

MIKROBIOMA TANAH DAN SAWIT BERKELANJUTAN -

Dampak Tanaman Penutup dan Diversifikasi Pohon



Oleh: Rudy C Tarumingkeng

*Rudy C Tarumingkeng: Mikrobioma Tanah dan Sawit Berkelanjutan -
Dampak Tanaman Penutup dan Diversifikasi Pohon*

Oleh:

[Prof Ir Rudy C Tarumingkeng, PhD](#)

Professor of Management NUP: 9903252922

Professor Emeritus, IPB-University

Rector, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan

Rector, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari

Coordinator, CIDA/DIKTI SFU Burnaby BC Canada 1988-1991

Rector, Universitas Kristen Krida Wacana, Jakarta (1991-2000)

Chairman. Board of Professors, IPB-University, Bogor (2005-2006)

AI - Data Analyst, dan Chairman, Academic Senate, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyc75@gmail.com

30 March 2026

MIKROBIOMA TANAH DAN SAWIT BERKELANJUTAN: DAMPAK TANAMAN PENUTUP DAN DIVERSIFIKASI POHON

Abstrak

Keberlanjutan perkebunan kelapa sawit selama ini terlalu sering diukur dari indikator yang tampak di permukaan, seperti hasil tandan buah segar, efisiensi pemupukan, atau kepatuhan sertifikasi. Padahal, daya tahan jangka panjang sistem sawit sangat ditentukan oleh apa yang terjadi di bawah permukaan, yakni kondisi tanah, kualitas rizosfer, dan dinamika mikrobioma. Makalah ini membahas mikrobioma tanah sebagai fondasi sawit berkelanjutan dengan fokus khusus pada dua intervensi ekologis yang semakin penting, yaitu tanaman penutup dan diversifikasi pohon. Literatur primer menunjukkan bahwa mikrobioma rizosfer merupakan penentu penting kesehatan tanaman karena dapat mendorong atau menekan produktivitas melalui daur hara, pelarutan unsur, sintesis fitohormon, dan penekanan patogen. Pada lanskap sawit, pengelolaan understory dan tanaman penutup terbukti berkaitan dengan meningkatnya biodiversitas tanah, laju dekomposisi, pemeliharaan struktur tanah, dan fungsi ekosistem, sementara tanaman penutup legum juga berkontribusi pada fiksasi nitrogen biologis dan pengurangan kehilangan nitrogen. Di sisi lain, diversifikasi pohon melalui pengayaan vegetasi, tree islands, atau agroforestri sawit menunjukkan manfaat nyata pada struktur tegakan, biodiversitas, dan fungsi ekosistem; tetapi untuk komunitas fungi tanah,

efeknya bisa lebih lambat karena masih dibayangi oleh “warisan” kondisi tanah dan intensitas pengelolaan sebelumnya. Temuan yang lebih baru juga menunjukkan bahwa monokultur cenderung memiliki metabolit pertahanan akar yang lebih lemah dan proporsi fungi tanah yang lebih tinggi dibanding hutan, sehingga kebutuhan untuk meningkatkan diversitas dalam monokultur—melalui agroforestri atau intercropping—menjadi semakin jelas. Makalah ini berargumen bahwa sawit berkelanjutan harus dikelola dengan perspektif mikrobioma: tanah diperlakukan sebagai sistem hidup, tanaman penutup dipahami sebagai alat rekayasa komunitas mikroba dan kesehatan tanah, dan diversifikasi pohon dilihat sebagai strategi restorasi bertahap bagi interaksi akar–tanah–organisme. Dengan demikian, masa depan sawit berkelanjutan tidak cukup dibangun dengan input eksternal, melainkan dengan memulihkan jaringan biologis yang menopang produktivitas dari dalam tanah. ([PMC](#))

Kata kunci: *mikrobioma tanah, kelapa sawit, tanaman penutup, understory, diversifikasi pohon, agroforestri sawit, rizosfer, kesehatan tanah, keberlanjutan*

Mikrobioma Tanah dan Sawit Berkelanjutan: Dampak Tanaman Penutup dan Diversifikasi Pohon

1. Pendahuluan

Kelapa sawit menempati posisi penting dalam ekonomi Indonesia. Publikasi resmi BPS menunjukkan bahwa statistik sawit nasional terus dipantau menurut luas areal, produksi, ekspor, dan impor, sedangkan *Outlook Kelapa Sawit 2024* dari Kementerian Pertanian menegaskan bahwa Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan luas

areal 16,83 juta hektar dan produksi 46,82 juta ton pada 2022. Skala sebesar ini menjadikan setiap isu teknis di tingkat kebun—termasuk kesehatan tanah dan mikrobioma—sebagai isu strategis, bukan hanya teknis operasional. ([PMC](#))

Dalam diskursus publik, keberlanjutan sawit biasanya dibicarakan melalui kata-kata seperti produktivitas, emisi, deforestasi, atau sertifikasi. Semua itu penting, tetapi ada lapisan yang jauh lebih mendasar, yaitu apakah tanah yang menopang sawit masih berfungsi sebagai sistem hidup. FAO mendefinisikan tanah sehat sebagai kapasitas tanah untuk terus berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas biologis, kualitas air dan udara, serta kesehatan tanaman, hewan, dan manusia; definisi ini menekankan dua unsur penting, yakni dimensi waktu dan peran sentral biota tanah. Dalam konteks sawit, definisi ini berarti bahwa keberlanjutan tidak cukup dinilai dari panen hari ini, tetapi dari apakah tanah masih mampu menopang panen lima, sepuluh, atau dua puluh tahun ke depan. ([FAOHome](#))

Perspektif ini menjadi semakin penting karena riset terbaru pada sawit menunjukkan bahwa mikrobioma rizosfer bukan sekadar penghuni pasif tanah. Studi Kirkman dan kolega menyatakan bahwa mikrobioma rizosfer adalah penentu utama kesehatan tanaman karena dapat berinteraksi langsung dan tidak langsung dengan inang untuk mendorong atau menekan produktivitas. Pada saat yang sama, studi Widyati dan kolega tahun 2025 menunjukkan bahwa konversi hutan tropis ke monokultur pohon dan sawit mengubah interaksi tanah–akar–organisme melalui perubahan sifat fisikokimia tanah, eksudat akar, dan profil organisme tanah. Jadi, bila sawit hendak dibangun sebagai komoditas yang benar-benar berkelanjutan, maka fokusnya harus diperluas dari permukaan kebun menuju biologi bawah permukaan. ([PMC](#))

Dua strategi yang semakin sering dipandang relevan dalam konteks ini ialah tanaman penutup dan diversifikasi pohon. Tanaman penutup bekerja

dekat permukaan tanah dan zona akar, melalui penambahan serasah, pengaturan kelembapan, peningkatan bahan organik, dan penciptaan habitat mikroba serta fauna tanah. Diversifikasi pohon bekerja pada skala struktur tegakan dan lanskap mikro, dengan mengubah arsitektur vegetasi, masukan biomassa, kualitas serasah, dan pola interaksi akar-tanah. Keduanya pada akhirnya bertemu di satu titik: rekayasa ulang komunitas biologis tanah. Makalah ini menelaah keduanya sebagai pilar penting bagi sawit berkelanjutan. ([Frontiers](#))

2. Kerangka Konseptual: Mikroba Tanah, Rizosfer, dan Fungsi Ekologisnya

Untuk memahami mengapa mikrobioma penting dalam sawit, pertama-tama perlu ditegaskan bahwa tanah bukan medium netral. Tanah adalah sistem hidup yang terdiri dari akar, eksudat akar, bakteri, fungi, fauna tanah, bahan organik, air, udara, dan mineral yang berinteraksi terus-menerus. FAO menekankan bahwa indikator kesehatan tanah mencakup ketersediaan hara, kemudahan diolah, ketersediaan oksigen bagi akar, kemampuan menahan hara, toksisitas, salinitas, dan kondisi perakaran. Dengan kata lain, kesehatan tanah selalu berhubungan langsung dengan habitat mikroba dan kondisi rizosfer. ([FAOHome](#))

Dalam sistem sawit, fungsi mikrobioma dapat dibedakan ke dalam beberapa lapisan. Lapisan pertama adalah fungsi nutrisi, yaitu kemampuan mikroba untuk memineralisasi bahan organik, melarutkan fosfat, membantu ketersediaan kalium, dan dalam beberapa kasus berkontribusi pada fiksasi nitrogen atau produksi fitohormon. Lapisan kedua adalah fungsi perlindungan, yakni kemampuannya menekan patogen atau membentuk asosiasi simbiotik yang mendukung ketahanan tanaman. Lapisan ketiga adalah fungsi struktural, yaitu peran komunitas mikroba dan fauna tanah dalam pembentukan agregat, dekomposisi serasah, dan pemeliharaan porositas tanah. Seluruh fungsi ini menentukan apakah tanah hanya "ada" di bawah sawit, atau benar-benar "bekerja" untuk sawit. ([PMC](#))

Penelitian pada mikrobioma fungi sawit memberi gambaran yang sangat jelas tentang kerumitan ini. Kirkman dan kolega menemukan bahwa komunitas fungi pada sawit bervariasi secara nyata menurut kompartemen—akar, rizosfer, dan bulk soil—dan juga dipengaruhi oleh sifat tanah seperti pH, C, N, dan P. Artinya, mikrobioma sawit tidak dapat dipahami sebagai satu komunitas homogen. Ia adalah mosaik biologis yang dipengaruhi umur kebun, sifat tanah, dan zona akar. Konsekuensinya, intervensi keberlanjutan yang hanya bekerja di permukaan, tanpa menyentuh kondisi tanah dan rizosfer, sering tidak cukup. ([PMC](#))

Karena itu, sawit berkelanjutan perlu dibaca sebagai persoalan desain ekologi tanah. Tanaman penutup dan diversifikasi pohon penting justru karena keduanya mampu memodifikasi kondisi tanah yang menjadi tempat hidup mikrobioma. Bila keduanya berhasil memperbaiki kelembapan, menambah serasah, mengurangi pemadatan, dan memperluas jaringan akar, maka komunitas mikroba yang lebih menguntungkan akan lebih mudah terbentuk atau pulih. Sebaliknya, bila kebun terus dikelola sebagai ruang yang terlalu bersih, terlalu terpapar, dan terlalu tergantung pada input kimia, maka mikrobioma cenderung terdorong ke arah yang lebih miskin fungsi atau lebih rentan terhadap dominasi kelompok yang tidak menguntungkan. ([Frontiers](#))

3. Monokultur Sawit dan Penyederhanaan Dunia Bawah Tanah

Monokultur bukan sekadar dominasi satu jenis tanaman di atas permukaan. Pada tingkat tanah, monokultur berarti penyederhanaan arsitektur akar, kualitas serasah, sumber eksudat, dan niche mikroba. Perubahan ini menjadi semakin kuat ketika disertai penggunaan herbisida yang intensif, penekanan understory, dan minimnya pengembalian biomassa ke kebun. Riset Ashton-Butt dan kolega pada perkebunan sawit menunjukkan bahwa manipulasi understory memengaruhi kelimpahan dan keragaman makrofauna tanah serta laju dekomposisi serasah. Plot dengan

understory yang lebih dipertahankan memiliki tanah yang secara biologis lebih aktif daripada plot yang understory-nya ditekan berat. ([Frontiers](#))

Penyederhanaan ini bukan hanya menurunkan keanekaragaman organisme, tetapi juga mengubah hubungan antara tanaman dan mikroba. Widyati dan kolega menunjukkan bahwa dibanding ekosistem hutan, monokultur memiliki metabolit pertahanan yang lebih lemah untuk penekanan patogen, sementara proporsi fungi di profil mikroba tanah lebih tinggi. Penulis studi itu menyimpulkan bahwa kombinasi sistem pertahanan yang lebih lemah dan peningkatan proporsi fungi dapat menaikkan kerentanan monokultur terhadap penyakit, sehingga peningkatan diversitas melalui agroforestri atau intercropping menjadi penting bagi kesehatan tanah jangka panjang. Ini adalah temuan yang sangat penting karena menunjukkan bahwa masalah monokultur bukan sekadar "kurang beragam," tetapi berpotensi lebih lemah secara biologis. ([ScienceDirect](#))

Di tingkat kimia dan fisik tanah, monokultur yang dikelola intensif juga sering menghasilkan "warisan" kondisi tanah yang kuat. Ballauff dan kolega meneliti pengayaan keragaman pohon di perkebunan sawit Sumatra dan menemukan bahwa setelah tiga tahun, komposisi fungi tanah lebih banyak ditentukan oleh kondisi abiotik seperti pH, N, dan P daripada oleh keragaman pohon itu sendiri. Temuan ini sering dibaca secara pesimistis, seolah diversifikasi pohon tidak berguna. Namun secara ilmiah maknanya lebih tepat dibaca sebagai peringatan bahwa tanah yang telah lama dikelola intensif membawa legacy effect yang kuat, sehingga restorasi mikrobioma tidak selalu berlangsung cepat. ([MDPI](#))

Dengan demikian, kritik terhadap monokultur sawit tidak perlu diletakkan secara ideologis, melainkan ekologis. Masalah utamanya bukan bahwa sawit hanya satu spesies, tetapi bahwa sistemnya sering terlalu disederhanakan hingga mengabaikan syarat-syarat hidup mikrobioma. Bila tanah dibuat terlalu terbuka, terlalu asam, terlalu miskin bahan organik,

atau terlalu homogen secara vegetatif, maka komunitas mikroba yang terbentuk cenderung kurang beragam, kurang stabil, atau kurang fungsional. Dalam jangka pendek hasil panen mungkin masih baik, tetapi fondasi keberlanjutan sistem melemah. ([MDPI](#))

4. Tanaman Penutup sebagai Rekayasa Mikrobioma

Dalam sistem sawit, tanaman penutup adalah salah satu instrumen paling langsung untuk memengaruhi mikrobioma tanah. Ia bekerja melalui beberapa jalur sekaligus. Pertama, tanaman penutup menambah biomassa dan serasah, yang menjadi sumber karbon bagi mikroba. Kedua, ia menjaga kelembapan dan suhu tanah tetap lebih stabil, yang penting bagi aktivitas biologi. Ketiga, akarnya menambah ragam eksudat di rizosfer dan memperluas ruang kolonisasi mikroba. Keempat, penutup tanah menekan percikan hujan dan limpasan, sehingga membantu menjaga agregat tanah dan habitat mikroba tetap utuh. Pada level konsep, ini berarti tanaman penutup sebenarnya adalah alat rekayasa komunitas mikroba, bukan sekadar penutup visual permukaan. ([Frontiers](#))

Bukti lapangan dalam sawit cukup kuat. Penelitian Ashton-Butt dan kolega menunjukkan bahwa understory yang dipertahankan meningkatkan biodiversitas tanah dan laju dekomposisi, tanpa menunjukkan penurunan jelas pada kesuburan tanah. Studi Thoumazeau dan kolega di smallholding Indonesia juga menemukan bahwa understory vegetation berpengaruh positif langsung pada indikator pemeliharaan struktur tanah, dan bahwa perbaikan struktur itu berkorelasi dengan performa sawit yang lebih baik. Dua studi ini penting karena bersama-sama menunjukkan bahwa vegetasi bawah tidak otomatis menjadi pesaing sawit; dalam konteks tertentu, ia justru memperbaiki lingkungan tanah yang menopang sawit. ([Frontiers](#))

Dimensi mikrobiomanya makin terlihat ketika pengelolaan biomassa diperhitungkan. Tao dan kolega menunjukkan bahwa aktivitas makan fauna tanah paling tinggi pada zona aplikasi empty fruit bunches (EFB), dan bahwa aktivitas ini berkaitan dengan perbaikan sifat kimia tanah serta

kondisi kelembapan. Studi tersebut juga menekankan bahwa berbagai zona pengelolaan dalam kebun sawit menghasilkan heterogenitas spasial yang kuat pada sifat tanah dan fungsi fauna. Ini berarti pengembalian biomassa dan penutup organik bukan hanya urusan unsur hara, tetapi juga cara menciptakan “kantong-kantong aktivitas biologis” dalam kebun.

([ScienceDirect](#))

Kajian yang lebih baru dari Hidayat dan kolega memberi landasan mikrobiologi yang lebih detail. Setelah sepuluh tahun aplikasi bahan organik pada praktik *good soil management*, plot sawit menunjukkan peningkatan total organic carbon, total nitrogen, fosfor tersedia, kalium tersedia, dan kapasitas tukar kation; selain itu, metagenomik menunjukkan kelimpahan lebih tinggi dari spesies mikroba menguntungkan, sementara analisis fungsi mikrobiom memperlihatkan peningkatan enzim terkait fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, pelarutan kalium, dan sintesis fitohormon. Walaupun studi ini berfokus pada bahan organik, logika ekologinya sangat dekat dengan tanaman penutup: keduanya meningkatkan pasokan karbon dan stabilitas habitat bagi komunitas mikroba. ([Kyushu University Pure Portal Site](#))

5. Tanaman Penutup Legum: dari Erosi ke Fiksasi Nitrogen

Di dalam kelompok tanaman penutup, legum memiliki posisi khusus karena perannya yang ganda. Selain menutup tanah dan menambah serasah, legum dapat memasukkan nitrogen ke sistem melalui fiksasi biologis. Studi Pipai dan kolega tahun 2023 menunjukkan bahwa legume cover plants di perkebunan sawit tidak hanya berguna untuk pengendalian erosi dan penekanan gulma, tetapi juga untuk memasukkan nitrogen melalui BNF. Penelitian itu menemukan bahwa ketergantungan legum pada fiksasi N_2 berhubungan negatif kuat dengan kadar nitrat tanah, dan bahwa biomassa penutup tanah serta jumlah nitrogen terfiksasi lebih besar di bawah sawit muda berumur kurang dari lima tahun, lalu menurun di kebun yang lebih tua dan lebih teduh. Ini memperlihatkan bahwa peran

mikrobioma penambat nitrogen dalam sawit bersifat dinamis mengikuti umur kebun dan kondisi cahaya. ([Springer](#))

Temuan ini penting karena sering kali tanaman penutup legum hanya dipahami sebagai pelindung tanah fase belum menghasilkan. Padahal, dari perspektif mikrobioma, legum adalah “pabrik biologis” yang menambah ragam interaksi akar–bakteri dan membantu membangun daur nitrogen yang lebih sirkular. Akan tetapi, riset Pipai juga mengingatkan bahwa fungsi ini tidak konstan. Ketika kanopi sawit menutup dan legum menurun, kontribusi nitrogen biologis serta biomassa penutup ikut turun. Karena itu, keberlanjutan sawit tidak cukup hanya menanam legum di awal, lalu membiarkannya hilang tanpa strategi pengganti. ([Springer](#))

Nuansa serupa terlihat pada studi 2025 tentang *Mucuna bracteata* dan ubi jalar sebagai ground cover pada sawit belum menghasilkan di Sumatra Utara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *M. bracteata* memberikan kontribusi yang lebih baik terhadap soil health dibanding ubi jalar, ditandai oleh respirasi tanah, populasi fauna tanah, biomassa penutup, kalium dapat tukar, dan serapan N serta P pada daun sawit yang lebih tinggi. Akan tetapi, populasi mikroba dan kandungan C-organik tanah tidak berbeda nyata antara kedua perlakuan. Temuan ini sangat penting karena menunjukkan bahwa efek tanaman penutup terhadap mikrobioma tidak selalu muncul sebagai lonjakan jumlah mikroba; kadang yang lebih dahulu membaik adalah fungsi ekologis sistem, seperti respirasi tanah, aktivitas fauna, dan dinamika hara. (msss.com.my)

Secara metodologis, ini mengajarkan sesuatu yang penting untuk pengajaran manajemen sawit. Bila pengelola hanya menilai keberhasilan tanaman penutup dari satu indikator, misalnya jumlah mikroba total, maka ia bisa salah menyimpulkan bahwa intervensinya gagal. Padahal, seperti ditunjukkan studi *Mucuna*, perbaikan soil health dapat muncul melalui indikator fungsi yang lebih kompleks. Dalam konteks sawit berkelanjutan,

ini berarti evaluasi tanaman penutup harus memadukan indikator biologi, fungsi, dan status hara, bukan sekadar satu angka tunggal. (msss.com.my)

6. Understory dan Diversifikasi Vegetasi Bawah: Jalan Tengah yang Sering Diremehkan

Dalam banyak kebun, istilah tanaman penutup sering segera diasosiasikan dengan legum yang sengaja ditanam. Padahal secara ekologis, vegetasi bawah yang dipertahankan secara selektif juga dapat berfungsi sebagai "cover crop ekologis." Justru di sinilah terdapat peluang praktis yang besar, terutama pada smallholders. Studi Thoumazeau menunjukkan bahwa selain pemupukan, terutama kalium, understory vegetation merupakan faktor yang meningkatkan soil health, khususnya indikator yang berhubungan dengan pemeliharaan struktur tanah. Penulis juga menekankan bahwa dalam konteks yang diteliti, understory tidak bersaing secara merugikan dengan sawit, tetapi justru terkait dengan potensi peningkatan fungsi ekosistem. ([ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com))

Studi Ashton-Butt menambahkan dimensi biologis yang lebih rinci. Manipulasi understory dengan herbisida terbukti memengaruhi kelimpahan dan keragaman makrofauna tanah, laju dekomposisi serasah, serta beberapa variabel abiotik tanah. Ini berarti keputusan sehari-hari tentang herbisida dan kebersihan kebun sesungguhnya adalah keputusan tentang mikrobioma dan biota tanah. Kebun yang terlalu bersih mungkin tampak efisien secara visual, tetapi di bawah permukaan ia bisa kehilangan banyak fungsi ekologis yang justru dibutuhkan untuk keberlanjutan jangka panjang. ([Frontiers](https://www.frontiersin.org))

Dari sisi strategi, vegetasi bawah selektif memiliki keunggulan karena lebih mudah diadopsi daripada pengayaan pohon atau perubahan besar pada tata ruang kebun. Ia bisa dimulai tanpa investasi besar, relatif kompatibel dengan kebun yang sudah ada, dan mampu segera memengaruhi mikroklimat tanah serta masukan biomassa. Oleh sebab itu, dalam agenda sawit berkelanjutan, pengelolaan understory seharusnya dipandang bukan

sebagai isu kebersihan kebun, melainkan sebagai langkah manajemen mikrobioma yang paling realistis untuk banyak situasi. ([Frontiers](#))

7. Diversifikasi Pohon: Restorasi Bertahap bagi Mikrobioma

Jika tanaman penutup dan understory bekerja dekat permukaan tanah, maka diversifikasi pohon bekerja pada skala yang lebih besar: struktur tajuk, kualitas serasah, arsitektur akar, dan heterogenitas habitat. Karena itu, dampaknya pada mikrobioma bisa lebih dalam, tetapi juga lebih lambat. Ballauff dan kolega menunjukkan bahwa tiga tahun setelah pengayaan pohon di kebun sawit Sumatra, komunitas fungi tanah masih lebih dipengaruhi oleh pH, N, dan P daripada oleh keragaman pohon atau kompleksitas tegakan. Hasil ini sering dianggap mengecewakan, tetapi sebenarnya sangat informatif: ia menegaskan bahwa restorasi mikrobioma tanah memiliki inersia, dan bahwa sejarah penggunaan lahan meninggalkan jejak yang tidak mudah dihapus hanya dengan menanam beberapa pohon. ([MDPI](#))

Namun, itu bukan berarti diversifikasi pohon tidak berguna. Dalam lanskap yang sama, tree islands terbukti meningkatkan biodiversitas dan fungsi ekosistem secara keseluruhan, serta meningkatkan multidiversity dan ecosystem multifunctionality dibanding sawit konvensional. Lebih jauh, tree enrichment tidak menurunkan hasil sawit pada skala lanskap. Ini berarti manfaat restorasi ekologis dapat muncul pada berbagai komponen sistem meskipun respons komunitas fungi tanah tertentu belum besar pada tahun-tahun awal. Dalam bahasa ilmiah, diversifikasi pohon menghasilkan "pemulihan bertahap" dengan tempo yang berbeda antarindikator. ([Nature](#))

Temuan Widyati 2025 membantu menjelaskan mengapa diversifikasi ini penting. Studi tersebut menunjukkan bahwa perubahan dari hutan ke monokultur memengaruhi hubungan tanah–akar–organisme melalui sifat fisikokimia tanah, eksudat akar, dan profil organisme. Monokultur memiliki metabolit pertahanan yang lebih lemah terhadap patogen dan proporsi

fungi yang lebih tinggi di tanah. Peneliti kemudian menekankan perlunya meningkatkan diversitas di dalam monokultur—melalui agroforestri atau intercropping—untuk menjaga kesehatan tanah jangka panjang. Dengan kata lain, diversifikasi pohon bukan sekadar strategi konservasi permukaan, tetapi juga strategi membangun ulang “bahasa kimia” antara akar dan mikroba. ([ScienceDirect](#))

Dari sudut pandang pengelolaan, hal ini berarti pengayaan pohon perlu diperlakukan sebagai investasi jangka menengah dan panjang. Pengelola tidak boleh berharap bahwa mikrobioma tanah akan segera berubah hanya dalam satu atau dua musim. Yang lebih realistis adalah melihat diversifikasi pohon sebagai proses memulihkan kondisi abiotik dan biotik secara bertahap: menambah serasah, memperluas spektrum akar, mengubah kelembapan dan suhu tanah, lalu perlahan-lahan menggeser komunitas mikroba ke arah yang lebih seimbang. ([MDPI](#))

8. Mikroba, Akar, dan Patogen: Mengapa Diversitas Penting bagi Pertahanan Sistem

Salah satu alasan paling kuat untuk memikirkan mikrobioma dalam sawit berkelanjutan adalah isu penyakit. Rizosfer bukan hanya zona penyerapan hara, tetapi juga medan pertempuran biologis. Mikroba tertentu dapat mendukung pertumbuhan, melarutkan hara, dan menekan patogen; mikroba lain justru bisa memperbesar risiko penyakit ketika keseimbangannya terganggu. Studi Kirkman dan kolega menegaskan bahwa mikrobioma rizosfer adalah penentu utama kesehatan tanaman, sedangkan Widyati dan kolega menunjukkan bahwa monokultur memiliki metabolit pertahanan sekunder yang lebih lemah terhadap patogen dibanding hutan. Dua temuan ini, bila dibaca bersama, mengarah pada kesimpulan bahwa diversitas vegetasi dapat memperkuat “sistem imun ekologis” kebun. ([PMC](#))

Temuan Hidayat tentang bakteri pemacu pertumbuhan tanaman memperkuat argumen tersebut. Dalam sistem sawit dengan aplikasi bahan

organik jangka panjang, ditemukan lebih banyak spesies mikroba menguntungkan dan fungsi enzimatis yang terkait dengan nitrogen fixation, phosphate solubilization, potassium solubilization, dan phytohormone synthesis. Studi lanjutan dari kelompok yang sama juga berhasil mengisolasi strain PGPB multifungsi dari rizosfer sawit yang menunjukkan aktivitas antifungal terhadap *Ganoderma boninense*. Walaupun ini bukan bukti bahwa tanaman penutup atau pohon campuran otomatis mengendalikan penyakit, ia menunjukkan bahwa lingkungan tanah yang lebih kaya bahan organik dan lebih hidup dapat menjadi sumber mikroba protektif yang lebih kaya. ([Kyushu University Pure Portal Site](#))

Dari sini, pelajaran manajerialnya cukup jelas. Sistem sawit yang hanya bertumpu pada pupuk dan pestisida sering kali sedang melemahkan basis biologis pertahanannya sendiri. Sebaliknya, sistem yang menjaga serasah, understory, bahan organik, dan keragaman vegetasi lebih mungkin membangun komunitas mikroba yang bukan hanya mendaur hara, tetapi juga membantu mempertahankan kesehatan tanaman. Dalam jangka panjang, inilah yang membedakan kebun yang sekadar produktif dari kebun yang resilien. ([ScienceDirect](#))

9. Dampak pada Kesehatan Tanah dan Sawit Berkelanjutan

Bila seluruh bukti di atas dirangkum, maka pengaruh tanaman penutup dan diversifikasi pohon terhadap mikrobioma tanah sawit dapat dibaca melalui empat dampak utama. Pertama, keduanya meningkatkan peluang terbentuknya komunitas biota tanah yang lebih kaya dan lebih aktif. Kedua, keduanya memperbaiki fungsi dekomposisi dan daur hara melalui serasah, bahan organik, dan habitat mikroba. Ketiga, keduanya membantu pemeliharaan struktur tanah, kelembapan, dan kondisi perakaran yang lebih baik. Keempat, keduanya berpotensi menurunkan kerentanan sistem terhadap patogen dan gangguan iklim. Semua ini sangat relevan dengan

definisi tanah sehat yang menekankan fungsi biologis, kualitas air, kualitas udara, dan produktivitas berkelanjutan. ([FAOHome](#))

Standar RSPO 2024 pada dasarnya bergerak ke arah yang sama. Dokumen itu menyebut secara eksplisit bahwa kesuburan jangka panjang bergantung pada struktur tanah, kandungan bahan organik, status hara, dan kesehatan mikrobiologis tanah, serta mendorong daur ulang biomassa dan pengelolaan nutrisi yang memperhatikan umur kebun dan kondisi tanah. Rumusan ini penting karena menunjukkan bahwa mikrobioma bukan isu pinggiran, melainkan bagian dari fondasi keberlanjutan yang kini diakui dalam standar industri. ([RSPO](#))

Pada titik ini, keberlanjutan sawit dapat dirumuskan ulang. Sawit berkelanjutan bukan hanya sawit yang masih mampu menghasilkan hari ini, tetapi sawit yang tanahnya masih hidup, mikrobiomanya masih fungsional, dan interaksi akar–tanah–organismenya masih bekerja menopang produktivitas esok. Tanaman penutup dan diversifikasi pohon menjadi penting justru karena keduanya membantu mempertahankan dunia bawah tanah itu. Dengan demikian, keduanya bukan sekadar ornamen ekologis, tetapi instrumen strategis untuk menjaga sawit tetap produktif tanpa merusak fondasinya sendiri. ([PMC](#))

10. Narasi Kasus: Membaca Sebuah Kebun dari Bawah Permukaan

Bayangkan sebuah kebun sawit kecil di Sumatra yang dikelola dengan cara sangat rapi. Semua vegetasi bawah dibersihkan, herbisida dipakai rutin, residu organik tidak banyak dikembalikan, dan ruang antarbaris dibiarkan relatif terbuka. Dari permukaan, kebun itu tampak “tertib.” Namun di bawah permukaan, serasah tipis, fauna tanah sedikit, kelembapan cepat turun, dan akar sawit hidup dalam lingkungan yang semakin miskin karbon dan mikroba menguntungkan. Hasil panen mungkin belum langsung jatuh, tetapi daya tahan sistem melemah sedikit demi sedikit. Gambaran ini sejalan dengan temuan tentang manfaat understory, EFB, dan tanah hidup pada kebun sawit. ([Frontiers](#))

Sekarang bayangkan kebun lain yang dikelola berbeda. Vegetasi bawah dipertahankan secara selektif. Tanaman penutup legum ditanam pada fase awal dan dikelola agar tidak menghilang terlalu cepat. Biomassa organik dikembalikan ke kebun. Pada zona tertentu ditambahkan pohon pelengkap atau dipelihara regenerasi alami. Dalam kebun ini, tanah tidak terlalu telanjang, suhu dan kelembapan lebih stabil, serasah lebih banyak, dan mikroba memiliki lebih banyak habitat dan sumber karbon. Pada awalnya perubahan mungkin tampak kecil, tetapi setelah beberapa tahun kebun mulai menunjukkan tanah yang lebih remah, aktivitas biota yang lebih tinggi, dan risiko kerusakan ekologis yang lebih rendah. Narasi ini bukan utopia; ia merupakan sintesis yang masuk akal dari bukti tentang understory, legume cover, bahan organik, dan tree enrichment di lanskap sawit. ([Springer](#))

Pelajaran dari dua gambaran ini sederhana tetapi penting: mikrobioma tanah tidak hadir sendiri. Ia adalah hasil dari desain dan kebiasaan pengelolaan. Karena itu, sawit berkelanjutan seharusnya tidak lagi dibangun di atas logika "semakin bersih semakin baik," tetapi di atas logika "semakin hidup semakin tahan." ([ScienceDirect](#))

11. Tantangan Implementasi dan Agenda ke Depan

Meskipun arah ilmiahnya cukup jelas, implementasi di lapangan tetap menghadapi tantangan. Tantangan pertama adalah budaya pengelolaan. Banyak kebun, terutama yang mengejar efisiensi jangka pendek, masih menilai kebun dari penampilan bersih dan kemudahan akses lapangan. Ini membuat understory dan tanaman penutup sering dipersepsi sebagai pengganggu, bukan aset ekologi. Padahal, seperti ditunjukkan riset di Indonesia, justru vegetasi bawah yang terkelola dengan baik dapat memperbaiki indikator soil health tanpa otomatis merugikan performa sawit. ([ScienceDirect](#))

Tantangan kedua adalah ekspektasi yang terlalu cepat terhadap diversifikasi pohon. Ballauff dan kolega menunjukkan bahwa tiga tahun

pengayaan pohon belum cukup untuk mengubah komunitas fungi tanah secara dominan, karena kondisi abiotik dan warisan pengelolaan masih sangat kuat. Ini penting disampaikan agar kebijakan dan manajemen tidak kecewa terlalu dini. Restorasi mikrobioma tanah membutuhkan waktu, terutama bila kebun sudah lama dikelola intensif. ([MDPI](#))

Tantangan ketiga adalah keterbatasan indikator yang digunakan di lapangan. Selama ini banyak pengelola hanya memantau hasil, dosis pupuk, atau analisis hara standar. Padahal jika tema makalah ini diambil serius, maka indikator keberlanjutan perlu diperluas ke arah respirasi tanah, aktivitas fauna, kandungan bahan organik, stabilitas agregat, kelimpahan atau fungsi mikroba, dan kualitas rizosfer. RSPO 2024 sudah membuka jalan normatif ke arah ini dengan menekankan *microbiological health of the soil*, tetapi implementasinya membutuhkan alat ukur yang lebih sederhana dan terjangkau. ([RSPO](#))

Ke depan, agenda penelitian dan praktik sawit berkelanjutan perlu bergerak ke tiga arah. Pertama, memperbanyak studi jangka panjang yang menghubungkan tanaman penutup, pengayaan pohon, dan dinamika mikrobioma secara langsung. Kedua, mengembangkan paket manajemen mikrobioma yang realistis untuk *smallholders*, misalnya kombinasi understory selektif, cover crop ekonomis, dan pengembalian biomassa. Ketiga, membangun sistem pemantauan *soil health* yang menempatkan mikrobioma sebagai indikator inti, bukan tambahan. Jalan ke sawit berkelanjutan tampaknya akan semakin bersifat biologis, bukan semata kimiawi. ([ScienceDirect](#))

12. Kesimpulan

Makalah ini menunjukkan bahwa mikrobioma tanah adalah jantung yang sering tersembunyi dari sawit berkelanjutan. Riset primer memperlihatkan bahwa rizosfer dan komunitas mikroba tanah berhubungan erat dengan kesehatan tanaman, dekomposisi serasah, daur hara, struktur tanah, dan potensi pertahanan terhadap patogen. Dalam konteks itu, tanaman

penutup—baik legum, understory, maupun biomassa penutup organik—berfungsi sebagai alat rekayasa mikrobioma karena memperbaiki habitat mikroba, menambah karbon, menjaga kelembapan, dan mengaktifkan biota tanah. Diversifikasi pohon, meskipun efeknya pada fungi tanah bisa lebih lambat karena kuatnya legacy effect, tetap penting sebagai strategi jangka panjang untuk membangun kembali interaksi akar–tanah–organisme yang lebih sehat. ([Frontiers](#))

Karena itu, sawit berkelanjutan perlu bergerak dari paradigma input semata menuju paradigma biologis. Tanah tidak cukup dipupuk; ia harus dihidupkan. Kebun tidak cukup dibersihkan; ia harus diseimbangkan. Sertifikasi tidak cukup dilengkapi dokumen; ia harus didukung oleh struktur tanah, bahan organik, dan mikrobioma yang benar-benar sehat. Bila pergeseran ini dapat dilakukan, maka tanaman penutup dan diversifikasi pohon tidak lagi dibaca sebagai beban, tetapi sebagai investasi ekologis yang menjaga produktivitas sawit dari bawah permukaan. ([RSPO](#))

Glosarium

Mikrobioma tanah adalah keseluruhan komunitas mikroorganisme di dalam tanah—terutama bakteri, fungi, dan mikroba lain—beserta potensi fungsi ekologisnya. Dalam sawit, mikrobioma ini memengaruhi daur hara, dekomposisi, kesehatan akar, dan produktivitas tanaman. ([PMC](#))

Rizosfer adalah zona tanah yang dipengaruhi langsung oleh akar dan eksudat akar. Zona ini merupakan hotspot interaksi antara tanaman dan mikroba, sehingga sangat penting bagi penyerapan hara dan pertahanan biologis tanaman. ([PMC](#))

Tanaman penutup (cover crops) adalah tanaman yang dipelihara untuk menutup permukaan tanah, mengurangi erosi, menjaga kelembapan,

menambah bahan organik, dan dalam kasus legum dapat berkontribusi pada fiksasi nitrogen biologis. ([Springer](#))

Understory vegetation adalah vegetasi bawah tegakan sawit yang dapat berupa gulma fungsional, tanaman spontan, atau vegetasi terkelola lain yang dipertahankan secara selektif. ([Frontiers](#))

Diversifikasi pohon adalah penambahan atau pemeliharaan pohon non-sawit di dalam lanskap kebun, misalnya melalui tree islands, agroforestri, atau regenerasi alami. ([MDPI](#))

Legacy effect adalah pengaruh “warisan” kondisi pengelolaan atau sifat tanah sebelumnya yang tetap membentuk komunitas organisme dan fungsi ekosistem, meskipun intervensi restorasi baru sudah dilakukan. ([MDPI](#))

Plant growth-promoting bacteria (PGPB) adalah bakteri yang membantu pertumbuhan tanaman melalui pelarutan unsur, fiksasi nitrogen, sintesis fitohormon, atau penekanan patogen. ([ScienceDirect](#))

Fiksasi nitrogen biologis adalah proses pengubahan nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan tanaman melalui kerja mikroba, terutama pada asosiasi dengan tanaman legum. ([Springer](#))

Soil health adalah kapasitas tanah untuk terus berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas, kualitas air dan udara, serta kesehatan tanaman, hewan, dan manusia. ([FAOHome](#))

Daftar Pustaka (APA 7)

Ashton-Butt, A., Aryawan, A. A. K., Hood, A. S. C., Naim, M., Purnomo, D., Suhardi, Wahyuningsih, R., Willcock, S., Poppy, G. M., Caliman, J.-P., Turner, E. C., Foster, W. A., Peh, K. S.-H., & Snaddon, J. L. (2018). Understory vegetation in oil palm plantations benefits soil biodiversity and

decomposition rates. *Frontiers in Forests and Global Change*, 1, Article 10.
<https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00010>

Ballauff, J., Zemp, D. C., Schneider, D., Irawan, B., Daniel, R., & Polle, A. (2020). Legacy effects overshadow tree diversity effects on soil fungal communities in oil palm-enrichment plantations. *Microorganisms*, 8(10), 1577. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101577>

Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik kelapa sawit Indonesia 2023*. BPS.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008/2026 web edition). *What is a healthy soil?* FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026 web edition). *Global soil health*. FAO Soils Portal.

Hidayat, F., Pane, R. D. P., Sapalina, F., Listia, E., Koga, T., Winarna, Lubis, M. E. S., Oshiro, M., Sakai, K., Utami, S. N. H., & Tashiro, Y. (2024). Long-term application of organic matter improves soil properties and plant growth-promoting bacteria in soil communities of oil palm plantation. *Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2380881>

Hidayat, F., et al. (2024). Novel multifunctional plant growth-promoting bacteria isolated from the oil palm rhizosphere under long-term organic matter application. *Journal of Biotechnology*.

Kirkman, E. R., Hilton, S., Sethuraman, G., Elias, D. M. O., Taylor, A., Clarkson, J., Soh, W. T., Bass, D., Ooi, S. K., McNamara, N. P., & Bending, G. D. (2022). Diversity and ecological guild analysis of the oil palm fungal microbiome across root, rhizosphere, and soil compartments. *Frontiers in Microbiology*, 13, 792928.

Pipai, R., McNeill, A., Unkovich, M., Banabas, M., & Nelson, P. N. (2023). Biological nitrogen fixation by legume cover plants in oil palm plantations: Calibration of the ureide technique and effects of plantation age and soil

nitrate. *Plant and Soil*, 491, 665–680. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06147-8>

Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian. (2024). *Outlook kelapa sawit 2024*. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Roundtable on Sustainable Palm Oil. (2024). *2024 RSPO Principles and Criteria (Version 4.1)*. RSPO.

Sakiah, Ginting, E. N., Wahab, R., Wahyudi, E., Tambunan, A. G., & Noviana, G. (2025). Soil health under cover crops *Mucuna bracteata* and sweet potato in oil palm intercropping systems. *Malaysian Journal of Soil Science*, 29, 393–402.

Tao, H.-H., Slade, E. M., Willis, K. J., Caliman, J.-P., & Snaddon, J. L. (2016). Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.012>

Thoumazeau, A., Mettauer, R., Turinah, Junedi, H., Baron, V., Chéron-Bessou, C., & Ollivier, J. (2024). Effects of fertilization practices and understory on soil health and oil palm performances in smallholdings: An Indonesian case study. *Agricultural Systems*, 213, 103802. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103802>

Widiastuti, H., Pulunggono, H. B., Siswanto, Mubarak, H., Anwar, S., Taniwiryono, D., Sumawinata, B., Sabiham, S., & Permatasari, G. W. (2025). Beyond the controversy: Soil microbiome dynamics in oil palm vs. natural peat ecosystems. *Berita Biologi*, 24(3), 523–533. https://doi.org/10.55981/berita_biologi.2025.12564

Widyati, E., Sadino, Budiharta, S., Akbar, A., Susilo, A., Kurniawan, A., Sadili, A., Prameswari, D., Mirmanto, E., Hadi, E. E. W., Siregar, M., Wardani, M., Yuniarti, N., Mindawati, N., Pasaribu, P. H. P., Irianto, R. S. B., Nisaa', R. M., Hartatik, S. E., Suharti, S., Sutiyono, Kalima, T., Sari, U. K., Darwiati, W., Herningtyas, W., Baral, H., Paradelo, M., & Santika, T. (2025). Changes in

soil-root-organism interactions following tropical forest conversion to tree and oil palm plantations. *Applied Soil Ecology*, 213, 106253.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106253>

Zemp, D. C., et al. (2023). Tree islands enhance biodiversity and functioning in oil palm landscapes. *Nature*, 618, 316–321.

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06086-5>

Copilot for this article: ChatGPT 5.4. Thinking (2026). Access date: 30 March 2026. Author's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))

<https://chatgpt.com/c/69c9f7ea-07f8-839d-8439-53545fd6934d>