

# Desain dan Implementasi Pemrosesan Data Time of Flight (ToF) pada Alat Monitoring Kondisi Internal Pohon (Terawang) menggunakan Sensor KY-037 dan Mikrokontroler Teensy 4.1

Bayu Aji Nugroho  
Sekolah Tinggi Elektronika dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
Bandung, Indonesia  
13221601@std.stei.itb.ac.id

Indra Sihar  
Sekolah Tinggi Elektronika dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
Bandung, Indonesia  
indra.sihar@itb.ac.id

Akhmadi Surawijaya  
Sekolah Tinggi Elektronika dan Informatika  
Institut Teknologi Bandung  
Bandung, Indonesia  
asurawijaya@itb.ac.id

**Abstrak**—Penelitian ini bertujuan untuk merancang perangkat yang dapat menghitung nilai *Time of Flight* (ToF) dan mengirimkan data ToF secara nirkabel pada alat tomografi akustik Terawang. Metode yang digunakan meliputi deteksi gelombang akustik yang merambat pada batang pohon menggunakan delapan sensor suara KY-037 yang dipasang mengelilingi batang pohon. Mikrokontroler Teensy 4.1 digunakan untuk mendapatkan stempel waktu dari setiap sensor berdasarkan hasil deteksi gelombang akustik. Stempel waktu tersebut kemudian diproses menjadi data ToF. Setelah diperoleh data ToF, data dikirimkan ke aplikasi Terawang di *smartphone* melalui jaringan komunikasi nirkabel menggunakan modul Bluetooth HC-05. Berdasarkan implementasi dan pengujian yang dilakukan pada media uji berupa potongan penampang batang kayu trembesi dengan diameter 50 cm, pemrosesan data ToF dapat dilakukan dengan baik dan berhasil dikirimkan ke aplikasi Terawang. Data ToF tersebut kemudian diolah menjadi data kecepatan rambat oleh aplikasi. Dari lima kali pengambilan data di setiap sensor, 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 sensitivitas masing-masing sensor.

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

## I. PENDAHULUAN

Terawang merupakan alat tomografi akustik yang digunakan untuk mengetahui kondisi internal batang pohon. Citra tomografi alat Terawang diperoleh dari pengolahan data kecepatan rambat gelombang akustik di dalam batang pohon. Untuk memperoleh data kecepatan rambat tersebut diperlukan dua buah data pendukung yaitu waktu rambat (*Time of Flight*/ToF) dan jarak rambat karena cepat rambat diperoleh dengan rumus (1) [1]:

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

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

$d$  = jarak antar sensor (meter)

ToF = waktu rambat gelombang (mikrosekon)

Data jarak diperoleh dari geometri pohon berdasarkan pengukuran. Sedangkan data ToF diperoleh dengan mengukur waktu rambat gelombang akustik antar sensor

menggunakan timer yang ada pada mikrokontroler.

Cepat rambat gelombang akustik didalam kayu secara radial memiliki nilai yang besar berkisar antara 1000 s.d. 2000 m/s [2]. Untuk menghitung ToF pada bagian melintang pohon dengan diameter 30-120 cm dibutuhkan timer dengan ketelitian dalam skala mikrosekon. Selain itu dibutuhkan juga pemrosesan data yang cepat agar mampu menangani pencatatan waktu dari 8 sensor yang dipasang mengelilingi bagian pohon.

Setelah 8 data waktu diperoleh dari kedelapan sensor kemudian data tersebut diolah 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.

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

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

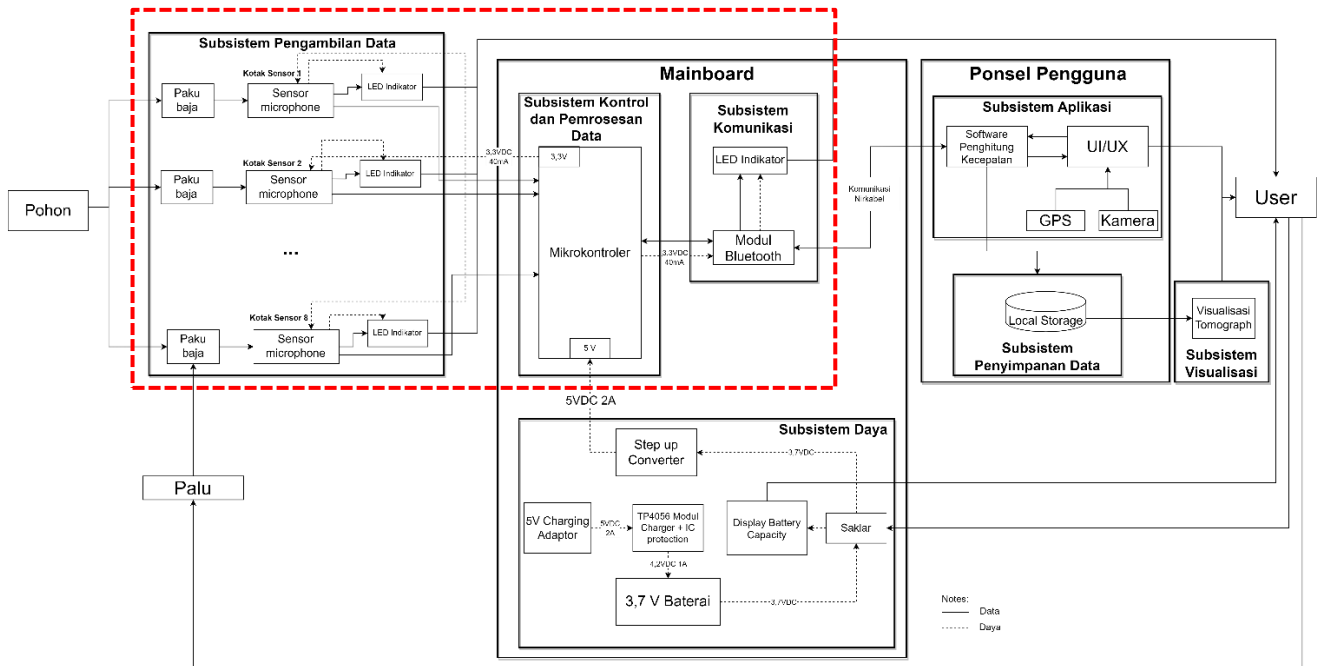
$t_{\text{sensor } x}$  = waktu tercatat timer di sensor ke- $x$

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

Selanjutnya ToF dikirimkan ke ponsel melalui jaringan komunikasi nirkabel. 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 dari penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan perangkat yang dapat memproses sinyal akustik yang merambat pada kayu pohon akibat ketukan palu ke paku menjadi data ToF. Selanjutnya, data ToF tersebut dapat dikirimkan ke *smartphone* secara nirkabel.

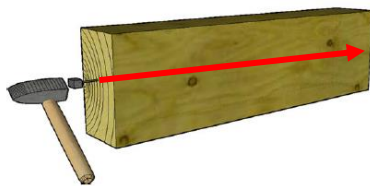


Gambar 1. Arsitektur perangkat pemroses data ToF dengan tanda garis putus-putus warna merah

## II. KAJIAN PUSTAKA

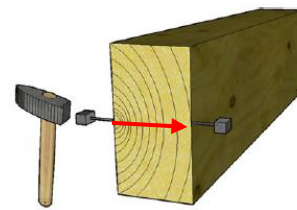
### A. Karakteristik Rambat Suara di Kayu

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 2 di bawah ini.



Gambar 2. 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 3 di bawah ini.



Gambar 3. 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.

## III. DESAIN DAN IMPLEMENTASI

### A. Desain Perangkat Keras

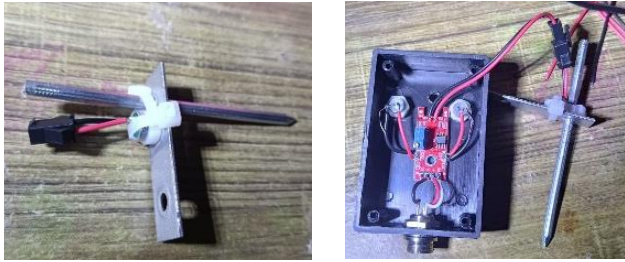
#### Arsitektur Perangkat

Arsitektur perangkat pemrosesan data ToF pada Terawang terdiri dari 3 sub-sistem yaitu sub-sistem data akuisisi, sub-sistem kontrol dan pemrosesan data, serta sistem komunikasi nirkabel. Ketiga sub-sistem tersebut dapat dilihat pada gambar 1 dengan garis warna merah. Berikut merupakan komposisi dari ketiga sub-sistem;

1. Data akuisisi :  
Paku baja, Sensor KY037, Led indikator.
2. Kontrol dan pemrosesan data :  
Mikrokontroler Teensy 4.1.
3. Komunikasi nirkabel :  
Bluetooth HC-05, Led Indikator.

### Desain Sensor

Dilakukan modifikasi pada sensor KY-037 yaitu dengan meletakkan mikrofon kondensernya pada lempengan besi yang disatukan dengan paku baja seperti pada Gambar 4(a).

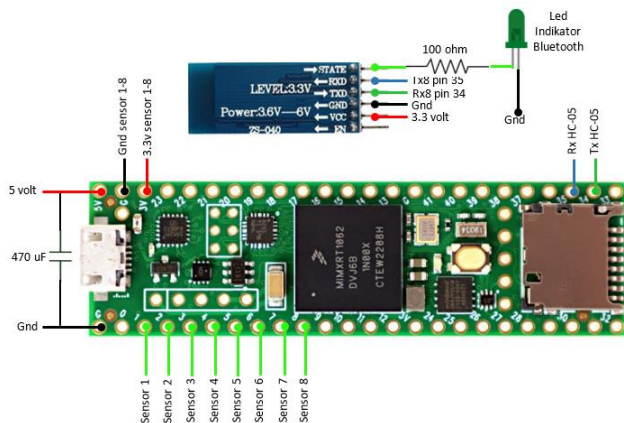


Gambar 4. (a) Modifikasi mikrofon kondenser KY-037, (b) Modifikasi papan pcb sensor KY-037.

Mikrofon kondenser selanjutnya dihubungkan ke papan sensor KY-037 menggunakan kabel sepanjang 6 cm dan konektor agar dapat ditempatkan pada kotak sensor seperti pada Gambar 4(b).

### Desain Mikrokontroler

Desain ini menjelaskan skema integrasi perangkat yang terdiri dari 8 sensor KY-037 dan modul Bluetooth HC-05 yang terhubung ke mikrokontroler. Integrasi antar perangkat dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini.

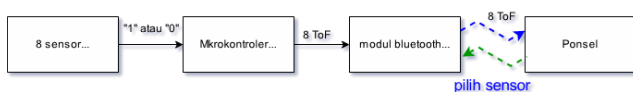


Gambar 5. Skema integrasi perangkat pemrosesan data

Catu daya Teensy berupa tegangan 5 volt yang berasal dari buck converter step up yang telah distabilisasi kemudian dihubungkan pada pin Vin dan Gnd.

### B. Pemrosesan Data ToF

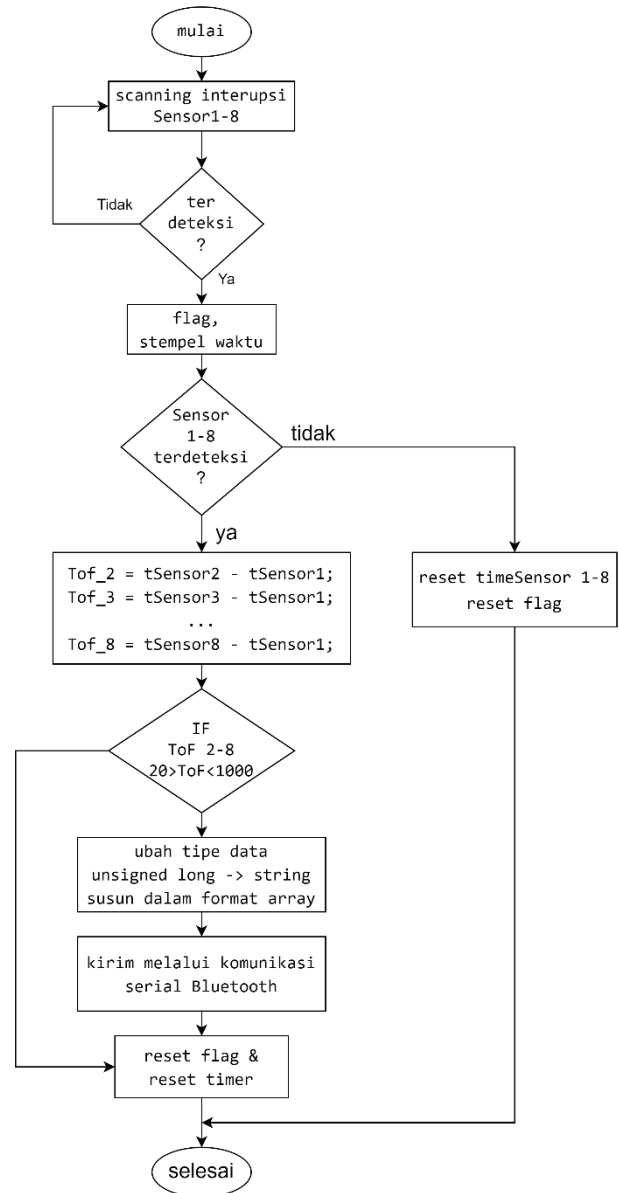
Pada pemrosesan data ToF, alur data dimulai dari sinyal digital yang berasal dari keluaran sensor dikirim ke mikrokontroler kemudian diolah menjadi ToF untuk dikirim ke ponsel melalui komunikasi nirkabel yang dilakukan oleh modul bluetooth HC-05. Berikut diagram blok pemrosesan data seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram blok pemrosesan data

Pada perangkat lunak mikrokontroler, ToF dimulai dengan melakukan *scanning* interupsi akibat deteksi suara

sensor 1 sampai dengan 8. Ketika suara terdeteksi oleh sensor, maka mikrokontroler akan memberikan stempel waktu kejadian suara berdasarkan *timer*. Jika semua sensor mendeteksi suara dan telah mendapat stempel waktu, maka dilakukan proses penghitungan ToF dengan rumus (2) di atas. Selanjutnya jika semua nilai ToF berada pada rentang 20-1000 mikrosekon, maka data ToF akan dikirim ke aplikasi ponsel melalui komunikasi bluetooth. Bagian flowchart program pada pengukuran dengan sensor acuan 1 dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah ini.

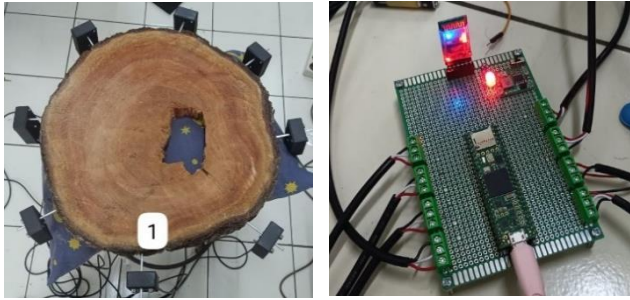


Gambar 7. Flowchart program dengan sensor acuan 1

## IV. HASIL DAN ANALISA

### A. Perangkat Keras (Sensor KY-037 dan Teensy 4.1)

Pengujian perangkat keras digunakan media potongan penampang batang pohon trembesi berukuran diameter 50 cm dan keliling 157 cm. Sensor KY-037 yang berjumlah 8 buah ditempatkan mengelilingi batang pohon dengan jarak antar sensor 19,6 cm seperti yang ditampilkan pada Gambar 8 (a).



(a) (b)

Gambar 8. (a) Media pengujian menggunakan penampang batang pohon trembesi. (b) Pengujian mainboard data ToF.

Kedelapan sensor dan modul bluetooth dirakit dan dihubungkan dengan perkabelan sesuai dengan skema integrasi yang ditampilkan pada Gambar 7. Berikut merupakan tampilan mainboard hasil dari pengujian skema integrasi ditampilkan pada Gambar 8(b).

### B. Pemrosesan Data ToF

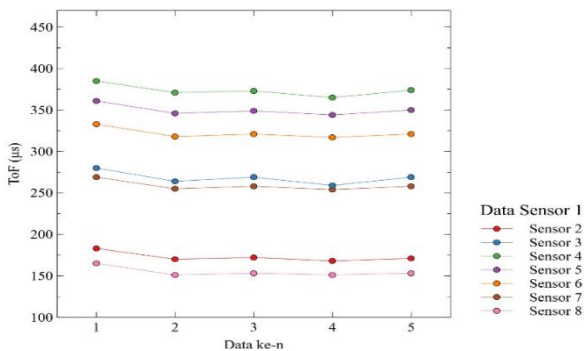
Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pukulan palu pada setiap paku sensor secara bergantian. Berikut merupakan hasil pengujian dari sensor satu sampai dengan 8 ditampilkan pada tabel 1 sampai dengan 8 dan grafik perubahan nilai ToF setiap sensor ditampilkan pada Gambar 9 sampai dengan 16.

#### Pengujian Sensor 1

Tabel 1. 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 mikrodetik



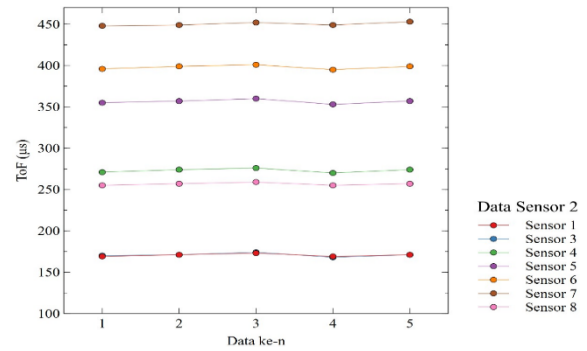
Gambar 9. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 1

#### Pengujian Sensor 2

Tabel 2. 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 mikrodetik



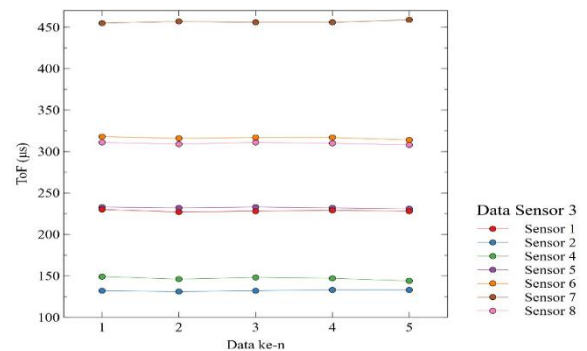
Gambar 10. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 2

#### Pengujian Sensor 3

Tabel 3. 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 mikrodetik



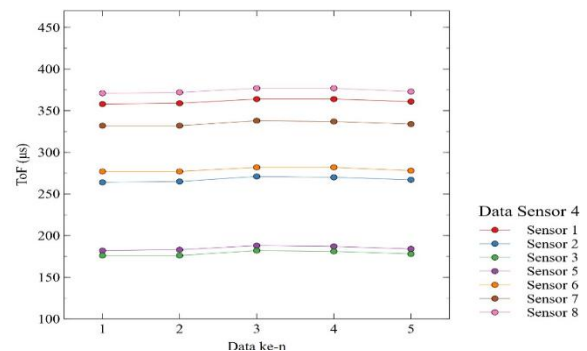
Gambar 11. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 3

#### Pengujian Sensor 4

Tabel 4. 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 mikrodetik



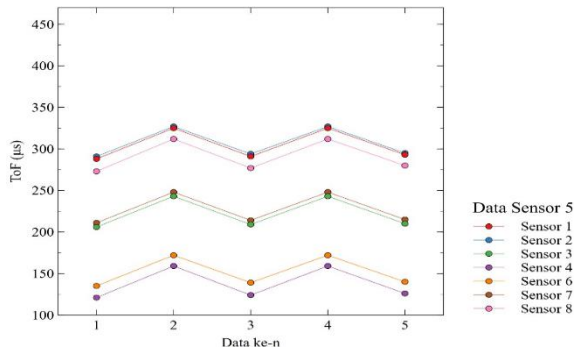
Gambar 12. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 4

## Pengujian Sensor 5

Tabel 5. 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 mikrodetik



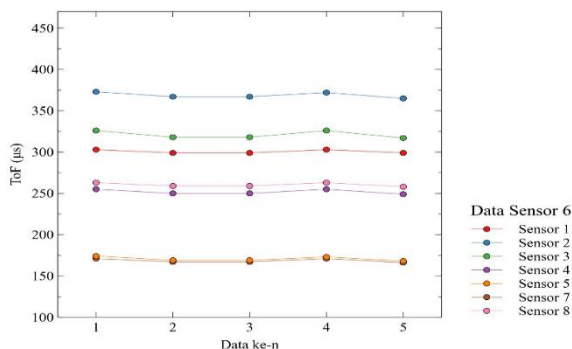
Gambar 13. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 5

## Pengujian Sensor 6

Tabel 6. 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 mikrodetik



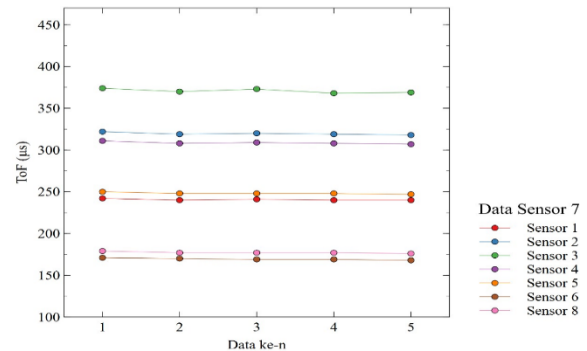
Gambar 14. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 6

## Pengujian Sensor 7

Tabel 7. 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 mikrodetik



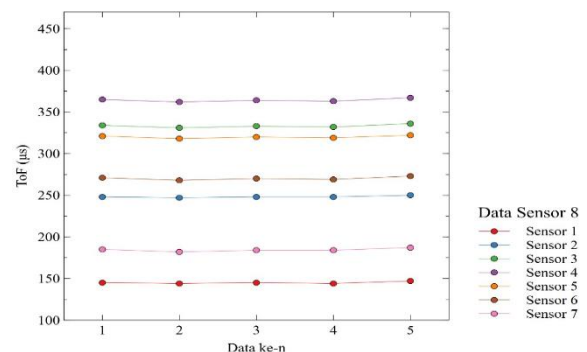
Gambar 15. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 7

## Pengujian Sensor 8

Tabel 8. 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 mikrodetik



Gambar 16. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 8

## ANALISA

Dalam menganalisa konsistensi pembacaan sensor saat pengukuran digunakan nilai rata-rata dan standar deviasi. Untuk mendapatkan nilai rata-rata pengukuran dan standar deviasi digunakan persamaan (3) dan (4) [7].

$$\text{rata - rata } (\bar{x}) = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$$

$$\text{standar deviasi } (\sigma) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh hasil nilai perhitungan rata-rata ToF dan standar deviasi seperti yang ditampilkan pada Tabel 9 sampai dengan Tabel 16.

## Pengujian Sensor 1

Tabel 9. Repeatability pengujian sensor 1

| Parameter      | ToF 1 | ToF 2 | ToF 3 | ToF 4 | ToF 5 | ToF 6 | ToF 7 | ToF 8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| rata-rata (µs) | #     | 172,8 | 268,2 | 373,6 | 350,0 | 322,0 | 258,8 | 154,6 |
| σ              | #     | 5,9   | 7,8   | 7,3   | 6,6   | 6,4   | 6,0   | 5,9   |

## Pengujian Sensor 2

Tabel 10. Repeatability pengujian sensor 2

| Parameter      | ToF 1 | ToF 2 | ToF 3 | ToF 4 | ToF 5 | ToF 6 | ToF 7 | ToF 8 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| rata-rata (µs) | 170,6 | #     | 170,8 | 273,0 | 356,4 | 398,0 | 450,2 | 256,6 |
| σ              | 1,7   | #     | 2,2   | 2,4   | 2,6   | 2,4   | 2,2   | 1,7   |



### Pengujian Sensor 3

Tabel 11. Repeatability pengujian sensor 3

| Parameter            | ToF 1 | ToF 2 | ToF 3 | ToF 4 | ToF 5 | ToF 6 | ToF 7 | ToF 8 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| rata-rata ( $\mu$ 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 12. Repeatability pengujian sensor 4

| Parameter            | ToF 1 | ToF 2 | ToF 3 | ToF 4 | ToF 5 | ToF 6 | ToF 7 | ToF 8 |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| rata-rata ( $\mu$ 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 13. Repeatability 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 14. Repeatability 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 15. Repeatability 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   |

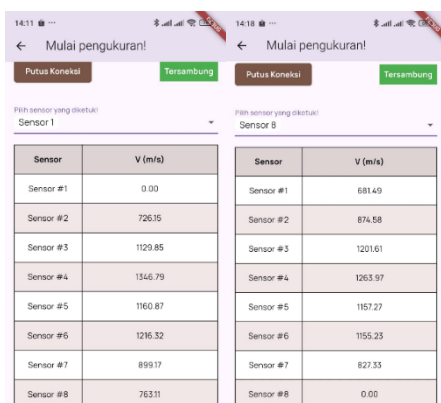
### Pengujian Sensor 8

Tabel 16. Repeatability 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 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.

### C. Pengiriman Data ToF

|  |         |
|---|---------|
| Sensor  | V (m/s) |
| Sensor #1   | 0.00    |
| Sensor #2   | 726.15  |
| Sensor #3   | 1129.85 |
| Sensor #4   | 1346.79 |
| Sensor #5   | 1160.87 |
| Sensor #6   | 1216.32 |
| Sensor #7   | 899.17  |
| Sensor #8   | 763.11  |

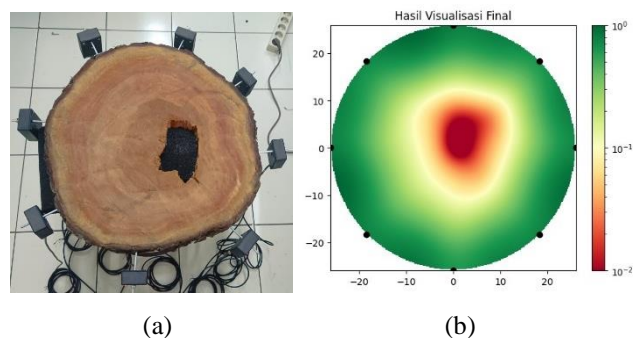
(a)

(b)

Gambar 17. (a) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 1, (b) Tampilan aplikasi pada pengujian sensor 8.

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa data ToF telah dapat di terima dan diolah menjadi data kecepatan oleh aplikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17 (a) dan (b).

Data kecepatan kemudian diolah menjadi tomografi yang mampu menggambarkan kondisi penampang batang pohon yang diuji. Berikut merupakan hasil perbandingan penampang pohon asli dan hasil tomografi ditunjukkan pada Gambar 18 (a) dan (b).



Gambar 18. (a) Penampang batang pohon asli, (b) Penampang pohon hasil tomografi,

Gambar di atas menunjukkan bahwa dari pemrosesan ToF dapat diperoleh citra tomografi. Hasil tomografi menunjukkan adanya lubang namun ukuran lubang dan lokasinya masih menunjukkan belum sesuai media uji.

## V. KESIMPULAN

Desain dan implementasi pemrosesan data Time of Flight (ToF) pada alat monitoring kondisi kesehatan internal pohon (Terawang) dapat dilakukan menggunakan sensor suara KY-037 dan mikrokontroler Teensy 4.1. Namun ketelitian dan keakuratan data ToF sangat dipengaruhi oleh sensitivitas sensor. Pengembangan sensor pendeteksi gelombang akustik masih diperlukan untuk ke depannya agar alat mampu mendeteksi dengan lebih baik dan tahan terhadap gangguan dari luar.

## 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
- [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.compagn.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. Armstrong, 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.