

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SUBSISTEM VISUALISASI MENGUNAKAN METODE TOMOGRAFI PADA ALAT MONITORING KONDISI INTERNAL BATANG POHON

TUGAS AKHIR

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

**Oleh
FARIS JABAR NUGRAHADI
NIM: 13219020
(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)**



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
Februari 2025**

ABSTRAK

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SUBSISTEM VISUALISASI MENGUNAKAN METODE TOMOGRAFI PADA ALAT MONITORING KONDISI INTERNAL BATANG POHON

Oleh

Faris Jabar Nugrahadhi

NIM: 13219020

(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)

Karya tulis ini berfokus pada pengembangan alat monitoring kondisi internal batang pohon bernama Terawang. Alat ini menggunakan metode *Acoustic Tomography*, yang memanfaatkan perbedaan kecepatan gelombang akustik dalam batang kayu untuk menghasilkan citra 2D. Kesehatan pohon berperan penting dalam mencegah dampak yang dapat ditimbulkan akibat pohon yang tumbang. Pada pemeliharaan pohon di lingkungan perkotaan, atau *urban forestry*, diperlukan konsultan yang dapat meninjau kondisi kesehatan pohon dengan tepat. Alat ini diperlukan karena dibutuhkannya suatu alat yang dapat mengetahui kondisi internal batang pohon berdasarkan distribusi densitasnya secara akurat tanpa merusak pohon (non-destruktif).

Dari berbagai subsistem yang terdapat pada alat Terawang, tugas akhir ini berfokus pada subsistem penyimpanan data dan subsistem visualisasi. Subsistem penyimpanan data bertugas untuk menyimpan semua data pengukuran dan informasi terkait pohon, sedangkan subsistem visualisasi berfungsi untuk merekonstruksi dan menampilkan kondisi internal batang pohon berdasarkan hasil pengukuran. Data yang diolah dalam subsistem visualisasi berupa cepat rambat gelombang akustik yang diukur oleh sensor yang dipasang mengelilingi batang pohon. Adapun proses yang terjadi dalam subsistem visualisasi meliputi inisialisasi, kompensasi kecepatan, dan interpolasi.

Pelaksanaan tugas akhir ini melibatkan proses perancangan dan implementasi berdasarkan spesifikasi teknis yang telah ditentukan. Dalam pengujian, alat menunjukkan performa yang baik dalam mendeteksi rongga dan pelapukan pada batang pohon. Namun, terdapat keterbatasan, yaitu pengukuran hanya dapat efektif dilakukan pada batang yang memiliki bentuk mendekati lingkaran sempurna.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu memetakan kondisi pelapukan pada batang pohon berdasarkan distribusi densitas dengan akurasi yang cukup baik. Hasil visualisasi ini dapat memudahkan konsultan pohon dalam melakukan diagnosa kesehatan batang pohon berdasarkan tingkat pelapukan yang terdeteksi. Secara keseluruhan, alat Terawang yang dikembangkan ini diharapkan dapat

memberikan kontribusi dalam pemantauan kesehatan pohon, terutama dalam konteks *urban forestry*, dengan metode yang lebih efektif dan non-destruktif.

Kata kunci: *acoustic tomography*, interpolasi, penyimpanan data, rekonstruksi, visualisasi

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF VISUALIZATION SUBSYSTEM USING TOMOGRAPHY METHODE FOR TREE TRUNK INTERNAL CONDITION MONITORING DEVICE

By

Faris Jabar Nugrahadi

NIM: 13219020

(Bachelor Program in Electrical Engineering)

This paper focuses on the development of a monitoring device for the internal condition of tree trunks, named Terawang. The device utilizes the Acoustic Tomography method, which leverages the differences in the acoustic waves velocity within wood to generate 2D images. Tree health plays a crucial role in preventing the impacts that can arise from falling trees. In urban forestry, it is essential to have consultants who can accurately assess the health condition of trees. This device is necessary because there is a need for a tool that can determine the internal condition of tree trunks based on their density distribution accurately and non-destructively.

Among the various subsystems present in the Terawang device, this project focuses on the data storage subsystem and the visualization subsystem. The data storage subsystem is responsible for storing all measurement data and information related to the trees, while the visualization subsystem functions to reconstruct and display the internal condition of the tree trunk based on the measurement results. The data processed in the visualization subsystem consists of the speed of acoustic waves measured by sensors placed around the tree trunk. The processes that occur in the visualization subsystem include initialization, speed compensation, and interpolation.

The execution of this thesis involves a design and implementation process based on predetermined technical specifications. During testing, the device demonstrated good performance in detecting cavities and decay in tree trunks. However, there are limitations; measurements can only be effectively conducted on trunks that have a shape close to a perfect circle.

The test results further substantiate that this device is proficient in mapping the decay conditions present within tree trunks based on density distribution with a commendable level of accuracy. The visualization outcomes derived from this process can significantly assist tree consultants in diagnosing the health of tree trunks based on the levels of decay detected. Overall, the Terawang device that has been developed is anticipated to make a meaningful contribution to the monitoring

of tree health, particularly in the context of urban forestry, through the implementation of a more effective and non-destructive method.

Keywords: *acoustic tomography, interpolation, data storage, reconstruction, visualization*

HALAMAN PENGESAHAN

DESAIN DAN IMPLEMENTASI SUBSISTEM VISUALISASI MENGUNAKAN METODE TOMOGRAFI PADA ALAT MONITORING KONDISI INTERNAL BATANG POHON

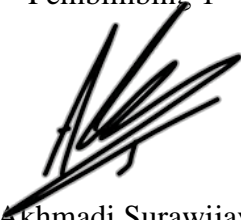
Oleh
Faris Jabar Nugrahadi
NIM: 13219020
(Program Studi Sarjana Teknik Elektro)

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:

Nugrahadi, F. J. (2025): *Desain dan Implementasi Subsystem Visualisasi Menggunakan Metode Tomografi pada Alat Monitoring Kondisi Internal Batang Pohon*, Tugas Akhir Program Sarjana, Institut Teknologi Bandung.

dan dalam bahasa Inggris sebagai berikut:

Nugrahadi, F. J. (2025): *Design and Implementation of Visualization Subsystem Using Tomography Methode for Tree Trunk Internal Condition Monitoring Device*, 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 penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Desain dan Implementasi Subsystem Visualisasi Menggunakan Metode Tomografi pada Alat Monitoring Kondisi Internal Batang Pohon”. Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua penulis, Eni Niyarti, S.Pd. (ibu) dan Maman Surahman, S.Pd., M.M. (ayah), atas doa dan dukungan yang tanpa henti kepada penulis untuk menyelesaikan masa studi di ITB.
2. Bapak Dr. Ir. Akhmadi Surawijaya, S.T., M.Eng. dan Bapak Indra Sihar, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing, atas arahan, bimbingan, dan motivasi selama proses pengerjaan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Rahadian Yusuf, S.T., M.T., selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir, beserta tim dosen tugas akhir lainnya yang telah mengarahkan, memberi masukan, dan mengevaluasi dalam proses pengerjaan tugas akhir.
4. Bapak Dr. Yayat Hidayat, S.Hut., M.Si., selaku dosen kehutanan ITB, yang telah menjadi narasumber penting dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bayu Aji Nugroho, Tifany Saulina Nababan, dan Rani Isramiharti, selaku rekan tim tugas akhir, atas kerja sama, dedikasi, dan semangatnya dalam proses pengerjaan tugas akhir.
6. Rekan-rekan Anteimu, yang senantiasa membantu penulis dalam menyelesaikan masalah teknis dan non-teknis selama menjalani masa studi di ITB.
7. Semua pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu, atas doa, bantuan, dan dukungan yang diberikan kepada penulis selama proses studi hingga penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis berharap bahwa tugas ini dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan dapat menjadi referensi bagi pembaca yang tertarik dengan topik ini. Penulis juga menyadari bahwa dalam penyusunan

tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang konstruktif sangat penulis harapkan untuk perbaikan di masa depan.

Bandung, 3 Februari 2025

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'FJN' with a stylized flourish at the end.

Faris Jabar Nugrahadi

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
PEDOMAN PENGGUNAAN TUGAS AKHIR.....	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
Bab I PENDAHULUAN	1
I.1. Masalah dan Tujuan	1
I.2. Batasan dan Konstrain	1
I.3. Bagian yang Dikerjakan	2
BAB II PENGETAHUAN DAN INFORMASI PENDUKUNG	5
II.1. Deteksi Akustik	5
II.2. Tomografi	5
II.3. Cincin Pertumbuhan Batang.....	6
II.4. Mata Kuliah Terkait	6
BAB III PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI.....	8
III.1. Spesifikasi Teknis	9
III.2. Proses Perancangan	9
III.3. Proses Implementasi	10
III.4. Hasil Implementasi.....	15
BAB IV ANALISIS HASIL TUGAS AKHIR.....	20
IV.1. Hasil Tugas Akhir	20
IV.2. Pengetahuan yang Diperoleh.....	20
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	21
V.1. Kesimpulan	21
V.2. Saran	21
REFERENSI.....	22
DAFTAR LAMPIRAN	23

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Arsitektur sistem	3
Gambar 2 Perbedaan arah rambat gelombang pada batang	5
Gambar 3 Prinsip kerja tomografi pada CT scanner	5
Gambar 4 (a) Benda yang dipantau. (b)-(e) Rekonstruksi menggunakan 1, 2, 3, dan 4 sinar. (f) Rekonstruksi menggunakan 32 sinar	6
Gambar 5 Hubungan cepat rambat gelombang dengan sudut tangensial	6
Gambar 6 Data flow diagram dari subsistem	9
Gambar 7 Flowchart proses rekonstruksi gambar	10
Gambar 8 Jalur cepat rambat gelombang akustik	11
Gambar 9 Pemodelan sudut tangensial pada gelombang	11
Gambar 10 Ilustrasi perbedaan nilai cepat rambat	12
Gambar 11 (a) Sinar proyeksi diberi ketebalan. (b) Hasil filter gaussian 2D.	12
Gambar 12 (a) Hasil akhir visualisasi metode sinar tebal. (b) Hasil thresholding	13
Gambar 13 Distribusi nilai cepat rambat metode elips	14
Gambar 14 Tampilan akhir visualisasi metode elips	14
Gambar 15 Hasil rekonstruksi menggunakan metode sinar tebal pada data dummy	16
Gambar 16. (a) Sampel batang pohon mati. (b) Hasil rekonstruksi tanpa kompensasi kecepatan.	16
Gambar 17. (a) Hasil rekonstruksi setelah kompensasi kecepatan. (b) Skala logaritmik. (c) Hasil thresholding	17
Gambar 18. Hasil rekonstruksi untuk pengujian kedua pada sampel batang yang sama.	17
Gambar 19. Sampel pohon hidup	18
Gambar 20. (a) Hasil rekonstruksi metode sinar tebal. (b) Hasil thresholding. (c) Hasil rekonstruksi metode elips.	19
Gambar 21. Hasil pengujian pada batang pohon dengan bentuk tak beraturan	19

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Penjelasan subsistem penyimpanan data	4
Tabel 2 Penjelasan subsistem visualisasi	4
Tabel 3 Karakteristik produk	8
Tabel 4 Spesifikasi teknis	9
Tabel 5 Contoh file hasil pengukuran	15
Tabel 6. Hasil pembacaan sensor	18

Bab I PENDAHULUAN

I.1. Masalah dan Tujuan

Kesehatan pohon berperan penting dalam mencegah dampak yang dapat ditimbulkan akibat pohon yang tumbang. Pada pemeliharaan pohon di lingkungan perkotaan, atau *urban forestry*, diperlukan konsultan yang dapat meninjau kondisi kesehatan pohon dengan tepat. Namun, saat ini peneliti pohon masih menggunakan metode *visual assessment* dan *Forest Health Monitoring* (FHM) dalam melakukan pengecekan kesehatan pohon. Melalui metode tersebut, kondisi internal batang pohon tidak dapat diamati secara langsung. Instrumen yang sudah ada harganya sangat mahal dan tidak selalu tersedia bagi peneliti pohon yang memiliki anggaran terbatas. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu alat yang dapat mengetahui kondisi internal batang pohon berdasarkan distribusi densitasnya secara akurat tanpa merusak pohon (non-destruktif).

Penelitian ini berfokus pada subsistem visualisasi pada alat monitoring kesehatan pohon Terawang. Data *time of flight (ToF)* yang terbaca oleh alat perlu diolah sehingga dapat ditampilkan dalam bentuk visual 2D. Gambar hasil rekonstruksi dan data identitas pohon kemudian disimpan menjadi sebuah berkas yang dapat dibuka menggunakan aplikasi mobile Terawang ketika dibutuhkan.

I.2. Batasan dan Konstrain

Pada tugas akhir ini, terdapat batasan masalah yang perlu diperhatikan:

1. Tugas akhir berfokus pada pengembangan alat monitoring kondisi internal batang pohon berdasarkan distribusi densitas untuk menentukan daerah yang mengalami keropos, pelapukan, atau berlubang.
2. Pohon yang dapat diukur memiliki batasan dengan beberapa kriteria: pohon berkayu, *overmature*, dan bentuk batang lingkaran dengan diameter 30 cm sampai 120 cm.

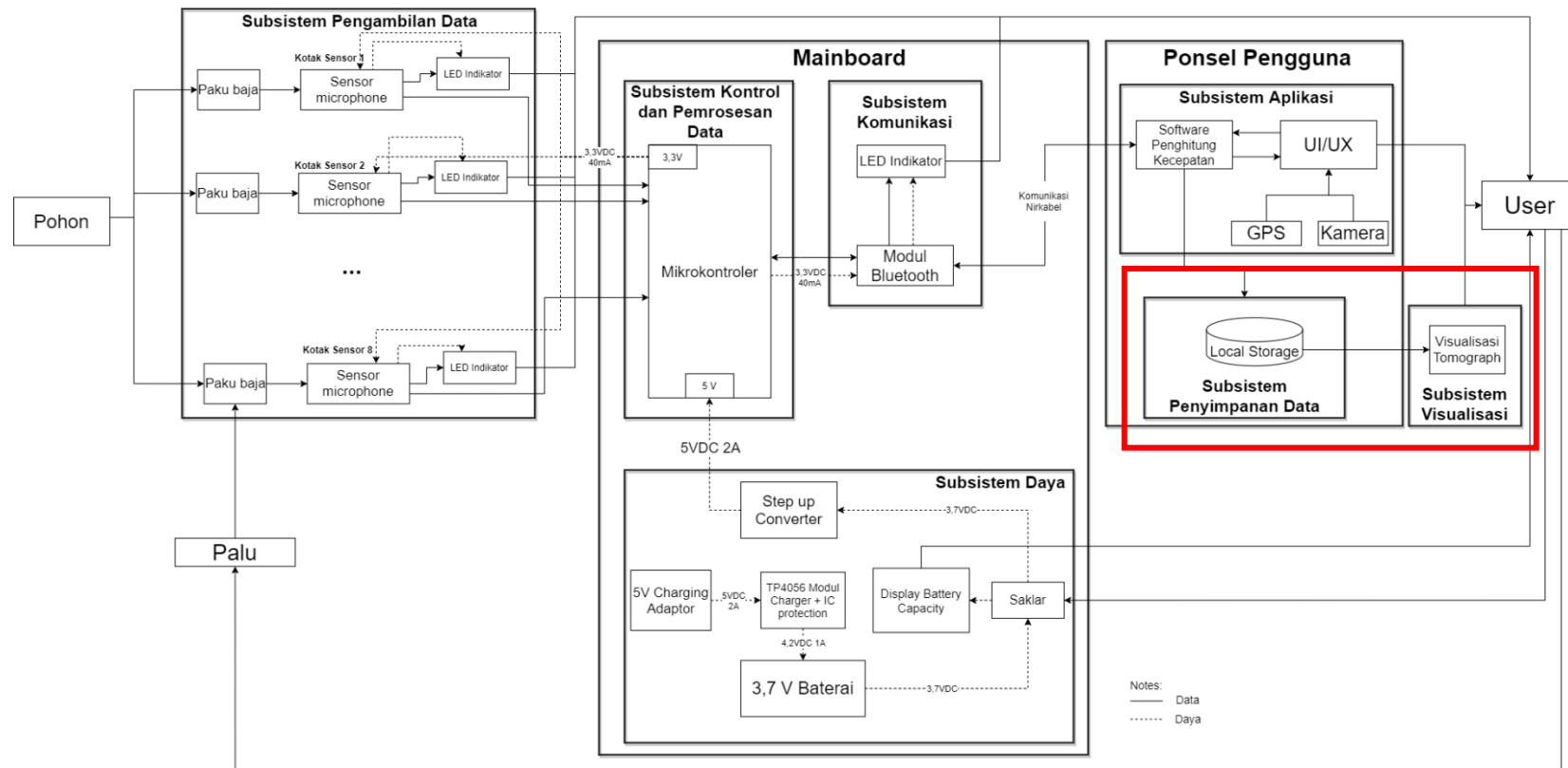
Selain itu, terdapat beberapa konstrain yang memengaruhi desain dan implementasi dari solusi tugas akhir:

1. Konstrain Ekonomi dan Manufakturabilitas (*Economy and Manufacturability*)

- Pertimbangan biaya produksi sehingga harga produk terjangkau oleh pihak pengelola area hijau perkotaan dan peneliti pohon.
 - Komponen yang dibutuhkan tersedia di dalam negeri agar mudah diperoleh dengan jumlah dan harga yang dibutuhkan.
2. Konstrain Kesehatan, Keselamatan, dan Lingkungan (*Health, Safety, and Environment*)
- Teknologi tidak membahayakan kesehatan pengguna, orang di sekitar, dan pohon yang dievaluasi.
 - Pengguna tidak ditempatkan dalam posisi dan kondisi yang berbahaya selama proses pengukuran dilakukan.
 - Penggunaan alat dirancang agar tidak merusak pohon yang diukur (non-destruktif).
3. Konstrain Lingkungan dan Keberlanjutan (*Environment and Sustainability*)
- Alat mampu beroperasi di bawah paparan cahaya matahari dan memiliki komponen yang tahan atau terlindung dari cipratan air.
 - Alat menggunakan baterai yang mampu menyala selama waktu pengukuran dalam satu hari.
4. *Legal, Code, and Standards*
- Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor: 05/PRT/M/2012: titik penanaman antar pohon berjarak sekitar 4 meter, sehingga area pengukuran terbatas.
5. *Ethics, Social, and Culture*
- Pengembangan alat ditujukan kepada pengguna yang memiliki *background* minimal S1 dan memiliki pengetahuan mengenai spesies pohon di Indonesia.

I.3. Bagian yang Dikerjakan

Secara keseluruhan, alat monitoring kondisi internal batang pohon terbagi menjadi 7 subsistem: subsistem akuisisi data, subsistem kontrol dan pemrosesan data, subsistem komunikasi, subsistem daya, subsistem aplikasi, subsistem penyimpanan data, serta subsistem visualisasi. Arsitektur sistem keseluruhan ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1 Arsistektur sistem

Bagian yang dikerjakan pada tugas akhir ini ditandai dalam kotak berwarna merah, yaitu subsistem penyimpanan data dan subsistem visualisasi. Masing-masing subsistem dijelaskan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Penjelasan subsistem penyimpanan data

Nama Subsistem	Penyimpanan data
Fungsi	Penyimpanan data bertugas untuk menyimpan semua data pohon, data hasil pengukuran.
Masukan	Informasi data pohon, data kecepatan hasil pengukuran, hasil visualisasi batang pohon.
Luaran	Data pohon dan data hasil pengukuran yang dapat diakses kembali oleh pengguna untuk melakukan visualisasi atau analisis lebih lanjut

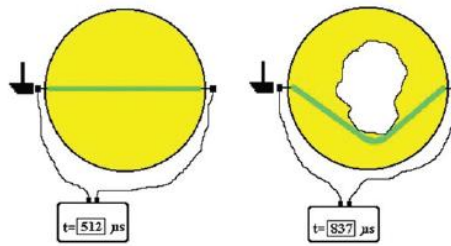
Tabel 2 Penjelasan subsistem visualisasi

Nama Subsistem	Visualisasi
Fungsi	Melakukan visualisasi terhadap kondisi internal batang pohon berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan.
Masukan	Data kecepatan hasil pengukuran.
Luaran	Tomogram visualisasi internal batang pohon dalam bentuk gambar

BAB II PENGETAHUAN DAN INFORMASI PENDUKUNG

II.1. Deteksi Akustik

Deteksi akustik atau *acoustic detection* banyak digunakan untuk investigasi batang dan akar pohon, mulai dari deteksi pelapukan, retakan, rongga, hingga karakterisasi untuk evaluasi penilaian kualitas kayu[1]. Kecepatan gelombang akustik di dalam kayu sehat berkisar antara 800 hingga 1600 m/s bervariasi sesuai jenis pohonnya[2]. Alat pengukuran menggunakan metode akustik terdiri dari *transmitter*, *receiver*, dan komponen pengukur waktu.

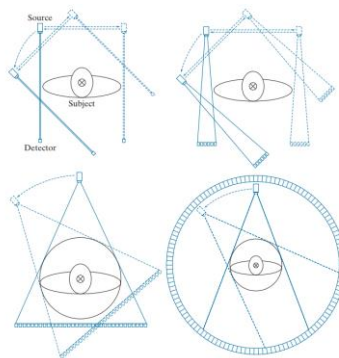


Gambar 2 Perbedaan arah rambat gelombang pada batang

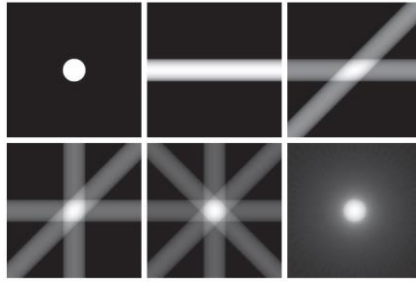
Acoustic detection pada batang didasarkan pada perubahan kecepatan akustik pada material yang berbeda. Kecepatan dari sinyal akustik yang terukur bervariasi sesuai kondisi pelapukan di material kayu. Gambar 1 menunjukkan perbedaan antara batang kayu yang sehat dengan batang yang mengalami pelapukan. Suara merambat lebih lambat di udara dibandingkan di kayu, sehingga suara akan sampai ke *receiver* melalui jalur yang lebih panjang.

II.2. Tomografi

Tomografi adalah metode rekonstruksi gambar berdasarkan proyeksi. Metode ini biasa digunakan untuk melihat kondisi irisan 2D dari sebuah benda 3D. Pada prinsipnya, tomografi melakukan rekonstruksi dengan menggabungkan sinar-sinar proyeksi hasil pembacaan alat yang ditempatkan secara melingkar di sekeliling benda yang ingin dipantau[3].



Gambar 3 Prinsip kerja tomografi pada CT scanner

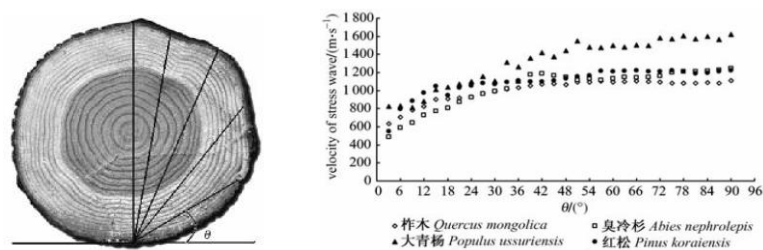


Gambar 4 (a) Benda yang dipantau. (b)-(e) Rekonstruksi menggunakan 1, 2, 3, dan 4 sinar. (f) Rekonstruksi menggunakan 32 sinar

Gambar 2 menunjukkan posisi *transmitter* dan *receiver* yang diputar mengelilingi benda pengamatan dengan perbedaan sudut yang konstan. Sinyal proyeksi kemudian dipetakan ke dalam bidang 2D menjadi sebuah gambar. Berdasarkan Gambar 3, semakin banyak sinar proyeksi yang digunakan, maka semakin baik keakuratan rekonstruksi gambar yang dihasilkan.

II.3. Cincin Pertumbuhan Batang

Sudut antara orientasi cincin pertumbuhan tahunan dari kayu dan sumber benturan sangat mempengaruhi waktu perjalanan gelombang suara di dalam kayu karena struktur lapisan kayu yang unik.



Gambar 5 Hubungan cepat rambat gelombang dengan sudut tangensial

Gelombang yang merambat tidak melewati titik tengah pohon (tangensial) akan memiliki kecepatan rambat yang lebih rendah dibanding kecepatan radial[4]. Semakin dekat posisi kedua titik ukur, semakin kecil sudut yang terbentuk, dan semakin kecil kecepatan tangensialnya.

II.4. Mata Kuliah Terkait

Mata kuliah yang telah dipelajari dan digunakan dalam proses perancangan tugas akhir adalah sebagai berikut.

1. Pengenalan Komputasi, sebagai dasar dalam mendesain sebuah algoritma, pembuatan *flowchart*, dan pembuatan DFD untuk program berbahasa python.
2. Pengolahan Citra Digital, sebagai pendukung dalam mendalami konsep dan metode tomografi.

BAB III PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI

Berikut merupakan karakteristik produk yang telah dirancang. Karakteristik produk diturunkan menjadi fitur utama, fitur dasar, fitur tambahan, dan sifat solusi yang diharapkan.

1. Fitur Utama:

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

2. Fitur Dasar:

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

3. Fitur Tambahan:

Menyediakan penyimpanan data pohon dan hasil pengukuran pada memori/database produk.

4. Sifat solusi yang diharapkan:

- Perangkat yang dibuat memiliki harga yang relatif lebih murah dibanding produk lain yang sudah ada (estimasi di bawah 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 kemudian diturunkan sebagai karakteristik produk yang dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3 Karakteristik produk

No	Karakteristik Produk
1	Dapat mengukur distribusi densitas batang pohon untuk mendeteksi adanya pelapukan pada titik yang diukur
2	Dapat memberikan visualisasi pelapukan batang pohon kepada user
3	Produk <i>portable</i> dan <i>splash resistant</i>

4	Menyediakan penyimpanan data hasil pengukuran pada <i>memory</i> /database produk
5	Waktu pengukuran per pohon tidak memakan waktu yang lama

III.1. Spesifikasi Teknis

Untuk memenuhi karakteristik produk tersebut, implementasi dan pengujian produk dilakukan untuk memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan. Spesifikasi yang perlu dicapai untuk subsistem visualisasi dan subsistem penyimpanan data diuraikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Spesifikasi teknis

Spesifikasi	Uraian
Tampilan hasil pengukuran	Teks dan gambar dalam aplikasi HP dapat terbaca dengan baik pada jarak ideal yaitu 41-46 cm.
<i>Memory Capacity</i>	Kapasitas memori minimal dapat menyimpan data dari 240 gambar hasil pengukuran selama satu bulan dengan 20 hari kerja.

III.2. Proses Perancangan

Subsistem visualisasi merupakan tahap lanjutan dari aplikasi monitoring kondisi internal batang pohon Terawang. Program ini menerima data hasil pengukuran kemudian merekonstruksi visual kondisi batang pohon dalam bentuk gambar. Gambar yang telah dihasilkan kemudian ditampilkan pada layar aplikasi.



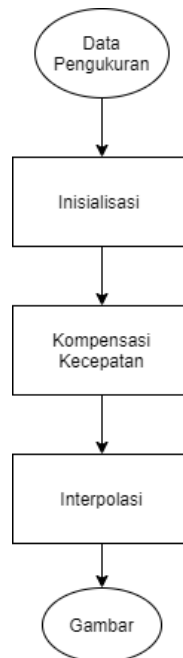
Gambar 6 Data flow diagram dari subsistem

Ada beberapa tahap yang perlu dilalui dalam melakukan visualisasi:

1. Inisialisasi dan Kompensasi Kecepatan
2. Interpolasi

3. Pembuatan dan Penyimpanan Gambar

Data hasil pengukuran yang diterima fungsi visualisasi berupa matriks cepat rambat gelombang suara antar sensor. Pertama, fungsi ini membuat garis-garis melintang pada lingkaran yang nilainya sesuai dengan nilai cepat rambat masing-masing sensor. Selanjutnya, nilai cepat rambat antar sensor perlu dikompensasi berdasarkan posisinya terhadap titik pusat batang. Untuk memperjelas hasil visualiasi, dilakukan proses interpolasi yang mengisi bagian-bagian kosong pada lingkaran berdasarkan sebaran nilai cepat rambat pada suatu area. Hasil gambar yang telah dibuat kemudian disimpan ke dalam format PNG yang dapat ditampilkan pada layar aplikasi. Proses rekonstruksi gambar ditunjukkan oleh flowchart pada Gambar 7.

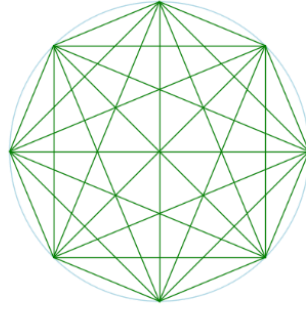


Gambar 7 Flowchart proses rekonstruksi gambar

III.3. Proses Implementasi

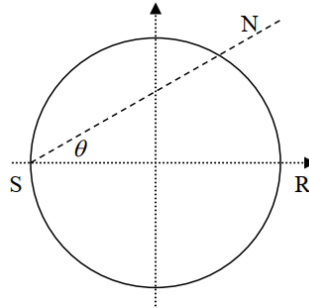
Implementasi Bagian Inisialisasi dan Kompensasi Kecepatan

Bagian ini berisi tahap persiapan dari rekonstruksi menggunakan prinsip tomografi yang telah dimodifikasi. Terdapat 8 titik yang merupakan posisi sensor pada batang, tersebar merata di sekeliling lingkaran. Alih-alih hanya menghasilkan proyeksi dari titik-titik sensor yang berseberangan, dari setiap titik ditarik sebuah garis melintang menuju titik yang lainnya. Masing-masing garis ini diberikan bobot nilai berdasarkan matriks cepat rambat gelombang dari data hasil pengukuran.



Gambar 8 Jalur cepat rambat gelombang akustik

Karena batang pohon yang bersifat anisotropi, terdapat perubahan kecepatan terukur untuk gelombang-gelombang non-radial.



Gambar 9 Pemodelan sudut tangensial pada gelombang

Perubahan cepat rambat gelombang non-radial memenuhi persamaan (1)

$$v_N = v_R \cos^2(\theta) \sqrt{1 + \frac{E_T}{E_R} \tan^4(\theta) + 2 \frac{G_{RT}}{E_R} \tan^2(\theta)} \quad (1)$$

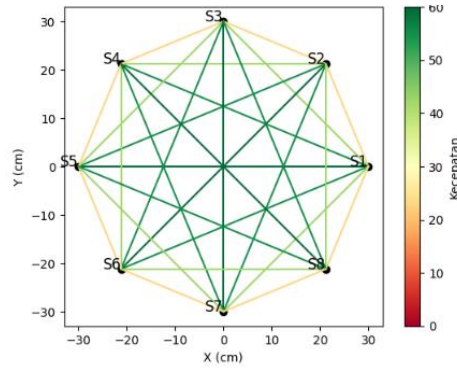
dimana v_N adalah cepat rambat non-radial, v_R adalah cepat rambat radial, θ adalah sudut antar kedua gelombang, E_T adalah modulus elastisitas tangensial, E_R adalah modulus elastisitas radial, G_{RT} adalah modulus shear.

Berdasarkan estimasi nilai konstanta dari percobaan yang pernah dilakukan Li[5], persamaan cepat rambat non-radial dapat disederhanakan sebagai persamaan (2)

$$v_N = (-0.2\theta + 1)v_R \quad (2)$$

Untuk melakukan penyesuaian data visualisasi, data hasil pengukuran perlu dibandingkan dengan nilai kompensasi kecepatan non-radial dengan persamaan (3).

$$v'_N = v_N / (-0.2\theta + 1) \quad (3)$$



Gambar 10 Ilustrasi perbedaan nilai cepat rambat

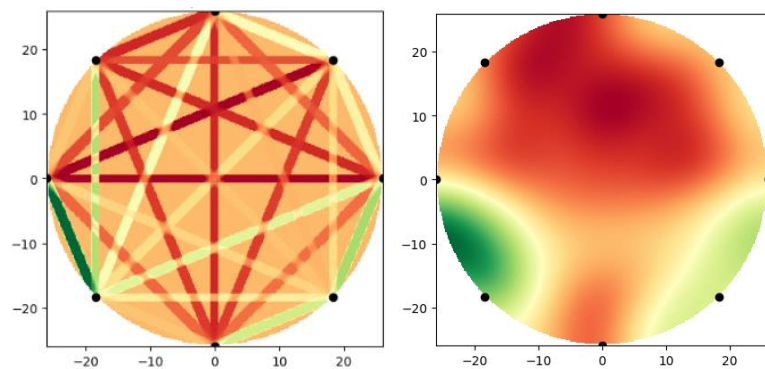
Implementasi Bagian Interpolasi

Berdasarkan prinsip kerja tomografi, sebuah proyeksi yang dihasilkan berupa sekumpulan sinar 1D dengan sudut pancaran yang sama. Sedangkan, proyeksi hasil pembacaan pada alat Terawang hanya berupa jalur cepat rambat yang menghubungkan antar titik sensor. Oleh karena itu, diperlukan metode interpolasi untuk mengisi bagian batang pohon yang masih kosong. Pada implementasinya, setiap garis diberikan ketebalan untuk merepresentasikan area yang memengaruhi nilai cepat rambat untuk jalur tertentu.

Kemudian, diterapkan filter gaussian 2D yang memberi distribusi nilai cepat rambat untuk mengisi daerah-daerah pada lingkaran yang kosong. Filter yang digunakan memenuhi persamaan (4)

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\left(\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (4)$$

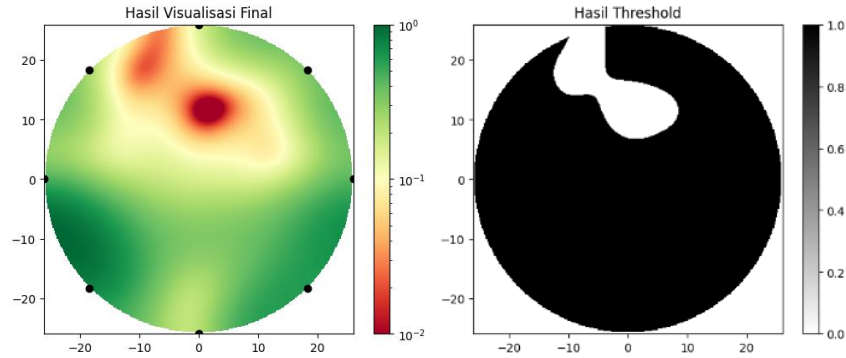
dimana $G(x, y)$ adalah faktor pengali nilai distribusi, x dan y adalah jarak dari titik utama, dan σ adalah standar deviasi dalam domain frekuensi.



Gambar 11 (a) Sinar proyeksi diberi ketebalan. (b) Hasil filter gaussian 2D.

Selain itu, memberikan hasil visualisasi kondisi internal batang pohon yang mudah diterjemahkan oleh mata pengguna, distribusi nilai cepat rambat ditampilkan dalam

skala logaritmik. Nilai maksimum untuk setiap pengukuran diberi nilai 1, sedangkan nilai lainnya dinormalisasi dalam rentang nilai maksimum dan nilai minimum. Selain itu dilakukan *thresholding* untuk mendeteksi adanya rongga pada batang.



Gambar 12 (a) Hasil akhir visualisasi metode sinar tebal. (b) Hasil thresholding

Pengembangan Implementasi Bagian Interpolasi Menggunakan Metode Elips

Dengan menggunakan metode sinar tebal, area dengan nilai cepat rambat yang lebih rendah sudah dapat terlihat dengan jelas. Namun, metode tersebut perlu mengasumsikan bahwa area di sekitar jalur cepat rambat bersifat homogen. Selain itu, karena nilai cepat rambat kayu di setiap pohon berbeda-beda, nilai threshold yang digunakan pada setiap pengukuran perlu disesuaikan nilainya. Karena keterbatasan informasi nilai cepat rambat gelombang untuk setiap jenis pohon di Indonesia, deteksi lubang pada pohon menggunakan metode ini tidak dapat dijamin keakuratannya.

Oleh karena itu, diperlukan metode interpolasi lain yang menghasilkan tampilan hasil rekonstruksi yang lebih tepat dalam menyampaikan informasi. Salah satu metode interpolasi yang telah dikembangkan adalah metode elips[6]. Daerah yang terdampak oleh sebuah jalur cepat rambat berbentuk elips dengan ukuran yang berbeda-beda. Ukuran elips ini dapat dimodelkan dengan persamaan (5)

$$c = b/a \quad (5)$$

dimana b adalah nilai sumbu pendek, a adalah nilai sumbu panjang, dan c adalah koefisien kontrol yang memenuhi persamaan (6)

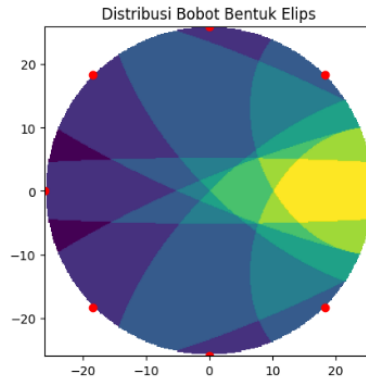
$$c_{ij} = \begin{cases} 1 - \left\lceil \frac{|j-i|}{\frac{N}{2}} \right\rceil, & |j-i| < \frac{N}{2} \\ 1 - \left\lfloor \frac{N-|j-i|}{\frac{N}{2}} \right\rfloor, & |j-i| < \frac{N}{2} \\ 0.1, & |j-i| = \frac{N}{2} \end{cases} \quad (6)$$

dimana i dan j adalah nomor sensor dan N adalah jumlah sensor keseluruhan.

Kemudian, untuk menentukan daerah yang berada di dalam elips, dapat menggunakan persamaan (7)

$$h(x, y) = \begin{cases} 1, & \frac{D_{xb}^2}{a^2} + \frac{D_{ya}^2}{b^2} \leq 1 \\ 0, & \frac{D_{xb}^2}{a^2} + \frac{D_{ya}^2}{b^2} > 1 \end{cases} \quad (7)$$

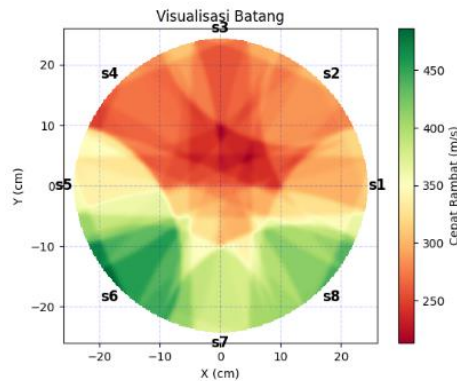
dimana D_{xb} adalah jarak titik dengan sumbu pendek elips, D_{ya} adalah jarak titik dengan sumbu panjang elips, dan $h(x, y) = 1$ menunjukkan bahwa titik berada di dalam elips.



Gambar 13 Distribusi nilai cepat rambat metode elips

Implementasi Bagian Pembuatan dan Penyimpanan Gambar

Informasi terkait hasil *plotting*: sumbu koordinat, ukuran batang, lokasi sensor, peta warna, dan nilai cepat rambat perlu ditampilkan pada gambar akhir visualisasi.



Gambar 14 Tampilan akhir visualisasi metode elips

Penyimpanan data pada aplikasi produk dilakukan dengan cara merekam data-data pengukuran ke dalam file JSON yang disimpan di *local storage* pada *smartphone*. Data pada file tersebut yang kemudian digunakan untuk membuat visualisasi. Hasil visualisasi kemudian disimpan dalam format PNG yang dapat ditampilkan kembali pada layar *smartphone*.

III.4. Hasil Implementasi

Pengujian Proses Penyimpanan Data

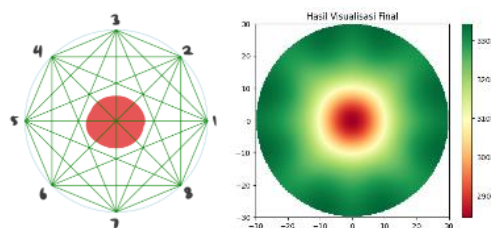
Data hasil pengukuran yang telah terbaca sensor dan dikirimkan menuju *smartphone* kemudian disimpan ke dalam sebuah file JSON. Lokasi penyimpanan bawaan terletak pada folder “Documents”. File berukuran 463 *bytes* berisi variabel-variabel karakteristik pohon dan data cepat rambat gelombang akustik pengukuran.

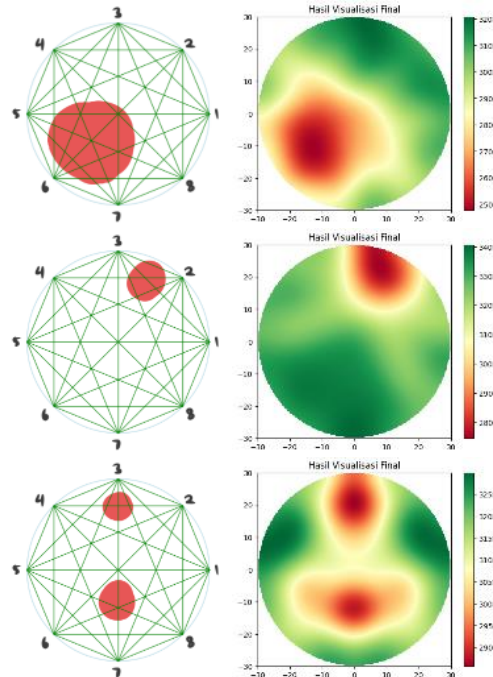
Tabel 5 Contoh file hasil pengukuran

```
{ "species": "Akasia", "keliling": 30, "jumlah_sensor": 8, "ketinggian": 50,
  "data_pengukuran": [
    [0, 1014, 785, 140, 271, 1669, 831, 647],
    [484, 0, 555, 189, 225, 362, 378, 834],
    [563, 951, 0, 135, 408, 430, 342, 293],
    [435, 1094, 514, 0, 374, 475, 501, 1098],
    [615, 291, 530, 71, 0, 920, 406, 923],
    [554, 337, 493, 190, 382, 0, 354, 932],
    [618, 594, 853, 242, 418, 782, 0, 657],
    [507, 431, 902, 218, 253, 979, 1291, 0]
  ]
}
```

Pengujian Rekonstruksi Menggunakan Data Dummy

Sebelum melakukan pengujian pada batang pohon, dilakukan pengujian output visualisasi ketika diberi input data *dummy*. Data *dummy* dibentuk dengan mengurangi nilai cepat rambat menjadi 50% untuk jalur-jalur cepat rambat yang melintasi lubang tanpa adanya variasi kecepatan yang diakibatkan kecepatan tangensial batang.



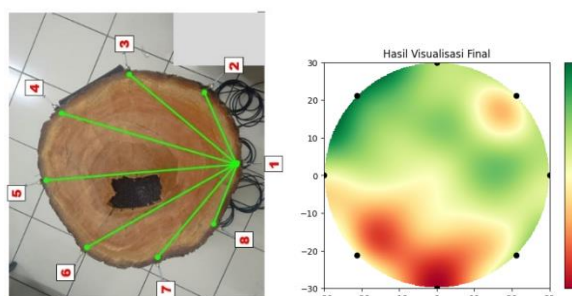


Gambar 15 Hasil rekonstruksi menggunakan metode sinar tebal pada data dummy

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, hasil rekonstruksi telah berhasil menunjukkan posisi lubang yang ada pada data *dummy*. Namun untuk lubang yang berada mendekati bagian pinggir batang, akurasi pemetaan menurun. Hal ini disebabkan oleh perbedaan jumlah jalur cepat rambat yang melintasi dipengaruhi suatu area. Pada bagian tengah, pemetaan cenderung lebih akurat karena dipengaruhi oleh lebih banyak jalur sensor.

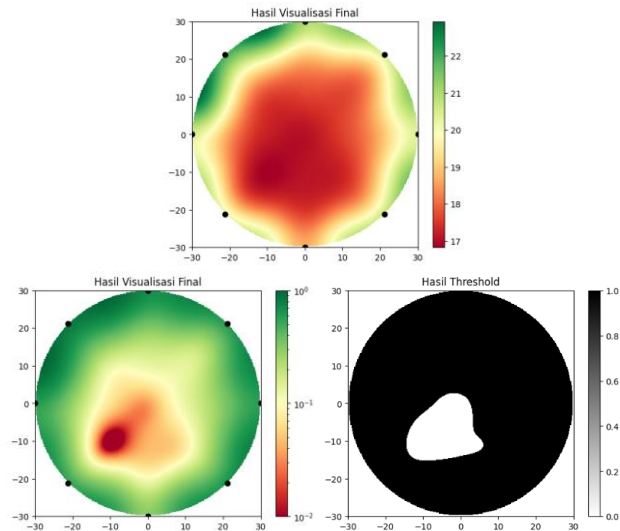
Pengujian Pada Batang Pohon Mati

Pengujian berikutnya dilakukan pada batang pohon mati yang berlubang. Pemetaan sensor dan hasil rekonstruksi ditunjukkan pada Gambar 16 berikut.



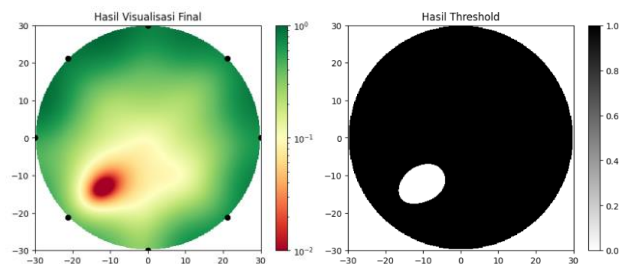
Gambar 16. (a) Sampel batang pohon mati. (b) Hasil rekonstruksi tanpa kompensasi kecepatan.

Berdasarkan Gambar 16, terlihat bahwa hasil rekonstruksi tanpa melakukan kompensasi kecepatan menunjukkan penurunan cepat rambat yang signifikan di bagian pinggir batang.



Gambar 17. (a) Hasil rekonstruksi setelah kompensasi kecepatan. (b) Skala logaritmik. (c) Hasil thresholding

Berdasarkan Gambar 17, kompensasi kecepatan memberikan hasil yang lebih akurat, yaitu posisi lubang yang berada lebih mendekati titik pusat.



Gambar 18. Hasil rekonstruksi untuk pengujian kedua pada sampel batang yang sama.

Gambar 18 menunjukkan hasil rekonstruksi pengukuran kedua pada sampel batang pohon yang sama. Pada visual dengan skala logaritmik, terlihat posisi lubang yang relatif sama dengan pengujian sebelumnya. Namun pada hasil *thresholding*, terlihat bahwa alat mendeteksi lubang yang lebih kecil dibanding pengujian pertama. Hal ini dikarenakan nilai rata-rata hasil pembacaan alat menurun, namun dengan distribusi yang sama. Akibatnya, untuk memperoleh hasil deteksi lubang yang sama, nilai *threshold* yang diperlukan untuk deteksi lubang juga perlu diturunkan. Nilai *threshold* yang selalu berubah ini menunjukkan bahwa metode *threshold* kurang dapat diandalkan dalam mendeteksi lubang pada batang.

Pengujian Pada Batang Pohon Hidup

Berikutnya dilakukan pengujian pada batang pohon hidup. Titik pengujian dilakukan 80 cm dari permukaan tanah pada batang berdiameter 31,2 cm.



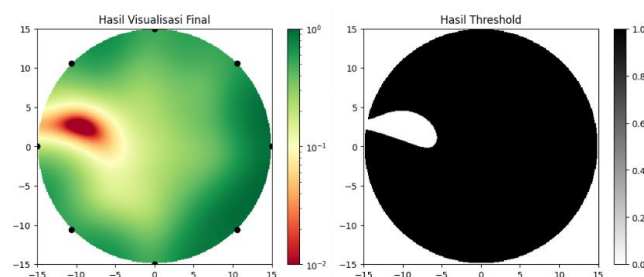
Gambar 19. Sampel pohon hidup

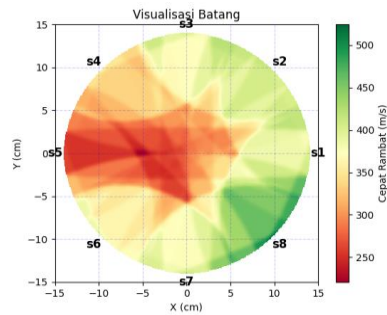
Data hasil pengukuran ditunjukkan oleh Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pembacaan sensor

Sensor ke-n	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
S1	#	484	432	334	153	1428	457	700
S2	460	#	515	367	132	1116	409	788
S3	479	527	#	134	355	1304	344	855
S4	304	481	563	#	382	1262	405	980
S5	402	491	472	291	#	991	434	980
S6	511	742	493	437	827	#	380	867
S7	526	452	310	480	296	865	#	624
S8	476	497	316	575	1255	1295	953	#

Berdasarkan Gambar 20, hasil rekonstruksi dari kedua metode menunjukkan pemetaan yang serupa. Namun pada metode elips, distribusi tidak menunjukkan perbedaan yang ekstrim. Peta warna juga memberikan informasi nilai cepat rambat untuk setiap titik. Pengguna yang merupakan peneliti atau konsultan *urban forestry* dapat menganalisa kesehatan pohon secara lebih tepat berdasarkan informasi tersebut.

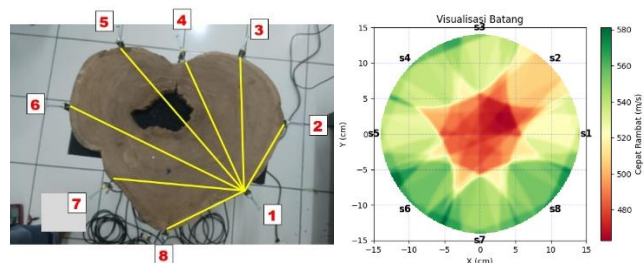




Gambar 20. (a) Hasil rekonstruksi metode sinar tebal. (b) Hasil thresholding. (c) Hasil rekonstruksi metode elips.

Pengujian Pada Batang Pohon Berbentuk Tak Beraturan

Pengujian berikutnya dilakukan pada batang pohon mati dengan bentuk tak beraturan.



Gambar 21. Hasil pengujian pada batang pohon dengan bentuk tak beraturan

Berdasarkan hasil pengujian, titik pelapukan pada batang tidak terpetakan secara akurat. Hal ini dikarenakan prosedur visualisasi batang dilakukan pada bidang lingkaran. Akibatnya terjadi distorsi pada jalur-jalur proyeksi yang mengubah hasil rekonstruksi secara keseluruhan.

BAB IV ANALISIS HASIL TUGAS AKHIR

IV.1. Hasil Tugas Akhir

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, alat monitoring kondisi internal batang pohon Terawang telah memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan. Subsistem visualisasi dapat menampilkan hasil pengukuran dalam bentuk gambar 2D. Informasi pada gambar yang ditampilkan di layar: skala sumbu, lokasi sensor, peta warna, nilai cepat rambat, dan distribusi densitas dapat terbaca dengan baik pada jarak 41 - 46 cm. Subsistem penyimpanan data menghasilkan sebuah file untuk satu proyek berukuran 436 *bytes* dan foto pohon berukuran 5 MB. Dalam 240 kali pengukuran, dibutuhkan kapasitas *storage* sebesar 1200 MB yang dapat disediakan oleh *micro SD card* sebesar 2 GB.

IV.2. Pengetahuan yang Diperoleh

Selama pengerjaan tugas akhir, penulis memperoleh berbagai wawasan baru mengenai metode monitoring kesehatan pohon. Selain FHM dan *acoustic tomography*, penulis juga mempelajari metode lain seperti *penetrating radar*, *electro resistive test*, dan resistograf. Penulis juga memperoleh ilmu mengenai karakteristik pohon dan pengaruhnya terhadap rambatan gelombang.

Selain itu, penulis mempelajari mengenai pengolahan sinyal dalam domain 2D sehingga dapat menghasilkan sebuah citra yang menyampaikan informasi dengan jelas. Ketika melakukan implementasi, penulis memperoleh pengalaman dalam membuat algoritma yang sesuai dan efektif untuk menyelesaikan masalah yang ada.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

V.1. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, Terawang sebagai alat monitoring kondisi internal batang pohon telah berhasil diimplementasikan. Data hasil pengukuran alat dapat tersimpan ke dalam penyimpanan lokal *smartphone* yang kemudian diolah menjadi sebuah visual 2D. Lokasi pelapukan yang terjadi pada batang pohon dapat dipetakan secara tepat menggunakan alat ini. Visualisasi kondisi internal batang pohon dapat membantu peneliti atau konsultan *urban forestry* dalam melakukan diagnosa kesehatan batang pohon.

V.2. Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan dalam melakukan desain dan implementasi berikutnya.

1. Optimalisasi algoritma rekonstruksi gambar

Pada tugas akhir ini, visualisasi menggunakan metode matematis menggunakan matriks berukuran besar sehingga mengakibatkan waktu komputasi cukup lama. Penulis menyarankan untuk mencoba metode lain dalam melakukan rekonstruksi gambar, misalnya *cross-correlation*.

2. *Interfacing* subsistem *smartphone* dan subsistem visualisasi

Pada tugas akhir ini, sebuah file yang berisi data hasil pengukuran perlu dipindahkan dari *smartphone* menuju komputer untuk dilakukan proses visualisasi. Penulis menyarankan untuk mencoba menambahkan jalur komunikasi antara *smartphone* dan komputer, misalnya menggunakan *flask* atau menggunakan server.

3. Integrasi subsistem *smartphone* dan subsistem visualisasi

Saran lain yang dapat penulis berikan yaitu mengimplementasikan subsistem visualisasi langsung sebagai bagian dari aplikasi pada *smartphone*.

REFERENSI

- [1] V. Bucur, *Urban forest acoustics*. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- [2] M. A. Price, K. Attenborough, and N. W. Heap, "Sound attenuation through trees: Measurements and models," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 84, no. 5, pp. 1836–1844, Nov. 1988, doi: 10.1121/1.397150.
- [3] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital image processing*. New York, NY: Pearson, 2018.
- [4] W. Lihai, W. Yang, and X. Huadong, "Effects of Tangential Angles on Stress Wave Propagation Velocities in Log's Cross Sections," *Scientia Silvae Sinicae*, vol. 47, no. 8, 2011.
- [5] G. Li, X. Wang, H. Feng, J. Wiedenbeck, and R. J. Ross, "Analysis of wave velocity patterns in black cherry trees and its effect on internal decay detection," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 104, pp. 32–39, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.compag.2014.03.008.
- [6] X. Du, S. Li, G. Li, H. Feng, and S. Chen, "Stress Wave Tomography of Wood Internal Defects using Ellipse-Based Spatial Interpolation and Velocity Compensation," *BioResources*, vol. 10, no. 3, pp. 3948–3962, May 2015, doi: 10.15376/biores.10.3.3948-3962.

DAFTAR LAMPIRAN

Dokumentasi Terawang (alat monitoring kondisi internal batang pohon):

<https://github.com/Akhmadi14/Terawang>