

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—Citra tomografi alat Terawang diperoleh dari cepat rambat gelombang akustik di dalam batang kayu yang dideteksi sensor KY-037. Cepat rambat gelombang diperoleh dari jarak antara sensor dibagi waktu perambatan antara dua sensor. Penghitungan cepat rambat gelombang akustik dilakukan oleh aplikasi dengan memperhitungkan data geometri pohon. Sedangkan penghitungan waktu perambatan gelombang akustik (*Time of Flight/ToF*) dilakukan oleh mikrokontroler Teensy 4.1 berdasarkan data dari 8 sensor KY-037 yang dipasang mengelilingi pohon dengan jarak antar sensor yang telah ditentukan. ToF diperoleh dari beda durasi waktu puncak sinyal suara yang didapatkan pada lokasi sensor penerima dan lokasi sumber. Beda waktu tersebut dihitung dengan menggunakan fungsi timer pada Teensy 4.1 dengan ketelitian sebesar 1 mikrosekon. Hasil ToF yang diperoleh kedelapan sensor dikirimkan ke aplikasi melalui komunikasi nirkabel untuk di proses menjadi data cepat rambat yang ditampilkan pada aplikasi Terawang.

Kata Kunci—cepat rambat gelombang akustik, *Time of Flight*, mikrokontroler Teensy 4.1, Sensor KY-03.

I. PENDAHULUAN

Terawang menghasilkan citra tomografi 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 (*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)

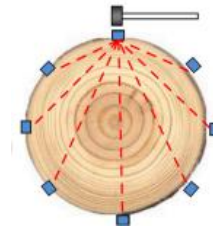
d = jarak antar sensor (meter)

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.

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 50-120 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 seperti yang ditampilkan pada

Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Pemasangan 8 sensor pada sekeliling 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 pukulan) seperti pada rumus (2) berikut ini.

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

$ToF_{\text{sensor } x}$ = waktu antara sensor sumber sensor ke-x

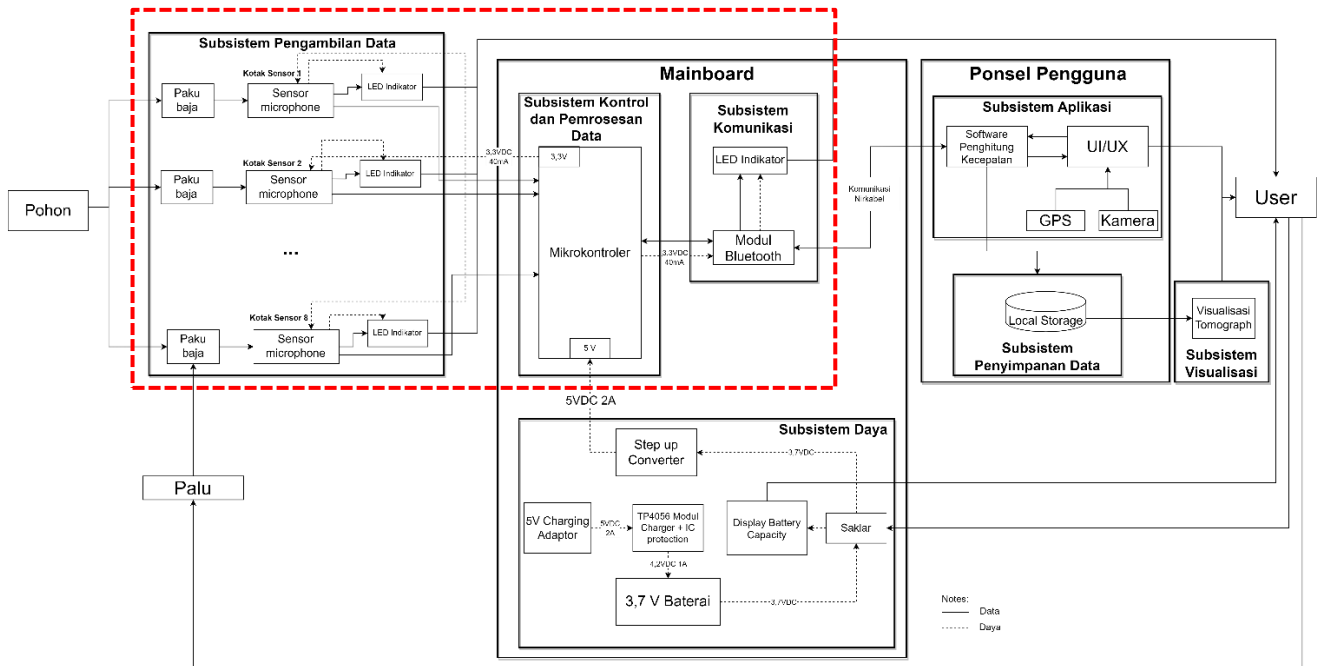
$t_{\text{sensor } x}$ = waktu tercatat timer di sensor ke-x

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

Selanjutnya ToF dikirimkan ke ponsel melalui jaringan komunikasi nirkabel yaitu bluetooth.

Gelombang akustik yang dihasilkan pukulan palu besi terhadap paku beton menghasilkan frekuensi berkisar antara 200 Hz – 5 kHz. Pada rentang frekuensi tersebut kayu masih dapat melewati gelombang tersebut dan tidak terjadi redaman.[3] Oleh karena itu, untuk mendeteksi gelombang akustik di sekeliling pohon dapat digunakan sensor KY-037.

Sensor KY-037 dapat mendeteksi impuls gelombang akustik yang disebabkan oleh *stress wave* pada kayu. Selain itu, sensor ini mempunyai pin digital sehingga dapat digunakan sebagai fungsi interupsi eksternal pada mikrokontroler. Selanjutnya untuk pemrosesan data digunakan Mikrokontroler Teensy 4.1. Teensy 4.1 yang memiliki kecepatan pemrosesan data hingga 600 MHz. Dengan kecepatan tersebut Teensy 4.1 memiliki timer dengan ketelitian 1 mikrosekon dan juga mampu menjalankan pin interupsi digital dari 8 sensor dengan kecepatan 120 MHz tanpa mengganggu tugas pemrosesan yang lain.

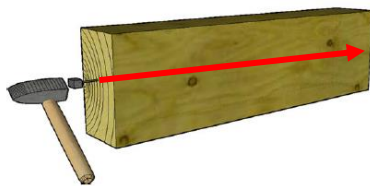


Gambar 2. Arsitektur perangkat pemroses data ToF dengan tanda garis putus-putus warna merah

II. KAJIAN PUSTAKA

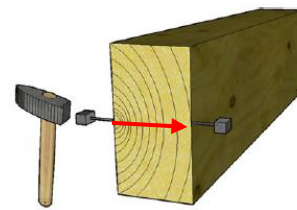
A. Karakteristik Rambat Suara di Kayu

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 3 di bawah ini.



Gambar 3. 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 4 di bawah ini.



Gambar 4. 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

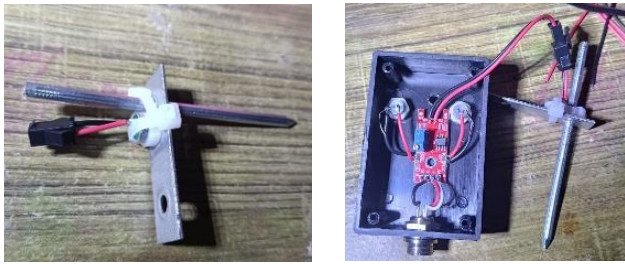
Arsitektur Perangkat

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 2 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 5(a).

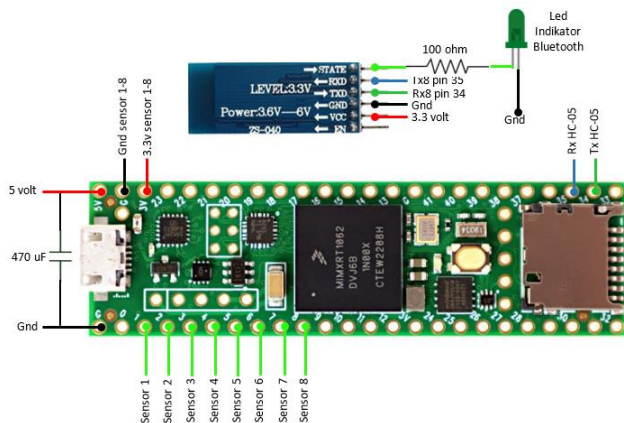


Gambar 5. (a) Modifikasi mikrofon kondenser KY-037, (b) Modifikasi papan pcb sensor KY-037.

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 5(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 6 di bawah ini.

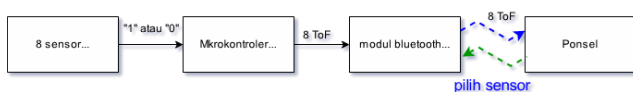


Gambar 6. Skema integrasi perangkat pemrosesan data

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

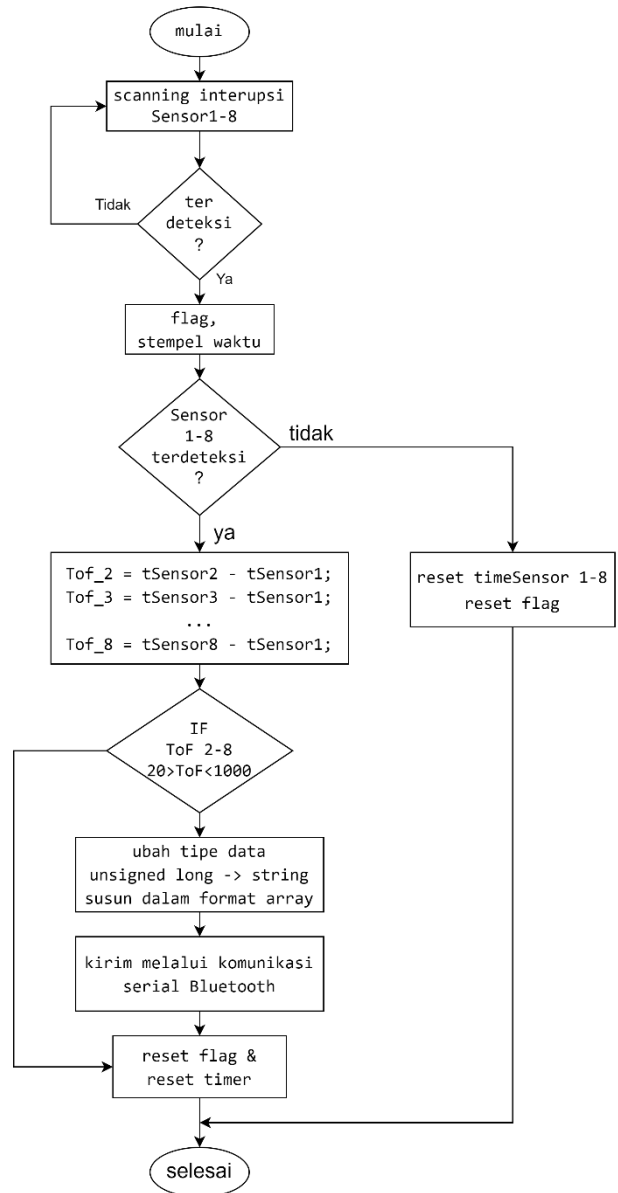
Pada pemrosesan data ToF, alur data dimulai dari sinyal digital yang berasal dari keluaran sensor dikirim ke mikrokontroler kemudian diolah menjadi ToF untuk dikirim ke ponsel melalui komunikasi nirkabel yang dilakukan oleh modul bluetooth HC-05. Berikut diagram blok pemrosesan data seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. 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 8 di bawah ini.

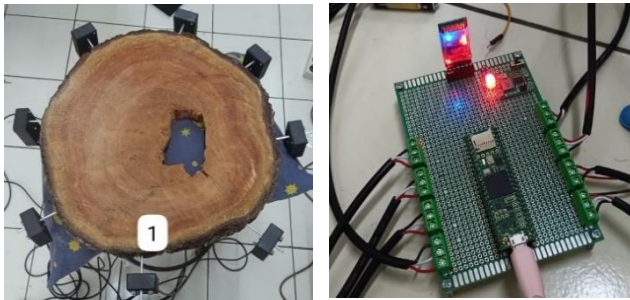


Gambar 8. Flowchart program dengan sensor acuan 1

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 9 (a).



(a) (b)

Gambar 9. (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 9(b).

B. Pemrosesan Data ToF

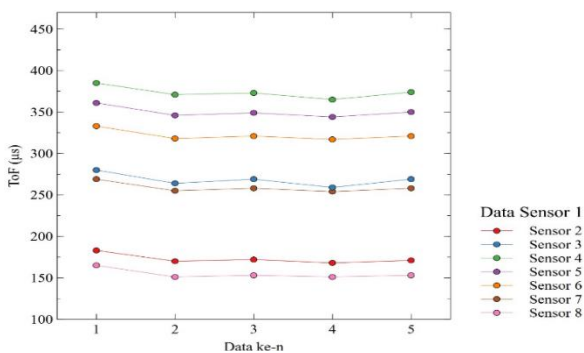
Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali pukulan palu pada setiap paku sensor secara bergantian. Berikut merupakan hasil pengujian dari sensor satu sampai dengan 8 ditampilkan pada tabel 1 sampai dengan 8 dan grafik perubahan nilai ToF setiap sensor ditampilkan pada Gambar 10 sampai dengan 17.

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 mikrosekond



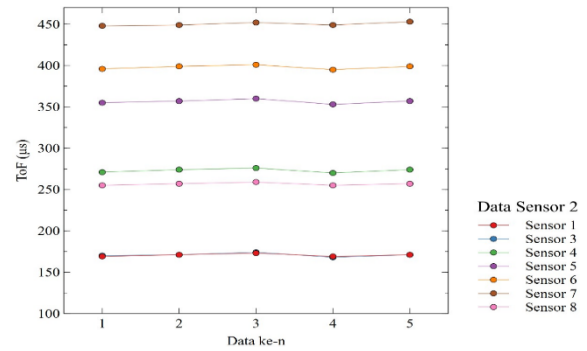
Gambar 10. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 1

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 mikrosekond



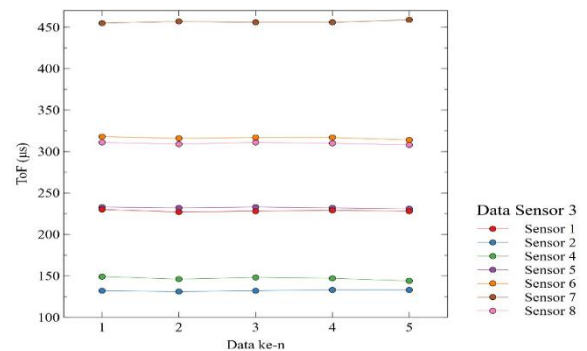
Gambar 11. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 2

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 mikrosekond



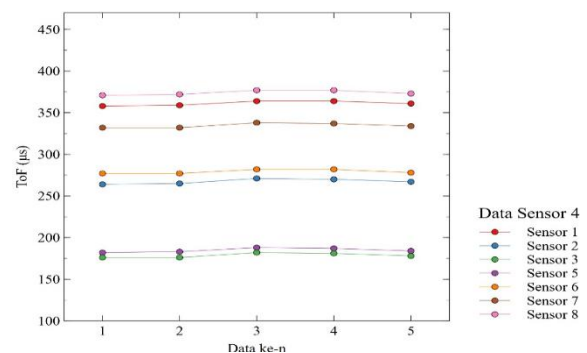
Gambar 12. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 3

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 mikrosekond



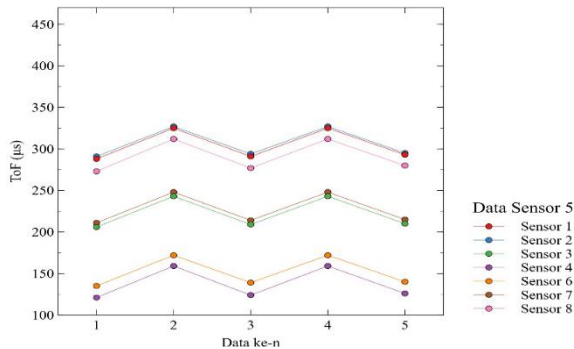
Gambar 13. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 4

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 mikrosekond



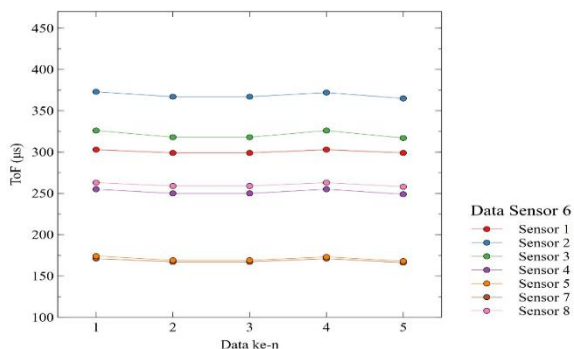
Gambar 14. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 5

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 mikrosekond



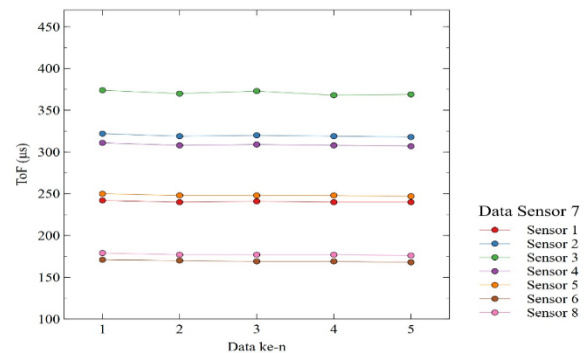
Gambar 15. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 6

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 mikrosekond



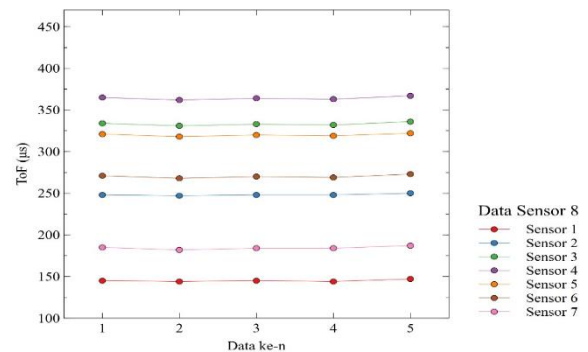
Gambar 16. Grafik perubahan nilai ToF pengujian sensor 7

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 mikrosekond



Gambar 17. 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 (μ s)	228,4	132,2	#	146,8	232,2	316,4	456,6	309,8
σ	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 (μ s)	361,2	267,4	178,6	#	184,8	279,2	334,6	374,0
Σ	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 (μ s)	304,4	306,8	222,2	137,8	#	151,6	227,2	290,8
Σ	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 (μ s)	300,6	368,8	321,0	251,8	170,6	#	168,4	260,4
Σ	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 (μ s)	240,6	319,6	370,8	308,6	248,2	169,4	#	177,2
Σ	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 (μ s)	145,0	248,2	333,2	364,2	320,0	270,2	184,4	#
σ	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 kecuali pada pengujian sensor 5 yang nilainya diantara 15-20. 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 1		Sensor 8	
Sensor	V (m/s)	Sensor	V (m/s)
Sensor #1	0.00	Sensor #1	681.49
Sensor #2	726.15	Sensor #2	874.58
Sensor #3	1129.85	Sensor #3	1201.61
Sensor #4	1346.79	Sensor #4	1263.97
Sensor #5	1160.87	Sensor #5	1157.27
Sensor #6	1216.32	Sensor #6	1155.23
Sensor #7	899.17	Sensor #7	827.33
Sensor #8	763.11	Sensor #8	0.00

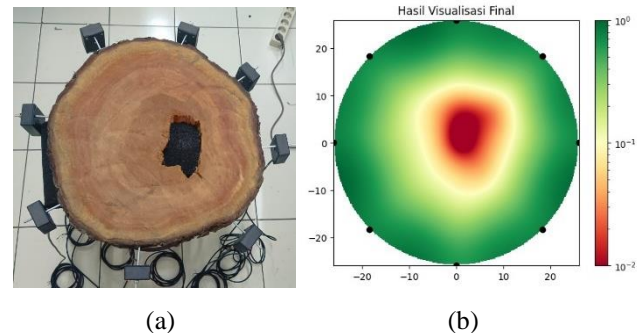
(a)

(b)

Gambar 18. (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 18 (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 19 (a) dan (b).



Gambar 19. (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 lebih akurat 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. 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.