

NASKAH ORISINAL

Deteksi Dini Infeksi *Ganoderma boninense* pada Kelapa Sawit Berbasis Radar 24 GHz di Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) Marihat

Afan Ghafar Al Hadad¹ | Firdausa Sonna Anggara Resti¹ | Ahmad Rafiqan¹ | Rachmad Setiawan^{1,2} | Eko Agus Suprayitno² | Nada Fitriyatul Hikmah² | Josaphat Pramudijanto² | Rezki El Arif^{2,*}

¹Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

²Departemen Teknik Biomedik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

Korespondensi

*Rezki EL Arif, Departemen Teknik Biomedik, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Alamat e-mail: rezki.arif@its.ac.id

Alamat

Teknik Biomedik, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Jl. Teknik Elektro, Kampus ITS Sukolilo, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111.

Abstrak

Penyakit Basal Stem Rot (BSR) pada kelapa sawit akibat jamur *Ganoderma boninense* merupakan ancaman serius dan gejala visual sering muncul terlambat sehingga deteksi dini sangat dibutuhkan. Studi ini menyajikan rancangan dan penerapan skrining noninvasif berbasis radar gelombang kontinu 24 GHz pada dua titik batang yaitu bawah dan atas berjarak 1 m dengan jarak sensor ke permukaan 10 cm. Akuisisi dilakukan kontinu selama sekitar 8 jam per pohon pada 512 Hz per kanal dan dicacah per 1 menit. Sinyal kemudian diringkas menjadi *Mean Power Frequency* (MPF) untuk masing-masing titik. Uji di Kebun PPKS Marihat menunjukkan pola yang dapat dibaca secara operasional. Kategori sehat cenderung bernilai rendah dengan kecenderungan menurun, kategori infeksi ringan berada pada nilai menengah dengan penurunan lebih landai, sedangkan kategori infeksi berat bernilai tinggi dengan kecenderungan meningkat. Perbedaan dua titik membantu membaca distribusi air di batang sebagai indikasi awal gangguan xilem. Alur kerja dibuat sederhana sehingga memungkinkan kapasitas 3 pohon per hari dan pelaporan pada hari berikutnya disertai penandaan pohon. Pendekatan ini memberi dasar praktis untuk memprioritaskan pemantauan dan tindakan dini di tingkat blok serta berpotensi direplikasi sebagai bagian dari inspeksi rutin kebun.

Kata Kunci:

Deteksi Dini, *Ganoderma boninense*, Kandungan Air Batang, Kelapa Sawit, Radar 24 GHz.

1 | PENDAHULUAN

1.1 | Latar Belakang

Industri *minyak kelapa sawit* sangat penting bagi ekonomi Indonesia. Ekspor CPO pada Januari 2024 mencapai 2,802 juta ton, naik 14,63 persen dibanding Desember 2023, seiring kenaikan produksi 5,91 persen menjadi 4,232 juta ton^[1]. Konsumsi domestik meningkat dari 21,24 juta ton pada 2022 menjadi 23,13 juta ton pada 2023 dan didorong kebijakan *biodiesel* B35^[2]. Sektor ini menyerap sekitar 4,2 juta pekerja langsung dan mendukung 12 juta pekerjaan tidak langsung di sepanjang rantai pasok^[3]. Angka tersebut menegaskan bahwa kestabilan pasokan dan pasar sangat bergantung pada kesehatan tanaman di tingkat kebun. Karena itu, peningkatan kemampuan pemantauan kesehatan tanaman menjadi bagian penting dari strategi menjaga keberlanjutan produksi.

Produktivitas kebun terancam penyakit *Basal Stem Rot* (BSR) yang terutama disebabkan oleh *Ganoderma boninense*. Jamur ini merusak xilem sehingga aliran air dan hara terganggu^[4]. Kerugian hasil dapat mencapai 80 persen, meski pada infeksi di bawah 20 persen peluang pemulihan masih ada^[5]. Pada kasus berat, tanaman sulit membentuk daun baru, pertumbuhan terhambat, dan efisiensi fotosintesis menurun^[6]. Tanda visual seperti tubuh buah di batang dan daun menguning muncul terlambat, sering ketika lebih dari separuh batang sudah rusak^{[7][8]}. Karena itu deteksi dini sangat penting untuk menekan kerugian dan biaya pengelolaan^[9]. Artinya diperlukan alat pemantauan yang mampu menangkap perubahan sejak dini sebelum gejala terlihat jelas. Deteksi yang lebih cepat memberi ruang bagi tindakan pengendalian sebelum kerusakan berkembang lebih jauh.

Metode deteksi laboratorium berbasis protein dan DNA akurat, tetapi invasif dan memerlukan waktu proses yang tidak singkat^{[10][11]}. Pencitraan dan spektroskopi, termasuk hiperspektral, membantu melihat kondisi kanopi dan respons spektral, namun umumnya menangkap gejala di daun sehingga kurang peka pada infeksi awal di jaringan dalam yang bermula dari batang^{[12][13]}. Keterbatasan ini membuat pendekatan lapangan yang cepat dan minim gangguan menjadi kebutuhan mendasak bagi pengelola kebun. Dengan kata lain, dibutuhkan metode yang dapat diterapkan berulang secara praktis di lokasi tanpa prosedur invasif.

Teknologi *microwave sensing* dengan radar gelombang kontinu 24 GHz menawarkan alternatif yang cepat dan *noninvasif*. Radar peka terhadap perubahan sifat dielektrik yang terkait kadar air jaringan. Dengan membandingkan respons pada dua titik di batang bagian bawah dan bagian atas, perbedaan distribusi air dapat terpantau. Pola perbedaan ini berpotensi menjadi indikator dini infeksi *Ganoderma boninense* di lapangan^[14]. Pendekatan ini dapat diulang secara berkala sehingga kebun dapat melakukan *skrining* awal dan memutuskan tindakan lanjutan dengan lebih tepat waktu. Dengan rancangan yang ringkas, metode ini berpotensi terintegrasi ke rutinitas inspeksi kebun tanpa mengganggu operasional harian.

1.2 | Solusi Permasalahan atau Strategi Kegiatan

Kegiatan deteksi dini dirancang sebagai alur kerja yang praktis, terukur, dan dapat diulang di Kebun Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) Marihat, Kabupaten Simalungun, Provinsi Sumatera Utara. Kegiatan dimulai dari rapat singkat dengan pengelola kebun untuk menyepakati tujuan, ruang lingkup, daftar blok prioritas, dan jadwal kunjungan. Hasil rapat dituangkan ke rencana harian yang memuat daftar pohon sasaran per blok, penempatan operator, titik kumpul, serta protokol komunikasi dan keselamatan kerja. Kapasitas operasi harian ditetapkan berdasarkan ketersediaan perangkat, yaitu tiga set sensor aktif, dengan ketentuan satu set sensor digunakan untuk satu pohon per hari, sehingga total kemampuan pengukuran adalah tiga pohon per hari. Pemilihan pohon mempertimbangkan sebaran kategori kondisi sehat, ringan, dan berat agar data mewakili variasi di lapangan, serta memperhatikan kemudahan akses, keamanan kerja, dan minim gangguan pada kegiatan kebun. Identitas pohon dan informasi lokasi dicatat lengkap meliputi blok pohon, koordinat, umur tanam, dan catatan agronomis singkat, sehingga proses penelusuran ulang dan pemantauan lanjutan dapat dilakukan dengan mudah.

Prosedur pengukuran menggunakan dua modul radar 24 GHz per pohon yang dipasang pada batang bagian atas dan batang bagian bawah. Radar diorientasikan tegak lurus ke permukaan batang pada jarak tetap 10 cm, dengan posisi dipatok agar konsisten selama perekaman. Akuisisi data berlangsung kontinu dengan frekuensi sampling 512 Hz selama kurang lebih delapan jam per pohon. Data dicacah per satu menit sehingga setiap menit terbentuk satu segmen sinyal mentah untuk batang bawah dan satu segmen untuk batang atas. Selama sesi berlangsung dilakukan pemeriksaan cepat mutu sinyal pada interval yang disepakati untuk memastikan amplitudo dan kestabilan berada pada rentang kerja yang diharapkan. Jika ditemukan gangguan jelas seperti

getaran berlebih, kontak sensor kurang stabil, atau hujan deras yang memengaruhi pembacaan, segmen pada menit terkait diulang agar tidak terbawa ke tahapan analisis. Pencatatan metadata lapangan dilakukan konsisten untuk setiap sesi, mencakup waktu pengukuran, kondisi cuaca, nama operator, dan keterangan teknis pemasangan, sehingga seluruh catatan siap diaudit dan direplikasi pada kunjungan berikutnya.

Setelah perekaman harian selesai, seluruh data dari tiga pohon dikompilasi, dibersihkan dari segmen yang tidak memenuhi kriteria mutu, dan diolah menjadi ringkasan yang mudah dibaca. Ringkasan menampilkan pola respons batang bawah dan batang atas serta perbedaan karakteristik keduanya sebagai gambaran distribusi air di dalam jaringan. Hasil olahan ini dilaporkan kepada pihak kebun pada hari berikutnya dalam bentuk rekap per blok dan lembar interpretasi per pohon. Pohon kemudian ditandai di lapangan dan pada peta blok dengan keterangan ringkas mengenai contoh respons yang mewakili kondisi sehat, indikasi ringan, atau indikasi berat. Penandaan dan rekap tersebut menjadi dasar keputusan operasional seperti penjadwalan pemantauan berkala, inspeksi tambahan, atau tindakan pencegahan penyebaran pada area sekitar. Dengan alur kerja yang tertib dari perencanaan, akuisisi, pengolahan, hingga pelaporan dan penandaan, kegiatan dapat diintegrasikan ke rutinitas inspeksi kebun tanpa mengganggu operasi harian, sekaligus menyediakan dasar yang jelas untuk tindak lanjut yang cepat dan tepat.

1.3 | Target Luaran

Bagian ini merumuskan keluaran yang langsung dapat dipakai oleh pengelola kebun PPKS Marihat untuk menjalankan *skrining* dini secara tertib, mudah diaudit, dan berulang. Fokus utamanya adalah standardisasi prosedur, keterlacakan data dari lapangan hingga laporan, kemudahan interpretasi hasil bagi pengambil keputusan, serta penguatan kapasitas agar kegiatan dapat diintegrasikan ke operasi rutin. Target luaran yang dihasilkan adalah:

1. Terselenggaranya pengukuran harian pada tiga pohon per hari dengan tiga set sensor. Pada tiap pohon dipasang dua modul radar 24 GHz pada batang bagian atas dan batang bagian bawah dengan jarak vertikal 1 m *antarmodul*; masing-masing radar diorientasikan tegak lurus ke permukaan batang pada jarak 10 cm. Akuisisi data berlangsung kontinu 512 Hz selama \pm 8 jam per pohon, dengan segmentasi per 1 menit dan pemeriksaan mutu sinyal berkala.
2. Tersedianya SOP pengukuran dan formulir lapangan yang seragam (blok dan koordinat pohon, waktu, cuaca, catatan pemasangan, dan *log* kendala) sehingga proses mudah direplikasi dan ditelusuri kembali.
3. Terbentuknya paket data dan *metadata* yang rapi untuk setiap pohon, termasuk arsip segmen mentah per menit, serta struktur penyimpanan yang memudahkan audit dan analisis lanjut.
4. Tersusunnya ringkasan analisis cepat per pohon yang menampilkan pola respons batang atas dan batang bawah beserta indeks perbedaannya, dilengkapi contoh pola referensi untuk interpretasi sehat, ringan, dan berat agar pembacaan di lapangan konsisten.
5. Pelaporan ke pihak kebun pada hari berikutnya berupa lembar hasil per pohon dan rekap per blok yang memuat rekomendasi tindak lanjut yang praktis, seperti pemantauan berkala, inspeksi lanjutan, atau langkah pencegahan penyebaran.
6. Penandaan fisik pohon di lapangan serta pembaruan peta blok, sehingga objek prioritas mudah ditemukan pada kunjungan berikutnya dan progresnya dapat dilacak.
7. Materi penguatan kapasitas operator berupa lembar langkah kerja dan kartu kontrol untuk memastikan pelaksanaan yang konsisten dan kemandirian operasional di tingkat kebun.

2 | TINJAUAN PUSTAKA

2.1 | Patogenesis *Ganoderma boninense* dan Disfungsi Xilem

Ganoderma boninense adalah patogen utama *Basal Stem Root* (BSR) pada kelapa sawit dan menjadi kendala besar produktivitas kebun. Infeksi biasanya bermula dari kontak akar, lalu patogen masuk ke jaringan dan merusak xilem sehingga aliran air serta nutrisi menuju tajuk terganggu. Pada tahap berat, tanaman memperlihatkan layu, pelepah menggantung, pembusukan pangkal, dan penurunan hasil yang sangat tajam hingga dilaporkan dapat mencapai sekitar delapan puluh persen pada areal terdampak

parah. Uraian ini menegaskan bahwa gangguan fungsi xilem adalah poros gejala fisiologis sekaligus penyebab menurunnya performa tanaman di lapangan^{[15][16]}.

Perkembangan penyakit mengikuti siklus yang berulang: dari sumber inokulum di akar atau jaringan sakit, pelepasan spora, perkecambahan menjadi miselium, kemudian pembentukan badan buah yang kembali menghasilkan basidiospora untuk menyebar ke inang lain. Pada fase-fase ini, enzim perusak dinding sel memperlancar penetrasi miselium ke jaringan; akibatnya, jalur air di xilem makin tersumbat dan ketersediaan air jaringan kian menurun. Siklus yang kontinyu inilah yang menjelaskan mengapa kurva kerusakan dapat berkembang progresif di tingkat blok jika tidak ada strategi deteksi dan intervensi dini^[17].

Untuk kepentingan diagnosis lapangan dan keputusan operasional, tingkatan keparahan kerap dipetakan ke dalam kategori visual mulai dari pohon sehat hingga kasus berat yang ditandai perubahan kanopi, pucuk yang belum membuka, hingga munculnya tubuh buah. Skor semacam G0–G3 memberi keseragaman bahasa teknis antara pengamat dan pengambil keputusan, serta berkorelasi dengan perubahan internal tanaman yang dipicu gangguan xilem. Dengan demikian, pemetaan gejala visual ini bukan hanya dokumentasi, tetapi juga indikator praktis untuk prioritas tindak lanjut di blok terdampak^{[15][18]}.

2.2 | Sifat Dielektrik Air dan Implikasi Gelombang Mikro

Pada level material, ketika suatu dielektrik berada dalam medan listrik, terjadi polarisasi pergeseran muatan yang membentuk momen dipol efektif. Kemampuan medium menahan atau merespons medan ini dinyatakan sebagai permitivitas (ϵ). Semakin tinggi permitivitas, semakin besar energi medan yang dapat “disimpan” oleh medium dan semakin kuat pula respons elektromagnetiknya. Kerangka fisis inilah yang menjadi dasar mengapa jaringan tanaman bereaksi khas ketika ditembak gelombang mikro^[5].

Air memiliki momen dipol permanen sehingga responsnya terhadap medan elektromagnetik sangat kuat; secara khas, konstanta dielektrik air cair sekitar 80 pada 20 °C, jauh melampaui udara yang ~ 1 . Perbedaan ekstrem ini menghasilkan kontras yang tajam antara domain “basah” dan “lebih kering” pada jaringan. Dengan kata lain, lapisan jaringan yang kaya air akan memberikan pantulan atau interaksi gelombang mikro yang jauh lebih besar dibandingkan media dengan kandungan air rendah, sebuah fenomena yang menjadi kunci strategi penginderaan *non-destruktif*^[5].

Dalam tumbuhan, air hadir sebagai air bebas yang bergerak di xilem (langsung terkait evapotranspirasi) dan air terikat yang melekat pada struktur sel. Air bebas lebih representatif terhadap status fisiologis tanaman dari waktu ke waktu. Karena konstanta dielektrik air sangat tinggi, perubahan kadar air bebas memodifikasi respons elektromagnetik jaringan; akibatnya radar dapat “membaca” dinamika kadar air secara *real-time* dan *noninvasif*. Prinsip ini memungkinkan pemantauan kondisi hidrasi batang sebagai proksi gangguan fungsi xilem pada tanaman terinfeksi^[5].

2.3 | Prinsip Radar untuk Pemantauan Kadar Air

Prinsip deteksi radar pada tanaman bertumpu pada interaksi gelombang mikro dengan jaringan yang mengandung air. Air dalam batang menyerap dan/atau memantulkan sinyal pada frekuensi tertentu; karena itu, variasi intensitas pantulan dapat dipakai sebagai indikator perubahan kadar air. Secara empiris, respons ini mengikuti dinamika fisiologi harian: menguat saat fotosintesis aktif, berubah pada transisi malam ke pagi seiring laju evapotranspirasi, dan pulih setelah penyiraman pola yang menegaskan keterkaitan langsung antara aliran air xilem dan reflektansi gelombang mikro^{[5][19]}.

Dari sisi arsitektur, sistem radar mencakup rantai pemancar–penerima: pemancar RF, antena, *T/R switch* dan pelindung penerima, penguat derau rendah, pencampur dengan osilator lokal untuk menghasilkan sinyal IF yang mudah diproses, penguat IF, detektor, konversi A/D, dan pemroses sinyal. Radar *Continuous Wave (CW)* memancarkan sinyal secara kontinu sehingga skema perangkat sederhana, ekonomis, dan cocok untuk pemantauan perubahan kecil di lapangan ini yang membuatnya relevan untuk aplikasi *in situ* pada batang tanaman^[5].

Aplikasi dalam konteks sawit menekankan pemasangan radar di dua titik pada satu batang bagian bawah dan bagian atas untuk menangkap perbedaan distribusi air sebagai indikator awal gangguan xilem. Kerangka ini sejalan dengan tujuan *skrining* lapangan, yakni membaca ketidaksimetrian hidrasi di sepanjang batang sebagai sinyal dini, sebelum gejala visual muncul atau ketika gejala masih samar. Dengan pengukuran berulang pada dua titik tersebut, informasi kadar air dapat diubah menjadi indikator operasional bagi keputusan cepat di blok prioritas^{[5][19]}.

Perkembangan penyakit mengikuti siklus yang berulang, dari sumber inokulum di akar atau jaringan sakit, pelepasan spora, perkecambahan menjadi miselium, kemudian pembentukan badan buah yang kembali menghasilkan basidiospora untuk menyebar ke inang lain. Pada fase-fase ini, enzim perusak dinding sel memperlancar penetrasi miselium ke jaringan, akibatnya jalur air di xilem makin tersumbat dan ketersediaan air jaringan kian menurun. Siklus yang kontinu inilah yang menjelaskan mengapa kurva kerusakan dapat berkembang progresif di tingkat blok jika tidak ada strategi deteksi dan intervensi dini^[15].

3 | METODE KEGIATAN

Bagian ini menetapkan cara kerja skrining dini infeksi *Ganoderma boninense* di kebun secara tertib, aman, dan terdokumentasi. Secara ringkas, alur kegiatan dirangkum dalam skema umum pada Gambar 1 dan bagan alir operasional pada Gambar 2 yang menampilkan tahapan mulai dari koordinasi kunjungan, penyiapan perangkat dan tim, penandaan pohon, pemasangan sensor, akuisisi data kontinu, pemeriksaan mutu serta pencatatan, pengolahan awal data, hingga pelaporan dan penandaan pohon. Ruang lingkup metode mencakup dua pokok bahasan. Pertama, prosedur operasional lapangan yang mengatur alur mulai dari koordinasi kunjungan, penyiapan perangkat dan penandaan pohon, akuisisi data kontinu pada dua titik batang, pemeriksaan mutu di tempat, pengolahan awal hingga terbentuk respons per titik, serta pelaporan dan penandaan. Kedua, rancangan sistem instrumentasi radar yang menjelaskan konfigurasi sensor, tata letak dan mekanik pemasangan, alur sinyal dan pencatatan data, serta ketentuan keselamatan dan penjaminan mutu. Rancangan disusun agar mudah direplikasi, tidak invasif, minim gangguan terhadap pekerjaan kebun, dan menghasilkan keluaran yang konsisten serta siap dipakai untuk keputusan cepat di tingkat blok.



Gambar 1 Skema umum kegiatan skrining dini infeksi *Ganoderma boninense* di Kebun PPKS Marihat.

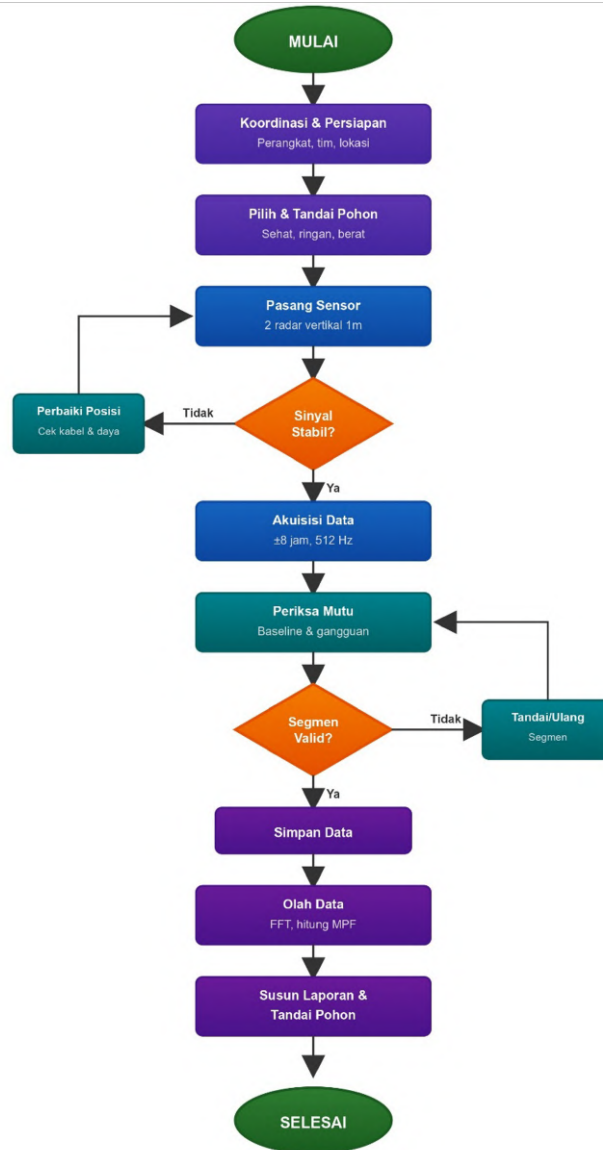
3.1 | Prosedur Operasional Lapangan

1. Koordinasi awal dan perencanaan kunjungan

Kegiatan diawali rapat singkat dengan pengelola kebun untuk menyepakati tujuan, ruang lingkup, daftar blok prioritas, dan jadwal kunjungan. Hasil rapat dituangkan dalam rencana kerja harian yang memuat jumlah *set sensor* aktif (tiga *set*), rute mobilisasi per blok, daftar tiga pohon sasaran per hari, titik kumpul, serta prosedur keselamatan kerja. Identitas pohon dicatat sejak awal (ID, blok, koordinat, umur tanam, catatan agronomis), sehingga proses penelusuran ulang dan pemantauan lanjutan mudah dilakukan tanpa mengganggu operasi kebun.

2. Penyiapan peralatan dan penandaan pohon

Setiap *set sensor* terdiri dari dua modul radar 24 GHz untuk satu pohon: satu dipasang pada batang bagian bawah dan satu pada batang bagian atas dengan jarak vertikal 1 m *antarmodul*. Setiap radar diorientasikan tegak lurus ke permukaan batang pada jarak tetap 10 cm; posisi dipatok atau ditandai agar konsisten selama perekaman. Perlengkapan penyangga, catu daya, dan kabel ditata aman dari lalu lintas pekerja dan alat kebun. Sebelum perekaman, operator melakukan pratinjau sinyal singkat untuk memastikan amplitudo berada pada rentang kerja yang diharapkan.



Gambar 2 Flowchart tahapan operasional pengukuran kandungan air batang berbasis radar 24 GHz.

3. Akuisisi data kontinu dan pemeriksaan mutu di lapangan

Perekaman berlangsung kontinu dengan frekuensi *sampling* 512 Hz per kanal selama kurang lebih delapan jam per pohon. Data dicacah per satu menit sehingga setiap menit terbentuk dua segmen sinyal mentah, satu untuk batang bawah dan satu untuk batang atas. Selama sesi dilakukan pemeriksaan mutu berkala untuk memantau kestabilan *baseline*, rasio sinyal terhadap derau, dan potensi gangguan fisik. Segmen yang bermasalah diulang saat itu juga agar tidak terbawa ke tahap pengolahan. Seluruh kejadian lapangan dicatat dalam *log* kualitas.

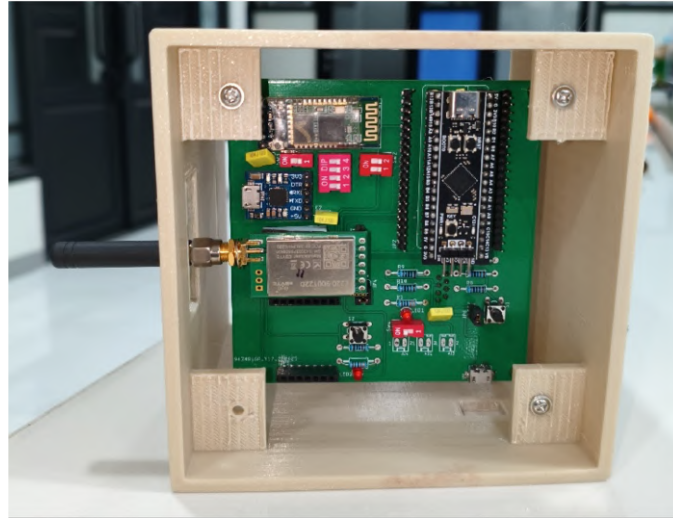
4. Pengolahan data dan pembentukan respons per titik

Setelah perekaman harian selesai, data diunduh, dicadangkan, lalu dibersihkan dari segmen yang tidak memenuhi kriteria. Sinyal mentah diubah ke domain frekuensi menggunakan transformasi cepat Fourier untuk membentuk kurva *power magnitude* dalam desibel pada masing-masing titik. Jika diperlukan, dibuat ringkasan sederhana per titik seperti *Mean Power Frequency* untuk memudahkan pembacaan. Pengolahan berhenti pada respons batang bawah dan respons batang atas. Tidak dilakukan penghitungan selisih antara dua titik dan tidak dilakukan ekstraksi fitur lanjutan.

5. Pelaporan keesokan hari dan penandaan pohon

Hasil pengolahan diringkas menjadi lembar per pohon dan rekap per blok yang disampaikan pada hari berikutnya kepada pengelola kebun. Lembar per pohon menampilkan respons batang bawah dan respons batang atas beserta ringkasannya sehingga pola mudah dibandingkan. Pohon diberi penandaan fisik di lapangan dan diperbarui pada peta blok, dengan keterangan contoh pola yang mewakili sehat, ringan, atau berat agar pembacaan di lapangan seragam. Rekomendasi tindak lanjut praktis dilampirkan, seperti pemantauan berkala untuk indikasi ringan dan inspeksi lanjutan untuk indikasi berat.

3.2 | Rancangan Sistem Instrumentasi Radar



Gambar 3 Instrumentasi Radar Deteksi Kandungan Air.

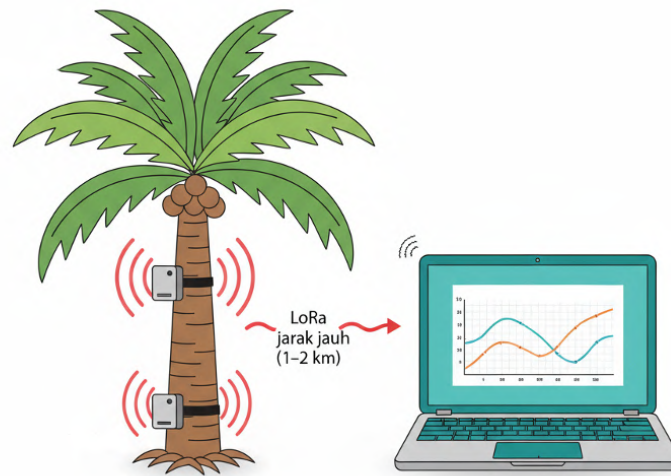
Berdasarkan rangkaian instrumentasi terintegrasi pada Gambar 3, sistem terdiri dari modul radar K-MC1 24 GHz sebagai sensor, mikrokontroler STM32F411CEU6 *Blackpill* sebagai pemroses utama, jalur komunikasi *master–slave* berbasis HC-05, *link* jarak jauh LoRa Ebyte E220, serta antarmuka USB–UART CP2102 yang dipakai hanya untuk uji serial dan konfigurasi. *Blackpill* menyediakan inti Cortex-M4F 100 MHz, ADC 12-bit, 36 pin GPIO, dan *flash* 512 kB untuk membaca dua kanal analog secara serempak, memberi stempel waktu pada setiap segmen 1 menit, menyisipkan blok pohon serta penanda titik atas atau bawah, lalu mengemasnya dalam paket data ringkas. Alur sinyal berlangsung bertahap dari radar ke ADC, dilanjutkan ke mikrokontroler untuk penyesuaian waktu dan pengemasan, diteruskan ke modul LoRa, dan berakhir di komputer penerima.

Merujuk Gambar 4, dua radar dipasang pada satu batang di bagian bawah dan bagian atas dengan jarak vertikal 1 m. Masing-masing radar diatur tegak lurus permukaan batang pada jarak 10 cm agar kondisi ukur konsisten dan pantulan stabil. Perekaman berjalan kontinu ± 8 jam per pohon pada 512 Hz per kanal dan disegmentasi per 1 menit sehingga setiap menit terbentuk sepasang berkas untuk titik bawah dan titik atas. Komunikasi *master–slave* menggunakan HC-05 melalui UART TTL sehingga modul di titik atas dapat mengirim data ke *master* pada titik bawah dalam radius kerja sekitar 1 m di lingkungan kebun yang relatif terbuka. Setelah paket dari kedua kanal diterima dan diselaraskan waktunya oleh mikrokontroler, data dikirim ke komputer menggunakan LoRa E220 pada pita 850–930 MHz dengan daya pancar 22 dBm dan jangkauan 1–2 km tanpa halangan. Dengan skema ini komputer dapat ditempatkan di lokasi yang lebih aman dan kering, sementara akuisisi tetap berlangsung di area pengukuran.

4 | HASIL DAN DISKUSI

4.1 | Koordinasi dan Perencanaan Kunjungan

Rapat koordinasi dilaksanakan di kantor kebun untuk menyelaraskan tujuan kegiatan, ruang lingkup, pembagian peran, penetapan blok prioritas, serta target pengukuran harian sebanyak 3 pohon dengan 3 *set sensor* aktif sehingga alur kerja lapangan tertib, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Kesepakatan mencakup penggunaan dua radar per pohon pada batang bawah



Gambar 4 Skema Pengambilan Data Kandungan Air.



Gambar 5 Diskusi koordinasi di kantor kebun PPKS Marihat.

dan batang atas dengan jarak vertikal 1 m dan jarak sensor ke permukaan batang 10 cm agar geometri pengukuran konsisten. Susunan ini memastikan pekerjaan kebun tetap berjalan dan tim pengukuran tidak mengganggu aktivitas rutin di lapangan. Pelaksanaan kegiatan lapang kemudian dijadwalkan dalam dua kali kunjungan, yaitu kunjungan pertama selama empat hari untuk penyiapan rinci, pengujian alur kerja, dan pemilihan pohon rujukan, serta kunjungan kedua selama empat belas hari untuk pelaksanaan pengukuran utama pada blok-blok prioritas sesuai kapasitas harian yang disepakati.

Rencana kerja harian disusun untuk setiap kunjungan yang memuat daftar pohon sasaran per blok, waktu mulai dan selesai, titik kumpul, rute mobilisasi, serta daftar pemeriksaan cepat sebelum pengukuran. Identitas pohon dicatat lengkap dengan kode blok, nomor pohon, dan penanda titik atas atau bawah. Penempatan komputer penerima dipastikan pada lokasi yang teduh dan kering, sementara area pemasangan diatur aman dari lalu lintas pekerja dan alat agar kegiatan tidak mengganggu operasi kebun. Mekanisme pelaporan dibuat ringkas dengan memberitahukan hasil per pohon pada hari berikutnya dan melakukan penandaan pohon di lapangan untuk memudahkan pemantauan pada kunjungan selanjutnya. Dari rangkaian dua kali kunjungan ke mitra kebun ini diperoleh beberapa hasil langsung, antara lain tersusunnya jadwal *skrining* yang operasional bagi kebun, penandaan fisik pohon rujukan pada blok-blok prioritas, serta umpan balik kategori sehat, indikasi ringan, dan indikasi berat yang

dapat dipakai sebagai dasar pemantauan lanjutan. Pada hari pertama juga disepakati orientasi singkat ke area pembibitan guna memperoleh konteks gejala awal pada bibit yang diinokulasi jamur sehingga interpretasi hasil pengukuran di kebun memiliki rujukan visual yang jelas.

4.2 | Observasi Area Pembibitan Kelapa Sawit PPKS Marihat



Gambar 6 Kunjungan ke Area Pembibitan PPKS Marihat.

Sebagai orientasi awal pelaksanaan, kunjungan ke kebun pembibitan dilakukan pada hari pertama sebelum pengukuran di kebun seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, untuk mengenali rentang gejala yang mungkin muncul pada tanaman yang terpapar jamur. Tujuan utamanya adalah memperoleh rujukan visual mengenai kondisi bibit yang sehat, bibit yang menunjukkan gejala awal, dan bibit yang telah mengalami penurunan kondisi agar interpretasi hasil pengukuran di kebun menjadi lebih terarah.

Di area pembibitan tersedia bibit yang diinokulasi jamur sehingga variasi respons fisiologis dapat diamati secara langsung. Pengamatan menunjukkan adanya bibit yang tampak layu jelas, ada yang tetap tidak layu, serta ada yang berada pada kondisi antara yang tampak setengah mati. Perbedaan ini menegaskan bahwa gangguan aliran air dan ketahanan tiap bibit tidak seragam sehingga interpretasi gejala perlu memperhatikan spektrum respons, bukan hanya tanda visual tunggal.

4.3 | Konfigurasi Pengukuran Instrumentasi Radar untuk Deteksi Kandungan Air

Sebelum pengukuran dimulai dilakukan pengecekan dan pemasangan alat yang mencakup verifikasi perangkat, penandaan pohon, pembersihan area tempel sensor, pemetaan kanal ADC1 untuk titik bawah dan ADC2 untuk titik atas, penyesuaian waktu pada mikrokontroler, uji koneksi *master-slave* melalui HC-05, serta uji kirim data ke komputer menggunakan LoRa E220, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Setelah pengecekan alat dilakukan pencatatan identitas pohon, blok, waktu mulai, kondisi cuaca, serta membuat catatan singkat terkait kendala lapangan agar proses audit mutu dan penelusuran kembali dapat dilakukan dengan cepat.

Penempatan dua radar dilakukan pada satu batang dengan jarak vertikal 1 m antara titik bawah dan titik atas, sedangkan jarak masing-masing radar ke permukaan batang dijaga 10 cm dengan orientasi tegak lurus untuk menjaga konsistensi geometri ukur dan kestabilan pantulan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Kabel dan pengikat dirapikan agar aman dari lalu lintas pekerja dan pergerakan alat di kebun, lalu posisi pemasangan diberi penanda agar sesi selanjutnya dapat diulang dengan konfigurasi yang sama. Selama sesi perekaman berlangsung kontinu ± 8 jam per pohon pada 512 Hz per kanal dengan segmentasi per 1 menit. Pemeriksaan mutu dilakukan berkala dan segmen yang bermasalah diulang pada menit terkait. Alur komunikasi lapangan



Gambar 7 Pengecekan dan Pemasangan Alat.



Gambar 8 Pemasangan Instrumentasi Radar Pada Pohon Sawit.

menggunakan HC-05 untuk pengiriman dari unit atas ke unit bawah, kemudian data yang telah diselaraskan oleh mikrokontroler dikirim ke komputer menggunakan LoRa E220. Keluaran yang dihasilkan berupa respons titik bawah dan respons titik atas yang siap diolah pada tahap berikutnya.

4.4 | Hasil Akuisisi Data Grafik Kandungan Air



Gambar 9 (a) Grafik Kandungan Air Pohon Sehat (b) Grafik Kandungan Air Pohon Infeksi Ringan (c) Grafik Kandungan Air Pohon Infeksi Berat.

Sebagai keluaran akuisisi, grafik kandungan air dibentuk dari nilai *Mean Power Frequency* (MPF) per 1 menit untuk titik batang bawah dan titik batang atas selama ± 8 jam per pohon, lalu ditampilkan untuk tiga kategori yaitu sehat, infeksi ringan, dan infeksi berat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9 (a), Gambar 9 (b), dan Gambar 9 (c). Pada masing-masing kategori, kurva batang bawah dan batang atas umumnya bergerak searah meskipun besarnya dapat berbeda sehingga pembacaan difokuskan pada dua hal, yaitu tingkat MPF relatif antar kategori dan arah kecenderungan grafik sepanjang durasi pengamatan.

Secara tingkat nilai, MPF pada kategori sehat cenderung paling rendah, pada kategori infeksi ringan berada di kisaran menengah, dan pada kategori infeksi berat berada pada nilai tinggi. Pola waktu menunjukkan tren menurun pada pohon sehat, tren menurun yang lebih landai pada infeksi ringan, dan tren meningkat pada infeksi berat. Pola ini konsisten dengan dugaan perubahan distribusi air pada jaringan, di mana gangguan yang lebih berat biasanya berkorelasi dengan kenaikan MPF, sedangkan tanaman sehat menunjukkan penurunan bertahap mengikuti dinamika harian.

Untuk membantu interpretasi operasional di lapangan, nilai MPF yang rendah pada kategori sehat dipandang selaras dengan kondisi kadar air yang masih normal, struktur sel dan xilem yang relatif utuh, serta pantulan sinyal yang cenderung stabil. Pada

kategori infeksi ringan, MPF yang berada di tingkat menengah dapat mengindikasikan mulai adanya pengaruh jamur pada sebagian jaringan dan kemungkinan peningkatan kelembapan lokal di area terdampak. Pada kategori infeksi berat, MPF yang tinggi mengisyaratkan gangguan xilem dan distribusi air yang lebih terganggu sehingga perubahan pada kandungan frekuensi pantulan terlihat lebih besar. Seluruh indikasi tersebut digunakan sebagai penyaring awal dan tetap dikonfirmasi dengan observasi lapangan serta pemantauan ulang agar keputusan berikutnya lebih meyakinkan, sebagaimana dicontohkan pada Gambar 9 (a), Gambar 9 (b), dan Gambar 9 (c).

5 | KESIMPULAN DAN SARAN

Pengukuran dengan instrumentasi radar 24 GHz di dua titik batang menghasilkan grafik kandungan air berbasis MPF yang dapat dibaca secara operasional. Polanya konsisten dengan tiga kategori lapangan. Pohon sehat cenderung bernilai rendah dan grafiknya menurun. Infeksi ringan berada di nilai menengah dan penurunannya lebih landai. Infeksi berat bernilai tinggi dan grafiknya meningkat. Alur kerja dari koordinasi, pemasangan, perekaman selama sekitar 8 jam, hingga pelaporan dan penandaan berjalan rapi sehingga kebutuhan deteksi dini yang noninvasif dan portabel dapat terpenuhi.

Ke depan disarankan cakupan pengukuran diperluas ke lebih banyak pohon dan beberapa hari agar hasil lebih kuat. Batas nilai MPF untuk tiap kategori sebaiknya disesuaikan dengan umur tanaman dan kondisi lokasi kebun, dengan acuan pemeriksaan lapangan oleh pihak kebun. Proses analisis sebaiknya dibuat otomatis dari perekaman hingga ringkasan per pohon agar umpan balik bisa diberikan lebih cepat. Perlu evaluasi pengaruh cuaca, posisi sensor, dan lingkungan sekitar terhadap kestabilan sinyal. Kualitas sambungan HC-05 dan LoRa juga perlu dicek berkala. Dengan langkah ini, metode dapat diterapkan sebagai skrining rutin yang mudah direplikasi dan berkelanjutan.

6 | UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan pendanaan dari Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit melalui Program Grant Riset Sawit Tahun 2023, Nomor PENG-3/DPKS.4/2023. Dukungan ini memungkinkan pelaksanaan pengambilan data, pengolahan data, dan penyusunan laporan secara menyeluruh.

Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Pusat Penelitian Kelapa Sawit Marihat di Simalungun atas izin lokasi, pendampingan lapangan, serta dukungan teknis selama kegiatan berlangsung. Apresiasi diberikan kepada seluruh pihak yang membantu koordinasi, penyediaan data pendukung, dan fasilitasi logistik hingga penyusunan laporan ini.

Referensi

1. Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), Ekspor Tertinggi ke Uni Eropa! Naik 14,63 Persen pada Januari 2024; 2024. <https://gapki.id/news/2024/04/01/ekspor-tertinggi-ke-uni-eropa-naik-1463-persen-pada-januari-2024/>, accessed: 2025-10-02.
2. Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), Kinerja Industri Minyak Sawit Tahun 2023 & Prospek Tahun 2024; 2024. <https://gapki.id/news/2024/02/27/kinerja-industri-minyak-sawit-tahun-2023-prospek-tahun-2024/>, accessed: 2025-10-02.
3. Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI), Palm Oil Has Irreplaceable Role in Indonesian Economy; 2021. <https://gapki.id/en/news/2021/09/22/palm-oil-has-irreplaceable-role-in-indonesian-economy/>, accessed: 2025-10-02.
4. Sanderson FR. An insight into spore dispersal of *Ganoderma boninense* on oil palm. *Mycopathologia* 2005;159(1):139–141.
5. Quemada Mayoral C, García González C, Iriarte Galarregui JC, Marín D, Gastón D, Miranda C, et al. Water Content Continuous Monitoring of Grapevine Xylem Tissue Using a Portable Low-Power Cost-Effective FMCW Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2019;57(8):6161–6171.

6. Paterson RRM. *Ganoderma boninense* Disease of Oil Palm to Significantly Reduce Production After 2050 in Sumatra if Projected Climate Change Occurs. *Microorganisms* 2019;7(1):24.
7. Kandan A, Bhaskaran R, Samiyappan R. *Ganoderma*: a basal stem rot disease of coconut palm in South Asia and Asia Pacific regions. *Archives of Phytopathology and Plant Protection* 2010;43(15):1445–1449.
8. Naher L, Siddiquee S, Yusuf UK, Mondal MMA. Issues of *Ganoderma* spp. and basal stem rot disease management in oil palm. *American Journal of Agricultural Science* 2015;2(3):103–107.
9. Liaghat S, Ehsani R, Mansor S, Shafri HZM, Meon S, Sankaran S, et al. Early detection of basal stem rot disease (*Ganoderma*) in oil palms based on hyperspectral reflectance data using pattern recognition algorithms. *International Journal of Remote Sensing* 2014;35(10):3427–3439.
10. Idris AS, Rafidah AR. Polyclonal antibody for detection of *Ganoderma*. *MPOB Information Series*; 2008.
11. Idris AS, Yamaoka M, Hayakawa S, Basri MW, Noorhasimah I, Ariffin D. PCR technique for detection of *Ganoderma*. *MPOB Information Series*; 2003.
12. Izzuddin MA, Nisfariza MN, Ezzati B, Idris AS, Steven MD, Boyd D. Analysis of airborne hyperspectral image using vegetation indices, red edge position and continuum removal for detection of *Ganoderma* disease in oil palm. *Journal of Oil Palm Research* 2018;30(3):416–428.
13. Ahmadi P, Muharam FM, Ahmad K, Mansor S, Abu Seman I. Early Detection of *Ganoderma* Basal Stem Rot of Oil Palms Using Artificial Neural Network Spectral Analysis. *Plant Disease* 2017;101(6):1009–1016.
14. Box GEP, Hunter WG, Hunter JS. *Statistics for Experimenters: An Introduction to Design, Data Analysis, and Model Building*. New York: John Wiley & Sons; 1978.
15. Tan MSMH, Jamlos MF, Omar AF, Dzaharudin F, Chalermwisutkul S, Akkaraekthalin P. *Ganoderma boninense* Disease Detection by Near-Infrared Spectroscopy Classification: A Review. *Sensors* 2021;21(9):3052.
16. Karunarathna SC, Patabendige NM, Hapuarachchi KK. An In-Depth Study of Phytopathogenic *Ganoderma*: Pathogenicity, Advanced Detection Techniques, Control Strategies, and Sustainable Management. *Journal of Fungi* 2024;10(6):414.
17. Richards MA, Scheer JA, Holm WA. *Principles of Modern Radar*. Raleigh: SciTech Publishing; 2010.
18. Khaled AY, Aziz SA, Bejo SK, Nawawi NM, Abu Seman I. Spectral features selection and classification of oil palm leaves infected by basal stem rot (BSR) disease using dielectric spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture* 2017;144:297–309.
19. Santos LC, dos Santos FN, Morais R. Potential Non-Invasive Technique for Assessing Plant Water Content Using a Radar System. *Agronomy* 2021;11(2):279.

Cara mengutip artikel ini: Al Hadad, A. G., Resta, F. S. A., Rafiqan, A., Setiawan, R., Suprayitno, E. A., Hikmah, N. F., Pramudijanto, J., El Arif, R., (2026), Deteksi Dini Infeksi *Ganoderma boninense* pada Kelapa Sawit Berbasis Radar 24 GHz di Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) Marihat, *Sewagati*, 10(1):221–233, <https://doi.org/10.12962/j26139960.v10i1.9574>.