

Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui **Agroforestry**:

Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara



Rudy C Tarumingkeng

Rudy C Tarumingkeng: **Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara**

Oleh:

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

Professor of Management NUP: 9903252922

Rektor, Universitas Cenderawasih, Papua (1978-1988, dan
Rektor, Kampus AGRO Manokwari sekarang Universitas Papua Manokwari)

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

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

Ketua Dewan Guru Besar, IPB-University, Bogor (2005-2006)

AI - Data Analyst, dan Ketua Senat Akademik, IBM-ASMI, Jakarta 2024-

© RudyCT Academic Series

rudyc75@gmail.com

20 Januari 2025

Bogor, Indonesia

MEMBANGUN KESUBURAN TANAH DI KEBUN SAWIT MELALUI AGROFORESTRY

Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

1) Pengantar: Mengapa “Kesuburan Tanah” Menjadi Isu Strategis di Kebun Sawit

Dalam praktik perkebunan sawit, produktivitas sering dibaca dari dua angka: ton TBS per hektare dan rendemen CPO. Namun di balik angka-angka itu ada fondasi yang jauh lebih menentukan: kualitas tanah sebagai “mesin biologis” yang bekerja tanpa henti. Ketika tanah sehat, kebun sawit cenderung stabil—produksi tidak mudah jatuh saat musim kering, serangan hama/penyakit tidak cepat meledak, dan kebutuhan pupuk tidak terus meningkat dari tahun ke tahun. Sebaliknya, ketika tanah menurun—bahan organik menipis, struktur rusak, pori-pori tertutup, mikroba melemah—maka kebun menjadi rapuh: setiap gangguan kecil (kekeringan, hujan ekstrem, erosi) berubah menjadi kehilangan hasil yang besar.

Di sinilah agroforestry menjadi relevan. Agroforestry (sistem budidaya yang menggabungkan pohon/semak/tanaman penutup dengan komoditas utama) bukan sekadar “diversifikasi tanaman”, melainkan strategi rekayasa ekologi untuk membangun kembali tiga pilar kesuburan tanah:

1. **Kesuburan kimia** (ketersediaan hara, pH, kapasitas tukar kation/KTK, kejenuhan basa),

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

2. **Kesuburan fisik** (struktur agregat, porositas, infiltrasi, ketahanan erosi),
3. **Kesuburan biologis** (aktivitas mikroba, fauna tanah, siklus karbon dan nitrogen).

Tiga komponen kunci yang sering menentukan keberhasilan agroforestry pada sawit ialah: **legum (penambat N dan penghasil biomassa), serasah (litter/mulsa organik), dan siklus hara (nutrient cycling)**. Ketiganya bekerja sebagai satu sistem: legum menghasilkan biomassa, biomassa menjadi serasah, serasah didekomposisi biota tanah, lalu hara dilepas kembali dan disirkulasikan oleh akar sawit serta komponen pohon/semak dalam agroforestry.

2) Memahami Kesuburan Tanah: Dari “Hara” ke “Fungsi Ekosistem”

Kesuburan tanah sering disalahpahami sebagai “berapa banyak pupuk yang diberikan”. Padahal tanah subur adalah tanah yang mampu menjalankan fungsi-fungsi berikut:

- **Menyediakan hara secara bertahap** (tidak meledak sesaat lalu hilang tercuci).
- **Menahan air dan melepasnya perlahan** saat tanaman membutuhkan (buffer kekeringan).
- **Menyediakan ruang udara** bagi akar dan mikroba (tanah tidak “mampat”).
- **Mengaktifkan proses biologis:** mineralisasi bahan organik, fiksasi nitrogen, pembentukan agregat, penekanan patogen.
- **Menahan kehilangan hara** melalui erosi, pencucian (leaching), dan volatilisasi.

Dari kacamata manajemen, kesuburan tanah dapat dipandang sebagai **aset produktif jangka panjang**. Pupuk adalah “biaya operasional”, sedangkan bahan organik dan biota tanah adalah “modal alam” yang

menentukan efisiensi biaya operasional itu. Agroforestry bertujuan menambah “modal alam” tersebut.

3) Sawit sebagai Tanaman Berbiaya Hara Tinggi: Mengapa Siklus Hara Harus Dirancang

Kelapa sawit adalah tanaman yang produktif dan berumur panjang, tetapi juga **menuntut aliran hara yang konsisten**. Dalam sistem monokultur, aliran hara sering bersifat “linear”: pupuk masuk → tanaman menyerap → hasil panen keluar → sebagian hara hilang. Jika tidak ada mekanisme pengembalian (return) yang kuat, tanah menjadi “rekening tabungan” yang terus ditarik.

Siklus hara yang sehat di kebun sawit memiliki komponen:

1. **Input:** pupuk anorganik, kompos/organik, deposisi atmosfer, fiksasi N oleh legum.
2. **Transformasi:** dekomposisi serasah, mineralisasi, immobilisasi mikroba, pembentukan humus.
3. **Serapan tanaman:** akar sawit + akar tanaman lain.
4. **Output:** panen TBS, erosi, leaching (terutama N dan K), volatilisasi N.
5. **Recycling:** pelepasan hara dari serasah pelepah, akar mati (root turnover), mulsa, biomassa legum.

Agroforestry memperkuat komponen nomor (2) dan (5), serta menekan kehilangan nomor (4).

BAGIAN A — PERAN LEGUM: “PABRIK NITROGEN” DAN “MESIN BIOMASSA”

4) Legum sebagai Penambat Nitrogen: Prinsip Ilmiah yang Mengubah Biaya Pupuk

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

Legum (kacang-kacangan) memiliki kemampuan unik: bersimbiosis dengan bakteri penambat nitrogen (misalnya kelompok rhizobia) yang membentuk bintil akar. Di dalam bintil, nitrogen udara (N₂) diubah menjadi bentuk yang bisa dimanfaatkan tanaman. Dampaknya:

- **Menambah nitrogen “baru”** ke dalam sistem kebun, bukan sekadar mendaur ulang.
- **Mengurangi ketergantungan pupuk N** bila dikelola baik.
- **Memperkaya bahan organik** karena legum umumnya menghasilkan biomassa tinggi.

Namun, perlu dicatat: nitrogen hasil fiksasi tidak “langsung” masuk ke sawit seperti pupuk urea. Ia masuk melalui **jalur ekologis**: biomassa legum dipangkas/mati → menjadi serasah → didekomposisi → nitrogen dilepas bertahap → diserap sawit. Ini berarti manajemen legum harus memikirkan **waktu, lokasi, dan bentuk pelepasan N**.

5) Legum sebagai Tanaman Penutup Tanah: Mengunci Erosi, Menghidupkan Tanah

Selain fungsi nitrogen, legum penutup tanah berperan sebagai *soil engineer*:

- Menutup permukaan tanah sehingga **energi pukulan hujan** berkurang → erosi turun.
- Menambah akar halus yang membantu **agregasi tanah** (struktur menjadi remah).
- Meningkatkan **infiltrasi** dan menurunkan limpasan.
- Menyediakan habitat bagi fauna tanah (cacing, arthropoda) yang mempercepat pembentukan pori.

Pada lahan miring atau tanah yang mudah memadat, manfaat fisik ini sering sama pentingnya dengan manfaat nitrogen.

6) Contoh Legum yang Lazim untuk Sawit: Pilihan Praktis dan Logikanya

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

Dalam konteks Indonesia, beberapa legum penutup tanah dikenal luas di perkebunan:

- **Mucuna bracteata**: agresif menutup tanah, biomassa tinggi, efektif menekan gulma.
- **Pueraria phaseoloides, Centrosema pubescens, Calopogonium caeruleum**: penutup tanah klasik, adaptif di berbagai kondisi.
- **Arachis pintoi** (kacang hias/penutup): lebih “rapi”, toleran pemangkasan, cocok untuk zona tertentu.

Untuk agroforestry, legum dapat juga berupa **pohon/semak leguminosa**:

- **Gliricidia sepium, Leucaena leucocephala, Calliandra calothyrsus** (sering dipakai sebagai pagar hidup/hedgerow, sumber biomassa pangkasan, peneduh terbatas).

Kunci pemilihan bukan “mana yang paling terkenal”, melainkan kecocokan dengan tujuan:

- Jika target utama **mulsa + kontrol gulma** → pilih penutup tanah biomassa tinggi.
- Jika target utama **biomassa pangkasan terencana** → pilih legum semak/pohon yang mudah dipangkas.
- Jika target utama **konservasi lereng** → kombinasikan penutup tanah + hedgerow kontur.

7) Risiko dan Trade-off Legum: Ilmu Kesuburan Selalu Mengandung Kompromi

Legum bukan solusi ajaib. Beberapa risiko yang harus dikelola:

1. **Kompetisi air** pada musim kering jika legum terlalu dominan dan tidak dipangkas.
2. **Kompetisi hara** pada fase awal pembentukan kebun bila tanah sangat miskin.

3. **Potensi menjadi inang hama tertentu** (tergantung spesies dan konteks lokal).
4. **Manajemen kebakaran:** biomassa kering bisa meningkatkan risiko bila tidak dikelola.

Karena itu, legum harus ditempatkan sebagai komponen manajemen: ada fase **establishment**, **pemeliharaan**, dan **pengendalian** (pemangkasan/penjarangan).

BAGIAN B — SERASAH: “BANK ORGANIK” YANG MEMBANGUN HUMUS, STRUKTUR, DAN MIKROBIOMA

8) Serasah Bukan Sampah: Ia Infrastruktur Ekologi Kebun

Serasah (litter) mencakup pelepah gugur, daun, ranting, sisa pangkasan, biomassa legum, dan mulsa organik lainnya. Dalam kebun sawit, serasah memiliki beberapa peran fundamental:

- **Sumber karbon:** bahan bakar utama mikroba tanah.
- **Pembentuk humus:** fraksi stabil bahan organik yang meningkatkan KTK dan retensi air.
- **Pelindung permukaan tanah:** menurunkan evaporasi, menjaga suhu tanah, menekan erosi.
- **Pelepas hara bertahap:** terutama N, P, K, Ca, Mg, dan unsur mikro.

Secara manajerial, serasah adalah “aset yang terlihat sederhana” tetapi efeknya sistemik. Banyak kebun mengalami penurunan kesuburan karena serasah dianggap mengganggu akses panen atau dianggap sumber hama, lalu dibersihkan berlebihan.

9) Dekomposisi Serasah: Teater Mikroba yang Mengatur Kecepatan Hara

Ketika serasah jatuh, ia tidak otomatis menjadi hara. Ia harus diurai. Kecepatan penguraian dipengaruhi oleh:

Rudy C Tarumíngkeng: **Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara**

- **Rasio C:N:** bahan kaya nitrogen (legum muda) terurai lebih cepat; bahan berkayu terurai lebih lambat.
- **Kelembapan:** terlalu kering → mikroba pasif; terlalu jenuh air → anaerob → proses berbeda.
- **pH tanah:** ekstrem asam menghambat sebagian mikroba.
- **Keanekaragaman biota:** cacing tanah, rayap, jamur, bakteri—masing-masing “spesialis”.

Agroforestry membantu menyediakan “menu serasah” yang lebih beragam: ada serasah cepat terurai (legum) dan serasah lambat terurai (daun pohon tertentu). Kombinasi ini ideal: yang cepat menyediakan hara segera, yang lambat membangun humus jangka panjang.

10) Praktik “Pengelolaan Pelepah” pada Sawit: Dari Tumpukan Menjadi Sistem

Salah satu sumber serasah terbesar adalah pelepah hasil pemangkasan. Banyak kebun melakukan **frond stacking** (pelepah ditumpuk di jalur tertentu). Jika dilakukan strategis, tumpukan pelepah menjadi:

- zona tinggi bahan organik,
- zona kelembapan lebih stabil,
- habitat mikroba/biota,
- “buffer” erosi.

Namun pengaturan lokasi tumpukan penting. Pada lahan miring, tumpukan pelepah bisa dipakai sebagai penguat kontur. Pada tanah rawan genangan, penempatan harus memperhatikan drainase agar tidak menciptakan titik anaerob berkepanjangan.

11) Serasah dari Legum: Mulsa “Berkualitas Tinggi”

Keunggulan serasah legum ialah:

- kandungan N relatif tinggi → mempercepat mineralisasi,

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

- tekstur daun lebih lunak → cepat menjadi sumber makanan mikroba,
- mempercepat pembentukan agregat lewat “lem biologis” (eksopolisakarida mikroba).

Dalam sistem agroforestry, Anda bisa merancang **kalender biomassa**: kapan legum dipangkas sehingga serasah tersedia menjelang fase kebutuhan hara tinggi pada sawit (misalnya fase pembentukan bunga/buah). Ini mirip manajemen supply chain: biomassa sebagai input, mikroba sebagai pabrik, tanah sebagai gudang, sawit sebagai konsumen.

BAGIAN C — SIKLUS HARAH: “AKUNTANSI EKOLOGI” UNTUK MENJAGA NERACA POSITIF

12) Siklus Hara sebagai Neraca: Input–Proses–Output

Cara paling jernih memahami kesuburan tanah adalah memakai logika neraca:

- Jika **output** > **input** secara kronis, tanah akan menurun.
- Jika **input dibangun** melalui serasah dan fiksasi N, serta kehilangan ditekan, maka sistem stabil.

Agroforestry memperkuat input internal:

- **Fiksasi N** (legum),
- **Daur ulang hara** (serasah dan akar),
- **Penahanan hara** (humus meningkatkan KTK, akar beragam menyerap dari berbagai kedalaman),
- **Penekanan kehilangan** (erosion control, improved infiltration reducing runoff).

13) Peran Akar: Arsitektur Bawah Tanah yang Sering Tak Terlihat

Dalam agroforestry, akar bukan hanya alat menyerap air, tetapi juga **arsitek siklus hara**:

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

- Akar dalam dari pohon tertentu dapat “mengangkat” hara dari lapisan bawah (nutrient pumping).
- Akar halus memperbanyak zona penyerapan dan menyediakan eksudat yang memberi makan mikroba.
- Root turnover (akar mati dan tumbuh kembali) menjadi sumber bahan organik yang sangat efektif karena langsung berada di dalam tanah (lebih cepat menjadi humus dibanding daun di permukaan).

Dengan kata lain, agroforestry mengubah tanah dari sistem “satu akar dominan” menjadi “jaringan akar multi-lapis”.

14) Mikroba dan Mikoriza: Pekerja Tak Bergaji yang Mengubah Efisiensi Pupuk

Banyak hara—terutama fosfor—sering terikat dalam bentuk yang sulit diserap. Mikroba dan jamur mikoriza membantu:

- melarutkan dan memobilisasi P,
- meningkatkan penyerapan unsur mikro,
- memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres.

Serasah menyediakan karbon untuk mikroba; legum menyediakan N dan serasah berkualitas; agroforestry menyediakan mikrohabitat yang lebih stabil. Kombinasi ini menumbuhkan “ekonomi mikroba” yang membuat pupuk lebih efisien.

BAGIAN D — DESAIN AGROFORESTRY PADA KEBUN SAWIT: MODEL-MODEL PRAKTIS

15) Prinsip Desain: Jangan Mengganggu Sawit, tetapi Perkuat Tanah

Sistem agroforestry pada sawit harus realistis: sawit tetap komoditas utama, sehingga desain perlu menjaga:

Rudy C Tarumíngkeng: **Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara**

- **Cahaya** (sawit butuh intensitas cahaya tinggi; peneduh harus dibatasi dan dikelola).
- **Ruang tajuk** (hindari kompetisi tajuk yang menghambat panen dan pemeliharaan).
- **Akses operasional** (jalan panen, pemupukan, dan pengendalian gulma).
- **Air** (komponen tambahan tidak boleh “menguras” air pada puncak kemarau).

Karena itu, agroforestry sawit umumnya lebih cocok berupa:

1. **Penutup tanah legum + semak/pohon di zona tertentu** (riparian buffer, kontur, tepi blok),
2. **Alley system terbatas** (barisan pohon/semak pada jarak aman),
3. **Multi-strata ringan** (pohon bernilai ekonomi tetapi tajuk terkendali).

16) Model 1: Legume Cover Crop sebagai Tulang Punggung

Ini model paling umum dan sering menjadi “langkah pertama”:

- Legum menutup tanah di piringan/antarbaris.
- Pelepah disusun strategis sebagai mulsa.
- Pemupukan anorganik dioptimalkan berbasis uji tanah/daun (bukan kebiasaan).

Kapan cocok?

- untuk kebun yang mulai menunjukkan gejala tanah keras, erosi, bahan organik rendah.
- untuk kebun muda hingga menghasilkan, dengan penyesuaian pemangkasan.

17) Model 2: Hedgerow Legum di Kontur untuk Lahan Miring

Pada lahan berlereng, desain kontur adalah kunci:

Rudy C Tarumíngkeng: **Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara**

- Legum semak/pohon (misal Gliricidia/Calliandra) ditanam mengikuti garis kontur.
- Pangkasan rutin dijadikan mulsa di bawah sawit atau di jalur rawan erosi.
- Penutup tanah legum tetap dipertahankan di antarbaris.

Manfaat utama: menahan erosi, memperbaiki infiltrasi, dan membangun bahan organik pada jalur kontur.

18) Model 3: Agroforestry Bernilai Ekonomi (Buah/Kayu) dengan Kepadatan Rendah

Untuk kebun rakyat (smallholders), sering ada motivasi: selain tanah membaik, ada pendapatan tambahan. Pilih pohon bernilai ekonomi dengan prinsip:

- tajuk bisa dikendalikan (pemangkasan),
- perakaran tidak terlalu agresif di zona piringan,
- tidak menjadi pesaing berat untuk cahaya.

Pohon bisa ditempatkan di **tepi blok** atau **zona khusus**. Kuncinya bukan banyaknya jenis, tetapi *ketepatan tata letak*.

19) Zona Riparian dan Biodiversity Strip: Memulihkan Fungsi Lanskap

Agroforestry juga dapat difokuskan pada zona sempadan sungai/anak sungai:

- vegetasi campuran memperkuat tebing, mengurangi sedimentasi,
- serasah dan akar menahan hara agar tidak “lari” ke badan air,
- meningkatkan biodiversitas dan jasa ekosistem.

Ini bukan hanya isu lingkungan, tetapi strategi menjaga “modal tanah” agar tidak hilang lewat erosi dan limpasan.

BAGIAN E — PRAKTIK MANAJEMEN INTI: DARI TANAM SAMPAI MONITORING

20) Tahap Implementasi: Roadmap Lapangan yang Realistis

Tahap 1: Diagnosa (baseline)

- Uji tanah (pH, C-organik, KTK, P tersedia, K, Ca, Mg, tekstur)
- Pengamatan fisik: infiltrasi sederhana, tingkat pemadatan, indikasi erosi
- Indikator biologis: cacing tanah, serasah cepat habis atau tidak, bau tanah

Tahap 2: Desain spesies dan tata letak

- pilih legum penutup + (opsional) legum semak/pohon di kontur/tepi
- tentukan zona mulsa pelepah
- rancang jalur akses panen

Tahap 3: Establishment

- tanam di awal musim hujan untuk mengurangi risiko gagal tumbuh
- kontrol gulma selektif, jangan “membunuh” semua vegetasi

Tahap 4: Pemeliharaan adaptif

- pemangkasan legum sesuai musim dan kondisi air
- penyesuaian dosis pupuk N secara bertahap (jangan ekstrem mendadak)
- pertahankan serasah sebagai mulsa

Tahap 5: Monitoring dan perbaikan

- pantau indikator tanah minimal 6–12 bulan sekali

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

- lakukan koreksi: jika terlalu rimbun → pangkas; jika serasah kurang → tambah mulsa/kompos; jika pH terlalu asam → pengapuran terukur.

21) Indikator Keberhasilan: Soil Health yang Bisa Dilihat Petani dan Manajer

Indikator cepat di lapangan (visual/praktis):

- tanah lebih remah, tidak keras saat dicangkul ringan
- air hujan cepat meresap, genangan berkurang
- erosi di parit/jalur panen menurun
- jumlah cacing tanah meningkat
- gulma agresif menurun karena tertutup legum

Indikator laboratorium (lebih presisi):

- C-organik meningkat
- KTK membaik
- pH bergerak ke rentang optimal
- P tersedia meningkat (sering karena aktivitas biologi membaik)
- perbaiki rasio Ca/Mg/K pada tanah tertentu

BAGIAN F — STUDI KASUS NARATIF (GAYA LAPANGAN INDONESIA)

22) Kisah 1: Kebun Rakyat di Riau—Dari Tanah “Panas” ke Tanah “Hidup”

Seorang petani sawit kebun rakyat di dataran rendah Riau mengeluhkan pola yang berulang: pupuk ditambah, biaya naik, tetapi produksi tidak stabil. Tanahnya tampak “panas” dan miskin serasah—permukaan terbuka, cepat kering, dan setelah hujan terbentuk kerak. Ia kemudian mencoba pendekatan agroforestry minimalis: menanam penutup tanah legum di antarbaris, mengubah kebiasaan

“membersihkan bersih” menjadi “membersihkan selektif”, serta menata pelepah sebagai mulsa.

Enam bulan pertama belum dramatis; tetapi satu tahun kemudian ia melihat perubahan yang “terukur oleh mata”: tanah lebih lembap, cacing tanah mulai banyak, dan rumput liar yang biasanya meledak berkurang karena tertutup. Ia tidak langsung memotong pupuk besar-besaran—hanya menurunkan bertahap sesuai respon tanaman. Pada musim kering berikutnya, kebunnya tidak seterpuruk sebelumnya. Dalam narasi manajemen, ia sebenarnya sedang membangun *resiliensi*—bukan hanya mengejar puncak produksi, tetapi mengurangi volatilitas.

23) Kisah 2: Lahan Miring di Lampung—Hedgerow Kontur sebagai “Bendungan Kecil” di Tanah

Pada kebun di wilayah bergelombang, erosi menjadi “pajak tersembunyi”: tanah halus dan bahan organik terbawa turun, lalu bagian atas menjadi miskin. Sebuah kebun menerapkan hedgerow legum mengikuti kontur. Pangkasan dijadikan mulsa di jalur rawan aliran permukaan. Hasil paling cepat terlihat bukan pada angka produksi, melainkan pada **parit**: sedimentasi menurun, aliran menjadi lebih jernih, dan tanah di bagian atas tidak lagi “habis” setelah hujan besar.

BAGIAN G — DAMPAK EKONOMI DAN KEBERLANJUTAN: MENGAPA INI MASUK AKAL SECARA BISNIS

24) Efisiensi Pupuk, Stabilitas Produksi, dan Nilai Tambah

Agroforestry yang fokus pada legum–serasah–siklus hara biasanya menghasilkan tiga bentuk “return”:

1. **Efisiensi biaya:** pupuk N bisa lebih hemat bertahap, dan hara lain lebih efektif karena tanah memegang hara lebih baik.
2. **Stabilitas hasil:** kebun lebih tahan terhadap musim ekstrem.

3. **Nilai tambah lanskap:** biodiversitas meningkat, risiko erosi dan konflik lingkungan menurun (relevan untuk standar keberlanjutan).

Dalam bahasa manajemen strategik, ini mirip investasi pada *kapabilitas inti* (core capability): tanah sehat menciptakan keunggulan biaya dan keunggulan ketahanan sekaligus.

BAGIAN H — AGENDA RISET DAN INOVASI (OPSIONAL UNTUK PROPOSAL)

Jika Bapak ingin mengubahnya menjadi riset, beberapa pendekatan yang kuat:

- **Nutrient budget** (neraca N–P–K): input vs output panen vs perubahan stok tanah.
- **Litterbag decomposition:** mengukur laju dekomposisi serasah legum vs pelepah sawit.
- **Soil Health Index:** gabungan indikator fisik-kimia-biologi.
- **Plot erosi + pengukuran limpasan** pada lahan miring.
- **Uji daun sawit** untuk melihat status hara aktual.

Penutup: Kesuburan Tanah sebagai “Proyek Peradaban Kecil” di Kebun Sawit

Membangun kesuburan tanah lewat agroforestry bukan proyek instan. Ia adalah perubahan paradigma: dari kebun sebagai “pabrik” yang diberi input pupuk, menjadi kebun sebagai **ekosistem produksi** yang memiliki daur ulang internal. Legum menambah nitrogen dan biomassa, serasah membangun humus dan struktur, dan siklus hara memastikan hara tidak hilang sia-sia. Pada akhirnya, tanah yang subur bukan hanya memberi produksi, tetapi memberi *ketenangan manajerial*: kebun lebih stabil, biaya lebih terkendali, dan keberlanjutan menjadi nyata—bukan slogan.

Refleksi & Pertanyaan Diskusi

1. Di kebun sawit, praktik mana yang paling sering “mematikan” serasah dan biota tanah? Mengapa itu terjadi secara sosial/operasional?
 2. Jika pupuk N dikurangi, indikator apa yang harus dipantau agar keputusan tetap aman?
 3. Untuk lahan miring, mana yang lebih dahulu: hedgerow kontur atau penutup tanah? Jelaskan logikanya.
 4. Bagaimana merancang agroforestry agar menambah pendapatan tanpa mengurangi cahaya untuk sawit?
 5. Dalam perspektif keberlanjutan, bagaimana Anda menjelaskan “nilai ekonomi tanah sehat” kepada petani atau manajer kebun?
-

Refleksi dan Diskusi

“Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara”

A. Refleksi Konseptual: Mengubah Cara Pandang dari “Input” ke “Ekologi Produksi”

Dalam banyak kebun sawit, kesuburan tanah dipahami sebagai persoalan *input*: berapa karung pupuk yang masuk, berapa kali penyemprotan dilakukan, seberapa bersih piringan dibuka. Cara pandang ini mudah dipraktikkan, tetapi sering menimbulkan paradoks: biaya meningkat sementara respons tanaman makin kecil. Pada titik itu, masalahnya bukan lagi “kurang pupuk”, melainkan **tanah kehilangan kemampuan biologisnya untuk mengolah dan menahan hara**.

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

Agroforestry menawarkan refleksi yang lebih dalam: kebun bukan sekadar lahan produksi, tetapi **ekosistem buatan** yang dapat dirancang agar memiliki mekanisme internal untuk menjaga produktivitas. Legum, serasah, dan siklus hara bukan sekadar komponen teknis, melainkan “bahasa” ekologi yang menyatakan bahwa tanah membutuhkan:

1. **sumber karbon** (energi bagi mikroba),
2. **sumber nitrogen biologis** (penambah stok N sistem),
3. **perlindungan permukaan tanah** (pengaman fisik),
4. **jaringan akar multi-lapis** (pengambil dan pendistribusi hara).

Refleksi paling mendasar adalah ini: **pupuk dapat mempercepat pertumbuhan, tetapi hanya tanah sehat yang membuat pertumbuhan itu stabil dan efisien.**

B. Refleksi Praktik Lapangan: “Bersih” Tidak Selalu “Sehat”

Budaya “kebun bersih” sering menjadi norma estetika dan norma kontrol. Piringan bersih dianggap tanda kebun terawat. Namun dari kacamata ilmu tanah, “bersih total” berarti:

- permukaan tanah terbuka → pukulan hujan langsung menghancurkan agregat,
- evaporasi meningkat → tanah cepat kering,
- bahan organik minim → mikroba kekurangan energi,
- siklus hara menjadi linear → kehilangan hara lewat limpasan/leaching.

Di sinilah diskusi manajerial menjadi penting: keputusan lapangan sering didorong oleh *kebiasaan*, bukan oleh *indikator tanah*. Jika keberhasilan hanya diukur dari kerapian visual, maka praktik yang merusak tanah bisa terus diulang dan dianggap benar.

Pertanyaan reflektif:

Apakah standar “kebun rapi” perlu didefinisikan ulang menjadi “kebun sehat”—dengan indikator yang dapat dipantau?

C. Refleksi Etika dan Keberlanjutan: Tanah sebagai Amanah Antar-Generasi

Kesuburan tanah adalah modal yang diwariskan. Ketika bahan organik habis atau lapisan atas tererosi, dampaknya tidak hanya dirasakan musim ini, tetapi menekan produktivitas jangka panjang. Dalam konteks keberlanjutan, agroforestry adalah strategi yang menegaskan **etika produksi**: mengambil hasil sambil memulihkan sistem pendukung hasil.

Diskusi nilai:

- Apakah kita melihat tanah hanya sebagai “media tanam”, atau sebagai “organisme sosial-ekologis” yang hidup?
 - Seberapa besar tanggung jawab manajemen kebun untuk mengembalikan minimal setara dengan yang diambil lewat panen?
-

D. Tema Diskusi Terstruktur (untuk kelas, FGD, atau workshop)

1) Legum: Solusi Biologis atau Beban Operasional?

Pokok diskusi:

Legum menambah nitrogen dan biomassa, tetapi juga memerlukan pengelolaan (pemangkasan, kontrol dominansi).

Pertanyaan diskusi:

1. Kapan legum berubah dari “pembantu” menjadi “pesaing” sawit (air/cahaya/hara)?
2. Bagaimana menentukan intensitas pemangkasan agar legum tetap produktif sebagai pemasok serasah?

3. Jika petani ingin hasil cepat, bagaimana menjelaskan bahwa manfaat legum bersifat bertahap tetapi stabil?

Kasus mini (naratif):

Di kebun rakyat, legum tumbuh subur saat musim hujan dan menutup gulma. Tetapi memasuki kemarau, sebagian petani mengeluh sawit “lesu”. Diskusikan kemungkinan penyebab (kompetisi air, pemupukan tidak disesuaikan, legum terlalu tebal), dan rancang tindakan korektif tanpa membuang legum sepenuhnya.

2) Serasah: “Gangguan Panen” atau “Bank Hara”?

Pokok diskusi:

Serasah sering dianggap mengganggu, padahal ia memperbaiki tanah.

Pertanyaan diskusi:

1. Apa dampak jangka panjang jika pelepah dan biomassa selalu dibakar atau dibuang?
2. Bagaimana menata serasah agar tidak menghambat akses panen, tetapi tetap berfungsi sebagai mulsa?
3. Apakah “frond stacking” perlu pola tertentu pada lahan miring vs datar?

Kasus mini:

Mandor meminta piringan bersih untuk memudahkan pemupukan. Namun tanah menjadi keras dan mudah tererosi. Diskusikan kompromi desain: zona bersih terbatas + zona mulsa + jalur akses.

3) Siklus Hara: Mengapa Kebun Bisa “Boros Pupuk”?

Pokok diskusi:

Banyak kebun tidak kekurangan pupuk, tetapi *kehilangan hara* lebih besar daripada hara yang dimanfaatkan.

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

Pertanyaan diskusi:

1. Pada kondisi apa nitrogen paling banyak hilang (leaching/volatilisasi)?
2. Apa peran humus dalam “menahan” hara?
3. Mengapa penambahan bahan organik dapat meningkatkan efisiensi pupuk P dan K?

Latihan sederhana:

Buat neraca hara konseptual: input (pupuk + fiksasi N + kompos) vs output (panen + erosi + leaching). Identifikasi titik kehilangan terbesar di kebun setempat.

4) Agroforestry sebagai Desain: “Seberapa Banyak Pohon Tambahan Itu Aman?”

Pokok diskusi:

Agroforestry sawit harus menjaga cahaya dan operasional.

Pertanyaan diskusi:

1. Apa prinsip tata letak agar komponen pohon/semak tidak menurunkan produktivitas sawit?
2. Lebih aman menempatkan pohon tambahan di mana: tepi blok, kontur, atau riparian? Mengapa?
3. Bagaimana menilai trade-off antara pendapatan tambahan vs risiko kompetisi cahaya?

Kasus mini:

Kelompok tani ingin menanam pohon bernilai ekonomi di seluruh blok. Diskusikan risiko tajuk dan panen. Rancang alternatif: penanaman zonal (tepi/riparian/kontur) + penutup tanah legum sebagai “inti” program.

5) Dimensi Manajerial: Mengelola Perubahan Perilaku di Kebun

Pokok diskusi:

Agroforestry sering gagal bukan karena teknis, tetapi karena "manajemen perubahan".

Pertanyaan diskusi:

1. Resistensi apa yang paling umum muncul (takut hama, takut biaya, takut tidak rapi)?
2. Strategi apa yang efektif untuk mengubah kebiasaan "bersih total" menjadi "bersih selektif"?
3. Indikator apa yang perlu ditampilkan agar pekerja/petani melihat bukti manfaat?

Refleksi organisasi:

Rancang "dashboard sederhana" 5 indikator (misalnya: infiltrasi, erosi parit, C-organik, jumlah cacing, stabilitas produksi musim kering) yang dapat memotivasi perubahan perilaku.

E. Pertanyaan Diskusi Tingkat Lanjut (untuk riset atau tesis)

1. Bagaimana hubungan antara **keragaman serasah** (cepat vs lambat terurai) dengan pembentukan **humus stabil**?
2. Apakah sistem legum tertentu lebih efektif pada tanah mineral dibanding gambut? Mengapa?
3. Bagaimana mengukur kontribusi **fiksasi N** terhadap penghematan pupuk tanpa menurunkan hasil?
4. Model ekonomi mana yang paling tepat untuk menilai "nilai tanah sehat": NPV, biaya siklus hidup (LCC), atau analisis risiko?
5. Bagaimana agroforestry mempengaruhi *carbon footprint* kebun dan peluang insentif karbon?

F. Penutup Reflektif: Tanah Sehat sebagai Bentuk Kepemimpinan Ekologis

Agroforestry pada sawit dapat dipahami sebagai praktik “kepemimpinan ekologis”: keputusan hari ini membentuk kemampuan tanah menolong kebun di masa depan. Legum, serasah, dan siklus hara bekerja pelan tetapi konsisten—mereka tidak memberi efek instan seperti pupuk dosis tinggi, namun memberi sesuatu yang lebih strategis: **ketahanan sistem produksi**.

Jika kebun sawit adalah organisasi, maka tanah adalah budaya kerjanya: tidak terlihat setiap hari, tetapi menentukan kualitas semua hasil. Mengelola kesuburan tanah berarti mengelola masa depan.

Glosarium

Agregat tanah: Gugusan partikel tanah (pasir–debu–liat) yang terikat menjadi struktur remah; stabilitas agregat menentukan infiltrasi, aerasi, dan ketahanan erosi. (bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com)

Agroforestry: Sistem pengelolaan lahan yang mengintegrasikan komponen berkayu (pohon/semak) dengan tanaman budidaya (mis. sawit) untuk mengoptimalkan produksi sekaligus fungsi ekologis seperti siklus hara dan konservasi tanah. ([World Agroforestry](https://www.worldagroforestrycentre.org/))

Alley cropping / sistem lorong: Pola agroforestry dengan barisan pohon/semak (sering legum) membentuk “lorong” tempat tanaman

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

utama tumbuh; biomassa pangkasan digunakan sebagai mulsa/green manure. ([World Agroforestry](#))

Aliran permukaan (runoff): Air hujan yang tidak meresap dan mengalir di permukaan; membawa partikel tanah dan hara (awal proses erosi). ([ResearchGate](#))

Bahan organik tanah (Soil Organic Matter/SOM): Campuran residu tanaman/hewan, biomassa mikroba, dan humus; meningkatkan KTK/CEC, retensi air, serta aktivitas biologi tanah. ([toc.library.ethz.ch](#))

Biomassa mikroba tanah (microbial biomass): "Stok hidup" mikroorganisme tanah yang aktif mendekomposisi serasah dan menggerakkan siklus N; indikator penting kesehatan tanah. ([Springer](#))

Bintil akar (root nodules): Struktur pada akar legum tempat bakteri penambat N hidup; pusat proses fiksasi nitrogen biologis. ([Springer](#))

Bulk density (BD)/kerapatan isi: Massa tanah kering per volume; BD tinggi menandakan tanah padat sehingga akar dan infiltrasi air terhambat. ([Springer](#))

CEC/KTK (Kapasitas Tukar Kation): Kemampuan tanah menahan kation hara (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+); meningkat dengan bahan organik dan liat aktif. ([toc.library.ethz.ch](#))

Denitrifikasi: Proses mikroba mengubah nitrat (NO_3^-) menjadi gas (N_2/N_2O) pada kondisi miskin oksigen; berkontribusi pada kehilangan N.

Dekomposisi: Penguraian serasah oleh mikroba dan fauna tanah hingga menjadi bentuk mineral (hara tersedia) dan humus. ([World Agroforestry](#))

Erosi: Hilangnya tanah permukaan akibat runoff/angin; membawa bahan organik dan hara sehingga menurunkan kesuburan. ([ResearchGate](#))

Eksudat akar: Senyawa organik yang dikeluarkan akar; "makanan" mikroba dan pemicu pembentukan agregat/aktivitas biologis tanah.

Fiksasi nitrogen biologis (BNF): Konversi N_2 atmosfer menjadi N tersedia (mis. amonia) oleh bakteri penambat N—umumnya bersimbiosis dengan legum. ([Springer](#))

Fronnd stacking: Penataan pelepah sawit (umumnya disusun pada jalur/gawangan tertentu) sebagai mulsa untuk menjaga kelembapan, menambah bahan organik, dan memperkuat siklus hara. ([Springer](#))

Green manure/pupuk hijau: Biomassa tanaman (sering legum) yang dikembalikan ke tanah (dipangkas/dibenamkan) untuk menambah N dan bahan organik.

Humus: Fraksi SOM yang stabil (terdekomposisi lanjut), berperan besar pada KTK/CEC dan stabilitas agregat. (toc.library.ethz.ch)

Immobilisasi: Penguncian sementara hara mineral (mis. N) ke dalam biomassa mikroba selama dekomposisi; hara akan kembali tersedia setelah mikroba mati/terurai. ([Springer](#))

Infiltrasi: Kecepatan air meresap ke tanah; meningkat jika agregat stabil dan permukaan terlindungi mulsa/serasah.

Legum (Leguminosae/Fabaceae): Kelompok tanaman kacang-kacangan—banyak yang mampu menambat N dan menghasilkan biomassa tinggi sebagai penutup tanah/penyedia serasah. ([ResearchGate](#))

Legume cover crop (LCC)/tanaman penutup tanah legum: Legum yang ditanam untuk menutup permukaan tanah, menekan gulma, menambah N dan biomassa, serta mengurangi runoff dan erosi. ([ResearchGate](#))

Leaching/pencucian: Pergerakan hara larut (terutama NO_3^- , K^+ pada kondisi tertentu) ke bawah zona akar akibat aliran air; menyebabkan kehilangan hara.

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

Litter/serasah: Residu organik (daun, pelepah, ranting, biomassa pangkasan) di permukaan tanah; sumber karbon dan hara serta pelindung permukaan. ([World Agroforestry](#))

Litter quality (kualitas serasah): Sifat serasah (rasio C:N, lignin, polifenol) yang menentukan cepat-lambatnya dekomposisi dan pelepasan hara. ([World Agroforestry](#))

Mineralisasi: Pelepasan hara (N, P, S, dll.) dari bahan organik menjadi bentuk anorganik yang dapat diserap tanaman. ([World Agroforestry](#))

Mikoriza arbuskular (AMF): Jamur simbiotik akar yang meningkatkan penyerapan P dan air serta membantu ketahanan stres; sering berperan dalam sistem tropis dan penutup tanah. ([Neliti](#))

Mulsa: Bahan penutup permukaan tanah (serasah, pelepah, biomassa legum) untuk menekan evaporasi, menjaga suhu tanah, dan mengurangi erosi. ([Springer](#))

Neraca hara (nutrient budget): Perhitungan input–output–stok hara dalam sistem kebun untuk menilai keberlanjutan dan efisiensi pemupukan. ([ResearchGate](#))

Nitrifikasi: Oksidasi NH_4^+ menjadi NO_3^- oleh mikroba; NO_3^- lebih mudah tercuci sehingga manajemen N perlu memperhatikan proses ini.

Nutrient cycling/siklus hara: Perputaran hara dari tanah–tanaman–serasah–mikroba kembali ke tanah; inti dari kesuburan jangka panjang. ([ACSess](#))

Nutrient pumping: Pengambilan hara dari lapisan tanah lebih dalam oleh akar komponen berkayu, lalu dikembalikan ke permukaan melalui serasah/daun gugur. ([World Agroforestry](#))

Ndfa (Nitrogen derived from atmosphere): Persentase N tanaman yang berasal dari fiksasi N_2 atmosfer (indikator kontribusi BNF). ([Springer](#))

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

pH tanah: Ukuran keasaman/alkalinitas; memengaruhi ketersediaan hara dan aktivitas mikroba (tanah sangat masam sering menekan efisiensi hara). (toc.library.ethz.ch)

P tersedia (available P): Fosfor dalam bentuk yang relatif mudah diserap; pada tanah masam tropis sering terfiksasi sehingga peran mikroba/AMF dan bahan organik menjadi penting. (Springer)

Piringan dan gawangan: Zona operasional kebun sawit—piringan (sekitar pangkal) untuk pemupukan/panen; gawangan (antarbaris) sering menjadi zona serasah/penutup tanah.

Retensi air: Kemampuan tanah menahan air agar tersedia bagi tanaman; membaik dengan SOM/humus dan struktur agregat. (toc.library.ethz.ch)

Rhizobium/Bradyrhizobium: Bakteri penambat N simbiotik legum; efektivitasnya dipengaruhi spesies, inokulasi, dan kondisi tanah.

Riparian buffer: Jalur vegetasi di tepi sungai/anak sungai untuk menahan sedimen dan hara, mengurangi limpasan, serta memperkuat fungsi ekosistem lanskap.

Root turnover: Siklus akar halus yang mati dan tumbuh kembali; sumber bahan organik “di dalam tanah” yang efektif membangun humus.

RUSLE: Model empiris untuk memperkirakan kehilangan tanah akibat erosi; relevan saat menilai manfaat penutup tanah dan mulsa pada lahan miring.

Soil Health Index (Indeks Kesehatan Tanah): Skor komposit indikator fisik–kimia–biologi untuk menilai “kebugaran” tanah dan respons manajemen (mulsa, LCC, pengapuran, dll.).

Stabilitas agregat: Ketahanan agregat terhadap pecah saat terkena pukulan hujan/rapid wetting; sangat dipengaruhi bahan organik dan aktivitas biota. (bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com)

Volatilisasi amonia: Kehilangan N sebagai gas NH_3 (mis. dari urea) terutama pada kondisi tertentu (permukaan terbuka, pH tinggi lokal, aplikasi tidak tepat).

Referensi (pilihan inti dan bacaan lanjut)

A. Buku/Monograf Utama

1. Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson. (toc.library.ethz.ch)
2. Corley, R. H. V., & Tinker, P. B. (2016). *The Oil Palm* (5th ed.). Wiley-Blackwell. (Wiley)
3. Fairhurst, T., & Härdter, R. (Eds.). (2003). *Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields*. PPI/PPIC/IPI. ([Tropical Crop Consultants Limited](http://TropicalCropConsultantsLimited))
4. Nair, P. K. R. (2004). *An Introduction to Agroforestry*. Kluwer Academic Publishers. ([World Agroforestry](http://WorldAgroforestry))
5. Young, A. (1997). *Agroforestry for Soil Conservation*. CAB International/ICRAF (edisi dan akses beragam). (CIFOR-ICRAF)

B. Agroforestry, Serasah, dan Siklus Hara

6. Nair, P. K. R., Kang, B. T., & Kass, D. C. L. (1995). Nutrient cycling and soil-erosion control in agroforestry systems. In C. A. Francis (Ed.), *Agriculture and the Environment* (ASA Special Publication 60, pp. 117–138). ASA/CSSA/SSSA. (ACSess)
7. CIFOR–ICRAF. (n.d.). *Agroforestry Practices for Soil Fertility* (ringkasan/chapters tematik). (CIFOR-ICRAF)

C. Sawit: Mulsa Pelepah, Neraca Hara, dan Risiko Deplesi

Rudy C Tarumingkeng: Membangun Kesuburan Tanah di Kebun Sawit melalui Agroforestry: Peran Legum, Serasah, dan Siklus Hara

8. Formaglio, G., dkk. (2021). Mulching with pruned fronds promotes the internal soil N cycling and soil fertility in a large-scale oil palm plantation. *Biogeochemistry*. ([Springer](#))
9. Lim, Y. L., Wandri, R., Gerendas, J., Sugianto, H., Donough, C., & Oberthür, T. (2018). *Update on Oil Palm Nutrient Budget* (konferensi; dataset blok komersial). ([ResearchGate](#))
10. Essono, D. M., dkk. (2023). Nutrient availability challenges the sustainability of low-input oil palm farming systems. *ScienceDirect* (artikel). ([ScienceDirect](#))
11. Pardon, L. (2017). *Modelling of the nitrogen budget of oil palm plantations...* (Doctoral thesis). James Cook University. ([James Cook University Research Online](#))
12. Greenshields, B., dkk. (2023). Estimating oil-palm Si storage, Si return to soils, and Si losses (termasuk peran pelepah). *Biogeosciences*. ([bg.copernicus.org](#))
13. Wandri, R., dkk. (2025). Oil palm frond decomposition and soil carbon stocks (implikasi zona frond stacking dan rekomendasi pemupukan). *JDMLM* (artikel). ([jdmlm.ub.ac.id](#))

D. Legum Penutup Tanah (LCC) di Sawit: Mucuna dan Lainnya

14. Wawan, Dini, I. R., & Hapsah. (2019). The effect of legume cover crop *Mucuna bracteata* on soil physical properties, runoff and erosion in three slopes of immature oil palm plantation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
15. Setyorini, T. (2017). Pertumbuhan *Mucuna bracteata* pada berbagai kondisi (artikel jurnal). ([jurnal.instiperjogja.ac.id](#))
16. Pipai, R., dkk. (2023). Biological nitrogen fixation by legume cover plants in oil palm systems (kuantifikasi N₂ fixed dan pengaruh nitrat tanah). *Plant and Soil*. ([Springer](#))

17. Widiastuti, H., & Suharyanto. (2007). Growth response of *Calopogonium caeruleum* and *Centrosema pubescens* terhadap inokulasi (legum penutup tanah dan simbiosis). *Buletin Plasma Nutfah*. ([Neliti](#))
18. Sitorus, R. S. (2010). Pertumbuhan *Mucuna bracteata* dan kadar hara kelapa sawit (karya ilmiah/skripsi). Universitas Sumatera Utara. (repository.usu.ac.id)
19. Wahyuni, M., Sembiring, M., Wagino, & Sihite, H. G. (2019). The effect of sulfur and *Rhizobium* sp. on growth and nodulation of *Mucuna bracteata*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.

E. Dasar Ilmu Tanah: Bahan Organik–Agregat–Stabilitas Struktur

20. Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33, 141–163. (bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com)
21. Oades, J. M. (1984). Soil organic matter and structural stability (konsep makro–mikro agregat dan peran SOM). *Soil and Tillage Research* (artikel). ([Springer](#))

F. Referensi Pendukung Indonesia (Organik/Keberlanjutan)

22. Sutanto, R. (2002). *Pertanian organik menuju pertanian alternatif dan berkelanjutan*. Kanisius.

Copilot for this article - Chatgpt 5.2 Thinking. Access date: 12 January 2026. Prompting on Writer's account ([Rudy C Tarumingkeng](#))
<https://chatgpt.com/c/696f5802-dd94-8323-b3db-b969848b4489>