. Pembuatan kode program Teensy 4.1 dilakukan pada aplikasi Arduino IDE yang telah disesuaikan versi dan *library*-nya sehingga kompatibel dengan Teensy 4.1.

### III.3. Proses Implementasi

#### Program untuk Pemrosesan ToF

Pada implementasinya, alur data pemrosesan data ToF dimulai dari sinyal digital yang berasal dari keluaran sensor yang dikirim ke mikrokontroler kemudian diolah menjadi ToF untuk dikirim ke *smartphone* melalui komunikasi nirkabel modul bluetooth HC-05. Berikut diagram blok pemrosesan data ToF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11



Gambar 11 Diagram blok pemrosesan data

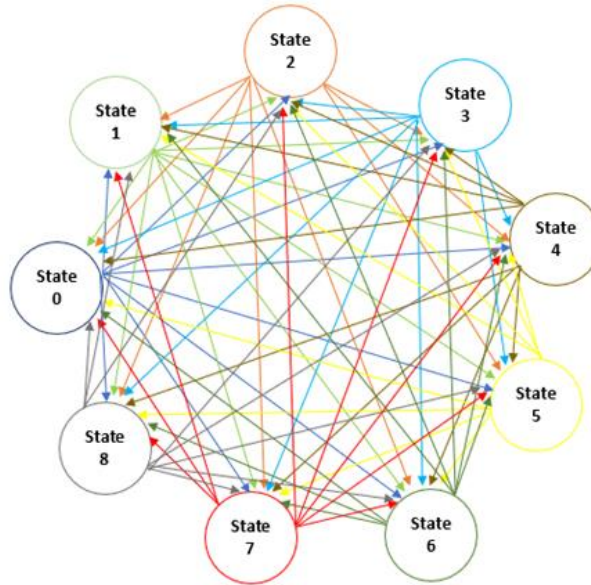
Pada bagian mikrokontroler dibuat program untuk menjalankan Teensy agar mampu memproses data ToF dengan menggunakan bahasa pemrograman C/C++ di Arduino IDE. Program tersebut terdapat 2 program utama yaitu program yang dijalankan secara terus menerus (*looping*) dan program yang bekerja ketika terjadi interupsi eksternal dari pin masukan. Terdapat 9 *state* pada bagian program utama. Setiap *state* dapat berpindah ke semua *state* lainnya. Berikut merupakan kesembilan *state* yang dirincikan pada Tabel 6.

Tabel 6 State pada program utama

State ke-n	Input perpindahan	Keterangan
0	0	Kondisi <i>idle</i> (tidak ada proses)
1	1	Proses1 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 1)
2	2	Proses2 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 2)
3	3	Proses3 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 3)
4	4	Proses4 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 4)
5	5	Proses5 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 5)
6	6	Proses6 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 6)

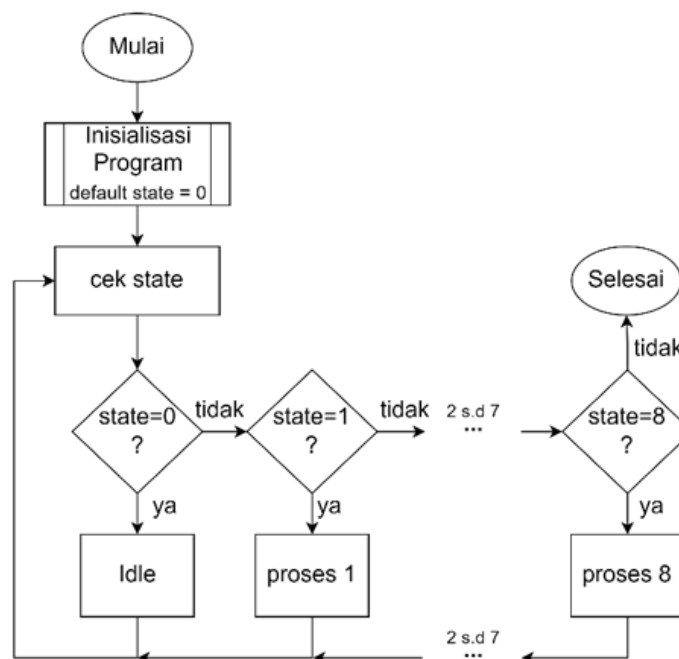
7	7	Proses7 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 7)
8	8	Proses8 (pengukuran dengan sensor acuan sensor 8)

Perpindahan *state program* dapat dilihat pada state diagram Gambar 12



Gambar 12 State diagram program utama

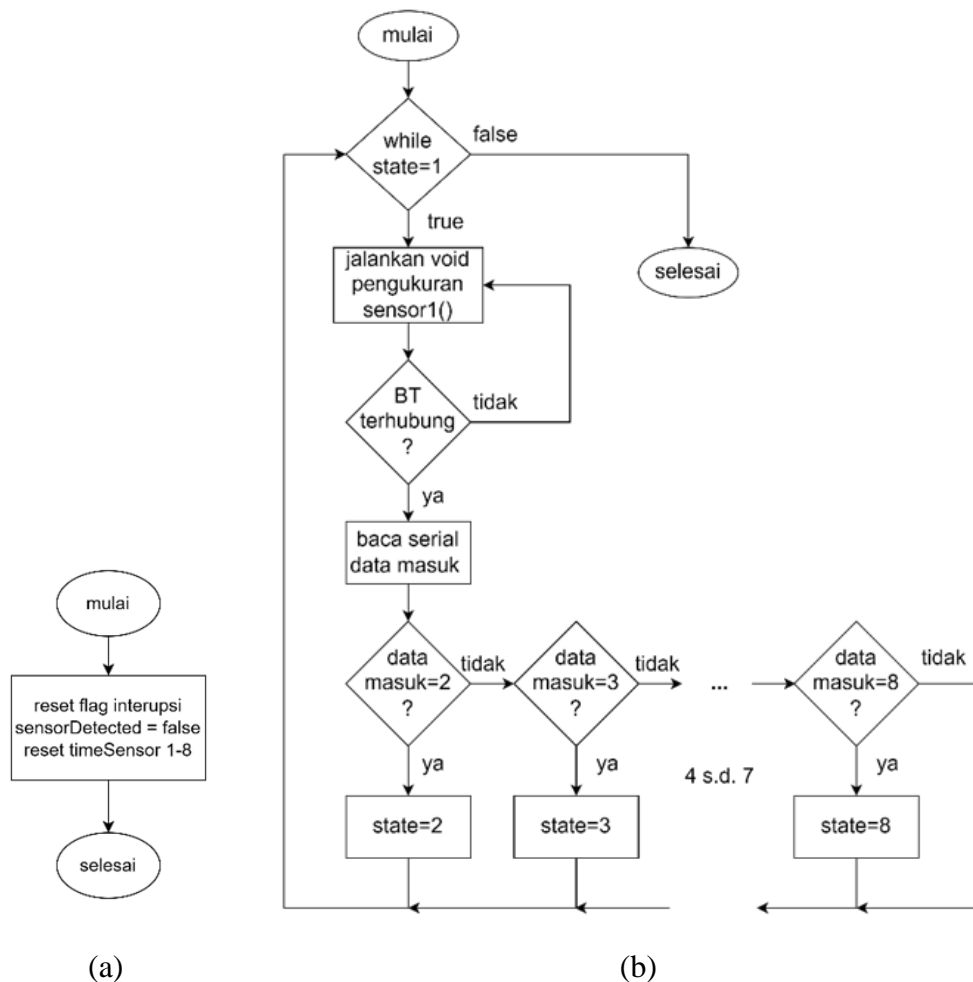
Dari 9 *state* di atas kemudian dikembangkan menjadi program yang dapat berjalan pada mikrokontroler Teensy. Berikut merupakan program utama yang dijalankan secara *looping* ditampilkan pada diagram alir Gambar 13 di bawah ini.



Gambar 13 Diagram alir program utama

Pada bagian ini program secara terus menerus mengecek *state* kondisi program. Terdapat 9 *state* program yang setiap *state*-nya menjalankan proses masing-masing ketika mendapat masukkan perintah. *State* 0 menjadi *default state* ketika program pertama kali dijalankan. Sembilan *state* ini berfungsi untuk menjalankan fungsi sensor berdasarkan pilihan pengguna yang berasal dari ponsel.

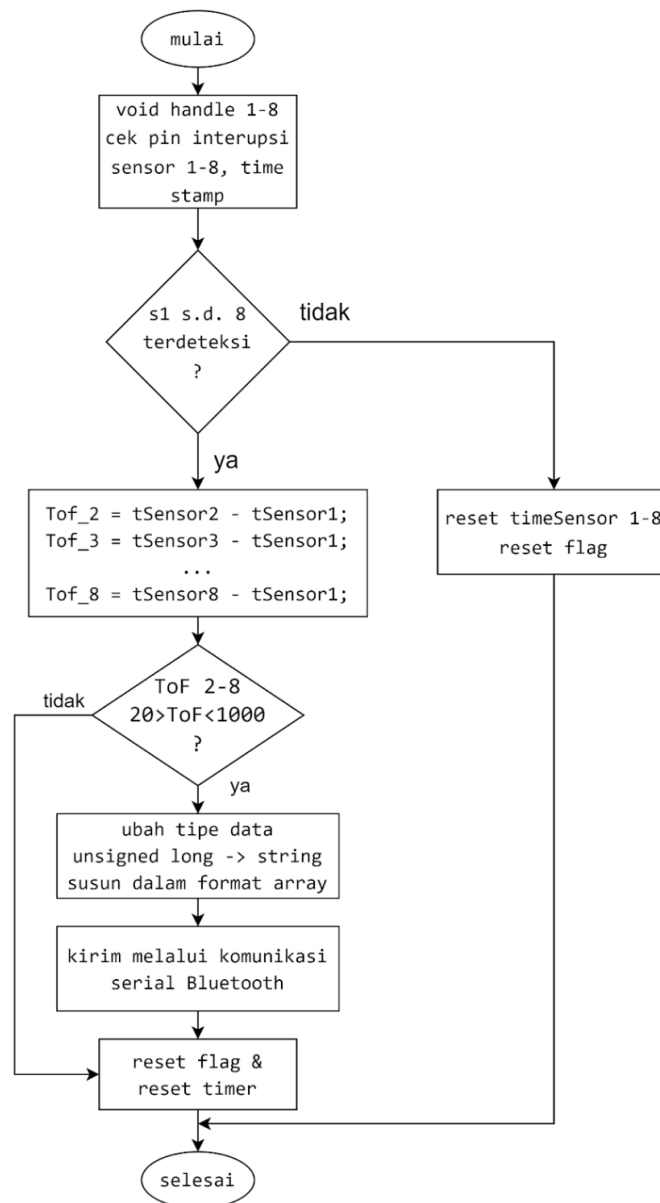
Di dalam *state* 0 sampai dengan 8 terdapat proses untuk menjalankan pekerjaan khusus. Di dalam proses *idle* akan menghentikan proses pengukuran. Sedangkan proses 1 sampai dengan 8 memiliki kesamaan alur yaitu untuk menjalankan fungsi pengukuran sensor dan mengecek kembali perubahan *state* berdasarkan masukan. Berikut merupakan diagram alir dari proses 0 sampai dengan 8 yang ditunjukkan pada Gambar 14 (a) dan (b).



Gambar 14 (a) Diagram alir proses idle, (b) Diagram alir proses 1 sampai dengan 8

Tampilan di atas merupakan isi dari proses 1 saja. Sedangkan proses 2 sampai dengan 8 tidak ditampilkan karena secara proses aliran program adalah sama

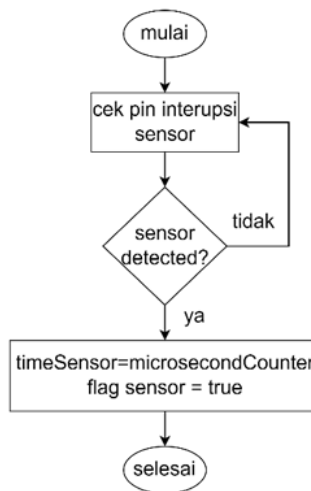
dengan proses 1. Pada bagian proses tersebut terdapat *void pengukuranSensor1()* yang di dalamnya terdapat alur program yang berfungsi melakukan penghitungan ToF ketika sensor 1 menjadi sensor acuan sumber suara. Berikut merupakan diagram alir program yang terdapat pada *void pengukuranSensor1()* ditampilkan pada Gambar 15.



Gambar 15 Diagram *void pengukuranSensor1()*

Pada *void pengukuranSensor()* 2 sampai 8 juga memiliki alur yang sama yang membedakan hanya rumus pengurangan ToF karena yang digunakan sebagai sensor acuan juga berbeda.

Program utama yang kedua yaitu program yang bekerja saat terjadi interupsi eksternal yang berasal dari pin digital Teensy. Program ini selalu melakukan *scanning* pada 8 pin digital yang telah diatur untuk menjadi pin interupsi. Ketika terjadi masukan berupa logika HIGH pada pin tersebut maka Teensy akan menangani kejadian tersebut dengan menjalankan program interupsi yang diagram alirnya ditampilkan pada Gambar 16. Seperti yang telah dijelaskan pada Gambar 10 di atas bahwa pin interupsi yang digunakan pada Teensy adalah pin ke 1 sampai dengan pin ke 8.



Gambar 16 Diagram alir program interupsi eksternal

### Kode Program Mendeteksi Sinyal Interupsi Digital dari 8 Sensor

Keluaran sinyal dari sensor KY-037 adalah sinyal digital yang bernilai 1 atau “HIGH” dan 0 atau “LOW”. Sinyal tersebut diperoleh dari sebuah impuls suara yang masuk melalui kondenser KY-037. Ketika tidak mendeteksi impuls suara maka sensor akan mengirimkan sinyal “LOW”. Sedangkan ketika mendeteksi impuls suara maka sensor akan mengirimkan sinyal “HIGH”.

Untuk mendeteksi sinyal dari kedelapan sensor tersebut, mikrokontroler Teensy 4.1 akan menggunakan pin digital dengan mengaktifkan fungsi interupsi dari pin digital. Dengan demikian, ketika terdeteksi sinyal “HIGH” pada pin maka Teensy akan mengaktifkan alarm interupsi eksternal dengan mengeksekusi perintah yang telah diprogramkan. Teensy 4.1 akan melakukan pencuplikan sinyal-sinyal pin interupsi dan beberapa program lainnya dengan kecepatan pemrosesan data sebesar 600 MHz.



Pengaktifan pin interupsi pada teensy dimulai dengan mendefinisikan nomor pin pada teensy yang akan digunakan sebagai pin interupsi dengan kode program berikut :

```
// Definisikan pin sensor
const int sensor1Pin = 1;
const int sensor2Pin = 2;
const int sensor3Pin = 3;
const int sensor4Pin = 4;
const int sensor5Pin = 5;
const int sensor6Pin = 6;
const int sensor7Pin = 7;
const int sensor8Pin = 8;
```

*Sensor1Pin* merupakan pin yang digunakan untuk menerima sinyal digital keluaran dari sensor nomor 1 KY-037. Kemudian *Sensor2Pin* untuk sensor nomor 2, *Sensor3Pin* untuk sensor nomor 3 dan seterusnya. Setelah nomor pin teensy ditentukan, kemudian dilakukan definisi fungsi pin tersebut sebagai pin memasukkan dan mengaktifkan pin-pin masukkan tersebut sebagai fungsi interupsi eksternal pada bagian *void setup()* dengan kode program berikut:

```
// Set pin sensor sebagai input
pinMode(sensor1Pin, INPUT);
pinMode(sensor2Pin, INPUT);
pinMode(sensor3Pin, INPUT);
pinMode(sensor4Pin, INPUT);
pinMode(sensor5Pin, INPUT);
pinMode(sensor6Pin, INPUT);
pinMode(sensor7Pin, INPUT);
pinMode(sensor8Pin, INPUT);

// Atur interrupt untuk masing-masing sensor
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor1Pin), handleSensor1, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor2Pin), handleSensor2, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor3Pin), handleSensor3, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor4Pin), handleSensor4, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor5Pin), handleSensor5, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor6Pin), handleSensor6, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor7Pin), handleSensor7, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(sensor8Pin), handleSensor8, RISING);
```

Berdasarkan kode interupsi di atas maka teensy akan mengaktifkan perintah program *handleSensor1* ketika pin 1 dari sensor ke-1 KY-037 mengirimkan sinyal “*RISING*” atau “*HIGH*”. Hal tersebut juga berlaku untuk pin dan sensor ke-2 sampai dengan ke-8. Kemudian berikut merupakan kode program yang dipanggil ketika interupsi diaktifkan:

```

// ISR untuk sensor 1
void handleSensor1() {
  if (!sensor1Detected) {
    timeSensor1 = microsecondsCounter;
    sensor1Detected = true;
  }
}
.....
2 s.d. 7
.....
// ISR untuk sensor 8
void handleSensor8() {
  if (!sensor8Detected) {
    timeSensor8 = microsecondsCounter;
    sensor8Detected = true;
  }
}
}

```

### Kode Program Mengaktifkan *Timer*

*Timer* pada sistem digunakan untuk menghitung waktu rambat gelombang akustik dari sensor referensi ke sensor penerima (ToF). Dalam menghitung kecepatan gelombang akustik pada penampang batang pohon yang bernilai 500-5000 m/s maka dibuat timer dengan ketelitian 1 mikrosekon. Untuk mengaktifkan fungsi timer diperlukan *library* khusus teensy 4.1 yaitu *intervalTimer.h*. *Timer* ini memiliki ketelitian 1 mikrosekon dengan tipe data *volatile uint\_32* yang memiliki rentang 0 s.d 4.294.967.295. *Timer* akan kembali ter-reset menjadi 0 ketika telah mencapai batas maksimal atau ketika kedelapan sensor telah terdeteksi sinyal “HIGH”. Berikut merupakan kode program untuk membuat *timer* pada teensy:

```

#include <IntervalTimer.h> // library timer teensy 4.1

// Deklarasi objek IntervalTimer
IntervalTimer myTimer;

// Variabel untuk menghitung mikrodetik
volatile uint32_t microsecondsCounter = 0;

// Fungsi ISR untuk timer
void timerISR() {
  microsecondsCounter++;
  //microsecondsCounter=microsecondsCounter+5;
}

void setup() {
  // Inisialisasi timer untuk memanggil fungsi timerISR setiap 1 mikrodetik
  myTimer.begin(timerISR, 1); // 1 mikrodetik
}

```

## Perpindahan State Program

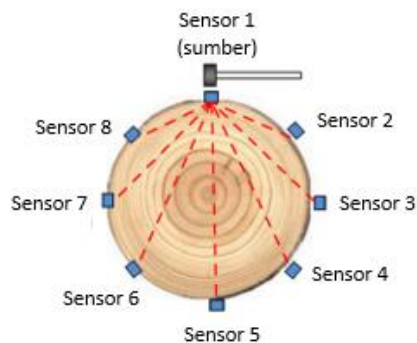
Sesuai dengan desain yang telah dibuat pada Tabel 6 dan Gambar 12 di atas, program terdiri dari 9 *state* yaitu *state 0* sampai dengan *state 8* dan *state idle*. *State-state* tersebut digunakan untuk memilih sensor yang diaktifkan sebagai sensor sumber referensi dan juga pemilihan kondisi *idle*. Pemilihan *state* tersebut dilakukan dari aplikasi Terawang yang telah dipasang pada ponsel. Dari pilihan yang tersedia, ponsel akan mengirim kode angka melalui jaringan *bluetooth* yaitu kode 0 sampai dengan 8 seperti yang ditampilkan pada Tabel 6. *Default state* dari program adalah *state 0* atau kondisi *idle*. Kemudian teensy memproses kode tersebut untuk dijalankan sesuai dengan permintaan kode. Berikut merupakan bagian dari potongan kode program perpindahan *state* program:

```
void loop() {
  if (state_program == 0) {
    while (state_program == 0) { // Program 0 akan terus berjalan selama state_program = 0
      Idle();
      // Periksa kembali input serial untuk kemungkinan perubahan state_program
      if (Serial8.available()) {
        String dataMasuk = Serial8.readStringUntil('\n');
        Serial.println("Sensor " + dataMasuk + " aktif");
        if (dataMasuk == "1") {
          state_program = 1; // Beralih ke pengukuranSensor1
        } else if (dataMasuk == "2") {
          state_program = 2; // Beralih ke pengukuranSensor2
        } else if (dataMasuk == "3") {
          state_program = 3; // Beralih ke pengukuranSensor3
        } else if (dataMasuk == "4") {
          state_program = 4; // Beralih ke pengukuranSensor4
        } else if (dataMasuk == "5") {
          state_program = 5; // Beralih ke pengukuranSensor5
        } else if (dataMasuk == "6") {
          state_program = 6; // Beralih ke pengukuranSensor6
        } else if (dataMasuk == "7") {
          state_program = 7; // Beralih ke pengukuranSensor7
        } else if (dataMasuk == "8") {
          state_program = 8; // Beralih ke pengukuranSensor8
        }
      }
    }
  } else if (state_program == 1) {
    while (state_program == 1) { // Program Sensor 1 akan terus berjalan selama state_program = 1
      pengukuranSensor1();
      // Periksa kembali input serial untuk kemungkinan perubahan state_program
      if (Serial8.available()) {
        String dataMasuk = Serial8.readStringUntil('\n');
        Serial.println("Sensor " + dataMasuk + " aktif");
        if (dataMasuk == "0") {
```



## Menghitung Waktu Sensor dan Pemrosesan ToF

Proses menghitung waktu rambat gelombang akustik (ToF) pada bagian melintang pohon dengan diameter 30 s.d. 120 cm dibutuhkan *timer* dengan ketelitian 1 mikrosekon. *Timer* ini telah dirancang pada bagian awal di sub-bab sebelumnya. Untuk mendapatkan data ToF, 8 sensor dipasang mengelilingi bagian pohon seperti yang ditampilkan pada Gambar 17 di bawah ini.



**Gambar 17 Pemasangan 8 sensor pada sekeliling pohon**

Teensy akan mencatat waktu berdasarkan *timer* ketika pin interupsi bernilai “HIGH”. Setelah 8 data waktu diperoleh dari kedelapan sensor kemudian data tersebut diolah

menjadi data ToF dengan cara pengurangan waktu antara sensor penerima dengan sensor yang menjadi sumber suara (suara ketukan) seperti pada rumus (3) berikut ini.

$$ToF_{Sensor\ x} = t_{sensor\ x} - t_{sensor\ sumber} \quad (3)$$

Keterangan :

ToF sensor x = waktu antara sensor sumber sensor ke-x

t sensor x = waktu tercatat timer di sensor ke-x

t sensor sumber = waktu tercatat timer di sensor sumber suara

Penulisan kode program untuk mendapatkan ToF tersebut adalah sebagai berikut:

```
void pengukuranSensor1() {  
  //aksi Program 1  
  // Cek apakah seluruh sensor telah terdeteksi  
  if (sensor1Detected && sensor2Detected && sensor3Detected && sensor4Detected &&  
      sensor5Detected && sensor6Detected && sensor7Detected && sensor8Detected) {
```

```

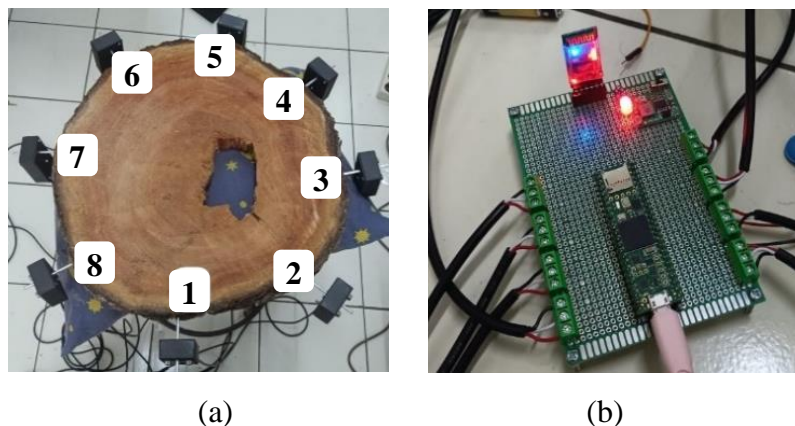
// Hitung selisih waktu (ToF)
unsigned long Tof_2 = timeSensor2 - timeSensor1;
unsigned long Tof_3 = timeSensor3 - timeSensor1;
unsigned long Tof_4 = timeSensor4 - timeSensor1;
unsigned long Tof_5 = timeSensor5 - timeSensor1;
unsigned long Tof_6 = timeSensor6 - timeSensor1;
unsigned long Tof_7 = timeSensor7 - timeSensor1;
unsigned long Tof_8 = timeSensor8 - timeSensor1;
//filter nilai error ToF, hanya ToF 20>ToF<1000 yang dikirim
if((Tof_2 > 20 && Tof_2 < 1000) && (Tof_3 > 20 && Tof_3 < 1000) && (Tof_4 > 20
&& Tof_4 < 1000) && (Tof_5 > 20 && Tof_5 < 1000) && (Tof_6 > 20 && Tof_6 <
1000) && (Tof_7 > 20 && Tof_7 < 1000) && (Tof_8 > 20 && Tof_8 < 1000)){
    // Ubah tipe data dan formatting
    String dataSend1 = "#" + String(",") + String(Tof_2) + String(",") + String(Tof_3) +
String(",") + String(Tof_4) + String(",") + String(Tof_5) + String(",") + String(Tof_6) +
String(",") + String(Tof_7) + String(",") + String(Tof_8);
    // Kirim hasil Tof ke SerialBluetooth
    Serial8.println(dataSend1);
    // Tampilkan hasil ke serial monitor utk cek ToF
    Serial.print("waktu tempuh (mikrodetik): ");
    Serial.println(dataSend1);
}
// Reset flag deteksi untuk percobaan selanjutnya
sensor1Detected = false;
sensor2Detected = false;
sensor3Detected = false;
sensor4Detected = false;
sensor5Detected = false;
sensor6Detected = false;
sensor7Detected = false;
sensor8Detected = false;
microsecondsCounter = 0;
} else { //jika hanya beberapa yang terdeteksi karenan gangguan maka akan di reset semua
//reset semua waktu sensor jika hanya beberapa yang terdeteksi
timeSensor1 = 0;
timeSensor2 = 0;
timeSensor3 = 0;
timeSensor4 = 0;
timeSensor5 = 0;
timeSensor6 = 0;
timeSensor7 = 0;
timeSensor8 = 0;
//reset flag
sensor1Detected = false;
sensor2Detected = false;
sensor3Detected = false;
sensor4Detected = false;
sensor5Detected = false;
sensor6Detected = false;
sensor7Detected = false;
sensor8Detected = false;
}
delay(2000);
}

```

Berdasarkan kode di atas jika semua pin terdefinisi mendeteksi sinyal interupsi maka akan dilakukan penghitungan ToF dengan cara waktu tercatat dari sensor penerima dikurangi dengan waktu tercatat dari sensor sumber. Kemudian digunakan filter ToF dengan rentang nilai antara 20-1000 mikrosekon. Namun jika hanya sebagian saja yang mendeteksi maka timer dan *flag state* dari pin terdefinisi akan ter-*reset* semua. Dalam hal ini, timer menjadi 0 lagi dan *flag state* pin menjadi *false* lagi.

#### III.4. Hasil Implementasi

Implementasi dilakukan melalui pengujian alat menggunakan media potongan penampang batang pohon trembesi dengan ukuran diameter 50 cm dan keliling 157 cm. Sensor yang berjumlah 8 buah dipasang mengelilingi batang pohon dengan jarak antar sensor 19,6 cm seperti yang ditampilkan pada Gambar 18 (a).



Gambar 18 (a) Media pengujian penampang batang pohon trembesi, (b) Perakitan sensor KY-037, mikrokontroler Teensy 4.1, dan Modul Bluetooth HC-05.

Kedelapan sensor dan modul bluetooth dirakit dan dihubungkan ke mikrokontroler Teensy 4.1 dengan perkabelan sesuai dengan skema integrasi yang ditampilkan pada Gambar 10. Hasil dari perakitan komponen tersebut ditampilkan pada Gambar 18 (b).

#### Implementasi Pemrosesan Data ToF

Setelah perakitan alat selesai, selanjutnya dilakukan pengujian pemrosesan data ToF dengan melakukan pengambilan data ToF pada setiap sensor. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali ketukan palu pada setiap paku sensor secara bergantian dimulai dari sensor 1 hingga sensor 8. Berikut merupakan hasil

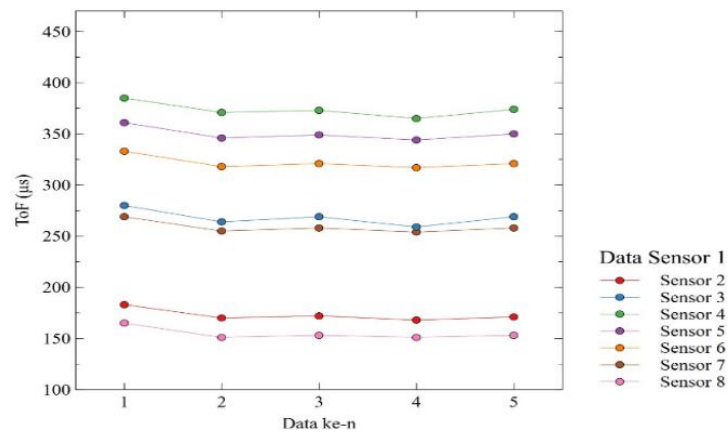
pengujian dari sensor satu sampai dengan 8 ditampilkan pada Tabel 7 sampai dengan 14 dan grafik perubahan nilai ToF setiap sensor ditampilkan pada Gambar 19 sampai dengan 26.

### Pengujian Sensor 1

*Tabel 7 Nilai ToF pada pengujian sensor 1*

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	#	183	280	385	361	333	269	165
2	#	170	264	371	346	318	255	151
3	#	172	269	373	349	321	258	153
4	#	168	259	365	344	317	254	151
5	#	171	269	374	350	321	258	153

\* ToF dalam mikrosekond



*Gambar 19 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 1*

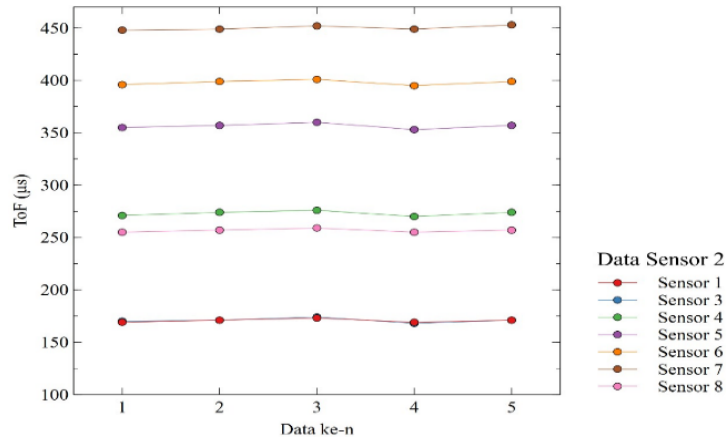
### Pengujian Sensor 2

*Tabel 8 Nilai ToF pada pengujian sensor 2*

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	169	#	170	271	355	396	448	255
2	171	#	171	274	357	399	449	257
3	173	#	174	276	360	401	452	259
4	169	#	168	270	353	395	449	255
5	171	#	171	274	357	399	453	257

\* ToF dalam mikrosekond





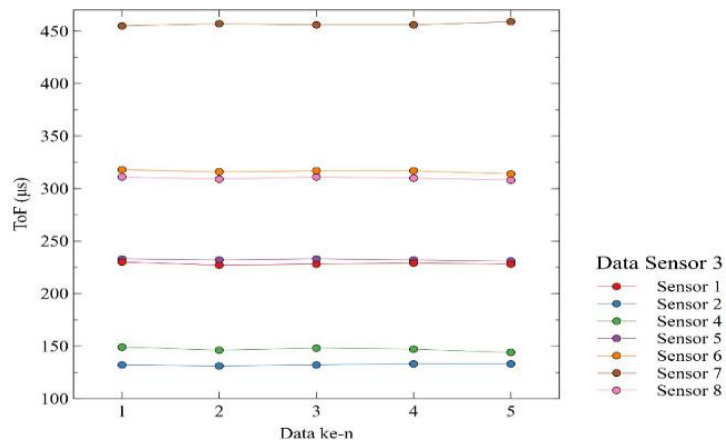
Gambar 20 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 2

### Pengujian Sensor 3

Tabel 9 Nilai ToF pada pengujian sensor 3

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	230	132	#	149	233	318	455	311
2	227	131	#	146	232	316	457	309
3	228	132	#	148	233	317	456	311
4	229	133	#	147	232	317	456	310
5	228	133	#	144	231	314	459	308

\* ToF dalam mikrosekond



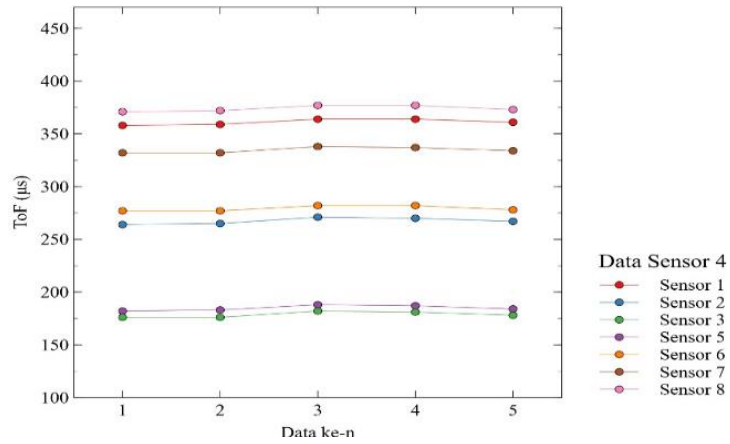
Gambar 21 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 3

### Pengujian Sensor 4

Tabel 10 Nilai ToF pada pengujian sensor 4

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	358	264	176	#	182	277	332	371
2	359	265	176	#	183	277	332	372
3	364	271	182	#	188	282	338	377
4	364	270	181	#	187	282	337	377
5	361	267	178	#	184	278	334	373

\* ToF dalam mikrosekond



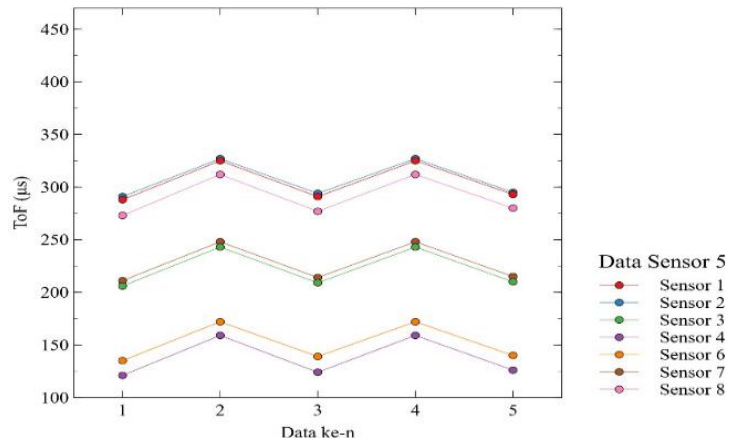
Gambar 22 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 4

## Pengujian Sensor 5

Tabel 11 Nilai ToF pada pengujian sensor 5

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	288	291	206	121	#	135	211	273
2	325	327	243	159	#	172	248	312
3	291	294	209	124	#	139	214	277
4	325	327	243	159	#	172	248	312
5	293	295	210	126	#	140	215	280

\* ToF dalam mikrosekond



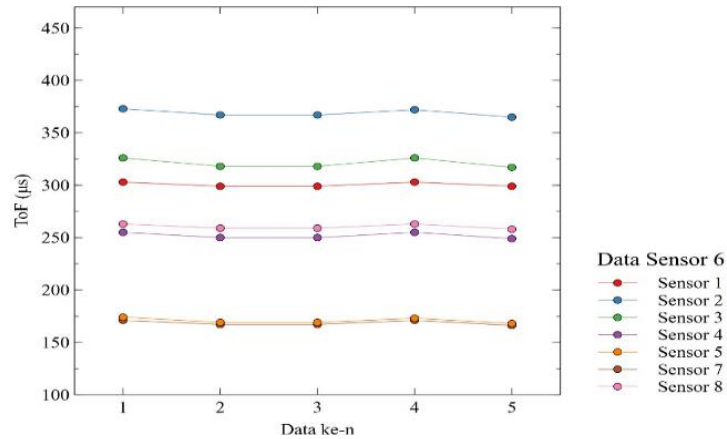
Gambar 23 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 5

## Pengujian Sensor 6

Tabel 12 Nilai ToF pada pengujian sensor 6

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	303	373	326	255	174	#	171	263
2	299	367	318	250	169	#	167	259
3	299	367	318	250	169	#	167	259
4	303	372	326	255	173	#	171	263
5	299	365	317	249	168	#	166	258

\* ToF dalam mikrosekond



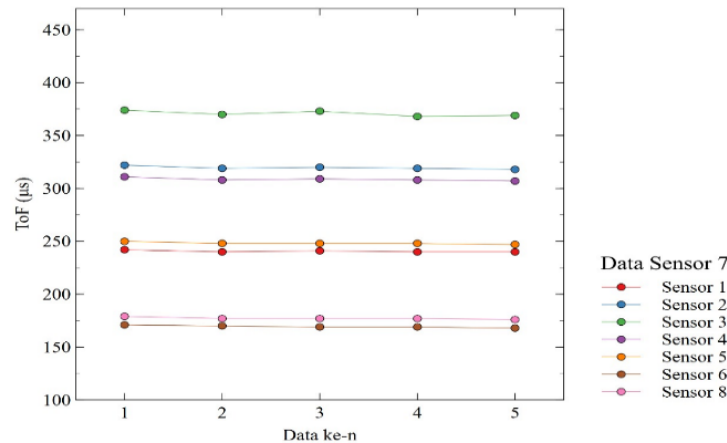
Gambar 24 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 6

## Pengujian Sensor 7

Tabel 13 Nilai ToF pada pengujian sensor 7

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	242	322	374	311	250	171	#	179
2	240	319	370	308	248	170	#	177
3	241	320	373	309	248	169	#	177
4	240	319	368	308	248	169	#	177
5	240	318	369	307	247	168	#	176

\* ToF dalam mikrosekond



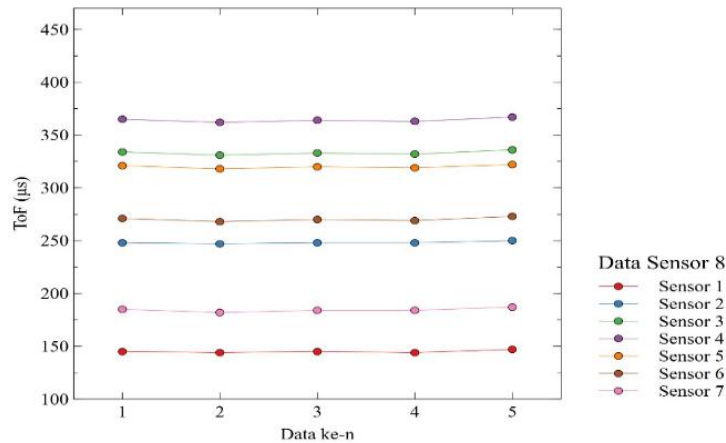
Gambar 25 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 7

## Pengujian Sensor 8

Tabel 14 Nilai ToF pada pengujian sensor 8

Data ke-n	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
1	145	248	334	365	321	271	185	#
2	144	247	331	362	318	268	182	#
3	145	248	333	364	320	270	184	#
4	144	248	332	363	319	269	184	#
5	147	250	336	367	322	273	187	#

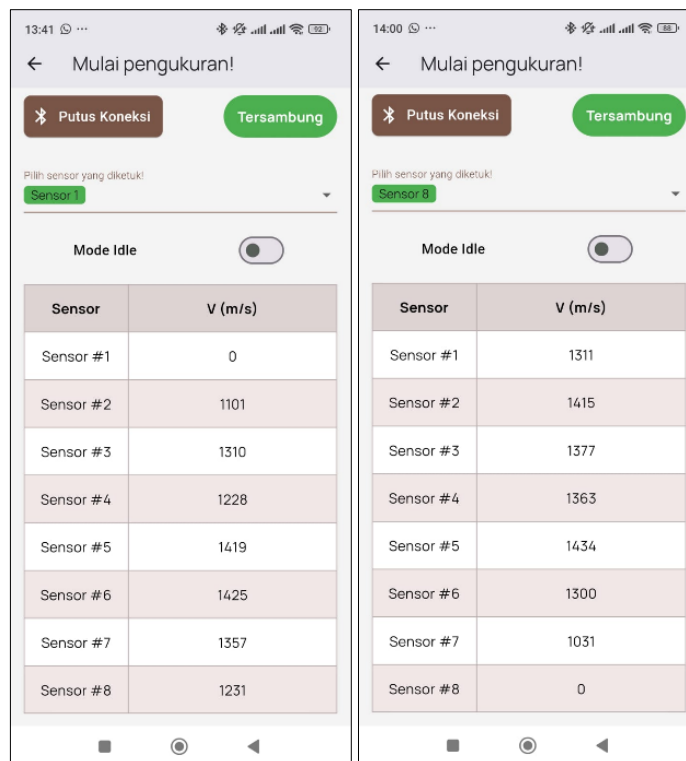
\* ToF dalam mikrosekond



Gambar 26 Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 8

### Implementasi Pengiriman Data ToF

Pengiriman data ToF dilakukan oleh mikrokontroler Teensy 4.1 ke *smartphone* melalui komunikasi nirkabel menggunakan modul bluetooth HC-05. Pada *smartphone*, data ToF diolah menjadi data kecepatan oleh aplikasi Terawang\_v1. Data kecepatan ditampilkan pada layar *smartphone* kemudian data kecepatan tersebut digunakan untuk memproses gambar tomogram 2 dimensi yang merepresentasikan kondisi internal batang pohon. Berikut merupakan 2 dari 8 tampilan aplikasi Terawang hasil dari pengiriman data ToF yang telah diolah menjadi data kecepatan ditampilkan pada gambar 27 (a) dan (b).



(a)

(b)

Gambar 27 (a) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 1, (b) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 8.

## BAB IV ANALISIS HASIL TUGAS AKHIR

### IV.1. Hasil Tugas Akhir

#### Analisis Data ToF

Dalam menganalisa konsistensi pembacaan sensor saat pengukuran ToF digunakan nilai rata-rata dan standar deviasi. Untuk mendapatkan nilai rata-rata pengukuran dan standar deviasi digunakan persamaan (4) dan (5) [7].

$$\text{rata - rata } (\bar{x}) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (4)$$

$$\text{standar deviasi } (\sigma) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh hasil nilai perhitungan rata-rata ToF dan standar deviasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 15 sampai dengan Tabel 22.

#### Pengujian Sensor 1

*Tabel 15 Analisis pengujian sensor 1*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu\text{s}$ )	#	172,8	268,2	373,6	350,0	322,0	258,8	154,6
$\sigma$	#	5,9	7,8	7,3	6,6	6,4	6,0	5,9

#### Pengujian Sensor 2

*Tabel 16 Analisis pengujian sensor 2*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu\text{s}$ )	170,6	#	170,8	273,0	356,4	398,0	450,2	256,6
$\sigma$	1,7	#	2,2	2,4	2,6	2,4	2,2	1,7

#### Pengujian Sensor 3

*Tabel 17 Analisis pengujian sensor 3*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu\text{s}$ )	228,4	132,2	#	146,8	232,2	316,4	456,6	309,8
$\sigma$	1,1	0,8	#	1,9	0,8	1,5	1,5	1,3

#### Pengujian Sensor 4

*Tabel 18 Analisis pengujian sensor 4*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu\text{s}$ )	361,2	267,4	178,6	#	184,8	279,2	334,6	374,0
$\sigma$	2,8	3,0	2,8	#	2,6	2,6	2,8	2,8

## Pengujian Sensor 5

*Tabel 19 Analisis pengujian sensor 5*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu$ s)	304,4	306,8	222,2	137,8	#	151,6	227,2	290,8
$\sigma$	18,9	18,5	19,0	19,4	#	18,7	19,0	19,5

## Pengujian Sensor 6

*Tabel 20 Analisis pengujian sensor 6*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu$ s)	300,6	368,8	321,0	251,8	170,6	#	168,4	260,4
$\sigma$	2,2	3,5	4,6	2,9	2,7	#	2,4	2,4

## Pengujian Sensor 7

*Tabel 21 Analisis pengujian sensor 7*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu$ s)	240,6	319,6	370,8	308,6	248,2	169,4	#	177,2
$\sigma$	0,9	1,5	2,6	1,5	1,1	1,1	#	1,1

## Pengujian Sensor 8

*Tabel 22 Analisis pengujian sensor 8*

Parameter	ToF 1	ToF 2	ToF 3	ToF 4	ToF 5	ToF 6	ToF 7	ToF 8
rata-rata ( $\mu$ s)	145,0	248,2	333,2	364,2	320,0	270,2	184,4	#
$\sigma$	1,2	1,1	1,9	1,9	1,6	1,9	1,8	#

Dari nilai standar deviasi yang telah diperoleh pada pengujian sensor 1 sampai dengan pengujian sensor 8, nilai pengukuran ToF memiliki standar deviasi dibawah 10 mikrodetik kecuali pada pengujian sensor 5 yang nilainya diantara 15-20 mikrodetik. Standar deviasi yang besar tersebut dapat dipengaruhi oleh tingkat sensitivitas sensor 5. Tingkat sensitivitas dapat diatur menggunakan resistor variabel yang terletak pada papan modul sensor KY-037.

## Analisis Pengiriman Data ToF

Dari data ToF yang telah disajikan di atas, data tersebut dikirim ke *smartphone* dan diolah menjadi data kecepatan oleh aplikasi Terawang\_v1. Data kecepatan tersebut selanjutnya akan digunakan untuk membuat gambar 2 dimensi tomogram. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, pengiriman data ToF berhasil dilakukan seperti yang telah ditampilkan pada Gambar 27 (a) dan (b). Berikut merupakan hasil rata-rata kecepatan dari 5 kali pengambilan data di setiap sensor, ditampilkan pada Tabel 23.

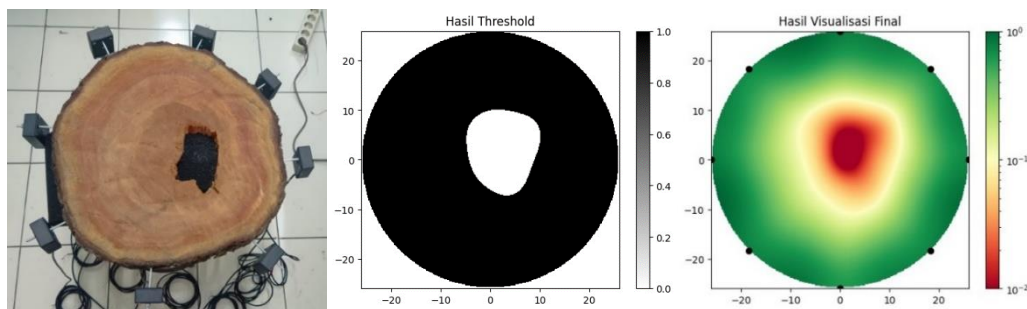
*Tabel 23 Rata-rata kecepatan dari 5 kali pengambilan data*

Pengujian pada Sensor ke-n	v1 (m/s)	v2 (m/s)	v3 (m/s)	v4 (m/s)	v5 (m/s)	v6 (m/s)	v7 (m/s)	v8 (m/s)
1	#	1101	1310	1228	1419	1425	1357	1231
2	1114	#	1113	1286	1287	1248	1019	1368
3	1537	1437	#	1295	1512	1450	1088	1481
4	1270	1313	1064	#	1028	1258	1371	1328
5	1636	1500	1589	1400	#	1268	1554	1583
6	1526	1347	1429	1395	1114	#	1129	1348
7	1460	1436	1340	1488	1416	1122	#	1074
8	1311	1415	1377	1363	1434	1300	1031	#

Berdasarkan tabel di atas, cepat rambat gelombang akustik yang dideteksi di setiap sensor memiliki nilai antara 1000-1500 m/s. Nilai tersebut telah sesuai dengan karakteristik cepat rambat gelombang akustik jenis transversal yang memiliki rentang kecepatan antara 1000-2000m/s[5].

### Analisis Kevalidan Data untuk Tomogram

Dari data kecepatan yang diperoleh pada Tabel 23, data tersebut digunakan untuk memperoleh gambar tomogram 2 dimensi. Hasil gambar tomogram dan perbandingannya dengan media kayu uji dapat dilihat pada Gambar 28.



*Gambar 28 Perbandingan gambar tomogram dengan media kayu uji asli*

Berdasarkan gambar di atas, gambar tomogram yang dihasilkan alat Terawang mampu mendeteksi adanya lubang dan densitas kayu yang rendah. Akan tetapi letak dan ukuran lubang yang terdeteksi masih belum akurat.

### Analisis Spesifikasi Teknis

- Resolusi pembacaan Kecepatan

#### Metode Pengujian

Pada sebuah batang kayu, ditancapkan dua buah sensor dengan jarak 24 cm. Pada jalur di antara kedua sensor tersebut, kayu dilubangi dengan diameter 2,4 cm (10% jarak antar sensor) seperti pada Gambar 29(a). Sensor pertama diketuk sebanyak 10 kali, kemudian *time of flight* dari gelombang akustik yang merambat direkam dan dirata-ratakan. Berikutnya, pada jalur di antara kedua sensor, dibuat lubang kedua dengan diameter 2,4 sehingga terdapat dua buah lubang di antara kedua sensor (totalnya 20% jarak antar sensor) seperti pada Gambar 29(b). Sensor pertama diketuk sebanyak 10 kali, kemudian *time of flight* (*ToF*) dari gelombang akustik yang merambat direkam dan dirata-ratakan.



Gambar 29 (a) Setup untuk Kayu Berlubang 10%, (b) Setup untuk Kayu Berlubang 20%

## Hasil Pengujian

Pada kayu dengan sebuah lubang, diperoleh hasil pengukuran sebagai berikut

Sensor siap	Sensor siap
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 192	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 239
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 236	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 237
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 239	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 236
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 237	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 237
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 241	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 234
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 233	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 235
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 237	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 4294966718
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 233	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 235
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 236	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 235
waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 232	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 234
	waktu tempuh (mikrodetik): t2 = 242

(a)
(b)

Gambar 30 (a) Hasil Pembacaan ToF pada Kayu Berlubang 10%, (b) Hasil Pembacaan ToF pada Kayu Berlubang 20%

Berdasarkan data pada gambar 30 (a) dan (b), diperoleh waktu tempuh rata-rata  $t(a) = 231,6 \mu s$  sehingga menghasilkan cepat rambat sebesar  $v(a) = 1036,26$  m/s. Sedangkan pada kayu dengan dua buah lubang, dengan mengabaikan input yang tidak valid pada ketukan ketujuh, diperoleh waktu tempuh rata-rata



$t(b) = 236,4 \mu s$  sehingga menghasilkan cepat rambat sebesar  $v(b) = 1015,22$  m/s.

### Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, diperoleh selisih cepat rambat gelombang pada kayu berlubang 10% dan kayu berlubang 20% yaitu  $v_{\text{selisih}} = 21,04$  m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa produk memenuhi spesifikasi resolusi pembacaan kecepatan gelombang, yaitu di bawah 41,05 m/s.

#### b. Sampling Rate

### Metode Pengujian

Produk melakukan pembacaan data dari sebuah sensor sebanyak 20 kali berturut-turut. Pada setiap pengambilan data, dilakukan fungsi timer untuk mencatat waktu. Nilai yang diambil adalah selisih waktu pertama dan waktu ke-20 kemudian dibagi 20. Implementasi pengujian menggunakan program berikut:

```
int sensor1Pin;
int data[20];
bool done = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // Set pin sensor sebagai input
  pinMode(sensor1Pin, INPUT);
  Serial.println("Alat Siap");
}

void loop() {
  if (!done){
    for (int i = 0; i < 20; i++){
      // line baca input sensor di sini
      int sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      sensorValue = digitalRead(sensor1Pin);
      data[i] = micros(); // ganti micros() dengan fungsi timer di teensy
    }
    for (int i = 0; i < 20; i++){
      Serial.println(data[i]);
    }
  }
}
```

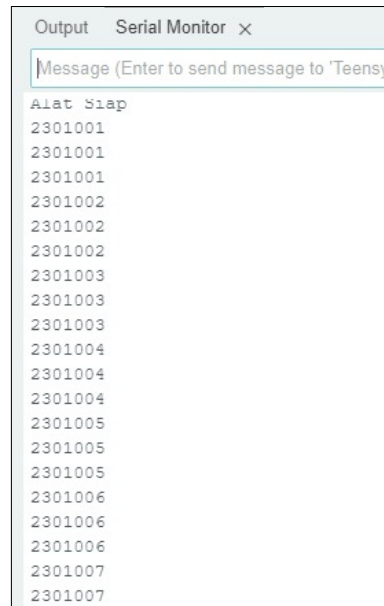
```

done = 1;
}
delayMicroseconds(10);
}

```

## Hasil Pengujian

Setelah produk melakukan pembacaan data dari sensor sebanyak 20 kali, waktu dari setiap pengambilan data ditampilkan pada layar sebagai berikut.



*Gambar 31 Hasil Pengujian Sampling Rate*

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, sampling rate untuk sebuah sensor bernilai  $t = (2301007 - 2301001) / 20 = 0.3 \text{ s}$

## Kesimpulan

Produk secara standarnya menggunakan 8 buah sensor, sehingga ketika beroperasi, produk perlu membaca input 8 sensor secara bergantian. Sampling rate atau waktu yang diperlukan untuk satu siklus pembacaan adalah  $t = 8 \times 0.3 = 2.4 \text{ s}$  atau  $f = 416,67 \text{ kHz}$ . Nilai tersebut memenuhi spesifikasi sampling rate, yaitu  $t < 35 \text{ s}$  atau  $f > 28600 \text{ Hz}$ .

### c. Total Waktu Pengukuran

## Metode Pengujian

Pengujian dilakukan dengan memperagakan semua tahapan dalam pengukuran dimulai dari membuka koper alat hingga mendapatkan gambar hasil tomografi. Pengujian ini dilakukan pada satu titik ketinggian pohon.

## Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan pada pohon jenis mahoni dengan diameter 104 cm. Dari kegiatan tersebut diperoleh rincian waktu tiap tahapan seperti yang ditampilkan pada Tabel 24 berikut :

*Tabel 24 Rincian waktu tahapan pengukuran pohon*

No.	Tahapan	Waktu
1.	Pengukuran dan pengisian data geometri pohon	3 menit
2.	Pemasangan kotak sensor	3 menit 30 detik
3.	Pemasangan kabel sensor dan pengecekan fungsi sensor	5 menit 30 detik
4.	Pengambilan data pengukuran.	3 menit 20 detik
5.	Pemrosesan gambar tomogram	5 menit 30 detik
6.	Pelepasan kabel sensor	2 menit 30 detik
7.	Pelepasan kotak sensor	3 menit 30 detik
8.	Penataan kembali koper alat	1 menit
Total Waktu Pengukuran		27 menit 40 detik

## Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, seluruh tahapan pengukuran pada satu titik ketinggian pohon diperagakan dengan total waktu 27 menit 40 detik. Target waktu yang digunakan untuk pengujian adalah di bawah 1 jam. Dengan demikian verifikasi pada spesifikasi total waktu pengukuran dapat terpenuhi di bawah 1 jam.

### IV.2. Pengetahuan yang Diperoleh

Dalam pengerjaan proyek tugas akhir ini, banyak pengetahuan dan pengalaman yang diperoleh oleh penulis. Sebelum pengerjaan tugas akhir, penulis lebih banyak belajar tentang teori dibandingkan dengan pengimplementasiannya secara nyata. Sedangkan selama pengerjaan proyek tugas akhir, penulis banyak bereksperimen dan dapat mengimplementasikan teori secara nyata. Hal ini banyak menambah keterampilan dan memperkuat pemahaman penulis dalam bidang elektronika.

Beberapa ilmu yang diperoleh penulis terkait pengerjaan proyek tugas akhir ini adalah tentang karakteristik perambatan gelombang akustik pada media, pengolahan sinyal fisis menjadi sinyal digital, pembuatan filter, amplifier, dan komparator, pemrograman mikrokontroler dan bahasa pemrograman C/C++, komunikasi data menggunakan jaringan kabel maupun jaringan nirkabel, serta pengetahuan tentang penulisan karya ilmiah. Keterampilan dan pemahaman yang baik dalam bidang elektronika tersebut sangat bermanfaat bagi penulis serta dapat dijadikan dasar dan modal penulis dalam membuat proyek-proyek elektronika selanjutnya.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

### **V.1. Kesimpulan**

Berdasarkan implementasi dan pengujian yang telah dilakukan pada proyek tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Desain dan implementasi pemrosesan data Time of Flight (ToF) pada alat tomografi akustik (Terawang) untuk monitoring kondisi internal batang pohon dapat dilakukan dengan baik menggunakan 3 komponen utama yaitu sensor suara KY-037, mikrokontroler Teensy 4.1, dan modul Bluetooth HC-05.
2. Dalam pengujian diperoleh nilai standar deviasi kurang dari 10 mikrodetik pada pengujian sensor acuan 1, 2, 3, 4, 6, 7, dan 8. Sementara itu, pada pengujian sensor acuan 5, diperoleh nilai standar deviasi sebesar 15–20 mikrodetik.
3. Data ToF yang diperoleh, telah dapat digunakan untuk memperoleh data kecepatan rambat gelombang akustik pada pohon yang selanjutnya data tersebut dapat diolah menjadi gambar tomogram dua dimensi yang merepresentasikan kondisi internal batang pohon.
4. Penggunaan sensor suara sebagai pendeteksi gelombang akustik pada kayu pohon sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya amplitudo gelombang akustik hasil dari ketukan palu ke paku baja sensor, sehingga dibutuhkan ketukan yang sedang hingga keras agar gelombang akustik yang dihasilkan mampu menembus pohon dengan diameter besar dan bergetah.

### **V.2. Saran**

Untuk pengembangan lebih lanjut pada desain dan implementasi pemrosesan data ToF, terdapat beberapa saran yang bisa dipertimbangkan dalam memodifikasi sistem yaitu sebagai berikut:

1. Penggunaan sensor yang lebih sensitif mendeteksi gelombang akustik seperti accelerometer dengan spesifikasi yang baik sebagai pengganti sensor suara KY-037.

2. Agar lebih kompatibel dan fleksibel dengan berbagai merk smartphone, modul komunikasi nirkabel bluetooth dapat digantikan dengan modul komunikasi Wifi (*Wireless Fidelity*).

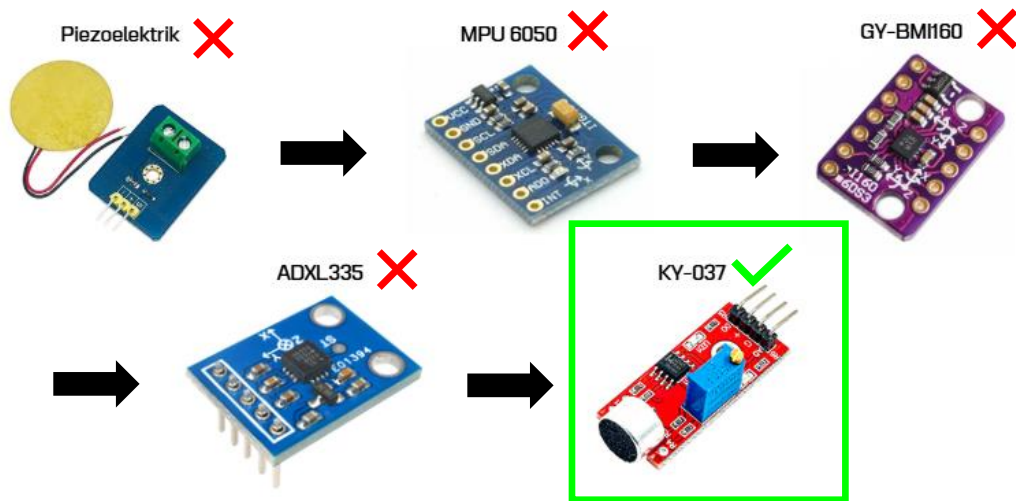
## REFERENSI

- [1] Sheikh Ali Ahmed, Stergios Adamopoulos, Francesco Poggi, “Resonance and Time-of-Flight Methodes for Evaluating The Modulus of Elasticity of Particleboards at Different Humid Conditions”, Linnaeus University, Sweden, May 2019, doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.3.365380
- [2] Viky Nurlaili, Agus Purwanto, “Pengukuran Modulus Elastisitas Kayu Menggunakan Gelombang Audiosonik”, volume 10 Edisi 01, April, 2023, Halaman 31–35.
- [3] Ahmed El-Hadad, Graham Ian Brodie, Berhan Shiday Ahmed. “The Effect of Wood Condition on Sound Wave Propagation”, August 20-2018, doi: [10.4236/oja.2018.83004](https://doi.org/10.4236/oja.2018.83004)
- [4] Guanghui Li, Xiang Weng, Xiaocheng Du, Xiping Wang, Hailin Feng, “Stress Wave Velocity Patterns in the Longitudinal-Radial Plane of Tress for Defect Diagnosis”, March 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.03.021>
- [5] Ulrike Dackermann, Keith Crews, Bohumil Kasal, Jianchun Li, Mariapaola Riggio, Frank Rinn, Thomas Tannert, “In situ assessment of structural timber using stress-wave measurements”, Materials and Structures, may 2013, doi: 10.1617/s11527-013-0095-4
- [6] James P. Amstrong, David W. Patterson, John E. Sneckenberg, “Comparison of Three Equation for Predicting Stress Wave Velocity as a Function of Grain Angle”, West Virginia University, August 1989.
- [7] Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, and General Motors Corporation, (2010). *Measurement systems analysis (4th ed.)*. MSA Work Group.

## DAFTAR LAMPIRAN

### A. Riwayat Perubahan dan Penggunaan Sensor

Selama proses penelitian pada sub-sistem data akuisisi, telah dilakukan eksperimen terkait penggunaan sensor yang akan digunakan pada alat Terawang. Berikut merupakan gambar riwayat perubahan dan penggunaan sensor:



Riwayat catatan penggunaan sensor pada link:

<https://github.com/Akhmadi14/Terawang/blob/main/Data/RIWAYAT%20PERUBAHAN%20SENSOR.pdf>

Hasil nilai ToF dan cepat rambat gelombang akustik setiap jenis sensor dapat dilihat pada dokumen B-Series pada link:

<https://github.com/Akhmadi14/Terawang/tree/main/B%20Series>

Hasil pengujian integrasi sub-sistem alat Terawang:

<https://github.com/Akhmadi14/Terawang/tree/main/Data>

### B. Source Code Mikrokontroler Teensy 4.1

Link Source Code Program :

<https://github.com/Akhmadi14/Terawang/tree/main/Source%20code>