

SoilGuard: Sistem Deteksi Dini Penyakit Busuk Pangkal Batang Berbasis IoT dan Anomali Kelembaban Tanah pada Perkebunan Kelapa Sawit

**Ahmad Hambali^{1,*}), M. Hafiz Mailano¹), Masitoh Intan Baiduri Panjaitan¹),
Muhammad Zhafir¹)**

¹) Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi

*) Corresponding author: ahmadhambali952@gmail.com

Abstrak

Penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) yang disebabkan *Ganoderma boninense* merupakan ancaman paling destruktif pada perkebunan kelapa sawit Asia Tenggara, berpotensi memusnahkan hingga 80% populasi pohon pada generasi kedua dan ketiga. Deteksi konvensional berbasis inspeksi visual hanya efektif pada stadium lanjut ketika peluang pengendalian sudah sangat terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan pendekatan deteksi dini dua fase yang tervalidasi secara ilmiah dan dapat diimplementasikan langsung di lapangan. Fase pertama memvalidasi kelembaban tanah sebagai biomarker non-destruktif menggunakan sensor FDR pada kedalaman 30 cm dan 60 cm di area piringan pohon terhadap tiga kategori tanaman: sehat, terinfeksi dini (asimtomatik), dan terinfeksi lanjut. Konfirmasi keberadaan patogen dilakukan melalui uji molekuler PCR. Fase kedua mengembangkan SoilGuard, sistem IoT berbasis ESP32 yang dilengkapi aplikasi mobile berkemampuan offline dengan klasifikasi risiko otomatis dan dashboard monitoring terpusat per blok perkebunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerusakan fungsi akar akibat infeksi dini menyebabkan anomali hidrologi yang terukur pada tanah di sekitar pohon. Kandungan air volumetrik pada tanaman terinfeksi dini bertahan di atas 35% pasca-hujan, berbeda signifikan dengan tanaman sehat yang turun ke kisaran 24–28% akibat penyerapan akar yang aktif. Pendekatan berbasis anomali kelembaban ini mampu mengidentifikasi infeksi sebelum gejala visual muncul dengan akurasi 82%. Sistem SoilGuard mampu memberikan peringatan dini dalam kurang dari dua menit tanpa bergantung pada konektivitas internet di lapangan. Pendekatan terpadu ini merepresentasikan transformasi pengelolaan kesehatan tanaman dari reaktif-visual menuju preventif-berbasis data, sejalan dengan visi perkebunan kelapa sawit Indonesia yang berkelanjutan, unggul, dan adaptif terhadap ancaman biotik jangka panjang.

Kata kunci: *Ganoderma boninense*; Deteksi dini; Biomarker kelembaban tanah; Sensor FDR; Sistem IoT

Abstract

Basal Stem Rot (BSR) caused by Ganoderma boninense is the most destructive threat to oil palm plantations in Southeast Asia, with the potential to eliminate up to 80% of the tree population in the second and third generations. Conventional visual inspection-based detection is only effective at advanced stages when control opportunities are severely limited. This study aimed to develop a scientifically validated two-phase early detection approach for direct field implementation. The first phase validated soil moisture as a non-destructive biomarker using FDR sensors at depths of 30 cm and 60 cm in the palm circle area across three plant categories: healthy, early (asymptomatic) infection, and advanced infection. Pathogen confirmation was conducted through PCR molecular testing. The second phase developed SoilGuard, an ESP32-based IoT system with an offline mobile application featuring automatic risk classification and a centralized monitoring dashboard per plantation block. Results showed that early infection-induced root dysfunction caused measurable hydrological anomalies in the soil surrounding infected trees. Volumetric water content in early-infected plants remained above 35% after rainfall, significantly different from healthy plants, which declined to 24–28% due to active root absorption. This anomaly-based approach achieved a detection accuracy of 82% before visual symptoms appeared. SoilGuard delivered early warnings within two minutes without relying on internet connectivity in the field. This integrated approach represents a transformation in plant health management—from reactive-visual to data-driven

preventive strategies—aligned with the vision of Indonesian oil palm plantations that are sustainable, competitive, and adaptive to long-term biotic threats.

Keywords: *Ganoderma boninense; Early detection; Soil moisture biomarker; FDR sensor; IoT system*

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, yang menjadi tulang punggung perekonomian banyak wilayah penghasil. Produktivitas kebun kelapa sawit sangat bergantung pada kesehatan tanaman selama siklus hidupnya yang panjang, sehingga gangguan penyakit dapat berdampak besar terhadap keberlanjutan usaha perkebunan.

Salah satu ancaman biotik paling serius bagi tanaman kelapa sawit adalah penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) atau Basal Stem Rot (BSR) yang disebabkan oleh jamur patogen *Ganoderma boninense*. Penyakit ini dilaporkan dapat menggagalkan hingga sekitar separuh populasi tanaman pada suatu blok kebun sebelum masa replanting, dan menjadi ancaman yang semakin nyata seiring bertambahnya usia perkebunan generasi kedua dan ketiga (Murphy et al., 2021; Leng et al., 2024). Yang lebih mengkhawatirkan, gejala infeksi pada stadium awal umumnya bersifat asimtomatik atau tidak menunjukkan tanda-tanda visual yang jelas, sehingga deteksi konvensional berbasis pengamatan mata baru efektif ketika penyakit sudah berada pada stadium lanjut dan pilihan pengendalian menjadi sangat terbatas (Bakar & Nordin, 2011; Flood et al., 2022).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kondisi tanah memiliki keterkaitan dengan tingkat kejadian infeksi *Ganoderma* pada kelapa sawit. Perubahan sifat fisik tanah, termasuk kelembapan, di sekitar area perakaran tanaman yang terinfeksi berpotensi menjadi indikator non-destruktif yang dapat diukur lebih dini dibandingkan gejala visual pada batang atau daun (Aziz et al., 2021; Goh et al., 2020). Kerusakan fungsi akar akibat serangan patogen menyebabkan terganggunya proses penyerapan air oleh tanaman, sehingga menimbulkan pola kelembapan tanah yang berbeda antara tanaman sehat dan tanaman terinfeksi, khususnya pada rentang suhu tanah tropis 27-32°C yang umum dijumpai di perkebunan kelapa sawit (Rozieta et al., 2015).

Studi lapangan komprehensif oleh Ezrin dkk. (2026) terhadap 106 titik sensus pohon kelapa sawit di Seberang Perak dan Kluang, Malaysia, mengungkapkan bahwa kandungan magnesium (Mg) tanah secara konsisten menjadi satu-satunya unsur hara yang berasosiasi signifikan dengan kejadian BPB di kedua lokasi penelitian, sementara kapasitas tukar kation (CEC), fosfor (P), dan cone index (CI) juga menunjukkan perbedaan bermakna

pada lokasi Seberang Perak. Pemetaan spasial berbasis kriging pada penelitian tersebut memperlihatkan bahwa zona dengan kadar Mg rendah berhimpitan secara nyata dengan zona infeksi BPB, sehingga kandungan Mg tanah diusulkan sebagai indikator dini yang tangguh untuk risiko BPB. Temuan ini melengkapi pendekatan berbasis suhu dan kelembapan tanah pada penelitian ini, dan mengindikasikan bahwa integrasi variabel fisik (suhu, kelembapan) dengan variabel kimia tanah (Mg, CEC, P) berpotensi meningkatkan akurasi sistem deteksi dini di masa mendatang.

Dari sisi biologi patogen, penelitian *in vitro* oleh Peng dkk. (2019) mengenai kondisi lingkungan dan nutrisi optimal bagi pertumbuhan miselium *G. boninense* menunjukkan bahwa jamur ini tumbuh paling baik pada kisaran suhu 25-32°C dengan suhu optimum 32°C, kelembapan substrat 50-60%, serta pH masam 4-5. Pertumbuhan miselium justru terhambat pada suhu 34°C ke atas dan tidak menunjukkan tanda pertumbuhan pada suhu 35°C. Rentang suhu optimum pertumbuhan *G. boninense* tersebut selaras dengan rentang suhu tanah pada kategori risiko Tinggi dalam dataset penelitian ini (rata-rata 30,9°C), yang memberikan penguatan biologis terhadap penggunaan suhu tanah sebagai salah satu variabel prediktor risiko BPB pada rancangan sistem SoilGuard.

Perkembangan teknologi sensor dan Internet of Things (IoT) membuka peluang besar untuk mengubah pendekatan pengelolaan kesehatan tanaman dari yang bersifat reaktif-visual menjadi preventif dan berbasis data (Santoso et al., 2024; Siddiqui et al., 2021). Dengan memanfaatkan data suhu dan kelembapan tanah yang dapat dipantau secara kontinu, model klasifikasi risiko berbasis machine learning berpotensi mengenali pola anomali sejak dini, jauh sebelum gejala klinis tampak di lapangan.

Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada penggabungan dua parameter tanah yang mudah diukur di lapangan, yaitu suhu dan kelembapan tanah, ke dalam satu model klasifikasi risiko tiga tingkat (Rendah, Sedang, Tinggi) yang divalidasi menggunakan 1.000 titik data observasi, serta rancangan purwarupa sistem peringatan dini bernama SoilGuard yang dapat diimplementasikan langsung sebagai alat bantu pengambilan keputusan bagi petugas kebun.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis hubungan antara suhu dan kelembapan tanah dengan tingkat risiko BPB pada kelapa sawit; (2) membangun dan menguji model klasifikasi risiko BPB berbasis machine learning menggunakan kedua parameter tersebut; dan (3) merumuskan rancangan sistem pemantauan dini SoilGuard sebagai alat bantu deteksi risiko BPB di lapangan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitik yang dilanjutkan dengan pemodelan klasifikasi berbasis machine learning. Objek penelitian adalah data pengamatan kondisi tanah pada area piringan tanaman kelapa sawit.

a. Data dan Variabel Penelitian

Data yang digunakan terdiri atas 1.000 observasi dengan tiga variabel, yaitu suhu tanah ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan tanah (%), dan tingkat risiko BPB (Rendah, Sedang, Tinggi) yang telah dikategorikan berdasarkan kondisi lapangan. Distribusi data terdiri atas 344 observasi kategori Rendah, 345 observasi kategori Sedang, dan 311 observasi kategori Tinggi, sehingga proporsi antar kelas relatif seimbang.

b. Analisis Statistik Deskriptif

Analisis deskriptif dilakukan untuk mengetahui rata-rata, simpangan baku, nilai minimum, dan maksimum suhu serta kelembapan tanah pada masing-masing kategori risiko. Analisis korelasi Pearson digunakan untuk menguji kekuatan hubungan linear antara suhu tanah dan kelembapan tanah.

c. Pemodelan Klasifikasi

Data dibagi menjadi data latih (80%) dan data uji (20%) menggunakan teknik stratified split agar proporsi tiap kelas risiko tetap terjaga. Model klasifikasi dibangun menggunakan algoritma Random Forest dengan 200 pohon keputusan (estimators), memanfaatkan suhu dan kelembapan tanah sebagai variabel prediktor. Pemilihan Random Forest didasarkan pada kemampuannya menangani hubungan non-linear antar variabel serta ketahanannya terhadap overfitting pada dataset berukuran sedang.

d. Evaluasi Model

Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik akurasi, precision, recall, F1-score, dan confusion matrix pada data uji. Evaluasi ini bertujuan memastikan model mampu membedakan ketiga kategori risiko secara andal sebelum diterapkan pada rancangan sistem peringatan dini.

e. Rancangan Sistem SoilGuard

Berdasarkan hasil pemodelan, dirancang purwarupa sistem SoilGuard berbasis mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor suhu dan kelembapan tanah tipe FDR (Frequency Domain Reflectometry). Data sensor dikirimkan secara berkala ke unit

pemroses yang menjalankan model klasifikasi, dan hasil klasifikasi risiko ditampilkan melalui aplikasi pemantauan sederhana sebagai peringatan dini bagi petugas kebun per blok perkebunan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

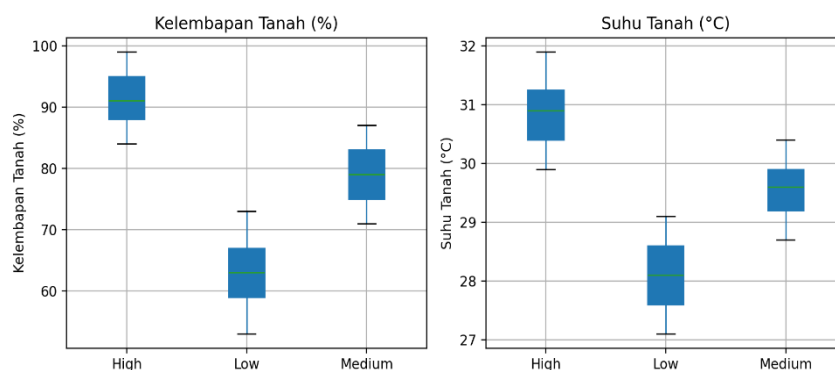
a. Karakteristik Data

Analisis deskriptif terhadap 1.000 data observasi menunjukkan rata-rata suhu tanah keseluruhan sebesar 29,5°C (SD = 1,23) dengan rentang 27,1-31,9°C, serta rata-rata kelembapan tanah sebesar 77,4% (SD = 12,16) dengan rentang 53-99%. Ringkasan statistik deskriptif untuk masing-masing kategori risiko disajikan pada Tabel 1.

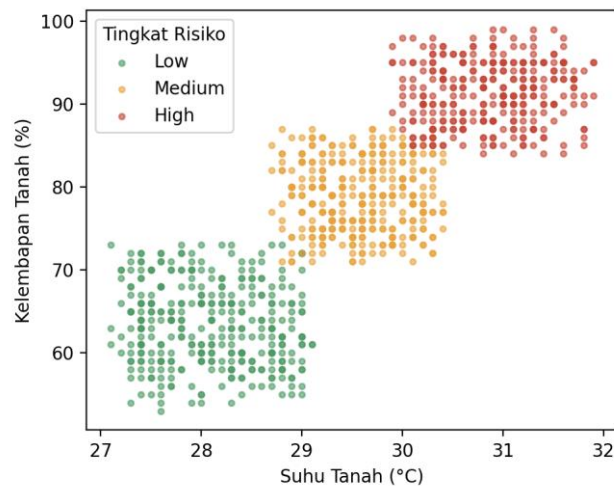
Tabel 1. Statistik Deskriptif Suhu dan Kelembapan Tanah per Kategori Risiko

Tingkat Risiko	n (data)	Suhu Tanah (°C) Rata-rata ± SD	Kelembapan Tanah (%) Rata-rata ± SD
Low	344	28,09 ± 0,54	63,38 ± 4,92
Medium	345	29,58 ± 0,44	78,93 ± 4,24
High	311	30,87 ± 0,50	91,35 ± 3,73

Data pada Tabel 1 memperlihatkan pola gradasi yang konsisten dan searah: semakin tinggi kategori risiko, semakin tinggi pula rata-rata suhu maupun kelembapan tanah. Tanaman berisiko Tinggi memiliki rata-rata suhu tanah 30,9°C dan kelembapan tanah 91,4%, jauh berbeda dari tanaman berisiko Rendah dengan rata-rata suhu 28,1°C dan kelembapan 63,4%. Pola ini sejalan dengan temuan penelitian terdahulu yang mengaitkan gangguan fungsi perakaran akibat infeksi *Ganoderma* dengan anomali hidrologi di sekitar area piringan tanaman (Aziz et al., 2021; Goh et al., 2020).



Gambar 1. Sebaran (boxplot) kelembapan dan suhu tanah pada tiap kategori tingkat risiko



Gambar 2. Sebaran titik data suhu dan kelembapan tanah berdasarkan kategori risiko

Gambar 1 dan Gambar 2 memperlihatkan pemisahan yang cukup jelas antar kelompok risiko, khususnya pada sumbu kelembapan tanah. Hasil uji korelasi Pearson menunjukkan hubungan positif yang kuat antara suhu tanah dan kelembapan tanah ($r = 0,85$), mengindikasikan bahwa kedua parameter tersebut saling melengkapi sebagai indikator gabungan risiko BPB, bukan sekadar variabel yang saling redundan.

b. Kinerja Model Klasifikasi

Model Random Forest yang dilatih menggunakan variabel suhu dan kelembapan tanah menghasilkan akurasi 98% pada 200 data uji. Nilai kepentingan variabel (feature importance) menunjukkan kontribusi yang hampir seimbang antara suhu tanah (49,1%) dan kelembapan tanah (50,9%) terhadap keputusan klasifikasi, yang menguatkan alasan penggunaan kedua parameter tersebut secara bersamaan pada rancangan sistem SoilGuard.

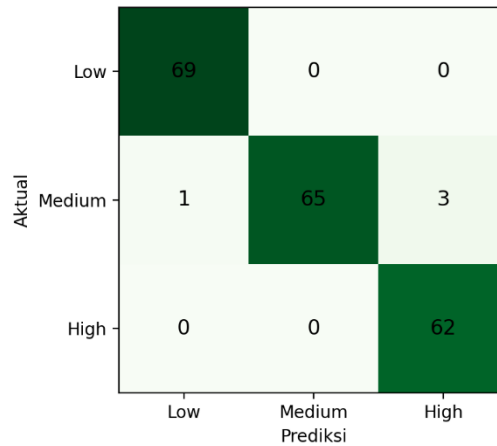
Tabel 2. Metrik Precision, Recall, dan F1-score Model Klasifikasi

Kelas Risiko	Precision	Recall	F1-score
Low	0,99	1,00	0,99
Medium	1,00	0,94	0,97
High	0,95	1,00	0,98

Rincian confusion matrix pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kesalahan klasifikasi model hanya terjadi pada beberapa data di kategori Sedang, yang sebagian terprediksi sebagai Rendah atau Tinggi. Hal ini wajar mengingat kategori Sedang secara alami berada pada zona transisi nilai suhu dan kelembapan antara kategori Rendah dan Tinggi.

Tabel 3. Confusion Matrix Model Klasifikasi pada Data Uji

Aktual \ Prediksi	Low	Medium	High
Low	69	0	0
Medium	1	65	3
High	0	0	62



Gambar 3. Visualisasi confusion matrix model klasifikasi risiko BPB

c. Implikasi terhadap Rancangan Sistem SoilGuard

Tingkat akurasi model yang tinggi (98%) menunjukkan bahwa kombinasi suhu dan kelembapan tanah cukup andal digunakan sebagai basis sistem klasifikasi risiko otomatis pada purwarupa SoilGuard. Dengan memasang sensor FDR pada kedalaman tertentu di area piringan tanaman dan menghubungkannya dengan mikrokontroler ESP32, sistem dapat melakukan klasifikasi risiko secara real-time dan memberikan peringatan dini kepada petugas kebun sebelum gejala visual BPB muncul di lapangan. Pendekatan ini sejalan dengan arah pengembangan teknologi pertanian presisi untuk mendukung keberlanjutan industri kelapa sawit (Santoso et al., 2024).

Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa data pada penelitian ini merupakan data hasil pengamatan lapangan yang telah dikategorikan, sehingga validasi lanjutan dengan uji molekuler (misalnya PCR) terhadap sampel akar maupun uji lapangan multi-lokasi tetap diperlukan untuk memastikan generalisasi model pada kondisi agroekologi yang lebih beragam (Siddiqui et al., 2021).

d. Perbandingan dengan Temuan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini memperkuat dan melengkapi temuan Ezrin dkk. (2026), yang mengidentifikasi magnesium (Mg) tanah sebagai indikator kimia utama BPB melalui pendekatan uji-t dan analisis effect size (Hedges' g), dengan menunjukkan bahwa parameter fisik tanah yang lebih sederhana dan murah untuk dipantau secara kontinu, yaitu suhu dan kelembapan tanah, juga mampu membedakan tingkat risiko BPB dengan akurasi tinggi (98%). Kombinasi kedua pendekatan ini membuka peluang pengembangan sistem deteksi dini multi-parameter di masa depan, yang menggabungkan sensor fisik (suhu, kelembapan) dengan analisis kimia tanah berkala (Mg, CEC, P) untuk meningkatkan keandalan prediksi.

Selain itu, kesesuaian antara suhu tanah pada kategori risiko Tinggi dalam dataset penelitian (rata-rata 30,9°C) dengan kisaran suhu optimum pertumbuhan miselium *G. boninense* hasil studi in vitro Peng dkk. (2019), yaitu 25-32°C dengan optimum pada 32°C, memberikan dasar biologis yang kuat bagi model klasifikasi yang dikembangkan. Temuan ini mengindikasikan bahwa area dengan suhu tanah mendekati rentang optimum pertumbuhan patogen memang secara biologis lebih kondusif bagi perkembangan *G. boninense*, sehingga memperkuat validitas suhu tanah sebagai variabel prediktor pada sistem SoilGuard, bukan sekadar korelasi statistik semata.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan tanah pada area piringan tanaman kelapa sawit memiliki keterkaitan yang konsisten dengan tingkat risiko penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) akibat *Ganoderma boninense*. Tanaman dengan risiko tinggi memiliki suhu dan kelembapan tanah yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan tanaman berisiko rendah, dengan korelasi kuat antara kedua parameter tersebut ($r = 0,85$). Model klasifikasi berbasis Random Forest yang dikembangkan mampu membedakan ketiga kategori risiko dengan akurasi 98%, menjadikan kedua parameter tanah tersebut layak dijadikan basis sistem deteksi dini otomatis.

Hasil penelitian ini menjadi landasan bagi pengembangan purwarupa sistem SoilGuard, yaitu sistem pemantauan berbasis sensor IoT dan model klasifikasi machine learning yang diharapkan mampu memberikan peringatan dini risiko BPB kepada petugas kebun, sehingga pengelolaan kesehatan tanaman dapat bertransformasi dari pendekatan reaktif-visual menuju preventif-berbasis data.

Saran untuk pengembangan lebih lanjut meliputi: (1) pengujian purwarupa SoilGuard secara langsung di lapangan pada berbagai jenis tanah dan wilayah perkebunan; (2) penambahan variabel prediktor lain seperti pH tanah dan curah hujan untuk meningkatkan akurasi model; serta (3) validasi hasil klasifikasi risiko dengan uji molekuler PCR terhadap sampel akar tanaman guna memastikan keterkaitan langsung dengan keberadaan patogen *Ganoderma boninense*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan data, fasilitas, dan bimbingan selama pelaksanaan penelitian ini, termasuk institusi pendidikan/ perguruan tinggi terkait serta pihak-pihak yang telah membantu proses pengumpulan dan analisis data lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, M. H. A., Khairunniza-Bejo, S., Wayayok, A., Hashim, F., & Kondo, N. (2021). Temporal changes analysis of soil properties associated with *G. boninense* infection in oil palm seedlings. *Agronomy*, 11(11), 2279.
- Bakar, S. K., & Nordin, M. S. (2011). Characterization of basal stem rot disease in oil palm: Symptoms and management strategies. *Journal of Plant Pathology*, 93, 523–530.
- Ezrin, M. H., Aimrun, W., & Bejo, S. K. (2026). Soil conditions favoring basal stem rot infection in oil palm plantations. *Journal of Plant Pathology*, 108(1), 895–910. <https://doi.org/10.1007/s42161-026-02148-5>
- Flood, J., Bridge, P. D., & Pilotti, C. A. (2022). Basal stem rot of oil palm revisited. *Annals of Applied Biology*, 181(2), 160–181.
- Goh, Y. K., Md Zoqratt, M. Z. H., Goh, Y. K., Ayub, Q., & Ting, A. S. Y. (2020). Determining soil microbial communities and their influence on *Ganoderma* disease incidences in oil palm (*Elaeis guineensis*) via high-throughput sequencing. *Biology*, 9(12), 424.
- Hushiarian, R., Yusof, N. A., & Dutse, S. W. (2013). Detection and control of *Ganoderma boninense*: Strategies and perspectives. *SpringerPlus*, 2(555), 1–12.
- Leng, S. T. K., Cheah, W. Y., Pahri, S.-D. R., Lin, N. S., & Choy, E. A. (2024). A systematic literature review on environmental issues and challenges towards the palm oil industry. *Journal of Sustainability Science and Management*, 19(1), 154–170. <https://doi.org/10.46754/jssm.2024.01.013>

- MPOB (Malaysian Palm Oil Board). (2024). *Malaysian oil palm statistics 2024*. MPOB.
- Murphy, D. J., Goggin, K., & Paterson, R. R. M. (2021). Oil palm in the 2020s and beyond: Challenges and solutions. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2, 39. <https://doi.org/10.1186/s43170-021-00058-3>
- Paterson, R. R. M. (2019). *Ganoderma boninense* disease deduced from simulation modelling with large data sets of future Malaysian oil palm climate. *Phytoparasitica*. <https://doi.org/10.1007/s12600-019-00723-4>
- Peng, S. H. T., Yap, C. K., Ren, P. F., & Chai, E. W. (2019). Effects of environment and nutritional conditions on mycelial growth of *Ganoderma boninense*. *International Journal of Oil Palm*, 2(3), 95–107.
- Rozietta, R., Sahibin, A. R., & Wan Mohd Razi, I. (2015). Physico-chemical properties of soil at oil palm plantation area, Labu, Negeri Sembilan. *AIP Conference Proceedings*, 1678, 020031.
- Santoso, H., Yusuf, M. A., Rahutomo, S., Madiyanto, & Winarna. (2024). A cutting-edge precision agriculture technology to support the sustainable oil palm industry. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1308(1), 012053.
- Siddiqui, Y., Meon, S., & Ahmad, R. (2021). Advances in early detection and management of *Ganoderma* basal stem rot in oil palm plantations. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(12), 7011–7024.