

Prof. Dr. Ir Hermansah MS., MSc | Dr. Fenky Marsandi, S.Si. | Dr. Ir. Agustian

BIODIVERSITAS TANAH TROIKA BASAH

Biodiversitas tanah di kawasan hutan hujan tropis basah menjadi sangat penting bagi keberadaan ekosistem tanah (*soil ecosystem*) yang menyediakan berbagai fasilitas dan sumber nutrisi yang beragam untuk tumbuh dan berkembang. Fungsi tanah yang penting dalam menjaga kestabilan ekosistem telah membuka ruang bagi vegetasi dan fauna tanah untuk dieksplorasi lebih dalam. Peran dan fungsi fauna tanah perlu mendapatkan penelaahan khusus untuk memahami berbagai jasa ekosistem yang ditawarkan untuk membantu manusia dalam menjaga dan melestarikan lingkungan serta meningkatkan kebutuhannya. Semakin meningkatnya populasi dan kebutuhan manusia, maka kebutuhan akan lahan semakin meningkat dan mengakibatkan kawasan hutan semakin berkurang. Pemanfaatan lahan pada agroekosistem sebagai sarana pemenuhan kebutuhan dan meningkatkan kualitas hidup manusia haruslah diiringi dengan pelestarian lingkungan untuk mempertahankan kondisi ekosistem yang stabil. Pemanfaatan dan pelestarian fauna tanah sebagai biodiversitas tanah pada kawasan tropika basah yang baik akan meningkatkan kualitas dan kesehatan tanah pada areal agroekosistem tersebut. Di dalam buku ini diuraikan berbagai informasi biodiversitas tanah di kawasan hutan hujan tropika basah yang disusun secara jelas dan sistematis agar lebih mudah untuk dipahami. Di dalam buku ini tidak hanya diuraikan aspek biologi dari fauna tanah, melainkan juga sifat fisik dan kimia tanah serta aspek sosial masyarakat yang mendukung keberlanjutan ekosistem tanah. Uraian di dalam buku ini, diakhiri dengan tantangan dan harapan yang ingin dicapai bersama, karena kita sadari bahwa manusia akan selalu bergantung dan tidak terlepas dari tanah dan lingkungannya.

Buku ini sangat disarankan bagi mereka yang ingin mempelajari dan melakukan penelitian terkait keragaman vegetasi dan fauna tanah di kawasan tropika basah. Kami berharap melalui buku ini akan timbul ketertarikan bagi para pembaca untuk lebih peduli terhadap lingkungan terutama biodiversitas tanah.



BIODIVERSITAS TANAH TROIKA BASAH



BIODIVERSITAS TANAH TROPIKA BASAH

**Prof. Dr. Ir. Hermansah, MS., MSc
Dr. Fenky Marsandi, S.Si
Dr. Ir. Agustian**



BIODIVERSITAS TANAH TROIKA BASAH

- Penulis** : Prof. Dr. Ir. Hermansah, MS., MSc
Dr. Fenky Marsandi, S.Si
Dr. Ir. Agustian
- Desain Sampul** : Syamsul Hidayat
- Tata Letak** : Syamsul Hidayat
Ikhsanul Anwar
- ISBN** : 978-623-172-095-5
- Ukuran Buku** : 23 cm
- Tahun Terbit** : 2023
- Cetakan** : Pertama
- Anggota :** : *Asosiasi Penerbit Perguruan Tinggi Indonesia (APPTI)*

Dicetak dan diterbitkan oleh :

Andalas University Press

Jl. Situjuh No. 1, Padang 25129

Telp/Faks. : 0751-27066

email : cebitunand@gmail.com

Hak Cipta Pada Penulis © 2023

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang.

KATA PENGANTAR

Peranan ekosistem dalam pengelolaan sumberdaya alam seperti halnya tanah sangat memegang peranan penting. Tanah merupakan sumberdaya alam yang sangat penting dan mempunyai peran yang sangat kompleks didalam ekosistem antara lain sebagai media tumbuh, siklus atau pendaaur ulang unsur hara, habitat untuk organisme tanah, sistem dalam suplai dan pembersih air dan juga sebagai medium pembangunan. Di kawasan tropika khususnya tropika basah dan bahkan super basah, tanah dengan berbagai penggunaannya mulai dari hutan, ladang berpindah, kebun, kebun campuran dan lahan-lahan pertanian yang diusahakan intensif seperti lahan sawah dan tegalan selalu mengalami perubahan dan terdegradasi. Kita manusia yang memerlukan papan, sandang dan pangan dalam kehidupan sehari-hari sangat tergantung dengan tanah baik kuantitas maupun kualitas nya secara fisik kimia dan biologi.

Penulis tertarik untuk menulis buku ini yang mencoba menyajikan tentang biodiversitas tanah di kawasan tropika basah terutama di kawasan hutan hujan tropika super basah Padang. Kawasan ini representatif sebagai kawasan hutan hujan tropik yang kaya dengan keragaman tumbuhan dan variabilitas tanah yang tinggi sebagai kekayaan alam dan selalu berkontribusi dalam memenuhi sandang pangan dan pangan serta jasa ekosistem yang sangat tidak ternilai. Mudah-mudahan buku ini dapat membantu mahasiswa dan peneliti yang berkecimpung dalam bidang ilmu tanah, pertanian dan lingkungan untuk meningkatkan pemahaman tentang biodiversitas tanah.

Saya berterimakasih kepada semua tim yang sudah berkontribusi dalam penyusunan buku ini semoga apa yang kita perbuat mendapat ridho dari Allah SWT. Amiin.

Padang, 9 Januari 2023

Hermansah, Fenky M. dan Agustian

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
1. PENDAHULUAN	1
2. TANAH TROPIKA BASAH KAWASAN HUTAN HUJAN TROPIS	11
2.1. Kawasan Hutan Hujan Tropis	11
2.2. Tanah Tropika Basah	22
2.3. Faktor Biotik Dan Abiotik Fauna Tanah Kawasan Hutan Hujan Tropis Tanah Tropika Basah	29
3. KARAKTERISTIK SIFAT FISIK DAN KIMIA TANAH	39
3.1. Sifat Fisik Tanah	39
3.2. Sifat Kimia Tanah	51
3.3. Bahan Organik Tanah	62
4. BIODIVERSITAS TANAH TROPIKA BASAH	69
5. FAUNA TANAH	77
5.1. Kelimpahan Fauna Tanah	82
5.2. Keanekaragaman Fauna Tanah	92
5.3. Kemerataan dan Dominansi Fauna Tanah	113
5.4. Indeks Kesamaan Fauna Tanah	116
5.5. Frekuensi kehadiran Fauna Tanah	119
5.6. Kepadatan Fauna Tanah	121
5.7. Nilai Penting Fauna Tanah	122
5.8. Distribusi Fauna Tanah	124
6. TANAH TROPIKA BASAH SEBAGAI HABITAT	127
6.1. Hubungan Faktor Biotik dan Abiotik Habitat Fauna Tanah	133

6.2. Tumbuhan dan Biodiversitas Fauna Tanah	141
6.3. Interaksi Biodiversitas Fauna Tanah Atas Dan Bawah	145
7. ANALISIS PERAN DAN POTENSI FAUNA TANAH	151
7.1. Alasan utilitarian untuk mempelajari fauna tanah 112	154
7.2. Manajemen pertanian	157
7.3. Sinkronisasi Tingkat Trofik	158
8. BIODIVERSITAS TANAH DAN PERUBAHAN PENGGUNAAN LAHAN	161
8.1. Hutan dan Padang Rumput	161
8.2. Konversi Hutan Menjadi Areal Pertanian Tanah Tropika Basah	164
8.3. Konversi Hutan Menjadi Areal Pertambangan	172
8.4. Konversi Hutan Menjadi Areal Perkotaan	176
9. DAMPAK DAN STRATEGI MANAJEMEN TANAH YANG BERKELANJUTAN	181
9.1. Dinamika Masyarakat dan Perubahan Penggunaan Lahan	187
9.2. Biodiversitas Fauna Tanah dan Sistem Jaring Makanan	194
10. KONSERVASI KEANEKARAGAMAN HAYATI	199
11. TANTANGAN DAN HARAPAN	223
12. PENUTUP	231
DAFTAR PUSTAKA	235
RIWAYAT PENULIS	257

DAFTAR TABEL

Tabel 1.	Keanekaragaman spesies tumbuhan pada taman nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat	17
Tabel 2.	Variasi kepadatan tanah pada berbagai jenis struktur tanah	43
Tabel 3.	Penurunan kepadatan tanah pada beberapa aktivitas penggunaan lahan	44
Tabel 4.	Karakteristik fisika tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	49
Tabel 5.	Karakteristik kimia tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	55
Tabel 6.	Kosentrasi dan akumulasi hara serasah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	65
Tabel 7.	Indeks keanekaragaman, pemerataan dan dominansi fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	96
Tabel 8.	Indeks kesamaan fauna tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang Padang, Indonesia	117
Tabel 9.	Nilai Korelasi jumlah, keanekaragaman dan fungsional fauna tanah terhadap karakteristik sifat kimia tanah, kimia serasah, fisika tanah dan kepadatan populasi bakteri tanah.	136

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.	Struktur Kanopi Hutan Hujan Tropik	3
Gambar 2.	Skema biota tanah berdasarkan ukuran tubuhnya	4
Gambar 3.	Contoh fauna tanah (Invertebrata)	5
Gambar 4.	Persentase kisaran jumlah biota tanah	6
Gambar 5.	Peta Hutan Hujan Tropik Dunia dan Indonesia	11
Gambar 6.	Variasi tumbuhan di kawasan hutan lindung Gunung Pesagi, Lampung Barat	15
Gambar 7.	Grafik data Kerapatan relatif vegetasi tumbuhan di Gunung Dempo	16
Gambar 8.	Model hierarki fungsi tanah	22
Gambar 9.	Faktor yang menentukan taksiran dekomposisi pada ekosistem terestrial	23
Gambar 10.	Tipe-Tipe Struktur Tanah	41
Gambar 11.	Ilustrasi porositas pada pasir, lanau, dan lempung	45
Gambar 12.	Komponen utama transformasi C pada lanskap	63
Gambar 13.	Hubungan biodiversitas, fungsi dan layanan ekosistem serta kesejahteraan masyarakat	74
Gambar 14.	Variasi Fauna Tanah pada Kawasan Hutan Hujan Tropis	78
Gambar 15.	Komponen fauna tanah di dalam dan di atas permukaan tanah	80
Gambar 16.	Grafik jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang berdasarkan waktu pengamatan	84

Gambar 17.	Persentase jumlah individu fauna tanah pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	88
Gambar 18.	Variasi Taksa Hymenoptera	101
Gambar 19.	Variasi Jenis Coleoptera yang hidup di permukaan tanah	104
Gambar 20.	Variasi jenis Diptera pada kawasan hutan hujan tropis	106
Gambar 21.	Variasi Jenis Orthoptera kawasan hutan hujan tropis	109
Gambar 22.	Variasi bentuk ordo Araneae	111
Gambar 23.	Empat pengelompokan utama yang dapat diindividualisasikan di antara invertebrata tanah, bergantung pada strategi hidupnya dan seberapa dekat mereka terkait dengan tanah	129
Gambar 24.	Tanah yang sehat adalah rumah bagi berbagai tanaman, hewan, dan jamur	130
Gambar 25.	Interaksi antara fauna tanah permukaan dan di dalam tanah dengan tanaman	142
Gambar 26.	Fauna tanah di bawah dan di atas permukaan tanah	146
Gambar 27.	Struktur Hirarki Rantai Makanan – Tanah	152
Gambar 28.	Deforestasi hutan dan degradasi fauna tanah	162
Gambar 29.	Alih Fungsi lahan hutan menjadi areal pertanian yang berpotensi menimbulkan bencana	166
Gambar 30.	Grafik Luasan Areal hutan dan Lahan Pertanian tahun 2014-2020	167
Gambar 31.	Gambaran umum daerah penelitian kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang	170
Gambar 32.	Manfaat Pengelolaan Tanah Berkelanjutan dan Pengaruhnya Terhadap Makrofauna Tanah	182
Gambar 33.	Masyarakat dan Hutan sebagai sumber kehidupan	188

Gambar 34.	Jaring makanan yang melibatkan fauna tanah dan hubungannya terhadap vegetasi tanaman secara tidak langsung (sumber makanan)	196
Gambar 35.	Konsep konservasi keanekaragaman hayati	201
Gambar 36.	Bingkai kemajuan konseptual dalam restorasi	203
Gambar 37.	Struktur Jaring makanan Fauna Tanah	207
Gambar 38.	Morfologi cacing tanah di habitatnya	213
Gambar 39.	Rayap dan habitatnya (kayu yang melapuk dan tanah)	215
Gambar 40.	Isopoda tanah	217
Gambar 41.	Mole (Tikus Tanah)	218
Gambar 42.	Cacing putih (Pot worms)	220

PENDAHULUAN

Kawasan hutan hujan tropis tersebar di beberapa negara dan kepulauan, setidaknya ada lima wilayah utama yaitu Asia, Afrika, Madagaskar, Neotropik dan Nugini. Masing-masing wilayah tersebut tentunya mempunyai kawasan hutan hujan tropik dengan karakteristik dan keunikan ekologisnya masing-masing, tentunya dengan tingkat keterancaman yang juga berbeda. Walaupun kesatuan ekologis dan biogeografis wilayahnya berbeda, tetapi dapat dipastikan bahwa kawasan hutan hujan tropik memiliki kelimpahan dan keanekaragaman pohon, satwa, hingga mikrobia yang sangat tinggi. Dengan keunikan ekologis wilayahnya, kawasan hutan hujan tropis pada masing-masing wilayah tersebut memiliki identitas biotanya sendiri. Ketidaksamaan identitas biota tersebut sebagian besar disebabkan adanya evolusi pada periode tersier puluhan juta tahun yang lalu, ketika penghalang samudera yang luas terbentuk, yang menyebabkan penyebaran biota pada masing-masing kawasan sangat sulit. Akibatnya, ketiadaan kelompok utama pada biota hutan hujan tropis yang terpisah, sangat mengandalkan hutan sebagai sumber kehidupan.

Salah satu daerah yang masuk ke dalam kawasan hutan hujan tropis adalah Indonesia (dilewati garis khaltulistiwa). Indonesia memiliki beragam bioma hutan hujan tropis yang lebat dengan tanah tropika basah yang selalu diguyur hujan sepanjang tahun. Bahkan curah hujan tertinggi bisa mencapai 6500 mm per tahun pada kawasan hutan hujan tropis Indonesia yang terdapat pada hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang (rangkaian Bukit Barisan) Padang, Sumatera Barat (Hermansah, et al., 2003). Tanah Tropika basah yang mendiami kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang Indonesia (Indonesia) sangat mudah ditumbuhi berbagai macam jenis tumbuhan terutama jenis tumbuhan berdaun lebar dan pepohonan yang tinggi yang menyebabkan munculnya kanopi rapat pada areal hutan tersebut. Kawasan hutan hujan tropis dengan tanah tropika basah Indonesia memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi dengan sumbangan oksigen sekitar 40% oksigen yang ada di bumi.

Tekstur lapisan hutan pada tanah tropika basah juga tidak lepas dari pengaruh kanopi dan puncak pohon pada tiga puluh hingga lima puluh meter di atas tanah, yang membentuk penutup terus menerus

hingga tingkatan yang rapat. Pada lapisan ini juga mengandung keanekaragaman hayati yang juga melimpah dan masih banyak jenis spesies yang masih belum diketahui. Batang, cabang, dan rongga pohon-pohon tinggi yang menumpuk dalam jumlah banyak menyebabkan ketersediaan air dan puing-puing serta serasah juga ikut bertambah, serta menjadi substrat bagi flora epifit yang subur. Aktivitas kelompok satwa aboreal dan fauna tanah juga bergantung dari pohon-pohon besar yang tersebar pada areal hutan hujan tropis tanah tropika basah. Pohon-pohon ini terkena sinar matahari penuh, suhu tinggi, angin kencang, dan kekeringan yang berlebihan. Keanekaragaman hayati tumbuhan yang tinggi ini sangat penting untuk kelangsungan hidup organisme untuk berkembang biak pada ekosistem tropis.

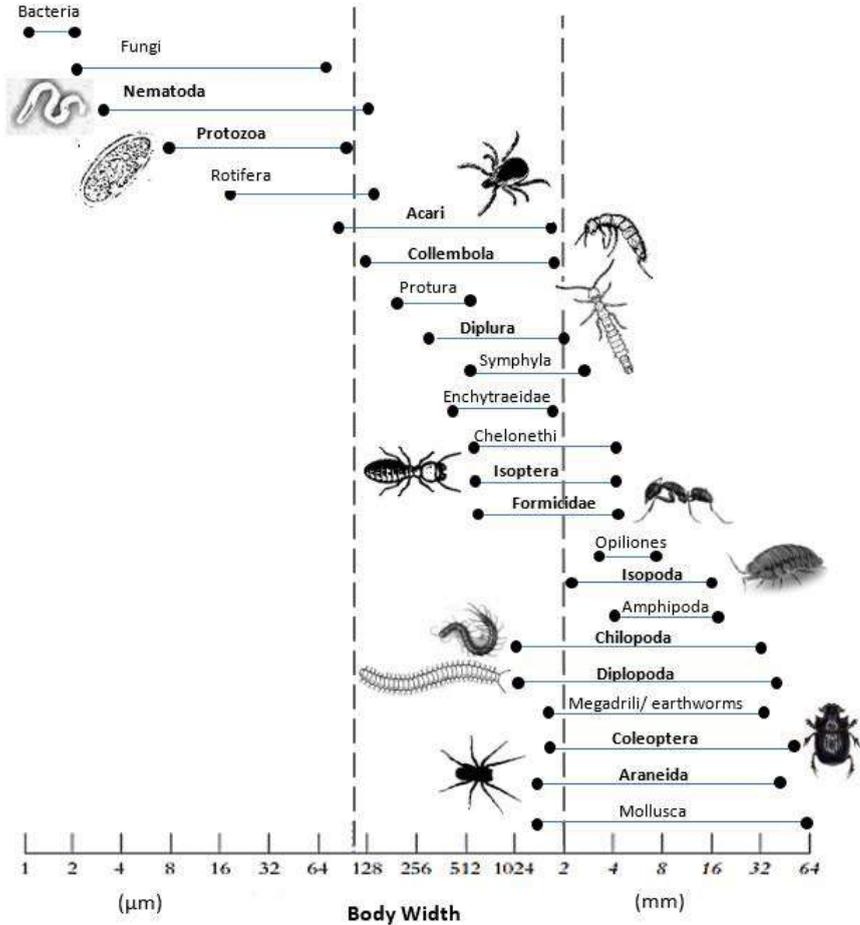
Kelimpahan dan Keanekaragaman pohon serta tumbuhan pada tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis memiliki arsitektur yang terdiri dari suksesi lapisan terstruktur. Lapisan lantai hutan menangkap kurang dari 5 % dari total sinar matahari yang mencapai puncak tutupan hutan. Kerapatan vegetasi pohon kawasan hutan hujan tropis menjaga suhu dan kelembaban lantai hutan. Kondisi ini merupakan, salah satu faktor pembentuk kualitas habitat biota yang berada di atas permukaan tanah. Lantai dasar yang padat dan kokoh menampung vegetasi jarang yang hanya terdiri dari tanaman yang mampu beradaptasi dengan kondisi cahaya yang sangat rendah. Kelompok tumbuhan bawah yang terletak tepat dibawah kanopi tutupan pohon maupun terletak di atas lapisan lantai hutan merupakan campuran tak terpisahkan dari herba yang tahan naungan, semak, pohon kecil, dan tanaman merambat berkayu yang melindungi keanekaragaman satwa liar dan biota tanah. Komponen lantai hutan merupakan tempat yang paling produktif karena mengandung unsur hara dalam jumlah besar, terutama nitrogen, fosfor, dan belerang. Lantai hutan menjaga lingkungannya dengan baik dari suhu tinggi, meningkatkan infiltrasi air, menjaga kelembaban tanah, dan juga mempengaruhi ribuan fauna tanah dan mikroorganisme dengan menyediakan habitat yang baik bagi mereka. Hal ini juga mempengaruhi pembentukan hutan, pertumbuhan pohon dan respons pertumbuhan karena sebagian besar dari unsur tersebut bekerja seperti pupuk bagi tanaman. Adapun struktur lapisan yang menggambarkan kawasan hutan hujan tropis tersebut diatas, dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Kanopi Hutan Hujan Tropik (Dani., 2016: Botani Visual Resource Library. Mc.Graw Hill Co.)

Kondisi tanah tropika basah dengan intensitas curah hujan yang tinggi menyebabkan pencucian nutrisi/hara tanah terlarut, menghasilkan kondisi tanah yang asam dan hampir tidak ada akumulasi humus. Tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis memiliki kandungan oksida yang tinggi, karena oksida tidak mudah diserap oleh akar tanaman dan terkadang membentuk endapan. Akar tanaman maupun area sekitar akar tanaman yang banyak dijatuhi serasah pada tanah tropika basah, menampung komunitas mikroorganisme yang melimpah dan hidup berkoloni yang tidak dapat lepas dari kawasan lembab serta juga mampu beradaptasi pada suhu yang lebih tinggi dan juga kelompok pengurai lainnya (termasuk jamur dan rayap) sehingga dapat memastikan pergantian bahan organik yang lebih cepat .

Selain itu, hal menarik lainnya adalah pada lapisan tanah tropika basah yang terdalam (lapisan induk) atau bagian lapisan bawah tanah kaya akan logam mulia dan bahan bakar fosil yang akan menarik bagi industri pertambangan dan pengeboran. Lebih dari ratusan juta orang bergantung pada ekosistem ini dalam berbagai tingkatan untuk penghidupan mereka, dan yang tidak kalah pentingnya bahwa tanah tropika basah pada kawasan hutan hujan tropis adalah rumah bagi ratusan juta lebih biota tanah sebagai tempat penghidupan (habitat) dalam melakukan semua aktivitas. Variasi manfaat hutan hujan tropis menjadikan kawasan ini sangat bermanfaat bagi makhluk hidup.



Gambar 2. Skema biota tanah berdasarkan ukuran tubuhnya (Dimodifikasi dari data Swift et al. (1982))

Biota tanah merupakan kelompok makhluk hidup penghuni tanah yang memegang peranan penting dalam perombakan jatuhnya serasah sebagai bahan organik di atas permukaan tanah. Pada lapisan permukaan tanah, terdapat berbagai jenis biota tanah, antara lain mikroba (bakteri, fungi, aktinomisetes, mikroflora, dan protozoa) serta fauna tanah dengan ukuran tubuh yang bervariasi (Gambar 2). Masing-masing biota tanah mempunyai fungsi khusus dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan menjaga keseimbangan ekosistem. Pada ekosistem tanah yang memiliki kandungan bahan organik yang cukup

tinggi, keanekaragaman biota tanah akan membentuk rantai atau jaring-jaring makanan yang lebih kompleks.

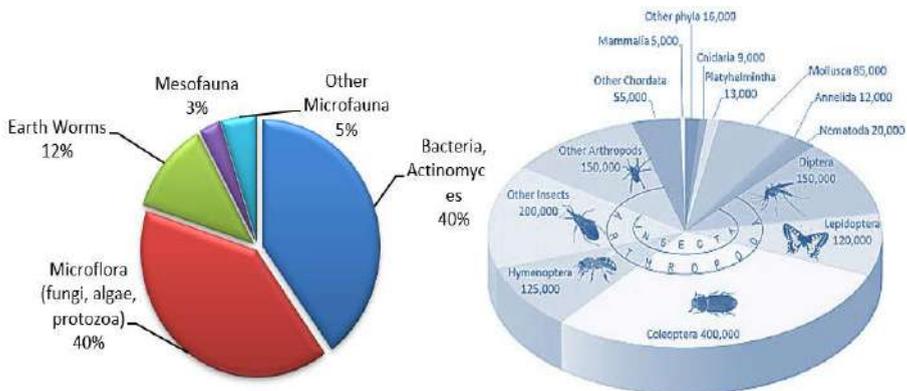
Salah satu komponen biota tanah pada lapisan permukaan tanah dan sensitif terhadap gangguan terhadap gangguan pada struktur dan fungsi tanah sebagai akibat dari perubahan iklim global dan perubahan penggunaan lahan adalah fauna tanah. Komunitas fauna tanah berperan menjaga keseimbangan ekosistem tanah dalam melakukan aktivitasnya sebagai agen pelaksana utama untuk kelangsungan siklus biogeokimia dan jaring makanan. Siklus biogeokimia maupun jaring-jaring makanan akan berjalan dengan baik apabila kelimpahan dan keragaman fauna tanah tetap terjaga tanpa adanya gangguan serius dari luar. Di sini kami mengkatagorikan fauna tanah kedalam kelompok invertebrata tanah yang berukuran relatif kecil (Gambar 3).



Gambar 3. Contoh fauna tanah (Invertebrata). Microinvertebrata (<0.1 mm) seperti (A) water bears dan nematoda; mesoinvertebrata (antara 0.1-2 mm) seperti (C) potworms, (D-G) colembola, dan (H,I) mites, (J) woodlice, (K) kumbang, (L) cacing Tanah, (M) milipedes, (N) centipedes, dan (O) laba-laba (photo credits: A,C-O: Frank Ashwood; B: Devdutt kamath) (Barreto et al., 2022)

Walaupun bentuknya relatif kecil, hidup dibawah tanah maupun serasah yang sering tidak terlihat langsung oleh mata dan jumlahnya yang relatif melimpah pada habitat yang tidak terganggu membuat kelompok fauna tanah ini kurang mendapatkan perhatian. Apalagi jika melihat dari nilai utilitas fauna tanah bagi manusia yang relatif lebih sedikit dibandingkan dengan mikroba tanah. Kami melihat bahwa peran ekologis fauna tanah sangat bermanfaat bagi ekosistem dan potensi nilai bioprospeksi fauna tanah menjadi sangat berguna untuk masa depan. Fauna tanah sebagai salah satu keanekaragaman hayati tanah perlu diperhatikan karena menjadi indikator penting bagi kesehatan tanah.

Fauna tanah merupakan kelompok fauna yang sebagian besar hidupnya berada di tanah, baik yang hidup di permukaan tanah maupun yang terdapat di dalam tanah. Dalam hal ini kami telah membatasi fauna tanah dalam kelompok invertebrata tanah yang berperan langsung dalam merombak senyawa organik. Proses dekomposisi dalam tanah tidak akan mampu berjalan cepat bila tidak ditunjang oleh aktivitas fauna tanah. Keberadaan fauna tanah sangat tergantung pada ketersediaan energi dan sumber makanan untuk melangsungkan hidupnya, seperti bahan organik. Ketersediaan energi dan nutrisi bagi fauna tanah akan menunjang perkembangan dan aktivitas fauna tanah yang berlangsung dengan baik dan timbal baliknya akan memberikan dampak positif bagi kesehatan dan kesuburan tanah. Berikut jumlah kisaran biota tanah/ fauna tanah berdasarkan jumlah spesiesnya (Gambar 4).



Gambar 4. Persentase kisaran jumlah biota tanah berdasarkan jumlah spesiesnya a). ukuran tubuh; b). ordo dan jenis spesiesnya (Grimmelikhuijzen and Hauser, 2012).

Komposisi fauna tanah berada dikisaran 3 % mesofauna tanah, 5% microfauna dan 12 % cacing tanah serta kisaran 40% untuk protozoa (Gambar 4). Dominasi bakteri dan fungi menjadi komunitas biota tanah tertinggi. Fauna tanah mengambil peran dan fungsi penting dalam melakukan proses pelapukan bahan organik secara biologis di atas permukaan tanah. de Vries *et al.* (2013) menyebutkan bahwa setidaknya proses pelapukan tersebut dilakukan dengan cara, fauna tanah melakukan penghancuran terhadap jaringan tanaman maupun hewan (bahan organik) secara langsung (fisik) yang dapat membantu meningkatkan ketersediaan hara dan nutrisi makanan bagi mikroba tanah terutama bakteri dan fungi untuk melakukan aktivitas. Sisa-sisa tumbuhan (bahan organik) yang telah melapuk akan menjadi humus dan menyuburkan tanah, dimana secara tidak langsung fauna tanah telah menggabungkan bahan yang membusuk pada lapisan tanah bagian atas. Selain ketersediaan bahan organik yang tinggi pada lapisan permukaan tanah, aktivitas tersebut juga membentuk kemantapan agregat antara bahan organik dan bahan mineral tanah.

Gambar 4 juga memperlihatkan persentase komposisi fauna tanah, dimana dominasi jumlah spesies tertinggi terdapat pada kelompok arthropoda tanah (invertebrata). Diantara kelompok arthropoda tersebut dapat dilihat (Gambar 4) bahwa coleoptera memiliki jumlah spesies terbanyak diantara arthropoda lainnya yaitu sebanyak 400.000 spesies. Kelompok spesies ini juga memiliki sebaran hampir di setiap wilayah permukaan bumi terutama daerah tropis. Selanjutnya Diptera dan Hymenoptera memiliki jumlah spesies sebanyak 200.000 dan 125.000 spesies. Kemampuan adaptasi yang luas bagi kelompok arthropoda menyebabkan kelompok ini mampu dengan cepat beradaptasi dan bertahan pada lingkungan yang bervariasi.

Fauna tanah sebagai pemakan bahan organik yang terdekomposisi serta membantu mengubah zat-zat yang terdekomposisi menjadi zat-zat yang lebih sederhana, sebagian diantaranya merupakan organisme tanah yang tinggal di atas permukaan tanah. Walaupun demikian, banyak jenis fauna tanah yang meluangkan sebagian atau seluruh hidup mereka di dalam permukaan tanah. Tanah tersebut memberikan suatu pemukiman atau sarang sebagai tempat pertahanan, berlindung, dan menyimpan makanan bagi fauna tanah. Tanah tersebut diterobos sedemikian rupa sehingga tanah menjadi lebih banyak mengandung udara dan tanah juga dapat diperkaya oleh hasil ekskresi dan tubuh-tubuh fauna tanah yang mati. Fauna tanah memperbaiki sifat fisik tanah dan menambah kandungan bahan organiknya.

Diversitas fauna tanah dan fungsi ekosistem pada suatu tipe lahan menunjukkan hubungan yang sangat kompleks dan belum banyak diketahui dengan pasti. Akan tetapi, telah banyak penelitian dilaporkan bahwa penurunan diversitas dan perubahan peran fauna tanah terjadi akibat perubahan sistem penggunaan lahan dan hal tersebut mengancam keberlanjutan fungsi dan keseimbangan ekosistem tanah seperti halnya perubahan dari ekosistem hutan menjadi ekosistem pertanian. Tanah-tanah yang terdegradasi juga menunjukkan penurunan kompleksitas dan biomassa fauna tanah. Tanah sangat erat hubungannya dengan habitat fauna tanah yang menyediakan berbagai sumber daya bagi fauna tanah termasuk sumber nutrisi.

Keberadaan keanekaragaman fauna tanah dalam suatu ekosistem menjadi daya tarik tersendiri bagi para ilmuwan. Berbagai penelitian terhadap kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah telah banyak dilakukan, terutama pada lahan hutan, pertanian, perkebunan, perkotaan, tambang dan industri. Kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah yang sangat tinggi pada kawasan hutan hujan tropis, mengharuskan para ilmuwan, peneliti dan akademisi untuk terus mengeksplorasi dan mengupdate informasi lebih dalam terkait kondisi saat ini, apalagi di era sekarang dengan laju pertumbuhan global yang terus meningkat dan kebutuhan manusia yang semakin tinggi. Selain itu, kajian kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah hendaknya bisa dianalisis dan diukur lebih dalam yang melibatkan faktor abiotik/ lingkungan biota tanah tersebut. Kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah menjadi referensi dasar bagi penelitian terapan ekologi dan pengambilan keputusan untuk membuat kebijakan yang diharapkan lebih besar lagi kebermanfaatannya bagi manusia dan lingkungan.

Hutan hujan tropis tanah tropika basah merupakan aset masa depan sebagai warisan berharga bagi generasi penerus bangsa. Berbagai kekayaan vegetasi dan biota yang berada di dalamnya menawarkan berbagai jasa dan fungsi ekosistem serta plasma nutfah yang bermanfaat bagi kesejahteraan manusia. Gangguan hutan baik gangguan alam maupun gangguan antropogenik memberikan kontribusi terhadap perubahan ekosistem hutan. Gangguan alam sangat menentukan dinamika hutan dan keragaman pohon maupun satwa dan fauna tanah di dalamnya baik pada skala lokal dan regional sedangkan gangguan antropogenik berkontribusi mengatur dinamika regenerasi, struktur dan komposisi floristik, faunistik, dan populasi secara berurutan serta perubahan ekosistem yang sangat sulit untuk dipulihkan. Ahli ekologi berhipotesis bahwa gangguan penting untuk

mempertahankan tingkat kekayaan yang tinggi di mana gangguan harus cukup sering mengganggu proses eksklusi kompetitif oleh spesies dominan, tetapi dengan intensitas dan interval yang cukup rendah untuk mencegah eliminasi sebagian besar spesies. Berbeda dengan pentingnya gangguan dalam pemeliharaan keanekaragaman jenis pohon, terdapat banyak bukti bahwa penebangan dan gangguan antropogenik lainnya memiliki efek negatif terhadap keanekaragaman dan kekayaan flora dan fauna kawasan hutan hujan tropik.

Tantangan berat telah menunggu di era yang akan datang. Deforestasi lahan, manajemen lahan budidaya yang semakin intensif dan berbagai aktivitas antropogenik lainnya telah mendesak ruang tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis. Hal ini akan terus berlanjut mengingat populasi global yang terus meningkat dan kesadaran akan kesehatan lingkungan yang mulai menurun. Fauna tanah invertebrata dengan ukuran tubuh yang kecil dan habitat di permukaan maupun di dalam tanah jarang sekali terlihat langsung, yang membuat kelompok biota tanah ini terkadang terlupakan. Kekhawatiran akan pola hidup, aktivitas, distribusi dan sistem rantai makanan fauna tanah yang mulai tidak teratur dan berubah sebagai akibat deforestasi dan aktivitas antropogenik yang tidak terukur akan menyebabkan bomerang bagi kesejahteraan manusia. Melalui buku ini, kami ingin mencoba memunculkan kembali ke permukaan primadona fauna tanah pada kawasan hutan hujan tropik tanah tropika basah sebagai pembatas dan penangkal derasnya arus deforestasi lahan kawasan hutan hujan tropik. Kami meyakini bahwa fauna tanah merupakan agen penting penjaga keseimbangan ekosistem tanah dan pelaksana aktivitas jasa lingkungan yang bermanfaat bagi manusia.

TANAH TROPIKA BASAH KAWASAN HUTAN HUJAN TROPIS

2.1. Kawasan Hutan Hujan Tropis

Tanah tropika basah identik dengan kawasan hutan hujan tropis Indonesia dengan letak geografis berada di garis khatulistiwa yang dianugerahi dua musim yaitu hujan dan kemarau. Secara geografis, daerah hutan hujan tropis mencakup wilayah yang terletak di antara 23°27'LU dan 23°27' LS mulai dari Amerika Selatan, bagian tengah dari benua Afrika, sebagian anak benua India, sebagian besar wilayah Asia Selatan dan wilayah Asia Tenggara, gugusan kepulauan di Samudera Pasifik dan sebagian kecil wilayah Australia. Bioma hutan tropik meliputi luas dengan jutaan hektar atau mencakup $\pm 30\%$ dari luas permukaan bumi. Iklim di hutan hujan tropis ditandai dengan suhu yang tinggi. Rata-rata suhu tahunan berkisar antara 25-28°C. Dengan suhu yang paling rendah pada musim hujan dan tertinggi ada pada musim kering. Di daerah tropik, setiap kita naik 100 meter di pegunungan, suhu akan berkurang sekitar 0,4 – 0,7 °C. Keragaman suhu musiman yang kecil tergantung pada keragaman panjang hari tahunan yang juga kecil. Selain itu, ketinggian juga mempengaruhi iklim lokal dan regional serta vegetasi Gasper et al., 2015. Ketinggian suatu tempat tidak hanya mempengaruhi iklim dan bentuk vegetasi, tetapi juga mempengaruhi keanekaragaman tanaman. Berikut peta hutan hujan tropik dunia dan indonesia (Gambar 5).



Gambar 5. Peta Hutan Hujan Tropik Dunia dan Indonesia (Butler, 2020: MONGABAY)

Gambar 5 menunjukkan sebaran kawasan hutan hujan tropis di Indonesia. Curah hujan yang tinggi di mana hampir merata sepanjang tahun, mampu mendukung produktivitas hutan yang tinggi pada kawasan hutan hujan tropis. Menurut Cardinale *et al.* (2012) hutan hujan tropis umumnya memiliki curah hujan tahunan tinggi yang dicirikan dengan adanya dua musim, yaitu musim penghujan dan musim kemarau dengan perbedaan yang jelas. Ciri lainnya adalah suhu, kelembaban udara, dan curah hujan yang tinggi, sedangkan hari hujan merata setiap tahun. Hutan hujan tropis memiliki sebaran bulan basah 9,5-12 bulan.

Menurut Indriyanto (2006) hutan hujan tropis yang masih utuh mempunyai jumlah jenis tumbuhan yang sangat banyak dan beraneka ragam. Indonesia memiliki pulau Kalimantan dengan sebagian wilayahnya terdapat hutan yang masih alami. Hutan di Kalimantan mempunyai lebih dari 40.000 jenis tumbuhan dan termasuk hutan yang paling kaya spesiesnya di dunia. Jenis tumbuhan termasuk pepohonan besar dan penting bagi ekologi biota serta masyarakat dengan jumlah 4.000 jenis, merupakan bagian dari 40.000 jenis tumbuhan di hutan Kalimantan. Hutan hujan tropis memiliki sedikitnya 320 pohon dengan ukuran garis tengah lebih dari 10 cm. Hutan hujan tropis Indonesia memiliki ratusan jenis rotan, berbagai jenis anggrek seperti anggrek hutan, dan beberapa jenis seperti umbi-umbian sebagai sumber makanan dan obat-obatan. Hutan hujan tropis juga memainkan peran penting dalam pemulihan iklim global dengan kemampuannya menyerap karbondioksida, suatu gas yang dipercaya oleh para ahli sebagai penyebab terjadinya pemanasan global. Tumbuhan yang secara alami menyerap karbon dioksida dan mengubahnya menjadi oksigen melalui proses fotosintesis mengurangi dampak efek rumah kaca. Hutan hujan tropis merupakan penyerap gas karbondioksida terbaik dibandingkan dengan ekosistem lainnya (Shiliang *et al.* 2017).

Selain itu hutan hujan tropis memiliki kemampuan yang baik dalam hal menyerap dan menyimpan air, sehingga dapat dijadikan penyangga untuk menjaga lingkungan dari bencana banjir dan kekeringan. Kualitas air kawasan hutan hujan tropis sangat alami dan bebas dari senyawa logam pencemar lingkungan. Ketika musim hujan tiba air dalam keadaan berlimpah, hutan hujan tropis dapat mengurangi limpasan sehingga sebagian besar air tetap berada di dalam ekosistem. Ketika musim kemarau tiba, kekurangan air dapat ditutupi dari cadangan yang diperoleh di musim hujan. Hutan hujan tropis pada umumnya ditemukan pada tanah-tanah yang kurang

subur maupun relatif subur.

Sebuah identitas penting dari daerah tropis adalah kawasan hutan hujan tropis yang dilengkapi dengan gradien yang relatif datar, landai dan bergelombang dalam penurunan suhu dengan meningkatnya ketinggian suatu kawasan. Suhu menurun jauh lebih cepat dengan adanya peningkatan ketinggian, umumnya sekitar 0,6 °C per kenaikan ketinggian seratus meter (Bush et al., 2004). Konsekuensi biologis dari gradien elevasi curam yang disandingkan dengan gradien suhu di daerah tropis telah mendorong banyak minat penelitian selama beberapa dekade, terutama tentang efek gradien pada rentang peningkatan jumlah spesies. Gradien pada tingkat ketinggian kawasan hutan hujan tropis baru-baru ini menarik minat sebagai daerah yang kemungkinan besar akan mengalami perubahan biologis yang cepat karena pemanasan global, dan sebagai tempat perlindungan potensial bagi spesies untuk melarikan diri ke bagian atas menghindari suhu yang semakin panas pada ketinggian yang lebih rendah. Migrasi fauna dari bawah ke atas baik spesies tumbuhan dan hewan telah berlangsung baik di daerah beriklim tropis pada kawasan hutan hujan tropis. Transek elevasi tropis juga penting sebagai area utama dengan keanekaragaman hayati yang tinggi, endemisme regional, penyimpanan karbon, dan secara lokal sebagai penyedia jasa ekosistem utama bagi lingkungan seperti perlindungan daerah aliran sungai.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kawasan hutan hujan tropik memiliki identitas yang khas, sehingga dimanapun/belahan dunia manapun kita berada, semuanya sekilas terlihat hampir sama bahkan secara umum bisa dikatakan hal tersebut sama. Di seluruh wilayah khatulistiwa di planet tempat hutan hujan tropik terbentuk, hutan cenderung memiliki struktur dan penampilan fisik yang serupa. Tentu saja, jika diamati lebih dekat, terdapat banyak perbedaan di antara hutan hujan tropis baik di dalam maupun di antara berbagai wilayah geografis. Dalam skala global, orangutan tidak ditemukan di Venezuela yang merupakan bagian dari negara bagian Amerika selatan karena menjadi hewan endemik untuk wilayah hutan kalimantan dan sebaliknya hewan endemik Amerika selatan Alpaca juga tidak ditemukan di wilayah Kalimantan, Indonesia. Masing-masing kawasan hutan hujan tropis memiliki karakteristik fauna yang berbeda.

Begitupun dalam kajian kewilayahan Neotropics, hutan hujan tropis di kawasan Amerika Utara seperti Kosta Rika berbeda dalam banyak hal yang signifikan dari kawasan hutan hujan tropik di Brasil,

wilayah Amerika Selatan. Walaupun berdekatan yang berada dalam satu benua, karakteristik hujan tropis apabila dilihat lebih dekat ke dalam, maka akan tampak perbedaan yang signifikan terutama terkait hewan endemik yang terdapat di dalamnya. Pires dan Prance (1985) mengatakan bahwa tidak hanya hutan hujan tropis yang berada dalam satu benua yang menunjukkan perbedaan, melainkan di Brasil, antar bagian hutan Amazon menunjukkan perbedaan yang cukup besar dari satu lokasi ke lokasi lainnya, beberapa lokasi memiliki hutan hujan lebat, beberapa hutan terbuka yang ditumbuhi palem, beberapa hutan terbuka tanpa palem, dan beberapa hutan terbuka dengan liana yang melimpah. Secara umum, kesamaan keseluruhan kawasan hutan hujan tropis menjadi satu kesatuan, tampak sebagai kesan pertama yang sangat mencolok dimana menjadi kawasan hutan yang kaya ditumbuhi oleh pepohonan. Kawasan hutan hujan tropis memberikan kesan bahwa kawasan tersebut kaya akan biodiversitas makhluk hidup yang memberikan banyak manfaat bagi alam dan manusia.

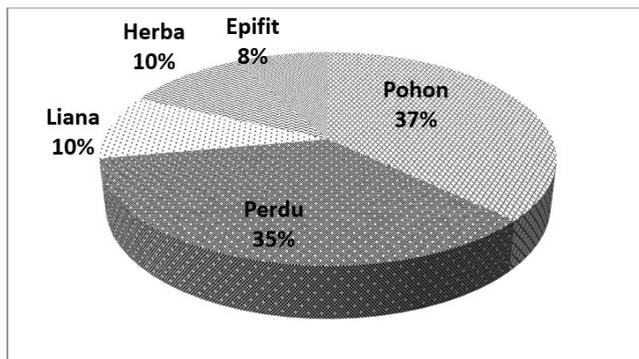
Kawasan hutan hujan tropis menyediakan kompleksitas struktural dan fungsional yang terlihat jelas. Betapa tampak luasnya pemandangan alam yang tertata hijau dan betapa tertutupnya dedaunan kanopi yang lebat menaungi interior hutan, terutama cahaya pagi yang redup. Di dekat sungai, di samping tepi hutan, berbagai satwa dapat dilihat langsung berjalan di atas lantai hutan yang dipenuhi serasah dedaunan maupun bertengger di ranting atau cabang pohon. Jika melihat lebih dalam lagi akan ditemukan kelompok fauna tanah invertebrata yang sedang berjalan di atas permukaan tanah diantara serasah dan akar pepohonan yang keluar di atas permukaan tanah. Bentuk dan struktur tubuh yang terlihat unik dan bervariasi. Naungan mencegah tumbuhnya semak belukar yang lebat, serasah jatuh melimpah pada lantai hutan yang menyebabkan kelembaban tanah tetap terjaga untuk kehidupan biota tanah di dalamnya. Pohon-pohon terbesar cenderung memiliki jarak yang lebar dengan pohon lainnya yang memungkinkan akar tumbuhan tumbuh dan berkembang (memanjang) dengan baik.

Karakterisasi vegetasi hutan hujan tropis juga dapat ditentukan oleh sifat struktural dan fisiognomi yang sangat dipengaruhi oleh faktor fisikokimia edafik. Hutan hujan tropis dewasa dikelompokkan oleh beberapa lapisan kanopi dan lapisan bawah. Profil vertikal yang berbeda dari hutan hujan tropis umumnya mencakup pohon-pohon yang muncul di atas kanopi, pohon-pohon tajuk atas yang tinggi tinggi dengan tinggi rata-rata 30-40 m, sub kanopi pohon rendah, semak belukar, dan lapisan tanah dari tumbuhan perdu dan pakis. Selain

bambu, rerumputan jarang ditemukan di sebagian besar hutan hujan tropis. Epifit dan tanaman merambat berkayu yang disebut liana yang bergantung pada pohon sebagai penyangga struktural untuk mencapai kanopi hutan.

Pepohonan kawasan hutan hujan tropis memiliki ketinggian yang bervariasi, baik di tingkat bawah maupun kanopi. Pohon berwarna hijau terlihat mendominasi kawasan tersebut, tetapi beberapa mungkin penuh dengan bunga yang berwarna-warni, sementara beberapa jenis pepohonan yang lain memiliki daun lebih sedikit yang memperlihatkan banyak epifit yang telah menempel pada cabang utama. Selanjutnya beberapa tanaman menjadi semak dan tanaman herba lainnya berbagi menempati lantai hutan yang sangat teduh dengan banyak pancang, pakis, dan palem. Sulit untuk memahami pola sederhana dalam keseluruhan struktur hutan hujan tropis dimana kompleksitas adalah aturan utamanya.

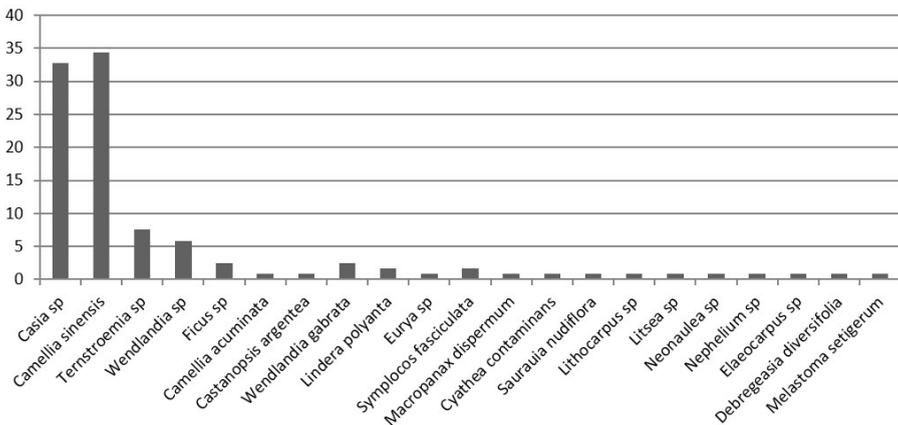
Gambar 6 menunjukkan data keragaman bentuk dan struktur tumbuhan di kawasan hutan hujan tropik, hutan lindung Gunung Pesagi, Lampung Barat. Gunung Pesagi merupakan salah satu kawasan hutan lindung di bawah pengelolaan Dinas Kehutanan, Kabupaten Lampung Barat, Provinsi Lampung yang termasuk dalam kategori hutan hujan tropis primer. Hasil penelitian Surya et al., (2017) menunjukkan bahwa kawasan hutan hujan tropis ini memiliki tegakkan pohon yang cukup rapat dengan nilai 40-70% dengan kondisi baik dan jumlah 337 jenis tumbuhan serta 50% tumbuhan tersebut memiliki potensi sebagai penghasil kayu, tanaman obat, tanaman buah maupun tanaman hias. Keanekaragaman tumbuhan digambarkan berdasarkan habitusnya bisa dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Variasi tumbuhan di kawasan Hutan Lindung Gunung Pesagi, Lampung Barat berdasarkan habitusnya

Selanjutnya, data keanekaragaman tumbuhan kawasan hutan hujan tropik di Indonesia juga dapat dilihat pada kawasan Gunung Dempo Pagar Alam, Sumatera Selatan dan Taman Nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat. Hasil penelitian Ismaini et al (2015) menunjukkan bahwa kawasan hutan hujan tropik Gunung Dempo Pagar Alam Sumatera Selatan ditemukan vegetasi tingkat pohon sebanyak 21 jenis dengan total individu 119 sedangkan pada tingkat semai ditemukan 98 jenis dengan total individu 830 pada 16 plot pengamatan. Sedangkan, pada Taman Nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat ditemukan 54 jenis pohon dengan total individu sebanyak 808 dengan nilai kerapatan tertinggi sebesar 91 pohon/hektar (Arrijani et al., 2006).

Sama halnya pada Taman Nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa, vegetasi tumbuhan pada Gunung Dempo Pagaralam, Sumatera Selatan juga menunjukkan variasi kerapatan tanaman yang beragam, dari yang tinggi hingga rendah (Gambar 7).



Gambar 7. Grafik data Kerapatan relatif vegetasi tumbuhan di Gunung Dempo

Terlihat pada Gambar 7, dominasi pohon pada kawasan hutan lindung gunung dempo Pagaralam, Sumatera Selatan adalah Casia sp dan Camellia sinensis dengan kerapatan relatif yang lebih tinggi dibandingkan jenis pohon lainnya. Casia sp termasuk pohon lindung berbunga yang masuk ke dalam kategori polongan family Fabaceae, sedangkan Camellia sinensis termasuk ke dalam kelompok tanaman perdu atau pohon kecil yang daun dan pucuk daunnya digunakan

untuk membuat teh. Sedangkan pada Taman Nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat, didominasi oleh tumbuhan *Schima wallichii* yang termasuk ke dalam katagori pohon penghasil kayu pertukangan berkualitas baik. Tumbuhan ini juga masih masuk ke dalam keluarga teh (Theaceae), dan menyebar luas di Asia Tenggara terutama Indonesia. Berikut Tabel keanekaragaman tumbuhan pada Taman Nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat.

Tabel 1. Keanekaragaman spesies tumbuhan pada taman nasional Gunung Gede-Pangrango, Cianjur Jawa Barat

No	Nama Ilmiah	Nama Daerah	KM	KR	FR	DR	INP
1	<i>Schima wallichii</i>	Puspa	91	11,26	6,7	29,77	47,73
2	<i>Altingia excels</i>	Rasamala	73	9,035	5,67	19,93	34,63
3	<i>Antidesma tetrandum</i>	Ki seer	50	6,188	4,9	3,401	14,49
4	<i>Saurauja pendula</i>	Ki leho	49	6,064	4,9	7,019	17,98
5	<i>Schefflera scanden</i>	Jangkurang	42	5,198	4,12	2,525	11,85
6	<i>Turpinia sphaerocarpa</i>	Ki bangkong	35	4,332	3,87	1,768	9,966
7	<i>Toona sureni</i>	Surian	30	3,713	3,61	1,671	8,993
8	<i>Vernonia arborea</i>	Hamerang	29	3,589	3,35	2,145	9,086
9	<i>Castanopsis argentea</i>	Saninten	26	3,218	3,61	1,946	8,773
10	<i>Trevesia sundaica</i>	Panggung	26	3,218	3,61	1,762	8,589
11	<i>Podocarpus neriifolius</i>	Ki putri	26	3,218	3,09	1,722	8,033
12	<i>Symplocos spicata</i>	Jirak	24	2,97	2,32	1,738	7,028
13	<i>Rauvolfia javanica</i>	Ki bentelli	21	2,599	2,84	1,635	7,07
14	<i>Ficus variegata</i>	Kondang	18	2,228	2,58	0,756	5,561
15	<i>Trema orientalis</i>	Kurai	17	2,104	3,09	0,954	6,152
16	<i>Vilebrunea rubescens</i>	Nangsi	17	2,104	3,35	1,034	6,489
17	<i>Litsea angulate</i>	Huru	17	2,104	2,32	1,719	6,143
18	<i>Elaeocarpus obtusus</i>	Katulampa	16	1,98	2,32	1,967	6,268
19	<i>Eurya acuminata</i>	Ki sakiti	16	1,98	1,55	1,004	4,531

20	<i>Castanopsis javanica</i>	Ki hiur	15	1,856	2,06	1,167	5,086
21	<i>Dacrycarpus imbricatus</i>	Jamuju	15	1,856	1,8	0,781	4,442
22	<i>Macaranga rhizinoides</i>	Calik angina	14	1,733	2,06	0,741	4,536
23	<i>Litsea angulate</i>	Huru	14	1,733	1,8	1,517	5,055
24	<i>Leptospermum flavescens</i>	Kayu puti	11	1,361	1,55	2,535	5,443
25	<i>Castanopsis tungeureut</i>	Ki tungeureut	11	1,361	1,55	0,832	3,74
26	<i>Acronychia laurifolia</i>	Ki jeruk	10	1,238	2,06	4,201	7,501
27	<i>Geniostoma haemospermum</i>	Ki endog	7	0,866	1,03	0,687	2,584
28	<i>Persea rimosa</i>	Huru leneur	6	0,743	0,77	0,273	1,789
29	<i>Castanopsis acuminatissima</i>	Riung anak	6	0,743	1,03	0,284	2,058
30	<i>Astronia spectabilis</i>	Ki harendong	6	0,743	0,77	0,307	1,823
31	<i>Magnolia blumei</i>	Maglid	5	0,619	0,77	0,186	1,578
32	<i>Litsea tumentosa</i>	Huru meuhmal	5	0,619	0,77	0,142	1,534
33	<i>Engelhardia spicata</i>	Ki hujan	4	0,495	0,77	0,098	1,367
34	<i>Decaspermum fruticosum</i>	Ki serem	4	0,495	0,52	0,105	1,115
35	<i>Glochidion arborescens</i>	Marama	4	0,495	0,77	0,111	1,379
36	<i>Eugenia densiflora</i>	Kopo	4	0,495	1,03	0,119	1,646
37	<i>Polyosma integrifolia</i>	Ki jebug	3	0,371	0,52	0,071	0,958
38	<i>Vibirnum rutescens</i>	Ketumpang	3	0,371	0,77	0,078	1,222
39	<i>Eugenia cuprea</i>	Ki tembaga	3	0,371	0,77	0,086	1,231
40	<i>Elaeocarpus stipularis</i>	Janitri	3	0,371	0,77	0,054	1,198
41	<i>Cryptocarya tomentosa</i>	Huru kunyit	3	0,371	0,77	0,15	1,295
42	<i>Macropanax disperrum</i>	Panggung serem	3	0,371	0,77	0,024	1,168

43	<i>Turpinia Montana</i>	Ki bancet	3	0,371	0,77	0,081	1,225
44	<i>Mischocarpus fuscescens</i>	Ki hoe	3	0,371	0,77	0,089	1,234
45	<i>Disoxylum excelsum</i>	Pingku	3	0,371	0,77	0,083	1,227
46	<i>Rapanea hasseltii</i>	Ki harupat	2	0,248	0,52	0,11	0,873
47	<i>Flacourtia rukam</i>	Kupalandak	2	0,248	0,52	0,145	0,908
48	<i>Alstonia scholaris</i>	Pulai	2	0,248	0,52	0,08	0,844
49	<i>Helicia serrate</i>	Bareubeuy	2	0,248	0,52	0,067	0,83
50	<i>Hypobathrum frutescens</i>	Ki kopi	2	0,248	0,52	0,093	0,856
51	<i>Saurauja cauliflora</i>	Ki leho beureum	2	0,248	0,52	0,044	0,807
52	<i>Ficus ribes</i>	Ki wilen	2	0,248	0,52	0,059	0,822
53	<i>Homalanthus populneus</i>	Kareumbi	2	0,248	0,52	0,054	0,817
54	<i>Neonauclea obtuse</i>	Cangcaratan	1	0,124	0,26	0,089	0,471
JUMLAH			808	100	100	100	300

Sumber: Arrijani et al., 2006

Hutan hujan tropis memiliki reputasi dengan pohon-pohon besar. Berbagai macam ukiran/lukisan telah menggambarkan pohon-pohon dengan ukuran yang menakjubkan. Pohon pada kawasan hutan tropis memiliki struktur batang pohon yang lebar dan tinggi, beberapa pohon memiliki batang yang ramping, dan cabang cenderung tidak menyebar dari batang sampai tingkat kanopi, sehingga meningkatkan tampilan batang yang lebih tinggi. Pohon tropis tertinggi ditemukan di hutan hujan tropis dataran rendah, dan tingginya berkisar antara 25 dan 45 meter (kira-kira 80–150 kaki), dimana sebagian besar pohon kawasan hutan hujan tropis memiliki ukuran sekitar 25–30 m. Pohon-pohon tropis kadang-kadang melebihi ketinggian 45 m (150 kaki), dan beberapa tumbuh mencapai 61 m (200 kaki) dan kadang-kadang dapat mendekati 90 m (300 kaki), meskipun ketinggian seperti itu jarang terjadi. Di Amerika Serikat, hutan sequoia raksasa Sierra Nevada, hutan redwood California, dan hutan tua sitka spruce Pacific Northwest, hutan cemara Douglas, cedar merah barat, dan hemlock barat semuanya secara rutin memiliki ketinggian pohon yang melebihi rata-rata ketinggian pohon biasanya yang terdapat pada sebagian besar hutan tropis. Begitu juga dengan hutan eucalyptus bluegum di Australia tenggara.

Kehidupan hewan dan tumbuhan berlimpah dan beragam pada kawasan hutan hujan tropis. Istilah kekayaan spesies dan keanekaragaman hayati mengacu pada berapa banyak spesies berbeda dari takson tertentu yang menghuni area tertentu. Kekayaan spesies yang tinggi di antara banyak takson yang berbeda adalah salah satu fitur yang paling khas dari hutan hujan tropis di seluruh dunia. Pada hutan zona beriklim sedang, sering kali memiliki kemungkinan untuk menghitung jumlah spesies pohon cukup dengan menggunakan jari tangan dan kaki. Bahkan di hutan Amerika Utara yang paling beragam, di teluk Appalachian tenggara yang subur, hanya sekitar 30 spesies pohon yang tumbuh dalam satu hektar (10.000 meter persegi), atau sekitar 2,5 hektar. Namun, untuk daerah tropis lainnya, 40 hingga 100 atau lebih spesies pohon dapat tumbuh per hektar. Bahkan, satu situs di Amazon Peru telah ditemukan sekitar 300 jenis pohon per hektar (Gentry 1988). Brasil sendiri diperkirakan memiliki sekitar 55.000 spesies tanaman berbunga (Pusat Pemantauan Konservasi Dunia tahun 1992).

Kekayaan spesies serangga tampaknya lebih mendominasi dan melimpah pada kawasan hutan hujan tropis dibandingkan dengan spesies lainnya. Ditemukan hampir 550 spesies kupu-kupu di negara Kosta Rika, Amerika Tengah dimana 204 spesies kupu-kupu telah diidentifikasi, dan 136 spesies telah didokumentasikan untuk BCI (Devries and Walla 2001) dan selebihnya belum diidentifikasi. Selanjutnya, E.O. Wilson (1987) melaporkan mengumpulkan 40 genera dan 135 spesies semut dari empat tipe hutan di Cagar Alam Tambopata di Amazon Peru. Wilson mencatat bahwa 43 spesies semut ditemukan di satu pohon, jumlah totalnya kira-kira sama dengan semua spesies semut yang ada di Kepulauan Inggris. Kekayaan spesies serangga di kanopi hutan hujan Neotropis juga berlimpah dan terdapat 163 spesies kumbang yang hanya ada di satu spesies pohon di kawasan hutan hujan tropis Panama, *Leuhea seemanii*.

Selanjutnya para ahli ekologi memperkirakan bahwa jumlah spesies pohon berbeda yang ada di daerah hutan hujan tropis secara global memiliki potensi kekayaan spesies kumbang sekitar 8 juta lebih. Kumbang diperkirakan mewakili sekitar 40% dari semua spesies artropoda darat tropis (termasuk laba-laba,krustasea, lipan, kaki seribu, dan serangga). Kekayaan spesies artropoda total di kanopi hutan hujan tropis kemungkinan mencapai 20 juta, dan angka itu naik menjadi 30 juta jika menambahkan artropoda tanah dan tumbuhan bawah (Wilson 1992).

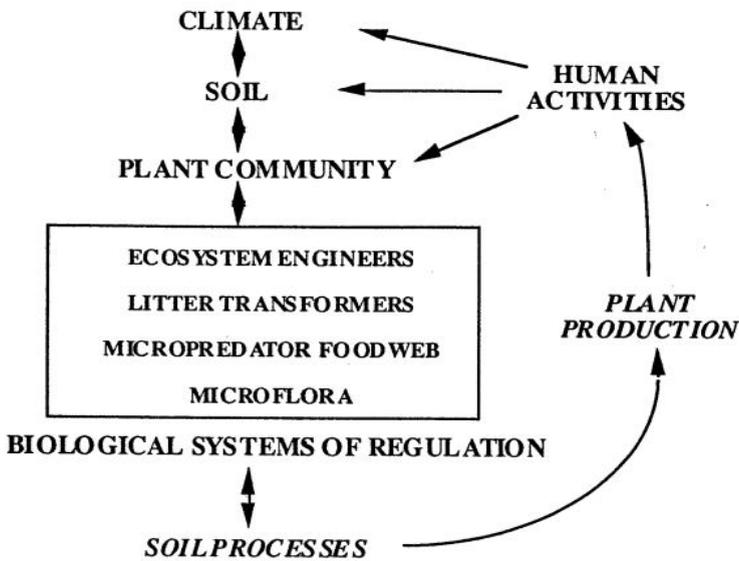
Hutan alam di Indonesia sebagian besar menempati tipe hutan tropis basah yang didominasi oleh kelompok pohon yang besar (Tsuji *et al.* 2016). Dataran yang ditempati oleh hutan ini adalah rata dan juga bergelombang, meskipun hutan ini dapat meluas ke bagian bawah lereng-lereng gunung sampai ketinggian kira-kira 100 meter di atas permukaan laut (3.218 kaki) atau bahkan lebih. Bukit Barisan menjadi primadona tersendiri bagi keanekaragaman hayati tanah, dimana bukit barisan diselimuti hutan yang tebal. Salah satu propinsi yang dilewati oleh bukit Barisan dan terkenal dengan kawasan hutan hujan tropik tanah tropika basah adalah Provinsi Sumatera Barat. Tempat komunitas biota tanah yang kompleks dan tempat yang menyediakan pohon dari berbagai ukuran. Di dalam kanopi, iklim mikro berbeda dengan keadaan sekitarnya, cahaya lebih sedikit, kelembaban sangat tinggi, dan temperatur lebih rendah. Pohon-pohon kecil berkembang dalam naungan pohon yang lebih besar, di dalam iklim mikro inilah terjadi pertumbuhan.

2.2. Tanah Tropika Basah

Tanah merupakan media tumbuh tanaman dan tempat berpijak bagi makhluk hidup yang terdiri dari horison-horison tanah di atas batuan induk membentuk lapisan tanah. tanah terbentuk dari interaksi berbagai faktor pembentuk tanah yang terdiri dari bahan induk, iklim, organisme hidup, timbulan, dan waktu. Tanah adalah rumah bagi lebih dari seperempat dari semua spesies hidup di bumi, dan satu sendok teh tanah kebun mungkin mengandung ribuan spesies, jutaan individu, dan seratus meter jaringan jamur. Biomassa bakteri sangat melimpah dan dapat mencapai 1-2 ton/ha – yang kira-kira setara dengan berat satu atau dua ekor sapi terutama pada tanah yang ditumbuhi rumput. Kelompok fauna tanah serta mikroorganisme yang dapat ditemukan di tanah pada umumnya dibagi menjadi tiga kelompok fungsional besar yang terdiri dari pereaksi kimia dalam tanah, melakukan aktivitas biologi dalam tanah, dan agen pengendali ekosistem. Sebagian besar spesies di dalam tanah adalah mikroorganisme, seperti bakteri, jamur, dan protozoa, yang merupakan agen pengatur senyawa kimia tanah dan bertanggung jawab atas penguraian bahan organik tanaman menjadi nutrisi yang tersedia untuk tanaman, hewan, dan manusia. Tanah juga terdiri dari berbagai macam fauna tanah berupa invertebrata kecil, seperti nematoda, cacing pot, springtails, tungau dan banyak lainnya, yang sebagian besar diantaranya bertindak sebagai pemakan

tanaman serta kelompok invertebrata lainnya atau mikroorganisme yang mengatur dinamika populasi dalam ruang dan waktu. Pada umumnya untuk kategori pengatur (aktivitas) biologis dalam tanah ini sebagian besar relatif tidak dikenal oleh khalayak yang lebih luas dan masih banyak yang belum diungkap/dipelajari, dimana hal ini antagonis dengan invertebrata yang lebih besar, seperti serangga, cacing tanah, semut dan rayap, kumbang tanah dan mamalia kecil, yang menunjukkan adaptasi yang lebih luas untuk bertahan hidup di dunia bawah tanah yang gelap. Berikut gambaran model hierarki fungsi tanah pada kawasan hutan hujan tropik (Gambar 8).

Figure 1: An hierarchical model of soil function (after Lavelle *et al.*, 1993)

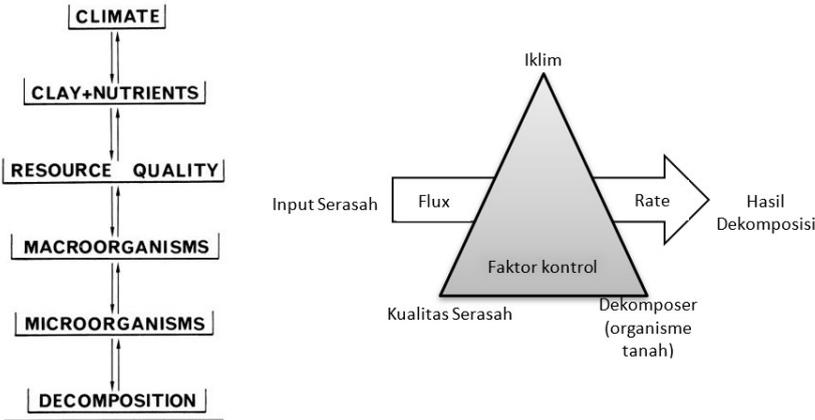


Gambar 8. Model hierarki fungsi tanah (Sumber: Lavelle *et al.*, 1993).

Gambar 8 mengisyaratkan bahwa aktivitas manusia juga bergantung dari produksi tanaman yang mempengaruhi kondisi iklim, tanah dan komunitas tumbuhan. Pemenuhan kebutuhan dengan meningkatnya jumlah penduduk menjadi faktor utama perubahan kondisi tersebut. dampak yang ditimbulkan adalah gangguan terhadap kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah manupun tumbuhan di atas permukaan tanah, layanan ekosistem dan dekomposisi serasah. Regulasi sistem biologi yang terganggu mempengaruhi semua aspek proses yang terjadi

baik itu reaksi kimia, fisik maupun interaksi biologis di dalam maupun permukaan tanah. semua proses yang terjadi di tanah merupakan pokok penting dalam menunjang aktivitas biota di dalamnya, terutama pertumbuhan tanaman. Terganggunya proses pertumbuhan tanaman mempengaruhi produktivitas tanaman. Tanaman yang tidak produktif akan merugikan manusia dalam pemenuhan kebutuhannya. Hal ini semakin memperjelas bahwasanya apa yang dirasakan oleh manusia dalam memperlakukan lingkungan, hasilnya akan kembali kepada manusia itu sendiri. Jika baik yang dilakukan maka hasil baik akan kembali dirasakan dan sebaliknya jika buruk yang dilakukan dengan tidak mempertimbangkan aspek lain yang dirasakan maka hasil buruk akan kembali dirasakan oleh manusia itu sendiri.

Gambar 9 menunjukkan model hirarki dekomposisi yang terjadi di atas permukaan tanah. Sebuah model umum disajikan untuk menjelaskan dinamika dekomposisi dalam ekosistem darat yang ditentukan oleh sekumpulan faktor yang tersusun secara hierarkis yang mengatur aktivitas biota tanah pada skala waktu dan ruang yang menurun dengan urutan sebagai berikut: iklim-mineral tanah liat + status nutrisi tanah - kualitas tanah- bahan organik di atas permukaan tanah yang membusuk sebagai akibat dari aktivitas organisme tanah membentuk sumber daya yang dibutuhkan oleh komunitas tanah. Pada skala penentuan yang lebih rendah, sistem regulasi biologis berdasarkan hubungan mutualistik antara makro dan mikroorganisme pada akhirnya menentukan tingkat dan jalur dekomposisi.



Gambar 9. Faktor yang menentukan taksiran dekomposisi pada ekosistem terestrial (Sumber: Lavelle et al., 1993 dan Bradford et al., 2016)

Empat sistem tersebut menurut Lavelle et al (1993) didefinisikan sebagai sistem serasah dan akar permukaan, rizosfer, drilosfer dan termitosfer di mana makroorganisme pengatur masing-masing adalah artropoda serasah dan akar permukaan, biota akar bawah tanah, cacing tanah endogeik, dan rayap. Di daerah tropis lembab, model umum ini sering diubah karena kendala iklim dan edafik dalam banyak kasus tidak penting dan karena kondisi suhu dan kelembaban yang tinggi sangat meningkatkan aktivitas sistem pengaturan biologis mutualistik yang memberikan kontrol yang lebih kuat pada serasah dan dinamika materi bahan organik tanah. Hipotesis umum ini dipertimbangkan berdasarkan informasi yang tersedia dari hutan hujan tropis dan sabana lembab. Implikasi teoretis dan praktis mengenai masalah keanekaragaman hayati dan praktik pengelolaan merupakan pembahasan lebih lanjut dalam buku ini. Disimpulkan bahwa keanekaragaman hayati mungkin ditentukan, setidaknya sebagian, oleh proses biologis tanah sebagai konsekuensi dari peningkatan interaksi mutualistik, yang memperbesar basis sumber daya yang tersedia bagi tumbuhan. Disimpulkan juga bahwa setiap upaya untuk memulihkan atau merehabilitasi tanah yang terdegradasi di daerah tropis yang lembab akan gagal kecuali tingkat optimal dari aktivitas akar serta invertebrata ditingkatkan dan efek pengaturan yang dihasilkan beroperasi dalam empat sistem pengaturan biologis yang dijelaskan di atas. Penelitian diperlukan untuk mendukung dan menguji secara memadai kumpulan konsep dan hipotesis yang disajikan saat ini.

Selain itu, secara singkat laju flux pada proses dekomposisi dijelaskan oleh Bradford et al. (2016) bahwa jatuhnya serasah segar di atas permukaan tanah merupakan input pertama bahan baku proses dekomposisi. Segitiga dekomposisi merupakan konseptualisasi klasik dari faktor-faktor dominan yang mengatur laju dekomposisi serasah dan dimodifikasi di sini untuk mewakili paradigma kontemporer (Gambar 9). Model asli menyatakan bahwa lingkungan fisikokimia, sifat-sifat serasah, dan organisme pengurai, merupakan kontrol mendasar pada laju dekomposisi. Swift et al., (1979) memisahkan kontrol fisika-kimia ke dalam faktor iklim dan edafik. Ide terbaru adalah bahwa kualitas serasah merupakan kontrol dominan pada skala spasial yang luas. Kedua, paradigma kontemporer ini mengasumsikan bahwa aktivitas organisme pengurai diatur oleh iklim dan kualitas serasah, sehingga tidak memberikan kontrol independen pada laju dekomposisi.

Selanjutnya yang disebut dengan tanah tropika basah adalah tanah yang terdapat pada kawasan hutan hujan tropis dengan curah hujan yang tinggi. Tanah tropika basah umumnya berjenis ultisol dan inceptisol. Keanekaragaman tumbuhan terutama jenis pohon yang tinggi pada kawasan ini menyebabkan banyaknya serasah yang jatuh di atas permukaan tanah. Hal ini mengakibatkan banyaknya kelompok biota tanah yang beraktivitas yang berpengaruh terhadap kualitas tanah. Kualitas tanah sehat yang menyediakan habitat yang baik bagi biota tanah pada kawasan tanah tropika basah berakibat pada kestabilan fungsi kawasan dalam menjaga keberlangsungan ekosistem.

Tanah tropika basah memiliki jenis tanah yang didominasi dengan tekstur liat. Hal tersebut tidak terlepas dari pengaruh curah hujan yang tinggi sepanjang tahun dan musim kering yang nyata atau jelas pada daerah tropis terutama kawasan hutan hujan tropis. Tanah tropika basah memiliki keanekaragaman jenis ordo tanah yang beraneka ragam terutama jenis ordo tanah yang telah mengalami pelapukan lebih lanjut yaitu Ultisol dan kelompok tanah yang sedang berkembang yaitu Inceptisol.

Ultisol merupakan jenis tanah dataran tinggi yang dominan menempati dataran bergelombang hingga bergulung di pulau-pulau terluar Sumatera, Kalimantan, Irian Jaya negara Indonesia. Ultisol sendiri mencakup sekitar 45,8 juta ha, atau sekitar 24,3% dari total Permukaan tanah Indonesia (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 2000). Sebaran yang luas pada jenis tanah ultisol memungkinkan jenis tanah ini memiliki banyak potensi dalam pemanfaatannya.

Jenis tanah ultisol memiliki banyak keterbatasan, mulai dari tingkat keasaman tanah yang rendah, tingkat kesuburan tanah yang rendah, nutrisi hara makro rendah dan ketersediaan P, kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa (KB) dan C-organik rendah sehingga kelompok jenis tanah ini kadang-kadang dikelompokkan sebagai tanah marginal. Curah hujan yang tinggi di sebagian besar wilayah Indonesia menyebabkan kandungan hara tanah sering kali mengalami pencucian keluar area tanah tropika basah dan yang tertinggal di dalam tanah selanjutnya akan bereaksi masam dan kejenuhan basa akan menjadi rendah yang menyebabkan sifat dan karakteristik kimia tanah bervariasi. Hal tersebut tentunya juga tidak terlepas dari pengaruh bahan induk tanah tersebut, dimana sebagian besar bahan induk tanah ultisol adalah batuan sedimen asam. Pengaruh lainnya

dalam proses pembentukan tanah adalah topografi, iklim, organisme, dan waktu.

Ultisol merupakan jenis ordo tanah dengan tingkat kesuburan tanah yang rendah dan mendominasi kawasan hutan hujan tropik Indonesia. Hara tanah mudah mengalami pencucian dan memiliki potensi besar terjadinya longsor. Hasil penelitian Yulnafatmawita (2014) tentang karakteristik tanah ultisol kawasan hutan hujan tropik tanah tropika basah di Sumatera Barat, menunjukkan bahwa tanah Ultisol memiliki kandungan liat yang sangat tinggi, dengan persentase >70% partikel liat dan kandungan Bahan Organik (BO) yang lebih rendah (<20%) pada lapisan tanah 20 cm permukaan tanah. Selanjutnya Yulnafatmawita *et al.* (2008) juga menambahkan bahwa agregat tanah memiliki stabilitas yang rendah atau dengan kata lain kurang stabil. Dalam hal ini tanah dengan ordo Ultisol memiliki pori tanah makro dan mikro yang tidak seimbang, dimana jumlah pori mikro lebih tinggi dibandingkan dengan pori makro, sehingga ketersediaan air tanah menjadi lebih banyak dan bisa memenuhi kebutuhan air bagi tanaman. Walaupun demikian, kondisi pori makro yang lebih sedikit menyebabkan udara terutama oksigen di dalam tanah menjadi lebih sedikit sehingga dibutuhkan kombinasi pori makro dan pori mikro yang seimbang untuk pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Banyak usaha yang telah dilakukan oleh para petani untuk kondisi tanah yang lebih baik dalam usaha budidaya tanaman, salah satunya yaitu dengan penambahan bahan organik tanah sebagai agen pengikat butir dan pemantap agregat ke dalam tanah secara reguler. Bahan organik tanah memiliki peran yang sangat penting bagi tanah Ultisol dengan kondisi hara tanah yang rendah, yaitu mengikat unsur/senyawa beracun sehingga tidak terserap oleh akar tanaman.

Selain Ultisol, jenis ordo tanah lainnya yang mendominasi tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropik yaitu ordo tanah Inseptisol. Inseptisol tergolong dalam tanah muda atau belum matang, dimana sifat tanah ini masih mirip dengan bahan induknya. Inseptisol masuk ke dalam kelompok jenis tanah yang mengalami pelapukan sedang dan tercuci, dimana adanya musim kering dan basah sangat mempengaruhi kedua sifat tersebut yang menempati wilayah tropika basah dengan luasan yang cukup tinggi mencapai 207 juta hektar (Sanchez,1992). Proses perubahan komposisi bahan induk yang cenderung lambat menyebabkan pembentukan lapisan horizon tanah juga menjadi lebih lambat. Hasil pelapukan secara terus menerus dalam membentuk lapisan horizon tanah terlihat tidak optimal. Karakteristik tanah

inceptisol adalah solum tanah yang tebal (sekitar 2 m), memiliki warna tanah coklat tua hingga kelabu,, struktur tanah yang remah dengan pH asam, kandungan hara dan produktivitas tanah sedang hingga tinggi serta kandungan bahan organik yang cukup tinggi, dimana inceptisol banyak ditemukan pada tanah tropika basah kawasan hutan.

Inceptisol merupakan ordo tanah yang mendominasi kawasan hutan hujan tropik, dimana jenis tanah mineral ini merupakan ordo tanah yang sedang berkembang. Tanah Inceptisol memiliki kandungan bahan organik rendah yang dilengkapi dengan pH dan KTK tanah juga rendah. Tanah ini memiliki struktur tanah yang halus bertekstur tanah liat dan cenderung kurang subur. Para petani memanfaatkan jenis tanah ini sebagai lahan perkebunan monokultur seperti kebun teh dan jenis tanaman hortikultura lainnya.

Tanah tropika basah menjadi lahan yang potensial untuk areal pertanian terutama perkebunan. Penggunaan lahan pertanian yang semakin meningkat, didukung juga dengan kepadatan dan populasi manusia yang bertambah. Perubahan penggunaan lahan dan intensifikasi penggunaan lahan tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropik didorong oleh meningkatnya permintaan global untuk produk pertanian (Foley, 2005) dan hutan dibuka untuk tanaman komersial dan perkebunan pohon industri secara besar-besaran terutama terlihat di Asia Tenggara. Pada kondisi yang sama, hutan hujan tropis dataran rendah Asia Tenggara adalah salah satu kawasan ekologi paling beragam di dunia dan memiliki jumlah spesies endemik dalam jumlah yang tinggi (Koh et al., 2013). Dalam penelitiannya Myers et al., (2000) menyatakan bahwa kawasan Asia Tenggara memiliki empat titik panas keanekaragaman hayati yang mengancam kelangsungan hidup biota tanah terutama kelompok biota endemik. Tingginya tingkat kehilangan habitat menyebabkan jumlah biota tanah endemik yang mendiami kawasan tersebut juga akan mengalami gangguan terhadap aktivitasnya dan kawasan tanah tropika basah mengalami kehilangan biodiversitas hayati secara bersamaan. Deforestasi, hilangnya habitat dan fragmentasi, dan meningkatnya penggunaan pupuk, herbisida, dan pestisida memberikan tekanan besar pada keanekaragaman hayati (Corlett, 2016), dan dinamika ini sangat parah pada daerah tropis (Gibbs et al., 2010). Perubahan penggunaan lahan dan intensifikasi penggunaan lahan terutama didorong oleh peningkatan permintaan global untuk produk pertanian, terutama di Asia Tenggara di mana mayoritas hutan dibuka untuk tanaman komersial pertanian dan perkebunan serta

pohon industri secara besar-besaran dalam lingkup kawasan yang luas.

Indonesia memiliki sejarah panjang degradasi dan konversi hutan menjadi lahan pertanian dan perkebunan. Selain memiliki kawasan hutan yang luas, hal lainnya yang mempengaruhi adalah tanaman pertanian dan perkebunan yang tumbuh dengan baik pada tanah tropika basah yang juga didorong oleh faktor lingkungan yang mendukung untuk pertumbuhan tanaman pertanian dan perkebunan di Indonesia. Pada tahun 2012 saja, Indonesia telah kehilangan sekitar 0,84 juta ha hutan sehingga saat ini Indonesia menjadi negara dengan laju deforestasi tertinggi di dunia. Sebagian besar hilangnya hutan ini terjadi di dataran rendah Indonesia, yang pada saat yang sama memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang tinggi (Margono et al., 2014). Di Sumatera, Kalimantan, Irian Jaya, konversi hutan menjadi pertanian monokultur dilakukan dalam skala besar oleh masyarakat, pemerintah dan swasta, seperti, kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) dan karet (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.) yang terjadi sejak tahun 1970-an yang telah meningkat dengan pesat dalam beberapa tahun terakhir. Konversi hutan untuk tujuan pertanian menyebabkan penurunan tajam keanekaragaman hayati masyarakat hutan (Böhnert et al., 2016; Betts et al., 2017) dan hilangnya fungsi ekologis secara substansial (Sodhi et al., 2010).

Hal ini mengkhawatirkan karena keanekaragaman hayati mengatur proses penting fungsi ekosistem (Hooper et al., 2005). Komunitas tumbuhan bawah memainkan peran penting dalam suksesi dan fungsi ekologis karena banyak komponen hutan seperti bibit pohon, herba, perdu, dan liana ditemukan di lapisan ini (Cicuzza et al., 2013). Komunitas tumbuhan bawah biasanya juga lebih beragam daripada lapisan pohon dan dengan demikian memberikan kontribusi yang signifikan terhadap keanekaragaman tumbuhan di hutan tropis. Bersamaan dengan efek langsung pada biota hutan yang dihasilkan dari konversi hutan hujan (misalnya Rembold et al., 2017), perubahan penggunaan lahan membuka pintu gerbang untuk invasi spesies tumbuhan asing yang dapat mengubah komunitas tumbuhan asli, bersaing dengan spesies asli, dan menyebabkan perubahan ekologi yang parah (Peh, 2010).

Spesies asing yang invasif juga dapat menyebabkan kerugian dan biaya ekonomi yang besar. Di Asia Tenggara, total kerugian tahunan yang disebabkan oleh spesies asing invasif diperkirakan

mencapai US\$33,5 miliar, hampir 90% di antaranya terkait dengan sektor pertanian (Nghiem et al., 2013). Hilangnya spesies asli dan penempatan kembali spesies asing merupakan penyebab utama homogenisasi biotik (Olden, 2006), sebuah proses yang mengarah pada penyederhanaan biotik dan situasi di mana spesies lebih dekat. terkait atau komunitas memiliki keragaman filogenetik rendah (Olden et al., 2004). Selanjutnya, bagaimana hilangnya spesies lokal dan penggantian spesies asli oleh spesies tumbuhan asing berinteraksi, kurang dipelajari dalam komunitas tumbuhan bawah tropis.

2.3. Faktor Biotik Dan Abiotik Fauna Tanah Kawasan Hutan Hujan Tropis Tanah Tropika Basah

Hutan hujan tropis merupakan tempat lahirnya kehidupan (kondisi sempurna untuk kehidupan) di Bumi, yaitu kaya akan komposisi jenis tumbuhan (>250 jenis tumbuhan/hektar) dan keanekaragaman fauna (>50% jenis hewan di dunia). Hutan hujan terjadi di dekat ekuator Bumi dan menutupi 6% permukaan bumi di seluruh wilayah tropis dan dicirikan oleh iklim basah, yaitu curah hujan tinggi (125—660 cm), kelembaban relatif (77—88%) dan suhu (20—34). °C). Mereka didominasi oleh berbagai macam pohon berdaun lebar yang membentuk tajuk yang rapat dan ekosistem yang paling kompleks.

Hutan hujan tropis memiliki struktur dan komposisi vegetasi yang paling beragam yang mendukung keragaman spesies fauna tanah seperti rayap, semut, kumbang, moles, dan invertebrata tanah lainnya, yang secara langsung maupun tidak langsung bergantung pada kawasan hutan hujan tropis untuk kelangsungan hidup dan keberadaannya. Kelompok ini kaya akan keanekaragaman habitat dan menyediakan berbagai sumber daya untuk spesies lainnya seperti makanan dan tempat tinggal. Kawasan tanah tropika basah hutan hujan tropis merupakan ekosistem vital, yaitu menyediakan jasa ekosistem penting seperti bahan baku, reservoir keanekaragaman hayati, perlindungan tanah, sumber kayu, tanaman obat, penyerapan karbon, dan perlindungan daerah aliran sungai.

Keanekaragaman tumbuhan yang melimpah dari jenis tumbuhan berumah satu maupun berumah dua, tumbuhan dikotil maupun monokotil tersebar pada kawasan hutan hujan tropik dengan tanah tropika basah. Julukan megabiodiversity menunjukkan keanekaragaman hayati indonesia sangat melimpah. Hal ini menyebabkan Indonesia

menjadi negara keragaman hayati tanah katagori paling lengkap. Semakin meningkatnya keanekaragaman hayati tanah terutama kelompok biota tanah, maka siklus hara kawasan tersebut juga akan semakin panjang, dengan semakin panjangnya daur hara maka potensi kehilangan unsur hara makro akan semakin kecil karena selanjutnya akan dilepaskan ke dalam subsistem tanah.

Selain keanekaragaman dan kelimpahan tumbuhan yang tinggi, tanah tropika basah juga memiliki keanekaragaman sumber daya hayati fauna tanah yang juga tinggi, sedangkan pada lahan terbuka (padang rumput) dan lahan pertanian tanaman pangan pada umumnya lebih rendah sebagai konsekuensi dari tingginya paparan radiasi panas matahari, pengolahan tanah intensif setiap musim tanam, penggunaan pupuk buatan dan pestisida yang berlebihan. Pada musim kemarau fauna tanah yang memiliki mobilitas tinggi bermigrasi ke habitat lain yang lebih sesuai. Lahan dengan tanaman tahunan yang memiliki naungan dan tidak ada pengolahan tanah intensif menjadi habitat utama bagi fauna tanah. Konservasi fauna tanah berperan penting dalam memperpanjang daur hara dan energi perlu diupayakan dengan menyediakan habitat yang tepat di sekitar kawasan lahan produksi.

Di hutan hujan tropis, penebangan menciptakan celah dan mengubah struktur habitat dan kondisi iklim mikro, misalnya suhu, kelembaban relatif, dan cahaya, yang mempengaruhi keanekaragaman dan distribusi fauna tanah. Setelah penebangan, habitat baru dengan iklim mikro yang fluktuatif dapat berkembang yang cenderung tidak cocok untuk fauna tanah yang beragam. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan mempengaruhi keragaman, kekayaan, dan distribusi fauna tanah invertebrata. Banyak peneliti yang telah menyatakan bahwa mengganggu habitat mempengaruhi kolonisasi dan distribusi fauna tanah. Kanopi hutan hujan tropis kaya akan fauna tanah seperti Coleoptera, Hymenoptera, Lepidoptera, dan Araneae. Namun, wilayah jelajah dan habitat mencari makan mereka dapat bervariasi tergantung pada jenis vegetasi, tipe hutan, dan wilayah biogeografis.

Kelompok fauna tanah seperti cacing tanah, semut, rayap, dan beberapa mamalia kecil adalah perekayasa ekosistem, karena mereka memodifikasi atau menciptakan habitat bagi organisme tanah yang lebih kecil dengan membangun agregat tanah dan pori-pori tanah yang tahan dari gangguan. Dengan cara ini, mereka juga mengatur ketersediaan sumber daya untuk organisme tanah lainnya karena

struktur tanah menjadi hotspot dari aktivitas mikroba. Tikus tanah misalnya, mampu memperluas sistem terowongan mereka hingga 30 cm per jam dan cacing tanah dapat menghasilkan cetakan tanah dengan kecepatan beberapa ratus ton per ha setiap tahun.

Fungsional fauna tanah seperti perekayasa kimia tanah, regulator biologi, dan perekayasa ekosistem yang memberikan kerangka kerja yang jelas untuk opsi pengelolaan kelimpahan dan keanekaragaman hayati tanah. Hal ini disebabkan ukuran organisme sangat menentukan pola agregasi spasial dan jarak penyebaran, serta masa hidup fauna tanah lainnya, dengan organisme yang lebih kecil. Perekayasa kimia biasanya dipengaruhi oleh faktor skala lokal dengan cakupan mulai dari mikrometer hingga meter dan proses jangka pendek, mulai dari detik hingga menit. Di sisi lain, Regulator biologis dan perekayasa ekosistem tanah, pada dasarnya dipengaruhi oleh faktor-faktor biotik dan abiotik yang bekerja pada skala spatio-temporal menengah, mulai dari beberapa meter sampai beberapa ratus meter dan dari hari ke tahun. Hal ini memberikan pengelola lahan dua pilihan pengelolaan yang berbeda untuk keanekaragaman hayati tanah yaitu tindakan langsung pada kelompok fungsional yang bersangkutan, atau tindakan tidak langsung pada skala spatio-temporal yang lebih besar daripada kelompok fungsional yang bersangkutan (Turbe et al., 2010).

Udara tidak terlihat dan keberadaannya berlimpah di atmosfer, sehingga mudah diabaikan sebagai faktor lingkungan abiotik. Udara yang menyelimuti bumi mengandung 78 persen nitrogen, 21 persen oksigen, 0,94 persen argon, 0,03 persen karbon dioksida, dan sejumlah kecil gas lainnya. Beberapa gas ini menyediakan zat yang mendukung kehidupan. Karbon dioksida (CO_2) diperlukan untuk fotosintesis. Fotosintesis merupakan serangkaian reaksi kimia yang menggunakan CO_2 , air, dan energi dari sinar matahari untuk menghasilkan molekul gula. Selanjutnya, sel menggunakan oksigen untuk melepaskan energi kimia yang tersimpan dalam molekul gula. Proses ini disebut respirasi. Melalui respirasi, sel memperoleh energi yang dibutuhkan untuk semua proses kehidupan. Fauna tanah yang bernapas dengan udara bukanlah satu-satunya organisme yang membutuhkan oksigen. Tumbuhan, beberapa bakteri, ganggang, ikan, dan organisme lain membutuhkan oksigen untuk respirasi. Organisme, seperti tumbuhan, yang dapat menggunakan fotosintesis disebut produsen karena menghasilkan makanannya sendiri. Selama fotosintesis, oksigen selanjutnya dilepaskan ke atmosfer. Tumbuhan merupakan aset penting bagi fauna tanah untuk tumbuh dan berkembang, baik sebagai sumber

makanan maupun habitat pada kawasan hutan hujan tropik.

Faktor abiotik lainnya adalah tanah itu sendiri sebagai tempat fauna tanah bernaung. Seperti yang telah kita bahas sebelumnya bahwa tanah merupakan campuran partikel mineral dan batuan, sisa-sisa organisme mati, air, dan udara. Ini adalah lapisan paling atas dari kerak bumi, dan mendukung pertumbuhan tanaman. Tanah terbentuk, sebagian, dari batuan yang telah dipecah menjadi partikel-partikel kecil. Tanah dianggap sebagai faktor abiotik karena sebagian besar terdiri dari partikel batuan dan mineral yang tidak hidup. Namun, tanah juga mengandung organisme hidup dan sisa organisme mati yang membusuk. Kehidupan tanah termasuk bakteri, jamur, serangga, dan cacing. Bahan membusuk yang ditemukan di tanah disebut humus. Tanah mengandung berbagai kombinasi pasir, debu, liat, dan humus. Selanjutnya, fauna tanah membutuhkan air untuk bertahan hidup. Kebutuhan air terkait dengan aktivitas sel di dalam tubuh fauna tanah untuk mendapatkan energi dalam melakukan aktivitas. Air sangat penting bagi kehidupan di Bumi. Ini adalah bahan utama cairan di dalam sel semua organisme. Faktanya, sebagian besar organisme terdiri dari 50 persen hingga 95 persen air. Respirasi, pencernaan, fotosintesis, dan banyak proses kehidupan penting lainnya hanya dapat berlangsung dengan adanya air.

Semua kehidupan membutuhkan energi, dan sinar matahari adalah sumber energi untuk hampir semua kehidupan di Bumi. Sinar matahari yang baik akan sangat bermanfaat bagi makhluk hidup terutama untuk menghasilkan energi dalam melakukan aktivitas. Selama fotosintesis, produsen mengubah energi cahaya menjadi energi kimia yang disimpan dalam molekul gula. Konsumen adalah organisme yang tidak dapat membuat makanannya sendiri. Energi diteruskan ke konsumen ketika mereka memakan produsen atau konsumen lain dan fotosintesis tidak dapat terjadi jika cahaya tidak pernah tersedia.

Sinar matahari memasok kehidupan di Bumi dengan energi cahaya untuk fotosintesis dan energi panas untuk kehangatan. Sebagian besar organisme dapat bertahan hidup hanya jika suhu tubuhnya berada dalam kisaran 0°C hingga 50°C. Air membeku pada suhu 0°C. Invertebrata tanah memiliki rentang kisaran suhu normal untuk bertahan hidup. Kelompok fauna tanah membutuhkan kelembaban yang efektif untuk melangsungkan hidupnya. Sering kali kelembaban bertindak sebagai faktor pembatas kehidupan fauna

tanah, dimana kelembaban yang tinggi juga menyebabkan hilangnya fauna tanah begitupun dengan sebaliknya. Banyak jenis serangga tanah memiliki batas toleransi sempit terhadap kelembaban, jika kondisi kelembaban lingkungan sangat tinggi hewan tanah bisa melakukan imigran ketempat lain bahkan sampai mati, serta kondisi yang kering terkadang juga mengurangi adanya jenis tertentu karena kurangnya populasi. Kelembaban juga mengontrol berbagai macam aktivitas hewan antara lain, aktivitas makan dan aktivitas bergerak. Secara tidak langsung pengaruh suhu ialah mempercepat kehilangan lalu lintas air yang mengganggu aktivitas fauna tanah. Suhu suatu daerah sebagian tergantung pada jumlah sinar matahari yang diterimanya. Jumlah sinar matahari tergantung pada garis lintang dan ketinggian tanah.

Fauna tanah bervariasi dalam kisaran suhu dan kelembaban optimalnya, dan variasi ini spesifik untuk tahap kehidupan, misalnya larva mungkin lebih memilih suhu dan kelembaban yang lebih optimal daripada kelompok fauna tanah dewasa. Misalnya, untuk springtail, suhu rata-rata optimum untuk bertahan hidup hanya di atas 20 °C, dan batas yang lebih tinggi adalah sekitar 50 °C, sementara beberapa bakteri dapat bertahan hingga 100 °C dalam bentuk resisten. Tekstur dan struktur tanah juga sangat mempengaruhi aktivitas biota tanah. Misalnya, tanah lempung bertekstur sedang dan tanah liat mendukung mikroba dan cacing tanah untuk melakukan aktivitas, sedangkan tanah berpasir bertekstur halus, dengan potensi retensi air yang lebih rendah, kurang menguntungkan. Salinitas tanah, yang dapat meningkat di dekat permukaan tanah, juga dapat menyebabkan stres berat pada organisme tanah, yang menyebabkan pengeringan yang cepat. Namun, kepekaan terhadap salinitas berbeda di antara spesies, dan peningkatan salinitas terkadang memiliki efek positif, dengan membuat lebih banyak bahan organik tersedia. Demikian pula, perubahan pH tanah dapat mempengaruhi metabolisme spesies (dengan mempengaruhi aktivitas enzim tertentu) dan ketersediaan nutrisi, dan dengan demikian sering mematikan organisme tanah. Ketersediaan fosfor (P), misalnya, maksimal ketika pH tanah netral atau sedikit asam, antara 5,5 dan 7,5 (Turbe et al., 2010).

Aktivitas dan keanekaragaman organisme tanah diatur oleh hierarki faktor abiotik dan biotik. Faktor abiotik utama adalah iklim, termasuk suhu dan kelembaban, tekstur tanah dan struktur tanah, salinitas dan pH. Secara keseluruhan, iklim mempengaruhi fisiologi organisme tanah, sehingga aktivitas dan pertumbuhannya meningkat

pada suhu dan kelembaban tanah yang lebih tinggi. Karena kondisi iklim berbeda di seluruh dunia dan juga, di tempat yang sama, di antara musim, kondisi iklim di mana organisme tanah terpapar sangat bervariasi.

Tanah Tropika basah merupakan tanah mineral dengan kondisi air hujan yang jatuh di atasnya dalam kondisi yang melimpah, yang menyebabkan kawasan ini memiliki laju dekomposisi bahan organik yang tinggi, sering menyebabkan terjadinya erosi tanah, dan akibatnya ketersediaan hara menjadi berkurang akibat pencucian hara. Laju dekomposisi yang tinggi menyebabkan kandungan C-Organik tanah dan efektivitas fungsi bahan organik tanah menjadi rendah.

Meskipun lahan basah tropis bergantung pada periode musiman kondisi basah dan kering, lahan basah ini semakin terancam oleh perubahan hidrologi. Perubahan hidrologi ini disebabkan oleh penggerak yang berhubungan dengan manusia termasuk perubahan iklim dan pengelolaan air yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan pertanian, industri, dan kebutuhan air perkotaan. Dampak ekologis negatif terhadap lahan basah tersebut diperkirakan akan meningkat di masa depan meskipun banyak manfaat sosial yang diberikan oleh ekosistem ini. Selain menyediakan habitat bagi ikan dan satwa liar, lahan basah tropis menyediakan makanan, menyimpan air banjir, meningkatkan kualitas air, dan menyediakan lahan penggembalaan yang berharga.

Kawasan air permukaan pada hutan hujan tropik merupakan areal perlindungan utama bagi ikan dan satwa liar selama bulan-bulan terkering dalam setahun, mendukung fungsi kehidupan organisme lainnya seperti burung, mamalia, ikan, dan organisme lainnya. Karena produktivitasnya yang tinggi dan konsentrasi sumber daya yang luar biasa, lahan tanah tropika basah di daerah tropis merupakan hotspot keanekaragaman hayati yang penting secara internasional yang juga sangat penting bagi masyarakat lokal yang mengelilingi lahan basah ini.

Dengan demikian, input air tawar dan siklus lahan tanah tropika basah yang menjaga ekosistem tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis menjadi hal yang perlu diprioritaskan dan dilindungi. Praktik pengelolaan air yang dirancang untuk memenuhi tuntutan perkotaan, pertanian, dan industri manusia yang meningkat dapat mempengaruhi kualitas, kuantitas, dan waktu pemasukan air tawar ke lahan tanah tropika basah, yang dapat memiliki dampak ekologis

yang besar. Lebih buruk lagi, perubahan iklim global diperkirakan akan memperburuk dan berpotensi memperkuat efek ekologis dari perubahan hidrologi lokal yang digerakkan oleh manusia. Proyeksi dampak perubahan iklim terhadap siklus hidrologi berbeda-beda di setiap wilayah. Namun, secara umum, pola curah hujan musiman diperkirakan akan berubah, dan kejadian kekeringan ekstrim dan banjir diperkirakan akan meningkat. Oleh karena itu, di masa depan, ekosistem lahan basah tropis diperkirakan akan semakin terpengaruh oleh perubahan hidrologi tersebut.

Mengingat kerentanan lahan tanah tropika basah kawasan hutan tropis terhadap perubahan iklim dan meningkatnya kebutuhan air manusia, ada kebutuhan mendesak untuk solusi yang menjaga keanekaragaman hayati, memaksimalkan ketahanan ekologi, dan mempertahankan jasa ekosistem untuk generasi mendatang. Di sini, kami mendefinisikan ketahanan ekologis sebagai kapasitas untuk menahan perubahan (misalnya, tidak terpengaruh oleh iklim ekstrem) dan ketahanan sebagai kapasitas untuk pulih setelah gangguan (misalnya, pulih setelah terkena dampak iklim ekstrem). Hidrologi adalah variabel pengendali utama di sebagian besar ekosistem lahan basah air tawar, dan hidrologi adalah titik awal terbaik untuk mengelola ketahanan lahan basah tropis. Kami berpendapat bahwa untuk mempertahankan lahan basah tropis dalam menghadapi perubahan di masa depan, kita harus melindungi siklus hidrologi basah-kering yang telah membentuk dan mendefinisikan ekosistem ini. Secara sederhana, kita harus melindungi fase “kering” dan fase “basah” dari siklus banjir basah-kering, dan kami memberikan contoh mengenai peran penting dari setiap fase.

Di daerah kawasan hutan hujan tropis, sumber daya air tawar biasanya langka selama musim kemarau. Untuk memenuhi tuntutan pertumbuhan populasi manusia, beberapa daerah telah mengembangkan praktik dan infrastruktur pengelolaan air yang meningkatkan jumlah air tawar yang tersedia untuk kebutuhan manusia selama musim kemarau. Setelah tujuannya, sebagian dari air yang tersisa mengalir ke lahan basah musiman selama periode di mana biasanya hanya ada sedikit atau tidak ada air. Misalnya, karena bendungan di hulu, kanal, dan/atau transfer air antar DAS, air dapat dikontrol dan secara tidak sengaja dilepaskan ke lahan basah tropis hilir selama musim kemarau. Sepintas, meningkatkan masukan air tawar ke lahan basah selama musim kemarau mungkin tidak tampak luar biasa atau bermasalah; namun, masukan air tawar

ke lahan basah selama fase “kering” dari siklus basah-kering dapat memiliki konsekuensi ekologis yang besar.

Mengganti rezim banjir musiman dengan rezim banjir permanen dapat memicu transformasi ekologis mendadak yang dikenal sebagai perubahan rezim ekologis. Pergeseran rezim yang dipicu genangan di lahan tanah tropika basah kawasan hutan tropis sering menurunkan keanekaragaman hayati, mendorong perluasan spesies non-asli yang invasif, dan mengurangi ketahanan ekologis. Banjir permanen mengurangi keanekaragaman hayati karena mosaik komunitas biologis berbeda yang mendefinisikan lahan basah ini bergantung pada rezim hidrologi musiman. Organisme yang tumbuh subur di lahan basah musiman tropis memiliki ciri-ciri riwayat hidup yang memungkinkan mereka untuk merespons dengan cepat dan pulih dari perubahan ketersediaan air. Ciri-ciri sejarah kehidupan ini memberikan tingkat ketahanan ekologis yang tinggi pada sistem. Misalnya, spesies tanaman yang dominan di ekosistem ini biasanya memiliki bank benih tanah yang berumur panjang yang memungkinkan individu baru untuk cepat beregenerasi dalam menanggapi kondisi banjir atau penarikan yang ideal. Bank benih tanah di sistem ini sering mengandung campuran beragam spesialis musim hujan dan musim kemarau (yaitu, spesies toleran banjir dan toleran penarikan, masing-masing) (Kozlowski, 2002).

Namun, ketahanan ekologi yang dimiliki ekosistem ini adalah hasil dari siklus basah-kering yang berfluktuasi, dan banjir permanen biasanya akan mengakibatkan berkurangnya ketahanan ekologis. Misalnya, banjir permanen dapat menghabiskan kumpulan spesies di bank benih tanah, karena spesies spesialis yang toleran kekeringan dan/atau mengalami penurunan menghilang dari sistem. Sebaliknya, peristiwa kekeringan berulang yang diselingi oleh peristiwa banjir yang dipersingkat yang tidak menghasilkan reproduksi juga dapat menghabiskan simpanan benih. Akibatnya, sistem tidak mempertahankan spesies yang dibutuhkan untuk merespons dan pulih dari kekeringan atau banjir ekstrem. Dengan kata lain, melindungi kondisi musim kemarau (yaitu, penarikan) dan osilasi basah-kering yang tepat dapat melindungi bank benih lahan basah yang memungkinkan lahan basah menjadi tahan terhadap kekeringan dan banjir ekstrem di masa depan.

Masukan air tawar pada musim kemarau akan mengubah lahan tanah tropika basah menjadi lebih lembab bahkan tergenang air dalam waktu yang lama dan hal tersebut berpotensi mengurangi

keanekaragaman dan kelimpahan fauna tanah.

Solusi untuk masalah ini adalah dengan melindungi dan mengelola fase “kering” dari siklus basah-kering. Untuk daerah-daerah tertentu yang menerima input air tawar yang tidak tepat waktu selama musim kemarau, solusinya mungkin mengalihkan input air tawar yang tidak tepat waktu ke daerah lain. Dan untuk daerah yang masih mengalami musim kemarau, pencegahan dan komunikasi menjadi solusi penting. Dengan kata lain, peran kritis lahan basah pada musim kemarau harus diperhatikan.

Pentingnya lahan tanah tropika basah bagi biogeokimia global, satwa liar, dan produksi makanan manusia jauh lebih besar daripada luas permukaan proporsional mereka di Bumi (hingga 6,4%). Baik lahan basah alami maupun pertanian merupakan sumber daya yang berharga dan ekosistem penting.

Lahan tanah tropika basah alami telah berkurang secara signifikan oleh aktivitas manusia dalam 100 tahun terakhir. Di masa lalu, pengelolaan lahan tanah tropika basah sebagian besar berarti mengubah lahan basah alami menjadi lahan pertanian dan Produksi perkebunan monokultur maupun perkebunan campuran. Dengan pengakuan nilai lahan basah, tujuan, seperti untuk melestarikan satwa liar populasi lahan basah, untuk memelihara dan meningkatkan siklus biogeokimia dan kualitas tanah, dan untuk menjaga atau meningkatkan kekuatan penyerap karbon dan unsur hara yang telah menjadi tugas pengelolaan lahan tanah tropika basah yang penting.

Sebagai akibat penggunaan lahan tanah tropika basah yang saling bertentangan, sulit untuk menyeimbangkan penyebut nilai dari berbagai lahan tanah tropika basah. Ada konflik antara kepentingan pemilik swasta di lahan tanah tropika basah, persepsi yang diperoleh masyarakat luas; dan nilai lahan basah sebagai bagian dari lanskap terpadu.

KARAKTERISTIK SIFAT FISIK DAN KIMIA TANAH

3.1 Sifat Fisik Tanah

Salah satu fungsi utama tanah adalah media tumbuh bagi tanaman, dimana tanah menjadi tempat bagi penetrasi akar (sifat fisik) untuk tumbuh dan berkembang. akar akan menyerap nutrisi dari dalam tanah untuk kelangsungan hidup tumbuhan, dimana akar muda akan cenderung menyerap air yang lebih banyak. Seiring dengan perkembangannya, akar pada tanah akan semakin berkembang dan menjadi area rhizosfer bagi mikrobia tanah. habitat alami pada rhizosfer akar akan memudahkan biota tanah baik itu fauna tanah maupun mikroba tanah untuk melakukan aktivitasnya. Kemudahan tanah untuk dipenetrasi oleh akar maupun menjadi habitat efektif bagi fauna tanah tergantung pada ruang pori-pori yang terbentuk diantara partikel-partikel tanah –partikel tanah (tekstur dan struktur) tanah dan stabilitas ukuran ruangpori tersebut tergantung pada konsistensi tanah terhadap pengaruh tekanan. Kerapatan porositas tersebut juga berpengaruh pada sirkulasi dan ketersediaan air dan udara.

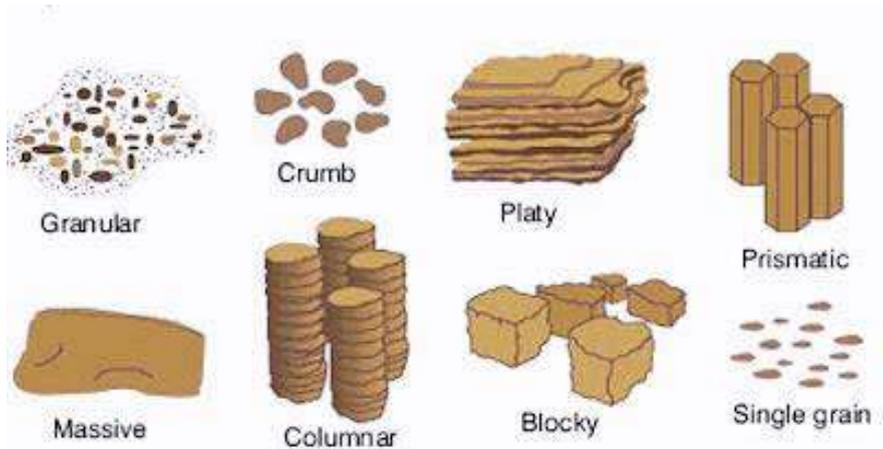
Sifat fisik tanah meliputi tekstur, struktur, porositas, kerapatan, konsistensi, warna, kestabilan agregat, dan berat volume tanah. Sifat-sifat ini mempengaruhi proses infiltrasi, erosi, siklus nutrisi, dan aktivitas biologis. Sifat-sifat ini juga mempengaruhi kesesuaian tanah untuk kegunaan yang berbeda, seperti infiltrasi air hujan, tanah dasar untuk jalan, dan kekuatan untuk bangunan.

Tekstur tanah mengacu pada proporsi partikel berukuran pasir, debu dan liat yang membentuk fraksi mineral tanah. tekstur tanah menunjukkan komposisi partikel penyusun tanah dengan ukuran yang variatif, dimana fraksi pasir memiliki ukuran partikel dengan diameter 2-0,2 mm, fraksi debu dengan ukuran diameter 0,2-0,002 mm dan fraksi liat dengan ukuran diameter partikel $< 2 \mu\text{m}$. Berikut lebih rinci distribusi ukuran partikel berdasarkan sistem USDA dan Sistem Internasional (SI), antara lain Pasir sangat kasar (2-1 mm), pasir kasar (1-0,5 mm), pasir sedang (0,5-0,25 mm), pasir (2-0,2 mm), pasir halus (0,25-0,10 mm), pasir sangat halus (0,10-0,05 mm), debu/USDA (0,05-0,002), debu/SI (0,02-0,002 mm), liat ($< 0,002$ mm).

Semakin kecil ukuran partikel fraksi mineral tanah, maka semakin banyak dan semakin luas permukaannya per satuan bobot tanah yang menunjukkan bahwa semakin padatnya partikel-partikel per satuan volume tanah (Hanafiah, 2005).

Tekstur tanah mempengaruhi banyak proses tanah, termasuk infiltrasi, drainase (distribusi air dan udara), erosi, proses kimiawi, dan proses biologis. Tekstur pasir memiliki karakteristik infiltrasi cepat, drainase cepat, kapasitas menahan air rendah, pencucian mineral dan bahan organik, proses kimia dan biologis berkurang dibandingkan dengan tanah dengan kandungan tanah liat tinggi. Debu memiliki karakteristik tingkat infiltrasi sedang, dikeringkan dengan baik, tingkat pemrosesan kimia dan biologi sedang, mudah terkikis dan dipadatkan. Tanah liat memiliki karakteristik laju infiltrasi lambat, drainase buruk, kapasitas menahan air tinggi, laju pemrosesan kimia tinggi bila tidak dipadatkan atau dijenuhkan dan mudah dipadatkan. Sedangkan tanah lempung: karena merupakan campuran pasir, lanau, dan lempung, tanah ini umumnya berdrainase baik, memiliki kapasitas menahan air yang baik, beragam secara kimiawi dan biologis serta aktif.

Susunan dan organisasi partikel di dalam tanah, dan kecenderungan partikel tanah individu untuk mengikat bersama dalam agregat digambarkan oleh struktur tanah. Agregasi mempengaruhi transportasi air dan udara, yang berpengaruh pada pergerakan zat terlarut dan polutan serta mempengaruhi aktivitas biologis, termasuk pertumbuhan tanaman. Perkembangan struktur tanah juga dipengaruhi oleh jumlah dan jenis lempung, serta ion-ion yang dapat ditukar pada lempung; jumlah dan jenis bahan organik, yang menyediakan makanan bagi jamur dan bakteri tanah serta sekresi bahan perekat (polisakarida); adanya bahan perekat seperti oksida besi dan aluminium; serta vegetasi yang menghasilkan bahan organik dan mengikat partikel tanah bersama-sama melalui perakaran. Struktur tanah biasanya dibagi menjadi salah satu kelompok berikut, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 10 di bawah ini.



Gambar 10. Tipe-Tipe Struktur Tanah (G. Geografi, 2017)

Penampakan bentuk dan susunan partikel-partikel primer tanah (pasir, debu dan liat) yang selanjutnya disebut dengan istilah struktur tanah hingga partikel-partikel tersebut bergabung membentuk partikel sekunder yang menghasilkan gumpalan (*ped*) yang membentuk agregat tanah (bongkah tanah). Tanah yang partikel-partikel primernya belum bergabung, terutama partikel bertekstur pasir disebut dengan tanpa struktur atau berstruktur lepas. Agregat tanah (*soil aggregates*) merupakan kelompok partikel tanah yang terikat satu sama lain dan lebih kuat dari partikel di dekatnya. Adapun tipe-tipe struktur tanah atau agregat tanah bisa dilihat pada Gambar 10.

Granular – berbentuk bulat atau agak bulat, seperti kacang anggur. Biasanya berdiameter 1-10 mm bahkan ada yang mencapai 1 cm. Paling umum di horizon A, di mana akar tanaman, mikroorganisme, dan produk lengket dari dekomposisi bahan organik mengikat butiran tanah menjadi agregat granular. Jenis agregat tanah ini biasanya memiliki kandungan organik yang tinggi dengan akar yang melimpah dan infiltrasi air besar. Crumb - jenis struktur ini seringkali tidak termasuk dalam klasifikasi, tetapi mewakili tanah di mana beberapa komponen granular telah beragregasi, tetapi tidak ditemukan pada struktur prismatic atau kolumnar. Kelompok struktur tanah ini berada di hrizon A, dengan relatif poreus dimana antar ped tidak terkait. Platy – peds datar yang terletak secara horizontal di dalam tanah. Struktur platy dapat ditemukan pada horizon A, B dan C. Ini umumnya terjadi

pada horizon A sebagai akibat dari pemadatan. Blocky – kira-kira berbentuk kubus, dengan permukaan yang kurang lebih datar. Jika ujung dan sudutnya tetap tajam. Ukuran umumnya berkisar antara 5-50 mm. Struktur gumpal merupakan ciri khas horizon B, terutama yang memiliki kandungan tanah liat yang tinggi. Mereka terbentuk dengan ekspansi berulang dan kontraksi mineral lempung. Prismatik – balok yang lebih besar, memanjang secara vertikal, seringkali dengan lima sisi. Ukuran biasanya 10-100mm. Struktur prismatik umumnya terjadi pada fragipans. Columnar – unit-unitnya mirip dengan prisma dan dibatasi oleh permukaan vertikal yang datar atau agak membulat. Bagian atas kolom, berbeda dengan prisma, sangat berbeda dan biasanya bulat.

Struktur tanah mempengaruhi pergerakan air dan udara di dalam tanah dan karenanya penting bagi biota tanah terutama fauna tanah. Tanah platy dan masif telah membatasi pergerakan udara dan air, sementara tanah granular telah meningkatkan transportasi udara dan air.

Struktur tanah menjadi hasil dari keragaman gaya-gaya fisik baik kimiawi maupun biologis yang bekerja dari dalam tanah. Sedangkan untuk tekanan atau gaya-gaya fisik dari luar yang bekerja pada tanah selaras dengan tingkat kejenuhan airnya merupakan konsistensi tanah. Faktor utama yang mendukung konsistensi tanah pada suatu tipe lahan adalah kepadatan tanah. Kepadatan tanah berhubungan dengan komposisi mineral dan bahan organik tanah serta struktur tanah. Ukuran standar kepadatan tanah adalah kepadatan partikel tanah, yang didefinisikan sebagai proporsi berat relatif tanah terhadap volumenya. Hal ini dinyatakan sebagai satuan berat per volume, dan biasanya diukur dalam satuan gram per sentimeter kubik (g/cm^3). Pada umumnya, kepadatan partikel tipikal adalah $2,65 \text{ g/cm}^3$ untuk mineral dan $1,3 \text{ g/cm}^3$ untuk bahan organik. Kepadatan partikel bahan organik lebih rendah dibandingkan dengan mineral, tanah dengan konsentrasi bahan organik lebih tinggi memiliki kepadatan yang lebih rendah. Kepadatan partikel dari tanah yang berbeda digambarkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Variasi kepadatan tanah pada berbagai jenis struktur tanah

Jenis Struktur Tanah	Kepadatan Tanah (gr/cm ³)
Gambut	0.2 to 0.3
Kompos	1.0
Tanah Berpasir	1.1 to 1.3
Pasir berlumpur	1.4
Lanau	1.3 to 1.4
Lempung berlumpur	1.2 to 1.5
Lanau/lempung organik	1.0 to 1.2
Glacial till	1.6 to 2.0
Rumput Perkotaan	1.5 to 1.9
Hancuran batu-batu kecil	1.5 to 2.0
Tanah Perkotaan	1.8 to 2.0
Lapangan Atletik	1.8 to 2.0
Jalan dan Bangunan (85% compaction)	1.5 to 1.8
Jalan dan Bangunan (95% compaction)	1.6 to 2.1
Trotoar beton	2.2
Kuarsit (batu)	2.65

Sumber: Minnesota Stormwater Manual (MSM), 2021

Tabel 2 menjelaskan variasi kepadatan tanah pada berbagai jenis struktur tanah, dimana jelas terlihat bahwa tipe kuarsit dan trotoar beton memiliki kepadatan tanah yang lebih tinggi. Kepadatan mempengaruhi transportasi air dan udara di dalam tanah. Tanah dengan kepadatan tinggi menahan transportasi air dan udara. Tanah dengan kepadatan tinggi juga dapat menghambat pertumbuhan akar. Beberapa aktivitas manusia mempengaruhi bulk density. Tanah di lokasi konstruksi umumnya dipadatkan akibat penggalian, pencampuran, penimbunan, penyimpanan peralatan, dan lalu lintas peralatan. Selain itu, lapisan tanah yang terbuka rentan terhadap pemadatan. Tanah liat dan tanah basah lebih rentan terhadap pemadatan. Bahkan di lokasi di mana perataan selektif digunakan, pemadatan terjadi sebagai akibat dari peralatan konstruksi, penimbunan, dan lalu lintas kendaraan (Lichter dan Lindsay, 1994). Ketika tanah dipadatkan, porositas berkurang dan kerapatan curah meningkat. Peningkatan tipikal dalam kerapatan curah ditunjukkan

pada tabel di sebelahnya, dengan kegiatan pemadatan lainnya disertakan untuk perbandingan. Akibatnya, permeabilitas udara dan air dalam tanah berkurang, kapasitas menahan air tanah berkurang, dan pertumbuhan akar terhambat. Pada skala DAS, pemadatan tanah menyebabkan peningkatan limpasan dan erosi.

Efek pemadatan sulit diatasi dan dapat bertahan selama beberapa dekade. Proses alami seperti siklus beku-cair, penggalian hewan, dan pertumbuhan akar hanya mengurangi pemadatan secara perlahan. Proses alami ini biasanya terbatas pada satu atau dua kaki bagian atas tanah. Bahkan ketika kerapatan curah menurun, struktur tanah asli mungkin tidak tercapai (Randrup, 1997; Schueler dan Holland, 2000). Penggunaan kompos adalah metode yang efektif untuk mengurangi pemadatan, sementara pengolahan tanah jauh kurang efektif. Namun perlu dicatat, ini adalah beberapa bidang penelitian yang sedang berlangsung dan beberapa penelitian menunjukkan bahwa pengolahan tanah yang dilakukan dengan benar dapat efektif dalam mengurangi pemadatan. Penurunan kepadatan tanah pada beberapa aktivitas penggunaan lahan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Penurunan kepadatan tanah pada beberapa aktivitas penggunaan lahan

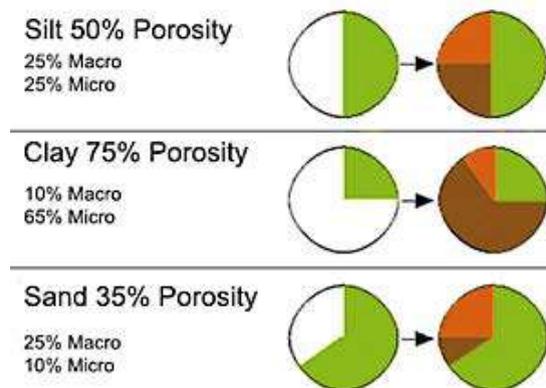
Penggunaan Lahan (Aktivitas)	Penurunan kepadatan tanah (gms/cc)	Sumber
Pengemburan tanah	0.00 to 0.02	Randrup, 1918. Patterson and Bates, 1994
Pelonggaran tanah khusus	0.05 to 0.15	Rolf, 1998
Penilaian selektif	0.00	Randrup, 1998 and Lichter and Linsy, 1994
Amandemen tanah	0.17	Patterson and Bates, 1994
Amandemen kompos	0.25 to 0.35	Kolsti et al. 1995
Waktu	0.20	Legg et al, 1996
Reforestration	0.25 to 0.35	Article 36

Sumber: Minnesota Stormwater Manual (MSM), 2021

Proses pemadatan tanah akan semakin memperkecil ruang pori tanah. Ruang pori merupakan bagian dari volume besar tanah yang tidak ditempati oleh mineral atau bahan organik tetapi merupakan ruang terbuka yang ditempati oleh gas/udara atau air. Porositas tanah

berbanding terbalik dengan kerapatan partikel tanah. Nilai porositas tanah akan berkurang seiring dengan bertambahnya bulk density pada tanah. Pada tanah bertekstur sedang yang produktif, total ruang pori biasanya sekitar 50% dari volume tanah. Kisaran porositas tanah ditunjukkan pada Tabel 8. Porositas tanah tidak bervariasi secara luas pada tekstur tanah. Porositas dikurangi kapasitas lapang menunjukkan ruang pori yang tersedia setelah air mengalir dari tanah oleh gravitasi dan dengan demikian dianggap sebagai batas atas air tersedia tanaman, dengan titik layu dianggap sebagai batas bawah.

Meskipun porositas berhubungan dengan densitas, ukuran pori merupakan faktor penting yang mempengaruhi proses tanah. Tanah dengan porositas yang sama mungkin memiliki distribusi ukuran pori yang berbeda. Pori-pori terkecil (diameter $<0,1 \mu\text{m}$) menahan air terlalu rapat untuk digunakan oleh akar tanaman. Air yang tersedia bagi tanaman disimpan dalam pori-pori berdiameter $0,1-75 \mu\text{m}$. Makropori (diameter $>75 \mu\text{m}$) umumnya terisi udara ketika tanah berada pada kapasitas lapang, tetapi pori makro dapat mengangkut air dan zat terlarut dengan cepat ke kedalaman yang lebih dalam di profil tanah. Tanah liat memiliki pori-pori yang lebih kecil, tetapi lebih banyak ruang pori total daripada pasir. Tanah dengan aktivitas biologis yang luas memiliki makroporositas yang lebih besar (misalnya akar tanaman, liang hewan). Keberadaan invertebrata mikro didalam tanah ditentukan oleh ketersediaan ruang pori makro sebagai tempat untuk bertahan hidup dan melakukan aktivitas. Adapun ilustrasi porositas tersebut dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Ilustrasi porositas pada pasir, lanau, dan lempung. Gambar: Penn State College of Agricultural Sciences (MSM, 2021)

Distribusi ukuran pori mempengaruhi kemampuan tumbuhan dan organisme lain untuk mengakses air dan oksigen; Pori-pori yang besar dan terus-menerus memungkinkan transmisi cepat udara, air, dan nutrisi terlarut melalui tanah, serta pori-pori kecil menyimpan air yang berasal dari curah hujan atau irigasi. Variasi ukuran pori juga meningkatkan aktivitas biologis dengan membagi ruang pori, yang mengurangi persaingan antar organisme, termasuk mikroba. Aktivitas manusia yang sama mempengaruhi struktur tanah dan kepadatan mempengaruhi porositas. Porositas dapat ditingkatkan pada tanah yang dipadatkan dengan penambahan bahan organik dan melalui pengolahan tanah. Makroporositas dapat dipromosikan dengan vegetasi perakaran yang lebih dalam.

Selanjutnya, ruang pori tanah memiliki suhu tanah yang variatif, dimana suhu tanah dipengaruhi oleh iklim, kandungan air tanah, warna tanah, penutup tanah (misalnya ada atau tidaknya mulsa), kedalaman profil tanah, dan aliran udara dan air di dalam tanah. Tanah berwarna gelap memanaskan lebih cepat dan mencapai suhu yang lebih tinggi daripada tanah berwarna terang. Bahan organik memberikan warna yang lebih gelap pada tanah, menyebabkan peningkatan pemanasan, tetapi juga menahan air, yang dapat memperlambat pemanasan. Tanah dengan porositas tinggi dan pori-pori yang terhubung dengan baik akan lebih cepat mengalami perubahan suhu tanah baik itu panas maupun dingin. Selain itu, Tanah di lereng yang menghadap ke selatan mengalami input termal yang lebih besar dibandingkan dengan tanah yang menghadap ke utara; Suhu tanah berfluktuasi lebih sedikit dengan kedalaman profil tanah; dan Suhu tanah berfluktuasi setiap hari.

Suhu tanah merupakan pertimbangan penting dalam sistem vegetasi. Vegetasi lahan mempengaruhi perubahan iklim mikro, dimana suhu juga menjadi salah satu faktor yang terpengaruh akibat hilangnya vegetasi. Perubahan penggunaan lahan atau deforestasi menjadi faktor utama penyebab hilangnya vegetasi. Berikut beberapa aktivitas manusia yang mempengaruhi perubahan suhu tanah, antara lain menambahkan bahan organik dan mulsa akan memperlambat pemanasan tetapi juga meningkatkan retensi panas pada tanah; Kegiatan yang memperbaiki struktur tanah, mengurangi pemadatan, dan meningkatkan konektivitas pori meningkatkan perpindahan panas; vegetasi lahan yang dapat menghasilkan naungan serta penutup tanah berwarna terang memantulkan radiasi matahari dan mengurangi pemanasan.

Warna tanah sangat ditentukan oleh kandungan bahan organik, kondisi drainase, tingkat oksidasi, dan dalam beberapa kasus, keberadaan mineral tertentu. Warna tanah sering kali digunakan sebagai sifat fisik tanah untuk mendeskripsikan karakter tanah, karena hal tersebut tidak secara langsung berhubungan dengan tanaman akan tetapi berpengaruh dampaknya melalui temperatur dan kelembaban tanah. Warna tanah bervariasi mulai dari putih, coklat, merah, kelabu, hitam dan kuning, dimana kebanyakan tanah pada suatu tipe lahan memiliki warna yang tidak murni melainkan campuran 2-3 warna. Warna tanah juga sering dijadikan indikator kondisi iklim pada suatu tipe lahan tempat tanah tersebut berkembang, termasuk juga indikator kesuburan tanah. Hal tersebut sering disimpulkan bahwa semakin gelap tanah, maka semakin subur tanah tersebut dan semakin tinggi kapasitas produktivitasnya karena kelimpahan bahan organik yang tinggi.

Proses fisik tanah alami biasanya terjadi secara perlahan, dengan pengecualian suhu tanah (berfluktuasi harian dan musiman) dan warna (perubahan sebagai respons terhadap kelembaban tanah). Porositas, densitas, dan struktur tanah berubah sebagai respons terhadap aktivitas biologis, karena biota tanah meningkatkan agregasi, menciptakan pori makro, dan mengubah konsentrasi bahan organik. Perubahan ini terbatas pada area biologis aktif bagian atas di dalam profil tanah. Pembentukan tanah adalah proses yang sangat lambat, dan dalam kondisi alami kerapatan dan struktur tanah berubah perlahan.

Manusia dapat dengan mudah mempercepat perubahan proses fisik tanah. Berbagai aktivitas manusia dalam perubahan fisik tanah dilakukan dalam rangka pemenuhan kebutuhan dan meningkatkan kesejahteraan. Adapun aktivitas tersebut antara lain:

- a. Pemadatan yang dihasilkan dari berbagai aktivitas menyebabkan menurunnya porositas tanah, meningkatkan densitas tanah, dan mengarah pada pembentukan struktur platy atau blocky pada tanah. Ini pada gilirannya membatasi aliran air dan udara, yang pada gilirannya berdampak buruk pada vegetasi dan biota tanah lainnya.
- b. Paparan tanah terhadap kekuatan erosi air dan angin yang terjadi secara alami dan yang terjadi selama kegiatan konstruksi, mengakibatkan hilangnya tanah, penutupan permukaan tanah, dan kerusakan struktur tanah permukaan.

- c. Proses pengolahan lahan dengan memecah tanah menjadi agregat yang lebih kecil, mengurangi kepadatan, meningkatkan porositas, dan untuk sementara mengganggu konektivitas pori, meskipun biasanya meningkatkan aktivitas biologis yang pada akhirnya meningkatkan konektivitas pori.
- d. Penambahan bahan organik tanah dan penutupan permukaan tanah dengan mulsa. Hal tersebut dapat menyuburkan tanah dan secara umum meningkatkan sifat fisik tanah. Penambahan bahan organik umumnya mengurangi kepadatan, meningkatkan agregasi dan struktur, meningkatkan aktivitas biologis, dan memoderasi suhu tanah dan proses hidrologi. Penutup permukaan seperti mulsa melindungi tanah dari kekuatan erosi, biasanya meningkatkan retensi air dengan mengurangi penguapan, dan suhu tanah yang moderat. Untuk informasi lebih lanjut, lihat Air hujan dan tanah, media rekayasa (bioretensi), dan amandemen media.

Kepadatan populasi manusia, menyebabkan kebutuhan lahan semakin meningkat yang mengakibatkan hutan alami semakin berkurang dan terdesak. Kawasan hutan hujan tropik yang semakin terancam menyebabkan banyaknya perubahan aspek fisik yang terjadi pada lingkungan kawasan hutan tersebut. salah satu contohnya adalah Bukit Pinang-Pinang yang merupakan kawasan hutan hujan tropik tanah tropika basah yang menjadi salah satu bagian dari rangkaian Bukit Barisan di Padang, Sumatera Barat. Banyak komponen faktor abiotik tanah yang terganggu, dimana salah satunya adalah sifat fisik tanah. Sifat fisik tanah berpengaruh terhadap kondisi habitat biota tanah. Keberadaan dan kehadiran biota tanah pada suatu tipe lahan, juga ditentukan dari aspek karakteristik fisika tanah. Karakteristik fisika tanah menggambarkan kondisi struktur tanah yang terdiri dari berat jenis tanah, tekstur tanah, dan kadar air tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang (Tabel 4).

Tabel 4. Karakteristik fisika tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

Tipe lahan	BV (gr/ cm ³)	KA (%)	Distribusi Ukuran Partikel			Kelas Tekstur
			Pasir	Debu %	Liat	
Hutan	0.73	0.37	16.30	31.34	52.36	Liat
Areal Terbuka	0.79	0.24	12.02	36.72	51.25	Liat
K e b u n Campuran	0.70	0.26	29.39	37.07	33.54	L e m p u n g Berliat
K e b u n Monokultur	0.66	0.24	20.97	42.94	36.09	L e m p u n g Berliat

Data pada Tabel 4 menunjukkan variasi nilai Berat Volum (BV) tanah. perbedaan nilai yang tidak signifikan ditampilkan pada tanah tipe lahan hutan, kebun campuran dan monokultur. Sedangkan areal terbuka memiliki nilai BV tertinggi dibandingkan dengan nilai BV pada tipe lahan lainnya pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang (ditandai dengan huruf kecil yang berbeda pada nilai BV). Tingginya berat volume tanah ini pada tipe lahan terbuka disebabkan sedikitnya bahan organik tanah yang disebabkan oleh hilangnya sebagian besar vegetasi permukaan tanah. Sebagai salah satu akibatnya pada tipe lahan tanpa vegetasi akan terkena langsung pukulan hujan yang menyebabkan tanah menjadi padat. Sebaliknya, tipe lahan monokultur memiliki nilai berat volume tanah yang paling rendah dibandingkan tipe lahan lainnya (Tabel 4). Berkurangnya serasah tanah pada suatu tipe lahan akan menyebabkan kandungan bahan organik rendah dan menurunnya kandungan bahan organik tersebut menyebabkan meningkatnya bobot isi tanah. Hal tersebut didukung oleh hasil penelitian Aprisal (2000); Basyra (2000); Yulnafatmawita *et al.* (2008); Adrinal *et al.* (2012) yang melaporkan bahwa penambahan bahan organik akan menurunkan nilai berat volume tanah dan bobot isi tanah yang diolah lebih kecil dibandingkan dengan bobot isi tanah tanpa diolah.

Seperti yang kita ketahui berat volume tanah merupakan indikasi terhadap kepadatan tanah. Berat volume tanah akan semakin tinggi pada tanah yang semakin padat dan sebaliknya. Hutan dan kebun campuran memiliki kepadatan tanah yang relatif sama. Ukuran berat volume tanah sangat bervariasi dan tidak hanya dipengaruhi

oleh bahan organik tanah melainkan juga dipengaruhi oleh tekstur tanah. Semakin padat lapisan tanah maka berat volumenya semakin besar, begitu juga sebaliknya. Kepadatan tanah akan semakin tinggi pada lapisan tanah yang semakin dalam. Hal tersebut disebabkan kandungan bahan organik yang semakin rendah, kurangnya agregasi dan terjadinya pemadatan.

Hasil analisis kadar air tanah pada tipe lahan hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur (Tabel 4) berkisar antara 0.23% – 0.37%. Nilai kadar air tertinggi terdapat pada tipe lahan hutan dan nilai kadar air terendah terdapat pada tipe lahan terbuka dan kebun monokultur. Nilai kadar air tanah pada tipe lahan hutan lebih tinggi dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Ketersediaan kadar air tanah juga bergantung terhadap bahan organik tanah. Serasah pada tipe lahan hutan menghasilkan bahan organik tanah yang bersifat menahan air. Semakin tinggi kandungan bahan organik di dalam tanah maka kemampuan tanah dalam meretensi air juga semakin tinggi. Bahan organik tanah bersifat dinamik, kandungannya mudah berubah dari suatu tanah ke tanah lain. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi tanah dalam menyimpan bahan organik tersebut serta faktor yang dapat mempercepat proses kehilangannya. Berkurangnya bahan organik dikaitkan dengan laju dekomposisi. Laju dekomposisi bahan organik meningkat dengan naiknya suhu dan curah hujan. Laju dekomposisi tertinggi terjadi di daerah tropik (Lavelle *et al.* 1994).

Selain itu, rendahnya kadar air tanah pada tipe lahan monokultur disebabkan penyerapan air tanah oleh tanaman kakao. Penetrasi akar tanaman kakao pada tipe lahan monokultur memperluas bidang penyerapan air tanah. Tanaman kakao membutuhkan air yang cukup untuk tumbuh dan berkembang. Produktivitas biomassa yang tinggi dibutuhkan tanaman untuk menghasilkan kualitas produksi tanaman budidaya yang tinggi. Menurut Hanafiah (2005), semakin besar bobot dan produksi biomassa serta semakin cepat laju pertumbuhan tanaman maka akan semakin banyak kadar air yang dibutuhkan. Semakin besar air konsumtif oleh tanaman akan mendorong pertumbuhan akar yang lebih cepat.

Di sini kita akan kembali melihat kondisi tekstur tanah berdasarkan hasil penelitian di kawasan hutan hujan tropis. Tekstur tanah pada beberapa tipe lahan hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur memiliki nilai fraksi pasir, debu dan liat yang berbeda. Pada tipe lahan hutan memiliki nilai fraksi pasir 16.30%, fraksi debu

31.34% dan fraksi liat 52.36% yang berarti pada tipe lahan hutan memiliki tekstur tanah liat. Pada tipe lahan terbuka nilai fraksi pasir 12.02%, fraksi debu 36.72% dan fraksi liat 51.25 yang berarti tipe lahan ini memiliki tekstur tanah yang juga liat. Tipe lahan kebun campuran memiliki nilai fraksi pasir 29.39%, fraksi debu 37.07% dan fraksi liat 33.54% yang artinya pada tipe lahan tersebut memiliki tekstur tanah lempung berliat. Pada tipe lahan monokultur memiliki nilai fraksi pasir 20.97%, fraksi debu 42.94% dan fraksi liat 36.09% yang berarti lempung berliat. Tekstur tanah yang berbeda akan mempengaruhi kemampuan tanah menyimpan dan menghantarkan air serta menyimpan dan menyediakan hara tanaman. Tanah bertekstur liat memiliki kemampuan menyimpan air dan hara tanaman yang tinggi. Akan tetapi, karena air yang diserap dengan energi yang tinggi, pada tekstur tanah liat akan sulit untuk dilepaskan terutama pada kondisi kering, sehingga kurang tersedia bagi tanaman. Tanah liat berlempung memiliki aerasi dan tata udara cukup baik sehingga kemampuan menyimpan dan menyediakan air untuk tanaman tinggi.

3.2 Sifat Kimia Tanah

Karakteristik sifat kimia tanah dilihat pada permukaan partikel tanah. Semakin halus partikel tanah akan menghasilkan luas permukaan partikel per satuan bobot yang semakin luas. Berbagai reaksi kimia tanah terjadi pada permukaan partikel ini, dimana dari reaksi kimia tersebut ditentukan pergerakannya, penyediaan dan penyerapan unsur hara oleh tanaman dari tanah. Hal ini menunjukkan bahwa fraksi liat yang menentukan sifat kimia tanah dan hal tersebut mempengaruhi kesuburan tanah.

Sifat kimia tanah meliputi konsentrasi bahan kimia tertentu (misalnya fosfor, nitrogen, karbon, kation utama (kalsium, magnesium, natrium, kalium), belerang, dan berbagai jenis logam lainnya), pH, kapasitas tukar kation, kejenuhan basa, salinitas, rasio adsorpsi natrium, enzim, dan konduktivitas listrik. Sifat-sifat ini mempengaruhi berbagai proses yang terjadi di lingkungan sebagai habitat fauna tanah seperti siklus nutrisi, aktivitas biologis, pembentukan tanah, nasib polutan, dan erosi. Kami mengambil beberapa contoh sifat kimia tanah dan menjabarkan hasil penelitian terkait sifat kimia tanah pada kawasan hutan hujan tropik yang akan berpengaruh terhadap lingkungan habitat fauna tanah. Sifat kimia tanah yang dibahas di bawah meliputi fosfor, nitrogen, kapasitas tukar kation, bahan organik

dan karbon, dan pH.

Fosfor memiliki ketersediaan terbatas di dalam tanah, dimana kandungan sekitar 0,2%. Dari berat kering tanaman. Fosfor sangat dibutuhkan oleh makhluk hidup karena memiliki peran utama dalam pembentukan adenosin trifosfat (ATP). Fosfor juga berperan sebagai komponen molekul jaringan seperti asam nukleat dan fosfolipid. Bersama dengan nitrogen, fosfor sering menjadi nutrisi pembatas dalam tanah. Ketersediaan fosfor yang sedikit dan terbatas di dalam tanah, menjadikan unsur hara ini sangat dibutuhkan oleh tanaman. Tanah yang terbatas pada fosfor mengurangi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, sedangkan kelebihan fosfor dapat dikeluarkan dari tanah dan memasuki badan air tawar. Sekitar 30 sampai 65 persen dari total fosfor tanah dalam bentuk organik dan 35 sampai 70 persen sisanya dalam bentuk anorganik. Mikroorganisme tanah memainkan peran kunci dalam mengolah dan mengubah bentuk organik menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Fosfor yang tersedia bagi tanaman, terdiri dari fosfor anorganik yang terlarut dalam air tanah. Fosfor yang melekat (diserap) pada permukaan lempung, oksida besi (Fe), aluminium (Al), dan kalsium (Ca) dalam tanah, yang dapat dilepaskan secara perlahan untuk serapan tanaman; dan mineral fosfor (misalnya apatit), yang dilepaskan dengan sangat lambat.

Ketersediaan fosfor umumnya meningkat dengan meningkatnya bahan organik tanah karena fosfor dilepaskan melalui mineralisasi bahan organik. Sumber organik segar (tidak dikomposkan) juga memiliki jumlah fosfor tersedia lebih banyak. Selanjutnya pada tanah liat; tanah dengan kandungan liat tinggi memiliki kapasitas retensi fosfor yang tinggi, sebab semakin luas permukaan partikel liat maka potensi ketersediaan unsur beserta reaksi kimia yang berada di permukaannya semakin tinggi. Pada mineralogi tanah: Tanah dengan konsentrasi aluminium, besi, dan kalsium yang tinggi memiliki kapasitas retensi fosfor yang tinggi. PH tanah; PH tanah optimal antara 6 dan 7 akan menghasilkan ketersediaan fosfor maksimum. Pada pH rendah (tanah asam), tanah memiliki jumlah aluminium dan besi yang lebih banyak, yang membentuk ikatan yang sangat kuat dengan fosfat. Pada pH tinggi fosfat cenderung mengendap dengan kalsium. Dan terakhir suhu, kelembaban, dan aerasi tanah dapat mempengaruhi laju mineralisasi fosfor dari dekomposisi bahan organik. Pada tanaman fosfor diserap dalam bentuk HPO_4^{2-} atau H_2PO_4^- dan PO_4 .

Sama halnya dengan Fosfor, nitrogen juga memiliki jumlah yang sedikit di dalam tanah, dimana kandungan nitrogen tersebut terdapat sekitar 1 persen dari berat kering tanaman. Nitrogen pada makhluk hidup berperan dalam pembentukan asam amino yang selanjutnya membentuk protein untuk pertumbuhan jaringan dan sel yang ditemukan di dalam tanaman (mengambil nitrogen di dalam tanah), serta untuk pembentukan klorofil. Bersama dengan fosfor, nitrogen seringkali merupakan unsur hara pembatas dalam tanah yang sangat dibutuhkan oleh tanaman. Tanah yang terbatas dalam nitrogen mengurangi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, sedangkan kelebihan nitrogen dapat diekspor dari tanah dan memasuki badan air tawar, termasuk air tanah. Nitrogen terdapat dalam bentuk organik dan anorganik di dalam tanah, dengan amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-) menjadi bentuk anorganik yang dominan.

Di dalam tanah banyak terdapat logam-logam yang terperap pada permukaan partikel berupa koloid tanah yang bermuatan listrik. Pada umumnya kation mudah larut di dalam air, namun karena koloid tanah (liat dan humus) bermuatan negatif, maka sebagian kation terikat dipermukaan partikel tanah tersebut dijerap oleh koloid tanah. Kation-kation yang terperap tersebut sukar tercuci oleh air gravitasi. Namun walaupun demikian, kation-kation tersebut dapat diganti atau bertukar dengan kation lain yang ada dalam larutan tanah. Adapun contoh kation-kation tersebut antara lain Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , NH_4^+ , H^+ , Al^{3+} . Selanjutnya peristiwa ini disebut dengan kapasitas tukar kation atau yang sering disebut dengan KTK. Kapasitas tukar kation (KTK) merupakan kapasitas total tanah untuk menahan kation yang dapat ditukar. Hal ini menentukan bagaimana nasib bahan kimia tanah lainnya, termasuk nutrisi dan polutan, serta menyediakan penyangga terhadap pengasaman tanah. Tanah lempung memiliki KTK yang lebih tinggi daripada tanah berpasir, dimana bahan organik tanah memiliki pengaruh terbesar pada KTK tanah. KTK erat hubungannya dengan kesuburan tanah. Tanah dengan KTK tinggi lebih mampu menyediakan unsur hara dibandingkan dengan KTK rendah. Bahan organik akan meningkatkan KTK tanah karena bahan organik memiliki KTK sekitar 4 kali lebih besar daripada tanah liat.

Tingkat asam basa tanah ditentukan oleh konsentrasi ion H^+ dalam tanah. Hal ini penting untuk diketahui dalam rangka menentukan tingkat kesuburan tanah dan perlakuan yang akan diberikan ke tanah dalam rangka meningkatkan kesuburan tanah untuk pertumbuhan tanaman yang lebih baik. pH menjadi ukuran kemasaman aktif atau

konsentrasi H^+ dalam larutan tanah. Tidak hanya tingkat keasaman tanah, pH tanah juga menjadi ukuran kebasahan tanah. pH tanah adalah properti tanah penting yang mempengaruhi kesesuaian tanaman, ketersediaan nutrisi, aktivitas mikroorganisme tanah, siklus kimia, dan mobilitas polutan seperti logam. pH tanah memiliki peran dalam menentukan kemampuan unsur hara untuk diserap oleh tanaman, dimana pada tanah yang masam unsur P akan sulit diserap oleh tanaman karena berikatan dengan logam Al dan tanah di dominasi oleh Fe, Zn, Mn, Cu yang menjadi mudah larut serta menjadi racun bagi tanaman. Sedangkan pada tanah dengan kandungan alkali tinggi unsur P akan difiksasi Ca serta ditemukan unsur mikro natrium (Na) dan Molibdenum (Mo) dalam jumlah besar dan meracuni tanaman. Dengan kata lain, dalam hal ini pH tanah menunjukkan keberadaan unsur-unsur yang beracun bagi tanaman. Selain itu pH juga menentukan kelimpahan mikroorganisme yang berperan di dalam tanah. Pada pH yang relatif lebih asam, maka tanah akan didominasi oleh kelompok fungi dengan hifa yang tersebar di dalam tanah ($pH < 5,5$) sedangkan pada kondisi pH relatif basa ($pH > 5,5$) maka kelompok mikroorganisme yang mendominasi adalah kelompok bakteri tanah.

Karakteristik kimia tanah yang telah dipahami di atas juga terjadi pada tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis. Karakteristik kimia tanah pada habitat alami hutan hujan tropis bagi fauna tanah ditunjukkan pada Bukit Pinang-Pinang yang merupakan rangkaian dari Bukit Barisan di Sumatera, Indonesia. Kawasan Bukit Pinang-Pinang yang telah berubah menjadi beberapa tipe lahan (hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur) membuat karakteristik kimia tanah menjadi bervariasi untuk masing-masing tipe lahan. Perubahan penggunaan lahan pada kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang menjadikan dinamika unsur kimia tanah lebih variatif dan semakin meningkat. Karakteristik kimia tanah pada kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang menjadi salah satu parameter kesuburan dan kesehatan tanah pada beberapa tipe lahan. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan data karakteristik kimia tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang, antara lain pH, N, P, K, C dan KTK tanah (Tabel 5).

Tabel 5. Karakteristik kimia tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

Tipe lahan	pH	N (%)	P (ppm)	K (me/100g)	C (%)	CTK (me/100g)
Hutan	4.85	0.44	15.23	0.14	5.88	14.04
Areal Terbuka	5.00	0.34	14.45	0.12	5.83	14.34
K e b u n Campuran	5.68	0.47	14.77	0.15	7.32	17.21
K e b u n Monokultur	5.78	0.56	20.64	0.14	6.88	16.59

Tabel 5 menunjukkan kisaran nilai pH tanah masam sampai agak masam. Variasi pH yang ditunjukkan menggambarkan terjadinya perubahan dinamika karakteristik unsur kimia tanah yang bervariasi pada kawasan hutan hujan tropis bukit Pinang-pinang. pH tanah yang merupakan tingkat derajat keasaman tanah memperlihatkan nilai tertinggi pada tipe lahan kebun monokultur dan terendah pada tipe lahan hutan. Tipe lahan kebun monokultur dan kebun campuran cenderung memiliki nilai pH yang lebih tinggi yaitu 5.78 dan 5.68 dibandingkan dengan tipe lahan hutan dan areal terbuka dengan nilai pH 4.85 dan 5.00 (Tabel 5). Tingginya nilai pH tanah pada tipe lahan kebun campuran dan kebun monokultur merupakan salah satu indikator yang menunjukkan tingkat kesuburan tanah pada tipe lahan tersebut lebih tinggi. Input tambahan kandungan hara sebagai langkah peningkatan kualitas pertumbuhan tanaman budidaya menyebabkan peningkatan basa kation tanah yang mengakibatkan pH tanah menjadi lebih tinggi. Pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang dengan curah hujan tinggi yang disertai dengan tingginya kandungan bahan organik di atas permukaan tanah akan memperbesar daya serap air oleh tanah yang mengakibatkan pelepasan ion H^+ semakin tinggi. Ion H^+ dari H_2O akan meningkatkan tingkat keasaman tanah yang menyebabkan nilai pH tanah menurun. Tingginya pH tanah pada tipe lahan budi daya disebabkan karena adanya sistem pengolahan tanah yang baik yang menyebabkan meningkatnya kation basa dalam tanah. Selanjutnya, kawasan hutan hujan tropis dengan kadar curah hujan yang tinggi menyebabkan terjadinya pencucian ion-ion yang bersifat basa sehingga mengakibatkan tanah pada kawasan ini cenderung bersifat masam sampai agak masam.

Selain itu, nilai pH tanah pada suatu tipe lahan juga dipengaruhi oleh kandungan bahan organik tanah. Pengaruh penambahan bahan organik tanah terhadap pH tanah yang dapat meningkat maupun menurun tergantung tingkat kematangan bahan organik tanah tersebut. Penambahan bahan organik tanah yang belum masak (misalnya pupuk hijau atau serasah) atau bahan organik yang masih mengalami proses dekomposisi biasanya akan menyebabkan pH tanah menjadi turun, karena selama proses dekomposisi akan dilepaskan asam-asam organik yang menyebabkan pH tanah menurun. Selanjutnya, peningkatan pH tanah akan terjadi apabila bahan organik yang ditambahkan telah terdekomposisi lanjut (matang) karena bahan organik yang telah termineralisasi akan melepaskan mineralnya berupa kation-kation basa.

Perubahan pH tanah dapat mempengaruhi komponen kimia tanah melalui efek langsung pada kelangsungan reaksi kimia tanah, serta melalui modifikasi metabolisme kimia tanah oleh komponen hayati tanah. Faktanya, beberapa enzim yang aktivitasnya sangat penting untuk regulasi metabolisme mikroba, seperti nitrogenase, bergantung pada pH tanah. Selain itu, kelarutan nutrisi dan ionisasi unsur mineral juga diatur oleh nilai pH.

Ketersediaan fosfor (P), misalnya, sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Ketersediaan P maksimal ketika pH tanah antara 5,5 dan 7,5. Kondisi tanah masam ($\text{pH} < 5,5$) menyebabkan pelarutan mineral aluminium dan besi yang mengendap dengan P terlarut. Kondisi dasar tanah ($\text{pH} > 7,5$) menyebabkan kelebihan kalsium dalam larutan tanah yang dapat mengendap dengan P, kembali menurunkan ketersediaan P. Ketersediaan P optimal adalah pH netral sampai sedikit asam. Sedangkan bagi ahli kimia, pH tanah merupakan salah satu faktor abiotik yang rentan terhadap pengaruh biologi dan aktivitas pengatur biologi. Sebuah korelasi, misalnya, telah ditunjukkan antara pH dan toksisitas terkait tembaga. Efek kontaminasi tembaga umumnya ditingkatkan dengan penurunan tanah pH.

Pengaruh pH terhadap ketersediaan logam berat di tanah tergantung pada kenyataan bahwa dengan meningkatkan pH biasanya logam berat mengendap sebagai hidroksida. Komposisi spesies dan kelimpahan kelompok trofik pada umumnya lebih sensitif dibandingkan jumlah total fauna tanah terutama kelompok nematoda. PH tanah dianggap sebagai faktor kunci yang menentukan keanekaragaman spesies komunitas fauna tanah terutama kelompok

mikroarthropoda, termasuk springtail dan tungau.

Springtails atau Colembola tanah telah mewarisi karakteristik fisiologis tertentu mengikuti adaptasi selama jalur evolusi mereka yang memungkinkan untuk memilih bagian atas tanah asam sebagai lingkungan yang sangat menguntungkan (Loranger et al., 2001). Sedangkan dalam kasus tungau, respon terhadap pH kurang jelas dibandingkan dengan kelompok lain. Tungau belum terlihat jelas gambarannya terhadap respon pada jenis kondisi pH tertentu. Tungau lebih menyukai pH netral dalam kondisi laboratorium. Namun, mirip dengan apa yang telah diamati untuk nematoda di lingkungan alami, respons spesies mikroarthropoda terhadap pH tanah dapat sangat bergantung pada konteks lingkungan (adanya senyawa beracun, jenis vegetasi, dll.).

Hasil sensitivitas pH fauna tanah yang diperoleh dalam kondisi laboratorium hanya merupakan indikasi untuk ekstrapolasi lapangan. Konteks lingkungan lokal dan sensitivitas individu dari spesies yang dianalisis harus selalu dipertimbangkan dalam evaluasi. Hal ini berlaku untuk regulator biologis, tetapi juga untuk gugus fungsi tanah lainnya. Serupa dengan apa yang telah diamati untuk pengatur biologis, pH tanah mengatur penyerapan senyawa beracun oleh perekayasa tanah sehingga memodifikasi kepekaan mereka terhadap polutan. Hal ini dapat mempengaruhi sejumlah parameter fisiologis fauna tanah, termasuk tingkat reproduksi. Fauna tanah terutama cacing tanah secara umum memiliki biomassa dan keragaman yang lebih tinggi pada pH netral meskipun perbandingan antara pola beriklim sedang dan tropis menunjukkan toleransi yang relatif lebih baik (satu unit pH) spesies tropis terhadap pengasaman dibandingkan dengan yang beriklim sedang.

Peran bahan organik terhadap ketersediaan hara dalam tanah tidak terlepas dari proses mineralisasi yang merupakan tahap akhir dari perombakan bahan organik. Mineral-mineral hara tanaman dengan lengkap dan jumlah yang tidak tentu atau relatif sedikit akan dilepaskan melalui proses mineralisasi. Unsur hara nitrogen (N) merupakan unsur hara yang relatif lebih banyak untuk dilepaskan yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

Nilai N total tanah menunjukkan kecenderungan (*trend*) yang sama dengan pH tanah (Tabel 5). Nilai N tanah pada kebun campuran (0.47%) dan pada kebun monokultur (0.56%) lebih tinggi dibandingkan dengan nilai N tanah pada tipe lahan hutan (0.44%) dan tipe lahan

areal terbuka (0.34%). Berdasarkan kriteria analisis kimia tanah, nilai tersebut tergolong ke dalam kategori sedang untuk tipe lahan hutan, areal terbuka, dan kebun campuran. Untuk tipe lahan kebun monokultur, masuk dalam kategori tinggi. Tingginya nilai N tanah pada tipe lahan kebun monokultur disebabkan pengaruh dari pemberian pupuk kandang yang dilakukan petani untuk meningkatkan kualitas pertumbuhan tanaman dan produktivitas buah kakao. Penambahan pupuk organik dalam tanah akan meningkatkan kandungan N total tanah. Hal tersebut disebabkan meningkatnya proses dekomposisi (pelapukan) pada permukaan tanah sebagai akibat penambahan bahan organik tanah. Proses dekomposisi tersebut dilakukan oleh kelompok biota tanah yang selanjutnya menghasilkan senyawa ammonium, nitrit, dan nitrat yang dimanfaatkan oleh tanaman sebagai sumber protein. Degradasi bahan organik yang terjadi pada perkebunan monokultur sangat berpengaruh terhadap ketersediaan N-total dalam tanah.

Sebagian besar nitrogen di dalam tanah tersimpan dalam bentuk molekul anorganik (N_2). Bahan organik sumber nitrogen (protein) akan mengalami aminisasi yang menguraikan protein menjadi asam amino. Selanjutnya, asam amino yang telah terbentuk dengan bantuan kelompok mikrobial heterotropik, akan diuraikan menjadi amoniak yang dikenal dengan proses amonifikasi. Amonia pada tanah kering akan menguap dan pada tanah basah/lembab akan terlarut dalam air dan membentuk ion ammonium (NH_4^+). Selanjutnya, ion amonium dapat langsung digunakan oleh tanaman dan bakteri untuk sintesa asam amino. Walaupun demikian, pemanfaatan nitrogen oleh kebanyakan tumbuhan umumnya dalam bentuk NO_3^- , karena ion ammonium NH_4^+ akan dioksidasi oleh kelompok bakteri nitrifikasi menjadi NO_3^- . Di samping itu, ion ammonia dan ammonium ini bersifat racun bagi tumbuhan dan dapat menghambat pembentukan ATP sehingga bahan organik tanah sangat berpengaruh terhadap ketersediaan N dalam tanah.

Selain itu, masih terlihatnya beberapa tanaman liar yang tergolong dalam kelompok *legume* dan polong-polongan seperti *Mimosa pudica*, *Leucaena leucocephala* dan kelompok Fabaceae liar yang dapat meningkatkan nilai N total dalam tanah. Kelompok tanaman ini akan memfiksasi N_2 simbiotik dari atmosfer. Selanjutnya, meningkatkan kandungan N total tanah terutama pada daerah *rhizosfer* akar. Menurut Rinnofer *et al.* (2008), tanaman penutup tanah berupa tanaman *legume* pada lahan pertanian berfungsi untuk mengurangi pencucian nutrisi terutama N-total tanah. Lalu, menurut Schomberg

et al. (2012), bagian akar kelompok tanaman legume atau polongan akan membentuk bintil akar (nodul) yang merupakan bentuk dari simbiosis bakteri dengan akar tanaman sebagai pengikat N_2 atmosfer. Kelompok tanaman *legume* pada tipe lahan pertanian secara simbiotik dapat mengikat N_2 dari udara. Input pupuk untuk kandungan hara N bisa diminimalisasi atau tidak sama sekali digunakan.

P tersedia tanah pada Tabel 5 menunjukkan nilai yang bervariasi untuk masing-masing tipe lahan. Nilai P tersedia tanah tertinggi terdapat pada tipe lahan monokultur yaitu 20.64 ppm dan nilai P tersedia tanah terendah terdapat pada tipe areal terbuka yaitu 14.45 ppm. Tingginya kandungan P tersedia tanah pada tipe lahan monokultur disebabkan kebutuhan tanaman kakao akan unsur P yang membutuhkan tambahan unsur P. Tanaman kakao merupakan tanaman penghasil buah dan biji, yang membutuhkan unsur P dalam jumlah yang banyak. Pemberian P yang cukup, sangat diperlukan untuk pembentukan biji dan buah. Rendahnya kandungan P pada tipe lahan terbuka, disebabkan hilangnya sebagian besar vegetasi pohon yang menyebabkan P tersedia tanah akan hanyut bersama aliran permukaan. Selain itu, tingginya kandungan P tersedia pada tipe lahan monokultur juga disebabkan oleh kandungan pH tanah yang juga tinggi (Tabel 5). Kandungan pH tanah yang tinggi menyebabkan P tanah tersedia menjadi bebas di dalam tanah dan tidak terikat oleh unsur Al dan Fe sehingga P tanah tersebut mudah untuk diserap tanaman. Kandungan P tanah tersedia seringkali terikat oleh unsur kimia mikro Al dan Fe yang bersifat racun bagi tanaman, sehingga untuk menguraikan unsur kimia Al dan Fe, diperlukan kondisi tanah dengan pH tinggi, yaitu dengan penambahan bahan organik dan kapur.

Pengaruh bahan organik terhadap ketersediaan P dapat secara langsung melalui proses mineralisasi atau secara tidak langsung dengan membantu pelepasan P yang terfiksasi. Ketersediaan P di dalam tanah dapat ditingkatkan dengan penambahan bahan organik melalui proses mineralisasi dengan pelepasan P dari PO_4^{3-} dan melalui reaksi asam organik serta senyawa pengkhelat hasil dekomposisi. Terjadi pelepasan posfat yang berikatan dengan Al dan Fe yang tidak larut menjadi bentuk terlarut serta penambahan bahan organik mampu mengaktifkan proses penguraian bahan organik asli tanah. Selain itu, asam-asam organik hasil proses dekomposisi bahan organik juga dapat berperan sebagai bahan pelarut batuan posfat, sehingga posfat terlepas dan tersedia bagi tanaman.

Masih pada hasil penelitian kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang, kandungan hara K tanah juga menunjukkan nilai yang bervariasi. Kebun campuran memiliki nilai K tanah yang lebih tinggi yaitu 0.15 me/100gr dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Tipe lahan terbuka memiliki kandungan hara K tanah terendah yaitu 0.13 me/100gr. Kandungan K hasil pelapukan mineral di dalam tanah dijumpai dalam jumlah yang bervariasi tergantung jenis bahan induk pembentuk tanah. Tingginya kandungan K tanah pada tipe lahan campuran tidak hanya disebabkan oleh pelapukan mineral tanah, melainkan juga dari hasil dekomposisi bahan organik tanah. Kalium dapat bertambah ke dalam tanah melalui berbagai sumber sisa tanaman, hewan, pupuk kandang dan pelapukan mineral kalium. Pertambahan kalium dari sisa tanaman dan hewan merupakan sumber yang penting dalam menjaga keseimbangan kadar kalium di dalam tanah. Rendahnya kandungan K tanah pada tipe lahan terbuka disebabkan oleh kondisi lahan yang terbuka yang menyebabkan unsur K tanah mudah tercuci pada saat curah hujan tinggi. Unsur K mempunyai bentuk terhidrasi yang relatif besar dan bervalensi 1 sehingga unsur ini tidak kuat dijerap muatan permukaan koloid, dan mudah mengalami pencucian.

Selanjutnya, hasil analisis kandungan C-organik tanah pada empat tipe penggunaan lahan yang berbeda, menunjukkan bahwa nilai C-organik berada pada kriteria tinggi seperti yang ditampilkan pada Tabel 5. Tipe lahan kebun campuran memiliki kandungan nilai C organik tanah tertinggi dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Tingginya kandungan C organik tanah pada tipe lahan kebun campuran. Selain disebabkan oleh penambahan komponen bahan organik tanah yang telah matang berupa pupuk kandang, juga disebabkan keragaman vegetasi penyusun kebun campuran yang menghasilkan komponen utama penyusun bahan organik. Kelimpahan dan keragaman serasah permukaan tanah yang ditumbuhi oleh tanaman buah dan tumbuhan liar yang rutin dipangkas oleh petani akan menyebabkan meningkatnya jumlah bahan organik tanah. Serasah tanaman akan menyumbangkan bahan organik untuk perombakan mikrobial tanah yang berisi 50% karbon. Tipe lahan terbuka menunjukkan nilai C organik tanah terendah dibandingkan tipe lahan lainnya. Hal tersebut disebabkan sedikitnya bahan organik di permukaan tanah sebagai akibat dari hilangnya vegetasi lahan tersebut. Salah satu komponen pokok tempat penyimpanan C adalah bahan organik.

Hasil analisis KTK tanah menunjukkan bahwa pada masing-masing tipe lahan lokasi penelitian, memiliki nilai KTK tanah yang bervariasi. Walaupun demikian, nilai KTK tanah tertinggi terdapat pada tipe lahan kebun campuran yaitu 17.21 me/100g tanah, sedangkan nilai KTK tanah terendah terdapat pada tipe lahan hutan yaitu 14.04 me/100g tanah. Tingginya nilai KTK tanah pada tipe lahan kebun campuran disebabkan dekomposisi bahan organik yang ditambahkan untuk meningkatkan kualitas pertumbuhan tanaman dan menghasilkan humus. Kelimpahan bahan organik permukaan tanah menyebabkan terjadinya peningkatan KTK tanah. Bahan organik tanah memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai KTK, dimana bahan organik akan meningkatkan kandungan senyawa karboksil COOH yang akan meningkatkan muatan negatif pada kompleks adsorpsi. Kompleks jerapan yang didominasi oleh unsur-unsur seperti Al dan Fe akan digantikan oleh unsur yang memiliki kemampuan jerapan yang lebih besar. Selanjutnya, bahan organik, liat oksida, dan sebagian besar nilai KTK liat silikat dipengaruhi oleh pH tanah. KTK tanah tinggi pada pH tinggi dan dapat menurun pada pH rendah yang disebabkan oleh pengaruh ion H^+ dan OH^- . Apabila kadar H^+ tinggi yaitu pada pH rendah, muatan negatif akan menjadi netral, sedangkan pada kadar OH^- tinggi (pH tinggi) maka muatan negatif ini tetap.

Seperti yang dijelaskan, bahwa penambahan bahan organik memberikan kontribusi yang nyata terhadap KTK tanah. Sekitar 20 - 70 % kapasitas pertukaran tanah pada umumnya bersumber pada koloid humus, sehingga terdapat korelasi antara bahan organik dengan KTK tanah. Kapasitas tukar kation (KTK) menunjukkan kemampuan tanah untuk menahan kation-kation dan mempertukarkan kation-kation tersebut termasuk kation hara tanaman. Kapasitas pertukaran kation penting untuk kesuburan tanah. Humus dalam tanah sebagai hasil proses dekomposisi bahan organik merupakan sumber muatan negatif tanah. Menurut Brady dan Weil (1990), dalam suasana pH rendah (masam), hydrogen akan terikat kuat pada gugus aktifnya dan berubah menjadi bermuatan positif, sehingga koloid yang bermuatan negatif menjadi rendah akibatnya KTK menjadi turun. Sebaliknya dalam kondisi pH yang tinggi, larutan tanah banyak mengandung gugus karboksil (OH^-) yang mengakibatkan terjadinya pelepasan H^+ dari gugus organik dan terjadi peningkatan muatan negatif sehingga KTK meningkat.

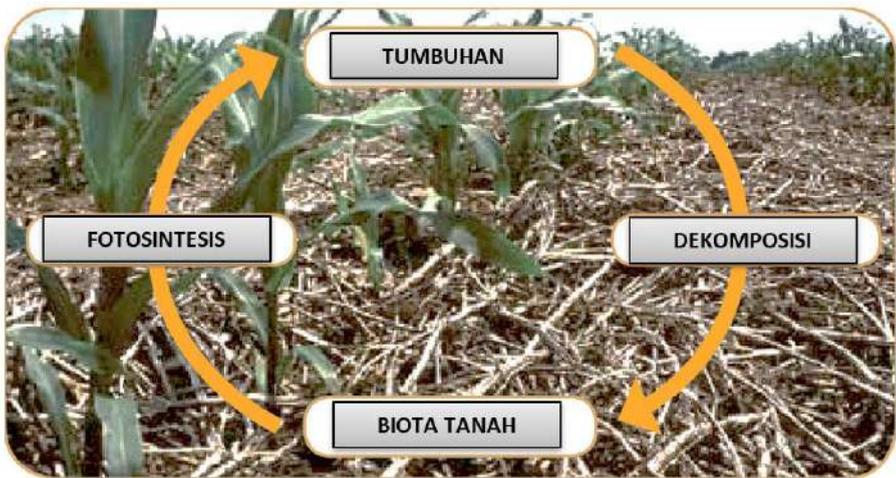
3.3 Bahan Organik Tanah

Kami memisahkan dan secara khusus membahas bahan organik tanah dalam satu judul, meskipun secara tidak langsung bahan organik tanah beserta proses dekomposisi telah dibahas di bagian judul lainnya. Hal ini kami anggap penting mengingat bahan organik tanah menjadi kunci utama terhadap kesuburan dan kesehatan tanah yang mempengaruhi kelimpahan dan keragaman fauna tanah. Kawasan hutan hujan tropik dengan tanah tropika basah yang dikaruniai berbagai jenis tumbuhan/pohon serta komunitas hayati lainnya akan meninggalkan banyak sumber bahan organik tanah. Bahan organik di dalam tanah diperoleh dari sisa tanaman dengan berbagai tahap dekomposisi. Bagian tanaman di atas tanah (*phytomass*) biasanya dikeluarkan dari pengertian bahan organik tanah, tetapi akar hidup dimasukkan ke dalam bahan organik tanah. Bahan organik tanah terbentuk dari serasah dan tubuh tumbuhan yang telah mati.

Penambahan terus menerus dari sisa tanaman yang membusuk ke permukaan tanah berkontribusi terhadap aktivitas biologis dan proses siklus karbon di dalam tanah. Daur karbon menjadi transformasi terus menerus dari senyawa karbon organik dan anorganik oleh tanaman yang diperankan langsung oleh mikro- dan makro-organisme antara tanah, tanaman dan atmosfer. Dekomposisi bahan organik sebagian besar merupakan proses biologis yang terjadi secara alami. Kecepatannya ditentukan oleh tiga faktor utama: organisme tanah, lingkungan fisik, dan kualitas bahan organik. Dalam proses dekomposisi, produk yang berbeda dilepaskan: karbon dioksida (CO₂), energi, air, nutrisi tanaman, dan karbon organik yang disintesis kembali. Dekomposisi berturut-turut dari bahan-bahan organik yang mati dan termodifikasi menghasilkan pembentukan bahan organik yang lebih kompleks yang disebut humus, yang dibentuk dalam proses humifikasi. Humus mempengaruhi sifat-sifat tanah. Saat perlahan-lahan terurai, tanah akan berwarna lebih gelap; meningkatkan agregasi tanah dan stabilitas agregat serta meningkatkan KTK (kemampuan menarik dan mempertahankan unsur hara); dan menyumbang N, P dan unsur hara lainnya.

Serasah merupakan bagian dari tumbuhan (daun, bunga, buah, ranting, cabang, batang dan kulit kayu) yang mati dan selanjutnya gugur di atas permukaan tanah. Serasah memegang peranan penting dalam penyedia nutrisi bagi tanaman dan perputaran hara dalam suatu lingkungan atau kawasan. Dalam suatu siklus hara yang terjadi

di hutan serasah merupakan sesuatu yang berperan dalam proses input unsur hara ke dalam tanah. Serasah dapat dipilah menjadi tiga lapisan, yaitu (1) L layer atau lapisan permukaan serasah, terdiri dari bagian-bagian tumbuhan yang mati, (2) F layer atau lapisan serasah yang sedang mengalami proses dekomposisi, terletak di bawah L layer dan (3) H layer atau lapisan humus (Ananthkrishnan, 2009). Produksi serasah sangat dipengaruhi oleh jenis-jenis tumbuhan penyusun vegetasi dan keadaan iklim kawasan setempat. Berikut komponen utamatransformasi karbon pada lanskap (Gambar 12).



Gambar 12. Komponen utama transformasi C pada lanskap (Barrios-O'Neill et al., 2015)

Transformasi karbon merupakan hal fundamental yang penting dari fungsi lanskap. Sebagai contoh, Proses yang melibatkan beberapa komponen yang terdiri dari tumbuhan, tanah dan serasah (dekomposisi), biota tanah dan proses fotosintesis. Serasah yang jatuh di atas permukaan tanah mengandung bahan organik yang menjadi bahan baku proses dekomposisi. Selanjutnya, komponen bahan organik dipecah menjadi molekul yang lebih sederhana selama dekomposisi, yang merupakan salah satu jasa ekosistem terpenting yang dilakukan oleh organisme tanah, yang mewakili komplemen katabolik fotosintesis. Penguraian bahan organik melibatkan langkah-langkah yang berbeda yang meliputi: (i) fragmentasi fisik, di mana memakan detritus oleh invertebrata kecil menghasilkan fragmen-fragmen yang lebih kecil tetapi luas permukaan yang lebih besar yang

memfasilitasi kolonisasi oleh mikroba; (ii) degradasi kimiawi, terjadi sebagai akibat dari kimiawi, terjadi sebagai hasil dari aksi enzim yang sebagian besar dihasilkan oleh bakteri dan jamur; dan (iii) pencucian substrat organik, di mana senyawa organik dan anorganik yang larut larut dari detritus.

Pemanfaatan kawasan hutan hujan tropik tanah tropika basah, harusnya bisa dilakukan tanpa penggunaan manajemen budidaya tanaman yang berbahaya. Cara bercocok tanam dengan tanpa atau dengan menggunakan teknik konservasi, yaitu dengan cara membiarkan serasah di atas permukaan tanah yang nantinya akan berdampak pada kelimpahan fauna tanah predator di atas permukaan tanah (Altieri dan Nichols, 2004). Dengan demikian, serasah yang merupakan bagian dari organ tumbuh-tumbuhan serta bahan organik tanah adalah sumber nutrisi makanan utama dan tempat hidup bagi sebagian besar fauna tanah.

Dalam praktik budi daya tanaman, membiarkan serasah berada di atas permukaan tanah dan memberikan mulsa penutup dari bahan organik tanaman pada dasarnya akan lebih bermanfaat dalam mempertahankan kelembaban dan suhu permukaan tanah. Serasah tanaman merupakan sumber makanan bagi fauna tanah termasuk arthropoda sebagai kelompok fauna tanah dominan di dalam tanah. Selanjutnya, kelompok fauna tanah pemakan serasah tersebut akan menjadi mangsa bagi kelompok fauna tanah predator. Kelompok fauna tanah predator yang mati akan terurai dengan bantuan kelompok mikroba tanah menjadi bahan organik tanah (Altieri dan Nichols, 2004).

Pada empat tipe penggunaan lahan di kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang Padang, Sumatera Barat telah dilakukan penelitian terhadap serasah tanah. Adapun empat tipe penggunaan lahan tersebut, antara lain hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur. Lahan hutan memperoleh bahan organik tanah dari serasah ataupun sisa hewan yang mati yang jatuh ke permukaan tanah. Serasah yang jatuh di atas permukaan tanah pada lantai hutan merupakan gambaran vegetasi penutup tanah dan relatif kecil mengalami intervensi manusia. Lahan kebun campuran memperoleh bahan organik juga dari serasah dan pasokan pupuk kandang serta residu tanaman dan tumbuhan yang dibiarkan di kebun. Lahan di kebun monokultur (kakao) memperoleh bahan organik dari serasah yang dibiarkan berjatuhan di kebun. Untuk areal terbuka, bahan

organik diperoleh dari serasah yang jatuh di atasnya karena adanya hembusan angin (Hermansah *et al.* 2003).

Tabel 6. Kosentrasi dan akumulasi hara serasah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang

Tipe lahan	Kel	N	P	K	C	Akumulasi serasah (ton/ha)
Hutan	<i>Kos</i>	1.22	0.16	1.88	50.10	19.11
	<i>Ak</i>	0.235	0.032	0.357	9.529	
Areal Terbuka	<i>Kos</i>	1.02	0.14	1.72	48.98	4.97
	<i>Ak</i>	0.048	0.007	0.082	2.259	
Kebun Campuran	<i>Kos</i>	1.13	0.17	1.89	49.67	5.24
	<i>Ak</i>	0.058	0.008	0.099	2.556	
Kebun Monokultur	<i>Kos</i>	1.29	0.16	1.90	47.64	9.57
	<i>Ak</i>	0.117	0.016	0.181	4.543	

Ket. Kel: Kelompok. Baris pertama dalam satu tipe lahan menyatakan nilai kosentrasi hara serasah (*kos* satuan dalam %), sedangkan baris kedua (*ak*) menyatakan nilai akumulasi hara serasah dengan satuan ton/ha.

Kosentrasi dan akumulasi hara serasah pada suatu tipe lahan merupakan salah satu indikator ketersediaan bahan organik tanah yang menjadi salah satu sumber nutrisi bagi kelompok biota tanah. Pentingnya analisis kosentrasi dan akumulasi hara serasah dimaksudkan sebagai estimasi ketersediaan dan potensi bahan organik tanah sebagai produk utama dari proses siklus nutrisi oleh biota tanah pada suatu tipe lahan. Hasil analisis kosentrasi, dan akumulasi unsur hara serasah pada tipe penggunaan lahan hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang disajikan pada Tabel 6. Adapun kosentrasi dan akumulasi hara serasah yang diamati antara lain N, P, K dan C tanah (Tabel 6).

N merupakan unsur kimia yang paling banyak diserap oleh tanaman. Tabel 6 menunjukkan nilai N serasah pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang yang bervariasi yaitu nilai terendah dan tertinggi. Tipe lahan monokultur

menunjukkan nilai N tertinggi yaitu 1.29% dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Input pupuk tambahan untuk meningkatkan kualitas nutrisi tanaman mempengaruhi total N serasah. Selain itu, tingginya kandungan unsur hara N disebabkan oleh kemampuan bakteri nitrogen pada daerah *rhizosfer* akar tanaman untuk melakukan fiksasi nitrogen. Serasah daun yang banyak kandungan nitrogen dan fosfor mengalami pelapukan dengan cepat, terutama pada keadaan aerobik. Tidak hanya pada kebun monokultur, pada tipe lahan hutan alami juga menunjukkan kandungan N serasah yang cukup tinggi. Tingginya kandungan N total serasah pada hutan alami disebabkan oleh banyaknya jumlah jenis tanaman yang bisa mengikat N bebas dari tanah. Selanjutnya, kandungan N total serasah semakin tinggi seiring dengan semakin lanjutnya tingkat dekomposisi serasah.

Berdasarkan Tabel 6, tipe penggunaan lahan hutan alami, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur memiliki nilai P serasah yang juga bervariasi. Hutan alami, kebun campuran, dan kebun monokultur memiliki nilai kandungan P serasah tertinggi dibandingkan dengan tipe lahan terbuka. P serasah merupakan unsur hara dengan tingkat ketersediannya paling sedikit pada tanaman. P dalam jaringan tanaman bersifat *mobile* dan mudah berpindah dari satu jaringan ke jaringan tanaman lainnya. Tingginya P serasah pada tipe lahan hutan, kebun campuran, dan kebun monokultur disebabkan beragamnya vegetasi pohon yang tumbuh dan kemampuan yang berbeda pada masing-masing tanaman untuk menyerap P dalam tanah. Kemampuan tanaman menyerap unsur hara P biasanya menurun dengan bertambahnya umur tanaman dan akan meningkat pada masa pertumbuhan dan perkembangan (masa vegetatif) untuk pembentukan jaringan primordial/jaringan produksi. Jika kandungan P bahan organik tinggi, akan terjadi mineralisasi atau pelepasan P ke dalam tanah, namun jika P rendah maka akan terjadi kehilangan atau immobilisasi P.

Sama halnya dengan N dan P, kandungan K serasah daun memiliki nilai yang variatif pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Kebun monokultur menunjukkan nilai K yang lebih tinggi (1.90%) dibandingkan dengan nilai K pada tipe lahan lainnya. Sumber utama kalium adalah pelapukan batuan. Bahan organik tanah dan tambahan pupuk anorganik seperti KCL untuk tanaman budidaya. Siklus hara kalium yang terbuka pada tipe lahan monokultur, banyak unsur hara yang keluar sebagai akibat proses panen mengharuskan penambahan nutrisi tanah untuk keberlanjutan

produktivitas tanaman budidaya. Selanjutnya, tipe lahan areal terbuka memiliki nilai K serasah yang paling rendah dan berbeda nyata terhadap nilai K pada tipe lahan lainnya. Hilangnya vegetasi lahan mengakibatkan menurunnya kandungan bahan organik tanah dan hal tersebut menyebabkan menurunnya konsentrasi K serasah. Penurunan konsentrasi ini menunjukkan besarnya kandungan K yang dilepaskan akibat pencucian. Konsentrasi K pada serasah akan menurun secara terus menerus selama proses dekomposisi karena K pada tanaman bukan merupakan komponen struktural yang terikat kuat pada jaringan tanaman. Selain itu, K merupakan unsur terlarut dalam air dan memiliki sifat mobilitas yang tinggi sehingga sangat mudah tercuci.

Selanjutnya, nilai C serasah pada tipe lahan hutan menunjukkan nilai tertinggi yaitu 50.10% (Tabel 6). Hal ini menunjukkan bahwa kelimpahan serasah pada tipe lahan hutan alami meningkatkan kandungan hara C serasah tersebut. Siklus hara C yang tertutup akan menstabilkan keberadaan C-organik dalam tumbuhan. Akumulasi serasah di atas permukaan tanah dengan bantuan kelompok mikroorganisme akan mempercepat proses dekomposisi. Semakin tinggi akumulasi serasah maka akan semakin tinggi kandungan C-organik serasah tersebut. Selanjutnya, nilai C-organik serasah terendah terdapat pada tipe lahan areal monokultur 47.64% (Tabel 6). Hal ini disebabkan sedikitnya akumulasi serasah di atas permukaan tanah dan terbukanya siklus hara yang mengakibatkan kandungan hara karbon organik serasah semakin berkurang. Tipe lahan monokultur dengan kondisi permukaan tanah yang relatif terbuka memungkinkan sebagian bahan organik tanah dibawa erosi ketika terjadi aliran permukaan. Selain itu, menurut Monde *et al.* (2008) hasil dekomposisi serasah oleh mikroba akan melepaskan karbon ke udara yang menyebabkan suhu meningkat.

Setiap serasah yang terakumulasi di lantai hutan, areal terbuka, kebun campuran, dan kebun monokultur pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang akan terdekomposisi dan menjadi potensi untuk sumbangan hara ke dalam tanah. Nilai akumulasi hara serasah N, P, K dan C menunjukkan nilai tertinggi pada tipe lahan hutan dibandingkan dengan tipe lahan lainnya (Tabel 6). Tingginya akumulasi kandungan hara serasah pada tipe lahan hutan disebabkan kandungan hara dan produksi serasah yang tinggi pada tipe lahan hutan. Pada tipe lahan hutan banyak ditumbuhi berbagai vegetasi pohon dengan kecenderungan dominasi pohon yang lebih tua adalah penyumbang

terbesar bahan organik tanah. Variasi hara yang dilepaskan oleh serasah akan tinggi apabila memiliki keanekaragaman tumbuhan yang tinggi. Selanjutnya, produktivitas tumbuhan yang sangat tinggi pada hutan hujan tropik terjadi karena ekosistem hutan hujan tropik memiliki siklus hara yang tertutup dan berlangsung cepat yang berasal dari reruntuhan serasah yang relatif tinggi.

Nilai akumulasi hara serasah terendah pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang terdapat pada tipe areal terbuka. Rendahnya akumulasi kandungan hara serasah pada tipe areal terbuka disebabkan oleh hilangnya vegetasi pohon sebagai akibat pembukaan lahan. Walaupun demikian, pada areal terbuka masih ditemukannya serasah tanaman yang berasal dari sisa penebangan pohon dan pembersihan semak serta vegetasi pohon yang terletak berdampingan pada tipe lahan tersebut. Keanekaragaman tumbuhan yang rendah akan melepaskan unsur hara yang sedikit. Selanjutnya, akumulasi unsur hara pada kawasan dengan sedikit vegetasi yang tumbuh di atasnya akan menyebabkan potensi hara yang disumbangkan lebih sedikit.

BIODIVERSITAS TANAH TROPIKA BASAH

Biodiversitas tanah umumnya mencakup semua hal yang hidup di dalam tanah. konsep keanekaragaman hayati di tanah sebenarnya tidak hanya mencakup keanekaragaman tumbuhan dan kehidupan hewan di habitat tertentu. Namun, ketika melihat lebih detail lagi pada keanekaragaman hayati, menjadi jelas bahwa terdapat sangat banyak komunitas lainnya yang menghuni tanah sebagai habitat, seperti jamur, bakteri, dan arkea. Tanah menjadi suatu sistem yang sangat beraneka ragam ketika dipertimbangkan secara biologis yang didukung oleh aspek fisik atau kimiawi yang juga beragam.

Keanekaragaman hayati terdiri dari semua variasi biologis dari gen ke spesies, hingga komunitas, ekosistem dan lanskap. Keanekaragaman hayati tanah merupakan variasi dalam kehidupan tanah, dari gen hingga komunitas, dan variasi dalam habitat tanah, dari agregat mikro hingga seluruh lanskap. Keanekaragaman yang ditemukan di tanah telah memberikan kontribusi untuk membuat prekursor ekologi tanah dalam banyak alternatif atau cara melalui peran dan fungsinya. Spesies tanah yang termasuk dalam keanekaragaman hayati tanah dari perspektif fungsional memiliki peran ekologis yang vital di dalam maupun permukaan tanah. Tentunya kesulitan tetap ada, karena ekosistem di atas maupun didalam permukaan tanah merupakan habitat yang sangat heterogen, mengingat banyak organisme yang memiliki ukuran kecil serta proses dan interaksi berlangsung pada skala yang sangat kecil dari sudut pandang manusia.

Dua dekade terakhir telah menyaksikan upaya penelitian yang sangat besar diarahkan untuk memahami bagaimana hilangnya keanekaragaman hayati berdampak pada fungsi ekosistem, dan pengaruhnya terhadap layanan jasa ekosistem tersebut. Hilangnya keanekaragaman hayati mengurangi sebagian besar fungsi ekosistem dan merusak stabilitasnya dari waktu ke waktu, dan bahwa sifat-sifat fungsional spesies memiliki peran utama dalam menentukan efek keanekaragaman. Mayoritas penelitian keanekaragaman hayati dikaji diatas permukaan tanah pada kelompok hewan-hewan yang dilindungi dalam rangka menyelamatkan keberlanjutan kelompok hewan tersebut agar tidak punah dan masyarakat secara arif dan bijaksana dalam menjaga dan melindunginya. Pemahaman tentang

konsekuensi fungsional dari hilangnya keanekaragaman hayati di bawah tanah kurang berkembang dengan baik. Kurangnya pengetahuan ini menghambat kemampuan kita untuk memprediksi konsekuensi dari skenario realistis perubahan keanekaragaman, terutama karena keanekaragaman hayati bawah tanah merupakan salah satu reservoir keanekaragaman hayati terbesar di Bumi. Komunitas tanah sangat kompleks dan beragam, dengan jutaan spesies dan miliaran organisme individu ditemukan dalam satu ekosistem, mulai dari bakteri dan jamur mikroskopis, hingga organisme yang lebih besar, seperti cacing tanah, semut, dan moles (Bardgett et al., 2014).

Pemahaman kita tentang keanekaragaman hayati yang tersembunyi ini terbatas, setidaknya dibandingkan dengan apa yang diketahui tentang keanekaragaman di atas permukaan tanah. Tetapi dekade terakhir telah menyaksikan semakin banyak penelitian yang menguji bagaimana komunitas bawah tanah didistribusikan dalam ruang dan waktu, bagaimana mereka merespons perubahan global dan apa konsekuensi dari perubahan keanekaragaman hayati bagi dinamika komunitas tumbuhan, interaksi trofik di atas tanah, dan siklus biogeokimia. Selain itu, penelitian keanekaragaman hayati tanah sekarang memasuki era baru: kesadaran tumbuh di antara para ilmuwan dan pembuat kebijakan tentang pentingnya keanekaragaman hayati tanah untuk penyediaan layanan jasa ekosistem bagi masyarakat dan alat generasi baru yang tersedia untuk memahami biologi tanah dan peran ekologis serta evolusionernya.

Sifat keanekaragaman hayati tanah yang diungkap, telah terbukti menjadi tugas dan pekerjaan yang menantang. Namun, dalam dekade terakhir, beberapa kemajuan signifikan telah dibuat, dan teknik baru telah memungkinkan penjelajahan tanah dengan cara yang sebelumnya belum memungkinkan untuk dilakukan. Misalnya, komunitas bakteri archea baru mulai dieksplorasi yang baru disadari dapat menjadi aktor utama dalam proses dekomposisi (Leininger & McFarland, 2006). Namun, sebagian besar keanekaragaman hayati tanah tidak dapat terlihat dengan mata telanjang, dan banyak spesies tanah masih belum diketahui. Keanekaragaman organisme tanah terutama kelompok mikroba tanah berpotensi sebanyak 99% spesies bakteri dan nematoda tanah global masih tidak diketahui (Wall et al., 2000). Bahkan ketika kelompok tersebut telah diketahui dengan baik dalam cakupan biologi dasar, ekologi dan pola distribusi, kelompok organisme tanah seringkali tetap tidak diketahui atau belum bisa diungkap secara pasti.

Sifat keanekaragaman hayati tanah yang mengacu pada alasan metodologis juga digunakan sebagai landasan identifikasi. Identifikasi dengan membedakan antara spesies mikroorganisme yang satu dengan yang lainnya dapat menjadi tantangan, meskipun kemajuan menggunakan teknik molekuler (misalnya DNA - DeoxyRibonucleic Acidmicroarrays) telah dilakukan, yang memungkinkan menentukan mikroorganisme yang tidak dapat dibiakkan luput. Saat ini, kurang dari 1% mikroorganisme dapat dibudidayakan dan/atau dikarakterisasi (Torsvik dan Ovreas, 2002). Meskipun identifikasi morfologi spesies di bawah mikroskop telah digantikan, setidaknya dengan metode molekuler yang melibatkan analisis DNA atau fosfolipid, sebagian besar metode sebenarnya mencirikan seluruh komunitas daripada spesies tunggal. Terlebih lagi, bahkan dengan metode molekuler, spesies atau kelompok spesies langka yang memiliki konsentrasi DNA yang lebih rendah mungkin tidak terdeteksi (Borneman dan Hartin 2000). Untuk alasan ini, kemajuan masih diperlukan untuk memiliki pengetahuan yang tepat tentang komposisi mikroba komunitas tanah. Karakterisasi metagenom tanah saat ini sedang berlangsung dan dapat menghasilkan informasi penting tentang keragaman mikroba. Namun, satu masalah dapat muncul dengan ekstraksi DNA. Disarankan bahwa metode tidak langsung dapat memberikan fragmen yang lebih besar daripada metode langsung, dan karena itu cocok untuk karakterisasi metagenom tanah.

Namun, DNA yang diekstraksi memiliki kemungkinan tidak mewakili DNA tanah asli (Bakken dan Frostegard, 2006). Konsep spesies lebih rumit di dalam tanah daripada ekosistem di atas tanah. Laju evolusi mikroorganisme jauh lebih cepat dibandingkan dengan kebanyakan organisme di atas permukaan tanah, dan identitas spesies jauh lebih sulit untuk ditentukan. Di atas tanah, sebagian besar organisme bergantung pada reproduksi seksual untuk menciptakan informasi genetik baru dan berevolusi. Sebaliknya, mikroorganisme terdapat di dalam tanah dalam jumlah yang jauh lebih besar dibandingkan dengan di atas permukaan tanah, dan mereka dapat bereproduksi secara aseksual dengan kecepatan yang jauh lebih cepat, hanya dalam waktu hitungan menit. Hal ini akan meningkatkan potensi mereka untuk melakukan mutasi dan adaptasi yang lebih cepat dibandingkan dengan spesies yang bereproduksi secara seksual lebih lambat.

Mikroorganisme juga dapat memperoleh informasi genetik baru dalam DNA mereka tanpa reproduksi seksual, melainkan melalui

transfer gen vertikal dan horizontal. Potensi tersebut akan semakin meningkat, misalnya DNA bakteri di tanah yang kaya akan lempung atau molekul humat, yang dapat melindungi asam nukleat dari degradasi, sehingga memungkinkan mereka untuk diambil oleh sel bakteri untuk selanjutnya tumbuh dan berkembang (Nannipieri et al., 2003).

Transfer gen vertikal memiliki arti disebagian besar organisme hidup berupa transfer gen yang terjadi secara vertikal dari organisme induk ke keturunannya. Transfer ini dapat terjadi melalui reproduksi seksual, jika informasi genetik dari kedua induk digabungkan kembali menjadi keturunannya, atau melalui reproduksi aseksual, di mana informasi genetik orang tua direplikasi ke dalam keturunannya. Dalam kedua kasus, kesalahan dalam penyalinan (atau mutasi) dapat terjadi, yang menawarkan dasar untuk adaptasi, di mana mutasi yang mendukung kelangsungan hidup atau reproduksi keturunan adaptif akan dipilih.

Sedangkan, transfer gen horizontal, dalam beberapa kasus jalur alternatif, yang disebut transfer gen horizontal, juga dapat terjadi. Dalam hal ini, suatu organisme menggabungkan materi genetik (DNA) dari organisme lain. Semua bakteri dapat melakukan transfer gen horizontal. Ada tiga mekanisme utama di mana transfer gen horizontal dapat terjadi yaitu, (1) Transformasi yaitu sel bakteri hidup mengambil dan mengintegrasikan benda asing materi genetik dari sel bakteri mati di sekitarnya. (2) Transduksi yaitu virus mentransfer DNA antara dua bakteri. DNA baru terintegrasi dalam DNA sel penerima. (3) Konjugasi: sel bakteri hidup membuat salinan sebagian DNA-nya dan mentransfer materi genetik ini ke bakteri lain yang tidak terkait melalui kontak sel ke sel. Materi genetik tambahan ini dapat memberikan keuntungan kelangsungan hidup bagi inangnya (misalnya memberikan resistensi terhadap antibiotik).

Proses transformasi dapat menjadi penting dalam tanah karena DNA ekstraseluler yang teradsorpsi oleh partikel tanah dan terlindung dari degradasi dapat digunakan untuk mentransformasi sel bakteri yang kompeten (Pietramellara 2009). Ini berarti bahwa DNA dari mikroorganisme sebelumnya atau dari mikroorganisme yang jauh secara spasial dapat digunakan oleh sel bakteri yang kompeten. Organisme tanah tidak terdistribusi secara merata melalui tanah, tetapi spesies ditemukan di mana mereka dapat menemukan habitat yang sesuai: sebagian besar spesies terkonsentrasi di sekitar akar

dan di lapisan atas yang kaya akan serasah. Habitat ini dibentuk oleh proses yang bekerja pada skala spasial bersarang. Pada skala seluruh bentang alam, iklim dan tekstur tanah menentukan kemungkinan kondisi habitat. Pada tingkat ekosistem menengah, faktor variabel yang dipengaruhi oleh penggunaan dan pengelolaan lahan, seperti pH tanah dan kandungan bahan organik, menentukan kondisi habitat yang ada. Secara lokal, kualitas serasah dan nutrisi berinteraksi dengan faktor habitat ini untuk menentukan kondisi tanah lokal yang spesifik.

Selanjutnya, hubungan biodiversitas, fungsi dan layanan ekosistem, serta kesejahteraan masyarakat dijelaskan pada Gambar 13. Perubahan keanekaragaman hayati diasumsikan bahwa memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap output layanan ekosistem yang tersirat dalam banyak argumen yang dibuat untuk melestarikan dan memulihkan sistem ekologi. Para peneliti sepakat untuk menyarankan bahwa dalam menggunakan hubungan antara keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem dijadikan sebagai dasar untuk menyatakan bahwa konservasi keanekaragaman hayati adalah penting. Konservasi dibutuhkan untuk memperkuat hubungan langsung dan positif yang perlu diamati, dimana hal yang terpenting lainnya, kita perlu menunjukkan bahwa pemeliharaan fungsi ekosistem dan output dari jasa ekosistem tergantung pada berbagai macam spesies asli pada habitat tersebut. Selanjutnya, kemiskinan atau terbatasnya kesejahteraan manusia merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan degradasi lingkungan dan hilangnya keanekaragaman hayati. Dampak hilangnya keanekaragaman hayati terhadap kesejahteraan tidak merata di seluruh masyarakat, yang paling bergantung pada sumber daya lingkungan.



Gambar 13. Hubungan biodiversitas, fungsi dan layanan ekosistem, serta kesejahteraan masyarakat. Biodiversitas adalah variabel yang menunjukkan respon terhadap perubahan iklim global dan biodiversitas sebagai faktor yang menyebabkan perubahan beberapa proses dan layanan ekosistem serta kesejahteraan masyarakat (Millenium Ecosystem Assesment, 2005).

Semakin berkembangnya zaman dan semakin meningkatnya populasi manusia merupakan faktor pemicu adanya perubahan global baik dari aspek iklim, siklus biogeokimia, sistem penggunaan lahan maupun introduksi spesies baru. Tentunya hal tersebut akan mempengaruhi kelimpahan dan keanekaragaman biodiversitas tanah. Gambar 13 memperlihatkan bahwa banyak layanan lingkungan yang dapat diberikan oleh biodiversitas tanah dalam rangka untuk mendukung kesejahteraan manusia. Layanan lingkungan tersebut terbagi dalam beberapa aspek, antara lain:

- a. Aspek kehidupan. Biodiversitas tanah melalui aktivitas yang dilakukan di dalam tanah terutama pada daerah rhizosfer akar akan mendukung penyediaan pangan dan serat, bahan bakar sumber genetik, sumber hara dan penyediaan air bersih.

- b. Aspek Budaya. Biodiversitas tanah juga memberikan layanan terhadap estetika, menjadi inspirasi bagi para peneliti dan masyarakat untuk berbagai inovasi dan pendidikan serta mendukung estetika, spiritual dan rekreasi.
- c. Aspek Penunjang. Dalam hal ini, biodiversitas tanah termasuk dalam salah satu faktor pembentuk tanah, dimana peran serta biodiversitas tanah sebagai penunjang. Selain itu, biodiversitas tanah juga penunjang bagi produksi primer dan siklus hara.
- d. Regulasi. Aspek ini meninjau pengaturan fungsi ekosistem, dimana biodiversitas tanah memastikan aliran energi yang berjalan dengan seimbang dan biodiversitas tanah juga sering dijadikan sebagai indikator kesehatan suatu tipe lahan.

Kelimpahan dan keanekaragaman hayati komunitas tanah pada suatu tipe lahan perlu dipertahankan untuk menjaga stabilitas kan layanan ekosistem pada lahan tersebut.

Proses populasi, seperti penyebaran, reproduksi dan kompetisi, atau skala kecil proses suksesi juga dipengaruhi oleh heterogenitas tanah dan bersama-sama mereka merupakan penentu utama distribusi spasial organisme tanah (Ettema and Wardle 2002). Aktivitas biotik di tanah seringkali tampak terkonsentrasi. Dalam kombinasi dengan heterogenitas tanah, kemampuan penyebaran biota tanah yang terbatas berarti bahwa organisme tanah memiliki mobilitas aktif yang terbatas dalam matriks tanah, biasanya tidak lebih dari mikrometer hingga sentimeter. Strategi reproduksi juga dapat menyebabkan agregasi individu, misalnya untuk spesies bertelur melalui distribusi telur yang berkelompok, atau untuk spesies lain. karena ukurannya yang kecil dan kemampuan penyebarannya yang terbatas (misalnya koloni bakteri). Namun, organisme tanah terkadang dapat menyebar secara pasif dari beberapa meter hingga ribuan kilometer oleh angin, air, atau vektor lainnya.

Masa hidup organisme tanah dapat bervariasi dari beberapa menit hingga ratusan tahun. Hal ini karena beberapa organisme tanah mampu memasuki dormansi, yang dapat bertahan hingga beberapa tahun, di mana mereka benar-benar 'tertidur'. Ini memberi mereka kemampuan yang patut ditiru untuk melakukan perjalanan dalam waktu, dan untuk bertahan hidup dari gangguan, tidak adanya inang/habitat yang sesuai, dan kondisi buruk lainnya. Aktivitas organisme tanah tergantung pada apakah suatu spesies menemukan sumber daya yang sesuai tersedia. Secara umum, aktivitas organisme tanah diatur melalui tiga skala

temporal utama. Adapun keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah, dalam skala waktu besar hingga menengah, dinamika suksesi seluruh ekosistem (puluhan hingga ribuan tahun) dan perubahan musiman dalam produktivitas vegetasi (bulan), memengaruhi jenis sumber daya yang tersedia bagi organisme tanah, dan oleh karena itu spesies mana yang aktif dan yang tidak. Ini mencerminkan hubungan erat antara tanaman, mikroba, dan organisme tanah lainnya. Koping erat antara tanaman dan organisme tanah ini juga diungkapkan oleh denyut pelepasan nutrisi, yang mendorong aktivitas lokal komunitas tanah.

FAUNA TANAH

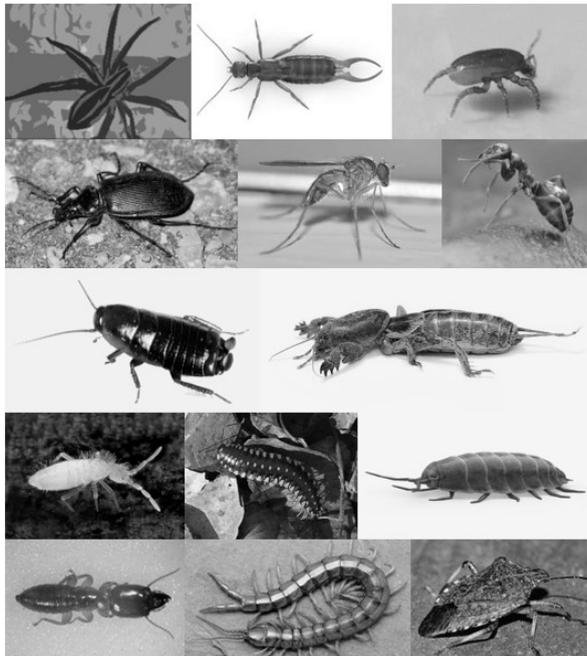
Penjelasan sebelumnya telah menerangkan bahwa sistem tanah sangatlah dinamis, bersifat heterogen dan kompleks. Kandungan tanah itu sendiri terdiri dari bagian mineral yang mengandung silika dan campuran logam serta bagian bahan organik yang mengandung berbagai macam senyawa organik yang berbeda, serta air dan berbagai macam organisme yang berbeda. Selain itu, ditinjau dari aspek fisiknya, terdapat berbagai jenis tekstur sebagai produk perubahan proporsi relatif pasir, debu dan liat. Tingkat heterogenitas yang tinggi ini berarti bahwa tanah mengandung relung ekologis dalam jumlah yang sangat besar yang telah memunculkan susunan keanekaragaman hayati yang menakjubkan. Berdasarkan pendekatan taksonomi yang digunakan untuk mengukur keanekaragaman hayati, sering dikatakan bahwa lebih dari setengah dari perkiraan 10 juta spesies tanaman, hewan dan serangga di dunia hidup di hutan hujan tropis. Namun, ketika pendekatan ini diterapkan pada tanah, tingkat keanekaragamannya sering dikutip dalam kisaran ratusan ribu hingga mungkin jutaan spesies yang hidup hanya dalam 1 genggam tanah (Gardy dan Jeffery, 2009).

Bukti semakin banyak bahwa keanekaragaman organisme yang hidup di bawah tanah memberikan kontribusi yang signifikan untuk membentuk keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah untuk berfungsinya ekosistem darat. Pemahaman kita tentang bagaimana keanekaragaman hayati bawah tanah ini didistribusikan, dan bagaimana ia mengatur struktur dan fungsi ekosistem darat, yang sedang berkembang dengan pesat. Bukti juga menunjukkan keanekaragaman hayati tanah memiliki peran kunci dalam menentukan ekologi dan evolusi tanggapan ekosistem terestrial terhadap perubahan lingkungan saat ini dan masa depan. Keanekaragaman hayati menopang fungsi ekosistem dan penyediaan jasa ekosistem yang penting bagi kesejahteraan manusia.

Seperti yang kita ketahui bersama, tanah merupakan sistem multikomponen dan multifungsi yang menyediakan serangkaian (produksi biomassa) untuk manusia, tetapi juga banyak “layanan pengatur” (misalnya, dekomposisi bahan organik tanah, pemeliharaan struktur tanah, siklus hara, dll.) yang memastikan keberlanjutan

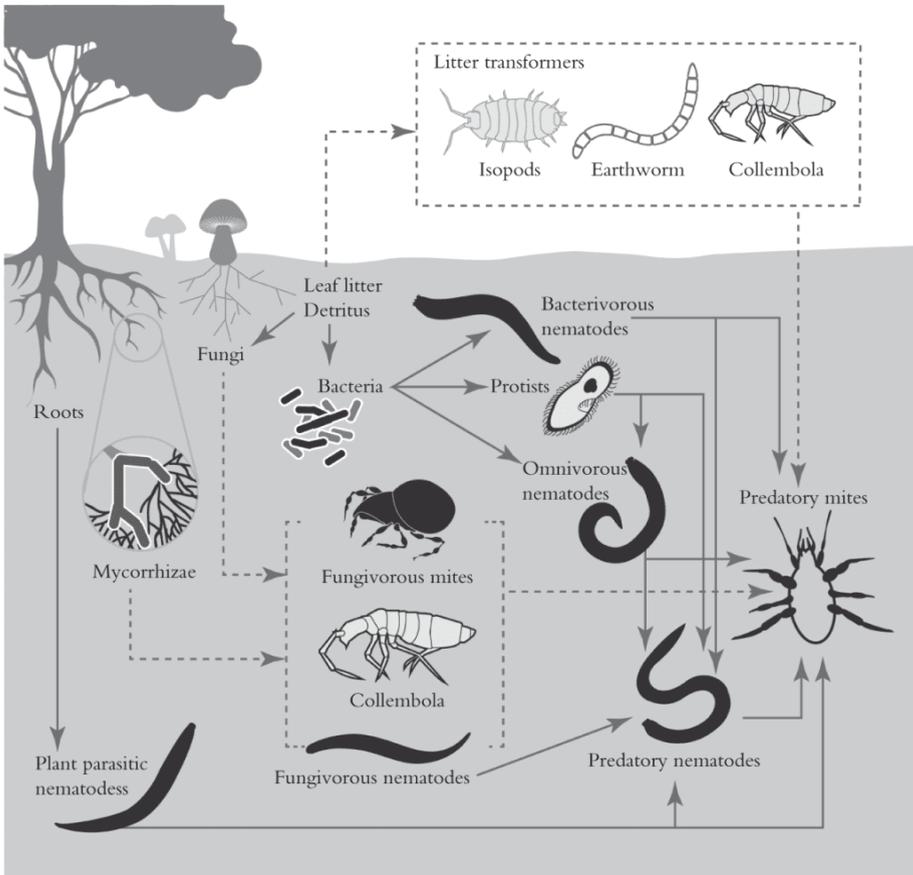
ekosistem. Semua fungsi ini disediakan oleh berbagai organisme yang hidup di dalam tanah, yaitu kelompok yang memiliki output fungsional dari proses biologis yang terjadi di lingkungan.

Kemajuan yang signifikan telah dicapai mengenai karakterisasi fisik dan kimia tanah, hanya saja komunitas fauna tanah praktis masih belum cukup untuk dieksplorasi. Seringkali fauna tanah mendapatkan perhatian yang masih kurang cukup untuk membuktikan kebermanfaatannya terhadap lingkungan dan manusia. Bahkan Petersen and Luxton, 1982 dalam Brones (2014) mengatakan bahwa penelitian tentang kontribusi fauna tanah untuk menjelaskan proses tanah dalam rangka mengungkapkan efek pada dekomposisi bahan organik tanah (BOT) (melalui serasah) mendapatkan hasil yang mengecewakan yang langsung dapat diabaikan karena efisiensi asimilasinya yang rendah. Walaupun demikian banyak keutamaan dan peran serta fauna tanah yang harus kita angkat bersama ke atas permukaan untuk menjaga keseimbangan ekosistem agar jasa lingkungan tetap terjaga dengan baik untuk kesejahteraan manusia. Adapun contoh keragaman kelompok fauna tanah kawasan hutan hujan tropis disajikan pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14. Variasi Fauna Tanah pada Kawasan Hutan Hujan Tropis

Gambar 14 menunjukkan variasi fauna tanah dengan bentuk morfologi yang beragam, dimana masing-masing fauna tanah memiliki habitat dan peran masing-masing. Fauna tanah invertebrata tersebut membantu dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Beragam fauna tanah invertebrata terdapat di dalam tanah yang sangat membantu dalam meningkatkan bahan organik tanah secara global. Meskipun ukurannya kecil, kelompok fauna tanah ini menyediakan proses ekosistem utama seperti dekomposisi bahan organik dan daur ulang nutrisi. Fauna tanah diklasifikasikan menurut ukuran tubuhnya menjadi mikrofauna ($<0,2$ mm), mesofauna ($>0,2$ mm), dan makrofauna (>2 mm). Mikrofauna sebagian besar adalah predator bakteri dan jamur tanah (misalnya protista dan beberapa nematoda), tetapi beberapa kelompok mikrofauna tanah bersifat saprofagus dan berkontribusi terhadap dekomposisi serasah (seperti nematoda pemakan serasah). Makro dan mesofauna sebagian besar termasuk saprofagus sedangkan beberapa mesofauna seperti collembolans atau makrofauna seperti larva diptera masing-masing berfungsi sebagai pengumpan jamur dan bakteri. Selain itu, aktivitas makan makro dan meso-fauna tanah mengubah kondisi lingkungan di lapisan atas tanah dan dengan demikian membentuk komposisi dan keanekaragaman tanah. Makrofauna tanah terutama seperti cacing tanah berkontribusi pada bioturbasi dan pembentukan Agregat tanah. Kemampuan fauna tanah dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah perlu dievaluasi secara mendalam baik dari aspek keanekaragamannya, fungsional dan layanan ekosistem yang diberikan dan rantai makanannya dalam ekosistem. Kami berkeyakinan bahwa dengan mengungkap biodiversitas fauna tanah secara sistematis peluang keberlanjutan program pertanian akan mudah tercapai. Berikut interaksi fauna tanah dalam menjalankan fungsi ekosistem tanah (Gambar 15).



Gambar 15. Komponen fauna tanah di dalam dan di atas permukaan tanah (Sumber: 2 - Functional Roles of Soil Fauna - *Soil Fauna Assemblages book*)

Fauna tanah pemangsa seperti kelabang, laba-laba, dan semut, secara tidak langsung meningkatkan dekomposisi serasah dengan mengubah pola efek cascading pada tingkat trofik yang lebih rendah melalui pengurangan kompetisi dan eksploitasi sumber daya yang berlebihan. Akhirnya, herbivora bawah permukaan seperti nematoda herbivora atau larva serangga secara langsung membentuk komunitas vegetasi di atas permukaan tanah yang pada gilirannya menyusun komunitas di bawah permukaan melalui masukan serasah. Fauna tanah mengasimilasi hanya sebagian dari serasah yang dikonsumsi dan mengembalikan serasah yang tidak tercerna ke tanah dalam bentuk

feses. Proses pengeluaran kotoran dan penggabungan feses ke dalam tanah oleh aktivitas fauna (misalnya bioturbasi) mengubah sifat fisika-kimia bahan organik. Perubahan ini berkontribusi pada stabilisasi bahan organik tanah dan pembentukan agregat tanah, yang secara tidak langsung mempengaruhi kandungan air tanah, penyimpanan nutrisi, dan kapasitas pertukaran ion. Estimasi global jumlah serasah yang diproses oleh fauna tanah adalah belum diketahui secara pasti, tetapi penelitian lokal menunjukkan bahwa lebih dari 50% produksi primer bersih (NPP) dikembalikan ke tanah melalui konsumsi serasah oleh berbagai kelompok fauna tanah. Namun, jumlah serasah yang dikonsumsi kemungkinan besar akan bervariasi di seluruh bioma. Pengolahan serasah oleh fauna tanah secara signifikan mempengaruhi sifat fisik-kimianya.

Banyak penelitian juga melaporkan bahwa fauna tanah mendorong dekomposisi serasah daun melalui fragmentasi serasah dan kominusi, yang pada gilirannya memfasilitasi kolonisasi serasah oleh mikroorganisme tanah. Terlepas dari bukti substansial bahwa fauna tanah sangat mempengaruhi transformasi serasah, secara kuantitatif perkiraan biomassa fauna serta konsumsi serasah oleh berbagai kelompok fauna masih kurang dipahami. Penting untuk membedakan antara efek fauna terhadap pembusukan dengan jumlah serasah yang dikonsumsi oleh fauna tanah. Konsumsi serasah oleh fauna tanah dan transformasi serasah menjadi feses mempengaruhi fisik dan kimiawi tanah seperti daya ikat air dan pH tanah. Akumulasi kotoran fauna tanah memberi umpan balik pada pembentukan agregat tanah, perubahan komunitas tumbuhan, asosiasi mikoriza, dan komposisi jaring makanan. Namun, kendala empiris pada jumlah sampah yang dikonsumsi oleh fauna tanah diperlukan untuk meningkatkan pemahaman tentang efek fauna tanah tidak hanya pada dekomposisi serasah tetapi juga pada banyak proses ekologi penting lainnya seperti siklus nutrisi dan transformasi bahan organik.

Fauna tanah memiliki pengaruh tidak langsung terhadap nilai ekonomi melalui aktivitas kelompok fungsionalnya seperti perekayasa ekosistem. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, beberapa studi eksperimental menunjukkan bahwa keanekaragaman fauna tanah sangat terkait dengan dekomposisi dan siklus nutrisi melalui aktivitas kelompok fungsionalnya sebagai detritivor, omnivora, predator, atau perekayasa ekosistem. Selain kelompok fauna tanah di atas, semut dan rayap dikategorikan sebagai perekayasa ekosistem berdasarkan hubungannya dengan peran mereka untuk memodifikasi sifat tanah,

dan menyediakan substrat yang tersedia untuk mikroba. Beberapa penelitian menggunakan fauna tanah sebagai perekayasa ekosistem untuk restorasi ekosistem.

Berdasarkan penjelasan di atas, perlu untuk dikaji lebih lanjut terkait komunitas fauna tanah. sekali lagi menekankan bahwa pada ekosistem terestrial, penjelasan dampak aktivitas manusia terhadap keanekaragaman hayati sebagian besar didominasi oleh studi dari komunitas di atas permukaan tanah. Saat ini, pendekatan baru dikemukakan oleh Parker (2010) bahwa keanekaragaman hayati seharusnya tidak hanya mempertimbangkan jumlah spesies tetapi juga kelompok fungsional spesies dalam komunitas. Bahkan, ekosistem bawah tanah dan kelompok fungsional spesies terabaikan, karena tidak adanya nilai ekonomis langsung (Decaens 2006) dan spesies fauna tanah yang 'karismatik'. Fauna tanah memiliki pengaruh tidak langsung terhadap nilai ekonomis melalui gugus fungsinya aktivitas seperti perekayasa ekosistem. Sehingga menurut kami, kajian sistematis membahas fauna tanah perlu dimulai dari kuantitas fauna tanah yang ditinjau dari aspek kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah, pemerataan fauna tanah, kepadatan fauna tanah, frekuensi kemunculan fauna tanah, indeks nilai penting fauna tanah, dominansi fauna tanah, dan indeks kesamaan fauna tanah pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik. Dengan perlahan dipahaminya aspek tersebut, sangat membantu dalam menguatkan peran dan fungsi fauna tanah untuk selanjutnya diangkat kharismanya agar bisa dikenal masyarakat secara luas.

5.1 Kelimpahan Fauna Tanah

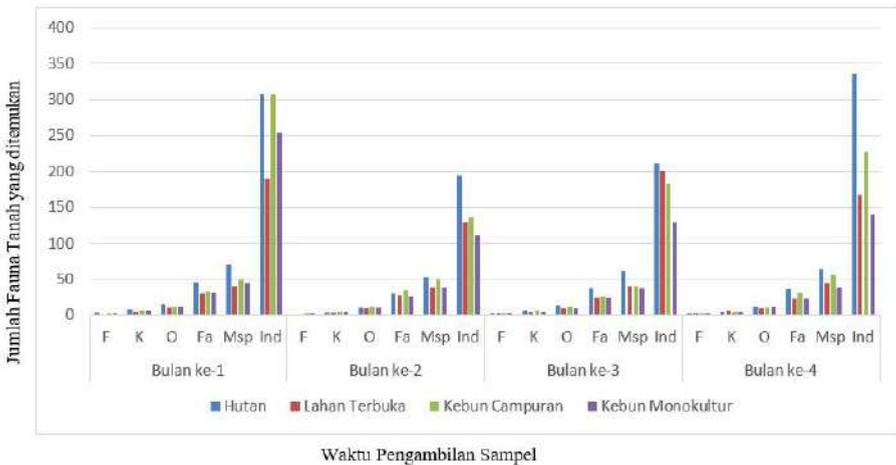
Fauna tanah merupakan organisme yang seluruh atau sebagian besar siklus hidupnya dilakukan di dalam tanah juga permukaan tanah yang berperan dalam membantu penguraian bahan organik, fauna tanah merupakan bagian dari organisme tanah yang merupakan kelompok heterotrof utama di dalam tanah. Fauna bersama dengan komunitas tanah lainnya sebagai komponen biologi yang mendiami tanah menciptakan struktur tanah biogenik alami yang unik, dan berperan dalam keberlangsungan proses daur hara di dalam tanah. Beragamnya organisme berbeda yang menghuni tanah membuat sangat sulit untuk membentuk kelompok besar di mana mereka dapat menyatu dan pada gilirannya nanti, akan mendukung aktivitas ekologi yang membuat kemudahan bagi para ahli ekologi untuk

menggambarkannya secara menyeluruh. Meskipun kemajuan besar dicapai dalam keanekaragaman taksonomi berkat kemajuan dalam teknik molekuler (misalnya, pengurutan DNA dari organisme yang berbeda, dan ekstraksi DNA langsung dari sampel tanah, yaitu DNA lingkungan atau e-DNA), penerapannya pada studi ekologi tanah tetap sulit.

Hal ini disebabkan oleh keberadaan Relic DNA yang dapat melebihi-lebihkan jumlah keanekaragaman hayati serta kurangnya standarisasi dalam prosedur metodologi tersebut (Orgiazzi et al., 2015), terbatasnya informasi yang diberikan tentang aktivitas dan kelangsungan hidup (mati atau hidup) dari banyak kelompok (Cangelosi dan Meschke, 2014), dan tingginya jumlah habitat dan kelompok hewan yang masih belum tersampel. Klasifikasi yang luas menjadi mikro-, meso-, dan makrofauna, meskipun memiliki beberapa keuntungan konseptual [misalnya, diasumsikan bahwa semakin besar hewan semakin besar pengaruhnya terhadap proses tanah, misalnya, Bradford et al. (2007), dan semakin besar hewan, semakin rentan terhadap gangguan lingkungan (misalnya, Tsiafouli et al., 2015; Briones dan Schmidt, 2017), juga menimbulkan beberapa ketidaknyamanan. Diantaranya, kesulitan dalam menempatkan banyak organisme ke dalam kelompok tertentu, sebagian karena banyak dari mereka sangat bervariasi dari jumlah dan ukurannya. Misalnya, beberapa kelompok mesofauna (seperti tungau, collembolans, enchytraeids) termasuk spesies yang terbentang dari spesimen kecil (di sekitar nilai lebar tubuh mikrofauna) hingga yang besar (mendekati nilai yang diamati untuk makrofauna).

Terlepas dari berbagai kemajuan teknologi tersebut beserta dengan kekurangannya, menurut kami jumlah fauna tanah yang terhimpun pada suatu tipe lahan adalah hal penting sebagai langkah awal untuk mendeteksi kondisi kesehatan lahan tersebut. Fauna tanah yang berlimpah akan membantu melihat bagaimana sistem ekologi tersebut berjalan dengan baik. Menjelaskan kelimpahan fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa akan membantu untuk perjalanan deteksi biodiversitas fauna tanah selanjutnya. Variasi jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa dalam klasifikasi fauna tanah menunjukkan tingkat keseimbangan hubungan kekerabatan dan persamaan ciri/karakteristik fauna tanah. Pentingnya menghitung jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa fauna tanah adalah untuk melihat variasi jumlah fauna tanah secara detail berdasarkan tingkatan klasifikasi fauna tanah. Selain itu, hal ini juga dibutuhkan

untuk menentukan tingkatan taksa yang representatif untuk menentukan jumlah kelompok fauna tanah. Jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa dalam klasifikasi pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang dapat dilihat pada Gambar 16.



Ket. F: Filum, K: Kelas, O: Ordo, Fa: Famili, Msp: Morfospesies, Ind: Individu, Bulan ke-1: November 2017, Bulan ke-2: Desember 2017, Bulan ke-3: Januari 2018, Bulan ke-4: Februari 2018

Gambar 16. Grafik jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang berdasarkan waktu pengamatan.

Gambar 16. menunjukkan variasi jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa dalam klasifikasi pada tipe lahan hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur. Hasil penelitian Marsandi et al., (2020) di kawasan hutan hujan tropis, Bukit Pinang-Pinang Padang menyebutkan bahwa berdasarkan gambar diatas pada bulan pertama jumlah ordo, famili dan morfospesies fauna tanah pada tipe lahan hutan menunjukkan nilai tertinggi yaitu 15 ordo, 46 famili dan 70 morfospesies serta jumlah individu sebanyak 307. Sedangkan jumlah taksa fauna tanah terendah terdapat pada tipe lahan terbuka dengan jumlah ordo 11, famili 30, morfospesies 41 dan jumlah individu sebanyak 190. Jumlah fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa pada tipe lahan hutan menandakan bahwa hutan menjadi habitat yang tepat

(referensi) sebagian besar fauna tanah. Pengaruh vegetasi pelindung yang didukung dengan adanya area *rhizosfer* akar yang bervariasi pada tipe lahan hutan akan meningkatkan jumlah fauna tanah pada masing-masing tingkatan taksa dalam klasifikasi. Kelimpahan fauna tanah sebagai komponen penting dari biota tanah pada ekosistem hutan disebabkan oleh daya dukung hutan yang memiliki proporsi tinggi dari total keanekaragaman hayati yang dilengkapi dengan ketersediaan nutrisi yang melimpah. Dinamika kelimpahan masing-masing tingkatan taksa fauna tanah akan menurun dengan semakin berkurangnya vegetasi lahan yang mendukung ketersediaan nutrisi bagi fauna tanah. Variasi vegetasi ekosistem hutan akan memberikan pengaruh terhadap peningkatan laju pertumbuhan dan aktivitas biota tanah terutama fauna tanah.

Pada bulan ke-2 (Gambar 16), juga menunjukkan bahwa tipe lahan hutan memiliki jumlah masing-masing tingkatan taksa fauna tanah tertinggi dibandingkan dengan tipe lahan lainnya, dimana terdapat jumlah ordo sebanyak 11, famili 31, morfospesies 53 dan jumlah individu sebanyak 195. Jumlah fauna tanah terendah berdasarkan tingkatan taksa terdapat pada tipe lahan terbuka dengan jumlah ordo sebanyak 10, famili 27 dan morfospesies 39 serta jumlah individu sebanyak 130 dan pada tipe lahan monokultur dengan jumlah ordo sebanyak 11, famili 26 dan morfospesies 39 serta jumlah individu sebanyak 111. Baik pada tipe lahan hutan maupun areal terbuka dan kebun monokultur pada bulan kedua mengalami kecenderungan penurunan kelimpahan fauna tanah (Gambar 16) dari bulan pertama. Hal ini menunjukkan jangkauan distribusi kelompok fauna tanah yang lebih luas. Tata ruang distribusi dari komunitas fauna tanah dipengaruhi oleh faktor ketersediaan sumber nutrisi makanan. Selain itu, komposisi komunitas fauna tanah pada masing-masing tingkatan taksa dalam klasifikasi juga menampilkan variabilitas temporal. Jenis fauna tanah tersebut keberadaannya hanya bersifat sementara. Fauna tanah yang menghuni ekosistem yang sama akan merespon secara berbeda atau serupa dengan dinamika spasial temporal dalam faktor lingkungan akan ditemukan variasi spesies yang sama maupun berbeda pada bulan berikutnya.

Pada bulan kedua, pengamatan jumlah fauna tanah pada tingkat taksa pada klasifikasi fauna tanah. Terdapat kelimpahan curah hujan yang menurun dari bulan pertama 922 mm menjadi 229 mm pada bulan kedua. Menurunnya kelimpahan curah hujan pada bulan kedua, menyebabkan kelimpahan fauna tanah berdasarkan tingkatan taksa

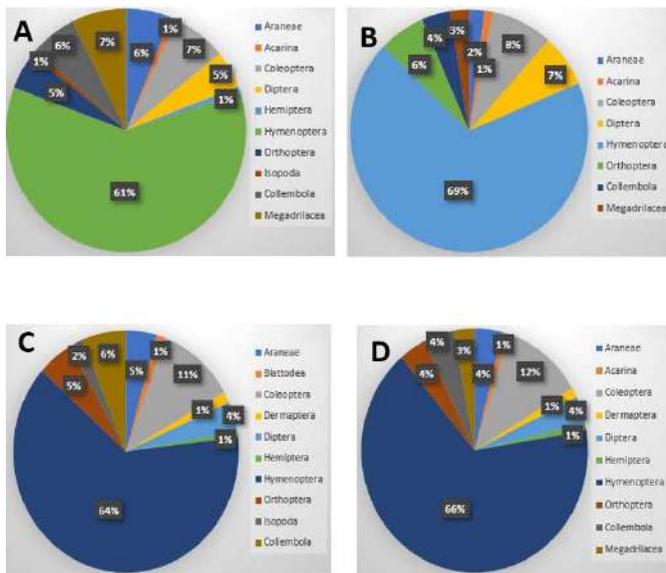
dalam klasifikasi juga berkurang. Curah hujan akan menyebabkan kondisi tanah menjadi lembab dengan suhu yang rendah. Sebagian besar komponen tubuh fauna tanah tersusun atas air, dimana fauna tanah membutuhkan habitat yang efektif untuk mempertahankan hidup. Selanjutnya, suhu memainkan peran penting dalam mengatur aktivitas kehidupan fauna tanah. Kedua faktor fisik tersebut akan mempengaruhi laju reaksi kimia dalam tubuh dan mengendalikan kegiatan metabolisme yakni mekanisme kompensasi yang khusus dikembangkan oleh fauna tanah untuk beradaptasi dengan suhu di alam. Fitriana (2006) menambahkan bahwa fauna tanah tidak dapat bertahan pada suhu yang terlalu tinggi dan rendah. Suhu optimal untuk perkembangan dan pertumbuhan fauna tanah adalah kisaran 26°C.

Variasi jumlah fauna tanah pada tingkatan taksa juga ditunjukkan pada bulan ke-3 yang memperlihatkan kecendrungan jumlah total yang hampir sama dengan bulan sebelumnya (Gambar 16). Jumlah tingkatan taksa fauna tanah tingkat ordo, famili dan morfospesies tertinggi masih terdapat pada tipe lahan hutan, yaitu sebanyak 13 ordo, 37 famili, 61 morfospesies dan jumlah individu fauna tanah sebanyak 211. Jumlah tingkat taksa fauna tanah terendah terdapat pada tipe lahan kebun monokultur, yaitu sebanyak 9 ordo, 25 famili, 37 morfospesies dan jumlah individu fauna tanah sebanyak 130. Setelah tiga bulan pengamatan, hutan masih menjadi rumah yang tepat bagi sebagian besar fauna tanah. Kelimpahan bahan organik dan vegetasi hutan memberikan ruang gerak yang cukup luas bagi fauna tanah. Hutan menjadi rumah yang tepat bagi sebagian besar fauna tanah. Hutan mampu menyediakan berbagai persyaratan pertumbuhan bagi fauna tanah untuk kelangsungan hidupnya. Menurut Lavelle *et al.* (2006), komponen fauna tanah berperan dalam proses menjalankan aliran energi dalam suatu ekosistem lahan. Kelompok fauna tanah memiliki kecendrungan melakukan penguraian (dekomposisi) bahan organik di atas permukaan tanah. Kondisi iklim mikro yang terdapat pada tumpukan serasah akan menghadirkan tingkat jumlah fauna tanah yang tinggi dan sebaliknya. Hal ini didukung oleh pendapat Bardgett dan Putten (2014) bahwa dalam melakukan aktivitasnya, kelompok fauna tanah memerlukan persyaratan tertentu terkait dengan kondisi lingkungan.

Selanjutnya, pada bulan ke empat jumlah fauna tanah pada tingkatan taksa tertinggi terdapat pada tipe lahan hutan, dengan jumlah ordo sebanyak 12, famili 36 dan morfospesies 64 serta jumlah

individu fauna tanah sebanyak 335 pada tipe lahan hutan. Jumlah fauna tanah pada tingkatan taksa terendah terdapat pada tipe lahan terbuka, yaitu ditemukan jumlah ordo sebanyak 10, famili 23 dan morfospesies 44 serta jumlah individu sebanyak 168 dan kebun monokultur dengan jumlah ordo 12, famili 24, morfospesies 39 dan jumlah individu fauna tanah 141. Rendahnya kelimpahan tingkatan taksa fauna tanah pada tipe lahan terbuka dan monokultur disebabkan perubahan vegetasi lahan. Vegetasi lahan mampu menyediakan tutupan tajuk yang dapat menjaga fluktuasi suhu dan kelembaban udara, serta menyumbangkan serasah sebagai bahan organik tanah yang penting dalam peningkatan kesuburan tanah. Bahan organik tanah sangat menentukan kepadatan populasi fauna tanah. Bahan organik tanah bertindak sebagai substrat bagi sebagian besar kelompok fauna tanah. Kelimpahan fauna tanah ditentukan oleh ketersediaan bahan organik tanah, dimana bahan organik tanah ini dihasilkan dari kelimpahan serasah yang jatuh di atas permukaan tanah.

Pada bulan keempat, kelimpahan curah hujan meningkat dari bulan sebelumnya (bulan kedua yaitu 229 mm dan ketiga yaitu 217 mm) yaitu 461 mm. Hal ini menyebabkan jumlah fauna tanah yang ditemukan pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang berdasarkan tingkat taksa relatif juga ikut meningkat dibandingkan dengan bulan sebelumnya terutama pada tingkat morfospesies dan jumlah individu fauna tanah. Meningkatnya curah hujan akan meningkatkan kadar air atau kelembaban tanah. Kadar air tanah atau kelembaban tanah memiliki pengaruh penting terhadap keberadaan dan keberlangsungan hidup fauna tanah. Kelembaban dapat mengontrol berbagai macam aktivitas fauna tanah seperti bergerak, beradaptasi, berkembang biak, dan makan.



Gambar 17. Persentase jumlah individu fauna tanah pada tipe lahan (a) hutan, (b) areal terbuka, (c) kebun campuran, (d) kebun monokultur kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

Mengkaji jumlah total fauna tanah berdasarkan tingkat taksa dalam klasifikasi belum cukup untuk menjelaskan kelimpahan jenis fauna tanah yang bisa menunjukkan keanekaragaman fauna tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Mengetahui jumlah masing-masing fauna tanah hasil identifikasi akan mempermudah mengenali identitas fauna tanah beserta dengan jumlahnya yang menempati suatu tipe lahan. Dalam hal ini, dibutuhkan data kuantitas fauna tanah berdasarkan tingkat ordo fauna tanah untuk menjelaskan keberagaman fauna tanah yang menempati masing-masing tipe lahan kawasan Bukit Pinang-Pinang. Adapun variasi kelimpahan tingkat ordo fauna tanah pada masing-masing tipe lahan yaitu hutan, areal terbuka, kebun campuran dan kebun monokultur pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang dapat dilihat pada Gambar 17.

Gambar 17. menunjukkan persentase jumlah fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang berdasarkan jumlah ordo fauna tanah. Dari hasil

penelitian yang telah dilakukan, didapatkan total jumlah individu fauna tanah tertinggi, terdapat pada tipe lahan hutan dengan jumlah 1049. Selanjutnya, tipe lahan kebun campuran dengan jumlah 852, tipe lahan terbuka dengan jumlah 688 dan kelimpahan total fauna tanah terendah terdapat pada tipe lahan kebun monokultur 636 individu. Banyak sedikitnya jumlah individu dan jenis fauna tanah pada suatu tipe lahan, akan membentuk struktur keanekaragaman fauna tanah yang mempengaruhi keberlanjutan ekosistem. Komposisi jumlah komunitas fauna tanah memainkan peran penting dalam mengatur proses dekomposisi dan berjalannya aliran energi atau nutrisi dalam suatu tipe lahan. Keberadaan fauna tanah yang melimpah pada tipe lahan hutan disebabkan oleh struktur lantai hutan yang dipenuhi serasah, tanaman herba, dan perdu pada area *rhizosfer* akar. Proses dekomposisi dan daur ulang nutrisi meningkat pada tipe lahan hutan sebagai akibat dari banyaknya akumulasi serasah di atas permukaan tanah. Selanjutnya rendahnya kelimpahan individu fauna tanah pada tipe lahan kebun monokultur disebabkan berbagai tekanan terhadap tanah yang berupa manajemen lahan pertanian untuk meningkatkan kualitas produksi. Perubahan kelimpahan fauna tanah tidak hanya disebabkan oleh faktor gangguan, seperti pengolahan tanah, pupuk, dan aplikasi bahan kimia pestisida, tetapi juga melalui perubahan kondisi habitat tanah dengan meningkatnya umur perubahan tipe lahan tersebut.

Dari beberapa kelompok ordo yang telah diidentifikasi, kelompok Hymenoptera, Coleoptera, Collembola, dan Orthoptera merupakan kelompok fauna tanah yang paling banyak ditemukan pada empat tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang (Gambar 17). Dari keempat ordo di atas, kelimpahan ordo Hymenoptera memiliki nilai kelimpahan fauna tanah tertinggi (Gambar 17). Hampir setiap kali pemasangan perangkap jebak, ordo Hymenoptera bisa ditemukan di empat tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang dengan jumlah yang terbanyak terutama dari famili Formicidae. Kelompok Hymenoptera merupakan fauna tanah yang tersebar luas di alam. Sedikitnya faktor pembatas kehidupan dan sumber makanan yang mudah didapat, membuat kelompok ini bisa dengan mudah ditemukan di alam. Selain itu, sebagian besar dari ordo Hymenoptera memiliki kehidupan dan struktur sosial yang terdiri dari kasta ratu, kasta prajurit, dan kasta pekerja yang memiliki keteraturan dan kerja sama yang baik dalam menjaga keberlanjutan komunitas kelompok Hymenoptera tersebut.

Sedangkan Ordo dari Isoptera, Phasmatodea, Julida, Pscoptera, Mollusca dan Chordata memiliki jumlah fauna tanah yang sangat sedikit dan jarang ditemukan. Semakin sedikitnya kelompok ordo yang ditemukan dalam suatu tipe lahan menandakan bahwa areal tersebut bukan habitat yang tepat bagi ordo fauna tanah tersebut. Selain itu, perubahan hutan alami menjadi beberapa tipe lahan dapat menimbulkan keterancaman terhadap populasi fauna tanah dengan jumlah yang semakin berkurang setiap bulannya. Ketersediaan makanan merupakan hal pokok dan paling utama dalam status kelimpahan fauna tanah. Karakteristik habitat tanah, seperti kualitas dan kerapatan vegetasi tanaman serta kelimpahan serasah serta kerapatan akar tanaman dapat berubah dalam periode waktu, yang pada gilirannya akan mengubah kondisi dan ketersediaan makanan bagi fauna tanah seiring dengan bertambahnya usia tipe lahan. Selanjutnya Yadav *et al.* (2011), menambahkan bahwa perubahan kondisi habitat tanah dapat mempengaruhi secara langsung dan tidak langsung distribusi, kehadiran, dan kelimpahan fauna tanah.

Gambar 17 menunjukkan bahwa pada tipe lahan hutan hanya ditemukan beberapa individu fauna tanah yang berasal dari ordo Dermaptera 1%, Hemiptera 1% dan Blattodea 1%. Kelompok ordo tersebut ditemukan dalam jumlah yang sangat sedikit dan keberadaanya bersifat sementara di area penelitian. Luasnya tipe lahan hutan pada areal penelitian dengan kondisi serasah yang melimpah, membuka habitat yang cukup luas bagi fauna tanah untuk menjelajah. Fauna tanah yang sangat sedikit atau bahkan tidak ditemukan dalam beberapa periode di suatu areal dalam satu kawasan menandakan bahwa areal tersebut bukan habitat aslinya. Seandainya, ditemukan beberapa jumlah fauna tanah tersebut dalam jumlah yang sedikit selama beberapa periode, hal ini menunjukkan bahwa fauna tanah tersebut bersifat temporal terhadap kawasan penelitian yang dimaksud. Inkonsistensi dalam pola pengelompokan komposisi fauna tanah dan karakteristik habitat fauna tanah pada suatu tipe lahan diindikasikan bahwa respon dari masing-masing taksa fauna tanah terhadap perubahan kondisi lingkungan dan makanan yang juga tergantung pada karakteristik kehidupan serta mobilitas taksa fauna tanah tersebut.

Gambar 16. juga menjelaskan bahwa terdapat beberapa ordo yang hanya sedikit ditemukan pada tipe lahan terbuka dengan persentase hanya 1%, yaitu Dermaptera, Acarina dan Hemiptera. Tipe ordo tersebut merupakan ordo fauna tanah yang penting dalam menjaga

keseimbangan ekosistem. Sedikitnya kelompok ordo fauna tanah tersebut, ditemukan pada tipe lahan terbuka disebabkan hilangnya vegetasi pada tipe lahan terbuka yang mengakibatkan berkurangnya bahan organik tanah yang dihasilkan. Menurut Bender (2016) bahan organik tanah akan meningkatkan kelembaban tanah dan nutrisi, sehingga sedikitnya bahan organik tanah yang tersedia di atas permukaan tanah, maka kelembaban tanah dan nutrisi fauna tanah akan semakin berkurang. Hilangnya bahan organik tanah pada suatu tipe lahan sebagai akibat perubahan dalam fisio-kimia lingkungan tanah akan menurunkan kelimpahan fauna tanah yang disebabkan oleh modifikasi habitat fauna tanah tersebut.

Pada tipe lahan kebun campuran (Gambar 17), terdapat beberapa ordo yang ditemukan hanya dalam jumlah sedikit pada lokasi tersebut antara lain Isopoda 1%, Acarina 1% dan Hemiptera 1%. Sedikitnya kelompok ordo tersebut ditemukan pada tipe lahan kebun campuran disebabkan adanya pengaruh pestisida yang digunakan petani untuk pemeliharaan tanaman budidaya, walaupun dalam intensitas yang rendah. Hal tersebut selaras dengan kelimpahan fauna tanah di kebun monokultur. Pada tipe lahan ini banyak kelompok ordo fauna tanah yang sangat sedikit ditemukan, antara lain Acarina 1%, Araneae 2%, dan Megadrilacea 3%. Hal ini semakin memperkuat bahwa pengaruh pemberian intensif senyawa kimia seperti pestisida ke lingkungan dalam rangka pemeliharaan tanaman produksi akan mempengaruhi dan menghilangkan keberadaan beberapa kelompok fauna tanah. Bahan kimia yang digunakan untuk perawatan tanaman produksi menimbulkan dampak negatif terhadap kelimpahan fauna tanah. Bahan kimia tidak hanya dapat menimbulkan gangguan lingkungan yang menyebabkan berkurangnya kelimpahan fauna tanah akan tetapi juga bisa menyebabkan kepunahan lokal suatu jenis fauna tanah.

Hasil penelitian Ayuke *et al.* (2009) pada beberapa tipe penggunaan lahan di Embu, Kenya mengungkapkan bahwa kelompok ordo Hymenoptera memiliki kelimpahan tertinggi yaitu 45% dari total fauna tanah yang ditemukan, sedangkan Hemiptera, Phasmatodea, dan Blattidae ditemukan $\leq 1\%$. Selanjutnya, hasil penelitian Yeo (2006) yang dilakukan pada beberapa tipe lahan hutan dan pertanian di negara Pantai Gading menyatakan bahwa kelimpahan kelompok Hymenoptera tertinggi terdapat pada tipe lahan hutan alami dibandingkan tipe lahan lainnya yaitu dengan kelimpahan 79.25 ± 15.75 . Pada manajemen lahan pertanian kebun campuran dan monokultur daerah Malang, Rosa *et al.* (2019) melaporkan bahwa

kelompok Hymenoptera memiliki kelimpahan fauna tanah tertinggi dibandingkan dengan kelompok fauna tanah lainnya yaitu, 440 individu.

5.2 Keanekaragaman Fauna Tanah

Keanekaragaman hayati adalah keanekaragaman organisme yang menunjukkan keseluruhan atau totalitas variasi gen, jenis, dan ekosistem pada suatu daerah. Keanekaragaman hayati melingkupi berbagai perbedaan atau variasi bentuk, penampilan, jumlah, dan sifat-sifat yang terlihat pada berbagai tingkatan, baik tingkatan gen, spesies maupun ekosistem. Berdasarkan hal tersebut, para pakar membedakan keanekaragaman hayati menjadi tiga tingkatan, yaitu keanekaragaman gen, keanekaragaman jenis dan keanekaragaman ekosistem. Keanekaragaman hayati atau biodiversitas (*biodiversity*) adalah suatu istilah pembahasan yang mencakup semua bentuk kehidupan. Secara ilmiah, dapat dikelompokkan menurut skala organisasi biologisnya, yaitu mencakup gen, spesies tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme serta ekosistem dan proses-proses ekologi di mana bentuk kehidupan bagi biota tersebut.

Terdapat beberapa cara untuk mengukur biodiversitas di antaranya adalah: 1) diversitas alpha (biodiversitas pada area tertentu, komunitas atau ekosistem, dan biasanya mengekspresikan kekayaan spesies pada area tersebut); 2) diversitas beta (membandingkan diversitas spesies di antara ekosistem, termasuk membandingkan beberapa taxa yang unik pada masing-masing ekosistem); 3) diversitas gamma (diversitas taksomik di suatu daerah dengan banyak ekosistem); 4) diversitas phylogenetik atau '*Omega Diversity*' (perbedaan atau diversitas di antara taxa); 5) diversitas global (seluruh biodiversitas di bumi). Keanekaragaman β atau keanekaragaman antar komunitas dapat dihitung dengan menggunakan beberapa teknik, yaitu kesamaan komunitas dan indeks keanekaragaman.

Fauna tanah sebagai salah satu keanekaragaman hayati tanah yang perlu diperhatikan karena merupakan salah satu indikator kesehatan tanah. Jika telah mengalami kematian, fauna-fauna tanah tersebut memberikan masukan bagi tumbuhan yang masih hidup. Proses dekomposisi dalam tanah tidak akan mampu berjalan cepat bila tidak ditunjang oleh aktivitas fauna tanah. Keberadaan fauna tanah dalam tanah sangat tergantung pada ketersediaan energi dan sumber makanan untuk melangsungkan hidupnya, seperti bahan organik. Dengan

ketersediaan energi dan hara bagi fauna tanah tersebut, perkembangan dan aktivitas fauna tanah akan berlangsung baik dan timbal baliknya akan memberikan dampak positif bagi kesuburan tanah.

Salah satu contohnya yaitu, Collembola dan Oribatida yang sering dikelompokkan ke dalam tingkat trofik yang sama dan dianggap menempati karakteristik yang hampir serupa dalam proses dekomposisi. Kedua kelompok berbeda dalam berbagai sifat ekologi yang meliputi mobilitas, produktivitas, tingkat tekanan predasi, dan toleransi terhadap kondisi abiotik. Secara khusus, beberapa spesies oribatid mendekomposisi unsur kayu yang lebih besar, sedangkan Collembola sering bergantung pada karbon yang bersifat labil seperti eksudat akar. Karena itu, untuk efek dari jenis serasah, Oribatida akan terlibat dalam dekomposisi serasah akar, yang merupakan substrat yang lebih aktif dari serasah daun. Rasio dominasi antara Oribatida dan Collembola akan berbeda karena Collembola lebih sensitif dibanding Oribatida dengan kondisi mikrohabitat abiotik (Lindberg and Bengtsson, 2005).

Komunitas fauna tanah invertebrata sangat dipengaruhi oleh perubahan lingkungan sebagai akibat dari aktivitas manusia. Disini kembali kami menekankan lahan agroekosistem, yang menyebabkan kelompok ini cenderung menghilang. Keberlanjutan sistem lahan pertanian menjadi daya dukung untuk kelestarian fauna tanah. Walaupun demikian, di sisi lain, perlu diperhatikan bahwa ada kasus di mana penggantian fauna tanah asli yang beragam oleh beberapa spesies eksotik oportunistik yang diadaptasi ke daerah yang sangat terganggu mengakibatkan hilangnya fungsi kunci dari keanekaragaman tersebut. Degradasi tanah yang parah atau kerusakan tanaman oleh fauna tanah juga dapat terjadi. Sebagai contoh, ada bukti bahwa setidaknya sebagian dari proses degradasi yang mempengaruhi padang rumput di Amazon Tengah disebabkan oleh penarikan spesies cacing tanah *Pontoscolex corethrurus*, dengan mengorbankan hilangnya semua spesies cacing tanah dan mayoritas artropoda dari asalnya di hutan. Hal tersebut menyebabkan sejumlah besar gips padat di permukaan tanah dan pemadatan tanah yang parah dan penyusutan air berikutnya dengan cepat terjadi, karena spesies-spesies yang biasanya mendekomposisi tanah sebagian besar telah dihilangkan. Belum lagi, rusaknya sistem rantai makanan yang berakibat pada invasi spesies yang merugikan. (Decaens et al., 2006)

Oleh karena itu, sangat penting untuk menggambarkan keanekaragaman komunitas fauna tanah dan mengevaluasi fungsinya

untuk mengidentifikasi pilihan pengelolaan yang pada akhirnya mengoptimalkan kegiatan fauna tanah tersebut. Keanekaragaman harus ditangani pada tingkat populasi (keanekaragaman genetik pada spesies kunci), tingkat komunitas (kekayaan spesifik) dan ekosistem (kelompok fungsional). Kebutuhan untuk memasukkan pengelolaan komunitas fauna tanah sebagai bagian dari sistem pertanian, remediasi lahan, dan jenis penggunaan lahan lainnya dengan jelas menetapkan prioritas pada tingkat ekosistem. Tujuan pengelolaan keanekaragaman hayati tanah seharusnya tidak hanya berarti memaksimalkan jumlah spesies dalam suatu ekosistem. Lebih mungkin itu berarti kemampuan untuk mempertahankan fauna saat ini dan untuk menekankan spesies dan proses tertentu untuk mencapai tujuan tertentu. Jelas, tujuan utama yang luas adalah untuk mengelola keanekaragaman hayati untuk ketahanan tanah maksimum.

Keanekaragaman hayati fauna tanah ditentukan dengan menggunakan indeks Shannon-Wiener. Para peneliti ekologi tanah sering menggunakan Indeks Shannon-Wiener (sering juga disebut Indeks Shannon) sebagai formula mengukur keanekaragaman fauna tanah. Indeks ini merupakan ukuran keteraturan atau ketidakteraturan dalam suatu sistem tertentu yang dapat digunakan dan diterapkan pada sistem ekologi, dimana ketika diterapkan dalam ekologi, digunakan untuk mengukur tingkat keanekaragaman hayati (Gardi and Jafferey, 2009). Indeks Shannon memperhitungkan kekayaan spesies dan proporsi masing-masing spesies dalam suatu zona tertentu. Indeks yang lebih tinggi merupakan indikasi bahwa terdapat jumlah spesies yang relatif tinggi atau adanya pemerataan spesies yang juga relatif tinggi. Adapun rumus yang digunakan dalam menentukan indeks keanekaragaman fauna tanah dengan Shannon-Wiener adalah sebagai berikut,

Keanekaragaman spesies fauna tanah dihitung dengan rumus Shannon- Weener (Odum, 1998):

$$H = - \sum p_i \ln p_i$$

Keterangan:

H = indeks keanekaragaman

$p_i = n_i/N$

n_i = cacah individu spesies ke-i

N = jumlah total individu

Kriteria nilai indeks keanekaragaman:

- $H < 1$ = keanekaragaman rendah (jumlah spesies dan individu rendah, beberapa spesies ada yang dominan)
- $H = 1-3$ = keanekaragaman sedang (jumlah spesies dan individu sedang, jumlah individu tidak beragam)
- $H > 3$ = keanekaragaman tinggi (jumlah spesies dan individu tinggi, tidak ada spesies yang dominan)

Indeks Shannon-Wiener sangat membantu dalam menentukan tingkat keanekaragaman fauna tanah pada suatu tipe lahan. Formula ini menurut kami menjadi solusi untuk melihat kondisi kesehatan tanah pada suatu tipe lahan. Walaupun banyak formula yang dapat digunakan untuk melihat keanekaragaman hayati, tapi kami lebih merekomendasikan Shannon-Wiener. Di sini kami juga menyarankan bahwa, untuk mendapatkan hasil yang lebih valid agar dilakukan koleksi data fauna tanah secara berulang dan tersebar merata (keterwakilan) pada areal yang dijadikan sebagai objek penelitian.

Buku ini juga ini mencoba untuk mensintesis pengetahuan yang ada tentang persepsi dan fungsi keanekaragaman hayati fauna (invertebrata) di dalam tanah. Area penelitian dan hipotesis baru diusulkan untuk meningkatkan pemahaman kita dan mempromosikan gagasan bahwa fauna adalah sumber daya yang memerlukan pengelolaan yang hati-hati, sama seperti komponen fisik, kimia dan mikrobiologi terkait kesuburan tanah yang diterima saat ini. Berikut kami tampilkan hasil penelitian indeks keanekaragaman (Shannon-Wiener), pemerataan dan dominansi fauna tanah pada kawasan hutan hujan tropik, Bukit Pinang-Pinang Padang.

Tabel 7. Indeks keanekaragaman, pemerataan dan dominansi fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang

Bulan	Parameter	Tipe Lahan			
		Hutan	Lahan Terbuka	Kebun Campuran	Kebun Monokultur
November 2017	H'	3.134	2.631	2.728	2.527
	E	0.552	0.464	0.481	0.445
	D	0.105	0.145	0.168	0.159
Desember 2017	H'	3.313	2.998	3.113	3.214
	E	0.584	0.528	0.549	0.566
	D	0.063	0.089	0.099	0.069
Januari 2018	H'	3.314	2.782	2.870	2.935
	E	0.584	0.490	0.506	0.517
	D	0.068	0.103	0.109	0.089
Februari 2018	H'	2.891	3.084	3.183	2.927
	E	0.509	0.544	0.561	0.516
	D	0.138	0.073	0.069	0.090

Ket. H': Indeks keanekaragaman Shanon-Winner; e: Indeks pemerataan; D: Dominansi fauna tanah (Marsandi et al., 2020).

Diversitas fauna tanah pada kawasan hutan hujan tropik sangat tinggi. Berbagai jenis dan tipe fauna tanah dapat ditemukan pada kawasan ini. Keterancaman hutan pada kawasan ini berkembang dengan sangat cepat dan berpengaruh terhadap keanekaragaman fauna tanah. Salah satu contoh perubahan tipe lahan pada kawasan hutan hujan tropik adalah pada Bukit Pinang-Pinang, yang tidak hanya memberikan dampak pada jumlah total fauna tanah, akan tetapi juga berpengaruh terhadap keanekaragaman, pemerataan, dan dominansi fauna tanah. Perubahan nilai indeks keanekaragaman, pemerataan dan dominansi fauna tanah dalam periode waktu tertentu pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik bukit Pinang - Pinang akan menjelaskan dinamika keberadaan fauna tanah dalam ekosistem masing-masing tipe lahan. Tabel 7 menunjukkan nilai indeks keanekaragaman, pemerataan, dan dominansi fauna tanah pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

Dari bulan pertama hingga bulan ketiga pada Tabel 7, menunjukkan bahwa indeks keanekaragaman fauna tanah pada tipe lahan hutan mengalami peningkatan yaitu 3.134, 3.313 dan 3.314 yang termasuk dalam kriteria keanekaragaman tinggi ($H' > 3$). Hal ini menunjukkan bahwa hutan sebagai habitat alami fauna tanah menyediakan tempat hidup yang sesuai dengan kebutuhan beragam jenis fauna tanah. Dengan beragamnya vegetasi tumbuhan yang tumbuh di hutan alami dan serasah yang jatuh ke lantai hutan, menyebabkan meningkatnya keanekaragaman fauna tanah yang hadir pada tipe lahan tersebut. Hal ini didukung oleh pendapat Wu *et al.* (2015) dinamika keanekaragaman populasi fauna tanah disebabkan oleh heterogenitas vegetasi suatu tipe lahan. Fauna tanah merupakan komponen penting dari ekosistem dengan tingkat keanekaragaman yang tinggi pada suatu tipe lahan yang menyediakan keanekaragaman vegetasi lahan yang tinggi. Hutan alami memfasilitasi ruang gerak dan kehidupan sebagian besar fauna tanah.

Akan tetapi, pada bulan keempat indeks keanekaragaman fauna tanah di hutan mengalami penurunan, yaitu 2.891 (Tabel 7) yang termasuk dalam kriteria keanekaragaman sedang ($H' = 1-3$) dan menjadi indeks keanekaragaman fauna tanah terendah dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa mobilisasi fauna tanah tipe lahan hutan lebih aktif dibandingkan tipe lahan lainnya. Kemampuan hutan menyediakan sumber nutrisi dan habitat yang beragam mengakibatkan kelompok fauna tanah memiliki jangkauan ruang gerak yang luas dan mempersempit faktor pembatas kehidupan fauna tanah tersebut. Menurut Yin *et al.* (2017) distribusi fauna tanah suatu areal ditentukan oleh keberadaan bahan organik di atas permukaan tanah karena mampu menyediakan sumber makanan yang berlimpah sehingga fauna tanah tidak bergantung hanya pada suatu tempat.

Tipe lahan terbuka memiliki kecenderungan keanekaragaman fauna tanah yang meningkat dari bulan pertama hingga bulan ke-4, yaitu 2.631, 2.998, 2.782 dan 3.084 (Tabel 7). Tumbuhnya vegetasi bawah seperti rerumputan, semak ataupun tumbuhan perdu pada bulan keempat meningkatkan keanekaragaman fauna tanah. Fluktuasi peningkatan indeks keanekaragaman fauna tanah areal terbuka menandakan bahwa vegetasi pohon bukan alasan peningkatan indeks keanekaragaman fauna tanah. Perubahan tata guna lahan hutan menjadi areal terbuka hingga areal pertanian menyebabkan hilangnya biodiversitas fauna tanah dibandingkan dengan ekosistem yang masih

alami. Gulma ataupun rumput yang tumbuh pada suatu tipe lahan akan meningkatkan keanekaragaman fauna tanah. Rumput ataupun gulma pada suatu tipe lahan menciptakan iklim mikro yang sesuai dengan aktivitas hidup fauna tanah.

Indeks keanekaragaman fauna tanah juga mengalami fluktuasi pada tipe lahan perkebunan, baik pada kebun campuran maupun pada kebun monokultur. Kebun campuran memiliki nilai indeks keanekaragaman fauna tanah selama empat bulan yaitu 2.728, 3.113, 2.870 dan 3.183 (Tabel 7). Kebun monokultur memiliki nilai indeks keanekaragaman fauna tanah 2.527, 3.214, 2.935 dan 2.927 (Tabel 7). Kebun campuran dan monokultur memiliki manajemen lahan perkebunan yang hampir sama, hanya saja kebun monokultur lebih intensif menggunakan senyawa kimia dalam pemeliharaan tanaman budi daya. Menurut Chapin *et al.* (2014), manajemen pemeliharaan tanaman budi daya dengan menggunakan senyawa kimia dapat menurunkan keanekaragaman fauna tanah pada ekosistem kawasan hutan hujan tropik. Masuknya senyawa kimia ke dalam tanah akan mengurangi jumlah dan komposisi fauna tanah bahkan jika terus berlanjut tanpa ada pengendalian yang signifikan akan menyebabkan kepunahan bagi salah satu kelompok fauna tanah.

Fauna tanah umumnya digunakan sebagai indikator lingkungan dalam lanskap pertanian, dan kelompok fauna tanah berkontribusi banyak pada fungsi ekologi penting bagi lingkungan seperti kontrol biologis dan aliran nutrisi, sehingga dengan menjaga keanekaragaman fauna tanah adalah kunci untuk memastikan kesuburan tanah dan kesehatan ekologis lahan menjadi lebih kondusif untuk mempromosikan pemanfaatan lahan budidaya yang berkelanjutan. Variasi fauna tanah pada beberapa tipe lahan suatu kawasan dalam tahun-tahun terakhir telah dilakukan kajian secara luas dan mendalam yang ditinjau dari beberapa aspek diberbagai variasi iklim dan ekosistem yang berbeda secara luas, hingga dampak yang terjadi pada keanekaragaman fauna tanah akibat perubahan iklim yang cepat (Phillips *et al.*, 2019). Namun, menurut kami masih hal tersebut masih membutuhkan masukan dan kajian serta tambahan penelitian yang dilakukan secara mendalam dan berkelanjutan terhadap hasil yang yang didapat.

Hasil penelitian Wasis *et al.* (2018) pada beberapa tipe lahan di Provinsi Jambi menyatakan bahwa tipe hutan alami memiliki indeks keanekaragaman fauna tanah tertinggi dibandingkan dengan tipe

lahan lainnya, yaitu 2.664. Tipe lahan perkebunan monokultur (kebun sawit) memiliki indeks keanekaragaman fauna tanah terendah yaitu, 2.081. Selanjutnya, hasil penelitian Barros *et al.* (2002) yang dilakukan pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan Amazonia, Brazil bagian Barat menyatakan bahwa tipe lahan hutan alami memiliki indeks keanekaragaman fauna tanah tertinggi dibandingkan dengan tipe lahan lainnya, yaitu 2.22. Tipe lahan perkebunan monokultur memiliki indeks keanekaragaman fauna tanah terendah yaitu 1.63.

Hasil penelitian Zhang *et al.* (2022) mengemukakan bahwa indeks keanekaragaman Shannon-Wiener, indeks keanekaragaman Simpson, dan indeks kemerataan Pielou adalah yang terendah pada lahan pertanian. Hal ini bisa jadi disebabkan akibat dari gangguan manusia dalam jangka panjang di lahan pertanian. Gangguan manusia di lahan pertanian termanifestasi dalam pengolahan tanah jangka panjang, pemupukan, dan penyemprotan pestisida. Penelitian telah menemukan bahwa pengolahan tanah jangka panjang jangka panjang dan pemupukan akan mempengaruhi struktur tanah, melemahkan pembentukan agregat tanah, mengubah sifat fisik dan kimia tanah serta kandungan bahan organik, yang selanjutnya kemudian mempengaruhi karakteristik komunitas fauna tanah, yang mengarah pada ketidakstabilan komunitas fauna tanah. Insektisida dan herbisida juga berdampak pada manifestasi dalam penurunan spesies dan jumlah fauna tanah. Selanjutnya penelitian Zhang *et al.*, (2022) juga telah mengkonfirmasi bahwa Prostigmata sangat sensitif terhadap reaksi penyemprotan pestisida. Sebagai kelompok dominan di daerah penelitian ini, Prostigmata menyumbang proporsi populasi yang besar. Proporsi populasi yang besar, dan perubahannya mungkin memiliki dampak penting pada keragaman fauna tanah. Selain itu, terdapat perbedaan vegetasi di atas permukaan tanah di antara tipe habitat yang berbeda. Penelitian telah membuktikan bahwa perbedaan vegetasi dapat secara signifikan mempengaruhi komposisi dan struktur keanekaragaman hayati bawah permukaan, dan distribusi fauna tanah berkaitan erat dengan humus tanah dan tipe vegetasi di atas permukaan tanah (Liu *et al.*, 2012) . Demikian pula, keanekaragaman hayati dan heterogenitas lanskap dapat digunakan sebagai indikator untuk meningkatkan multifungsi ekologis lahan hutan di lanskap pertanian. Secara umum diyakini bahwa hutan buatan adalah “gurun ekologis”, dan peran hutan buatan dalam perlindungan keanekaragaman hayati sering ditolak secara sepihak, dimana perlindungan keanekaragaman hayati sering kali disangkal secara sepihak, atau diabaikan (Baum *et al.*,

2009) Namun, penelitian telah mengkonfirmasi bahwa hutan buatan (kebun campuran) memiliki keanekaragaman hayati tumbuhan bawah yang lebih tinggi daripada hutan alam ketika memiliki beberapa karakteristik habitat (Mthimunya and Munyai, 2022). Hutan buatan dapat mendorong regenerasi alami dari vegetasi bawah dan dengan demikian mempromosikan konservasi keanekaragaman hayati. Harapan kami konsep keberlanjutan pembangunan pertanian yang lestari dan berkelanjutan segera tercapai dengan mengikutkan fauna tanah sebagai pertimbangannya.

Perlu disampaikan bahwa dalam penelitian biodiversitas tanah kawasan hutan hujan tropik bukit Pinang-Pinang, didapatkan lima taksa dominan yang sering hadir pada beberapa tipe lahan kawasan tersebut. Ke lima taksa tersebut adalah kelompok ordo Hymenoptera, Coleoptera, Diptera, Orthoptera dan Araneae. Keberadaan kelompok taksa tersebut berpeluang untuk menjadi indikator kesehatan tanah kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-pinang. Bahkan kami meyakini bahwa, tidak hanya di Bukit Pinang-Pinang, tetapi di seluruh kawasan hutan hujan tropik. Ke lima taksa tersebut diharapkan dapat mewakili fauna tanah terutama serangga tanah untuk menjadi pioner keberlanjutan komunitas tanah terutama pada lahan pertanian. Berikut kami mencoba menjabarkan penjelasan ke lima fauna (serangga) tanah tersebut.

a. Hymenoptera

Hymenopteran, (ordo Hymenoptera) merupakan salah satu anggota serangga (fauna tanah) terbesar yang menempati hampir semua tempat di bumi dan kebermanfaatannya lebih tinggi dibandingkan dengan kelompok serangga lainnya. Lebih dari 115.000 spesies telah dideskripsikan, termasuk semut, lebah, ichneumon, chalcids, lalat gergaji, tawon, dan jenis yang kurang dikenal. Kecuali di daerah kutub, mereka melimpah di sebagian besar habitat, terutama di daerah tropis dan subtropis. Hymenoptera termasuk contoh serangga sosial yang terkenal, seperti lebah madu dan semut; serangga ini telah mengembangkan sistem sosial yang teratur di mana anggotanya dibagi menjadi kasta pekerja, tentara, pejantan, dan ratu. Hymenoptera sosial semacam itu dapat hidup bersama dalam sarang yang dihuni oleh ribuan individu, dimana semuanya diturunkan dari satu ratu. Namun, tidak semua hymenoptera bersifat sosial; banyak juga yang hidup menyendiri, berkumpul hanya untuk kawin dalam waktu singkat.

Secara kolektif, Hymenoptera paling penting bagi manusia sebagai penyerbuk tanaman berbunga liar dan budidaya, sebagai parasit (serangga perusak), *seed dispersal* dan sebagai pembuat madu. Hymenoptera termasuk penyerbuk penting bagi tanaman berbunga. Bunga yang diserbuki oleh lebah biasanya berwarna kuning atau biru dan seringkali memiliki pola yang hanya terlihat di bawah sinar ultraviolet, yang dapat dilihat oleh lebah. Banyak bunga yang diserbuki oleh lebah bersifat simetris bilateral dan menghasilkan nektar yang melimpah, seperti anggrek, beberapa spesies bergantung pada satu spesies lebah untuk penyerbukan. Tumbuhan lain mungkin diserbuki oleh semut, atau bergantung pada semut yang hidup di dalamnya untuk mengusir pemangsa. Banyak dari tanaman ini menghasilkan nektar dalam jumlah besar, atau menghasilkan cairan lain untuk semut. Selain itu, kelompok semut juga bertindak sebagai penyebar biji, dimana biji yang disimpan di sarang akan tumbuh dengan subur dan hal tersebut berpeluang untuk meningkatkan keanekaragaman tanaman berbiji. Kelompok tawon parasitoid bertelur di inang hidup dan menetas menjadi larva yang memakan jaringan inang tersebut. Perlakuan seperti itu biasanya membunuh inangnya; parasitoid menarik minat sebagai kontrol alami pada hama serangga. Tawon lain menjadi parasit pada telur atau larva serangga lain terutama kelompok serangga hemipteran. Berikut variasi taksa ordo Hymenoptera (Gambar 18).



Gambar 18. Variasi Taksa Hymenoptera

Hymenoptera sebagian besar adalah serangga berukuran kecil hingga sedang, umumnya dengan empat sayap berselaput dan pinggang sempit yang menonjolkan perut dari toraks, atau bagian tengah tubuh. Bagian mulut dapat berupa tipe penggigit atau tipe penggigit-penghisap. Dalam bentuk evolusioner yang lebih tinggi—lebah, misalnya—bagian mulut dimodifikasi menjadi alat penghisap, meskipun banyak juga yang mempertahankan rahang penggigit. Ovipositor, atau organ bertelur pada betina, seringkali sangat panjang dan dapat dimodifikasi untuk ditusuk, digergaji, atau disengat. Metamorfosis selesai; yaitu, serangga berkembang melalui empat tahap berbeda: telur, larva, pupa, dan dewasa. Jenis kelamin biasanya ditentukan oleh apakah sel telur dibuahi atau tidak.

Hymenoptera menampilkan serangkaian karakteristik perilaku yang menarik, terutama pada spesies sosial. Gerakan lebah madu yang seperti menari mengkomunikasikan informasi dari satu pihak ke lain tentang lokasi, jarak, jumlah, dan kualitas sumber makanan tertentu. Gerakan-gerakan ini dipelajari dan dijelaskan dengan cermat oleh ahli entomologi Jerman Karl von Frisch. Trophallaxis, atau pertukaran makanan yang saling menguntungkan antara larva dan lebah dewasa pada semut, dan tawon juga telah menjadi perhatian khusus bagi ahli hymenopteri.

Semut tertentu memiliki hubungan yang luar biasa dengan serangga seperti kutu daun dan sisik yang menghasilkan embun madu atau cairan manis lainnya. Semut yang mendapatkan cairan manis dari ulat dari spesies kupu-kupu tertentu (*Lycaenidae*) membalasnya dengan membiarkan ulat melahap larva semut. Semut madu (*Myrmecocystus* di Amerika Serikat, *Plagiolepis* di Afrika) di sarangnya memiliki divisi semut pekerja yang dikenal sebagai repletes, yang diberi makan sekresi gula. Sebagai konsekuensi dari asupan makanan yang tinggi, perut perut membengkak menjadi gumpalan dengan diameter hingga 1 cm (Britannica, 2022).

b. Coleoptera

Coleoptera juga merupakan ordo terbesar di kelas Insecta dengan lebih dari 250.000 spesies yang telah dideskripsikan. Jelas, dengan banyaknya spesies ini, terdapat keragaman yang luas dalam ordo ini sehubungan dengan ukuran, karakter morfologis, biologi, dan perilaku. Namun, ordo ini biasanya dicirikan oleh sepasang elytra (sayap depan yang mengeras) dan sepasang sayap belakang yang berselaput.

Coleoptera memiliki bagian mulut pengunyah yang mungkin sedikit dimodifikasi untuk berbagai fungsi dan mengalami metamorfosis sempurna. Kumbang ada di hampir setiap jenis habitat, dari padang pasir hingga sistem perairan, dan memakan berbagai bahan tumbuhan dan hewan.

Kelompok coleoptera dengan tanah sebagai habitat utama merupakan agen pengendali hayati yang penting dalam agroekosistem. Kelompok ini biasanya didominasi oleh Carabidae. Dengan mata besar, kaki kuat berduri, dan rahang besar, kumbang carabid adalah predator yang tangguh di dunia serangga. Mereka hidup di permukaan tanah di mana kelompok ini menangkap dan mengkonsumsi berbagai macam serangga yang tinggal di tanah, termasuk ulat, wireworm, belatung, semut, kutu daun dan siput. Beberapa kumbang tanah juga akan memakan biji gulma yang mengganggu dan dianggap sebagai salah satu dari cikal bakal tumbuhnya gulma yang membantu mengatur populasi pertumbuhan gulma. Melestarikan kumbang tanah melalui manipulasi habitat dan praktik budaya dapat meningkatkan regulasi alami populasi hama dan gulma artropoda dan mengurangi kebutuhan akan kontrol kimiawi.

Kumbang Carabid adalah kelompok serangga yang sangat beragam dengan lebih dari 40.000 spesies di seluruh dunia, 2.000 di antaranya menghuni Amerika Utara. Ukuran kumbang tanah dewasa berkisar dari 2mm hingga lebih dari 35mm (sekitar 1/8 inci hingga 1 ¼ inci). Banyak spesies nokturnal berwarna hitam pekat atau cokelat; ini adalah orang-orang yang bergegas mencari perlindungan ketika Anda membalikkan gumpalan tanah, batu, atau batang kayu. Kumbang tanah dapat dibedakan dari kumbang gelap, yang juga berwarna gelap dan berada di permukaan tanah, dari seberapa cepat mereka bergerak. Spesies diurnal (siang hari) cenderung berwarna-warni dan berwarna cerah atau berpola. Kumbang carabid biasanya memiliki kaki yang panjang, yang memungkinkan mereka bergerak cepat untuk menangkap mangsa dan menghindari pemangsa lainnya. Kumbang carabid hidup di hampir setiap habitat yang tersedia, meskipun beberapa spesies berasosiasi dengan ekosistem tertentu, seperti padang rumput, hutan, atau ladang tanaman (Britannica, 2022). Karena kekhususan habitat beberapa spesies, kumbang ini dapat digunakan sebagai indikator biologis untuk menilai perubahan penggunaan lahan di antara ekosistem yang berbeda. Berikut Variasi Jenis Coleoptera yang hidup di permukaan tanah (Gambar 19).



Gambar 19. Variasi Jenis Coleoptera yang hidup di permukaan tanah

Kumbang carabid menggunakan berbagai strategi ekologis, namun secara umum dapat dibuat untuk mewakili sebagian besar spesies. Kumbang karabid menunjukkan metamorfosis sempurna. Dimana pertumbuhan serangga melewati empat tahap pertumbuhan yang terpisah: telur, larva, pupa, dan dewasa. Rata-rata, kumbang carabid menghasilkan satu generasi per tahun. Setelah menemukan lokasi yang cocok, betina akan menyimpan sendiri antara 30 dan 600 telur oval di dalam tanah atau di lapisan sisa tanaman di permukaan tanah. Tempat telur yang dilindungi sangat penting karena larva muda memiliki mobilitas terbatas untuk mencari makan dan tubuhnya yang relatif lunak rentan terhadap predator.

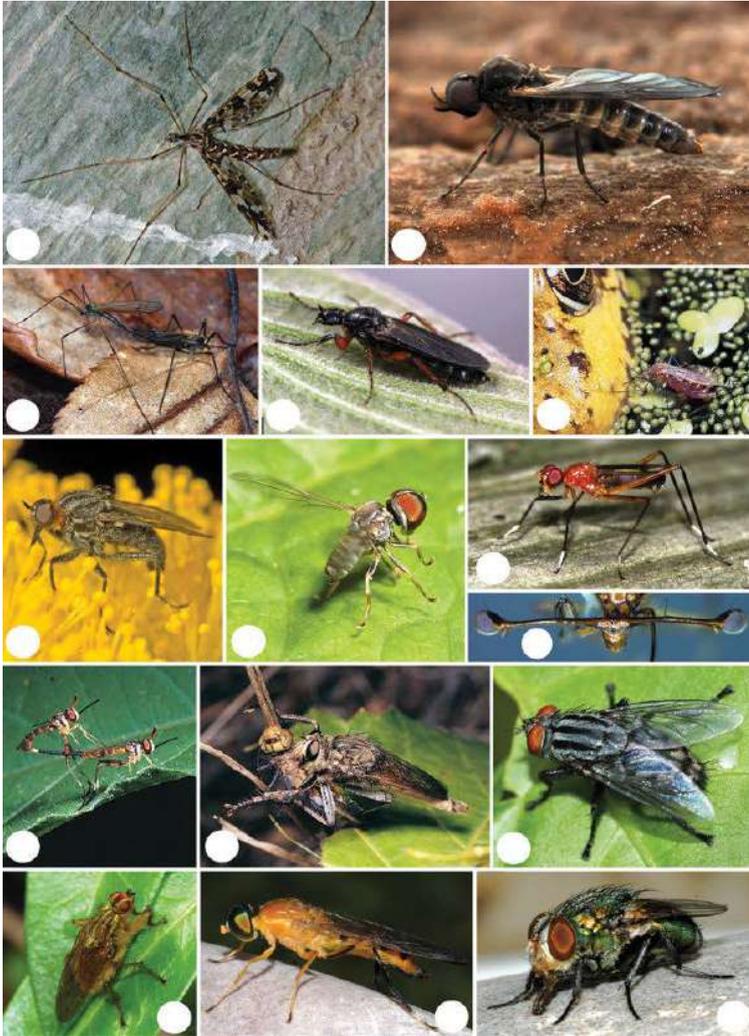
Kumbang carabid dianggap sebagai pengumpulan oportunistik yang mengonsumsi berbagai makanan; namun, sebagian besar spesies telah diamati sebagai pemangsa utama, memakan serangga lain dan organisme terkait. Sebagian besar spesies menemukan makanan dengan pencarian acak, meskipun beberapa spesies yang aktif di siang hari (diurnal) berburu dengan menggunakan pengelihatannya. Beberapa spesies juga telah diamati untuk mendeteksi isyarat kimia dari springtail, moluska, dan kutu daun. Keanekaragaman jenis makanan yang lebih besar pada betina dikaitkan dengan ukuran telur

dan jumlah telur yang lebih besar (Lovei dan Sunderland 1996). Larva dan dewasa biasanya memiliki kebiasaan makan yang serupa; namun, makanan larva lebih dibatasi karena jangkauan pencarian yang terbatas di bawah tanah. Makanan alami kumbang carabid masih belum ditentukan secara luas. Studi laboratorium telah menunjukkan bahwa kumbang karabid akan memakan hampir semua yang ditawarkan, namun mereka biasanya menunjukkan preferensi makanan dan tidak jelas apakah kebiasaan makan ini khas atau tidak. Preferensi mangsa dapat berubah sepanjang siklus hidupnya berdasarkan kebutuhan nutrisi atau perubahan sumber daya atau lingkungan.

Beberapa spesies kumbang tanah bersifat fitofag (memakan tumbuhan). Yang menarik adalah “predasi benih”, di mana benih tanaman tidak hanya dikonsumsi oleh kumbang tanah, tetapi juga dihancurkan dalam prosesnya (berlawanan dengan hanya menelan benih). Telah dikemukakan bahwa pemakan tanaman (herbivora) dan pemangsaan benih gulma (*granivory*) sebagian besar diremehkan pada kumbang tanah (Tooley dan Brust 2002).

Diptera

Diptera, yang biasa disebut lalat, adalah kelompok serangga yang sudah tidak asing lagi yang sering kita dengar termasuk, di antaranya nyamuk, lalat kuda, lalat hitam, lalat buah, dan lalat rumah serta banyak jenis spesies lalat lainnya. Diptera adalah salah satu ordo serangga yang paling beragam dengan jumlah spesies di dunia saat ini mendekati 160.000 spesies yang masih ada (Pape et al. 2011). Diptera tidak hanya beragam dalam kekayaan spesies, tetapi juga dalam struktur morfologinya, eksploitasi habitat, kebiasaan hidup, dan interaksinya dengan manusia (Marshall, 2017). Diptera telah berhasil mengkolonisasi semua benua, termasuk Antartika, dan hampir setiap habitat kecuali laut terbuka dan di dalam gletser. Variasi ordo Diptera ditampilkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Variasi jenis Diptera pada kawasan hutan hujan tropis (Sumber: Courtney et al., 2017)

Diptera masuk ke dalam kelompok fauna (serangga) tanah, disebabkan daur hidup larva diptera sebagian besar terdapat di dalam tanah. selain itu, beberapa kelompok Diptera dewasa juga sering ditemukan pada permukaan tanah. Larva Diptera penghuni tanah merupakan bagian penting dari edaphon dalam berbagai ekosistem dari hutan hingga agroekosistem. Kelimpahan mereka di tanah

bervariasi dari beberapa ratus hingga beberapa ribu individu per meter persegi. Kelompok ini mengambil bagian dalam banyak proses biologis penting dalam tanah seperti dekomposisi serasah tanaman dan siklus hara. Diptera penghuni tanah meliputi kelompok dan spesies yang bervariasi dalam ukuran serta kebutuhan makanan dan ekologi.

Terkait hubungannya dengan tanah, hanya sedikit Diptera yang tinggal di tanah selama masa hidupnya. Ini termasuk beberapa Sciaridae dan Cecidomyiidae yang tidak bersayap, yang menunjukkan adaptasi morfologi yang jelas untuk hidup di dalam pori-pori tanah bahkan saat dewasa. Kelompok Diptera yang lebih besar menghabiskan semua tahap perkembangannya yang belum dewasa di dalam tanah, sedangkan yang dewasa muncul dari tanah. Akhirnya, ada Diptera yang berkembang biak di substrat tertentu seperti jaringan tanaman, mobil, feses, dan menjadi larva hingga kepompong di tanah. Ada beberapa alasan mengapa Diptera penghuni tanah cocok sebagai bioindikator. Larva Diptera membentuk bagian penting dari edaphon di berbagai ekosistem.

Diptera penghuni tanah merupakan kelompok yang sangat beragam yang mencakup hewan-hewan dengan berbagai ukuran dan bentuk. Pada berbagai tingkatan dalam jaring-jaring makanan (misalnya saprofit, spesies *algae* atau jamur dan pemangsa). Beberapa spesies Diptera penghuni tanah memainkan peran penting dalam dekomposisi bahan organik mati dan pelepasan hara. Siklus hidup Diptera yang tinggal di tanah menggabungkan larva yang bergerak lambat dan spesies dewasa yang sangat mobile yang jelas-jelas merespon secara berbeda terhadap perubahan lingkungan. Larva tinggal dalam kondisi yang mirip dengan larva penghuni tanah lainnya. Pada kondisi dewasa, Diptera dapat mengkolonisasi habitat baru dengan cepat yang berlawanan dengan hewan tanah lainnya yang bermigrasi sangat lambat. Salah satu kelemahan penggunaan Diptera penghuni tanah sebagai bioindikator adalah kesulitan dalam penentuannya (terutama untuk tahap larva).

Orthoptera

Keberadaan Orthoptera melimpah di daerah tropis di seluruh dunia baik dalam jumlah spesies maupun individu, dan umum dijumpai pada bulan-bulan musim panas di daerah beriklim sedang, ketika ukurannya yang relatif besar dan suaranya yang berkicau

menarik perhatian yang cukup besar. Sebagian besar dari 24.000 spesies orthopterans adalah pemakan tumbuhan, dengan bagian mulut yang disesuaikan untuk mengunyah. Belalang, yang dikenal sebagai hama sejak zaman terdahulu, sangat merusak hasil pertanian. Sebagian besar spesies Orthoptera adalah serangga berukuran besar atau sedang. Panjang tubuh kurang dari 0,4 in (10 mm) jarang terjadi, sementara banyak yang panjangnya lebih dari 2 in (50 mm), dengan beberapa memiliki tubuh lebih dari 3,9 in (100 mm) panjang dan lebar sayap 7,9 in (200 mm) atau lebih. Orthoptera terkecil adalah jangkrik antasociated (*Myrmecophilus*), yang panjang tubuhnya jarang melebihi 0,08 in (2 mm); yang terbesar adalah katydid dari genera *Phyllophora* dan *Macrolyristes*. Kelompok Orthoptera yang terberat dari semua Orthoptera (dan juga serangga hidup terberat) adalah weta raksasa Selandia Baru (*Deinacrida heteracantha*), dengan berat badan yang tercatat 0,16 lb (71 g) Britannica, 2022.

Orthopteran adalah serangga hemimetabolous, dengan larva yang menyerupai bentuk dewasa dalam penampilan umum mereka tetapi tidak memiliki sayap dan organ reproduksi yang berkembang sepenuhnya. Bentuk tubuh secara keseluruhan bervariasi secara dramatis tergantung pada gaya hidup spesies. Kelompok ini sering dikenal dengan penghuni rumput, seperti yang berasal dari genus *Lepacritis*, umumnya cenderung memiliki bentuk tubuh yang ramping, seperti tongkat atau bladell, sementara spesies arboreal, seperti *Steirodon careovirgulatum*, seringkali berbentuk daun. Beberapa kelompok belalang gurun adalah peniru sempurna dari kerikil dan lumut, dan peniruan lumut adalah hal yang umum di antara spesies yang mendiami hutan awan tropis dataran tinggi, seperti *Championica montana*. Berikut variasi bentuk morfologi ordo Orthoptera (Gambar 21)



Gambar 21. Variasi Jenis Orthoptera kawasan hutan hujan tropis

Bagian mulut orthopteran adalah tipe mengunyah/menggigit. Kepala bersifat hypognathous (mouthparts mengarah ke bawah), jarang prognathous (mouthparts mengarah ke depan); antena biasanya panjang, seperti benang. Pronotum, bagian tubuh tepat di belakang kepala, biasanya besar, sering kali seperti perisai, dan dalam kasus yang ekstrim menutupi sebagian besar (seperti pada banyak katydid) atau seluruh tubuh serangga (seperti pada belalang kecil). Kaki depan dan tengah adalah cursorial, atau diadaptasi untuk berjalan, namun dalam beberapa kasus sepasang kaki depan dapat dimodifikasi untuk menggali (seperti pada jangkrik mol, jangkrik mol kerdil, sandgropers) atau kedua pasangan depan dan tengah dapat dimodifikasi untuk menggenggam (seperti pada katydid predator). Pada beberapa orthopteran (kebanyakan katydid dan jangkrik) kaki depan memiliki organ pendengaran tibialis (telinga). Kaki belakang dari kebanyakan orthopterans adalah saltatorial, atau dimodifikasi untuk melompat, dengan femora yang besar dan berotot dan tibiae yang panjang dan ramping. Beberapa belalang dapat melakukan lompatan berulang-ulang sejauh 8,5 kaki (2,6 m) tanpa tanda-tanda kelelahan yang jelas. Hal ini dimungkinkan terutama karena adanya protein resilin di kaki

belakang mereka. Resilin memiliki sifat elastis yang luar biasa, dengan efisiensi 97% dalam mengembalikan energi yang tersimpan. Hal ini memungkinkan pelepasan energi secara eksplosif yang melontarkan serangga, suatu tugas yang mustahil dilakukan dengan kekuatan otot saja. Kelompok orthopteran tertentu, terutama yang menjalani kehidupan di bawah tanah, kehilangan kemampuan mereka untuk melompat, dan kaki belakang mereka menyerupai kaki kursorial yang khas.

Mantid, predator pada serangga lain, telah beradaptasi menyerupai bunga, batang pohon, atau batang rumput tempat mereka menunggu mangsanya. Jangkrik, katydid, dan belalang dikenal karena lagu-lagu yang mereka hasilkan dengan menggunakan mekanisme stridulatori, dan penelitian yang berkaitan dengan produksi lagu merupakan bidang yang aktif. Biologi belalang atau belalang yang bermigrasi melibatkan hormon yang mendorong transformasi belalang yang tidak bermigrasi, soliter, dan bertanduk pendek menjadi gerombolan belalang yang mampu menyebabkan kehancuran besar. Transformasi ini telah dipelajari dalam upaya untuk mengendalikan hama ini (Britannica, 2022).

ARANEAE

Laba-laba (Araneae) salah satu dari lebih dari 46.700 spesies araknida yang berbeda dari serangga karena memiliki delapan kaki, bukan enam kaki, dan memiliki tubuh yang terbagi menjadi dua bagian, bukan tiga. Penggunaan sutra sangat berkembang di antara laba-laba. Sutra memiliki banyak fungsi lain, seperti transfer sperma, membungkus telur, dan membangun sarang atau liang. Laba-laba yang menggunakan sutranya untuk jaring seringkali menghasilkan pola yang rumit. Walaupun demikian, rumit ataupun tidak fungsi utama jaring juga untuk menangkap mangsa. Berikut variasi bentuk morfologi ordo Araneae (Gambar 22)



Gambar 22. Variasi bentuk ordo Araneae

Panjang tubuh laba-laba berkisar dari 0,5 hingga sekitar 90 mm (0,02–3,5 inci). Laba-laba terbesar adalah mygalomorphs berbulu, biasanya disebut sebagai tarantula, yang ditemukan di iklim hangat dan paling melimpah di Amerika. Beberapa mygalomorph terbesar termasuk laba-laba pemakan burung goliat (*Theraphosa leblondi* atau *T. blondi*), ditemukan di beberapa bagian Amazon, dan goliat kaki merah muda (*T. apophysis*), terbatas pada Venezuela selatan. Laba-laba terkecil milik beberapa keluarga yang ditemukan di daerah tropis, dan informasi tentang mereka pertama kali diketahui pada 1980-an.

Laba-laba ditemukan di semua benua (kecuali Antartika, meskipun fragmen laba-laba telah dilaporkan di sana) dan pada ketinggian setinggi 5.000 meter (16.400 kaki) di Himalaya. Lebih banyak spesies terjadi di daerah tropis daripada di daerah beriklim sedang. Meskipun sebagian besar laba-laba terestrial, satu spesies Eurasia hidup di air dan hidup di air tawar yang bergerak lambat. Ada beberapa spesies yang hidup di sepanjang pantai atau di permukaan air tawar atau air asin (Britannica, 2022).

Laba-laba kecil dan anak dari banyak spesies yang lebih besar mengeluarkan untaian sutra panjang yang menangkap angin dan dapat membawa laba-laba dalam jarak yang sangat jauh. Perilaku ini, yang disebut ballooning, terjadi di banyak keluarga dan mempercepat distribusi. Beberapa spesies didistribusikan dengan cara ini di seluruh dunia dalam batas aliran jet utara. Laba-laba balon melayang di udara pada ketinggian mulai dari 3 meter (10 kaki) atau kurang hingga lebih

dari 800 meter (2.600 kaki).

Semua laba-laba adalah predator, memakan hampir seluruhnya pada arthropoda lain, terutama serangga. Karena kelimpahannya, mereka adalah predator serangga yang paling penting. Beberapa laba-laba adalah pemburu aktif yang mengejar dan mengalahkan mangsanya. Laba-laba ini biasanya memiliki indera peraba atau penglihatan yang berkembang dengan baik. Laba-laba lain malah menenun jerat sutra, atau jaring, untuk menangkap mangsa. Jaring dibuat secara naluriah dan secara efektif menjebak serangga terbang. Banyak laba-laba yang menyuntikkan racun ke dalam mangsanya untuk membunuhnya dengan cepat, sedangkan yang lainnya menggunakan pembungkus sutra untuk melumpuhkan korbannya. Pada beberapa perkebunan dan sawah di China, laba-laba telah digunakan untuk mengendalikan serangga hama. Sejumlah besar laba-laba juga diamati memakan serangga di sawah Amerika Selatan dan di ladang berbagai tanaman Amerika Utara. Strategi pengelolaan hama modern menekankan penggunaan insektisida yang paling sedikit merusak predator alami hama serangga.

Meskipun banyak laba-laba menghasilkan racun untuk menangkap mangsa, hanya sedikit spesies yang beracun bagi manusia. Racun janda hitam (genus *Latrodectus*) bertindak sebagai racun saraf yang menyakitkan. Gigitan pertapa coklat dan lainnya dari genus *Loxosceles* dapat menyebabkan kematian jaringan lokal. Laba-laba berbisa lainnya termasuk laba-laba jaring corong seperti tarantula (genus *Atrax*) dari tenggara Australia dan beberapa anggota Afrika (laba-laba babon) dari keluarga Theraphosidae dari Afrika dan Amerika Selatan. Di Amerika Utara *Cheiracanthium mildei*, laba-laba kecil pucat yang diperkenalkan dari Mediterania, dan penduduk asli *Cheiracanthium inclusum* dapat memasuki rumah pada akhir musim gugur dan bertanggung jawab atas beberapa gigitan. Kadang-kadang terjadi kematian jaringan di lokasi gigitan. Beberapa tarantula Amerika membuang bulu perut sebagai pertahanan terhadap predator. Rambut memiliki duri kecil yang menembus kulit dan selaput lendir dan menyebabkan gatal sementara dan reaksi alergi (Hahn, 2015).

Spesies tertentu dari penenun bola (*Araneidae*), tarantula (*Theraphosidae*), dan laba-laba pemburu (*Sparassidae*) dan anggota famili *Nephilidae* diduga merupakan predator kelelawar, terutama spesies kelelawar vesper (famili *Vespertilionidae*) dan kelelawar berekor sarung (famili *Emballonuridae*). Burung juga diketahui terperangkap dalam jaring laba-laba, dan dalam beberapa kasus laba-

laba terlihat memakan burung. Laporan-laporan ini telah mengarahkan para ilmuwan untuk mengusulkan bahwa vertebrata terbang mungkin merupakan sumber mangsa penting bagi spesies laba-laba tertentu (Britannica, 2022).

5.3 Kemerataan dan Dominansi Fauna Tanah

Pada ekosistem terestrial, penjelasan dampak aktivitas manusia terhadap keanekaragaman hayati sebagian besar didominasi oleh studi dari komunitas di atas permukaan tanah pada kawasan hutan hujan tropis. Keanekaragaman hayati seharusnya tidak hanya mempertimbangkan jumlah spesies tetapi juga bagaimana kelompok spesies tersebut tersebar di dalam suatu kawasan dan bagaimana tingkat kemerataan penyebaran masing-masing spesies tersebut. Kemerataan fauna tanah juga dikenal dengan istilah lain sebagai Nilai indeks kemerataan yang digunakan untuk mengukur derajat kemerataan pada kelimpahan individu spesies dalam komunitas. Kemerataan menggambarkan keseimbangan antara satu komunitas dengan komunitas lainnya. Menurut Magurran (1988) nilai kemerataan yang mendekati satu menunjukkan bahwa suatu komunitas semakin merata penyebarannya, sedangkan jika nilai mendekati nol maka semakin tidak rata. Dengan adanya perhitungan indeks kemerataan fauna tanah pada suatu kawasan, mendukung informasi fluktuasi kelimpahan spesies/individu suatu kawasan terhadap dominansi yang dilakukan spesies/individu tersebut.

Seperti yang telah kita ketahui bersama, selain indeks keanekaragaman fauna tanah, kajian fauna tanah penting lainnya adalah kemerataan fauna tanah, dimana pada Tabel 7 juga menunjukkan tingkat kemerataan fauna tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Pada tabel tersebut, parameter tingkat kemerataan fauna tanah berbanding terbalik dengan dominansi fauna tanah dalam suatu kawasan. Tipe lahan hutan memiliki nilai kemerataan yang lebih tinggi hampir disetiap bulannya dibandingkan dengan tipe lahan lainnya. Berdasarkan Tabel 7, indeks kemerataan fauna tanah tipe lahan hutan menunjukkan nilai 0.509-0.584 yang berarti tingkat kemerataan fauna tanah lahan tersebut adalah sedang. Tipe lahan terbuka memiliki nilai indeks kemerataan 0.464-0.544, yang berarti tingkat kemerataannya juga sedang. Tipe lahan kebun campuran memiliki nilai indeks kemerataan 0.481-0.561 dan tipe lahan monokultur dengan nilai indeks kemerataan 0.445-0.556 yang

berarti tingkat pemerataan fauna tanah kawasan perkebunan tersebut juga sedang. Maguran (1998) menyatakan bahwa nilai pemerataan $0.4 < \text{nilai pemerataan} < 0.6$ menunjukkan bahwa pemerataan fauna tanah pada kawasan tersebut adalah sedang. Tingkat pemerataan fauna tanah suatu kawasan ditentukan dari jumlah individu ataupun spesies yang sama. Pemerataan fauna tanah akan mencapai nilai maksimum jika semua individu yang ditentukan bersifat homogen. Homogenitas individu suatu kawasan umumnya ditentukan oleh homogenitas lingkungannya. Berikut formula yang digunakan untuk menghitung indeks pemerataan fauna tanah. Pemerataan, Indeks pemerataan spesies dapat dihitung dengan menggunakan rumus Pielou sebagai berikut.

$$e = \frac{H'}{H \text{ maks}}$$

Keterangan:

e	=	indeks pemerataan
H'	=	indeks keanekaragaman
H max	=	indeks keanekaragaman maksimum (ln S)
S	=	jumlah spesies

Kriteria nilai indeks pemerataan :

- E < 0,5 Artinya, pemerataan antara spesies rendah, artinya kekayaan individu yang dimiliki masing-masing spesies sangat jauh berbeda.
- E > 0,5 Artinya pemerataan antarspesies relatif merata atau jumlah individu masing-masing spesies relatif sama.

Berdasarkan hasil perhitungan indeks pemerataan (*Evenness*) dapat diketahui dari lokasi penelitian antara pertanian semi organik dan pertanian non organik memiliki nilai pemerataan yang berbeda. Berdasarkan nilai indeks pemerataan pada pertanian semi organik didapatkan nilai pemerataan sebesar 0.6201, sedangkan pada pertanian non organik nilai pemerataan sebesar 0,5789. Tingginya indeks pemerataan dapat mengindikasikan kelimpahan dari suatu jenis yang sama atau merata, sementara indeks keanekaragaman yang rendah menunjukkan kecenderungan terdapat dominasi dari jenis tertentu di suatu habitat, dengan kata lain indeks pemerataan pada

suatu habitat dapat menjadi indikator apakah terdapat dominasi dari suatu jenis fauna tanah pada habitat tertentu. Apabila jumlah populasi suatu jenis fauna tanah tidak mendominasi populasi jenis yang lain maka nilai pemerataan akan cenderung tinggi (Khasanah, 2011).

Selain pemerataan ada istilah lain yang mendukung keanekaragaman fauna tanah pada suatu tipe lahan yaitu dominansi. Nilai dominansi menunjukkan antagonis terhadap nilai pemerataan fauna tanah, dimana pada saat pemerataan tinggi, maka dominansi akan rendah dan sebaliknya. Dominansi menunjukkan jumlah individu terbanyak dari suatu spesies yang menempati suatu tipe lahan. Nilai dominansi fauna tanah berbanding terbalik dengan nilai pemerataan. Pemerataan akan turun jika nilai dominansi meningkat dan sebaliknya. Nilai dominansi fauna tanah tertinggi dari semua tipe lahan terdapat pada tipe lahan kebun campuran yaitu 0.168 pada bulan pertama pengamatan (Tabel 7). Kelompok Hymenoptera terutama dari famili Formicidae menunjukkan jumlah yang dominan dibandingkan jumlah jenis fauna tanah lainnya. Semut merupakan sebutan umum untuk famili Formicidae dan sebagian besar dari kelompok Hymenoptera. Semut merupakan kelompok fauna tanah yang dapat ditemukan di semua tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Semut memiliki kehidupan sosial dengan tingkatan kasta yang kuat sehingga dapat bertahan hidup di setiap kawasan hutan hujan tropik. Menurut Hilwan dan Eko (2013) semut bersimbiosis dengan berbagai serangga, tumbuhan, dan fungi. Simbiosis ini saling menguntungkan. Tanpa bersimbiosis dengan semut, organisme-organisme tersebut akan menurun populasinya hingga dapat menyebabkan kepunahan. Dominansi spesies hewan tanah dihitung dengan menggunakan rumus Shimphson sebagai berikut (Fachrul, 2012):

$$D = \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

Keterangan:

D = dominansi spesies

n_i = jumlah individu spesies ke-i

N = jumlah total individu

Kriteria nilai indeks dominansi :

$D < 0,5$ Artinya tidak terdapat spesies yang mendominasi spesies lainnya atau struktur komunitas dalam keadaan stabil.

$D > 0,5$ Artinya terdapat spesies yang mendominasi spesies lainnya

atau struktur komunitas labil, karena terjadi tekanan ekologis atau stress

Fauna tanah yang menunjukkan nilai dominansi yang tinggi pada suatu tipe lahan dapat diartikan sebagai fauna tanah yang mampu beradaptasi secara baik pada tipe lahan tersebut. ketersediaan sumber nutrisi yang berlimpah disertai dengan faktor abiotik yang mendukung keberadaan fauna tanah tersebut untuk tumbuh dan beregenerasi membentuk populasi yang melimpah. Keseuain habitat pada fauna tanah tertentu akan berdampak baik pada kondisi kesehatan lingkungan dan jika hal tersebut berada diluar batas toleransi, kelimpahan fauna tersebut yang mendominasi suatu tipe lahan justru akan berbahaya bagi lingkungan. Hal ini jarang sekali terjadi, dan biasanya akan muncul jika terjadi perusakan atau perubahan yang signifikan terhadap suatu tipe lahan yang mengalami gangguan secara masif.

5.4 Indeks Kesamaan Fauna Tanah

Indeks kesamaan fauna tanah digunakan untuk mengetahui seberapa besar persamaan struktur komunitas fauna tanah pada suatu kawasan tertentu. Indeks kesamaan fauna tanah sering kali dikenal dengan naman indeks kesamaan Sorensen, sangat bermanfaat dan memberikan langkah mudah dalam membandingkan dua struktur komunitas fauna tanah pada masing-masing tipe lahan yang berbeda (Jacobs, 2008). Indeks kesamaan dua tipe lahan dengan indeks Sorensen mengidentifikasi banyaknya kesamaan tipe individu pada kedua lahan tersebut. Indeks kesamaan memiliki nilai berkisar antara 0 sampai dengan 1. Nilai indeks 0 terjadi jika tidak ada spesies yang sama di kedua lapangan dan nilai 1 akan diperoleh bila kedua lapangan memiliki komposisi spesies yang sama (Suin, 2012). Kesamaan, Indeks kesamaan fauna tanah dapat dihitung dengan menggunakan rumus Sorensen sebagai berikut (Suin, 2006):

$$IS = \frac{2j}{a + b} \times 100\%$$

Keterangan:

IS = Indeks similaritas Sorensen

j = Jumlah jenis fauna tanah yang ditemukan pada lokasi penelitian a dan b

a = Jumlah jenis fauna tanah yang ditemukan pada lokasi penelitian a

b = Jumlah jenis fauna tanah yang ditemukan pada lokasi penelitian b

Indeks kesamaan fauna tanah digunakan untuk mengetahui seberapa besar persamaan struktur komunitas fauna tanah pada beberapa tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang, yaitu hutan, areal terbuka, kebun campuran, dan kebun monokultur (Marsandi, et al 2020). Beberapa tipe lahan menunjukkan ciri khas fauna tanah yang mendominasi habitat masing-masing. Keberadaan fauna sebagai indikator yang menunjukkan kualitas kesehatan tanah terdistribusi pada masing-masing tipe lahan tersebut. gangguan terhadap habitat alami pada suatu tipe lahan menyebabkan berkurangnya bahkan hilangnya beberapa spesies fauna tanah. kami berasumsi bahwa hutan sebagai habitat alami fauna tanah dengan kelimpahan fauna tanah yang berlimpah layak menjadi referensi keberadaan fauna tanah pada kawasan hutan hujan tropis. Adapun nilai indeks kesamaan fauna tanah tersebut ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Indeks kesamaan fauna tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang Padang, Indonesia.

Habitat	Hutan	Areal Terbuka	Kebun Campuran	Kebun Monokultur
Hutan		47.68%	54.08%	44.87%
Areal Terbuka			60.00%	56.69%
Kebun Campuran				59.26%
Kebun Monokultur				
Rata-Rata indeks kesamaan fauna tanah kawasan hutan Pinang-Pinang = 53.76%				

(Marsandi et al., 2020)

Hasil perhitungan indeks kesamaan Sorensen pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang pada Tabel 8. menunjukkan nilai yang bervariasi antara 44.87% - 60.00% dengan nilai indeks kesamaan rata-rata yaitu 53.76%. Hal ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan terdapat perbedaan struktur dan komposisi komunitas fauna tanah tidak begitu signifikan pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Hal ini ditunjukkan dari nilai rata-rata indeks kesamaan fauna tanah yang cukup tinggi. Menurut Dewi (2001) dua komunitas atau tipe lahan dianggap sama apabila memiliki nilai indeks kesamaan Sorensen > 50%. Walaupun demikian, jika dilihat kembali dari aspek perbandingan dua tipe lahan sebagai akibat perubahan penggunaan lahan, didapatkan beberapa nilai indeks kesamaan komunitas fauna tanah yang lebih rendah. Hal tersebut menandakan adanya perbedaan struktur dan komposisi komunitas fauna tanah yang signifikan.

Nilai indeks kesamaan Sorensen fauna tanah tertinggi ditunjukkan pada tipe lahan terbuka dan kebun campuran, yaitu 60.00% (Tabel 8). Hal ini menunjukkan bahwa tipe lahan terbuka memiliki tingkat kesamaan struktur dan komunitas fauna tanah yang tinggi terhadap kebun campuran. Hal ini disebabkan karena habitat fauna tanah pada tipe lahan terbuka berbatasan langsung dengan habitat fauna tanah pada kebun campuran, sehingga fauna tanah yang terdapat pada tipe lahan terbuka banyak ditemukan pada kebun campuran. Menurut Rahayuningsih *et al.* (2012) tingginya tingkat indeks kesamaan fauna tanah pada suatu tipe lahan terhadap tipe lahan lainnya disebabkan karena antara dua tipe lahan tersebut terletak berdekatan sehingga memudahkan pergerakan fauna tanah untuk berpindah habitat. Hal tersebut berbanding lurus pada tipe lahan hutan dan kebun monokultur yang menunjukkan nilai kesamaan Sorensen terendah yaitu 44.87%. selain disebabkan karena jarak antara kedua tipe lahan yang berjauhan, juga disebabkan karena manajemen lahan kebun monokultur yang menggunakan bahan kimia secara intensif. Penggunaan bahan kimia pada suatu tipe lahan mengakibatkan berpindahnya dan hilangnya beberapa fauna tanah.

Perubahan penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang menyebabkan tingkat kesamaan vegetasi pada masing-masing tipe lahan menjadi berbeda, begitu juga dengan indeks kesamaan fauna tanah. Hutan sebagai habitat alami komunitas fauna tanah memberikan kontribusi tinggi terhadap kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah. Perubahan hutan menjadi lahan

terbuka menyebabkan indeks kesamaan fauna tanah menjadi rendah yaitu 47.68% yang menandakan bahwa banyak jenis fauna tanah yang hilang. Selain itu, pada tipe lahan terbuka yang telah ditumbuhi oleh rerumputan atau gulma pada bulan ke 4 menyebabkan ditemukannya beberapa fauna tanah yang berbeda dari habitat sebelumnya. Hal ini menjelaskan bahwa kehadiran fauna tanah pada vegetasi bawah penutup lahan antara hutan yang didominasi oleh serasah berbeda dengan tipe lahan terbuka yang didominasi oleh rerumputan atau gulma.

Hal tersebut tidak berlaku pada perubahan tipe lahan hutan menjadi kebun campuran, yang memiliki nilai indeks kesamaan fauna tanah yang lebih tinggi yaitu 54.08%. Walaupun jarak antara kedua tipe lahan tersebut dibatasi dengan tipe lahan terbuka akan tetapi variasi vegetasi tumbuhan antara kedua tipe lahan hampir sama. Tutupan kanopi pohon yang rapat disertai dengan variasi *rhizosfer* akar dan serasah yang jatuh di atas permukaan tanah menyebabkan kelimpahan sumber nutrisi fauna tanah pada kedua tipe lahan ini hampir sama. Kehadiran fauna tanah juga ditentukan oleh kelimpahan sumber nutrisi pada suatu tipe lahan. Komponen nutrisi yang sama maka akan menghadirkan komposisi fauna tanah yang juga sama. Variasi vegetasi yang beragam dalam habitat memiliki potensi ketersediaan nutrisi yang lebih baik sehingga ketersediaan nutrisi yang sama akan menentukan komposisi fauna tanah yang relatif hampir sama.

5.5 Frekuensi Kehadiran Fauna Tanah

Organisme tanah sangat penting untuk fungsi ekosistem darat (misalnya, siklus nutrisi, pembentukan tanah, aerasi tanah). Namun, peran fungsional dan pentingnya keragaman spesies fauna tanah tropis belum ditemukan dengan pasti (Wall et al. 2010). Keberadaan hymenopteran (terutama semut), collembolans, dan coleopterans (kebanyakan kumbang kulit kayu dan kumbang) di kawasan hutan hujan tropik mendapatkan perhatian lebih, mengingat kelimpahannya yang tinggi. Ketiga kelompok fauna tanah ini merupakan representatif dari fauna tanah yang bersifat heterogen dalam hal kebiasaan makan dan dapat menempati relung yang luas dalam jaring makanan hutan.

Hilangnya keanekaragaman hayati global menciptakan kebutuhan yang lebih mendesak untuk memahami peran yang dimainkan organisme dalam fungsi ekosistem dan mekanisme kontrol ekosistem

tersebut. Dekomposisi bahan organik mati adalah proses ekologi utama yang memastikan pembentukan tanah, ketersediaan nutrisi, dan penyerapan karbon. Untuk mendapatkan pemahaman tentang bagaimana keanekaragaman hayati dan ekosistem berfungsi bersama untuk mengendalikan proses dekomposisi serasah daun di hutan hujan tropis tidak lepas dari pengaruh kehadiran fauna tanah pada wilayah tersebut. mendapatkan fauna tanah dengan perangkap maupun secara langsung merepresentasikan kehadiran fauna tanah pada tipe lahan tersebut. sehingga frekuensi kehadiran fauna tanah pada suatu tipe lahan terutama lahan yang terganggu dibutuhkan untuk memastikan kondisi fauna tersebut aman dan tidak terancam.

Frekuensi kehadiran sering pula dinyatakan sebagai konstansi. Dari frekuensi kehadiran atau konstansi itu, fauna tanah dapat dikelompokkan menjadi empat golongan. Golongan aksidental (sangat jarang) bila konstansinya 0 - 25%, golongan assesori (jarang) bila konstansinya 25 - 50%, golongan konstan (sering) bila konstansinya 50 - 75%, dan golongan absolut (sangat sering) bila konstansinya lebih dari 75% (Suin, 2006). Rumus menentukan frekuensi kemunculan dapat dihitung dengan:

$$\text{Frekuensi (F) Jenis A} = \frac{\text{Jumlah Plot dimana Jenis A ditemukan}}{\text{Jumlah seluruh plot}}$$

$$\text{Frekuensi Relatif (FR) Jenis A} = \frac{\text{Frekuensi (F) Jenis A}}{\text{Jumlah Frekuensi seluruh Jenis}} \times 100\%$$

Frekuensi kehadiran fauna tanah menunjukkan bahwa suatu jenis fauna tanah sering tampak atau hadir dalam suatu habitat. Frekuensi kehadiran mengisyaratkan bahwa fauna tanah telah menemukan habitat yang tepat untuk melakukan aktivitas. Habitat tanah maupun serasah, rhizosfer dan rerumputan pada lapisan solum tanah memberikan semua fasilitas hidup bagi fauna tanah. Hasil penelitian Wibowo dan Slamet (2017) di *Holcim Educational Forest* Sukabumi Jawa barat menunjukkan bahwa pada lapisan tanah (solum tanah / 1-10 cm) kawasan tersebut, jenis yang sering ditemukan adalah Formicidae 7 (FR = 52.78%), Scarabaeidae (FR = 30.56%), dan Megascolecidae (FR = 27.78%). Kehadiran kelompok makrofauna tanah tersebut cenderung berada diatas permukaan tanah. Fauna tanah yang berada diatas permukaan tanah dan terlindungi oleh vegetasi

yang rapat serta serasah yang berlimpah khususnya kelompk insekta tanah, cenderung tidak menyukai cahaya matahari langsung, sehingga lapisan tanah dengan faktor abiotik yang mendukung memberikan kondisi lingkungan yang nyaman bagi fauna tanah terutama kelompok makrofauna agar terhindar dari sinar matahari langsung.

Selanjutnya data frekuensi kehadiran fauna tanah yang paling sering ditemukan pada lapisan serasah adalah Formicidae 7 (FR = 41.67%). Formicidae dapat hidup pada setiap habitat dan memiliki mobilitas dan struktur sosial yang kuat. Lapisan serasah adalah tempat yang paling banyak menyediakan makanan bagi makrofauna tanah. Dari hasil pengamatan, famili Formicidae (semut) adalah famili yang sering ditemukan pada lapisan serasah. Dari pengamatan yang dilakukan, semut merupakan jenis yang lebih tahan terhadap paparan sinar matahari langsung dibanding makrofauna tanah lainnya, sehingga banyak ditemukan pada lapisan serasah yang terkena sinar matahari langsung (Wibowo dan Slamet., 2017).

5.6 Kepadatan Fauna Tanah

Kepadatan fauna tanah menunjukkan kerapatan fauna tanah pada suatu tipe lahan. dimana keberadaan populasi fauna tanah memiliki jumlah yang lebih tinggi pada tingkat kerapatan fauna di permukaan tanah. Kepadatan yang dimaksud disini adalah kepadatan populasi. Kepadatan populasi merupakan jumlah individu suatu jenis dalam satuan. Luas tertentu atau jumlah individu per unit area. Pengkajian mengenai suatu populasi, Odum (1996) mengemukakan bahwa hal penting yang harus diperhatikan yaitu kerapatan atau kepadatan populasi yang dapat dijadikan sebagai ciri populasi tersebut. Selanjutnya disebutkan, pengaruh populasi terhadap komunitas maupun ekosistem tidak hanya tergantung kepada spesies organisme apa yang terlibat, tetapi tergantung juga kepada jumlah individu masing- masing spesies atau tergantung kepada kerapatan populasinya. Adapun perhitungan untuk menentukan kepadatan fauna tanah dapat dilihat pada rumus berikut:

$$\text{Densitas (D) Jenis A} = \frac{\text{Jumlah Individu Jenis A}}{\text{Jumlah Unit Sampling}}$$

$$\text{Densitas Relatif (DR) Jenis A} = \frac{\text{Densitas (D) Jenis A}}{\text{Jumlah Densitas Seluruh Jenis}} \times 100\%$$

Fauna tanah merupakan komponen ekosistem tanah yang bergantung pada habitatnya, karena keberadaan dan kepadatan populasi suatu jenis fauna tanah di suatu tempat atau tipe lahan sangat ditentukan oleh faktor biotik dan abiotik tempat tersebut. Kepadatan fauna tanah dan fungsi ekosistem tanah suatu tipe lahan perlu banyak dikaji lebih lanjut, karena hal tersebut menunjukkan hubungan sangat kompleks yang sangat bermanfaat bagi lingkungan. Dari pernyataan tersebut kami berasumsi bahwa kepadatan fauna tanah juga didukung oleh vegetasi, dimana semakin tinggi dan beragam vegetasi suatu tipe lahan maka kepadatan fauna tanah akan semakin tinggi. Hal tersebut didukung dari data hasil penelitian Arico dan Jayanthi (2018) di Kawasan hutan hujan tropik Taman Nasional Gunung Leuser tentang kepadatan makrofauna tanah bahwa pada kerapatan tinggi diperoleh kerapatan makrofauna tanah adalah 17,6 ind/m² , kerapatan sedang 12,96 ind/m² , dan kerapatan rendah 9,12 ind/m². Fauna tanah merupakan penghuni ekosistem tanah yang menyumbangkan energi dari lingkungan untuk stabilitas ekosistem tanah. Hal ini disebabkan karena jenis fauna tanah dapat melakukan penghancuran ataupun perombakan bahan tanaman dan fauna yang mati di atas permukaan tanah. Makrofauna tanah memiliki peran penting dalam proses daur ulang bahan dalam siklus biogeokimia melalui transformasi dan dekomposisi serasah, serangga dan dekomposisi serasah, kayu lapuk, feses dan bangkai hewan.

5.7 Nilai Penting Fauna Tanah

Fauna tanah memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan ekosistem tanah, beberapa fauna tanah diantaranya terlihat jelas bagaimana peran penting tersebut menjaga lingkungan seperti keluarga Lumbricidae (cacing tanah), Termitidae (rayap), dan Formicidae (semut) memiliki peran penting dan berpengaruh dalam mengatur fisika, kimia, dan sifat mikrobiologi tanah. Keanekaragaman dan kelimpahan organisme tersebut dianggap sebagai bioindikator yang relevan dengan kualitas kesuburan dan kesehatan tanah. Berbagai jenis fauna tanah dengan berbagai fungsi berkumpul dalam suatu habitat untuk melakukan berbagai metabolisme atau aktivitas biologi tanah. Misalkan, proses yang terjadi pada sebuah ekosistem yaitu siklus makanan atau rangkaian tingkat trofik aliran makanan (rantai makanan) yang terdiri dari tanaman, herbivora, dan predator.

Masuknya kelompok omnivora dan interaksi tidak langsung dalam jaring-jaring makanan, membuat kondisinya sangat sulit untuk membedakan dan menetapkan spesies pada tingkat trofik yang berbeda.

Ekosistem Perkebunan konvensional tidak bisa lepas dari pemeliharaan pertanian dengan menggunakan bahan kimia sebagai pupuk atau pestisida untuk membunuh hama. Kondisi ini dapat mempengaruhi tidak hanya jumlah fauna tetapi juga keseimbangan dalam siklus aliran energi maupun biogeokimia. Pestisida yang menumpuk dari tahun ke tahun bisa dibawa ke dalam jaringan organisme melalui proses pemindahan makanan melalui rantai makanan.

Fauna tanah yang terkontaminasi senyawa kimia berbahaya akan mempengaruhi kesehatan masyarakat dan jenis fauna tanah lainnya pada tingkat trofik yang lebih tinggi dalam jaring makanan. Senyawa kimia berbahaya tersebut akan terakumulasi dari satu organisme ke organisme lain melalui rantai makanan yang akan cenderung terus meningkat konsentrasinya terhadap organisme yang menempati makanan piramida atau tingkat trofik yang lebih tinggi. Selain itu, kami telah mengkonfirmasi bahwa fauna tanah memiliki peranan penting dalam bidang lingkungan pertanian, terutama dalam transformasi bahan organik dan siklus nutrisi untuk menjaga produktivitas tanah dan kesehatan tanah. Sehingga kami berasumsi bahwa, indeks nilai penting bagi fauna tanah pada suatu tipe lahan dibutuhkan untuk memastikan kesehatan tanah terjaga dengan baik.

Disini kami mencoba memasukan indeks nilai penting fauna tanah sebagai komponen penilaian kualitas kesehatan komunitas tanah dalam menjalankan ekosistem. Sama halnya pada analisa vegetasi tumbuhan, indeks nilai penting ditentukan dari frekuensi kehadiran dan kepadatan populasi pada fauna tanah pada suatu tipe lahan.

Indeks Nilai Penting (INP) Jenis A = DR + FR

Dimana : DR = Densitas Relatif

FR = Frekuensi Relatif

Indeks nilai penting fauna tanah diartikan sebagai suatu jenis lahan menunjukkan bahwa keberadaannya sangat penting di daerah tersebut, dengan kata lain indeks nilai penting menunjukkan daya

dukung kepentingan fauna tanah pada suatu tipe lahan. Hal ini menunjukkan bahwa fauna tanah memiliki nilai kepentingan pada setiap jenis lahan. Indeks Nilai Penting (INP) merupakan salah satu indeks yang dihitung berdasarkan jumlah yang didapatkan untuk menentukan tingkat dominasi jenis dalam suatu komunitas. Sugiyarto (2001) bahwa spesies yang dominan dalam suatu komunitas akan memiliki indeks kepentingan yang tinggi, sehingga spesies yang paling dominan tentunya akan memiliki indeks nilai yang paling besar. Dengan kata lain Indeks Nilai Penting (INP) digunakan untuk menganalisis dominansi (penguasaan) suatu jenis dalam komunitas tertentu. Adapun Rumus untuk menentukan indeks nilai penting adalah sebagai berikut.

5.8 Distribusi Fauna Tanah

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, Tanah menampung beragam jenis organisme termasuk fauna invertebrata yang membantu meningkatkan bahan organik tanah. Meskipun ukurannya kecil, fauna tanah memfasilitasi proses ekosistem seperti dekomposisi bahan organik dan daur ulang nutrisi. Lahan Agroekosistem, daerah industri, persawahan dan tipe lahan antropogenik lainnya juga merupakan salah satu habitat yang memiliki beberapa jenis fauna tanah untuk hidup dan tumbuh serta terlibat dalam penguraian bahan organik. Pertumbuhan dan perkembangannya sangat tergantung pada sifat fisik dan kimia tanah. Sugiyarto (2001) telah mengklasifikasikan fauna tanah berdasarkan aktivitas dominansi mereka hidup pada suatu habitat yaitu kelompok fauna tanah yang aktif di permukaan tanah, dalam tanah permukaan dan di dalam tanah. Keberadaan fauna tanah sangat bergantung pada habitat hidup spesifik mereka, hutan menjadi ekosistem yang paling mungkin menjadi tempat hidup yang sesuai. Kelimpahan dan keragaman fauna tanah yang tinggi karena tanah hutan mengandung bahan organik yang tinggi dan unsur hara baik di permukaan maupun di dalam tanah. Populasi fauna tanah tertinggi telah ditemukan di lantai hutan Kalimantan yang terdiri dari Collembola, Arachnida, Coleoptera, Hymenoptera dan kelompok lain.

Fauna tanah butuh bergerak dan berpindah untuk mendapatkan sumberdaya makanan yang dibutuhkan oleh tubuh. Begitupun terkait dengan keterancaman atau gangguan habitat yang mengharuskan fauna tanah bermigrasi dari habitatnya ke habitat baru. Hal tersebut sering kali kita sebut dengan distribusi fauna tanah. Sebaran (Distribusi)

fauna tanah terbagi menjadi 3 pola yaitu pola distribusi acak, pola distribusi mengelompok dan pola distribusi seragam. Suin (2012) telah melaporkan bahwa sebagian besar fauna tanah didistribusikan sebagai rumpun, mereka lebih suka memilih dan hidup di habitat yang cocok untuk diri mereka sendiri, keduanya sesuai berdasarkan karakteristik fisik dan kimia tanah serta ketersediaan pakan populasi dan distribusi organisme tanah baik untuk flora dan fauna tanah bervariasi tergantung juga pada karakteristik tanah, budidaya tanah, dan jenis tumbuhan yang tumbuh di atas tanah. Hanafiah et al., (2014) telah mencatat bahwa ada tiga faktor utama yang mempengaruhi populasi dan distribusi fauna tanah yaitu (1) cuaca, terutama musim hujan dan kelembaban; (2) kondisi/karakteristik tanah yaitu keasaman, kadar air tanah, suhu dan ketersediaan nutrisi; dan (3) jenis vegetasi/lahan penutup tanah yaitu hutan, semak dan rumput.

Salah satu formula yang bisa digunakan untuk menentukan pola distribusi fauna tanah adalah dengan menggunakan Indeks Morisita. Indeks distribusi morisita pada fauna tanah menggunakan komponen petak ukur dan jumlah individu suatu spesies. kedua komponen ini merupakan faktor penentu pola penyebaran fauna tanah pada suatu tipe lahan (ekosistem). Adapun rumus indeks distribusi morisita adalah sebagai berikut:

$$Id = n \frac{\sum X^2 - \sum x}{(\sum X)^2 - \sum x}$$

Keterangan:

Id = index penyebaran morisita

n = jumlah petak ukur

$\sum x$ = jumlah total individu suatu spesies pada suatu komunitas

$\sum x^2$ = jumlah kuadrat dari total individu suatu spesies pada suatu komunitas

Kriteria pola penyebaran dikelompokkan sebagai berikut:

$Id < 1$ = pola penyebaran seragam

$Id = 1$ = pola penyebaran acak

$Id > 1$ = pola penyebaran berkelompok

Dengan diketahuinya kondisi dan stabilitas komunitas fauna tanah melalui beberapa formula atau alat bantu yang digunakan seperti kelimpahan fauna tanah, keanekaragaman fauna tanah, indeks kesamaan fauna tanah, pemerataan dan dominansi fauna tanah, kepadatan fauna tanah, frekuensi kehadiran fauna tanah, indeks nilai penting fauna tanah dan distribusi fauna tanah diharapkan dapat mengkonfirmasi kondisi ekosistem dan kesehatan tanah terutama pada lahan antropogenik.

TANAH TROPIKA BASAH SEBAGAI HABITAT

Tanah merupakan habitat bagi sebagian besar komunitas hayati. Dimana tanah tersusun atas partikel mineral dan organik yang terbentuk dalam struktur tiga dimensi yang terdiri dari partikel-partikel tanah dan di antara partikel-partikel tersebut terdapat rongga-rongga yang terisi udara dan air. Komposisi ini berpotensi memunculkan kehidupan tanah untuk makhluk hidup di dalam rongga-rongga tersebut, dan bersembunyi dari predator serta dari kondisi di atas permukaan tanah yang merugikan. Selain itu, rongga tanah bagi komunitas tanah juga berperan untuk mendapatkan air, nutrisi dan oksigen, serta untuk berkembang biak. Dalam sistem terestrial, kehidupan di bawah permukaan tanah lebih berlimpah dan beragam daripada di atas permukaan tanah.

Sebagian besar tumbuhan terestrial berakar di tanah, memulai siklus hidupnya di tanah, dan memiliki bakal regenerasi (keturunan) yang dorman atau beristirahat di tanah (misalnya sebagai biji) sampai kondisinya menjadi menguntungkan untuk bertunas. Tidak hanya tanaman, banyak juga organisme lain yang memiliki tahap kehidupan di dalam tanah. Contoh-contoh khas terdiri atas tahap-tahap telur dan larva dari banyak spesies serangga yang menemukan tempat berlindung dan makanan di dalam tanah selama periode kehidupan yang rentan. Di samping organisme yang hidup sebagian di dalam tanah, tanah merupakan habitat bagi organisme yang lebih luas yang menghabiskan seluruh hidupnya di dalam atau tinggal di tanah. Organisme-organisme ini memiliki ukuran yang sangat luas, mulai dari vertebrata dan invertebrata makro-skopik (misalnya cacing tanah), hingga invertebrata mikroskopik (misalnya nematoda), dan jamur serta prokariota yang hanya berukuran beberapa mikrometer (De Deyn and Kooistra, 2021). Pekerjaan terbaru dan lebih mukhtahir sangat diperlukan untuk memperjelas identifikasi keanekaragaman hayati komunitas tanah, yang dimungkinkan oleh teknik molekuler untuk mempelajari keanekaragaman hayati tanah dan upaya bersama antara para ilmuwan, menghasilkan kumpulan data yang mulai mengungkapkan distribusi global dan potensi pendorong keanekaragaman hayati tanah.

Tanah menjadi habitat dan sumber daya untuk sebagian besar keanekaragaman hayati global: lebih dari seperempat dari semua spesies hidup di bumi adalah penghuni tanah atau serasah. Tanah dan serasah adalah rumah bagi keragaman kehidupan yang luar biasa, yang sering kali bisa menjadi urutan lebih besar dari yang ada di atas tanah atau di kanopi hutan hujan tropis. Satu meter persegi permukaan tanah kemungkinan mengandung sekitar sepuluh ribu spesies organisme tanah, sedangkan keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah beberapa kali lipat lebih rendah. Mikroorganisme seperti alga, bakteri dan jamur membentuk sebagian besar biomassa tanah. Satu sendok teh tanah mengandung beberapa ribu spesies mikroba, beberapa ratus meter hifa jamur, dan lebih dari satu juta individu. Spesies mikroba sebagian besar masih belum diketahui. Ini adalah salah satu perbedaan utama antara keanekaragaman hayati di atas dan di bawah tanah.

Tanah juga terdiri dari berbagai macam fauna tanah invertebrata, seperti cacing tanah, tungau, laba-laba, kumbang, semut, dan rayap, serta artropoda yang menghuni serasah seperti kaki seribu, lipan dan kutu kayu. Tetapi penghuni tanah yang paling terkenal mungkin adalah mamalia kecil, seperti tikus tanah yang dapat menunjukkan adaptasi fantastis untuk hidup di dunia bawah tanah yang gelap.

Ketika organisme tanah makan, tumbuh, dan bergerak, mereka melakukan layanan penting bagi ekosistem, serta bagi manusia. Di antara jasa ekosistem utama yang dimediasi oleh biota tanah adalah transfer, penyimpanan, dan penyediaan air tanah bersih, penyimpanan karbon dan pencegahan emisi gas yang penting untuk pengendalian iklim, serta penyediaan nutrisi dan regulasi hama dan patogen yang mendukung pertumbuhan tanaman dan keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah. Bahkan, biota tanah terlibat dalam penyediaan segala jasa penunjang dan pengatur aktivitas biologis utama, serta merasakan langsung laju perusakan tanah saat ini, penyegelan dan ancaman lain akibat penyalahgunaan tanah oleh manusia yang pada akhirnya mengancam keberlangsungan kehidupan manusia di muka bumi. Tanah juga merupakan ruang harta bagi keanekaragaman hayati, yang dapat menghasilkan peluang baru untuk mengembangkan obat-obatan baru. Oleh karena itu, pengelolaan tanah dan keanekaragaman hayati yang bertanggung jawab sangat penting untuk menopang kehidupan manusia. Berikut pengelompokan fauna tanah yang dapat diindividualisasikan di antara invertebrata tanah (Gambar 23).



Gambar 23. Empat pengelompokan utama yang dapat diindividualisasikan di antara invertebrata tanah, bergantung pada strategi hidupnya dan seberapa dekat mereka terkait dengan tanah (Sumber: Menta, 2012)

Sebagian besar fenomena yang diamati di dunia di atas permukaan tanah yang kasat mata dikendalikan secara langsung atau tidak langsung oleh spesies, interaksi, atau proses di dalam tanah. Secara umum semua makanan yang kita makan, udara yang kita hirup, pakaian yang kita pakai, dan bahan bangunan yang kita gunakan, secara langsung atau tidak langsung terkait dengan tanah. Inilah sebabnya mengapa keanekaragaman hayati tanah sangat penting bagi kehidupan di bumi. Biota tanah dapat mengatur struktur dan fungsi individu dan komunitas di atas permukaan tanah secara langsung, dengan merangsang atau menghambat spesies tanaman tertentu lebih dari yang lain. Sebagai alternatif, organisme tanah dapat mengatur komunitas di atas permukaan tanah secara tidak langsung dengan mengubah dinamika nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Efek tidak langsung ini cenderung melibatkan interaksi yang kurang spesifik dan terjadi dalam durasi yang lebih lama daripada peraturan langsung.

Tanah merupakan habitat yang sangat heterogen, yang tidak ditempati secara seragam oleh organisme tanah. Mikroorganisme tanah sebenarnya hanya mewakili 0,1% massa tanah, dan menempati kurang dari 5% dari total volume tanah. Tanah terdiri dari mozaik mineral anorganik yang dihasilkan dari pelapukan batuan, dan bahan organik yang sebagian merupakan produk tanaman dan organisme lain yang terdekomposisi. Mikroorganisme tanah hidup di dalam pori-pori yang tertinggal di antara partikel tanah, bebas atau menempel pada permukaan, seperti pada lapisan air yang mengelilingi partikel tanah. Tanah yang sehat menjadi habitat bagi sebagian besar biota tanah bahkan kelompok makhluk hidup di atas permukaan tanah. Berikut ilustrasi tanah sehat sebagai rumah bagi biota tanah (Gambar 24).



Gambar 24. Tanah yang sehat adalah rumah bagi berbagai tanaman, hewan, dan jamur (Sumber: <https://www.soundingsoil.ch/en/know/>)

Lebih-lebih lagi, dalam pandangan hilangnya keanekaragaman hayati global, muncul pertanyaan tentang apa risiko hilangnya keanekaragaman hayati tanah saat ini, dan bagaimana keanekaragaman

hayati tanah dapat dipulihkan, dilindungi dan dikonservasi. Mempertimbangkan sifat spesifik keanekaragaman hayati tanah dibandingkan dengan keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah, solusi yang dikenal dengan praktik konservasi dan restorasi di atas tanah mungkin tidak selalu dapat diterapkan begitu saja ke tanah. Meskipun masih banyak yang belum terungkap tentang organisme tanah, ahli ekologi tanah telah membuat kemajuan luar biasa selama beberapa tahun terakhir, sehingga peran dan fungsi organisme tanah dapat dinilai. Oleh karena itu, tujuan dari buku ini adalah untuk berbagi ilmu pengetahuan keanekaragaman hayati tanah, fungsinya, kontribusinya terhadap jasa ekosistem, dan relevansinya bagi keberlanjutan masyarakat manusia.

Sesuai dengan definisi keanekaragaman hayati yang diberikan dalam Konvensi Rio de Janeiro 1992, keanekaragaman hayati tanah dapat didefinisikan sebagai variasi dalam kehidupan tanah, dari gen hingga komunitas, dari agregat mikro hingga seluruh lanskap. Meskipun banyak spesies juga penghuni tanah paruh waktu atau hanya sementara waktu (larva serangga, kumbang, serangga pembuat gundukan, vertebrata penggali), penghuni tanah yang hidup permanen di dalam sudah mewakili keanekaragaman kehidupan yang luar biasa. Selain itu, mereka adalah komponen keanekaragaman hayati global yang kurang dikenal dan kurang diperhatikan, sehingga seringkali diabaikan.

Diharapkan dari buku ini dapat menjadi rujukan bagi pembuat kebijakan untuk mengambil keputusan yang dapat membantu mempertahankan keanekaragaman hayati dan fungsi tanah melalui habitatnya. Buku ini juga dapat digunakan sebagai referensi, bahan pembelajaran dan landasan ilmu kepastakaan bagi para akademisi dan peneliti dalam upaya untuk mengisi dan memperbaharui kesenjangan dalam pengetahuan. Untuk tujuan ini, langkah pertama adalah menggambarkan organisasi dan fungsi keanekaragaman hayati tanah. Langkah kedua adalah memahami pentingnya keanekaragaman hayati tanah bagi masyarakat manusia, dengan menunjukkan bagaimana fungsi-fungsi ini berkontribusi pada penyediaan jasa ekosistem. Ini diikuti dengan analisis ancaman saat ini dan masa depan terhadap keanekaragaman hayati tanah (proses degradasi tanah, pengelolaan lahan, perubahan iklim, invasi biologis, polusi), untuk menilai risiko yang dihadapi oleh organisme tanah dan manusia (Turbe et al., 2010).

Modifikasi dan terbentuknya habitat perekayasa ekosistem yang juga penting adalah perekayasa fisik, membangun agregat tanah dan pori-pori yang tahan yang berfungsi sebagai habitat bagi semua organisme tanah yang lebih kecil. Masing-masing aspek karakteristik sifat fisik tanah tersebut sangat membantu bagi para peneliti. Dengan cara itu, para ahli ekosistem juga sangat tertolong dalam mencari informasi aktivitas organisme tanah. Modifikasi aspek sifat fisik tersebut diatas bertujuan untuk meningkatkan jumlah habitat yang tersedia untuk fauna tanah lain. Namun, disisi lain hal tersebut memberikan dampak pada beberapa derajat seleksi, karena dapat mengurangi jumlah nematoda parasit tanaman melalui stimulasi pertahanan alami tanaman, dan juga menghilangkan proporsi yang signifikan dari serasah daun permukaan dengan signifikan – meskipun terkadang hal tersebut berdampak positif pada artropoda serasah. Misalnya, pengaruh cacing tanah pada pembentukan agregat dihasilkan dari hasil aktivitas makan mereka dan aktivitas menggali. Cacing tanah membuat pori-pori makro melalui aktivitas terowongan mereka dan menelan partikel tanah dan bahan organik, mencampurkan kedua fraksi ini bersama-sama dan mengeluarkannya sebagai gips permukaan atau bawah permukaan. Dengan demikian mereka dapat menghasilkan gips dengan kecepatan beberapa ratus ton per ha, dengan nilai maksimum di atas 1.000 ton di sabana tropis (Lavelle et al., 2006).

Melalui aktivitas fauna tanah, perekayasa tanah memodifikasi tingkat agregasi tanah dan porositas yang memiliki dampak pada sifat hidrolik terkait. Perekayasa umumnya mempertahankan tingkat tinggi aerasi dan porositas tanah melalui pembentukan struktur seperti liang, terowongan, galeri, cor, gundukan dll dan dengan meningkatkan proporsi agregat yang stabil di dalam tanah dan dengan demikian porositas antar-agregat menjadi stabil. Misalnya, galeri vertikal besar cacing tanah anesik memfasilitasi aliran air melalui profil tanah, meningkatkan pengangkutan air dan nutrisi yang larut ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam.

Demikian pula, sarang semut telah terbukti mempengaruhi laju infiltrasi air dan kandungan bahan organik tanah. Partikel tanah dapat terikat bersama dalam unit struktural yang lebih besar yang disebut agregat. Agregat ini kurang lebih cocok satu sama lain, menciptakan ruang dengan berbagai ukuran yang menyediakan habitat bagi organisme tanah lainnya, dan mampu menyimpan udara, air, mikroba, nutrisi serta bahan organik. Biasanya, mikro-agregat

(<250 m) diikat bersama oleh agen sementara, seperti akar dan hifa jamur, atau seperti polisakarida mikroba, untuk membentuk makro-agregat (> 250 m). Perekrayasa ekosistem adalah salah satu aktor utama yang mempengaruhi dinamika agregat. Sebagai contoh, cacing tanah mempengaruhi rasio agregat makro dan mikro dengan menelan dan mengeluarkan agregat dari berbagai ukuran selama aktivitas tunneling dan feeding mereka. Gips yang mereka keluarkan kaya akan bahan organik, dan meskipun gips ini tidak stabil saat baru terbentuk dan basah, campuran bahan organik, lendir dan tanah yang dapat membuat gips yang sangat stabil saat dikeringkan.

Mekanisme penting kedua dari pembentukan agregat makro adalah melalui aktivitas akar dan perekrayasa kimia. Akar yang tumbuh aktif dan hifa jamur dapat memulai pembentukan makro-agregat dengan menjerat partikel tanah halus dan mengikatnya bersama-sama (misalnya melalui sekresi protein lengket). Eksudat mikroba atau akar, terdiri dari polisakarida panjang dan fleksibel mengikat mereka bersama-sama dalam agregat stabil yang dapat menahan dekomposisi. Pembentukan dan pemecahan agregat secara langsung mempengaruhi dinamika bahan organik tanah. Agregat secara fisik melindungi BOT (Bahan Organik Tanah) dari mikroorganisme dan enzim mikroba dan mempengaruhi pergantian mikroba. Misalnya, cacing tanah dapat menstabilkan BOT melalui penggabungan dan perlindungan bahan organik dalam cetaknya.

6.1 Hubungan Faktor Biotik Dan Abiotik Habitat Fauna Tanah

Keberadaan dan keanekaragaman fauna tanah pada suatu tipe lahan dipengaruhi oleh faktor lingkungan biotik maupun abiotik yang berperan penting membentuk karakteristik habitat dan ekosistem fauna tanah. Di sini kami mengambil contoh Bukit Pinang-Pinang (Marsandi et al., 2020). Perubahan penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang memberikan dampak penting terhadap perubahan keanekaragaman fauna tanah, sehingga diperlukan penekanan yang komprehensif untuk menjelaskan kondisi ekosistem kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang. Hubungan antara faktor biotik dan abiotik tanah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropis Bukit Pinang-Pinang merupakan alternatif penting dalam rangka mendeskripsikan kondisi ekosistem pada masing-masing tipe lahan tersebut. Korelasi jumlah total, keanekaragaman dan fungsional fauna tanah terhadap karakteristik

sifat kimia tanah, kimia serasah, fisika tanah, dan kepadatan populasi bakteri tanah yang telah diamati sebelumnya disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 menunjukkan hasil analisis korelasi pearson antara jumlah total, keanekaragaman, dan komponen fungsional fauna tanah terhadap beberapa karakteristik biotik (kelimpahan bakteri tanah) dan abiotik (faktor kimia dan fisika tanah serta kimia serasah). Karakteristik kimia tanah yang memiliki korelasi pearson signifikan terhadap fauna tanah adalah pH tanah dengan fungsional herbivora fauna tanah dengan nilai korelasi pearson -0.331 dan nilai signifikansi 0.022 (Tabel 9). pH tanah mempengaruhi kehadiran kelompok herbivora tanah pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang. Karakteristik kimia tanah pH merupakan kunci utama dalam pengaturan ketersediaan hara dalam tanah.

Keanekaragaman jenis fungsional herbivora tanah akan semakin meningkat pada pH yang rendah. Kelimpahan jenis herbivora tanah pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang menandakan bahwa kawasan tersebut memiliki tingkat keanekaragaman vegetasi yang tinggi dengan jumlah serasah yang melimpah. Menurut Suin (2006), sebagian dari kelompok fauna tanah memilih habitat dengan pH rendah sebagai tempat untuk melakukan aktivitas. Kelimpahan serasah pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang menciptakan mikrohabitat yang efektif bagi sebagian besar jenis herbivora fauna tanah yang memanfaatkan dedaunan pohon, bunga dan buah yang baru jatuh, vegetasi bawah (herba) maupun memanfaatkan bahan organik tanah lainnya sebagai sumber makanan. Kelimpahan serasah pada suatu kawasan akan meningkatkan proses dekomposisi bahan organik tanah oleh kelompok mikroorganisme, sekresi akar dan oksidasi dari bahan anorganik. Meningkatnya aktivitas dekomposisi tersebut menyebabkan tanah menjadi masam. Menurut Hanafiah (2014), dekomposisi bahan organik cenderung akan meningkatkan keasaman tanah sebagai akibat dari asam-asam organik yang dihasilkan. Sebagian besar fauna tanah dalam membantu mempercepat proses dekomposisi serasah atau bahan organik lainnya dipengaruhi oleh pH asam yang cukup tinggi, dimana aktivitas kelompok fauna tanah berlangsung.

Karakteristik fisika tanah menunjukkan korelasi yang signifikan antara KA (Kadar Air) tanah dengan kelompok fungsional herbivora tanah, yaitu pada nilai korelasi pearson 0.745 dengan nilai signifikansi korelasi 0.005 (Tabel 9). Kadar air tanah memiliki peran penting

terhadap keberadaan fauna tanah. Kecendrungan fauna tanah untuk memilih suatu habitat salah satunya dipengaruhi faktor abiotik tanah yang diindikasikan dengan karakteristik kadar air tanah. Tabel 8 menunjukkan bahwa kadar air tanah memiliki korelasi positif terhadap keanekaragaman fungsional fauna tanah herbivora. Pemanfaatan air tanah dibutuhkan oleh kelompok fungsional herbivora tanah untuk tumbuh dan berkembang. Hal ini terjadi signifikan karena mengingat ketergantungan herbivora tanah terhadap tanaman sebagai sumber nutrisi utama, sehingga ketersediaan air tanah selain dibutuhkan untuk menjaga kelembaban mikrohabitat, juga dibutuhkan untuk membantu proses metabolisme fauna tanah herbivora. Kepadatan fauna tanah herbivora yang berlimpah pada suatu lahan disebabkan tersedianya kadar air tanah pada lahan tersebut dalam jumlah yang efektif. tingginya kadar air tanah menyebabkan kondisi tanah menjadi lembab yang mendukung pertumbuhan.

Tabel 9. Nilai Korelasi jumlah, keanekaragaman dan fungsional fauna tanah terhadap karakteristik sifat kimia tanah, kimia serasah, fisika tanah dan kepadatan populasi bakteri tanah.

	Nilai Korelasi Pearson & Signifikansi Korelasi																	
	Jumlah Fauna Tanah			Keanekaragaman Fauna Tanah			Herbivora Fauna Tanah			Predator Fauna Tanah			Parasitoid Fauna Tanah			Detritivora Fauna Tanah		
	KP	Sig		KP	Sig		KP	Sig		KP	Sig		KP	Sig		KP	Sig	
pH Tanah	-0.133	0.368		-0.156	0.291		-0.331*	0.022	-0.100	0.500		0.151	0.306		0.034	0.821		
N Tanah	-0.186	0.206		-0.144	0.328		-0.277	0.057	-0.155	0.294		-0.060	0.686		0.024	0.871		
P Tanah	-0.149	0.313		0.127	0.390		-0.008	0.958	-0.155	0.294		0.170	0.248		-0.052	0.727		
K Tanah	0.007	0.961		0.140	0.341		0.087	0.558	-0.031	0.837		-0.128	0.386		0.132	0.370		
C Tanah	-0.118	0.425		-0.225	0.125		-0.253	0.082	-0.071	0.632		-0.219	0.134		-0.010	0.944		
KTK Tanah	0.132	0.371		0.100	0.418		0.445	0.113	0.077	0.601		0.397	0.085		0.126	0.394		
BV Tanah	0.173	0.591		0.173	0.591		-0.023	0.942	0.258	0.419		0.177	0.583		-0.226	0.480		
KA Tanah	0.236	0.461		0.236	0.461		0.745*	0.005	0.021	0.947		0.024	0.941		0.476	0.188		
Fraksi Pasir	-0.070	0.828		-0.070	0.828		0.023	0.944	-0.208	0.517		0.421	0.173		0.424	0.170		
Fraksi Debu	-0.080	0.805		-0.064	0.844		0.209	0.514	-0.141	0.663		0.211	0.511		0.305	0.335		
Fraksi Liat	0.127	0.693		0.127	0.693		0.184	0.567	0.275	0.387		-0.497	0.166		-0.562	0.057		
Populasi Bakteri Tanah	0.084	0.568		-0.247	0.059		0.078	0.596	0.154	0.296		-0.060	0.686		0.214	0.144		
Tipe Koloni	0.194	0.186		0.054	0.117		0.229	0.118	0.151	0.305		-0.035	0.168		0.090	0.354		
N Serasah	-0.082	0.578		0.296*	0.041		0.366*	0.010	-0.174	0.238		0.267	0.057		0.042	0.777		
P Serasah	0.326*	0.024		0.043	0.770		0.124	0.401	0.255	0.080		0.154	0.297		0.305*	0.035		
K Serasah	0.104	0.481		0.091	0.538		0.124	0.400	0.069	0.643		-0.057	0.699		0.112	0.450		
C Serasah	0.287*	0.050		0.169	0.251		0.255	0.124	0.206	0.159		-0.025	0.867		0.250	0.087		

Ket. KP: Korelasi Pearson, Sig: Nilai signifikansi, *: Signifikan ($\alpha < 0.05$) Sumber: (Marsandi et al., 2020)

Selain itu, kelembaban tanah akan mempertahankan keberadaan fauna tanah dalam melakukan aktivitas terutama fragmentasi bahan organik tanah (*fresh litter*), karena fauna tanah herbivora menyukai keadaan lembab dan agak masam. Sehingga selain mendukung pertumbuhan tanaman yang merupakan sumber nutrisi bagi fauna tanah herbivora, kadar air tanah juga berperan dalam menyediakan habitat yang efektif serta membantu proses metabolisme fauna tanah herbivora.

Karakteristik hara serasah pada beberapa tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang bergantung pada tingkat keanekaragaman vegetasi kawasan tersebut. Kandungan N tanah serasah memiliki keterkaitan dengan keanekaragaman fauna tanah, dimana kandungan unsur hara N memiliki fungsi vital dalam proses terbentuknya protein pada proses metabolisme. Tabel 9 menunjukkan korelasi yang signifikan antara N serasah terhadap keanekaragaman fauna tanah dengan nilai korelasi pearson 0.296 pada nilai signifikansi 0.041 (Tabel 9) dan herbivora tanah dengan nilai korelasi pearson 0.366 pada nilai signifikansi 0.010 (Tabel 9). Variasi serasah yang jatuh diatas permukaan tanah akan meningkatkan variasi kehadiran jenis fauna tanah dalam pemanfaatan kelimpahan serasah tersebut. Meningkatnya kandungan N serasah tanah akan meningkatkan keanekaragaman jenis fauna tanah dan kelompok fauna tanah herbivora. Unsur-unsur kimia serasah seperti N merupakan beberapa unsur yang dibutuhkan oleh sebagian besar organisme dan mikroorganisme tanah untuk mensitesa zat makanan. pemanfaatan fauna tanah maupun herbivora tanah terhadap tanaman sebagai sumber makanan meningkatkan produktivitas N. Dekomposisi serasah akan membebaskan sejumlah C dan senyawa yang mengandung N sebagai hasil dari dekomposisi bahan organik. Selanjutnya, Harper *et al.* (2010) menyatakan bahwa menyusutnya bahan serasah akibat dekomposisi oleh kelompok fauna tanah dan mikroba tanah menyebabkan menurunnya kadar serasah dan meningkatkan kadar N. N yang dihasilkan dari proses dekomposisi serasah atau tanaman oleh fauna tanah diperoleh dari senyawa-senyawa protein dan asam amino, sehingga semakin beragam dan melimpah keberadaan fauna tanah dan herbivora tanah pada tipe lahan tersebut, mengindikasikan bahwa pada tipe lahan tersebut terdapat kandungan N serasah yang tinggi.

Karakteristik hara serasah lainnya yang memiliki korelasi signifikan dengan komponen fauna tanah adalah kandungan hara P serasah. Kandungan hara P pada serasah memiliki hubungan

korelasi signifikan terhadap jumlah fauna tanah yang ditemukan dan fungsional detritivora fauna tanah. Kandungan P serasah dibutuhkan sebagai salah satu unsur pembentuk energi bagi fauna tanah. Tabel 9 menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar P serasah maka kelimpahan fauna tanah dan fungsional detritivora fauna tanah semakin meningkat. Dekomposisi serasah yang sudah tua merupakan proses penting dalam fungsi ekosistem. Hal tersebut berhubungan dengan konsentrasi fosfor (P) dan rasio pada daun-daun yang jatuh di atas permukaan tanah yang menentukan tingkat peluruhan serasah serta kehadiran fauna tanah. Kadar P serasah menunjukkan kecenderungan yang sama dengan N total serasah, dimana kadar P serasah akan semakin besar seiring dengan peningkatan laju dekomposisi serasah dari *fresh litter* ke *fermented litter* hingga *humified litter* oleh kelompok fauna dan mikroba tanah. Fosfor yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik serasah diperoleh dari senyawa-senyawa organik yang mengandung P seperti fitin, asam nukleat dan fosfolipid. Fauna tanah akan melimpah pada suatu tipe lahan dengan kandungan P serasah yang tinggi terutama kelompok fauna tanah detritivora.

Karakteristik hara C serasah menunjukkan korelasi terhadap jumlah fauna tanah, yang ditandai dengan nilai korelasi person 0.287 pada nilai signifikansi korelasi 0.050 (Tabel 9). Kandungan hara C pada tanaman dibutuhkan oleh sebagian besar fauna tanah sebagai bahan utama penyusun struktur karbohidrat, lemak dan protein. Pemanfaatan kandungan hara C serasah terjadi pada saat proses dekomposisi. Dalam hal ini peran fauna tanah adalah fragmentasi serasah. Semakin banyak jumlah serasah yang jatuh di atas permukaan tanah, maka akan semakin meningkat kandungan C serasah tersebut sehingga jumlah total fauna tanah juga akan semakin tinggi. Fauna tanah memegang peranan penting dalam berbagai proses yang terjadi pada ekosistem daerah tropis dalam perbaikan sifat kimia tanah melalui proses imobilisasi dan humifikasi. Selanjutnya, Coleman *et al.* (2004) serasah tanaman menyimpan kandungan hara C yang tinggi yang dimanfaatkan oleh fauna tanah untuk menjalankan aktivitas metabolisme, dimana dalam pemanfaatan serasah tersebut, umumnya kelompok fauna tanah bekerja sama dengan kelompok mikroba tanah.

Komponen kelimpahan faktor biotik bakteri tanah tidak menunjukkan korelasi yang signifikan terhadap kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah serta komponen fungsionalnya. Tabel 9 menunjukkan keragaman nilai yang disertai tanda yang berbeda pada hubungan korelasi kelimpahan bakteri tanah terhadap kelimpahan,

keanekaragaman maupun komponen fungsional fauna tanah. Walaupun demikian, hal ini menunjukkan bahwa antara bakteri tanah dan fauna tanah memiliki fungsi vital dalam menjaga keberlanjutan ekosistem. Pemahaman fungsi masing-masing komponen biotik ini akan membantu dan menjadi alternatif dalam pemecahan masalah lingkungan. Kelompok fauna tanah terutama dengan jumlah yang mendominasi di dalam maupun di atas permukaan tanah yang mampu hidup dalam kondisi ekosistem basah maupun kering memiliki kontribusi secara fungsional ke berbagai tingkat tropik dalam jaring makanan terrestrial. Kelompok fauna tanah dapat mengerahkan pengaruh pada proses siklus mineralisasi dan nutrisi melalui interaksi tropik dengan bakteri tanah sebagai mikroorganisme pengurai. Kelompok fauna tanah memiliki peran dalam memfragmentasi bahan organik, dimana selanjutnya kelompok fauna tanah tersebut meregulasi populasi mikroorganisme tanah. Beberapa kelompok taksa fauna tanah pada saluran pencernaannya ditemukan bakteri tanah yang berasosiasi dengan bahan organik sebagai substrat tumbuh. Feses yang dihasilkan oleh fauna tanah mampu menambah kandungan bahan organik tanah karena substrat organik yang terfragmentasi oleh fauna tanah dan terdekomposisi oleh kelompok bakteri tanah.

Korelasi kepadatan populasi bakteri tanah dengan keanekaragaman fauna tanah dan kelimpahan parasitoid fauna tanah menunjukkan nilai negatif yang berarti semakin tinggi tingkat keanekaragaman fauna tanah dan jumlah parasitoid fauna tanah, maka semakin sedikit kepadatan populasi bakteri tanah. Populasi bakteri tanah merupakan kelompok biota tanah yang memiliki jumlah komunitas berlimpah yang menempati suatu mikrohabitat. Keberadaan bakteri tanah mencapai sekitar 6000 genom bakteri yang berbeda per gram tanah. Populasi bakteri tanah menempati kurang dari 5% total ruang yang tersedia. Keberadaan komponen bakteri tanah pada suatu tipe lahan tidak selamanya menguntungkan bagi organisme lain, dimana terdapat beberapa komponen bakteri tanah yang bersifat patogen bagi organisme lain. Menurut Salaki *et al.* (2010) kelompok bakteri entomopatogenik di dalam tanah berpotensi dalam mengurangi keanekaragaman fauna tanaman, karena memproduksi protein yang bersifat racun bagi serangga. Selain itu, kelompok fauna tanah parasitoid yang merupakan hama pengganggu tanaman telah dikonfirmasi melalui beberapa penelitian bahwa memiliki hubungan antagonis terhadap beberapa bakteri tanah patogen. Salah satunya adalah Tian dan Shi (2014) mengungkapkan mekanisme pengendalian

fauna parasitoid dengan menggunakan beberapa kelompok bakteri tanah dengan istilah nematofag melalui parasitisasi; memproduksi toksin, antibiotik, atau enzim yang bertindak secara sinergis terhadap nematoda melalui injeksi langsung pada nematoda, mendorong pertumbuhan tanaman, dan memfasilitasi kolonisasi rhizosfer serta aktivitas antagonis mikroba.

Selain kepadatan populasi bakteri tanah, keanekaragaman tipe koloni bakteri tanah juga menunjukkan korelasi yang beragam terhadap kelimpahan, keanekaragaman dan fungsional fauna tanah. Korelasi positif ditunjukkan terhadap kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah, fauna tanah herbivora, fauna tanah predator dan fauna tanah detritivora. Korelasi negatif ditunjukkan terhadap parasitoid fauna tanah. Pada dasarnya hubungan antara keanekaragaman bakteri tanah dan fauna tanah yang berada di dalam maupun di permukaan tanah tidak terjadi secara signifikan dan tidak diketahui secara pasti. Hal tersebut disebabkan karena cukup sulit untuk mengukur keanekaragaman mikroba tanah terutama komunitas bakteri tanah. Masalah utama dari hubungan antara keanekaragaman mikroba dan fungsi tanah adalah untuk memahami hubungan antara keragaman genetik dan struktur komunitas bakteri tanah terhadap struktur dan fungsi komunitas fauna tanah. Hal ini menjadikan pengukuran tingkat keanekaragaman hayati tanah penting, dimana keanekaragaman spesies yang lebih besar menunjukkan lingkungan yang sehat.

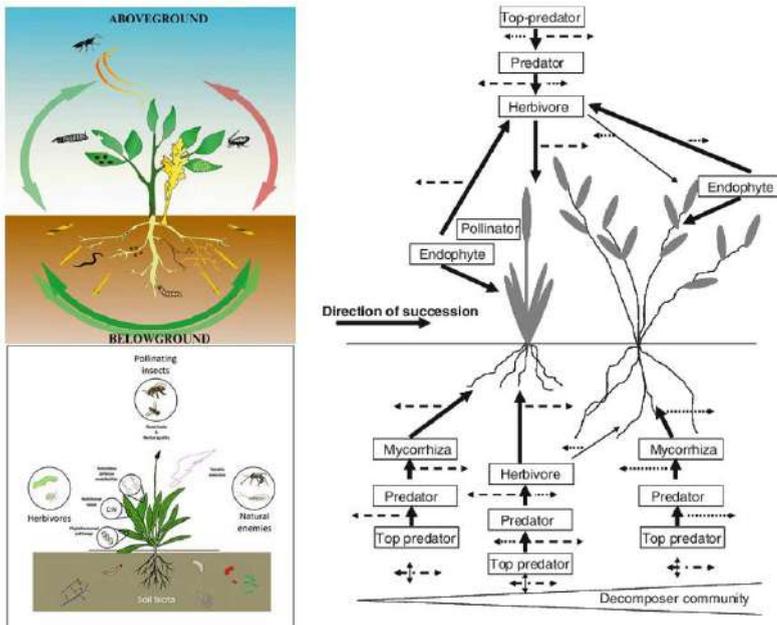
Hal berbeda ditunjukkan pada korelasi antara keanekaragaman tipe koloni bakteri tanah terhadap fauna tanah parasitoid, dimana terjadi korelasi yang tidak signifikan dengan arah korelasi negatif. Kelompok fauna tanah parasitoid sebagian besar bertindak sebagai patogen bagi tanaman. Keragaman bakteri tanah memberikan efek positif terhadap penurunan patogen tanaman ini. Namun, efek ini tergantung pada jenis tanah yang merupakan faktor lingkungan yang mendukung aktivitas dan keanekaragaman bakteri tanah. Hal ini biasanya hanya terjadi pada tanah lempung dan berpasir di bawah pengelolaan pertanian konvensional. Fauna tanah yang bertindak sebagai patogen bertahan hidup pada kepadatan inang yang lebih tinggi dan untuk periode yang lebih lama. Akan tetapi, keanekaragaman komunitas bakteri tanah mampu memanfaatkan sumber daya pembatas (eksudat akar tanaman) secara luas yang mengakibatkan aktivitas invasi fauna tanah yang bertindak sebagai patogen menjadi gagal.

Melalui hubungan korelasi antara faktor lingkungan biotik dan abiotik terhadap komponen struktural maupun fungsional fauna tanah, didapatkan konsep yang jelas bahwa kelompok fauna tanah secara struktural maupun fungsional membutuhkan sistem ekologi yang dinamis sebagai sumber habitat maupun makanan untuk menjaga dan meningkatkan keanekaragaman fauna tanah tersebut. Akan tetapi, hal ini belum cukup untuk menjelaskan bagaimana dinamika yang terjadi pada keanekaragaman fauna tanah baik secara struktural maupun fungsional sebagai akibat dari perubahan penggunaan lahan. Keragaman fungsional fauna tanah penting dalam berlangsungnya ekosistem tanah karena mereka berperan dalam pembentukan dan stabilitas struktur ekosistem tanah. Sampai saat ini tidak ada penggolongan yang betul-betul tegas terhadap organisme tanah berdasarkan perannya di ekosistem, sehingga memfokuskan fauna tanah pada peranan/fungsi fauna tanah berdasarkan sumber nutrisi utamanya yang umumnya juga ditentukan oleh ukuran tubuhnya menjadi alternatif yang tepat untuk memahami stabilitas ekosistem suatu kawasan. Peranan keragaman fungsional fauna tanah sangat dipengaruhi oleh pola penggunaan lahan, sehingga perubahan penggunaan lahan pada suatu kawasan akan mengubah dinamika struktur fungsional tersebut. Untuk itu, dalam menjelaskan perubahan dinamika fungsional fauna tanah tersebut dibutuhkan pola jaring makanan fauna tanah pada masing-masing tipe lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

6.2 Tumbuhan dan Biodiversitas Fauna Tanah

Interaksi antara tanaman dan perekayasa kimia memiliki peran penting dalam pengembangan komunitas tanaman, keanekaragaman tanaman, siklus nutrisi dan dalam pemeliharaan struktur tanah secara keseluruhan. Interaksi antara akar tanaman serta mikroorganisme penting dan terjadi melalui crosstalk molekuler. Interaksi tersebut dapat bersifat menguntungkan, merugikan, dan netral. Interaksi umpan balik tanaman-mikroorganisme peka huruf besar/kecil dan bergantung pada spesies tanaman, kelompok taksonomi tanaman (atau fungsional) dan perbedaan spesifik lokasi dalam sifat tanah (Bezemer et al., 2006). Ini berarti bahwa interaksi kunci mungkin bergantung pada konteks, tetapi interaksi tanaman-tanah secara umum memainkan peran utama dalam mengatur keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah dan fungsi ekosistem. Secara umum,

tanaman dapat sangat mempengaruhi komposisi komunitas mikroba tanah karena kelimpahan, aktivitas dan komposisi komunitas bakteri di rizosfer bervariasi menurut keanekaragaman vegetasi, terutama tergantung pada keragaman biokimia eksudat akar mereka. Sebaliknya, di banyak ekosistem tanah, pertumbuhan tanaman dibatasi oleh jumlah nutrisi yang dilepaskan oleh bakteri dan jamur, seperti NH_4^+ , yang bergantung pada laju dekomposisi yang didorong oleh mikroba. dalam perspektif perubahan iklim, setiap modifikasi konsentrasi CO_2 di atmosfer akan mempengaruhi hubungan ini melalui perubahan pertumbuhan dan produktivitas tanaman, sehingga kualitas dan kuantitas substrat organik yang masuk ke tanah sebagai eksudat dan serasah, sehingga akhirnya mempengaruhi ketersediaan substrat untuk mikroorganisme pengurai dan dapat memiliki pengaruh positif atau negatif pada mineralisasi hara. Peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer akan merangsang aktivitas fotosintesis spesies tanaman tertentu dan dengan demikian dapat mempengaruhi fungsi mikroba di rizosfer yang umumnya terbatas karbon. Ini akan terjadi secara tidak langsung melalui modifikasi deposisi akar (Zak et al., 2000). Berikut interaksi biota tanah dengan tanaman (Gambar 25).



Gambar 25. Interaksi antara fauna tanah permukaan dan di dalam tanah dengan tanaman (Sumber: Heinen et al., 2020)

Efek tidak langsung lainnya yang disebabkan oleh alokasi karbon tanah yang lebih besar menyangkut peningkatan struktur tanah dan peningkatan serapan nutrisi dan air oleh tanaman. Hal ini dapat menyebabkan penurunan jumlah nitrogen yang tersedia dengan kompetisi antara tanaman dan mikroorganisme, yang mendukung mikroorganisme dan memicu penurunan pertumbuhan tanaman. Rupanya, hasil yang berbeda pada aktivitas, komposisi dan ukuran mikroflora tanah dan pada interaksi antara mikroorganisme dan tanaman dan mikroorganisme dan fauna sebenarnya bergantung pada sistem tanaman-tanah yang berbeda yang dipelajari. memiliki karakteristik intrinsik yang berbeda dan teknik yang berbeda yang digunakan memiliki kepekaan yang berbeda. Infeksi mikoriza pada akar tanaman di bawah konsentrasi CO₂ yang tinggi, misalnya, umumnya dirangsang karena peningkatan karbon tingkat alokasi ke akar. Namun, penelitian masa depan harus membahas peran sentral mikoriza dalam konteks perubahan global, karena mikoriza tampaknya menjadi batu kunci dalam CO₂.

Tumbuhan juga dapat mengatur interaksi mutualistik dengan jamur. Sebagian besar tumbuhan berpembuluh berasosiasi dengan jamur mikoriza. Tanaman melalui interaksi ini mendapat manfaat dari peningkatan kapasitas untuk mengekstrak fosfor, air, atau nutrisi lain dari tanah, sedangkan jamur memperoleh karbohidrat dari tanaman sebagai imbalannya. Hubungan antara tumbuhan dan jamur tanah juga dapat mengatur pola spasial suatu komunitas tumbuhan, misalnya di hutan beriklim sedang jamur tanah patogen tumbuhan secara aktif berkontribusi pada jarak pohon dengan mematikan anakan di sekitar pohon induk. Singkatnya, aktivitas fisiologis tanaman dan komunitas mikroba tanah dan interaksinya mengontrol aliran nutrisi, seperti karbon dan nitrogen dalam ekosistem terestrial (Packer and Clay, 2000).

Interaksi biotik antara regulator biologis dan perekayasa ekosistem, sepengetahuan kami, terbatas pada interaksi parasit antara nematoda dan akar tanaman. Nematoda simpul-akar dan nematoda kista misalnya, merupakan patogen obligat dari banyak spesies tumbuhan yang secara eksklusif memakan sitoplasma sel tumbuhan hidup. Organisme ini menyebabkan perubahan dramatis dalam morfologi dan fisiologi inangnya dan sejumlah proses tanaman diubah oleh nematoda saat mereka membentuk sel makanan khusus mereka. Dengan demikian, nematoda parasit tanaman dapat merusak berbagai tanaman tanaman, menyebabkan kerugian ekonomi yang sangat besar di bidang pertanian setiap tahun. Insinyur Tanaman dan Ekosistem

Sama halnya dengan insinyur kimia, insinyur ekosistem mungkin juga memiliki pengaruh penting pada struktur komunitas tanaman dengan mengubah nutrisi tanaman. Pengaruh ini bisa langsung atau tidak langsung.

Perekayasa ekosistem dapat secara langsung menentukan struktur komunitas tumbuhan melalui tindakan rekayasa mereka, penciptaan hotspot bahan organik, atau melalui pelepasan senyawa aktif. Cacing tanah, misalnya, sebenarnya dapat mempengaruhi kesehatan dan pertahanan tanaman melalui produksi hormon seperti produk (De Deyn and Van der putten, 2005) sedangkan gundukan rayap, gundukan semut dan gundukan gopher di berbagai wilayah dunia dapat secara lokal menentukan jenis vegetasi dan mendukung spesies tanaman tertentu yang dapat sangat berbeda dari lanskap sekitarnya. Menariknya, eksperimen pilihan makanan menunjukkan preferensi rayap yang kuat dalam mendukung spesies tanaman yang tumbuh di sarang mereka sendiri. Oleh karena itu, ada kesepakatan yang jelas antara preferensi tanaman untuk tanah yang diubah oleh aktivitas rayap dan preferensi rayap untuk spesies tanaman yang disukai oleh tindakan rekayasa mereka. Selain itu, perekayasa ekosistem mendapat manfaat dari akar tanaman untuk menstabilkan sarang mereka dan keberadaan nektar sebagai sumber makanan. Jadi, dalam beberapa kasus, struktur biogenik yang dihasilkan oleh insinyur ekosistem, selain keuntungan langsung, juga dapat memiliki efek positif tidak langsung pada kebugarannya.

Pola spasial aktivitas perekayasa tanah juga dapat memiliki efek penting pada pertumbuhan tanaman individu karena penciptaan hotspot bahan organik. Jumlah nutrisi, seperti fosfor dan nitrogen, misalnya, lebih tinggi di dalam lubang dan lubang cacing tanah daripada di tanah sekitarnya menciptakan sumber daya yang tersedia untuk pertumbuhan akar. Kapasitas untuk menemukan patch yang diperkaya nutrisi tersebut dan ukuran patch yang optimal bervariasi di antara spesies tanaman, yang menyebabkan perekayasa ekosistem secara selektif mendukung atau tidak menyukai spesies tanaman, yang akan mengubah mereka pada keseimbangan kompetitif dan, oleh karena itu, juga pada keanekaragaman tumbuhan dan komposisi komunitas.

Perekayasa ekosistem juga dapat memiliki efek tidak langsung pada tanaman melalui modifikasi distribusi spasial regulator biologis. Fenomena ini telah diamati, misalnya, di Belanda, di mana semut di

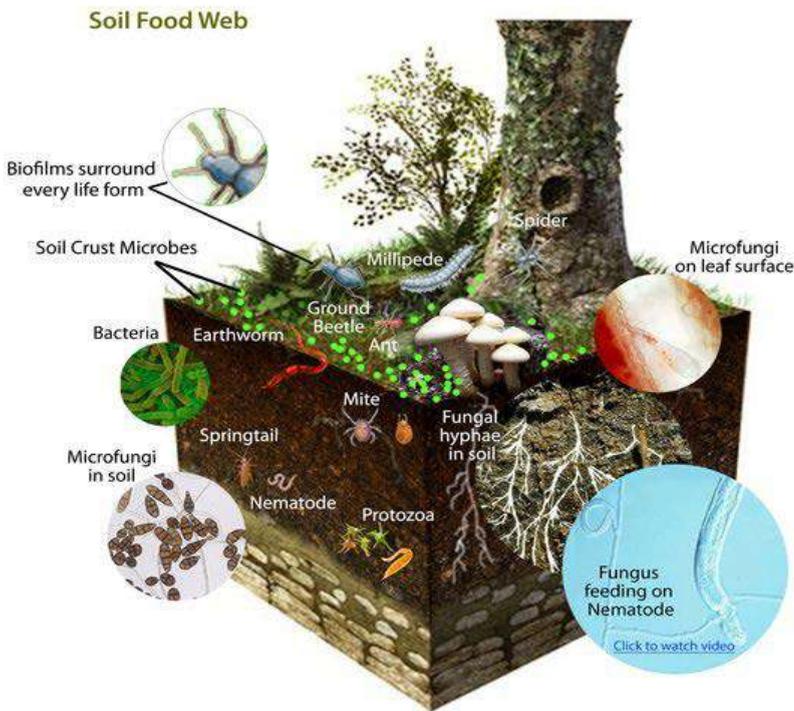
tanah padang rumput semi-alami membawa lapisan bawah tanah segar ke permukaan, yang menyediakan substrat bagi tanaman yang bebas dari nematoda parasit tanaman. Kondisi ini menguntungkan rerumputan (fescue merah: *Festuca rubra*) di atas sedge (sedge pasir: *Carex arenaria*). Setelah beberapa saat, tanah kembali dijajah oleh nematoda parasit tanaman, yang mengakibatkan penggantian rumput (Olf et al., 2000).

6.3 Interaksi Biodiversitas Fauna Tanah Atas Dan Bawah

Dalam jaring-jaring makanan tanah, gugus fungsi dapat dikendalikan oleh interaksi biotik dari bawah ke atas atau dari atas ke bawah. Secara umum, interaksi dari bawah ke atas adalah interaksi yang melibatkan penyerapan sumber daya di tingkat bawah yang berdampak pada tingkat atas. Ini dapat berupa bahan akar segar dalam kasus pengumpulan tanaman, akar mati, eksudat akar dan serasah dalam kasus pengurai primer atau mangsa dalam kasus pengurai sekunder dan predator. Efek top-down terutama didorong oleh predasi: predasi dilakukan oleh organisme di tingkat atas jaring makanan dapat berdampak pada organisme di tingkat yang lebih rendah. Kontrol bottom-up dan top-down melibatkan persaingan untuk sumber daya. Setelah bertahun-tahun perdebatan, pandangan saat ini adalah bahwa sebagian besar spesies dapat dikendalikan oleh efek bottom-up dan top-down, yang dapat berubah secara dinamis dari waktu ke waktu. Di sini, bottom-up dan top-down utama menurunkan interaksi biotik antara ketiga tanah kelompok fungsional disajikan.

Meskipun terpisah dalam ruang, organisme di atas tanah dan di bawah tanah saling mempengaruhi, baik secara langsung maupun tidak langsung. Misalnya, herbivora besar yang mencari makan di atas permukaan tanah dapat memiliki dampak tidak langsung yang kuat terhadap komunitas tanah di bawah tanah. Demikian pula, tanaman, sebagai produsen utama yang memiliki organ di bawah tanah (akar) dan di atas tanah (daun, batang dan bunga), memainkan peran langsung dalam menghubungkan organisme di atas dan di bawah tanah (Wardle 2002). Interaksi biotik utama antara tanaman dan kelompok fungsional tanah disajikan di bawah ini. Sebagian besar penelitian tentang dampak aktivitas makan herbivora difokuskan pada struktur komunitas tumbuhan atau keanekaragaman hayati. Namun, herbivora juga dapat memiliki efek tidak langsung positif atau negatif di bawah tanah, pada organisme tanah dan siklus nutrisi.

Misalnya, percepatan siklus nutrisi terjadi ketika herbivora mempromosikan pasokan substrat labil ke tanah sebagai feses dan/atau eksudat akar, yang merangsang aktivitas pengurai tanah, tingkat mineralisasi nutrisi, dan penyerapan nutrisi oleh tanaman yang digembalakan. Sebaliknya, perlambatan siklus hara terjadi ketika pemberian makan selektif pada spesies tanaman kaya nutrisi menyebabkan dominasi tanaman yang menghasilkan serasah berkualitas buruk, atau ketika herbivora menginduksi produksi metabolit sekunder di dedaunan yang mengurangi kualitas serasah dan dekomposabilitas. Selain itu, di padang rumput konservasi yang digembalakan secara ekstensif, sebuah studi eksklusi jangka panjang, telah menunjukkan bahwa herbivora besar mempengaruhi keanekaragaman hayati tanah melalui perubahan komposisi vegetasi (Veen et al. 2019). Selain dengan tanaman, antar biota tanah atau fauna tanah sering terjadi interaksi. Berikut gambar interaksi antar fauna tanah di dalam maupun di permukaan tanah (Gambar 26).



Gambar 26. Fauna tanah di bawah dan di atas permukaan tanah

(Sumber: id.pinterest.com)

Penggembalaan herbivora juga dapat memanasakan tanah, merangsang aktivitas semut. Semut membawa tanah segar dari lapisan yang lebih dalam, yang mengandung lebih sedikit nematoda dan mikroorganisme. Akibatnya, tanah di gundukan semut menjadi lebih cocok untuk tanaman yang biasanya sensitif terhadap nematoda tanah dan mikroba patogen. Interaksi biotik seperti itu, tergantung pada konteksnya, pada akhirnya dapat menciptakan mosaik keanekaragaman tumbuhan (Blomqvist et al. 2000).

Tumbuhan memiliki berbagai pertahanan kimiawi yang sering meningkat konsentrasinya setelah diserang oleh herbivora. Respon tanaman yang diinduksi tersebut dapat terjadi di atas tanah, di daun, dan juga di bawah tanah di akar (misalnya pelepasan senyawa beracun). Tanah organisme juga dapat menginduksi respon pertahanan di atas permukaan tanah dan sebaliknya. Efek organisme bawah tanah pada pertahanan tanaman di atas tanah bisa langsung atau tidak langsung. Beberapa organisme tanah (nematoda, jamur mikoriza, dll.) yang melewati bagian dari siklus hidupnya yang berasosiasi dengan akar tanaman dapat secara langsung mempengaruhi pelepasan molekul pertahanan di bagian atas tanaman, sehingga pada akhirnya mengubah efisiensi pertahanan tanaman terhadap permukaan tanah. hama dan herbivora. Sebagai alternatif, pertahanan tidak langsung melibatkan daya tarik musuh herbivora dan hama, karena, ketika mereka diberi makan, tanaman mengeluarkan senyawa volatil yang menarik bagi herbivora dan musuh hama.

Sama halnya dengan organisme di bawah tanah, herbivora di atas tanah dapat memengaruhi respons pertahanan tanaman di bawah tanah. Makan tanaman oleh ulat, misalnya, menyebabkan penurunan molekul beracun yang mampu mengurangi pertumbuhan jamur patogen di akar ragwort. Memang, efek organisme di atas tanah pada di bawah tanah pertahanan tanaman, bahkan jika efek sebaliknya tidak terlalu parah, dapat secara signifikan mengubah komposisi komunitas tanah. Regulator biologis dapat memodulasi aktivitas mikroba dengan mengatur jumlah mereka, terutama melalui penggembalaan. Faktanya, beberapa spesies protista, serta nematoda bakterivora memakan bakteri. Dengan demikian, biomassa bakteri metanotrofik sebagian ditentukan oleh aktivitas penggembalaan protista lokal (Murase dan Frenzel 2008).

Demikian pula, studi jaring makanan di berbagai sistem tanah

telah menunjukkan bahwa ketersediaan nitrogen mineral untuk vegetasi tergantung sekitar sepertiga pada predasi mikroba, yang melepaskan nutrisi mineral yang tersedia untuk tanaman (serapan tanaman). Misalnya, protista dapat memodifikasi komposisi komunitas mikroba rizosfer melalui penggembalaan pada rhizobakteri pemacu pertumbuhan tanaman terpilih (Bonkowski 2002). Mineralisasi nitrogen dan fosfor tingkat juga dapat diatur dengan penggembalaan pada jamur tanah.

Efek dari penggembalaan menjadi jelas ketika mereka dihilangkan secara selektif. Misalnya, penghapusan nematoda mengurangi mineralisasi nutrisi secara keseluruhan dan akibatnya menyebabkan penurunan penyerapan nitrogen dan fosfor oleh tanaman (gandum). Namun, regulator biologis juga dapat merangsang dan membentuk aktivitas mikroba melalui mekanisme yang lebih kompleks. Misalnya, selama proses penggembalaan, sejumlah nutrisi dan senyawa perangsang menjadi lebih tersedia bagi mikroorganisme sehingga mendukung pertumbuhan mereka. Selain itu, migrasi nematoda menciptakan porositas dan meningkatkan ventilasi di tanah, memungkinkan pengangkutan nutrisi yang sebelumnya tidak tersedia ke mikroba. Selain itu, nematoda pemakan akar mempengaruhi kuantitas dan kualitas deposit rizosfer, mendorong tanaman untuk menghasilkan zat pelindung sekunder, yang berdampak pada keanekaragaman mikroba. Akhirnya, regulator biologis dapat mempromosikan heterogenitas lingkungan mikro dan dengan demikian keragaman mikroorganisme. Di sisi lain, mikroorganisme dapat menghambat reproduksi regulator biologis di rizosfer. Beberapa spesies jamur, misalnya, menghasilkan bahan kimia yang dapat menghambat penetasan telur dan mobilitas nematoda remaja (Kerry 2000). Efek lokal dari interaksi biotik antara insinyur kimia dan regulator biologi bervariasi secara lokal, tergantung pada beberapa faktor, termasuk (Bardgett dan Chan 1999):

- Perekayasa kimia dan pengatur komposisi biologi spesies lokal
- Penggembalaan selektif: predator mikro mungkin lebih menyukai beberapa spesies mikroba daripada yang lain. Nematoda pemakan bakteri, misalnya, lebih suka merumput bakteri tanah yang tersuspensi, sementara protista lebih suka merumput bakteri yang lebih besar dan tumbuh cepat. Akibatnya, tingkat makan mikro-fauna dapat mengubah

keunggulan kompetisi di antara berbagai jenis komunitas mikroba, dan dapat menawarkan kondisi dominan pertumbuhan jamur melalui penggembalaan pada bakteri. Dengan demikian, melalui penggembalaan selektif, protista dan nematoda dapat sangat mempengaruhi struktur dan fungsi komunitas mikroba tanah.

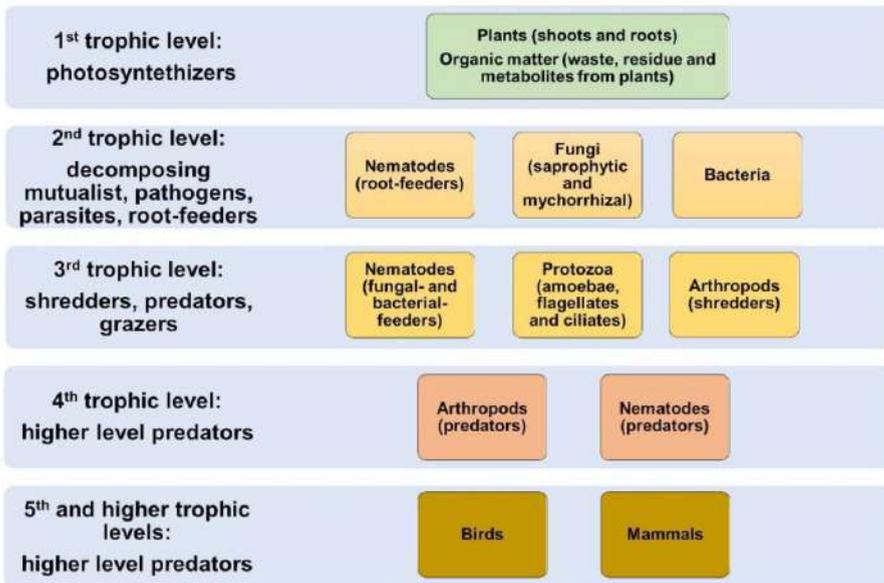
- Karakteristik fisikokimia tanah lokal: rasio C/N, kandungan bahan organik, pH, dll. Mikroba tanah juga dapat bertindak sebagai antagonis terhadap patogen (perlindungan dari hama), atau sebagai patogen bagi tanaman atau organisme tanah lainnya, sehingga berkontribusi pada fungsi regulasi biologis.

ANALISIS PERAN DAN POTENSI FAUNA TANAH

Kepedulian terhadap fauna tanah harus semakin dikuatkan mengingat besarnya potensi kerusakan dan kehilangan habitat fauna tanah. Semua sektor harus terlibat berperan dalam perlindungan fauna tanah. Sehingga memunculkan rasa peduli terhadap fauna tanah mencerminkan keinginan, minat dan keadaan pribadi kita untuk memperbaiki kondisi lingkungan, yang dimulai dengan tidak membahas literatur ekologi tanah secara luas melainkan dimulai dari hal yang penting terlebih dahulu. Hal tersebut merupakan refleksi diri yang sangat menyenangkan melihat minat yang berkelanjutan dalam mempelajari fauna tanah oleh generasi baru ahli ekologi tanah yang didorong oleh daya tarik yang sama untuk mendukung penelitian oleh para ahli ekologi sebelumnya. Selama beberapa tahun terakhir telah terjadi pergeseran dari fokus pada studi populasi dan komunitas fauna tanah, melalui eksperimen mikrokosmos yang menyelidiki proses dan penekanan pada mekanisme interaksi fauna pada keanekaragaman hayati tanah dan berfungsi pada skala ekosistem.

Perspektif ahli ekologi tanah telah mengemukakan bahwa upaya untuk meningkatkan aktivitas fauna tanah ke dalam proses tingkat ekosistem tampaknya ada hambatan konseptual dan praktis untuk maju mencapainya dengan tidak membuang beberapa detail ekologi menarik yang telah mendukung upaya tersebut. Sebelum mempertimbangkan potensi dan peran fungsional fauna tanah, hendaknya kita terlebih dahulu melihat alasan intrinsik mempelajari fauna tanah. Menurut Anderson (2009) alasan intrinsik untuk mempelajari fauna tanah adalah nilai estetikanya. Banyak ahli ekologi tanah memulai karir mereka sebagai seorang anak yang membalik batu, kayu busuk atau tumpukkan daun dan menangkap makrofauna tanah yang dimasukkan ke dalam toples untuk melihat pola makannya. Selanjutnya dalam perkembangannya, mikroskop cahaya dan elektron telah membantu mengungkapkan keragaman yang luar biasa dari kelompok taksonomi dan morfologi yang telah menjadi dorongan untuk rasa ingin tahu, penelitian mendasar dalam sejarah kehidupan, adaptasi terhadap kehidupan di tanah, aspek ekologi pola makan, proses dekomposisi dan interaksi invertebrata dengan mikroorganisme.

Interaksi tersebut terlihat pada penggunaan bagian-bagian yang tertanam gelatin pada tanah hutan yang memberikan dampak positif ke dalam struktur tanah organik. Kompleksitas mikroskopis dari serasah dan mikrohabitat tanah yang ditempati oleh tungau oribatid, mikoriza dengan massa ekstra-matriks hifa bercabang melalui matriks organik, dan keajaiban sesekali seperti kelabang geophilid yang sedang mengerami telurnya, atau kalajengking semu dengan collembola masih dalam chelicerae-nya! Studi jenis ini memiliki pengaruh yang sangat kuat pada pendekatan seseorang ketika mempertimbangkan skala di mana interaksi hewan/mikroba terjadi.



Gambar 27. Struktur Hirarki Rantai Makanan - Tanah (Sumber: Sofu et al., 2021)

Hal ini diperkuat dengan eksperimen dinamika collembola (*Folsomia candida*) dan jamur (*Mucor plumbeus*) dalam gambaran seperti matriks manik-manik kaca dua dimensi atau tiga dimensi (Leonard & Anderson, 1991). Penggembalaan intensif dan pertumbuhan populasi yang cepat dari *Folsomia* yang melebihi produksi jamur dan collembola mati. Kedua komponen bertahan selama beberapa waktu dan jamur bersporulasi di beberapa ruang interstisial yang tidak dapat diakses oleh collembola. Kanibalisme

telur oleh collembola juga berkurang, sehingga populasi akhirnya melebihi sumber daya jamur. Hal penting untuk diambil pelajarannya dalam peristiwa ini adalah bahwa seseorang harus sangat berhati-hati dalam menafsirkan hasil eksperimen terkait dengan interaksi hewan/mikroba dalam sistem laboratorium, terutama struktur matriks yang dapat mengekspos jamur, akar tanaman atau asosiasi rizosfer dengan tingkat pengembalaan buatan yang mungkin tidak terjadi di tanah alami yang tidak terganggu. Hal ini telah diperkuat oleh studi elegan dari Nunan et al. (2002), yang menekankan pentingnya struktur tanah pada dinamika spasial dan temporal pada populasi mikroba, dengan implikasi penting untuk interaksinya dengan fauna tanah.

Keanekaragaman hayati komunitas fauna tanah melimpah di atas permukaan tanah sesuai dengan urutan ukurannya di banyak habitat. Keragaman vegetasi di atas permukaan tanah dapat mempengaruhi keragaman di bawah permukaan tanah, tetapi mekanismenya mungkin bersifat korelatif daripada kausal. Hutan beriklim sedang yang didominasi oleh spesies pohon tunggal, seperti beech (*Fagus sylvatica*) atau oak (*Quercus* spp.), dapat berisi 1.000 spesies m-2 (Schaefer & Schauer mann, 1990). Keanekaragaman habitat mikro di tanah organik ini tampaknya menjadi penentu utama keragaman fauna tanah yang tinggi, serta menyediakan substrat untuk sumber makanan untuk mendukung kepadatan populasi fauna tanah yang tinggi. Tanah organik ini dapat dibentuk oleh satu jenis serasah yang terurai dalam waktu lebih dari satu tahun, atau dengan kombinasi serasah berkualitas rendah dan berkualitas tinggi, masing-masing berkontribusi pada struktur habitat tanah dan sumber makanan. Sebaliknya, serasah berkualitas tinggi yang terurai dengan cepat hanya membentuk habitat sementara bagi fauna tanah.

Eksperimen manipulatif menggunakan jenis serasah dan campuran spesies di satu sisi menunjukkan, pengaruh kuat spesies serasah terhadap keanekaragaman fauna atau, di sisi lain, menunjukkan efek dominan dari jenis serasah. Dalam kedua kasus, kesimpulan umum tentang hubungan ini dibatasi oleh durasi jangka pendek yang relatif dari percobaan, yang tidak membahas efek jangka panjang dari spesies serasah dan komposisi pada perkembangan jenis tanah di bawahnya yang merupakan habitat utama fauna tanah yang menjajah permukaan serasah. Terlepas dari peningkatan kesadaran internasional tentang kepunahan spesies secara global, yang menghasilkan Konvensi Keanekaragaman Hayati tahun 1992, keanekaragaman komunitas bawah tanah yang tinggi harus menerima banyak perhatian. pengakuan

yang lebih luas sebagai komponen keragaman sistem total (Decaëns et al., 2006). Sampai saat ini, Menurut Anderson (2009) masih relatif sedikit fauna tanah yang diberi status pada Buku Data Merah IUCN (misalnya cacing tanah raksasa Gippsland, cacing tanah Palouse, beberapa semut dan laba-laba; (lihat [http:// www.iucnredlist.org/](http://www.iucnredlist.org/) untuk detailnya). Akan tetapi, dukungan publik untuk konservasi panda, harimau, gorila dan beberapa satwa lainnya juga menghasilkan beberapa pelestarian habitat, termasuk tanah dan keanekaragaman di bawah tanah. Aspek konservasi yang menarik adalah keberadaan spesies langka. Sejarah eksploitasi, penganiayaan atau perusakan habitat sering menjadi penyebab kelangkaan spesies di komunitas di atas tanah.

Namun, spesies langka juga merupakan ciri komunitas fauna tanah yang relatif tidak terganggu dan menarik untuk berspekulasi tentang bagaimana populasi yang sangat rendah dari beberapa tungau oribatid bertahan di komunitas tersebut. Pertama, kondisi yang mendukung peningkatan populasi mereka dapat terjadi hanya sesekali, sehingga, dalam sebagian besar penelitian yang berlangsung beberapa tahun, orang hanya merekam sisa-sisa populasi yang menurun. Kedua, spesies yang langka di tanah mungkin melimpah di habitat di atas tanah, seperti pada kulit kayu (misalnya *Humerobates* spp.) atau kanopi pohon dan ditemukan secara kebetulan ketika jatuh ke tanah. Ketiga, beberapa spesies selalu langka karena mereka memiliki makanan khusus atau persyaratan habitat yang cukup rumit. Keempat, spesies ini mungkin berada pada batas jangkauan distribusinya. Akhirnya, ada kemungkinan bahwa metode pengambilan sampel standar tidak selamanya tepat, seperti dengan insiden rendah nimfa *Phthiracarid*, yang endophagous in situ di ranting dan tangkai daun yang mati selama ekstraksi gradien panas. Apapun itu mekanisme kausal, mungkin mengungkapkan untuk mengisi kembali komunitas tanah dari defaunasi di lapangan dengan spesies langka, untuk memantau dinamika populasi mereka tanpa adanya pesaing atau predator (Anderson, 2009).

7.1 Alasan Utilitarian Untuk Mempelajari Fauna Tanah

Nilai utilitas mencakup penggunaan langsung dari fauna tanah itu sendiri sebagai makanan, obat-obatan atau untuk produk biokimia baru dari aplikasi farmasi atau industri. Rayap, cacing tanah, larva kumbang dan serangga lainnya adalah makanan pilihan para pemburu-pengumpul di seluruh daerah tropis. Di banyak daerah bagian Afrika,

wanita hamil dan anak-anak juga memiliki kebiasaan memakan nodul jamur didalam sarang rayap yang dihasilkan oleh aktivitas pola makan dari Macrotermitinae. Ini sering dianggap hanya sebagai tradisi, tetapi pada kenyataannya, bahan yang dimanfaatkan oleh rayap tersebut dibawa jauh dari bawah lapisan tanah ke lapisan atas yang kekurangan nutrisi dan bahan tersebut kaya akan zat besi yang tersedia (yang dapat mengurangi anemia), seng (penting untuk proses penyembuhan) dan elemen lain yang menjadi pelengkap dalam kebutuhan nutrisi. Rayap dapat pergi beberapa meter ke bahan induk tanah untuk menemukan sumber air selama periode kering dan kandungan mineral pada sarangnya juga telah digunakan untuk bioprospeksi bijih (Leroux & Hambleton-Jones, 1991).

Mikroorganisme tanah, terutama yang berasal dari lingkungan ekstrim, telah menyediakan berbagai macam bahan obat dan senyawa biokimia, seperti enzim termotabil (Cragg & Newman, 2001), tetapi relatif sedikit senyawa baru yang telah diisolasi dari fauna tanah. Byzov (2006) menemukan senyawa dalam usus kaki seribu yang memiliki aktivitas bakteriolitik yang kuat, tetapi tidak mengidentifikasi sifat spesifiknya. Mira & Terezija (2007) juga menunjukkan bahwa ekstrak glikoprotein *Eisenia fetida* memiliki banyak aktivitas biologis, termasuk mitogenesis, antikoagulasi, fibrinolisis, bakteriostasis dan antioksidan. Beberapa rayap pemakan tanah memiliki sistem pencernaan yang luar biasa yang melibatkan alkali, hidrolisis anaerobik bahan organik tanah, lisis eubacteria oleh kompleks simbiosis actinomycetes, dan penyerapan produk melalui 'pori saringan' di kutikula hindgut. Karakterisasi kumpulan actinomycetes ini mengungkapkan sejumlah besar strain *Streptomyces* yang merupakan asosiasi usus yang unik. Studi awal mikroflora pada usus rayap ini dibatasi oleh teknik untuk mengidentifikasi mikroorganisme, seperti spirochetes, yang dapat dilihat dalam mikrograf elektron tetapi tidak bisa dibudayakan. Penggunaan teknik sekuensing molekuler baru pada spesies *Nasutitermes* kini telah mengungkapkan keragaman yang luar biasa dari simbiosis usus dan sekuens gen untuk enzim yang terlibat dalam hidrolisis lignoselulosa dan xilan (Warnecke et al., 2007), yang dapat memiliki aplikasi bioteknologi, termasuk pengembangan biofuel generasi kedua.

Mungkin masih banyak contoh lain yang bisa dikutip untuk nilai utilitas fauna tanah. Namun, pencarian literatur kata kunci untuk 'senyawa baru' menghasilkan tujuh temuan untuk rayap, delapan untuk cacing tanah serta tidak satu pun untuk sebagian besar

kelompok fauna tanah lainnya. Sebaliknya, ada 71 senyawa untuk moluska laut, 40 untuk karang, 94 untuk Crustacea laut dan 341 untuk ikan. Faulkner (1984) mengulas berbagai produk alami dan metabolit dari nilai komersial yang terbukti atau potensial yang diperoleh dari invertebrata laut. Mengapa ada perbedaan untuk komunitas fauna tanah yang representatif dari banyak taksa kelas utama? Alasan praktis untuk ini mungkin termasuk ukuran kecil sebagian besar invertebrata tanah dan masalah mengekstraksi massa yang cukup untuk pengujian biokimia. Namun, alasan yang lebih mendasar mungkin bahwa sifat samar habitat tanah memberikan perlindungan dari pemangsaan, sehingga kebutuhan senyawa pertahanan yang sering menjadi kepentingan farmasi berkurang. Misalnya, banyak kaki seribu epigeik memiliki pewarna aposematik dan senyawa pertahanan, termasuk benzokuinon yang sangat beracun dan karsinogenik bagi mamalia dan burung. Meskipun demikian, beberapa kaki seribu digunakan oleh monyet capuchin untuk melindungi tubuh mereka dari serangga, seperti nyamuk dan lalat (Weldon et al., 2008). Spesies kaki seribu yang sangat beracun dan sangat dicari oleh kelompok kera sehingga beberapa kera dapat berbagi (Shaer, 2015).

Nilai-nilai pilihan fauna tanah (kemungkinan penggunaan masa depan untuk tujuan ekonomi) merupakan argumen penting untuk melestarikan komunitas fauna tanah. Meskipun nilai fungsional, bukan utilitas seperti komersialisasi nematoda untuk mengendalikan siput adalah contoh dari potensi ekonomi fauna tanah yang sebagian besar belum dimanfaatkan dan menggambarkan perlunya penelitian berkelanjutan tentang ekologi fauna tanah tersebut. Alasan mempelajari fungsi fauna tanah telah banyak dijabarkan dalam berbagai pernyataan literatur yang mirip, seperti Lavelle et al. (2006) bahwa 'invertebrata tanah memainkan peran yang signifikan, tetapi sebagian besar diabaikan, dalam pemberian jasa ekosistem pada skala plot dan lanskap'.

Hal ini menjadi bahan renungan bahwa, jika peran fauna tanah invertebrata tanah signifikan mengapa mereka 'diabaikan'? Kita tahu bahwa fauna tanah juga termasuk penentu langsung dari proses biologis tanah. Namun, pengukuran proses ekosistem dilakukan pada skala spasial yang lebih besar (hektar) dan interval waktu yang lebih lama (bulan hingga tahun), laju proses terkait dengan variabel yang lebih jauh, seperti jenis vegetasi, sifat biofisik tanah (pH, mineralogi tanah, dll. .) dan akhirnya berdampak pada kondisi iklim menyebabkan peran fauna tanah tidak terlihat spesifik. Pada tingkat kontrol proses

yang lebih tinggi ini, efek organisme tanah jarang terlihat. Dua alasan utama kesulitan dalam menghubungkan aktivitas fauna tanah dengan jasa ekosistem pada skala plot dan lanskap menurut Anderson (2009) adalah: pertama, efek pengelolaan komunitas tanah dari atas ke bawah, terutama dalam sistem pertanian; kedua, hubungan antara source-sink dari proses tanah. Kedua situasi ini akan dipertimbangkan sebelum menjelaskan keadaan di mana aktivitas fauna tanah dapat muncul sebagai proses kontrol tingkat tinggi

7.2 Manajemen pertanian

Efek 'top-down' dari aktivitas manusia (polutan, kehutanan, pertanian, dll.) umumnya merusak aktivitas fauna tanah dan keanekaragaman hayati. Praktik pertanian intensif yang melibatkan input energi/senyawa eksternal yang tinggi (misalnya, pengolahan tanah) dan bahan kimia pertanian, yang sebagian besar bertanggung jawab atas produksi pangan global, mengesampingkan kontrol biologis pada proses tanah dan mengurangi fauna tanah dan keanekaragaman mikroba. Namun demikian, keanekaragaman hayati tanah dapat dipertahankan atau dipulihkan dengan praktik pertanian organik; khususnya dengan pengurangan atau tanpa pengolahan tanah. Sebuah studi ekstensif praktik pertanian organik oleh Birkhofer et al., (2008) menunjukkan bahwa pertanian organik jangka panjang menggunakan pupuk kandang meningkatkan kualitas tanah, meningkatkan biomassa mikroba tanah, kelimpahan cacing tanah dan pengendalian hama biologis. Namun, mereka menyimpulkan bahwa produksi biji-bijian akan lebih tinggi dalam sistem yang menerima pupuk mineral dan herbisida, yang mencerminkan keseimbangan antara produktivitas dan tanggung jawab lingkungan. Demikian pula, sebuah studi tentang produksi hijauan oleh padang rumput pertanian di Inggris selama lebih dari 20 tahun (Clements et al., 1991) menunjukkan bahwa eliminasi cacing tanah dari plot yang diobati dengan fungisida mengakibatkan perubahan struktur tanah, kerapatan curah, sifat hidrologi, serasah permukaan dan dinamika bahan organik tanah – semua atribut yang kami kaitkan dengan pentingnya aktivitas cacing tanah. Namun, produksi rumput secara signifikan lebih tinggi di plot tanpa cacing tanah, karena struktur tanah dan kesuburan tidak menjadi kendala untuk produksi rumputan. Contoh-contoh ini menyarankan perlunya spesifik tentang keadaan tertentu di mana fauna tanah dapat meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman, dan bahwa ada

sistem dan skala di mana aktivitas mereka mungkin tidak terlihat oleh pemangku kepentingan lainnya.

7.3 Sinkronisasi Tingkat Trofik

Sebagian besar pemahaman kita tentang peran fauna tanah dalam proses dekomposisi, mineralisasi karbon dan siklus nutrisi telah diturunkan dari mikrokosmos laboratorium, studi dekomposisi menggunakan kantong sampah, eksperimen manipulatif lapangan, invasi fauna tanah dan introduksi ke habitat baru. Dalam setiap kasus ini, sinkronisasi aktivitas fauna tanah memperkuat besaran dan persepsi efeknya. Biasanya, ketika fauna tanah ditambahkan ke mikrokosmos dengan garis dasar aktivitas mikroba, dengan adanya peningkatan mineralisasi karbon atau nutrisi. Pola respon yang sama terjadi pada skala lapangan, ketika cacing tanah lumbricid diperkenalkan ke padang rumput Selandia Baru. Hal ini menghasilkan peningkatan awal yang besar dalam produksi rumput sebagai konsekuensi dari penggabungan jerami dan peningkatan kedalaman perakaran, tetapi turun ke tingkat berkelanjutan yang lebih rendah setelah beberapa musim (Stork and eggleton, 1992). Pola aktivitas ini juga khas untuk efek invasi hewan atau wabah hama, dan dengan sistem mencapai keseimbangan baru karena keterbatasan sumber daya, persaingan dan pemangsaan mulai membatasi populasi. Ini juga menjadi alasan mengapa hasil eksperimen mikrokosmos harus ditafsirkan dengan hati-hati. Hal ini tidak hanya mencegah suksesi alami spesies fauna dan mikroba, tetapi juga keseimbangan antara populasi hewan dan sumber makanannya. Mencegah penyebaran dapat menyebabkan efek 'pigsty' di mana hewan dapat dipaksa melakukan coprophagy, intensitas makan yang lebih tinggi pada makanan suboptimal atau lainnya. Perilaku trofik pola makan yang tidak alami, menghasilkan tingkat proses yang meningkat secara artifisial. Aktivitas fauna tanah juga diselaraskan oleh beberapa peristiwa lingkungan. Misalnya, penempatan kantong serasah atau mulsa membentuk kelompok bahan tertentu yang menghasilkan suksesi fauna dan aktivitas makan yang akan sulit diukur (Anderson, 2009).

Demikian pula, sinkronisasi trofik terjadi di mana patch sumber daya, seperti kotoran disimpan di permukaan tanah dan menyebabkan agregasi sementara pada fauna tanah. hal ini bertahan selama sumber daya dapat dieksploitasi, sehingga semakin besar sumber daya dan semakin lama durasinya, semakin besar efek yang dimiliki fauna

tanah terhadap struktur tanah di bawahnya. Hubungan ini khususnya ditandai untuk pemakan kayu *Macrotermitinae*, di mana eksploitasi pohon mati besar dalam jangka waktu lama dapat mengakibatkan terciptanya terowongan besar yang berfungsi sebagai saluran air. Demikian pula, agregasi cacing tanah di bawah kotoran di padang rumput secara signifikan meningkatkan porositas dan tingkat infiltrasi air permukaan (Grammatikopoulou et al., 2015). Saat kotoran itu hancur, cacing tanah menyebar dan pori-pori tanah yang mereka buat dan diisi dengan partikel tanah serta ditutup dengan ternak yang menginjak-injak. Oleh karena itu, ada mosaik dinamis dari tambalan makropori yang menggradasi dan menurunkan kepadatan cacing tanah di padang rumput yang ditentukan oleh jumlah ternak dan tingkat pemberian makan.

Dalam semua kasus ini, transisi dalam laju proses dari satu keadaan ke keadaan lain yang memungkinkan kita untuk mengidentifikasi 'sinyal' efek fauna tanah tertentu terhadap 'kebisingan' latar belakang yang dihasilkan oleh fungsi umum fauna tanah dan komunitas mikroba. perekayasa ekosistem, terutama cacing tanah dan rayap, adalah kasus khusus di mana efek fisik kumulatif dari aktivitas makan dan menggali mereka dapat secara signifikan mempengaruhi struktur tanah dan hidrologi (seperti yang disebutkan di atas). Sekali lagi, contoh paling jelas dari jasa ekosistem yang mempengaruhi sifat dan proses tanah berada dalam situasi 'tidak seimbang' di mana populasi mereka dikumpulkan oleh sumber makanan lokal (mulsa, serasah, kotoran) atau aktivitas mereka memiliki inisiasi yang ditentukan yang disebabkan oleh introduksi, invasi atau eliminasi.

BIODIVERSITAS TANAH DAN PERUBAHAN PENGGUNAAN LAHAN

8.1 Hutan dan padang rumput

Terlepas dari kenyataan bahwa mayoritas penduduk tinggal di daerah perkotaan, dimana sebagian masyarakat telah terdoktrin untuk merantau ke kota dalam rangka meningkatkan kesejahteraan hidup. Kota telah menyediakan berbagai fasilitas untuk meningkatkan taraf hidup untuk pemenuhan kebutuhan. Walaupun demikian, Wilayah Indonesia juga masih banyak terdapat daerah pedesaan, hutan, dan daerah (semi) alami. Daerah pedesaan terutama terdiri dari mosaik lahan pertanian, padang rumput, dan kebun buah-buahan. Dalam 10 tahun mendatang, kami memperkirakan bahwa wilayah Indonesia akan ada peningkatan total kawasan hutan, dan wilayah pertanian yang sesuai dengan program keberlanjutan. Respons komunitas tanah terhadap perubahan penggunaan lahan membutuhkan waktu lebih lama daripada perubahan awal vegetasi, sehingga pencegahan dan pelestarian (konservasi) telah dipikirkan dan dilaksanakan dari sekarang bahkan jauh hari sebelumnya untuk mencapai pertanian yang berkelanjutan.

Diperlukan waktu yang cukup lama, bahkan hingga bertahun-tahun bagi komunitas tanah untuk beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang berubah. Hal ini sebagian karena pertumbuhan dan perkembangan populasi sangat lambat dan sebagian disebabkan membutuhkan banyak waktu untuk membangun bahan organik tanah serta, sebagian lainnya disebabkan beberapa organisme tanah perlu menyebar ke tanah yang telah mengalami perubahan (gangguan) atau diubah oleh penggunaannya. Dengan demikian, penggunaan lahan dapat berubah dari satu hari ke hari lainnya, tetapi mungkin diperlukan waktu bertahun-tahun hingga beberapa dekade bagi keanekaragaman hayati tanah untuk mengikuti dan membangun keseimbangan baru. Ini juga akan memakan waktu bertahun-tahun, atau lebih mungkin dekade, agar jasa ekosistem diubah kembali seperti semula sesuai dengan kondisi awal.



Gambar 28. Deforestasi hutan dan degradasi fauna tanah

Hutan alam adalah jenis kawasan alami yang paling umum dan tersebar di berbagai wilayah belahan dunia. Tanah hutan dicirikan oleh sistem akar yang luas dan lapisan serasah daun yang menyediakan habitat dan makanan bagi fauna tanah. Hutan juga menawarkan iklim mikro pelindung, dimana sebagian besar ditandai dengan penurunan suhu ekstrem, penurunan ketersediaan cahaya, penurunan kecepatan angin, dan peningkatan kelembaban. Tanah hutan biasanya cukup sebagai penyangga dan biasanya memiliki lingkungan yang sangat tua, yang cenderung menjadi tuan rumah komunitas tanah yang sangat beragam. Tanah hutan memiliki kecenderungan aerasi yang baik dan memungkinkan terjadinya pertukaran ion, mendukung keanekaragaman hayati tanah yang tinggi. Tanah hutan menunjukkan rasio C:N yang tinggi dan umumnya dicirikan oleh jaring makanan yang didominasi jamur (rasio biomassa jamur dan bakteri berkisar antara 5:1 hingga 10:1 di hutan gugur), jamur -makan protista dan nematoda, dan kepadatan tinggi mikroartropoda dan cacing tanah anesik (Bardgett 2005). Namun, komunitas cacing tanah di hutan tidak terlalu beragam: hanya beberapa spesies umum yang ditemukan dan berasosiasi dengan lingkungan hutan serta spesies lain hanya dapat ditemukan dalam kondisi kepadatan yang rendah (Watt 2004). Tanah hutan jenis konifera sebaliknya memiliki aktivitas biologis yang lebih rendah, karena kondisi asam membatasi aktivitas mikroba. Dibandingkan dengan tanah hutan gugur, tanah ini lebih didominasi jamur, dengan rasio biomassa jamur dan bakteri mencapai 100:1 atau 1000:1 (Coleman et al. 2008). Komunitas perekayasa ekosistem didominasi oleh cacing tanah epigeik dan enchytraeid (Lavelle et al. 1997).

Rasio C:N adalah jumlah karbon relatif terhadap jumlah nitrogen yang ada dalam bahan organik tanah. Selalu lebih banyak karbon daripada nitrogen dalam kandungan bahan organik, dan rasio rendah berarti jumlah karbon mendekati jumlah nitrogen, sedangkan rasio tinggi berarti bahwa ada massa karbon yang jauh lebih tinggi untuk setiap gram nitrogen dalam bahan organik. Rasio C:N daun biasanya jauh lebih rendah daripada kayu, setidaknya dalam urutan besarnya (Snowdon 2005).

Rasio C:N menentukan apa yang terjadi ketika bahan organik dimasukkan ke dalam tanah. Rasio C:N adalah ukuran kualitas bahan organik tanah yang mempengaruhi laju dekomposisi. Dekomposisi dapat terjadi baik melalui jamur atau melalui jalur berbasis bakteri. Jamur memiliki rasio C:N yang lebih tinggi daripada kebanyakan bakteri (de Vries et al. 2006). Oleh karena itu, jamur cenderung lebih menyukai makanan yang kaya akan karbon, seperti: selulosa, sedangkan bakteri cenderung menyukai makanan yang kaya nitrogen, seperti daun tanaman. Selain itu, jamur biasanya memiliki tingkat pergantian yang lebih lambat daripada bakteri. Akibatnya, rasio C:N yang tinggi dapat menyebabkan dekomposisi yang didominasi jamur dan mineralisasi nitrogen yang lebih rendah daripada dekomposisi bakteri. Pada setiap tahap dekomposisi, defisiensi unsur hara dapat membatasi aktivitas mikroba dan dengan demikian menghalangi pelepasan unsur hara dan unsur-unsur lain ke tanaman dan organisme tanah lainnya. Ini terjadi ketika rasio C:N dari penguraian sumber daya tinggi dibandingkan dengan perekayasa kimia. Memang, dalam hal ini nitrogen membatasi, dan digunakan oleh para perekayasa kimia untuk pertumbuhan, dan tidak tersedia untuk tanaman (Lavelle, 2001). Ini menjelaskan mengapa sistem pertanian memerlukan pupuk nitrogen, serta pengayaan bahan organik dengan kadar sedang pada rasio C:N.

Padang rumput adalah tanah yang ditutupi oleh vegetasi yang didominasi rumput, dan sedikit atau tidak ada tutupan pohon. Berbagai jenis padang rumput tersedia diberbagai wilayah, mulai dari yang hampir mirip gurun, melalui jenis stepa dan mesic hingga padang rumput lembab dan padang rumput yang mendominasi di Utara dan Barat Laut. Sebagian besar padang rumput dapat didefinisikan sebagai 'padang rumput semi-alami', karena mereka ditutupi dengan rumput yang ditaburkan dan rumput yang ditujukan untuk menghasilkan hijauan untuk ternak. Padang rumput dimodifikasi dan dipelihara melalui penggembalaan dan/atau sistem tebang petani. Intensitas dan jenis praktik pengelolaan lahan oleh para petani relatif bervariasi

sesuai dengan penggunaannya. Sebagian besar sistem padang rumput dikelola dengan moderat, sementara sebagian besar lainnya sistem yang dipangkas dikelola secara intensif. Pengelolaan padang rumput bervariasi khususnya, sehubungan dengan sifat dan kuantitas input pupuk.

Tanah padang rumput menyajikan keanekaragaman hayati tanah terkaya dan perlu dipertimbangkan untuk memasukkan padang rumput yang lebih tahan lama dalam rotasi tanaman yang subur untuk memulihkan tingkat karbon dan keanekaragaman hayati tanah, serta layanan penekan penyakit (Garbeva et al., 2004). Padang rumput dicirikan oleh sistem perakaran yang ekstensif dan pada umumnya jumlah serasah daun yang terbatas yang mendukung keanekaragaman dan biomassa nematoda, mikroarthropoda, dan cacing tanah yang tinggi pada khususnya. Mengingat rendahnya tingkat serasah daun, padang rumput dicirikan oleh sistem ekologi dan aliran nutrisi yang didominasi jamur dengan biomassa mikroba mirip dengan hutan, tetapi tidak ada jamur pelapuk kayu (Tugel et al., 2000). Komunitas regulator biologis sangat aktif, dan didominasi oleh mikroarthropoda pemakan jamur, protista dan nematoda. Padang rumput umumnya menampung komunitas cacing tanah yang paling beragam dan melimpah, dengan beberapa komunitas didominasi oleh spesies endogeik dan lainnya oleh spesies anekik. Di padang rumput beriklim sedang, sebagian besar biomassa dapat dijelaskan oleh satu famili cacing tanah, Lumbricidae, yang dapat mewakili 70-80% dari total biomassa tanah dalam sistem pengolahan tanah rendah (Ruiz Camacho 2004).

8.2 Konversi Hutan Menjadi Areal Pertanian Tanah Tropika Basah

Ekosistem hutan berperan dalam mempertahankan sebagian besar keanekaragaman hayati terestrial di seluruh dunia. Kehidupan manusia akan bergantung pada keberlanjutan fungsi ekosistem hutan (MEA, 2005). Deforestasi dan degradasi hutan dapat sangat mempengaruhi keanekaragaman hayati terestrial dan praktik komersial yang bergantung pada hutan. Secara khusus, hutan hujan tropik yang ditunjuk sebagai tempat konservasi keanekaragaman hayati oleh Konservasi Internasional telah terbukti mengalami hilangnya habitat yang ekstrim dan dalam skala yang luas serta jumlah spesies endemik yang luar biasa (Myers *et al.* 2000).

Indonesia (dengan total luas 191,9 M ha, termasuk 9,2 M ha air laut) memiliki wilayah bioma hutan hujan tropik yang cukup luas

di dunia (FAO, 2015). Negara ini ditandai oleh hutan rindang kaya di sepanjang garis pantai, hutan hujan tropik dataran rendah, hutan pegunungan di pedalaman Sumatera, Sulawesi, dan Kalimantan, dan vegetasi Gunung Alpin di Papua. Selain itu, bagian selatan Kalimantan dan Pulau Sumatera mengakomodasi daerah hutan rawa gambut yang luas. Berdasarkan komposisi tanaman yang terkait dengan tipe tanah, kondisi air tanah, dan elevasi, Kartawinata (2005) mengklasifikasikan tanah di Indonesia menjadi 12 jenis vegetasi. Klasifikasi tersebut mulai dari mangrove dan vegetasi littoral dalam air garam ke subalpin dan padang rumput.

Tekanan terhadap sumber daya hutan cenderung semakin meningkat. Deforestasi dan degradasi hutan merupakan penyebab utama kerusakan sumber daya hutan di Indonesia. Deforestasi dan degradasi hutan di Indonesia antara lain disebabkan oleh: (a) kebakaran dan perambahan hutan, (b) *illegal logging* dan *illegal trading* yang didorong oleh permintaan yang tinggi terhadap kayu dan hasil hutan lainnya di pasar lokal, nasional dan global, (c) konversi kawasan hutan secara permanen untuk pertanian, perkebunan, pemukiman, dan keperluan lain, (d) penggunaan kawasan hutan di luar sektor kehutanan melalui pinjam pakai kawasan hutan, dan (e) pemanenan hasil hutan yang tidak memperhatikan prinsip-prinsip pengelolaan hutan lestari (PHL) (Wibowo and Gintings, 2009).

Banyak sekali dampak yang ditimbulkan dari alih fungsi hutan menjadi areal perkebunan ataupun pertanian. Salah satunya hilangnya keseimbangan ekosistem alami pada hutan tersebut. Sebagian besar komunitas fauna tanah maupun satwa liar akan beralih habitat, bahkan hilang dan mati sebagai akibat tidak terpenuhinya nutrisi. Dengan kata lain, implikasi proses degradasi lahan di daerah tropika akibat deforestasi sangat rumit, unik dan belum banyak dipublikasikan. Lebih-lebih jika dikaitkan dengan proses kepunahan biodiversitas, baik pada taraf ekosistem, spesies maupun gen. Oleh karena itu kajian tentang hal ini masih sangat dibutuhkan (FAO, 2015). Berikut gambar alih fungsi lahan hutan menjadi areal pertanian pada lahan miring (Gambar 29).

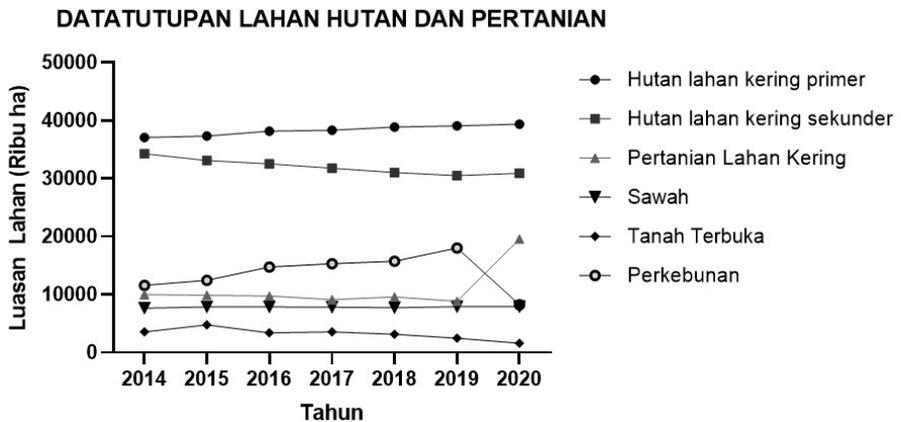


Gambar 29. Alih Fungsi lahan hutan menjadi areal pertanian yang berpotensi menimbulkan bencana (Zuraya, 2019)

Berbagai jenis organisme tanah yang umumnya anggota fauna tanah dilaporkan berperan penting dalam ekosistem terestrial, terutama di daerah tropika. Fauna tanah merupakan kelompok biota tanah yang sebagian atau seluruh siklus hidupnya berada di dalam tanah. Fauna tanah merupakan salah satu penyusun biodiversitas tanah serta berperan penting dalam perbaikan sifat fisika, kimia dan biologi tanah. Dalam hal ini proses dekomposisi serasah merupakan proses penting yang mendorong terjadinya siklus biogeokimia untuk menjaga keseimbangan ekosistem. Diversitas fauna tanah dan fungsi ekosistem menunjukkan hubungan yang sangat kompleks dan belum banyak diketahui. Tanah yang terdegradasi umumnya menunjukkan penurunan kompleksitas dan biomassa fauna tanah. Mengingat tingginya peranan fauna tanah serta spesifikasi fungsinya maka beberapa ahli telah mempromosikan fauna tanah sebagai bioindikator kesehatan tanah.

Selain itu, sebagian serangga tanah dan fauna tanah lainnya pada hutan hujan tropik dapat bertindak sebagai hama bagi tanaman pertanian. Apabila terjadi konversi hutan menjadi areal pertanian,

akan sangat diperlukan perlindungan intensif terhadap tanaman produksi dari serangan hama. Tindakan preventif yang dilakukan tidak hanya menggunakan proteksi secara fisik maupun biologi, melainkan menggunakan senyawa kimia yang berbahaya bagi lingkungan. Agar kerugian karena serangga dapat ditekan dan agar kelestarian hasil hutan alam dapat tercapai, upaya perlu dilakukan untuk memberikan kondisi agar peledakkan populasi serangga yang merugikan dapat ditekan. Menghilangkan sama sekali serangga hama di dalam hutan alam tidaklah mungkin. Hal yang dapat dilakukan adalah mengembangkan teknik silvikultur untuk menciptakan kondisi dalam hutan yang tidak memacu peningkatan jumlah serangga hingga mencapai tingkat yang merugikan. Berikut data tutupan lahan hutan dan pertanian (Gambar 30).



Gambar 30. Grafik Luasan Areal hutan dan Lahan Pertanian tahun 2014-2020 (Sumber BPS)

Gambar 30 menunjukkan data tutupan lahan hutan dan pertanian di Indonesia dalam periode waktu 2014-2020. Data luasan lahan tutupan hutan menjadi yang tertinggi serta memiliki kecenderungan yang stabil setiap tahunnya, dimana luasan tutupan hutan lahan kering primer cenderung meningkat di tahun 2020 dan luasan hutan lahan kering sekunder cenderung mengalami penurunan yang tidak signifikan pada tahun 2020 jika dilihat trend nya sejak tahun 2014. Luasan tutupan lahan yang meningkat pada lahan pertanian ditunjukkan pada areal lahan pertanian kering dari tahun 2019 hingga tahun 2020. Sebaliknya luasan tutupan lahan perkebunan mengalami penurunan

dari tahun 2019 ke tahun 2020. Kestabilan luasan tutupan lahan hutan dan berkurangnya luasan lahan perkebunan menjadi modal yang meyakinkan untuk pelaksanaan konservasi keanekaragaman fauna tanah, dimana hutan merupakan rumah bagi sebagian besar fauna tanah.

Kawasan hutan Ulu Gadut, bukit Pinang-Pinang merupakan salah satu kawasan hutan hujan tropik yang terletak pada jajaran Bukit Barisan, Padang, Sumatera Barat. Kawasan tersebut terletak \pm 17 km kearah Timur dari kota Padang, Sumatera Barat, dengan lokasi $0^{\circ}55'LS$, $100^{\circ}30'BT$. Pada kawasan Ulu Gadut terdapat plot-plot pengamatan vegetasi hutan di antaranya plot Pinang-Pinang yang terletak pada kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang (Nishimura *et al.* 2006). Kawasan Bukit Pinang-Pinang adalah salah satu contoh perubahan penggunaan lahan hutan menjadi kawasan pertanian.

Sama halnya dengan kawasan hutan lainnya di Indonesia, kawasan hutan Ulu Gadut juga tak lepas dari berbagai gangguan dan ancaman seperti *illegal logging*, perambahan hutan, dan pengerusakan lahan untuk perladangan dan pertanian. Peningkatan aksesibilitas dan pengembangan ekonomi di sekitar kawasan Ulu Gadut sebagai salah satu kawasan pertambangan, pertanian, peternakkan, dan pemukiman di Sumatera Barat, khususnya Kota Padang dalam kurun waktu beberapa tahun ini telah menjadikan ancaman yang serius terhadap kawasan hutan Ulu Gadut. Oleh karena itu, penelitian terkait dengan mitigasi bencana alam sektor kehutanan sangat dibutuhkan guna mengantisipasi dampak perubahan penggunaan lahan terhadap lingkungan disekitar kawasan Ulu Gadut (Rafdinal *et al.* 2015).

Pinang-Pinang merupakan suatu plot observasi sekaligus nama suatu bukit yang terletak pada kawasan Ulu Gadut untuk berbagai kajian bidang ekologi tanah dan hutan yang dibuat oleh ahli ekologi Universitas Andalas dan Jepang (Hotta, 1984). Lokasi ini tepatnya berada di daerah Koto Baru, Kecamatan Pauh. Secara geografi, berada pada koordinat $100^{\circ}29'40''$ dan $100^{\circ}30'20''$ BT dan di antara $0^{\circ}54'55''$ dan $0^{\circ}54'45''$ LS. Plot ini berlokasi di sekitar puncak bukit dengan memiliki puncak yang sebagian sempit dan sebagian lagi relatif luas yang berada pada ketinggian 460-650 mdpl. Daerah ini memiliki iklim Monsoon (musim hujan) tropik basah dengan rata-rata suhu tahunan $27^{\circ}C$ (perbedaan suhu relatif $< 2^{\circ}C$ antara musim hujan dan kemarau). Kelembaban relatif setiap bulan adalah 73-80% dengan rata-rata kelembaban tahunan adalah 77%.

Pada plot ini, telah dilakukan berbagai macam penelitian secara terus-menerus seperti yang dilakukan oleh Hotta (1989) terkait keanekaragaman pohon, Masunaga *et al.* (1998) melakukan penelitian terkait potensi tumbuhan *hyperaccumulator*, Hermansah *et al.* (2003) terkait siklus hara tanah dan *soil chemical properties*, Tahirna, (2012) tentang akumulasi dan fraksinasi serasah; Mukhtar *et al.* (2013) terkait komposisi spesies tanaman dan stok karbon serta masih banyak lagi penelitian lainnya. Kubota *et al.* (1998) menyatakan bahwa tumbuhan yang terdapat pada plot penelitian ini memiliki spesies tumbuhan yang beragam dan memiliki kanopi yang rapat. Dalam 1 ha, ditemukan 892 pohon tumbuhan yang berdiameter >10 cm. Pinang-Pinang memiliki ciri-ciri antara lain : 1) dikategorikan sebagai tanah yang baru berkembang dari ordo inceptisol yang memiliki karakteristik tanah berwarna merah, masam, relatif tinggi kandungan karbon, nitrogen, kapasitas tukar kation dan kation-kation basa terutama sekali kalsium. 2) curah hujan relatif tinggi, yaitu 6500 mm/tahun, tanpa musim kering yang nyata merupakan daerah peralihan yang dicirikan dengan keragaman bahan induk seperti bahan metamorfik, batuan andesit dan batuan kapur, di samping itu kaya dengan spesies tumbuhan (Hermansah *et al.* 2003).

Berdasarkan hasil observasi lapangan, dapat dikemukakan bahwa lokasi penelitian merupakan daerah yang mengalami alih fungsi lahan. Dari hasil survei dan *interview* yang dilakukan dengan petani setempat, alih fungsi lahan ini telah terjadi semenjak puluhan tahun yang lalu. Adapun kondisi kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang saat ini telah berubah menjadi beberapa tipe penggunaan lahan, antara lain hutan, areal terbuka, kebun campuran, dan kebun monokultur.



Ket. A. Hutan, B. Areal terbuka, C. Kebun campuran, D. Monokultur.

Gambar 31. Gambaran umum daerah penelitian kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang.

Pada tipe lahan terbuka, terlihat bekas tebangan pohon yang dilakukan warga dalam rangka membersihkan lahan untuk dijadikan sebagai areal pertanian. Masyarakat lokal menggunakan *chain saw*, parang dan arit untuk menebang pohon dan membersihkan lahan. Pembukaan lahan dilakukan secara tradisional dengan peralatan konvensional. Akan tetapi, setelah lahan dibuka, masyarakat cenderung membiarkannya tanpa diolah, sehingga menyebabkan rumput dan tanaman perdu tumbuh kembali serta mengharuskan mereka untuk melakukan pembersihan lahan kembali di beberapa bulan/tahun berikutnya. Perilaku ini terus dilakukan oleh warga lokal terhadap lahan yang sama, karena lahan tersebut ditinggalkan dan dibiarkan terbuka setelah dilakukan penebangan pohon. Gambaran umum lokasi penelitian pada masing-masing tipe penggunaan lahan kawasan hutan hujan tropik Bukit Pinang-Pinang disajikan pada Gambar 31.

Selanjutnya pada tipe lahan kebun campuran terletak berdekatan dengan lahan terbuka. Pada tipe lahan ini, banyak tumbuh tanaman buah-buahan yang beranekaragam, antara lain manggis (*Garcinia mangostana*), kakao (*Theobroma cacao*), sawo (*Manilkara zapota*),

durian (*Durio zibethinus*), pisang (*Musa acuminata*), kayu manis (*Cinnamomum burmani*), jambu air (*Syzygium aqueum*), duku (*Lansium domesticum*) dan kopi (*Coffea canephora*). Kakao, kayu manis, sawo dan pisang sengaja ditanam sendiri sedangkan manggis, durian, jambu dan kopi telah tumbuh sebelumnya. Berdasarkan hasil *interview* dengan petani, budi daya tanaman buah pada kebun campuran tidak dilakukan dengan menggunakan senyawa kimia secara terus menerus, melainkan pestisida hanya digunakan pada waktu terjadi serangan hama yang intensif, sedangkan untuk pengendalian gulma dilakukan secara mekanis dengan menggunakan parang dan arit. Selain itu, penanaman tanaman buah dilakukan dengan menggunakan pupuk kandang sehingga lebih ramah lingkungan. Pada kondisi sekarang, tipe lahan kebun campuran terlihat banyak ditumbuhi oleh tumbuhan liar secara alami yang didominasi oleh kirinyuh (*Chromolaena odorata*) dan kelompok tanaman legum.

Tipe lahan kebun monokultur bersebelahan dengan kebun campuran lebih tepatnya berada di bawah kebun campuran. Pada tipe lahan ini, ditanami hanya satu jenis tanaman budi daya, yaitu tanaman kakao (*Theobroma cacao*). Budidaya tanaman kakao telah lama dilakukan sejak tahun 2010 dengan luas areal \pm 1 ha. Budidaya tanaman dilakukan secara intensif dengan menggunakan senyawa kimia pestisida untuk perlindungan tanaman (biasanya dilakukan 2 kali setahun). Selain itu, juga dilakukan pemberian pupuk kandang maupun anorganik untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta produksi buah kakao.

Terlepas dari banyak manfaat sosial yang diberikan oleh lahan tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis, kita hidup di era perubahan ekologi yang belum pernah terjadi sebelumnya yang dinamai Antroposen, dimana aktivitas manusia mulai memiliki pengaruh global terhadap ekosistem bumi. Konversi langsung lahan hutan ke penggunaan lahan lain adalah ancaman paling langsung terhadap suatu wilayah terutama kawasan hutan hujan tropis. Jika tidak ada perlindungan hukum, kawasan hutan hujan tropis sebagai penyimpanan cadangan air, udara dan keanekaragaman pohon maupun biota di seluruh dunia sering diubah menjadi dataran tinggi maupun kawasan perkebunan, yang mengakibatkan hilangnya jasa ekosistem yang penting. Namun, peningkatan kebutuhan manusia akan air untuk mendukung pertanian, industri, dan kota juga merupakan pendorong perubahan yang signifikan di lahan tropis. Populasi manusia bertambah, yang berarti bahwa permintaan akan air tawar meningkat

sehingga lebih terbatas air tawar yang tersedia untuk lahan. Nilai jasa ekosistem yang disediakan oleh lahan tropis melalui komunitas tanah haruslah menjadi perhatian penting yang dituangkan ke dalam kebijakan yang berpihak pada konservasi lingkungan dan pertanian berkelanjutan.

8.3 Konversi Hutan Menjadi Areal Pertambangan

Deforestasi telah membawa hutan berubah menjadi berbagai tipe lahan yang bervariasi dengan kegunaan yang juga beragam. Tentunya gangguan pada habitat alami tersebut berpengaruh terhadap aktivitas, sebaran, kelimpahan dan keanekaragaman hayati tanah, terutama fauna tanah yang sensitif terhadap perubahan lingkungan. Di sini kami melihat bahwa potensi terbesar pengurangan fauna tanah juga terjadi pada perubahan penggunaan lahan hutan menjadi areal industri, terutama efek dari aktivitas industri tersebut dan pengaruh limbah pabrik yang dihasilkan. Aktivitas produksi industri dan limbah yang dihasilkan memiliki tingkat kontaminasi yang relatif tinggi, terutama logam.

Perhatian terhadap kondisi lingkungan alami (fauna tanah) seringkali tidak dipertimbangkan untuk pengelolaan areal yang terkontaminasi tersebut, meskipun hal tersebut justru akan menjadi potensi solusi yang berharga dan lebih hemat biaya. pengembangan jasa ekosistem dan penggunaan proses alami yang menjadi landasan restorasi dapat dilakukan pada situs-situs tersebut, asalkan kondisinya tidak terlalu buruk dan tidak akan menghasilkan dampak negatif pada lingkungan sekitar terutama potensi dampak negatif terhadap lingkungan sekitar, misalnya kontaminasi badan air atau penurunan keanekaragaman hayati

Ekosistem hutan dapat secara spontan membentuk identitas diri mereka sendiri di bekas lokasi industri terkontaminasi oleh logam yang tidak digunakan lagi (terbengkalai). Selain itu upaya restorasi dan remediasi dapat menjadi alternatif untuk mengembalikan habitat alami komunitas tanah (terutama fauna tanah). Pengelolaan yang efektif dari situs-situs ini dengan atenuasi alami membutuhkan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antara keanekaragaman hayati tanah, logam dan fungsi tanah dalam ekosistem tersebut. Dalam konteks ini, ekosistem hutan akan tumbuh di atas produk sampingan industri besi atau pada lahan yang mengandung logam yang berpotensi toksik.

Komunitas fauna di lapisan atas tanah dicirikan oleh kelimpahan dan keragaman taksonomi yang tinggi, tetapi juga oleh dominasi epigeon yang tidak biasa. Kelompok epigion ini umumnya juga dikelompokkan sebagai fauna tanah lapisan permukaan. Umumnya pada lapisan atas permukaan tanah kelompok fauna tanah detritivora dan epigeik mendominasi, dimana struktur komunitas sebagian fauna tanah tersebut dijelaskan oleh kehadiran logam berat (Zn, Cd) juga Fe dan Mn yang merupakan logam dominan dalam produk sampingan industri besi. Struktur komunitas makrofauna tanah yang tidak umum dapat ikut berpengaruh pada fungsi tanah, seperti membatasi penggabungan dan pencampuran bahan organik ke dalam tanah. Selain itu, komunitas mesofauna berkontribusi pada redistribusi logam dalam tanah dengan mengintegrasikan logam ke dalam asosiasi organo-mineral (Hout et al., 2017). Kajian tersebut menghasilkan dan menunjukkan kelayakan penggunaan atenuasi alami untuk mengelola lokasi dengan kandungan logam yang tinggi dengan ketersediaan logam rendah dan lebih menguntungkan. Kondisi yang menguntungkan untuk pertumbuhan tanaman, dimana tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang dengan baik. Namun, pengaruhnya terhadap biota tanah dilihat dari mobilitas biota tanah pada mobilitas logam dan fungsi tanah perlu diselidiki lebih lanjut untuk menilai keberlanjutan pengelolaan tersebut.

Keanekaragaman hayati tanah di lokasi yang terkontaminasi logam sangat kompleks dan mungkin ataupun tidak mencerminkan gradien kandungan logam total tanah (Caruso and Bishop, 2009). Di beberapa tanah yang terkontaminasi, beberapa organisme dapat diamati karena kelompok organisme tersebut telah beradaptasi dengan keberadaan kandungan logam tanah (Lanno et al., 2004). Dampak kontaminan pada biota tanah sangat terkait dengan bioavailabilitasnya, yang tergantung pada beberapa faktor termasuk sifat tanah dan sensitivitas spesies (Nahmani et al., 2007). Kontaminasi logam dapat sangat mempengaruhi komunitas fauna, mendorong perubahan struktur komunitas. Perubahan komposisi komunitas ini dapat disebabkan sebagian diantaranya terkait dengan modifikasi vegetasi yang berkaitan dengan kualitas dan kuantitas bahan organik yang juga disebabkan oleh kontaminasi tanah

Pada gilirannya, keberadaan bahan organik dalam jumlah kuantitas maupun kualitas yang tinggi juga dapat mengimbangi efek logam yang berpotensi merusak komunitas fauna tanah. Sebagai contoh pada tanah perkotaan dapat mendukung kehidupan dan kelimpahan

komunitas kolembola yang sebanding dengan tanah hutan meskipun terjadi polusi tanah karena mereka disukai oleh akumulasi bahan organik (Santorufu et al., 2012).

Selain itu, perubahan struktur komunitas fauna tanah juga terjadi di areal tambang atau bahan galian. Campur tangan deforestasi merupakan awal menurunnya kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah. Untuk mempelajari perkembangan edaphon, terutama fauna tanah yang hidup pada lapisan permukaan tanah perlu digunakan habitat ekstrim yang berbeda dari lanskap lainnya yaitu lahan tambang bahan galian. Pemahaman karakteristik tanah penting untuk menentukan alternatif strategi pengelolaan lahan, khususnya yang terkait dengan skema konservasi. Temuan ini menunjukkan adanya variasi karakteristik tanah yang tinggi dari berbagai tutupan lahan yang berbeda di sekitar area konsesi pertambangan. Oleh karena itu, disarankan bagi pengelola untuk menerapkan strategi adaptif dalam mendukung upaya konservasi tanah berdasarkan karakteristik tanah di setiap lokasi. Tanah merupakan komponen sumber daya alam yang memegang peranan penting dalam menjaga kestabilan lingkungan. Selain memasok air dan unsur hara bagi tanaman, tanah juga memiliki kontribusi yang mendasar dalam fundamental dalam mendukung siklus biogeokimia dan aliran energi dalam ekosistem melalui komponen komunitas tanah di dalamnya (Smith et al., 2021).

Sejumlah penelitian juga melaporkan bahwa karakteristik tanah berkorelasi langsung dengan kerentanan terhadap bencana alam bencana alam seperti banjir dan tanah longsor (Djukem et al., 2020). Mempertimbangkan posisi strategis tersebut, maka penting untuk menerapkan upaya konservasi tanah dengan tidak hanya memperhatikan aspek vegetasi yang tumbuh di atas permukaan tanah melainkan juga komunitas tanah. Walaupun keterkaitan komunitas tanah terhadap bencana alam yang ditimbulkan tidak berhubungan secara langsung, akan tetapi komunitas tanah kunci dari kestabilan ekosistem pada tanah dengan kontribusinya dalam menjaga stabilitas pasokan air tanah dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Smith et al., 2021).

Tantangan ini telah menjadi isu yang paling esensial di banyak sektor komersial, salah satunya adalah industri pertambangan seperti yang telah disampaikan sebelumnya. Keberadaan bisnis pertambangan telah memberikan kontribusi yang tinggi terhadap peningkatan produk domestik bruto dan pertumbuhan ekonomi

bangsa. Industri ini juga memberikan banyak peluang kerja bagi masyarakat yang tinggal di sekitar konsesinya. Bahkan, kehadiran beberapa industri pertambangan (batubara, emas, minyak bumi, dan lain sebagainya) dapat mempercepat upaya pembangunan pedesaan, khususnya dari program tanggung jawab sosial perusahaan. Namun demikian, kegiatan eksplorasi pertambangan juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan, terutama terkait dengan degradasi tanah (Ma et al., 2019). Apalagi sebagian diantaranya industri penambangan atau bahan galian menggunakan sistem tambang terbuka yang menghilangkan tutupan vegetasi (Kuzevic et al., 2019).

Akibatnya, keanekaragaman hayati tanah akan menurun dan laju limpasan serta erosi akan terjadi lebih cepat. Keadaan ini dapat mengurangi kesuburan tanah karena jumlah lapisan topsoil telah tercuci (Lulu et al., 2022). Selain itu, penggunaan senyawa kimia dapat juga dapat menyebabkan kontaminasi tanah yang menyebabkan struktur komunitas tanah terganggu yang mengancam kestabilan ekosistem tanah (Mourinha et al., 2022). Potensi dampak negatif pada lingkungan yang ditimbulkan elatif lebih besar dan berbahaya.

Kondisi tanah yang telah terkontaminasi oleh senyawa kimia dari aktivitas pertambangan yang telah dilakukan mengganggu stabilitas ekosistem tanah. Akibatnya upaya reklamasi akan lebih sulit untuk dilaksanakan karena kontaminasi tanah tersebut dapat merangsang terjadinya stres pada tanaman yang ditanam (Li et al., 2018). Hal ini akan membuat tanaman layu dan akhirnya mati. Upaya reklamasi yang dilakukan tidak dapat dilakukan secara langsung di atas permukaan tanah yang terkontaminasi senyawa kimia bahan tambang, melainkan terlebih dahulu harus memberikan perlakuan khusus kepada tanah. Pengelolaan tanah terpadu sangat diperlukan untuk meminimalkan dampak aktivitas penambangan (batu bara dan bahan galian lainnya) terhadap degradasi tanah. Skema ini hanya dapat dirumuskan jika terdapat informasi yang komprehensif tentang karakteristik tanah di sekitar wilayah konsesi pertambangan tersebut. Selain itu, juga perlu dipahami histori dari areal penambangan tersebut.

Sayangnya, Banyak perusahaan penambangan yang terus berfokus pada produktivitas hasil tambang dan bahan galian tanpa mempertimbangkan dampak lingkungan yang lebih besar. Tantangan pengelolaan tanah tidak hanya dalam skala kecil tetapi juga terjadi terjadi pada lanskap. Konektivitas setiap tutupan lahan menjadi penting yang harus dipertimbangkan untuk menemukan solusi optimum.

Selain itu, kajian komunitas tanah secara menyeluruh juga perlu dilakukan untuk keseimbangan ekosistem. Fauna tanah seringkali menjadi aspek yang diabaikan dalam kajian dampak lingkungan akibat konsensi pertambangan. Kelimpahan fauna tanah dialam sering kali menjadi alasan untuk tidak mengkajinya secara mendalam. Akan tetapi, jika kita lihat lebih jauh secara bersama, komponen fauna tanah baik mikro maupun makro merupakan komunitas yang sensitif terhadap perubahan lingkungan, dimana kelompok ini sebagai indikator biologis bagi kesehatan tanah. jika kita memahami secara mendalam peran dan fungsi fauna tanah terhadap ekosistem tanah di lingkungan (telah dijelaskan sebelumnya), maka kita akan berpikir untuk selalu berupaya memberika warisan terbaik terhadap generasi penerus nantinya pada aspek lingkungan yang lebih baik.

8.4 Konversi Hutan Menjadi Areal Perkotaan

Revolusi demografis yang tinggi dan perkembangan lingkungan perkotaan yang cepat merupakan dampak dari pertumbuhan manusia yang lebih cepat. Akibatnya, perubahan ini sering menyebabkan degradasi kualitas lingkungan di daerah perkotaan. Sebagai konsekuensinya, kebijakan manajemen pemerintah lebih banyak mengarah dan mendorong program pelestarian lingkungan dan berupaya mengembalikan kondisi di perkotaan menjadi lebih alami yang pada gilirannya nanti, hal tersebut membutuhkan pemahaman yang lebih baik mengenai ekologi lingkungan perkotaan. Secara khusus, ada kebutuhan akan pengetahuan yang lebih baik tentang pengetahuan yang lebih baik tentang pengelolaan tanah karena tanah menyediakan banyak fungsi di perkotaan salah satu contohnya adalah pertanian perkotaan.

Mengoptimalkan keanekaragaman organisme yang hidup di tanah sangat penting untuk mendukung banyak fungsi lingkungan seperti pencemaran air, siklus biokimia, kesuburan dan penyimpanan karbon. Namun, sejauh ini menurut kami hanya sedikit penelitian tentang kualitas biologis tanah perkotaan yang telah dilakukan. Penjabaran tentang definisi dan karakteristik serta alur histori tanah perkotaan harus mampu dijelaskan secara gamblang dalam upaya menjaga kestabilan ekosistem.

Revolusi demografis dari tahun ketahun telah menggambarkan perubahan nyata peningkatan jumlah penduduk dunia. Selama periode yang sama peningkatan manusia perkotaan telah semakin berkembang,

dimana data Seto et al (2014) menyatakan lebih dari separuh populasi manusia dunia (54%) saat ini tinggal di lingkungan perkotaan. Evolusi yang cepat ini telah disertai dengan berbagai eksternalitas negatif, yaitu peningkatan produk limbah, polusi, artifisialisasi, perluasan kota ke lahan subur, pengembangan pulau-pulau panas, pengurangan keanekaragaman hayati, bahaya dan kerentanan lahan terhadap perubahan iklim (Alberti 2015). Dengan adanya degradasi yang cukup besar dalam kualitas lingkungan perkotaan menyebabkan perubahan besar dalam metode konsepsi dan perencanaan ruang kota. Berbagai konsep pembaharuan telah dirumuskan yang berupaya untuk mengembalikan kondisi ruang kota menjadi lebih hijau dan alami. Potensi pembaharuan dalam rangka perbaikan degradasi lingkungan dibutuhkan kebijakan perencanaan kota berorientasi pada konsep kota yang berkelanjutan. Setelah lama berseberangan dengan tatanan konsep yang berbeda antara alam (hutan) dan kota, sudah saatnya sekarang kita mencari cara-cara yang tepat dan baru untuk hidup berdampingan dan kehadiran alam di kota dianggap sebagai faktor kunci dan trobosan dalam mengevaluasi kualitas kehidupan kota. Untuk mengatasi tantangan ini, pengetahuan yang lebih baik tentang ekologi perkotaan sangat diperlukan (McDonnell dan Pickett 1990), khususnya ekosistem tanah yang masih jarang dipertimbangkan (Pollak 2006).

Peran tanah sangat penting karena posisinya sebagai pendukung kegiatan manusia seperti konstruksi dan produksi tanaman, penghubung antara atmosfer dan hidrosfer (biogeokimia) serta sebagai sumber fungsi dan jasa utama bagi ekosistem dan keanekaragaman hayati tanah (habitat) (Jelery et al., 2010). Adapun fungsi utama tanah yaitu memberikan layanan yang disediakan oleh tanah untuk kesejahteraan penduduk perkotaan, yaitu untuk produksi tanaman atau sebagai habitat komunitas tanah yang menyimpan keanekaragaman hayati.

Keragaman dan kelimpahan organisme yang hidup di dalam tanah sangat besar (Maron et al. 2011). Hal ini dapat dijelaskan oleh kompleksitas dan heterogenitas dari matriks lingkungan yang menawarkan berbagai habitat yang bervariasi. Keanekaragaman hayati tanah sendiri mewakili 25% dari keanekaragaman hayati total yang telah diidentifikasi hingga saat ini. Terlepas dari aspek warisan peninggalan dari zaman sebelumnya, keanekaragaman hayati memainkan peran kunci dalam berbagai lingkungan, yaitu depolusi, siklus biogeokimia, kesuburan, penyimpanan C; dan merupakan dasar

dari jasa yang diberikan oleh tanah (De Groot et al. 2002). Meskipun akumulasi pengetahuan tentang keanekaragaman hayati tanah telah tumbuh secara eksponensial sejak tahun 2000an, namun masih banyak pekerjaan yang harus diselesaikan terutama investigasi yang telah dilakukan pada tanah perkotaan (sekitar 1% dari studi tanah berhubungan dengan tanah perkotaan, penyelidikan WOS Oktober 2017). Selama ini, penelitian keanekaragaman komunitas tanah berfokus pada lingkungan alami atau pertanian. Akibatnya, hanya sedikit yang diketahui tentang patrimoni biologis dari tanah-tanah perkotaan.

Kelompok komunitas tanah seperti cacing tanah, artropoda, nematoda, mikroorganisme, dan perannya serta fungsi-fungsi yang menarik untuk mengembalikan kondisi alami di lingkungan tanah perkotaan dapat meningkatkan kualitas hidup bagi penduduk kota, misalnya, untuk meningkatkan kualitas hidup penduduk kota seperti kondisi kesehatan tanah baik aspek kesuburan fisik dan biologis, penghalang patogen, degradasi polutan, atenuasi perubahan iklim melalui penyimpanan karbon (Morel et al. 2015). Heterogenitas ekosistem perkotaan yang besar memunculkan gagasan tentang mosaik perkotaan dengan tanah yang dimodifikasi oleh aktivitas manusia.

Aspek komunitas organisme tanah terkecil adalah yang paling banyak dan beragam di tanah seperti bakteri yang paling melimpah dan beragam di tanah. Kami berasumsi bahwa semakin kecil ukuran suatu komunitas tanah maka kelimpahan dan keanekaragamannya di dalam tanah semakin tinggi. Walaupun demikian, kami meyakini bahwa hanya sedikit dari spesies bakteri maupun mikroorganisme dan mikrofauna tanah lainnya yang telah diidentifikasi. Bahkan Bouchez et al. (2016) menyatakan bahwa hanya sekitar 5-10% kelompok bakteri dan jamur yang telah teridentifikasi di dalam tanah.

Organisme yang hidup di dalam tanah melakukan banyak fungsi yang sangat diperlukan untuk berfungsinya ekosistem terestrial, dimana cacing tanah diketahui merupakan keluarga dengan biomassa terbesar dan keanekaragaman spesies yang paling dikenal akan kebermanfaatannya. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa kelompok fauna tanah bertanggung jawab atas dekomposisi, transformasi dan transportasi bahan organik dan terlibat dalam siklus biogeokimia serta dalam pembentukan dan pemeliharaan struktur tanah. Dalam hal ini, fauna tanah sangat penting bagi produktivitas ekosistem

terrestrial . Meskipun masing-masing dari organisme hidup ini secara individual memainkan peran khusus dalam fungsi dan sifat-sifat tanah, keragamannya yang besar dan interaksinya yang bertanggung jawab atas fungsi dan jasa yang diberikan oleh lingkungan terrestrial. Jasa yang diberikan oleh ekosistem perkotaan termasuk pasokan air minum dan makanan, atenuasi polusi udara, dan mitigasi iklim lokal . Dalam situasi perkotaan, sebagian besar jasa ini dijamin oleh infrastruktur hijau yang dibentuk oleh pemerintah dan masyarakat (MEA 2005).

DAMPAK DAN STRATEGI MANAJEMEN TANAH YANG BERKELANJUTAN

Pembangunan antropogenik, perubahan iklim, pergantian dan penggunaan lahan seperti pertambangan, intens pertanian, peternakan, ekstraksi gas, dan urbanisasi mengancam ketahanan lahan tanah tropika basah dan dapat meningkatkan laju degradasinya. Memahami dampak ini kekuatan eksternal pada emisi gas rumah kaca (GRK) dan nutrisi (karbon C, nitrogen N, dan belerang S) di lahan basah sangat penting untuk mengembangkan strategi restorasi yang lebih efektif dan rencana adaptasi masa depan dan salah satu yang paling terkena dampak adalah perubahan iklim (Williams et al., 2009). Sebagai contoh, peristiwa iklim ekstrem seperti angin topan, kekeringan, gelombang panas yang hebat, dan kebakaran semak diikuti oleh banjir meningkatkan risiko hilangnya vegetasi lokal. Meningkatkan konsentrasi CO₂ di atmosfer dapat mengubah produktivitas lahan tanah tropika basah, mempengaruhi keseimbangan biogeokimia, dan mengubah kapasitas penyimpanan hara . Demikian pula perubahan hidrologi dapat menyebabkan pelepasan tiba-tiba dalam C, N, dan S dalam bentuk CO₂, N₂O, dan gas lainnya ke atmosfer (Baccini et al., 2017).

Produksi pertanian juga dapat menimbulkan tekanan pengelolaan nutrisi. Sebagian besar kegiatan pertanian terkonsentrasi di daerah tertentu, di mana curah hujan musiman mengurangi pasokan air kendala untuk memungkinkan penanaman dan penggembalaan. Dari awal 1990-an, transisi di darat manajemen dari rotasi tanaman ke pemupukan telah menyebabkan peningkatan beban nutrisi persatuan luas, mengakibatkan peningkatan emisi N₂O, pencucian N ke air tanah, dan produksi limpasan nutrisi tinggi. Faktor-faktor ini dapat menyebabkan kerusakan pada jasa ekosistem yang disediakan. (Middleton, 2016)



Gambar 32. Manfaat pengelolaan tanah berkelanjutan dan pengaruhnya terhadap makrofauna tanah (Sumber: Sofu et al., 2021)

Dalam jangka panjang, kelebihan hara dapat mempengaruhi laju dekomposisi bahan organik tanah (BOT), sedangkan perubahan kondisi hidroklimatik dapat memperkuat emisi CH₄ dan CO₂, menjadikan suatu tipe lahan sebagai pemicu sekaligus korban dalam skenario ini. Pengukuran lapangan dapat membantu meninjau proses dan mekanisme yang mempengaruhi lahan; Namun, tidak realistis untuk menerapkan pengukuran terdistribusi pada skala tertentu. Oleh karena itu, model mekanistik yang mengintegrasikan umpan balik antara kekuatan eksternal dan proses yang dimediasi secara biologis telah menjadi alat penting untuk memahami dinamika nutrisi dalam tanah dan meningkatkan kuantifikasi anggaran nutrisi tersebut (Kaushal et al., 2014; Beerling et al., 2011).

Saat ini model mekanistik mengintegrasikan variabel hidroklimatik, sifat tanah, penggunaan lahan pengelolaan, dinamika vegetasi, dan biologi tanah untuk mengukur emisi Gas Rumah Kaca

(GRK) dan sekuestrasi C dalam tanah. Meskipun demikian, ada kekurangan representasi umpan balik nutrisi dan masukan limpasan. Secara khusus, fluks unsur C, N, dan S dalam tanah, ketersediaan hayatinya berubah selama setahun, dan hal ini mempengaruhi fluks internal dalam hal emisi, pencucian, serapan tanaman, dan variabilitas stok yang kurang terwakili. Oleh karena itu, penilaian yang lebih mendalam tentang siklus nutrisi di lahan basah Australia diperlukan untuk mengurangi efeknya aktivitas manusia dan perubahan iklim.

Proses biogeokimia umumnya dipelajari melalui in-situ dan berbasis laboratorium eksperimen, yang memberikan pemahaman mendalam tentang mekanisme yang mengatur. Namun, mereka gagal untuk menjelaskan bagaimana umpan balik yang kompleks antara proses yang berbeda mempengaruhi stok dan emisi karbon, nitrogen, dan sulfur tanah jangka panjang, juga tidak dapat mengungkapkan informasi penting ini pada skala spasial yang besar. Untuk tujuan ini, kami menerapkan jaringan reaksi biogeokimia yang kompleks, BAMS4 (Model Biotik dan Abiotik untuk SOM-versi 4) di Pemecah komputasi BRTSim untuk memberikan penilaian skala regional dari siklus C, N, dan S di lahan basah Australia di atas $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ grid resolusi di tahun 2008-2017 (Pasut et al., 2020).

Tanah tropika basah pada kawasan padang rumput adalah tanah yang menyajikan keanekaragaman hayati terkaya, sebelum hutan dan lahan pertanian atau perkotaan. Di lahan pedesaan, keanekaragaman hayati tanah cenderung menurun dengan meningkatnya intensifikasi praktik pertanian (misalnya penggunaan pestisida, pupuk, alat berat). Namun, tidak semua praktik pengelolaan tanah memiliki dampak negatif terhadap keanekaragaman hayati tanah dan jasa terkait. Sementara secara umum perawatan kimia dan pengolahan tanah yang bertujuan untuk meningkatkan kesuburan tanah yang diimbangi dengan penyimpanan karbon tanah dan layanan dekontaminasi, sebaliknya mulsa, pengomposan dan rotasi tanaman semuanya berkontribusi untuk memperbaiki struktur tanah, transfer air dan karbon. penyimpanan.

Dunia telah mengalami perubahan penggunaan lahan yang drastis sepanjang sejarahnya, yang telah membentuk komunitas organisme tanah yang ditemukan saat ini. Perubahan tata guna lahan yang cepat dan cepat masih terjadi hingga saat ini, menuju peningkatan urbanisasi dan intensifikasi pertanian, tetapi juga menuju pertumbuhan hutan. Keanekaragaman hayati tanah dapat hanya merespon secara lambat

terhadap perubahan penggunaan lahan, sehingga jasa ekosistem di bawah penggunaan lahan baru dapat tetap suboptimal untuk waktu yang lama (misalnya, pengurangan dekomposisi bahan organik tanah). Konversi lahan, dari padang rumput atau hutan menjadi lahan yang dipangkas, mengakibatkan hilangnya karbon tanah dengan cepat, yang secara tidak langsung meningkatkan pemanasan global. Ini juga dapat mengurangi kapasitas pengaturan air tanah dan kemampuannya untuk menahan hama dan kontaminasi. Urbanisasi dan perluasan kota saat ini menciptakan titik dingin jasa ekosistem tanah, dan salah satu tantangannya adalah membebaskan tanah di lingkungan perkotaan, misalnya dengan perkerasan semi terbuka, atap hijau dan dengan menghindari penyegelan tanah yang berlebihan dan fokus yang lebih kuat pada penggunaan kembali tanah, misalnya lokasi industri yang ditinggalkan (pengembangan brownfield).

Perubahan iklim global sudah menjadi fakta yang diketahui dan diperkirakan akan menghasilkan peningkatan lebih lanjut sebesar 0,2°C per dekade selama dua dekade mendatang, bersama dengan modifikasi dalam laju dan intensitas presipitasi. Dengan demikian, perubahan iklim kemungkinan akan berdampak signifikan pada semua layanan yang diberikan oleh keanekaragaman hayati tanah. Ini biasanya akan menghasilkan konsentrasi CO₂ yang lebih tinggi di udara, suhu yang dimodifikasi dan tingkat curah hujan, yang semuanya akan mengubah ketersediaan bahan organik tanah. Perubahan ini dengan demikian akan secara signifikan mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas insinyur kimia, dengan implikasi untuk penyimpanan karbon, siklus nutrisi dan kesuburan jasa (IPCC, 2014). Untuk alasan inilah, Buku Putih UE 2009 (yang baru diadopsi baru-baru ini) menetapkan kerangka kerja tindakan untuk memperkuat ketahanan UE untuk mengatasi dampak perubahan iklim merupakan relevansi khusus. Penyimpanan dan pemindahan air juga dapat dipengaruhi melalui modifikasi keanekaragaman tumbuhan dan aktivitas rekayasa organisme tanah. Perubahan iklim juga dapat mendukung wabah hama dan mengganggu pengendalian hama alami dengan mengubah distribusi atau interaksi spesies hama dan musuh alaminya, dan berpotensi menghilangkan sinkronisasi interaksi ini.

Pencemaran tanah sebagian besar merupakan akibat dari kegiatan industri dan penggunaan pupuk dan pestisida. Polutan beracun dapat mengacaukan dinamika populasi organisme tanah, dengan mempengaruhi reproduksi, pertumbuhan dan kelangsungan hidup mereka, terutama ketika mereka terakumulasi secara biologis.

Secara khusus, akumulasi faktor-faktor stres merusak stabilitas jasa ekosistem tanah. Polutan mungkin juga secara tidak langsung mempengaruhi jasa tanah, dengan mencemari pasokan makanan di bawah tanah dan memodifikasi ketersediaan bahan organik tanah.

Dampak polutan tidak terdistribusi secara merata di antara ketiga kelompok fungsi tersebut dan bergantung pada spesies yang dipertimbangkan, serta pada dosis dan waktu paparan polutan. Misalnya, mikroorganisme, yang memiliki waktu reproduksi yang sangat singkat, dapat mengembangkan resistensi yang cepat terhadap bahan kimia beracun dan sensitivitas nematoda terhadap pentaklorofenol setelah 72 jam paparan dapat 20 hingga 50 kali lebih tinggi daripada sensitivitasnya terhadap kadmium. Paparan cacing tanah di sisi lain adalah sangat tergantung pada preferensi makan mereka, dan pada kemampuan mereka untuk menghilangkan polutan tertentu. Oleh karena itu, untuk setiap polutan kimia dan spesies yang dipertimbangkan, kurva dosis-respons spesifik harus ditentukan. Pendekatan holistik, yang menyelidiki dampak pencemar kimia terhadap fungsi ekosistem tanah secara keseluruhan masih kurang dan baru belakangan ini mulai dicakup dalam risiko ekologis. penilaian. Namun, dampak signifikan dapat diharapkan pada siklus nutrisi, kesuburan, pengaturan air dan layanan pengendalian hama (Turbe et al., 2010).

Keberadaan *Dendrobaena octaedra* dan *Octolasion tyrtaeum* memberikan pengaruh yang berbeda terhadap kepadatan dan keanekaragaman artropoda mikro tanah, dan Dauber et al. (2008) melaporkan bahwa keberadaan semut merangsang peningkatan kerapatan cendawan mikoriza arbuskular (FMA) pada akar rumput sekitar. Perubahan dalam komunitas fauna tanah (sebagai perekayasa ekosistem) dapat dipengaruhi oleh struktur tanah, dan aktivitas mikroba tanah dan mikro-arthropoda, yang akan mengatur siklus hara di dalam tanah.

Akibatnya akan mempengaruhi produktivitas tanaman termasuk buah, biji-bijian, bunga, serat, tanaman obat, minyak, dll (Benckiser dan Schnell 2007). Fakta tersebut menunjukkan pentingnya keanekaragaman fauna tanah sebagai insinyur ekosistem dalam pengaturan dan pemeliharaan stabilitas komunitas biota tanah, termasuk sebagai indikator kualitas tanah dan tanah. klasifikasi biologis. Di Indonesia, perkebunan kakao mencakup sekitar 1,75 juta ha, dan 1,64 juta ha adalah milik petani kecil (Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian, Republik Indonesia 2011) dan sebagian besar

studi fauna bawah tanah di perkebunan kakao (agroforestri kakao) fokus pada pentingnya melestarikan keanekaragaman hayati (Syahabuddin 2010). Kajian tentang pentingnya perilaku fauna tanah sebagai gugus fungsi pada berbagai umur tanaman kakao diabaikan. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan variasi keanekaragaman ekologi pada fauna tanah sebagai perekayasa ekosistem di perkebunan kakao rakyat. Terpenting, (i) untuk mengetahui keanekaragaman fauna tanah sebagai perekayasa ekosistem pada berbagai umur tanaman kakao; (ii) untuk mengetahui ekologi pengukuran keanekaragaman untuk habitat yang berbeda (umur tanaman kakao); dan (ii) untuk mengetahui status keanekaragaman perekayasa ekosistem di habitat yang berbeda.

Lahan pertanian, padang penggembalaan dan padang rumput, serta hutan produksi dan multiguna, yang bersama-sama menempati sekitar 55% dari permukaan tanah bebas es di Bumi (FAO, 2015), memberi manusia makanan, pakan, serat, bahan bakar, dan kayu lainnya produk. Namun, jasa penyediaan ini sering datang dengan mengorbankan keanekaragaman hayati dan banyak jasa ekosistem lainnya. Secara khusus, sekitar 40% spesies dalam 47 kelompok taksonomi telah hilang dari agroekosistem yang dikelola paling intensif, yang seringkali merupakan monokultur yang menerima input kimia tingkat tinggi dan padang rumput serta padang rumput dengan stok tinggi. Laju Bahkan di daerah penggembalaan dan perkebunan yang paling luas dikelola, sekitar 20% spesies telah hilang (Isbell et al., 2017).

Sekarang ada minat yang cukup besar tidak hanya dalam mencegah hilangnya keanekaragaman hayati lebih lanjut tetapi juga dalam diversifikasi strategis agroekosistem dan hutan produksi yang disederhanakan melalui peningkatan keragaman genetik tanaman, penanaman campuran, tanaman bergilir dan diversifikasi margin lapangan dan lanskap sekitarnya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa diversifikasi agroekosistem dan hutan produksi memberikan banyak manfaat (Scherer-Lorenzen 2014). Terdapat bukti kuat yang konsisten bahwa peningkatan keanekaragaman tanaman secara strategis meningkatkan hasil panen dan pakan ternak, produksi kayu, stabilitas hasil, penyerbuk, penindasan gulma dan penindasan hama. Di sini kami meninjau secara singkat studi yang mempertimbangkan bagaimana peningkatan keanekaragaman tanaman mempengaruhi produksi tanaman, hijauan, dan kayu, stabilitas hasil, dan beberapa jasa pengatur dan pendukung agroekosistem. Kami menyimpulkan dengan membahas tantangan dan rekomendasi untuk diversifikasi agroekosistem.

9.1 Dinamika Masyarakat Dan Perubahan Penggunaan Lahan

Lanskap dunia yang padat penduduknya adalah struktur dinamis yang telah mengalami redistribusi dan modifikasi terus menerus selama berabad-abad. Penggunaan lahan berubah sesuai dengan kebutuhan populasi manusia yang terus berkembang untuk jasa ekosistem penting seperti makanan, air bersih, dan perumahan. Hutan ditanam dan ditebang untuk bahan bangunan, kertas atau bahan bakar; selanjutnya ladang tanaman dibudidayakan dengan intensitas yang bervariasi, tergantung pada pertumbuhan penduduk dan kebutuhan, atau juga ditinggalkan sama sekali, karena alasan ekonomi atau lainnya. Misalnya, pada tahun sembilan puluhan, ketika harga pasar dunia turun, banyak tanah yang bisa ditanami menjadi bera. Contoh lain adalah pengabaian lahan pertanian yang saat ini dilakukan untuk konservasi keanekaragaman hayati dan praktik restorasi. Jika terjadi bencana alam atau ketika petani mengganti lahan yang lebih produktif atau pergi dengan bayaran aktivitas yang lebih baik. Padang rumput juga diubah menjadi ladang tanaman, dan beberapa dari ladang ini secara bertahap dikonsumsi oleh urbanisasi yang terus berkembang. Selain perubahan terus-menerus dalam bentuk dan komposisi mosaik lanskap (jumlah spesifik), perubahan intensifikasi penggunaan lahan juga sering terjadi dan semakin berkembang.

Permintaan untuk memproduksi tanaman bahan bakar nabati melibatkan risiko bahwa intensifikasi penggunaan lahan akan meningkat, yang mengarah pada penurunan keanekaragaman hayati tanah dan fungsi ekosistem yang sesuai. Hal ini akan terus kami sampaikan sebagai pengingat untuk penemuan alternatif yang tepat dalam menjaga keberlanjutan pembangaunan sektor pertanian dan konservasi lingkungan/tanah. Dalam literatur ilmiah, perubahan penggunaan lahan adalah penyebab pertama yang paling sering dikutip dari kepunahan keanekaragaman hayati secara umum, karena perubahan tersebut bersifat langsung dan sering terjadi dalam skala besar, sehingga tidak memungkinkan spesies untuk beradaptasi, atau berpindah ke daerah lain. Karena penggunaan lahan sangat rentan terhadap perubahan kebijakan dan sebagai efek dari penggunaan lahan pada keanekaragaman hayati begitu kuat, perubahan penggunaan lahan merupakan alat kebijakan penting untuk mengelola dan melestarikan keanekaragaman hayati (tanah) dan layanan terkait.



Gambar 33. Masyarakat dan Hutan sebagai sumber kehidupan (Wahyu, 2022: greeners.co)

Gambar 33 menunjukkan masyarakat yang bergantung pada hutan. Sebagian masyarakat bergantung kepada hutan sebagai sumber kehidupan, bahkan sebagian lagi diantaranya tinggal di dalam hutan dengan memanfaatkan seluruh komponen hutan dan menjaganya untuk kelestarian alam. Masyarakat hutan sangat berisiko kehilangan tempat tinggal karena deforestasi dan perubahan penggunaan lahan untuk area pemukiman, peternakan, penebang liar untuk eksploitasi kayu, dan perusahaan lainnya. Kegiatan-kegiatan ini tidak hanya menghancurkan masyarakat yang menggantungkan mata pencaharian dan budayanya pada hutan, tetapi juga berkontribusi terhadap perubahan iklim global dengan menghilangkan hutan masyarakat sebagai penyerap karbon.

Jutaan manusia di seluruh belahan bumi menggunakan dan bergantung pada kawasan hutan yang luas untuk mata pencaharian dan budaya mereka. Bagi masyarakat pedesaan dan masyarakat adat ini, hutan merupakan sumber air, kayu, satwa liar, dan identitas yang sangat penting. Sumber daya hutan merupakan jantung kehidupan sosial, politik, dan ekonomi mereka sebagai sumber utama mata pencaharian, nutrisi, dan pekerjaan. Aset-aset fundamental ini merupakan dasar bagi keamanan dan, bagi banyak masyarakat hutan, secara kultural dan spiritual sangat penting. Masyarakat yang

kehidupannya bergantung pada hutan menjadikan hutan tersebut sebagai hutan kemasyarakatan. Hutan kemasyarakatan merupakan lahan yang dimiliki secara kolektif oleh masyarakat pedesaan atau masyarakat adat berdasarkan sejarah, bahasa, budaya, atau garis keturunan yang sama yang telah diatur oleh hak-hak adat, aturan, dan lembaga yang telah ada sebelum pemerintahan modern, dan terus beradaptasi dengan keadaan yang berubah (Chao, 2012).

Pihak yang berkepentingan dan memiliki wewenang mengalokasikan kawasan hutan yang luas untuk digunakan oleh penebangan komersial, kelapa sawit, pertambangan, dan kepentingan ekonomi lainnya. Dalam prosesnya, hak de facto diberikan kepada operator komersial untuk melakukan deforestasi, karena alokasi lahan hutan yang disetujui seringkali mengarah pada penebangan habis-habisan dan konversi hutan menjadi penggunaan non-hutan. Akibatnya, masyarakat dapat kehilangan hutannya secara permanen. Tindakan ini tidak hanya merugikan masyarakat hutan, deforestasi berkontribusi terhadap perubahan iklim.

Bekerja sama dengan masyarakat untuk memperkuat hak hutan mereka, dengan tidak merusaknya, pemerintah dapat memastikan banyak manfaat pembangunan berkelanjutan. Hak hutan masyarakat yang kuat membantu masyarakat melindungi hutan, mengurangi emisi CO₂ dari deforestasi dan meningkatkan kesehatan hutan. Hak hutan yang kuat juga memberi masyarakat akses yang aman ke produk hutan untuk perumahan, obat-obatan, dan penggunaan lokal lainnya serta pendapatan dari penjualan hasil hutan kayu dan non-kayu. Selain itu, keseimbangan ekosistem hutan dapat terjaga dengan baik melalui tanah yang sehat. Masyarakat sangat berperan penting dalam menjaga keberlanjutan ekosistem tanah.

Perubahan penggunaan lahan dapat mempengaruhi komunitas tanah terutama dengan mengubah kualitas dan kuantitas input yang tersedia bagi mereka dan dengan memodifikasi habitat mikro tanah. Misalnya, pembukaan hutan menghilangkan daun dan permukaan kayu serasah yang merupakan rumah bagi keragaman jamur dan invertebrata yang luas. Dengan cara yang sama, konversi padang rumput menjadi ladang pertanian atau pembibitan pohon melibatkan pengolahan tanah yang menghancurkan habitat invertebrata besar yang misalnya bertindak sebagai insinyur tanah (menghasilkan liang atau galeri). Pengolahan tanah juga merusak jaringan mikoriza dan hifa jamur lainnya dan membawa komunitas tanah dalam keadaan

terganggu, sehingga menghilangkan banyak organisme tanah yang memiliki rentang hidup yang relatif lama.

Karena populasi manusia terus bertambah, permintaan akan jasa tanah dan kebutuhan berikutnya untuk perubahan jenis dan intensitas penggunaan lahan diperkirakan akan terus berlanjut pada tingkat yang semakin meningkat. Pada akhirnya, dan jika tidak ada tindakan yang diambil, hal ini dapat mengubah kelimpahan dan keragaman fauna tanah dan juga mikroba tanah, terutama jamur tanah, yang mengurangi kapasitas tanah untuk menyediakan barang dan jasa yang diharapkan.

Telah lama diketahui bahwa campuran dan rotasi rumput dan legum menghasilkan lebih banyak biomassa daripada yang diharapkan berdasarkan hasil monokultur. Interaksi spesies penting ini ditemukan berabad-abad yang lalu, dan terus dieksploitasi di banyak sistem tanam modern (Sanderson et al, 2004). Studi terbaru menunjukkan bahwa banyak spesies lain juga berinteraksi menyebabkan efek positif keragaman tanaman pada hasil tanaman, hijauan dan kayu (Chen et al., 2020).

Eksperimen baru ini telah mengungkapkan beberapa spesies yang sangat produktif dengan kombinasi spesies, bahkan ketika mengecualikan legum atau mencampur spesies dalam kelompok fungsional. Sekarang jelas bahwa perubahan kekayaan spesies tanaman padang rumput dapat mempengaruhi produktivitas tanaman seperti perubahan komposisi spesies, manajemen pertanian intensif dan banyak faktor lain yang telah lama diketahui mengatur produktivitas tanaman (Tilman et al., 2012). Singkatnya, manfaat hasil dari peningkatan keanekaragaman tanaman (yaitu timbul dari berbagai aspek keanekaragaman termasuk kekayaan, pemerataan, keanekaragaman fungsional dan keanekaragaman filogenetik) terbukti dalam banyak studi ekologi dan agronomi (O'Connor et al.2017).

Sekarang juga terdapat banyak bukti dari studi yang mengadopsi berbagai pendekatan eksperimental dan observasional bahwa meningkatkan keanekaragaman pohon dapat meningkatkan produksi kayu (Chamagne et al., 2017) dan penyimpanan karbon di pohon (Hulvey et al.2013). Percobaan silvikultur sering menunjukkan pertumbuhan yang lebih tinggi dalam campuran daripada di monokultur, terutama jika spesies pengikat nitrogen dicampur dalam satu tipe lahan. Percobaan keanekaragaman pohon, yang memiliki gradien keanekaragaman pohon yang lebih luas daripada percobaan

silvikultur, masih cukup muda (maksimal 17 tahun saat ini). Namun demikian, beberapa dari eksperimen ini sudah menunjukkan hasil yang berlebihan dalam produksi kayu yang didorong oleh komplementaritas sumber daya dan efek seleksi (Verheyen et al., 2017). Secara taksonomi, secara fungsional atau secara genetik, komunitas/kumpulan tanaman yang beragam biasanya menghambat stabilitas temporal hasil yang lebih besar, termasuk resistensi yang lebih besar (perubahan yang dikurangi) dalam menghadapi gangguan iklim.

Keanekaragaman tanaman meningkatkan stabilitas hasil melalui efek peningkatan kinerja, yang meningkatkan hasil rata-rata melalui mekanisme hasil berlebih yang dijelaskan di atas, dan/atau efek penyangga, yang menurunkan varians hasil sementara. Buffering terjadi ketika varians temporal hasil berkurang karena beberapa spesies merespon secara berbeda dari yang lain terhadap fluktuasi lingkungan atau meningkat secara kompetitif dengan mengorbankan spesies lain (kompensasi). Mekanisme ini telah terbukti berkontribusi pada stabilitas hasil di padang rumput dan hutan (Jucker et al., 2016). Lebih jauh, keragaman genetik yang lebih besar mendorong stabilitas padang rumput yang dipanen secara teratur dengan meningkatkan perbedaan pertumbuhan musiman (pembagian ceruk fenologis) di antara spesies.

Studi baru tentang stabilitas hasil diperlukan untuk membedakan dampak positif dari penyimpangan negatif, sering dianggap menguntungkan atau merugikan secara agronomis dan yang memperhitungkan ambang ekonomi, ketika biaya panen melebihi pengembalian investasi meskipun upaya konservasi seperti lebah madu yang dikelola secara luas di seluruh dunia untuk menyediakan penyerbukan tanaman serta serangga penyerbuk lainnya (lebah lain, ngengat, lalat, kumbang, kupu-kupu, semut, tawon, dll.) yang dapat berkontribusi jauh lebih banyak daripada yang diperkirakan sebelumnya untuk penyerbukan tanaman (Rader et al., 2015). Kekayaan bunga mendukung komunitas penyerbuk liar dalam ruang dan waktu dengan mendukung: (i) berbagai spesies penyerbuk yang berbeda pada preferensi bunga dan tingkat spesialisasi, dan (ii) spesies penyerbuk individu dengan periode terbang yang lebih lama dari periode bunga dari salah satu spesies inang tanaman, termasuk spesies yang paling umum dan yang menyediakan sebagian besar layanan penyerbukan. Oleh karena itu, kelimpahan dan kekayaan bunga sangat penting untuk mempromosikan dan mempertahankan

layanan penyerbukan tanaman dari penyerbuk yang tidak dikelola. Sebagai contoh peningkatan kekayaan spesies tanaman secara positif terkait dengan peningkatan keragaman fungsi penyerbuk (Orford et al.2016).

Sebagai organisme bergerak, komunitas penyerbuk di agroekosistem merespons secara positif terhadap peningkatan keragaman tanaman. pada beberapa skala spasial mulai dari dalam bidang lokal hingga beberapa lanskap sekitarnya (Kennedy et al.2013). Pada skala lokal, rumput liar, tanaman pagar tanaman, pagar tanaman tahunan, tanaman sela, polikultur dan manajemen organik semuanya telah diamati memiliki efek positif pada penyerbuk dan layanan penyerbukan dengan meningkatkan keanekaragaman bunga, meskipun hanya sedikit penelitian yang meneliti polikultur atau efek tumpangsari. Pada skala lanskap, sintesis dari 39 studi menunjukkan bahwa jarak dari habitat alami sangat mengurangi rata-rata dan stabilitas terhadap ruang atau waktu pada kekayaan, kunjungan dan kumpulan lebah liar (dalam lapangan) (Garibaldi et al., 2011). Efek positif dari habitat alami di sekitarnya kemungkinan besar karena kontribusinya terhadap sumber daya flora dan/atau sarang. Efek isolasi dari habitat alami pada penyerbuk non-lebah, tidak ada hubungan signifikan yang ditemukan. Dengan demikian, distribusi penyerbuk tanaman non-lebah dapat menyangga layanan penyerbukan tanaman dari hilangnya habitat sampai batas waktu tertentu.

Diversifikasi sistem tanam baik dalam dimensi temporal dan spasial dapat berkontribusi pada regulasi populasi gulma yang efektif. Diversifikasi dapat dilakukan dengan menabur tanaman dalam urutan rotasi dengan tanaman lain, sebuah praktik yang dikenal sejak Yunani kuno, Roma dan Cina. Rotasi yang beragam biasanya menggunakan tanaman dengan tanggal tanam dan panen yang berbeda, kebiasaan pertumbuhan yang kontras dan karakteristik kompetitif, serta praktik pengolahan dan pengelolaan gulma yang berbeda. Akibatnya, gulma dapat ditantang dengan berbagai tekanan dan risiko kematian, dan diberi sedikit peluang yang konsisten untuk pertumbuhan dan reproduksi yang tidak terkendali. Sebuah tinjauan studi yang dilakukan dengan berbagai spesies tanaman menemukan bahwa rotasi mengakibatkan kepadatan tanaman gulma yang lebih rendah dalam 21 kasus (Liebman et al., 2001).

Diversifikasi juga dapat dicapai dengan menggunakan tanaman penutup tanah, yang menempati lahan sebelum atau sesudah periode

produksi 'tanaman utama'. Tanaman penutup tanah dapat menekan gulma dengan mengubah faktor lingkungan yang mempengaruhi perkecambahan dan pembentukan gulma, bersaing untuk sumber daya pertumbuhan, dan melepaskan fitotoksin, sehingga mengurangi jumlah benih gulma dan propagul vegetatif yang menyerang tanaman berikutnya. Demikian pula, menggabungkan spesies hijauan yang tumbuh cepat dan lambat cenderung meningkatkan penekanan gulma (Finn et al., 2013). Sistem tanam juga dapat didiversifikasi secara spasial melalui tumpangsari. Pola komplementer dari penggunaan sumber daya dan interaksi fasilitatif antara komponen tanaman sela dapat menyebabkan penangkapan cahaya, air, dan nutrisi yang lebih besar. Akibatnya, tanaman sela bisa lebih efektif daripada tanaman tunggal dalam mencegah penggunaan sumber daya oleh gulma dan menekan pembentukan dan pertumbuhan gulma.

Penanggulangan hama Tegakan murni dari satu tanaman menyediakan sumber daya yang sangat terkonsentrasi yang menguntungkan beberapa herbivora dan tidak memiliki asosiasi-resistensi nasional yang muncul ketika tanaman lain mengencerkan sumber daya untuk herbivora dan meningkatkan sumber daya untuk musuh alami herbivora (Root 1973). Diversifikasi sistem produksi dengan tanaman campuran, rotasi, campuran varietas atau penanaman non-tanaman dapat mengurangi kolonisasi hama dan laju pertumbuhan populasi dengan (i) mengganggu sumber daya tanaman inang untuk konsumen sekunder dan (ii) meningkatkan kelimpahan dan keragaman musuh alami mereka (Kremen & Miles 2012). Sebuah meta-analisis dari eksperimen tanam menunjukkan bahwa penanaman yang lebih beragam mengungguli sistem yang disederhanakan, biasanya monokultur, ketika membandingkan beberapa tindakan bersama: tingkat serangga herbivora, kerusakan tanaman, tingkat kematian herbivora dan hasil tanaman utama.

Contoh mencolok adalah desain penanaman dengan tanaman pengusir serangga ditambahkan ke lahan pertanian untuk mengusir hama dan tanaman menarik ditanam di luar lahan tanaman untuk mengeluarkan hama dan mengganggu siklus hidup mereka. Di 14 perbandingan eksperimental, strategi diversifikasi ini mengurangi kerusakan hama sebesar 138% dan meningkatkan hasil panen sebesar 84%, sedangkan beberapa strategi diversifikasi lainnya untuk pengelolaan hama menurunkan hasil panen. Keragaman genetik dalam satu tanaman juga dapat digunakan untuk menekan pertumbuhan dan kelangsungan hidup hama herbivora.

Ketika tanaman kekurangan sumber daya penting untuk predator dan parasitoid, penanaman campuran dan perbatasan non-tanaman dapat menyediakan nektar, serbuk sari, mangsa alternatif dan perlindungan, sehingga meningkatkan jumlah dan kekayaan musuh alami. Komplementer di antara musuh alami menyebabkan peningkatan kematian hama secara keseluruhan dengan peningkatan kekayaan musuh, tetapi kasus gangguan dan predasi intraguild juga dapat mengganggu pengendalian hama secara biologis (Letourneau et al., 2009). Pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme perilaku terkait dan pola evolusi akan membantu dalam menyesuaikan kumpulan tanaman yang menekan hama, termasuk dengan mendorong musuh hama.

Kompleksitas vegetasi di seluruh bentang lahan sekitarnya juga cenderung berhubungan positif dengan kelimpahan, kekayaan, dan tingkat parasitisme/predasi musuh alami hama, dan dengan keanekaragaman herbivora, meskipun tidak perlu dengan kelimpahan hama. Penyederhanaan lanskap telah mengurangi pengendalian hayati hama (kutu daun) sebesar 46% di Eropa dan Amerika Serikat (Rusch et al., 2016). Membangun hubungan sebab akibat antara keanekaragaman lanskap, komunitas musuh alami, dan dinamika hama tetap menjadi area yang menantang tetapi penting untuk penelitian ekologi di masa depan.

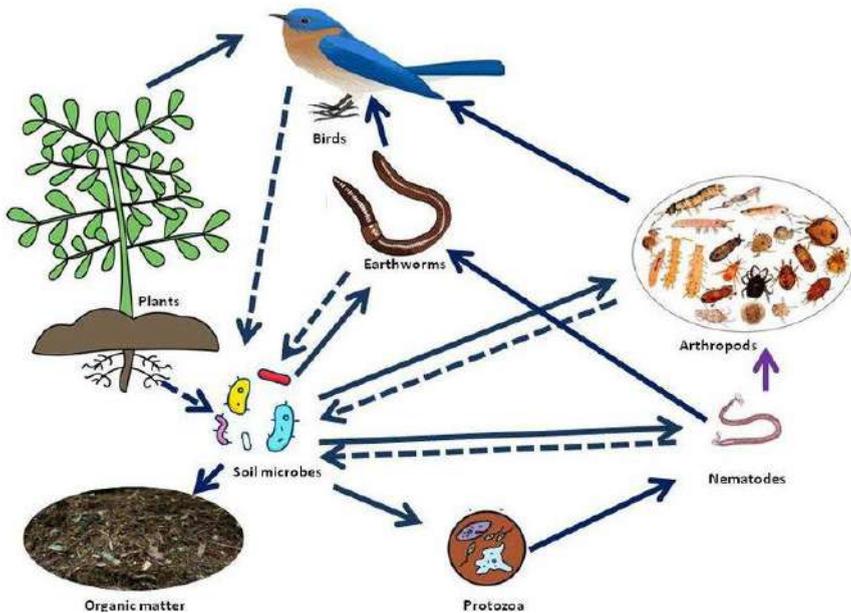
9.2 Biodiversitas Fauna Tanah Dan Sistem Jaring Makanan

Selama dua dekade terakhir, fokus utama penelitian keanekaragaman hayati tanah adalah untuk memahami bagaimana fauna tanah memengaruhi dinamika vegetasi. Secara tradisional, dinamika vegetasi dijelaskan berdasarkan faktor abiotik, seperti iklim dan sifat fisiko-kimia tanah, dan faktor biotik seperti herbivora di atas permukaan tanah. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, telah diterima secara luas bahwa dinamika vegetasi juga sangat dipengaruhi oleh interaksi antara akar tanaman dan organisme herbivora, patogen, simbiosis dan dekomposer tular tanah, terutama pada skala spasial lokal. Sudah ada kesadaran di tahun 1990-an tentang peran biota tanah, terutama jamur mikoriza, serangga pemakan akar, dan patogen tular tanah sebagai penggerak dinamika vegetasi. Tapi ini menjadi lebih dikenal secara luas setelah terjadinya pergantian era milenium dengan studi yang menunjukkan peran umpan balik tanaman-tanah sebagai pendorong keanekaragaman tanaman, kelimpahan dan suksesi, dan

perekayasa ekosistem, seperti cacing tanah, dalam mengatur dinamika vegetasi. Beberapa penelitian telah menguji efek keanekaragaman hayati tanah pada komposisi komunitas tanaman, dan ini berfokus pada keanekaragaman tanah dalam kelompok taksonomi tunggal, seperti jamur mikoriza, atau pada manipulasi unit taksonomi yang lebih kasar, misalnya berdasarkan ukuran tubuh organisme.

Studi-studi ini menunjukkan bahwa keanekaragaman di bawah tanah dapat mempengaruhi keanekaragaman komunitas tumbuhan baik secara positif maupun negatif, yang menunjukkan banyak sekali mekanisme di mana komunitas tanah yang kompleks mempengaruhi pertumbuhan tanaman, dan potensi efek diferensial dari biota tanah untuk menghilangkan keberadaan satu sama lain. Memang, efek keanekaragaman hayati tanah pada dinamika vegetasi beroperasi melalui berbagai interaksi biotik, yang mempengaruhi kinerja tanaman dan dinamika vegetasi secara langsung, melalui perubahan herbivora, simbiosis, atau patogenesis, atau secara tidak langsung melalui perubahan nutrisi tanah. ketersediaan, pemangsaan pada organisme atau simbiosis pemakan tumbuhan, atau perubahan interaksi antara tumbuhan dan komunitas multitrofik di atas permukaan tanah. Dalam jangka pendek, interaksi biotik ini dapat berubah kapasitas spesies tanaman untuk bersaing, memfasilitasi, dan bereproduksi, sedangkan efek jangka panjang mempengaruhi kebugaran dan adaptasi secara evolusioner (Bardgett, 2014).

Area yang sangat kaya akan penemuan baru menyangkut peran metabolit sekunder tanaman dan sinyal pertahanan dalam mengatur interaksi di bawah permukaan tanah. Baru-baru ini ditemukan bahwa jaringan hifa bawah tanah dari jamur mikoriza arbuskular bertindak sebagai saluran untuk sinyal pertahanan dari tanaman yang diserang oleh serangga herbivora ke tanaman yang tidak diserang yang berdekatan, sehingga bertindak sebagai sistem peringatan dini untuk serangan herbivora. Juga, herbivora daun dan pucuk telah terbukti memberikan efek warisan tanah yang unik yang sangat mempengaruhi produksi bahan kimia pertahanan di tanaman berikutnya, dan bahwa efek warisan ini dimediasi oleh perubahan komposisi komunitas jamur tanah. Studi-studi ini menggambarkan bahwa biota tanah dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman dengan memodifikasi interaksi biotik antar tanaman dan musuh alami mereka, tetapi peran keanekaragaman hayati tanah dalam proses ini masih belum terselesaikan.



Gambar 34. Jaringan makanan yang melibatkan fauna tanah dan hubungannya terhadap vegetasi tanaman secara tidak langsung (sumber makanan) (Sumber : Das et al., 2021)

Interaksi biologis yang menarik dari fauna tanah digambarkan melalui rantai makanan yang berkembang lebih luas hingga menjadi jaringan-jaringan makanan. Gambar 34 memperlihatkan secara umum struktur kompleks jaringan-jaringan makanan tanah. hal ini terus kami bahas di dalam buku ini dengan berbagai model atau gambar dengan penjabaran yang berbeda. Jaringan-jaringan makanan yang ditunjukkan secara sederhana pada Gambar 34 mengisyaratkan bahwa kelompok organisme hayati tanah memegang peranan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Kelompok fauna tanah (Arthropoda) mengambil peran pada tingkat tropfik menengah hingga atas pada struktur jaringan makanan tersebut. Pemangsaan terhadap mikroba tanah dan nematoda memeberikan banyak peluang potensi fungsi ekologis yang lebih besar pada kelompok ini. Keberadaan arthropoda tanah sangat penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem.

Kemajuan yang cukup besar baru-baru ini telah dibuat dalam memahami peran keanekaragaman hayati tanah dalam kaitannya dengan penekanan penyakit dan simbiosis, dan penggunaan alat-alat

molekuler telah mengungkapkan keanekaragaman mikroba rizosfer yang sebelumnya tidak terduga terlibat. Sejumlah mekanisme telah diajukan untuk menjelaskan mengapa dan bagaimana beberapa spesies tular tanah berkontribusi pada penekanan penyakit, termasuk kompetisi, predasi dan komunikasi kimiawi, yang secara kolektif berkontribusi pada bentuk biostasis tanah yang tidak dapat dihindari oleh banyak spesies. Namun, mekanisme baru sedang diusulkan, seperti gagasan bahwa rizosfer adalah tempat pasar di mana akar dan simbiosis bertukar karbohidrat untuk nutrisi di mana kerjasama dapat dihargai, sedangkan kecurangan mungkin tidak dianjurkan. Keanekaragaman hayati tanah saat ini berada di bawah ancaman dari berbagai tekanan antropogenik, tetapi pemahaman kita tentang bagaimana organisme tanah beradaptasi dengan perubahan yang cepat di lingkungan mereka, apakah mereka dapat melakukan ini cukup cepat untuk mengatasi lingkungan baru, dan bagaimana kapasitas adaptif ini dapat berhubungan dengan tingkat keanekaragaman hayati tanah, terbatas.

KONSERVASI KEANEKARAGAMAN HAYATI

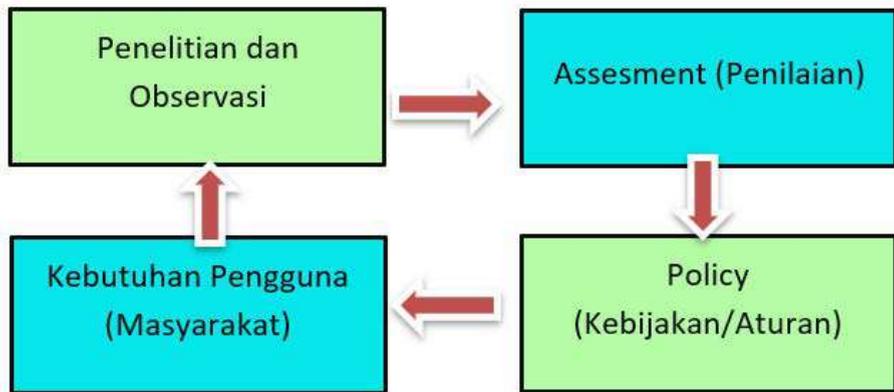
Keanekaragaman hayati global menurun pada tingkat yang belum pernah terjadi sebelumnya, dan upaya konservasi telah diintensifkan dalam beberapa tahun terakhir untuk mencegah, atau mengatasi kehilangan keanekaragaman hayati. Penurunan keanekaragaman hayati global berpengaruh pada berbagai hal terutama keseimbangan ekosistem. Namun saat ini, sebagian besar upaya dan pengetahuan konservasi difokuskan pada bagian permukaan tanah. Berbagai kelompok vertebrata tanah mendapatkan perhatian khusus untuk menjaga keberlangsungan hidupnya. Hewan tanah hanya mewakili 1% dari spesies yang terdaftar dalam daftar merah IUCN (International Union for Conservation of Nature), dan hanya delapan spesies tanah yang memiliki perlindungan CITES (Convention on International Trade in Endangered Species) di seluruh dunia (tiga kalajengking, empat laba-laba, dan satu kumbang), meskipun demikian faktanya biota tanah mewakili hampir seperempat dari semua spesies di bumi (Decaens et al., 2006).

Ada sedikit data tentang kepunahan organisme tanah dibandingkan dengan organisme di atas permukaan tanah. Namun, dalam pengambilan sampel makrofauna tanah seperti cacing tanah (*Lumbricina*), lebih dari setengah spesies yang diidentifikasi masuk dalam kategori langka, dan hanya ditemukan sekali atau dua kali di lokasi yang berbeda. Hilangnya spesies cacing tanah endemik besar juga telah dilaporkan di Prancis Selatan (Abdul Rida dan Bouché 1995), dan banyak lagi kepunahan cacing tanah telah dilaporkan di daerah tropis, seperti hilangnya cacing tanah *Acanthodrilinae* di Afrika Selatan atau cacing tanah raksasa berukuran 2 meter, cacing tanah panjang *Rhinodrilus fafner*. Secara keseluruhan, hasil dari beberapa upaya pemantauan status populasi tanah menunjukkan penurunan populasi karena intensifikasi penggunaan tanah meningkat yang juga berpengaruh pada populasi cacing tanah (Peres et al., 2011).

Kelangkaan juga dapat menjadi konsekuensi dari homogenisasi tumbuh pada berbagai lanskap karena urbanisasi, praktik pertanian monokultur, kondisi ekonomi, sarana teknis, dan pilihan dalam perencanaan lingkungan. Efek dari homogenisasi tersebut telah diamati pada keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah

terutama pada kelompok hewan vertebrata. Misalnya, telah diamati bahwa urbanisasi dapat menyebabkan homogenisasi spesies burung yang ada di berbagai wilayah, dengan mengurangi kelimpahan spesies burung yang bersarang di tanah dan spesies burung yang lebih menyukai habitat semak belukar. Memang tidak ada pekerjaan khusus yang dilakukan pada homogenisasi keanekaragaman hayati tanah. Beberapa upaya penelitian telah dilakukan dan sebagian besar diantaranya menyatakan bahwa homogenisasi menurunkan kelimpahan dan keanekaragaman fauna tanah. Spesies tanah dengan toleransi habitat yang lebih luas dapat dipilih dengan mengorbankan spesies dengan persyaratan habitat spesifik yang tidak mampu beradaptasi dengan perubahan dan tetap terisolasi di fragmen habitat alami. Meskipun banyak spesies yang hidup di tanah berada dalam bahaya, kepunahan mereka mungkin sama sekali tidak diketahui dan database serta alat untuk memantaunya juga belum tersedia.

Saat ini, rezim gangguan berubah secara drastis dimana tidak hanya berasal dari perubahan penggunaan lahan, malain kan juga di bawah pengaruh gabungan dari perubahan iklim, invasi biologis, dan modifikasi langsung dari manusia terhadap lingkungan. Namun, masih sangat sulit untuk menilai dan memprediksi bagaimana komunitas tanah akan merespon gangguan ini. Kami percaya bahwa sebagai besar fauna tanah terutama makrofauna tanah akan memberikan langsung respon negatif terhadap gangguan tersebut. Akan tetapi, berlawanan dengan kepercayaan umum, gangguan tidak selalu menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati jangka panjang. Tingkat gangguan yang muncul mempengaruhi tingkat kerusakan keanekaragaman hayati tanah terutama fauna tanah. Dalam banyak kasus, gangguan sedang (menengah) sebenarnya dapat menjadi kekuatan positif, memungkinkan spesies hidup berdampingan satu dengan lainnya, dan dengan demikian meningkatkan keanekaragaman hayati tanah.



Gambar 35. Konsep konservasi keanekaragaman hayati (Sumber: Navarro et al., 2017)

Kami menilai bahwa konservasi hayati sangat diperlukan dalam rangka menyelamatkan keanekaragaman hayati pada suatu kawasan. Konservasi hayati hendaknya dilakukan dengan hati-hati dan melalui beberapa kajian dan pertimbangan. Konsep keanekaragaman hayati yang diperkenalkan oleh Navarro et al (2017) menunjukkan bahwa terdapat beberapa proses yang harus dilalui untuk menjalankan konservasi hayati. Proses tersebut tentunya berawal dari aktivitas riset/penelitian dan observasi pada tipe lahan dan objek keanekaragaman hayati yang akan diamati. Data hasil penelitian yang telah didapatkan selanjutnya direpresentasikan dan dikaji secara menyeluruh untuk dilakukan penilaian secara langsung maupun berkala. Penilaian konkret berdasarkan kebutuhan dan kondisi/situasi yang mengancam ataupun mendesak dan dianggap penting selanjutnya dirumuskan aturan yang berpihak pada kesejahteraan masyarakat dan lingkungan atau berdasarkan kebutuhan pengguna.

Selain itu, konsep keanekaragaman hayati juga bisa digambarkan pada tiga komponen utama prinsip konservasi keanekaragaman hayati yaitu flora, fauna dan tanah. Dalam hal ini tentunya kita menggunakan komunitas tanah sebagai pemegang kendali dalam memegang kestabilan ekosistem. Keterkaitan fauna tanah dengan tumbuhan maupun dengan tanah telah dijelaskan sebelumnya dimana secara umum tanah memfasilitasi ketersediaan nutrisi dan tumbuhan menjadi salah satu sumber nutrisi tersebut. Keragaman lingkungan merupakan bagian integral dari dinamika ekosistem, dan beberapa gangguan tidak

dapat dihindari. Misalnya, variasi musiman berada dalam kisaran normal gangguan bagi banyak organisme. Namun, perubahan iklim dapat mengintensifkan gangguan musiman ini, merentangkan batas lebih ke arah peristiwa ekstrem, seperti misalnya kekeringan musim panas yang parah. Gangguan alam atau antropogenik yang tidak dapat diprediksi seperti itu (misalnya kekeringan, badai, kebakaran, fragmentasi habitat, penggunaan pestisida, pupuk atau pengolahan tanah) mengubah habitat organisme dan fungsi ekosistem, terutama ketika tekanan ini meningkat secara bersamaan.

Gangguan dapat memiliki dampak yang berlawanan pada komunitas ekologis: di satu sisi, gangguan sering diakui sebagai pendorong utama hilangnya keanekaragaman hayati, sementara di sisi lain, gangguan semakin diakui sebagai salah satu mekanisme yang mendorong koeksistensi spesies. Kontradiksi yang nyata ini dipecahkan oleh Hipotesis Gangguan Menengah, dengan alasan bahwa keanekaragaman hayati tertinggi ketika gangguan sedang. Ide utamanya adalah bahwa dengan gangguan rendah, eksklusi kompetitif oleh spesies dominan muncul, sedangkan dengan gangguan tinggi, hanya spesies yang toleran terhadap stres yang dapat bertahan.

Salah satu tujuan konservasi adalah untuk memaksimalkan stabilitas ekosistem dalam menanggapi gangguan. Stabilitas ini dapat dilihat sebagai ketahanan ekosistem terhadap perubahan, dimana ekosistem dapat terus berfungsi tanpa perubahan ketika stres atau terganggu. Komponen stabilitas lainnya adalah ketahanan ekosistem terhadap perubahan, yaitu kemampuannya untuk bangkit kembali dan pulih setelah gangguan. Resiliensi dengan demikian dapat menjelaskan berapa lama suatu sistem akan pulih setelah gangguan. Komunitas dengan resiliensi tinggi dapat segera kembali ke kondisi semula, sedangkan komunitas dengan resiliensi rendah mungkin membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk kembali ke kondisi semula.

Gangguan tersebut meskipun dapat menyebabkan hilangnya beberapa spesies, namun dapat membuka relung atau sumber daya untuk digunakan organisme lain. Selain itu, peristiwa gangguan yang identik dapat menyebabkan hasil yang sangat berbeda di komunitas tanah yang berbeda, seperti: spesies dan komunitas menunjukkan ketahanan yang berbeda terhadap stres. Dengan demikian peristiwa gangguan yang sama dapat memiliki pengaruh yang sangat kecil pada beberapa sistem (resistensi tinggi dan ketahanan tinggi), sementara

itu dapat secara dramatis mempengaruhi sistem yang lain meskipun mereka mungkin dapat pulih dengan sangat cepat (resistensi rendah dan ketahanan tinggi).

Akhirnya, pengaruh suatu gangguan terhadap suatu komunitas sangat bergantung pada frekuensi, intensitas, dan apakah komunitas tersebut berinteraksi dengan gangguan lain (misalnya perubahan penggunaan lahan melibatkan gangguan fisik atau penggunaan pupuk dan pestisida). Oleh karena itu, memprediksi dampak gangguan terhadap fungsi dan jasa ekosistem tanah menjadi rumit. Jaringan makanan tanah sangat kompleks, dan banyak fungsi dalam tanah dilakukan oleh lebih dari satu spesies, yang disebut redundansi fungsional. Mengingat redundansi fungsional ini, dapat dianggap bahwa spesies dapat punah tanpa dampak apa pun pada penyediaan jasa tanah. Namun pada kenyataannya, sifat jaringan makanan tanah yang sangat terintegrasi, intervensi apa pun yang mengganggu satu fungsi pasti akan mempengaruhi dinamika fungsi lainnya.



Gambar 36. Bingkai kemajuan konseptual dalam restorasi (Perring et al., 2015)

Meskipun ada banyak alasan untuk melindungi keanekaragaman hayati karena nilai intrinsiknya, upaya konservasi semakin membenarkan konservasi keanekaragaman hayati untuk fungsi atau

layanan ekosistem yang diberikannya. Dalam hal ini, pertanyaan utama adalah apakah semua spesies penting bagi fungsi ekosistem tanah. Sampai saat ini, tidak ada hubungan yang konsisten antara keanekaragaman jenis tanah dan fungsi tanah yang telah ditemukan (Bardgett 2005), menyiratkan bahwa lebih banyak spesies tidak tentu memberikan lebih banyak layanan. Ini karena beberapa spesies dapat melakukan fungsi yang sama. Jadi, menurut hipotesis 'spesies berlebihan', hanya jumlah spesies minimum yang diperlukan agar ekosistem tanah berfungsi dan hilangnya spesies yang secara fungsional berlebihan akan berdampak kecil pada kuantitas atau kualitas layanan yang diberikan (Hunt dan Wall., 2002)

Gambar 36 menunjukkan Perkembangan restorasi ekologi: Restorasi secara tradisional berfokus baik pada tujuan fungsional (misalnya mengembalikan proses tanah, produktivitas) atau, dalam pengaturan konservasi, mencapai komposisi spesies (tanaman) yang diinginkan yang diasumsikan mengarah pada fungsi (ekosistem) yang diinginkan, dengan pandangan dunia ekologis yang cenderung memikirkan keseimbangan dalam lingkungan yang tidak berubah. Ekologi restorasi kontemporer: Ekologi restorasi kontemporer berada di penghubung antara sistem ekologi dan sosial dan karenanya dipengaruhi oleh perubahan dalam masing-masing dimensi dan interaksi di antara komponen tersebut. Restorasi kontemporer menggunakan kerangka sifat dan pemahaman baru tentang jaringan trofik untuk mencapai dinamika berbasis proses tujuan fungsional dan komposisi di era perubahan sosial-lingkungan. Restorasi bertujuan untuk memberikan fungsi seperti layanan dan ketahanan ekosistem pbingkai ekologi restorasi kontemporer ini untuk meninjau konseptual dan teknologi kemajuan yang akan memungkinkan pemulihan ekologis untuk mengatasi tantangan lingkungan dalam beberapa dekade mendatang.

Ketika konservasi dimasukkan ke dalam proses dan lingkup yang lebih luas, hal yang terjadi di dalam tanah menunjukkan keanekaragaman hayati tanah (fauna tanah) tidak cukup hanya dilihat dari aspek strukturalnya melainkan juga dipertimbangkan dengan berfokus pada aspek fungsionalnya. Kelompok fungsional fauna tanah dalam jumlah yang lebih sedikit pada tingkat trofik puncak daripada kelompok organisme tanah yang berada di tingkat trofik dibawahnya dalam model jaring makanan tanah perlu mendapatkan perhatian yang lebih banyak. Gugus fungsi ini memainkan peran utama dalam fungsi ekosistem dan dalam penyediaan jasa ekosistem. Kelompok ini

juga dapat didefinisikan sebagai satu set spesies yang memiliki efek serupa pada proses biogeokimia atau biofisik pada tingkat ekosistem tertentu. Pengelompokan/ klasifikasi dapat didasarkan pada kriteria yang berbeda, dan bahkan di antara pendekatan fungsional komunitas tanah terutama fauna tanah. Klasifikasi tersebut terdiri dari perekayasa ekosistem, regulator biologis dan perekayasa kimia tanah. Klasifikasi ini terus dibahas disepanjang chapter buku ini dan mungkin tampak terlalu menyederhanakan fungsi dari fauna tanah, namun hal tersebut telah terbukti menjadi alat komunikasi dan analisis yang baik. Manfaat utama dari pengelompokan ini adalah bahwa aktivitas dari kelompok fungsional yang berbeda sebenarnya dapat dipetakan pada serangkaian skala spatio-temporal yang dimulai dari proses skala kecil/jangka pendek hingga skala besar/jangka panjang.

Sebagian besar organisme tanah dipengaruhi oleh lingkungan, sesuai dengan ukuran dan kapasitas penyebarannya. Organisme tanah yang berukuran lebih besar cenderung memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kondisi lingkungan. Pengaruh utama aktivitas perekayasa kimia yang didominasi oleh kelompok mikroba tanah adalah karakteristik lingkungan dalam skala lokal, meskipun sebagian mikroba tanah memiliki kerentanan dalam perjalanan jarak jauh (penyebaran pasif, dormansi). Sedangkan regulator biologis sebagian besar terdiri dari mesofauna, sedangkan ahli ekosistem justru cenderung pada sebagian besar makrofauna, yang keduanya dipengaruhi oleh proses spatio-temporal skala lokal maupun yang lebih besar (skala lanskap dan tahun). Jadi pendekatan fungsional ini adalah cara yang berguna untuk melihat fungsi dan memberikan kerangka kerja yang jelas untuk pilihan manajemen yang akan digunakan (misalnya memilih di antara tindakan langsung pada kelompok fungsional yang terpengaruh atau tindakan tidak langsung pada skala spatiotemporal yang lebih tinggi daripada kelompok fungsional yang terpengaruh).

Penting untuk digarisbawahi bahwa klasifikasi ke dalam kelompok fungsional merupakan indikasi peran paling khas dari suatu organisme yang lebih fleksibel atau tidak kaku. Misalnya, beberapa pengatur biologi atau perekayasa kimia (misalnya melalui sekresi protein yang lengket) juga dapat bertindak sebagai perekayasa ekosistem. Demikian pula, banyak hama tanaman, seperti fauna tanah herbivora dan nematoda yang dikendalikan setidaknya sebagian oleh mikroba musuh dan sementara bakteri adalah agen kimiawi mengingat kapasitas pencernaan mereka sangat berkembang. Kelompok ini juga dapat menggunakan beberapa pengendalian penyakit yang terbatas

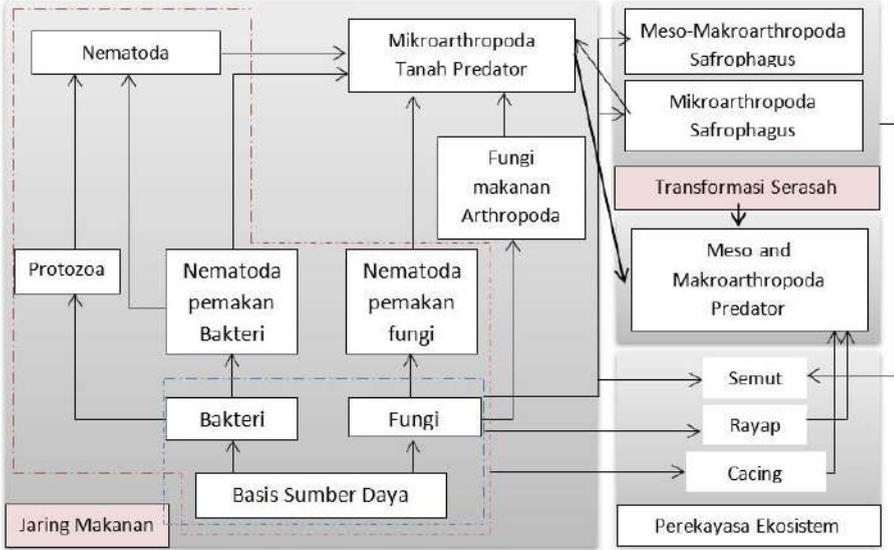
dan beberapa perekayasa ekosistem, pada skala habitat ruang mereka (Young dan Crawford 2004). Di sisi lain, kelompok cacing tanah yang secara jelas diidentifikasi sebagai perekayasa ekosistem, memiliki beberapa kemampuan terbatas untuk mencerna bahan organik dengan enzim yang tepat. Keterbatasan ini menggambarkan bahwa masing-masing fauna tanah memiliki peran dan kemampuan yang berbeda terhadap lingkungan (Mora et al. 2005).

Uraian fungsi utama organisme dalam setiap kelompok fungsional disajikan secara singkat sesuai dengan tugas utamanya di tanah (misalnya pembentukan tanah) tanpa mempertimbangkan fungsi potensial lain yang tidak terkait dengan ekosistem tanah (misalnya patogen untuk manusia). Fungsi ekologis fauna di dalam secara spesifik telah mempengaruhi keberlanjutan pemenuhan kebutuhan hidup manusia maupun kelompok organisme lainnya. Baik faktor biotik dan abiotik yang mempengaruhi ekologi mereka juga perlu dibahas dan dikaji secara berkelanjutan. Penting juga untuk diluruskan bersama bahwa untuk kesederhanaan dan lebih mudah dipahami, hanya jenis utama organisme tanah dari setiap kelompok fungsi yang dimiliki yang perlu dijelaskan secara lebih rinci. Organisme yang kurang jelas terkait dengan fungsi yang disorot (misalnya archea dan virus untuk perekayasa kimia, atau kaki seribu, lipan, kumbang, ulat, enchyatreids, kalajengking dll untuk kelompok fungsional lainnya) tidak dijelaskan secara detail dan telah disebutkan secara singkat di mana relevan terhadap fungsi ekologis fauna tanah.

Keterwakilan fauna tanah utama yang sering ditemukan atau mendominasi suatu habitat pada suatu tipe lahan bertindak sebagai indikator kesehatan tanah pada lahan tersebut. Rentang adaptasi yang luas pada fauna tanah tersebut menyebabkan hampir semua tipe lahan mampu untuk ditempati. Kemampuan tumbuh, berkembang dan melakukan aktivitas lainnya menjadi aspek penting dalam mengkaji fungsi dan peran fauna tanah. Gambaran fungsi dan peran tersebut sangat bermanfaat bagi keberlanjutan ekosistem dan bisa dijadikan alternatif bagi pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan. Mempelajari aspek fauna tanah secara utuh akan memberikan kontribusi penting bagi keberlanjutan lingkungan dan pertumbuhan ekonomi di bidang pertanian.

Secara historis, studi keanekaragaman hayati fauna tanah dimulai dengan pemetaan jaring-jaring makanan tanah, kemungkinan hal tersebut disebabkan fitur integrasi paling mendasar dari komunitas

tanah adalah hubungan makan antar organisme. Gambar di atas ini menunjukkan bagaimana jaring makanan tanah merinci rantai transfer energi di dalam tanah, yang didasarkan pada pengelompokan organisme dalam serikat makan, menurut peran trofik dan preferensi makanan mereka masing-masing (de Ruiter et al. 1995) . Secara sederhana, jaring makanan tanah dapat dilihat sebagai bahan bakar oleh tanaman dan bakteri fotosintetik yang mengikat karbon dari atmosfer melalui fotosintesis. Organisme tanah lainnya kemudian memperoleh energinya dengan menguraikan residu tanaman dan senyawa organik yang ditemukan di dasar jaring makanan, atau dengan memakan organisme lain. Selama proses ini, nutrisi diubah dari bentuk organik menjadi anorganik dan tersedia bagi tanaman dan organisme tanah lainnya.



Gambar 37. Struktur Jaringan makanan Fauna Tanah (Coleman, 2008)

Walaupun pendekatan jaring makanan tanah berguna untuk memahami siklus hara dan aliran energi dalam komunitas tanah, akan tetapi pendekatan ini memiliki kapasitas terbatas untuk menjelaskan proses ekosistem lainnya. Fokus utama kajian ekosistem tanah tidak lepas dari jaring makanan dengan menggambarkan proses makan dan dimakan pada komunitas tanah yang melibatkan organisme tanah secara lebih luas. Memang, dengan berfokus secara eksklusif pada aktivitas makan dan dimakan pada fauna tanah, memungkinkan

akan mengabaikan proses penting lainnya yang tidak didasarkan pada hubungan hubungan tersebut, seperti struktur perkembangan tanah, parasitisme dan patogenesis. Selain itu, pengelompokan trofik menggolongkan variasi signifikan dalam perilaku fungsional, yang tidak dibuat eksplisit dalam jaring makanan. Akan tetapi, melalui kajian yang lebih dalam pemahaman kondisi ekosistem secara luas akan bisa terjawab. Selanjutnya, struktur jaring makanan bergantung pada biomassa dan komposisi spesies. Aktivitas tersebut memberikan pemahaman yang lebih baik tentang fungsi biologis tanah.

Namun, mengingat pertanyaan yang sering diajukan terkait kajian ekosistem tanah, pendekatan jaring makanan telah memberikan kontribusi yang berharga untuk menempatkan serikat makan dan peran fauna tanah pada habitatnya di tanah secara terstruktur dan pemahaman lebih lanjut terkait dinamika populasi, serta pintu masuk yang baik ke dalam keanekaragaman fungsional hayati tanah. Perekayasa kimia bertanggung jawab atas proses kimia pada tingkat pertama jaring makanan dan mencakup semua organisme yang menguraikan bahan organik melalui reaksi katabolik dan anabolik. Mikroorganisme, atau organisme tanah terkecil, sejauh ini merupakan penyumbang atau memiliki kontribusi terpenting, karena lebih dari 90% aliran energi dalam sistem tanah dimediasi oleh mikroba tanah (Nannipieri et al., 2003). Selain itu, juga ada virus yang umum di tanah. Perdebatan tentang status virus masih berlangsung hingga sekarang, dimana kami mengasumsikan bahwa ini masuk ke dalam kategori partikel pada benda mati dan mikroorganisme jika menempel pada makhluk hidup, yang mewakili kelompok besar dan sangat heterogen dan dapat menginfeksi semua jenis sel hidup, dari bakteri hingga hewan besar.

Komponen utama pengatur biologis lainnya adalah cacing tanah atau nematoda. Seperti yang telah sempat dijelaskan sebelumnya bahwa kelompok ini memiliki peran penting bagi kesuburan tanah. Nematoda adalah cacing kecil dengan panjang sekitar 0,5-1 mm yang umum di tanah di mana-mana. Mereka dapat mencapai kepadatan 10-50 individu per gram tanah dan telah berhasil beradaptasi dengan hampir setiap jenis lingkungan, bahkan yang paling ekstrim seperti Antartika dan palung samudera laut dalam. Nematoda secara umum merupakan beberapa kelompok spesies yang paling beragam, dengan lebih dari 80.000 spesies nematoda telah dijelaskan, dari total 500.000 spesies yang telah diperkirakan keberadaannya (Bongers dan Bongers 1998).

Nematoda umum ditemukan di hampir semua tanah, tetapi mereka lebih menyukai tanah berpori yang bertekstur agak kasar. Mereka bergerak dalam film air di dalam ruang pori, kecuali di ruang pori terkecil, yang tidak dapat diakses oleh mereka. Mereka cenderung memiliki kapasitas penyebaran terbatas beberapa sentimeter, meskipun beberapa nematoda dapat bermigrasi hingga satu meter per tahun. Mereka juga memiliki kapasitas penyebaran pasif oleh angin, atau melekat pada hewan. Nematoda ada di mana-mana di bumi karena kemampuan beradaptasinya yang tinggi. Mereka adalah komponen penting dari jaring makanan tanah dan dapat diklasifikasikan menurut kebiasaan makan mereka (Yeates et al., 2009). Beberapa spesies memakan alga, yang lain pada bakteri, jamur atau akar tanaman. Keragaman dalam kebiasaan makan ini penting untuk sektor pertanian. Pemakan jamur menusuk dinding sel jamur untuk menghisap isinya, sedangkan nematoda predator menempelkan diri pada kutikula nematoda lain, mengikisnya sampai bagian tubuh internal mereka dapat diekstraksi. Nematoda terkonsentrasi di mana mangsa utama mereka berada.

Kebanyakan nematoda memiliki reproduksi seksual, dan perbedaan fenotipik penting antara jantan dan betina, dengan jantan biasanya jauh lebih kecil daripada betina. Beberapa spesies hermaphrodit, dan menyimpan telur yang membuahi sendiri di dalam rahim sampai menetas. Beberapa spesies parasit akan menghabiskan sebagian dari siklus hidup mereka di dalam inang sedangkan spesies lainnya hidup bebas. Siklus hidupnya cukup sederhana pada nematoda yang hidup bebas, di mana larva menetas dari telur, akhirnya tumbuh menjadi dewasa. Sebaliknya, siklus hidup seringkali jauh lebih rumit untuk spesies parasit, di mana individu melewati beberapa tahap remaja sebelum menjadi dewasa. Sama halnya dengan protista, nematoda memiliki kemampuan untuk menjadi tidak aktif, dalam keadaan kering, ketika kondisinya tidak cocok lagi, seperti dalam kondisi panas dan kering.

Microarthropoda adalah invertebrata kecil yang mengandalkan kerangka eksternal pada struktur tubuh. Ukurannya berkisar dari mikroskopis hingga beberapa milimeter, dan termasuk serangga kecil, seperti springtail, serta beberapa laba-laba kecil dan tungau. Springtails (Collembola) adalah satu-satunya serangga tanpa sayap dan memiliki tubuh tersegmentasi 0,2-6 mm dengan pelengkap khusus, termasuk ekor seperti pegas yang digunakan untuk melompat. Tungau (Acaridae) adalah arthropoda yang paling melimpah yang hidup di

tanah. Sekitar 50.000 spesies tungau diketahui, tetapi diperkirakan hingga ratusan ribu spesies dapat dimasukkan dalam kelompok ini. Dalam satu hektar tanah, dapat ditemukan hewan tanah yang setara dengan berat empat ekor kelinci.

Kelas organisme ini memiliki kemampuan menggali yang terbatas dan umumnya hidup di serasah permukaan atau terkurung di tanah lapisan atas. Karena ukurannya yang kecil, sebagian besar spesies mampu menembus ruang pori kecil dan saluran akar. Sebagian besar memiliki mobilitas terbatas. Springtail biasanya hidup berkelompok. Tungau sangat heterogen dan, dan memiliki perilaku suka berteman yang didorong oleh feromon yang disekresikan yang membantu individu tunggal menghindari habitat yang tidak menguntungkan (misalnya kering). tergantung pada spesiesnya, habitat dan ekologiinya bisa sangat berbeda.

Microarthropoda dapat memiliki kebiasaan makan yang bervariasi. Kebanyakan microarthropoda yang tinggal di tanah adalah herbivora, pemakan jamur, atau predator. Predator memangsa dan memakan nematoda atau mikroarthropoda jenis lainnya. Colembola dan tungau untuk sebagian besar memakan bakteri dan jamur yang terkait dengan vegetasi yang membusuk, namun mereka juga diketahui kadang-kadang memakan nematoda atau mikro-invertebrata lainnya. Mikroarthropoda kebanyakan bereproduksi secara seksual. Namun, pada colembola, reproduksi dapat secara seksual (melalui spermatofor) atau melalui partenogenesis (tanpa pembuahan oleh jantan). Beberapa spesies tungau bersifat parasit dan bergantung pada interaksi dengan inang untuk menyelesaikan siklus hidupnya. microarthropoda dapat menyajikan siklus hidup yang kompleks dengan beberapa tahap kehidupan, seperti larva dan nimfa.

Namun, sebagian besar mikroarthropoda mampu melakukan kriptobiosis, keadaan metabolisme tersuspensi, yang memungkinkan mereka bertahan hidup pada suhu ekstrem atau kekeringan yang dapat mematikan. Regulator biologis bertindak sebagai integrator jaring makanan, menghubungkan tingkat fungsional yang lebih rendah dari perekayasa kimia dalam ruang dan waktu, dan mengatur dinamika kelompok tersebut (dengan memberi makan dan berkontribusi pada penyebaran mikroba), terutama melalui predasi dan melalui pengaturan aktivasi mereka selama proses pencernaan. Aktivitas mikroba berlanjut dalam pelet feses yang kadang-kadang dicerna kembali oleh invertebrata dengan memanfaatkan pelepasan kimiawi

oleh mikroba.

Selain itu, tindakan parasit dan mutualistik regulator biologis secara langsung mengatur kelimpahan dan aktivitas perekayasa kimia melalui efek top-down. Pada kepadatan rendah, predator merangsang tingkat pertumbuhan populasi mangsanya (misalnya bakteri pengumpukan merangsang pertumbuhan bakteri), tetapi pada kepadatan tinggi mereka mengurangi populasi mangsanya. Predasi sering menekan populasi mikroba lebih dari sumber daya, sehingga ketersediaan sumber daya makanan tidak lagi menjadi faktor pembatas bagi mereka. Namun, konteks regulasi predator sangat sensitif. Oleh karena itu, efeknya dapat berubah secara substansial dalam mencari makanan menghadapi gangguan. Jaringan makanan menjadi entitas yang sangat dinamis dan terbuka, yang dapat mengubah atribut spesies. Hal ini berlaku bahkan lebih untuk beberapa fungsi lain seperti parasitisme, atau patogenesis tanaman, di mana spesifisitas jauh lebih tinggi. Parasit dan patogen berkontribusi tidak hanya pada pengaturan kelimpahan spesies, tetapi juga pada pengaturan keanekaragaman hayati.

Protista dan nematoda, melalui tindakan predatornya membantu menyebarkan bahan organik dan pengurai di dalam tanah dan berperan dalam memecah bahan organik dan meningkatkan luas permukaannya untuk pelapukan oleh mikroba. Dengan cara ini, mereka secara tidak langsung berkontribusi pada peningkatan ketersediaan nutrisi yang jika tidak akan tetap bergerak dalam biomassa mikroba. Ada bukti bahwa peningkatan kompleksitas dalam jaringan makanan kadang-kadang dapat mempercepat mineralisasi nutrisi (Whalen et al. 2013), yang kemudian dapat meningkatkan produktivitas.

Selain itu, tindakan regulator biologis dapat mempengaruhi keanekaragaman hayati di atas tanah. Memang, melalui efeknya pada keberadaan tanaman dan kimia tanaman, regulator biologis juga mempengaruhi interaksi antara tanaman dan hama dan penyakit di atas permukaan tanah (Scheu and Schaefer, 1998). Oleh karena itu, gugus fungsi ini juga penting dalam pengembangan ekosistem semi alami, pertanian dan kehutanan berkelanjutan, dengan secara tidak langsung mempengaruhi kelimpahan tanaman, wabah spesies invasif, dan wabah wabah dan hama pada sistem tanaman.

Distribusi regulator biologis di ekosistem dan seluruh lanskap mengikuti gradien jenis tanah, ketersediaan air, dan praktik budidaya. Misalnya, distribusi colembola (springtail) di lanskap pertanian dapat

mengikuti gradien karbon tanah skala besar dan jenis budidaya lahan. Demikian pula, distribusi nematoda sering juga dapat dijelaskan oleh pengelolaan lahan dan gangguan tanah. Misalnya, sebuah model menunjukkan bahwa ketika ketersediaan sumber daya berfluktuasi, distribusi nematoda terutama tergantung pada kemampuan spesies. Untuk menjajah kembali patch yang kaya sumber daya dari patch yang berada di sebelahnya.

Pada waktu tertentu, hanya sebagian kecil spesies yang aktif secara biologis yaitu hanya spesies yang mampu menggunakan sumber daya yang tersedia saat ini. Jadi aktivitas pengatur biologis cenderung mengikuti irama pertumbuhan dan reproduksi yang biasanya mengikuti pola musiman kelimpahan sumber daya, tetapi segera setelah kondisinya menjadi tidak memadai mereka kemudian memiliki kemampuan untuk bertahan hidup dalam waktu lama dalam resistensi istirahat. Misalnya, untuk protista dan nematoda pemakan bakteri, pertumbuhan umumnya maksimum selama minggu-minggu pertama setelah penambahan bahan organik ke tanah (Griffiths, 1994). Kemudian sebagian besar protista tanah memasuki fase istirahat, membentuk kista (Ekelund dan Ronn 1994), sedangkan anggota biota tanah lainnya, seperti misalnya, mikroartropoda, meskipun mereka tidak dalam bentuk istirahat yang dapat dikenali, mungkin juga memiliki periode tanpa aktivitas, seperti telur atau nimfa. Sehingga ketika sumber daya langka, banyak pengatur biologis mampu menyesuaikan aktivitas mereka dalam waktu daripada membubarkan dalam ruang.

Perekayasa ekosistem adalah organisme yang memodifikasi kondisi lingkungan untuk organisme lain melalui aktivitas mekanisnya. Perekayasa ekosistem tanah memiliki kemampuan untuk membangun struktur dan pori-pori organo-mineral yang tahan dengan bergerak melalui tanah dan mencampur tanah, dalam proses yang dikenal sebagai bioturbasi. Cacing tanah, rayap, semut dan akar telah diidentifikasi sebagai ahli tanah yang paling penting (Lavelle et al. 1997).

Namun, perekayasa tanah juga memasukkan banyak invertebrata lain, seperti kaki seribu, lipan, kumbang, ulat, dan kalajengking, yang mungkin kurang lebih bertanggung jawab atas fungsi pembentukan tanah. Perekayasa juga dapat memasukkan beberapa vertebrata yang merupakan penghuni tanah paruh waktu dan terutama menggali tanah untuk makanan atau tempat berteduh. Organisme tanah yang

termasuk dalam kelompok fungsional lain juga dapat memainkan peran yang relatif kecil dalam rekayasa tanah. Bakteri dan jamur juga berperan berperan dalam pembentukan struktur tanah, misalnya eksudat jamur mikoriza arbuskular senyawa yang meningkatkan pembentukan agregat tanah dan miselia jamur telah terbukti secara fisik menjerat agregat dan mengikat mereka bersama-sama. Sedangkan kelompok vertebrata tanah yang termasuk makhluk relatif besar seperti tikus tanah. Mereka biasanya menggali liang dan terowongan di bawah tanah untuk mendapatkan perlindungan dari pemangsa dan cuaca ekstrem teritorial. Spesies dapat mempertahankan satu set liang sistem, yang lain seperti tikus tanah menggali banyak liang yang tidak dipelihara.

Penggalian mereka mencampur tanah lapisan atas dengan serasah dan kotoran. Ini membantu menyuburkan tanah dan mengubur bahan organik tanah, yang menguntungkan banyak tanaman dan mikroorganisme tanah. Liang dan terowongan mereka juga memungkinkan air dari badai besar dengan cepat meresap ke dalam tanah, bukannya mengalir. juga mengubur benih, sehingga mendorong penyebaran dan pertumbuhan tanaman Sistem liang menganginkan tanah, menyediakan oksigen di sekitar akar tanaman.

Cacing tanah berkisar dari beberapa milimeter hingga beberapa puluh sentimeter dan pada dasarnya merupakan sistem pencernaan yang panjang dalam bentuk tabung. Cacing tanah sering membentuk bagian utama dari biomassa fauna tanah, mewakili hingga 50% dari biomassa fauna tanah di beberapa padang rumput beriklim sedang, dan hingga 60% di beberapa hutan beriklim sedang. Di Eropa, tetapi juga Amerika Utara dan Asia Barat, cacing yang paling umum termasuk dalam famili Lumbricidae, yang memiliki sekitar 220 spesies.



Gambar 38. Morfologi cacing tanah di habitatnya (Gueadi, 2020)

Cacing tanah adalah makhluk penggali, menelan tanah dan mengeluarkannya baik di permukaan tanah atau di ruang yang baru saja mereka kosongkan dengan menelan tanah. Mereka melakukan perjalanan di liang mereka dengan kontraksi otot yang juga memperpendek dan memperpanjang tubuh mereka, dibantu dalam perkembangan mereka dengan sekresi lendir pelumas. Dengan cara ini mereka dapat bergerak beberapa meter.

Cacing tanah memainkan peran utama dalam fungsi tanah seperti penguraian bahan organik, mereka adalah herbivora dan dapat dibagi menjadi tiga kategori ekologi utama: (1) epigeik atau serasah daun-/cacing kompos, (2) cacing endogeik yang hidup di tanah lapisan atas dan juga makan di dalam tanah, sebagian besar pada tanaman, dan (3) cacing anecik yang menghabiskan sebagian besar waktunya di tanah, di liang dalam semi permanen yang mereka bangun, tetapi memakan serasah permukaan yang mereka buat. Cacing epigeik memiliki dampak kecil pada struktur tanah, dan anekik serta endogeik bertanggung jawab atas sebagian besar pekerjaan rekayasa, melalui aktivitas penggalian dan pencampuran mereka.

Selain itu, usus cacing tanah sebenarnya adalah reaktor mikroba yang sangat aktif dengan kondisi lingkungan tertentu yang secara selektif membangunkan mikroorganisme tanah yang tidak aktif. Oleh karena itu, sebagai hasil dari aktivitas mikroba, cacing tanah menunjukkan konsentrasi nutrisi yang relatif tinggi, seperti NH_4^+ dan P. Mayoritas cacing tanah adalah hermaphrodit, yang berarti bahwa setiap individu memiliki organ reproduksi jantan dan betina. Meskipun kekhasan ini, cacing tanah masih kawin, untuk bertukar sperma dengan yang mereka kemudian akan menyuntikkan telur mereka sendiri. Sebagian kecil spesies juga dapat bereproduksi dengan partenogenesis (aseksual) reproduksi yang memberi mereka keuntungan yang signifikan dalam menjajah lingkungan baru dan kadang-kadang menjadi spesies invasif.

Cacing tanah biasanya membutuhkan waktu sekitar satu tahun untuk berkembang ke tahap dewasa, meskipun hanya sebagian kecil (20 hingga 30%) yang berhasil mencapai tahap ini. Beberapa spesies besar yang hidup di tanah dalam dapat hidup beberapa tahun. Rayap adalah serangga kecil, berukuran sekitar 0,5-2 cm, tergantung pada gips dan spesiesnya. Semua spesies rayap sangat sosial dan hidup dalam koloni hingga satu juta individu. Namun sementara hampir 3.000 spesies rayap kini telah diidentifikasi, kurang dari sepuluh

spesies muncul di habitat alami dan hanya sedikit di antaranya yang hidup di tanah.

Cacing tanah menelan jaringan tanah dan daun untuk mengekstrak nutrisi dan kemudian mengeluarkan gips, atau pelet feces kecil dengan ukuran mulai dari beberapa milimeter hingga beberapa sentimeter dengan diameter. Biasanya, gips granular sangat kecil dan dibentuk oleh pelet feces yang terisolasi dan umumnya diproduksi oleh cacing epigeik, sedangkan globular cast lebih besar dan biasanya diproduksi oleh cacing tanah endogeik atau anesik. Mereka terdiri dari akumulasi pelet berbentuk oval yang menyatu untuk membentuk struktur besar. Cacing tanah membangun habitat melalui gerakan mereka dalam matriks tanah. Setiap kali mereka melewati habitat tersebut, mereka melapisi dindingnya dengan lendir. Habitat ini dapat diisi dengan gips dan berkontribusi baik untuk pembentukan pori makro atau akhirnya pembentukan mikroagregat (Turbe et al., 2010).

Rayap bawah tanah hidup dan berkembang biak di tanah, kadang-kadang sedalam beberapa meter - meskipun beberapa koloni mungkin membangun sarang di dalam pohon tumbang atau di lokasi lain di atas tanah. Sarang rayap adalah struktur rumit yang dibuat dengan menggunakan kombinasi tanah, lumpur, kayu yang dikunyah / selulosa, air liur, dan kotoran yang menciptakan ruang hidup yang terlindungi dan kelembaban optimal melalui kondensasi air. Di dalam sarang, jaringan galeri mirip terowongan memberikan kemungkinan Baik rayap maupun koloni biasanya tidak melakukan perjalanan jarak jauh karena mereka dibatasi untuk hidup di dalam batas teritorial mereka atau di dalam bahan makanan mereka.



Gambar 39. Rayap dan habitatnya (kayu yang melapuk dan tanah)
Atrindo Asia Global, 2020

Rayap adalah detritivora utama, yang memainkan peran penting dalam jaring makanan tanah. Mereka mampu mendegradasi selulosa,

molekul gula kompleks yang memberi struktur pada pohon dan semak. Selulosa tidak dapat dicerna oleh sebagian besar organisme lain, termasuk manusia. Rayap memakan sebagian besar selulosa dari bahan tanaman mati, seperti kayu dan serasah daun, tetapi juga pada kotoran hewan (Lavelle dan Spain, 2001).

Beberapa rayap juga merupakan pemakan tanah-kayu dan pengumpan tanah, yang berarti bahwa mereka memakan sebagian besar bahan mineral. Nutrisi mereka terutama berasal dari kayu yang membusuk dengan baik dan bahan organik tanah yang sebagian dilembabkan. Kelompok rayap lainnya, di beberapa wilayah di dunia, menumbuhkan jamur di sarangnya pada kue bahan tanaman maserasi (rayap tumbuh jamur) Rayap adalah serangga eusosial yang hidup dalam koloni terorganisir yang terdiri dari gips, atau kumpulan individu yang tampak berbeda yang dirancang untuk melakukan tugas tertentu. Koloni dimulai dengan ratu dan rajanya, tetapi pada saat dewasa, mereka dapat mencapai beberapa ratus hingga beberapa juta individu Ratu adalah individu sentral dan terbesar dalam koloni, yang fungsinya menghasilkan 10-20 telur pada tahap awal koloni, tetapi hingga beberapa ribu telur per hari setelah beberapa tahun. Segelintir prajurit, dengan kepala besar dan rahang kuat, ditempatkan di luar sarang, untuk menjaga sarang dan koloni. Beberapa prajurit, dengan kepala besar dan rahang kuat, ditempatkan di luar sarang, untuk menjaga sarang dan sarang. koloni. Rayap biasanya hidup beberapa minggu dengan pengecualian pasangan kerajaan yang dapat hidup selama bertahun-tahun.

Dalam aktivitas pembangunannya, rayap memproses material dalam jumlah besar dan mengangkut partikel-partikel kecil dari cakrawala tanah yang lebih dalam ke bagian atas. Jadi gundukan mereka menunjukkan sifat tanah yang berbeda dibandingkan dengan tanah di sekitarnya. Demikian pula, melalui mereka kegiatan membangun sarang, semut dapat memasukkan banyak bahan organik dan nutrisi ke dalam tanah. Semua kegiatan ini berkontribusi pada pencampuran tanah dan pembentukan agregat tanah.



Gambar 40. Isopoda tanah (Sumber: wikiwand.com)

Isopoda biasanya memiliki pola makan detritivorous, dan bertindak sebagai insinyur ekosistem dalam menghasilkan pelet feces yang kadang-kadang agak stabil. Kadang-kadang mereka bisa menjadi insinyur ekosistem yang sangat penting, terutama di daerah gurun (Yair 1995). berbagai kebiasaan makan, beberapa menjadi herbivora, detritivor, karnivora atau parasit. Isopoda berkembang biak melalui reproduksi seksual. Rentang hidup rata-rata sebagian besar isopoda adalah sekitar 2 tahun tetapi beberapa telah hidup selama 5 tahun.

Pada awalnya kami sepakat membatasi lingkup fauna tanah pada komponen invertebrata tanah. akan tetapi, dalam hal ini terdapat mamalia tanah yang memberikan pengaruh signifikan pada komunitas tanah terutama pada fauna tanah invertebrata. Mamalia tanah yang kecil tersebut dikenal dengan mole (tikus tanah). Moles adalah mamalia kecil dengan moncong runcing dan tidak berbulu di depan mulut dan tubuh silindris berukuran panjang sekitar 15 cm. Mereka beradaptasi dengan sangat baik di liang bawah tanah, dengan mata tertutup kecil, tidak ada telinga luar, dan kaki depan yang sangat lebar dan lebar. (Gambar 41). Moles adalah mamalia kecil dengan moncong runcing dan tidak berbulu di depan mulut dan tubuh silindris berukuran panjang sekitar 15 cm. Mereka beradaptasi dengan sangat baik di liang bawah tanah, dengan mata tertutup kecil, tidak ada telinga luar, dan kaki depan yang sangat lebar dan lebar. Mole sangat umum, dan dapat ditemukan di mana-mana di Eropa, kecuali Irlandia. Mole ada di sebagian besar habitat di mana tanahnya cukup dalam untuk memungkinkan pembuatan terowongan dan tidak mampu mempertahankan keberadaannya di tanah yang keras, padat, dan semi-kering seperti di hutan konifer.



Gambar 41. Mole (Tikus Tanah) (Sumber: Brown, 2019)

Moles menghabiskan hampir seluruh hidup mereka di bawah tanah dalam sistem terowongan permanen dan semi permanen yang ekstensif. Sistem liang dalam permanen membentuk jaringan kompleks yang dapat mencakup ratusan meter, pada kedalaman yang berbeda-beda di dalam tanah. Di sinilah Moles membangun sarangnya , biasanya satu atau lebih ruang sarang berbentuk bola, masing-masing dilapisi dengan tanaman kering. Sebagian besar jaringan bawah tanah mole biasanya terdiri dari terowongan dangkal berdiameter 3-4 cm yang membentang di atas tempat berburunya. Terowongan permukaan ini biasanya berumur pendek dan tidak dapat digunakan lagi atau hanya dilalui kembali pada jalur yang tidak teratur. Mole membuat liang rumah mereka di tempat yang tinggi dan kering, tetapi mereka lebih suka berburu di tanah yang teduh, sejuk, lembab, dan dihuni oleh cacing dan belatung. Jadi, terowongan permukaan biasanya terjadi di ladang yang baru dibudidayakan, di daerah tanah berpasir ringan dan Terowongan terdalam paling banyak digunakan pada suhu ekstrem, seperti pada saat kekeringan dan suhu rendah (Hendersen, 1994).

Mole masuk dalam kategori tikus tanah yang merupakan predator dimana makanan utamanya adalah cacing tanah, tetapi juga pada invertebrata tanah kecil lainnya, seperti larva serangga. Mereka memiliki kebutuhan makanan yang sangat besar, dan perlu makan dari 70% hingga 100% dari beratnya setiap hari. Ini membutuhkan mereka untuk bergerak secara ekstensif dalam mencari mangsa, mencukur tanah dengan Kaki depan dan menyendoknya ke permukaan untuk membentuk sarang tikus tanah Mereka mampu memperluas sistem terowongan mereka dengan 30 cm per jam dengan cara ini Mereka menangkap mangsanya baik dengan menjebak atau berburu. Mole dapat mengumpulkan mangsa yang jatuh melalui terowongan mereka atau mengejar dan menggali mereka. Setelah tertangkap, mereka dapat

melumpuhkan cacing tanah berkat racun dalam air liur mereka. Mereka kemudian menyimpan beberapa mangsanya di 'lemari makan' khusus untuk konsumsi nanti – hingga 1000 cacing tanah telah ditemukan di tempat penyimpanan tersebut. Jantan dan betina menyendiri hampir sepanjang tahun, menempati wilayah eksklusif. Dengan dimulainya musim kawin, pejantan memperbesar wilayah mereka, membuat terowongan di area yang luas untuk mencari betina menyebar dari sarang induknya setelah kira-kira satu setengah bulan. Penyebaran terjadi di atas permukaan tanah. Kebanyakan mole tidak hidup lebih dari 3 tahun tetapi dapat hidup sampai 6 tahun. Predator utama mereka adalah burung hantu, kucing dan anjing tetapi kendaraan yang lewat dan manusia juga banyak memburunya (Ferraro et al., 2010).

Beberapa organisme yang termasuk dalam dua kelompok fungsional lainnya juga dapat bertindak sebagai perekayasa ekosistem. Selain fungsi utamanya dalam dekomposisi, mikroorganisme tanah juga memainkan peran kecil lainnya dalam rekayasa dalam tanah. Misalnya, bakteri dan jamur dapat menghasilkan (memancarkan) zat lengket dalam bentuk polisakarida (sejenis gula) atau protein yang membantu mengikat partikel tanah menjadi agregat kecil, memberikan stabilitas struktural pada tanah. Dengan demikian, perekayasa kimia dapat berkontribusi pada fungsi rekayasa tanah. Namun, secara umum efeknya kurang terlihat dibandingkan dengan yang berasal dari para perekayasa ekosistem. Sama halnya dengan perekayasa kimia, pengatur biologis terbesar (colembola dan tungau) juga memiliki fungsi rekayasa. Mereka dapat menghasilkan struktur dari bahan organik di mana mikroba dapat hidup dan berfungsi. Struktur ini dapat diproduksi baik dengan mengubah laju dekomposisi mikroba melalui penggembalaan dan ekskresi feses yang kaya nutrisi dan berkontribusi pada pembentukan struktur. Meskipun dampaknya feses pada sifat fisik tanah terbatas, struktur ini dapat mengubah pola dekomposisi dan mineralisasi spatiotemporal. Sementara mineralisasi dapat ditingkatkan dalam waktu singkat di dalam struktur tersebut, dalam jangka panjang, aerasi dan penyimpanan air mungkin terbatas, mengakibatkan penurunan penting dari mineralisasi. Selain itu, struktur ini dapat melepaskan asam organik yang mempengaruhi fungsi tanah dalam jangka panjang.

Cacing pot atau cacing putih adalah makhluk putih kecil yang biasa ditemukan di tanah dan paling dikenal sebagai makanan ikan. Secara ilmiah, mereka dikenal sebagai Enchytraeids dan merupakan kerabat tersegmentasi dari cacing tanah. Kelompok ini juga termasuk

spesies air, seperti cacing es. Dengan ukuran tubuh berkisar antara 1 sampai 50 mm, mereka jauh lebih kecil dari cacing tanah lainnya, dan hampir tidak terlihat dengan mata telanjang. Cacing putih termasuk organisme yang memakan limbah dan memberikan aerasi ke tanah atau kompos di sekitarnya. Cacing putih dalam kompos tidak secara langsung membahayakan apa pun pada lingkungan, tetapi mereka tumbuh subur dalam kondisi dengan kelembaban tinggi. Kelompok ini memakan jenis sampah yang sama dengan cacing tanah. Makanan mereka terutama terdiri dari bakteri, jamur dan bahan organik. Mereka juga dikenal memangsa nematoda. Mereka efisien dalam mengaerasi tanah dan memecah beberapa bahan organik. *Enchytraeids* memiliki toleransi yang luas terhadap air, tetapi memiliki sedikit adaptasi terhadap kekeringan. Mereka lebih suka lingkungan asam yang lembab, dan dapat bermigrasi ke atas dan ke bawah setiap hari sebagai respons terhadap perubahan kelembaban tanah. Dengan demikian, mereka mencapai kelimpahan terbesar mereka di tanah beriklim lembab. Beberapa Enchytraeid bahkan dapat ditemukan di bawah salju dan es gletser, dan mereka umum di sub-arktik. Beberapa spesies memiliki kemampuan mengejutkan untuk menghasilkan darah merah untuk bertahan hidup dalam kondisi oksigen rendah. Enchytraeids adalah hermaphrodit, yang berarti bahwa setiap individu memiliki keduanya organ reproduksi jantan dan betina, meskipun beberapa spesies dapat bereproduksi melalui partenogenesis dan aseksual dengan fragmentasi dan juga dengan pembuahan sendiri dalam siklus sekitar 20 hari.



Gambar 42. Cacing putih (Pot worms) (Taylor, 2019)

Akar adalah bagian tanaman yang biasanya terletak di bawah tanah dan menambatkan tanaman ke tanah, sambil menyerap nutrisi dan kelembaban dari tanah. Akar akan bervariasi dalam bentuk dan

ukuran. Mereka bisa dangkal atau dalam, dan terdiri dari akar kasar (> 2mm) yang merupakan organ abadi yang setara dengan cabang pohon, dan akar halus yang merupakan organ berumur pendek yang mengkhususkan diri dalam penyerapan air dan nutrisi, umumnya tumbuh ke segala arah yang sesuai kondisi aerasi, nutrisi mineral dan ketersediaan air ada.

Dua fungsi utama akar adalah penyerapan air dan nutrisi anorganik, dan penahan tubuh tanaman ke tanah. Akar sering berpartisipasi dalam penyimpanan makanan dan nutrisi dan mereka dapat menghasilkan, atau menyimpan bahan kimia yang digunakan dalam mempertahankan tanaman melawan musuh pemakan tanaman. Wilayah tanah yang berbatasan langsung dengan dan dipengaruhi oleh akar tanaman (sekitar 2 mm) termasuk wilayah rizosfer akar dan pada area ini (ujung akar) akar menarik nutrisi dan air ke tanaman, sambil memancarkan senyawa organik, yang bersama-sama membuat lingkungan rizosfer sangat berbeda dari bagian tanah lainnya. Konsentrasi organisme tanah bisa sampai 500 kali lebih tinggi di rizosfer daripada di bagian tanah lainnya. Selain itu, akar dari banyak spesies tanaman bersimbiosis dengan jamur atau bakteri tertentu, yang dapat meningkatkan perolehan nitrogen, fosfor, dan air.

Akar tanaman sangat dinamis dimana rambut akar hanya hidup maksimal beberapa hari, sementara bagian lain dapat berubah dalam beberapa hari atau minggu. Hanya akar penahan yang lebih besar dapat menjadi setua tanaman itu sendiri. Berlawanan dengan regulator biologis, pengaruh perekayasa ekosistem terutama berkembang melalui hubungan non-trofik. Inti dari konsep rekayasa tanah adalah kemampuan perekayasa ekosistem untuk bergerak melalui tanah dan membangun struktur organo-mineral dengan sifat fisiko-kimiawi tertentu (Lavelle et al., 2005). Dengan demikian, para perekayasa ekosistem mengubah dinamika ekosistem melalui struktur rizosfer secara langsung dengan memodifikasi atau menciptakan habitat atau secara tidak langsung dengan mengatur ketersediaan sumber daya untuk spesies lain.

TANTANGAN DAN HARAPAN

Indonesia dengan potensi tingkat kesuburan tanah tinggi sangat membantu pertumbuhan ekonomi bangsa, dimana sebagian besar masyarakat Indonesia juga bergantung pada bidang pertanian. Indonesia dengan pasokan pangan yang masih dalam kondisi aman mengharuskan kita untuk terus berfikir kedepan mengantisipasi dan mencari alternatif yang tepat dalam menghadapi berbagai kemungkinan yang akan terjadi. Mengingat jumlah populasi bangsa yang terus meningkat disertai dengan semakin meluasnya areal pemukiman warga dan areal industrimenjadi ancaman tersendiri terhadap ketahanan pangan bagi bangsa di masa yang akan datang. Pemanfaatan areal agroekosistem dengan meningkatkan kualitas dan efektivitas produksi pangan yang variatif (diversifikasi) merupakan salah satu solusi untuk menghadapi tantangan di masa depan. Kemajuan substansial dalam memahami potensi manfaat diversifikasi vegetasi agroekosistem telah memberikan peluang dan tantangan baru kedepan.

Terlepas dari hal tersebut, penerapan diversifikasi tidak bisa dilakukan secara langsung tanpa adanya perencanaan dan strategi yang matang. Masih banyak lagi tantangan dalam menerapkan strategi diversifikasi. Pertama, adalah tantangan ekonomi dan budaya yang substansial terhadap diversifikasi pertanian. Misalnya, kemungkinan diversifikasi yang akan membutuhkan investasi keuangan yang besar, seperti pengembangan peralatan panen baru dan campuran benih yang beragam. Kedua, masih menjadi tantangan untuk mengidentifikasi, menetapkan, dan mempertahankan spesies campuran yang optimal untuk memaksimalkan hasil, terutama kelimpahan relatif, dimana spesies bergeser dari waktu ke waktu. Ketiga, akan lebih sulit untuk mengidentifikasi spesies campuran secara optimal yang memaksimalkan tidak hanya hasil tetapi juga jasa ekosistem lainnya karena kumpulan spesies yang berbeda mendorong fungsi ekosistem yang berbeda pada suatu tipe lahan baik di padang rumput dan hutan (van der Plas et al.2016). Mengingat tantangan berat ini, apakah diversifikasi dapat dicapai dan bermanfaat?

Kami meyakini bahwa tanaman yang beranekaragam akan menghasilkan spesies fauna tanah maupun biota lainnya yang beragam

terutama spesies yang hidup pada tanaman di suatu tipe lahan. Sebagian besar spesies fauna tanah bergantung pada tanah sebagai habitat maupun sumber nutrisi. Kami mempercayai hal tersebut bahwa diversifikasi akan membawa keseimbangan dan merekomendasikan dua strategi pelengkap. Pertama, diversifikasi agroekosistem yang dikelola secara intensif yang saat ini diterapkan sebagai tegakan tanaman dengan keragaman rendah (seringkali terdapat pada sistem pertanian monokultur). Agroekosistem yang dikelola secara intensif ini mencakup sistem tanaman baris dengan input tinggi dan keanekaragaman hayati rendah. Hal tersebut bertujuan untuk meningkatkan keragaman tanaman yang ditanam dan menanam tanaman pagar yang kaya spesies sebagai tanaman perbatasan dan merupakan salah satu strategi yang paling mudah diterapkan. Seringkali ada *trade-off* antara memperoleh hasil tinggi baik dari input tinggi atau keanekaragaman yang tinggi karena kecenderungan input yang meningkatkan hasil sering menurunkan keanekaragaman hayati. Namun, dimungkinkan untuk memperoleh hasil tinggi dari tingkat input dan keragaman yang moderat, dengan keragaman bertindak sebagai pengganti sebagian untuk beberapa input.

Salah satu tantangan unik untuk diversifikasi sistem produksi intensif adalah bahwa banyak tanaman telah dipilih dan dibiakkan untuk memaksimalkan hasil dalam sistem monokultur, bukan dalam sistem kebun campuran. Peluang untuk meningkatkan hasil dari sistem kebun campuran dengan memilih variasi tanaman produktif untuk saling melengkapi memberikan harapan yang cukup besar untuk kesetimbangan hasil dan keanekaragaman. Kata kuncinya adalah mencari strategi yang efektif dalam sistem diversifikasi agroekosistem mengintensifkan produksi secara berkelanjutan (Pywell et al.2015).

Kedua, diversifikasi sistem yang dikelola secara ekstensif dengan input rendah dan lahan pertanian dengan keragaman hayati tinggi, dimana sebagian aktivitas yang dilakukan dengan mengawasi atau dengan mendukung regenerasi alami di hutan. Diversifikasi mungkin merupakan strategi yang sangat efektif dalam sistem yang dikelola secara ekstensif, di mana hal ini bertujuan untuk mengoptimalkan hasil dan memanfaatkan tambahan ekosistem (misalnya penyimpanan karbon dan habitat) (Gamfeldt et al. 2013), termasuk dalam strategi pembagian lahan yang lebih luas. Manfaat diversifikasi agroekosistem diharapkan menjadi yang terbesar di mana input pertanian menimbulkan biaya sosial terbesar dan gagal mengoptimalkan kondisi lingkungan biotik dan abiotik untuk memaksimalkan hasil satu

spesies tanaman. Di bawah kondisi lingkungan yang heterogen secara spasial dan berfluktuasi akan menimbulkan perbedaan relung antara spesies tanaman yang menjadi sangat berguna untuk memastikan produksi biomassa (Turnbull et al.2016). Diversifikasi tidak akan selalu mempengaruhi semua jasa ekosistem, tetapi keanekaragaman tanaman dapat memberikan sebagian untuk melengkapi banyak input pertanian (Weigelt et al.2009), seperti pupuk, pestisida, penyerbuk dan irigasi.

Masukan ini (input senyawa kimia) nantinya dapat menjadi mahal, tidak hanya bagi orang yang membeli dan menerapkannya tetapi juga bagi orang lain, di tempat lain dan di masa depan yang menanggung biaya sosial yang tidak diinginkan, seperti yang terkait dengan penurunan kualitas air dan udara akibat polusi nitrogen (Keeler et al.2016). Kontroversi pembangunan dan konservasi akan terus berlanjut hingga sampai ditemukannya titik kesepakatan yang tepat untuk kesejahteraan manusia dan alam. Daripada hanya menanyakan apakah sistem kebun campuran yang beragam menghasilkan hasil yang jauh lebih besar daripada agroekosistem saat ini, lebih baik berusaha untuk mengambil keputusan bijak yang tidak memihak satu dengan yang lainnya. Kami mendorong penggunaan campuran yang beragam bahkan dalam kasus hasil yang serupa atau sedikit lebih rendah daripada sistem monokultur adalah yang terbaik, karena berbagai manfaat tambahan yang diberikan oleh sistem kebun campuran. Lebih lanjut, dalam hal ini kami mendorong pengembangan studi yang mempertimbangkan rangkaian biaya dan manfaat diversifikasi yang lebih lengkap.

Selanjutnya hal yang tidak kalah menariknya adalah terkait objek yang dibahas dalam buku ini yaitu tantangan utama untuk menentukan bagaimana spesies tanah (fauna tanah) merespon perubahan lingkungan yang cepat, baik melalui plastisitas fenotipik, pergeseran jangkauan atau dengan adaptasi evolusioner. Kemudian bagaimana perubahan ini berdampak pada reorganisasi komunitas di atas tanah dan fungsi ekosistem, dan bagaimana tingkat keanekaragaman hayati tanah dapat mempengaruhi proses ini. Meskipun sedikit, bukti yang muncul bahwa organisme tanah tertentu memiliki kapasitas untuk merespon dengan cepat terhadap perubahan iklim. Fauna tanah menjadi organisme tanah yang sensitif terhadap gangguan dan perubahan lingkungan. Perlu disadari bersama bahwa, analisis temporal keanekaragaman hayati tanah saat ini berada di bawah ancaman dari berbagai tekanan antropogenik, tetapi pemahaman

kita tentang bagaimana organisme tanah beradaptasi dengan perubahan yang cepat di lingkungan tersebut, apakah mereka dapat melakukan ini cukup cepat untuk mengatasi lingkungan baru, dan bagaimana kapasitas adaptif ini dapat berhubungan dengan tingkat keanekaragaman hayati tanah yang terbatas. Hal tersebut perlu kita jawab bersama tidak hanya untuk kepentingan kita sekarang melainkan untuk regenerasi yang akan datang.

Sintesis dan pekerjaan rumah terbaru yang perlu diselesaikan secara tuntas adalah mekanisme yang terlibat dalam berbagai respons komunitas tanah terutama fauna tanah. Akan tetapi terbukti bahwa keanekaragaman hayati tanah berpotensi memengaruhi proses evolusi dan ekologi di bawah perubahan global melalui efek secara langsung (patogen, simbiosis atau herbivora akar), serta oleh efek tidak langsung yang melibatkan organisme pengurai di dalam tanah. Biota tanah mungkin juga memiliki peran dalam dinamika eko-evolusi dari spesies tanaman eksotik yang telah diperkenalkan. Semakin banyak penelitian menunjukkan bahwa spesies tanaman yang diperkenalkan telah lolos dari efek umpan balik negatif dari biota tanah, sehingga mendukung hipotesis pelepasan musuh alaminya.

Dalam satu penelitian tentang *Prunus serotina* (ceri hitam), patogen tanah lebih ganas di tanah asli daripada di kisaran non-asli. Studi-studi ini menunjukkan bahwa baik biota tanah patogen asli yang menyebabkan umpan balik negatif lebih cepat atau lambat yang diperkenalkan secara bersamaan, atau bahkan patogen tanah asli dalam kisaran baru menjadi lebih ganas dengan evolusi yang lebih cepat. Indikasi evolusi yang begitu cepat muncul dari studi tentang *Alliaria petiolata* yang diperkenalkan di Amerika Utara, yang menunjukkan bahwa komunitas pengurai tanah di lokasi yang baru saja diinvasi kurang mampu menguraikan senyawa beracun dari tanaman yang diintroduksi dibandingkan komunitas mikroba dari lokasi yang diinvasi sebelumnya. Juga, setelah invasi, kekayaan dekomposer telah terbukti menurun dan kemudian meningkat lagi, menunjukkan bahwa komunitas mikroba dapat beradaptasi atau menjadi direorganisasi melalui proses penyebaran dan kolonisasi.

Hubungan yang dikonseptualisasikan antara keanekaragaman hayati tanah dan pengenalan spesies tumbuhan eksotik invasif yang berasal dari benua lain dan spesies tumbuhan yang memperluas jangkauannya dalam benua yang sama. Semua biota asli (tanaman, serangga dan mikroba di atas tanah, dan mikroba di bawah tanah dan

invertebrata) telah banyak memberikan kontribusi ke dalam tanah serta memerikan berbagai layanan untuk kesejahteraan manusia. Pada tahap invasi ini, tanah dan keanekaragaman hayati di atas permukaan tanah biasanya menurun karena hilangnya spesies tumbuhan inang, atau karena spesies tumbuhan eksotik yang menekan biota spesifik oleh senyawa kimia baru. Selama keadaan naturalisasi, taksa mikroba tanah dapat berkembang pesat di bawah pengaruh spesies tumbuhan eksotik, yang menyebabkan patogen asli dan organisme pengurai dapat beradaptasi dengan spesies tumbuhan eksotik. Karena efek patogen spesifik biasanya lebih kuat daripada efek pengurai yang spesifik sehingga tanaman eksotik menjadi terkontrol. Akibatnya, kelimpahan spesies tanaman eksotik menjadi terkendali, sehingga berkontribusi pada naturalisasi ekologisnya.

Dua dekade terakhir penelitian keanekaragaman hayati tanah telah mengungkapkan bahwa komunitas bawah tanah sangat beragam dan bahwa mereka memiliki peran utama dalam membentuk keanekaragaman hayati di atas tanah dan berfungsinya ekosistem darat, serta tanggapan ekologi dan evolusioner mereka terhadap perubahan lingkungan. Salah satu tantangan terbesar bagi ahli ekologi tanah adalah untuk mengintegrasikan pemahaman baru ini ke dalam kerangka ekologi yang ada dan baru dalam penelitian fungsi keanekaragaman hayati. Memang, secara teori masih banyak yang telah tertinggal di belakang terkait pekerjaan eksperimental dalam ekologi tanah, dan ada kebutuhan mendesak untuk mengadaptasinya serta mengembangkan model teoretis baru untuk menjelaskan pola organisasi komunitas di bawah maupun permukaan tanah dan menggunakannya untuk memahami dampaknya terhadap dinamika komunitas di atas tanah dan fungsi ekosistem. Ada juga kebutuhan untuk meningkatkan pemahaman tentang mekanisme yang membentuk komunitas biologis tanah yang kompleks pada skala spasial dan temporal yang berbeda.

Ada kelangkaan informasi tentang spasial dan temporal pola keanekaragaman hayati tanah, dan ini membuat sulit untuk mengembangkan model baru yang menjelaskan struktur komunitas tanah. Tetapi ketersediaan data keanekaragaman hayati tanah berkembang pesat dan dengan ini muncul kesempatan untuk mengembangkan kerangka kerja baru untuk menjelaskan pola organisasi komunitas pada skala spasial dan temporal yang berbeda, dan untuk mengidentifikasi mekanisme ekologi dan evolusi yang mendasarinya. Kemajuan telah dibuat di bidang ini, misalnya melalui

penggunaan analisis jaringan untuk menentukan pola koeksistensi dalam komunitas mikroba tanah dan penerapan teori-teori baru untuk stabilitas jaring-jaring makanan di tanah.

Namun, tantangan yang tersisa adalah untuk menggabungkan jalinan kompleks interaksi biotik yang beroperasi di tanah ke dalam kerangka integratif tunggal yang juga memperhitungkan kompleksitas struktural dan kimia tanah. Sekarang jelas bahwa keanekaragaman hayati tanah mempengaruhi berbagai proses ekosistem, termasuk siklus biogeokimia dan dinamika eko-evolusi dalam komunitas tumbuhan dan di atas permukaan tanah dalam menanggapi perubahan global. Namun, masih ada pertanyaan mengenai peran relatif keragaman genetik, spesies dan fungsional dalam mendorong proses ini, dan peran faktor ekstrinsik dalam memodulasi hubungan keanekaragaman hayati-fungsionalnya, seperti variasi kesuburan tanah dan kompleksitas struktur tanah. Selain itu, hampir tidak ada yang diketahui tentang bagaimana komunitas bawah tanah menyesuaikan diri dan beradaptasi dengan perubahan lingkungan yang cepat, meskipun respons keanekaragaman hayati tanah tampaknya memengaruhi proses evolusi di atas permukaan tanah, termasuk pemilihan sifat tanaman sebagai respons terhadap perubahan lingkungan. Tanggapan eko-evolusi dari komunitas bawah tanah terhadap perubahan lingkungan yang cepat juga memiliki potensi untuk mempengaruhi dinamika komunitas dan fungsi ekosistem di dalam tanah, tetapi sejauh ini hal ini masih belum dieksplorasi lebih jauh.

Akhirnya, tujuan utama penelitian keanekaragaman hayati tanah adalah untuk mengintegrasikan apa yang kita pelajari ke dalam keputusan pengelolaan lahan yang berkelanjutan, terutama mengenai pendekatan baru untuk pemeliharaan dan peningkatan kesuburan tanah untuk produksi pangan, pakan dan biomassa, pencegahan penyakit manusia, dan mitigasi dari perubahan iklim. Seperti yang kami soroti di sini, era penelitian baru diperlukan untuk memenuhi tantangan ilmiah ini dan untuk mengintegrasikan pemahaman tersebut ke dalam pengelolaan lahan di masa depan dan strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. Kami meyakini bahwa tidak hanya menjadi tugas para peneliti dalam menjaga dan melestarikan keanekaragaman hayati tanah terutama fauna tanah melainkan keterlibatan masyarakat dan stakeholder terkait sangat diperlukan. Periset berupaya membuka gerbang dengan eksplorasi fauna tanah selanjutnya dukungan masyarakat dan pemerintah dalam upaya membuat kebijakan tegas

dengan landasan hukum yang kuat terkait kelestarian fauna tanah.

Kami akan terus berupaya mengangkat fauna tanah ke permukaan sebagai kunci utama dalam menjaga keberlanjutan ekosistem. Fauna tanah bukan sebagai alat ataupun entitas untuk menghalangi atau mempersempit lingkup pembangunan dan perkembangan sektor pertanian, melainkan sebagai salah satu motor penggerak kemajuan pertanian bangsa. Kami sangat mendukung keberlanjutan sektor pertanian dalam meningkatkan ketahanan pangan dan pemenuhan kebutuhan masyarakat. Trobosan terbaru dalam penguatan aspek teknologi pertanian yang ramah lingkungan untuk meningkatkan pertumbuhan ekonomi bangsa, kami yakini akan terus berkembang hingga pada saatnya nanti akan mencapai titik keseimbangan. Kami sangat berharap dengan adanya buku ini, berbagai lapisan masyarakat, stakeholder dan peneliti dapat saling bahu membahu untuk terus berupaya mengenalkan fauna tanah dengan berbagai karakteristik dan fungsi pentingnya terhadap lingkungan kepada generasi penerus dan pada akhirnya fauna tanah bisa menjadi langkah awal untuk pencapaian kemajuan sektor pertanian dan konservasi lingkungan di Indonesia.

PENUTUP

Tanah mempunyai fungsi yang kompleks didalam ekosistem disamping sebagai media tumbuh, siklus dan daur ulang hara, sistim pensuplai dan pembersih air, media pembangunan dan yang tak kalah lebih penting adalah sebagai habitat dari organisme tanah. Tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis menjadi rumah bagi sebagian besar biota tanah termasuk fauna tanah untuk melakukan aktivitas, tumbuh dan berkembang (beregenerasi). Faktor fisik dan kimia serta interaksi biologi pada kawasan hutan hujan tropis menjadi salah satu tolak ukur keberhasilan tersebut. Selain itu, ukuran habitat yang membuat variasi bentuk alam kawasan hutan hujan tropik merupakan faktor selanjutnya yang mendukung kehidupan biota tanah di dalamnya. Area hutan yang luas meningkatkan keragaman karena plot yang lebih besar dan memungkinkan memiliki lebih banyak habitat, sehingga relung, untuk mendukung keragaman spesies yang lebih besar. Banyak spesies memerlukan daerah jelajah yang luas untuk mendapatkan mangsa atau benih yang memadai.

Tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis mempengaruhi kestabilan keanekaragaman fauna tanah hutan. Meskipun hampir 70 persen hutan hujan tropis berada di tanah asam, namun sebagian besar kesuburannya tetap terjaga berkat daur ulang unsur hara dan proses lainnya. Tanah tropika basah kawasan hutan hujan tropis merupakan salah satu reservoir keanekaragaman hayati yang paling penting. Hal ini mencerminkan metabolisme ekosistem karena semua proses bio-geo-kimia dari berbagai komponen ekosistem yang berbeda yang berbeda digabungkan di dalamnya; oleh karena itu fluktuasi kualitas tanah dianggap sebagai kriteria yang cocok untuk mengevaluasi keberlanjutan jangka panjang ekosistem. Di dalam struktur tanah yang kompleks komponen biotik dan abiotik berinteraksi erat dalam mengendalikan degradasi bahan organik dan proses daur ulang hara.

Fauna tanah menjadi reservoir keanekaragaman hayati yang penting dan memainkan peran penting dalam beberapa fungsi ekosistem tanah. Selain itu, fauna tanah juga sering digunakan sebagai indikator kualitas tanah, dimana para peneliti ekologi sering kali menjadikan keanekaragaman fauna tanah sebagai bioindikator kesehatan lingkungan. Beragam peran dan fungsi penting fauna tanah

kawasan hutan hujan tropis perlu diangkat ke permukaan untuk mengenalkannya lebih jauh kepada masyarakat.

Sebagai pelengkap dari keanekaragaman spesies fauna tanah, konsep keanekaragaman fungsional yang menjadi komponen kunci dalam memperoleh informasi peran dan fungsi fauna tanah pada ekosistem. Hal ini digambarkan atau diilustrasikan dalam berbagai struktur dan model data seperti peran dan fungsi ekosistem tanah, hierarki tanah dan dekomposisi serta jaring makanan pada komunitas tanah menjadi hal yang penting untuk dilakukan dan telah mendapatkan dukungan dari percobaan eksperimen pada komunitas tanah serta peningkatan laju dekomposisi yang signifikan pada perlakuan fauna yang paling kompleks (mikro, meso dan makrofauna). Hal yang menarik dari fauna tanah lainnya yaitu ketidaksamaan fungsional antara spesies penyusunnya merupakan pendorong utama dalam keanekaragaman hayati yang menjadi kekuatan pendorong utama dalam hubungan keanekaragaman hayati/proses tanah.

Aktivitas manusia sering menyebabkan degradasi kondisi lingkungan tanah yang menyebabkan penurunan kelimpahan dan penyederhanaan komunitas hewan dan tumbuhan serta fauna tanah, di mana spesies di yang mampu menanggung stres mendominasi melalui aliran energi jaring makanan pada sistem ekologi kawasan hutan akan hilang bahkan punah. Hasil dari pengurangan keanekaragaman hayati ini adalah ekosistem buatan yang membutuhkan intervensi manusia secara konstan dan biaya operasional yang lebih mahal, sedangkan jika itu hutan alami, hanya diatur oleh komunitas tumbuhan dan hewan melalui aliran energi dan nutrisi sebagai suatu bentuk kontrol yang kondisi sekarang semakin hilang dengan intensifikasi pertanian.

Hutan yang paling parah terdegradasi dengan keanekaragaman yang paling sedikit adalah hutan yang paling kecil, dengan luas satu hektar, sedangkan hutan yang paling banyak mempertahankan keanekaragaman adalah hutan dengan luas yang paling besar. Di cagar alam yang lebih kecil, angin yang mengering mencapai bagian dalam, mempengaruhi spesies pohon dan mengakibatkan lebih banyak pohon tumbang. Celah di kanopi memungkinkan lebih banyak sinar matahari mencapai lantai hutan, yang selanjutnya mengubah iklim mikro di bawahnya dan menyebabkan perubahan susunan spesies penghuni. Herbivora yang lebih besar meninggalkan petak-petak hutan karena jumlah pohon yang terbatas tidak dapat menyediakan makanan, segera diikuti oleh predator, yang tidak dapat mengatasi hilangnya

mangsa. Hilangnya predator menyebabkan ketidakseimbangan dalam rantai makanan, dan populasi herbivora kecil dan omnivora meningkat, menambah tekanan pada bank benih hutan dan merusak kemampuan reproduksi pohon hutan. Pasukan semut tentara tidak dapat ditopang oleh petak-petak hutan yang sedikit dan mereka pun pergi, bersama dengan burung, kupu-kupu, dan spesies serangga lainnya yang bergantung pada pasukan tersebut. Tumbuhan dan spesies hewan yang menyukai naungan mati karena lebih banyak sinar matahari yang menembus kanopi yang berkurang, dan spesies “celah”, seperti tanaman merambat dan spesies burung dan serangga tertentu, berkembang biak. Kehilangan ini terus memicu reaksi berantai yang menyebabkan perubahan besar dalam sistem, yang akhirnya mengakibatkan keruntuhannya.

Walaupun sebagian dari masyarakat menjadi pelaku dari alih fungsi hutan yang mengubahnya menjadi beberapa tipe lahan dan industri, akan tetapi di sisi lain terdapat masyarakat lainnya yang bergantung dari hutan. Kami meyakini bahwa dengan mempelajari dan terus berupaya menggali informasi fauna tanah sebagai indikator kesehatan tanah beserta peran dan fungsinya pada keseimbangan ekosistem akan memberikan manfaat yang besar terhadap perlindungan dan pelestarian hutan di kawasan hutan hujan tropis.

Kehidupan fauna tanah sebagai pemukim, indikator, dan arsitek tanah telah digarisbawahi, tetapi penelitian terbaru dan keprihatinan alam di seluruh dunia mendesak komunitas ilmiah untuk melihat lebih jauh ke dalam kontrol fauna tanah untuk pengelolaan tanah yang berkelanjutan di masa-masa yang bergejolak ini. Data molekuler saja tidak mencukupi untuk banyak penyelidikan tentang fauna tanah, dan karenanya diperlukan upaya yang sungguh-sungguh dalam meningkatkan keahlian dalam taksonomi klasik fauna tanah. Spesialisasi ini, bersama dengan data tentang biogeografi fauna tanah, hubungannya dengan masalah-masalah di atas tanah, dan skema pengelolaan lahan, akan sangat penting untuk menerima bagaimana fauna tanah akan berkomunikasi dan bereaksi terhadap berbagai perubahan di seluruh dunia. Hubungan erat faktor abiotik dengan keanekaragaman hayati tanah, perannya dalam peristiwa dan fungsi ekosistem, dan, akhirnya, pengaturan manfaat ekosistem bagi kesejahteraan manusia. Pemikiran yang tepat dan diteliti tentang spesies fauna tanah, identitasnya, luas geografisnya, dan pemahaman tentang perannya dalam pengelolaan tanah dan lahan akan membantu dalam memberikan prakiraan yang seimbang untuk kerja komunitas

biologis masa depan yang berada di bawah ancaman karena perubahan iklim lingkungan yang tak terelakkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rida, A.M.M and Marcel B. Bouché. 1997. Earthworm toxicology: From acute to chronic tests. *Soil Biol. Biochem* 29(3-4): 699–703.
- Adrinal., A. Saidi., Gusmini. 2012. Perbaikan sifat fisiko-kimia tanah psamment dengan pemulsaan organik dan olah tanah konservasi pada budidaya jagung. *Jurnal Solum* 9 (1): 25-35.
- Alberti M .2015. Ecoevolutionary dynamics in an urbanizing planet. *Trends Ecol Evol* 30(2):114–126.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I. 2004. Biodiversity and Pest Management in Agroecosystem. 2nd ed. New York: Hawworth press inc.
- Ananthakrishnan, T.N. 2009. *Ecodynamics of Insect Communities*. Scientific Publishers. India.
- Anderson, J.M. 2009. Why should we care about soil fauna?. *Pesq. agropec. bras., Brasília* 44(8): . 835-842.
- Aprisal. 2000. Kajian Reklamasi Lahan Marjinal Alang-Alang dan Model Sistem Usaha Tani Terpadu untuk Membangun Pertanian Lestari di Daerah Transmigrasi Pandan Wangi Peranap Riau. Disertasi Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Bogor
- Arico, Z and Jayanthi, S. 2018. Strategi Konservasi Hutan Taman Nasional Gunung Leuser Berdasarkan Analisis Swot. *Jurnal Jeumpa* 5(2): 119-125.
- Arrijani., Setiadi, D., Guhardja, E, Qayim, I. 2006. Vegetation analysis of the upstream Cianjur watersheds in Mount Gede-Pangrango National Park's. *B I O D I V E R S I T A S* 7(2): 147-153.
- Astrindo Asia Global (AAG). 2020. Rayap. AAG Pest Control. https://www.aag.co.id/storage/app/media/ARTIKEL%20RAYAP_.pdf
- Ayuke, F.O., Karanja, N.K., Muya, E.M., Musombi, B.K., Mungatu, J., Nyamasyo, G.H. 2009. Macro-fauna diversity and abundance across different land use systems in Embu, Kenya. *Trop. Subtrop. Agroecosyst* 11(2009): 371-384.
- Baccini, A.; Walker, W.; Carvalho, L.; Farina, M.; Sulla-Menashe, D.; Houghton, R. 2017. Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss. *Science* 2017, 358, 230–234

- Bakken, L.R., and Frostegard, A. 2006. Nucleic Acid Extraction from Soil. In: Nannipieri, P., Smalla, K. (eds) *Nucleic Acids and Proteins in Soil*. *Soil Biology* 8: 49-73.
- Bardgett RD and Chan KF. 1999. Experimental evidence that soil fauna enhance nutrient mineralization and plant nutrient uptake in montane grassland ecosystems. *Soil Biol Biochem* 31: 1007-1014
- Bardgett, R. 2005. *The biology of soil: A community andecosystem approach*. Oxford University Press Inc. New Yor: 242p.
- Bardgett, R.D., van der Putten, W.H. 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515: 505-511.
- Barreto, C., Lindo, Z. 2022. Response of soil biodiversity to global change. *Pedobiologia* 90: 150792.
- Barrios-O'Neill, D., Jaimie, T.A., Emmerson, M.C., Anthony, R., Hugh, J.M. 2015. Predator-free space, functional responses and biological invasions. *Functional Ecology* 29 (3): 377-384.
- Barros, E., B. Pashanasi, R. Constantino, & P. Lavelle. 2002. Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biol. Fertil. Soils* (2002) 35: 338-347.
- Basyra, B.S. 2000. Pengaruh Cara Pengelolaan Lahan terhadap Perubahan Sifat-Sifat Tanah Oxisol dan Hasil Kedelai di DAS Singkarak. *Jurnal Stigma* 8(3): 1-13.
- Baum, C., Peter, L., Weih, M., Lamersdorf, N. 2009. Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Landbau-forschung Volkenrode* 59(3): 183-196.
- Beerling, D.J.; Fox, A.; Stevenson, D.S.; Valdes, P.J. 2011. Enhanced chemistry-climate feedbacks in past greenhouse worlds. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2011, 108, 9770-9775.
- Bender, S.F. 2016. An underground revolution: bio-diversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. *Trends Ecol. Evol.*3: 440-452.
- Betts, M. G., Wolf, C., Ripple, W. J., Phalan, B., Millers, K. A., Duarte, Levi, T. (2017). Global forest loss disproportionately erodes biodiversity in intact landscapes. *Nature*, 547: 441-444.
- Bezemer, T.M., Lawson, C.S., Hedlund, K., Edwards, A.R., Brook, A.J., Igual, J.M., Mortimor, S.R., Van der Putten, W.H. 2006. Plant species and functional group effects on abiotic and microbial soil properties and plant-soil feedback responses in two grasslands.

Journal of Ecology 94(5): 893-904.

- Birkhofer, K., T.M. Bezemer, J. Bloem, M. Bonkowski, S. Christensen, D. Dubois, F. Ekelund, A. Fließbach, L. Gunst, K. Hedlund, P. Mäder, J. Mikola, C. Robin, H. Setälä, F. Tatin-Froux. 2008. Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry* 40(9): 2297-2308.
- Blomqvist, M. M., H. Olf, Blaau, M.B. 2000. "Interactions between above- and belowground biota: importance for small-scale vegetation mosaics in a grassland ecosystem." *Oikos* 90(3): 582-598.
- Böhnert, T., Wenzel, A., Altenhövel, C., Beeretz, L., Tjitrosoedirdjo, S. S., Meijide, A., ... Kreft, H. (2016). Effects of land-use change on vascular epiphyte diversity in Sumatra (Indonesia). *Biological Conservation*, 202: 20–29.
- Bongers, T. and Bongers, M. (1998) Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*, 10, 239-251.
- Bonkowski M, Brandt F (2002) Do soil protozoa enhance plant growth by hormonal effects? *Soil Biol Biochem* 34: 1709– 1715.
- Borneman J., and Hartin, R.J. 2000. PCR Primers That Amplify Fungal rRNA Genes from Environmental Samples. *Applied and Environmental Microbiology* 66(10): 4356-60.
- Bouchez T, Blieux AL, Dequiedt S, Domaizon I, Dufresne A, Ferreira S, Godon JJ, Hellal J, Joulain C, Quaiser A, Martin-Laurent F, Maulret A, Monier JM, Peyret P, Schmitt-Koplin P, Si-bourg O, D'oiron E, Bispo A, Deportes I, Grand C, Cuny P, Maron PA, Ranjard L (2016) Molecular microbiology methods for environmental diagnosis. *Environ Cem Lett* 14(4):423–441.
- Bradford, M.A., B. Berg, D.S. Maynard., W.R. Wieder, and S.A. Wood. 2016. Understanding the dominant controls on litter decomposition. *Journal of Ecology* 104: 229–238.
- Bradford, M.A., T. Eggers., J.E. Newington., G.M. Tordoff. 2007. Soil faunal assemblage composition modifies root in-growth to plant litter patches. *Pedobiologia* 50 (2007): 505—513.
- Briones, M.J.I. and Schmidt, O. 2017. Conventional Tillage Decreases the Abundance and Biomass of Earthworms and Alters Their Community Structure in a Global Meta-Analysis. *Global Change Biology* 23: 4396-4419.

- Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "leaf-rolling grasshopper". Encyclopedia Britannica, 2022, <https://www.britannica.com/animal/>. Accessed 17 January 2023.
- Butler, R.A. 2020. Rainforest Information. MONGABAY: <https://rainforests.mongabay.com/>
- Byzov, B.A. 2006. Intestinal Microbiota of Millipedes: Intestinal Microorganisms of Soil Invertebrates. *Soil Biology*, Volume 6. H. König, A. Varma (Eds.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Bush MB, Silman MR, Urrego DH. 2004. 48,000 years of climate and forest change in a biodiversity hot spot. *Science* 303:827–829
- Cangelosi, G.A., and Meschke, Js. 2014. Dead or Alive: Molecular Assessment of Microbial Viability. *Applied and Environmental Microbiology* 80(19): 5884-5891.
- Cardinale, B.J., E. Duffy, A. Gonzalez, D.U. Hooper, C. Perrings, P. Venail, A. Narwani, G.M. Mace, D. Tilman, D.A. Wardle, A.P. Kinzig, G.C. Daily, M. Loreau, J.B. Grace, A. Larigauderie, D.S. Srivastava and S. Naeem. 2012. Biodiversity Loss and Its Impact on Humanity. *Nature* 486: 59- 67.
- Caruso, B.S., Bishop, M. Seasonal and Spatial Variation of Metal Loads from Natural Flows in the Upper Tenmile Creek Watershed, Montana. *Mine Water Environ* 28, 166–181.
- Chamagne, J., Tanadini, M., Frank, D., Matula, R., Paine, C.E.T., Philipson, C.D., Svátek, M., Turnbull, L.A., Volařík, D. and Hector, A. (2017), Forest diversity promotes individual tree growth in central European forest stands. *J Appl Ecol*, 54: 71-79.
- Chao, S. 2012. FOREST PEOPLES: Numbers across the world. United Kingdom. Forest Peoples Programme: 27 p
- Chapin, F.S., Jhon, P.G., Ingrid, C.B., David.U.H. 2014. Ecosystem Consequences of Changing Biodiversity. *BioScience* 4(1): 45-51.
- Chen, C., Chen, H.Y., Chen, X. 2020. Functional diversity enhances, but exploitative traits reduce tree mixture effects on microbial biomass. *Functional Ecology* 34: 276–286.
- Cicuzza, D., Krömer, T., Poulsen, A.D. *et al.* A transcontinental comparison of the diversity and composition of tropical forest understory herb assemblages. *Biodivers Conserv* 22, 755–772.
- Clements, R.O., Murray, P.J. & Sturdy, R.G. 1991. The impact of 20 years' absence of earthworms and three levels of N fertilizer on a grassland soil environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,

36, 75–85.

- Coleman, D.C. 2008. From peds to paradoxes: Linkages between soil biota and their influences on ecological processes. *Soil Biology & Biochemistry* 40 (2008): 271–289.
- Coleman, D.C. 2008. From peds to paradoxes: Linkages between soil biota and their influences on ecological processes. *Soil Biology & Biochemistry* 40 (2008): 271–289.
- Coleman, D.C., Crossley J., D.A., Hendrix, P.F. 2004. *Fundamentals of Soil Ecology*. Elsevier Academic Press, USA.
- Corlett, R. T. (2016). Plant diversity in a changing world. *Plant Diversity* 38: 10–16.
- Courtney, G.W., Pape, T., Skevington, J.V., Siclair, B.J. 2017. Chapter: Biodiversity of Diptera: Science and Society. *Insect Biodiversity: Science and Society, Volume I*. 7 John Wiley & Sons: 229-278.
- Cragg, G.M, and Newman, D.J. 2001. Natural product drug discovery in the next millennium. *Pharmaceutical Biology* 39.
- Dani, I. 2016. Penyebab Perubahan Ekosistem. <https://pak.pandani.web.id/2016/09/penyebab-perubahan-ekosistem.html>. Diakses tanggal 15 Desember 2022
- De Deyn GB, Kooistra L. 2021 The role of soils in habitat creation, maintenance and restoration. *Phil.Trans. R. Soc. B* 376: 20200170.
- De Deyn, G.B., and Van der Putten, W.H. 2005. Linking aboveground and belowground diversity. *Trends in Ecology & Evolution* 20(11): 625-633.
- de Ruiter PC, Neutel AM, Moore JC. 1995. Energetics, patterns of interaction strengths, and stability in real ecosystems. *Science* 269 (5228): 1257-1260.
- de Vries, F. T., E. Hoffland, et al. (2006). “Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management.” *Soil Biology & Biochemistry* 38(8): 2092-2103.
- de Vries, F.T., de Thebault, E., Liiri, M., Birkhofer, K., Tsiafouli, M.A., Bjørnlund, L., Jørgensen, H.B., Brady, M.V., Christensen, S., Ruitter, P.C., de d’Hertefeldt, T., Frouz, J., Hedlund, K., Hemerik, L., Hol, W.H.G., Hotes, S., Mortimer, S.R., Setälä, H., Sgardelis, S.P., Uteseny, K., Putten, W.H., van der Wolters, V., Bardgett, R.D. 2013. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 14296-14301.

- De Groot RS, Wilson MA, Boumans RM (2002) A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecol Econ* 41 (3):393–408.
- Decaëns, T., J.J. Jiménez, C. Gioiac, G.J. Measey, P. Lavelle. 2006. The values of soil animals for conservation biology European. *Journal of Soil Biology* 42 (2006): S23–S38.
- Decaëns, T., J.J. Jiménez, C. Gioiac, G.J. Measey, P. Lavelle. 2006. The values of soil animals for conservation biology European. *Journal of Soil Biology* 42 (2006): S23–S38.
- Decaens, T., Jimenez, J.J., Gioia, C., Measey, G.J., Lavelle, P. 2006. The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology* 42(1): 23-38.
- Dewi, W.S. 2001. Biodiversitas Tanah pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan. *Environmental* 1(2): 16 – 21.
- Ekelund F, Ronn R (1994) Notes on protozoa in agricultural soil with emphasis on heterotrophic flagellates and naked amoebae and their ecology. *FEMS Microbiol Rev* 15:321–353.
- Ettema, C.H. and Wardle, D.A. (2002) Spatial Soil Ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 17: 177-183.
- FAO. 2015. Global Forest Resources Assessment 2015: Country Report Indonesia. FAO, Rome.
- Faulkner, D.J., Molinski, T.F., Andersen, R.J., Eric, J.D., de Silva, E.D. 1990. Geographical Variation In Defensive Chemicals From Pacific Coast Dorid Nudibranchs And Some Related Marine Molluscs. *Camp. Biochem. Physiol* 97C(2): 233-240.
- Ferraro, D.M., Vantassel, S.M., Hygnstrom, S.E. 2010. Moles and Their Control. *Wildlife Damage Control*. University of Nebraska–Lincoln Extension: <https://extensionpublications.unl.edu/assets/html/g1538/build/g1538.htm>
- Fitriana, Y. R. 2006. Keanekaragaman dan Kemelimpahan Makro-zoo-bentos di Hutan Mangrove Hasil Rehabilitasi Taman Hutan Raya Ngurah Rai Bali. *Biodiversitas* 7(1): 67-72.
- Foley, J. A. (2005). Global consequences of land use. *Science* 309: 570–574.
- Garbeva, P., van Veen, J.A., van Elsas, J.D. (2004). “Assessment of the diversity, and antagonism towards *Rhizoctonia solani* AG3, of *Pseudomonas* species in soil from different agricultural regimes.” *FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY* 47(1): 51-64

- Gardi, C. dan Jeffrey S., 2009. Soil Biodiversity. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environmental and Sustainability, Land Management and Natural Hazards Unit.
- Gardi, C. dan Jeffrey S., 2009. Soil Biodiversity. European Commission Joint Research Centre, Institute for Environmental and Sustainability, Land Management and Natural Hazards Unit.
- Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J.M., Bommarco, R., Cunningham, S.A., Luísa G., C.Natacha., P. Chacoff., J.H. Dudenhöffer., Sarah, S., Greenleaf., A.Holzschuh., Rufus, I., Kristin, K., Yael, M., Margaret, M.M., Lora, A. M., Simon, G.P., Taylor, H.R., Hajnalka, S., Blandina, F.V., Catrin, W., Rachael, W., Alexandra, M.K. 2011. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecology Letters* (2011) 14: 1062–1072.
- Gasper AL, Eisenlohr PV, Salino A. 2015. Climate-related variables and geographic distance affect fern species composition across a vegetation gradient in a shrinking hotspot. *Plant Ecology & Diversity* 8: 25-35.
- Gentry, A.H. 1988. Tree species richness of upper Amazonian forests. *Proceedings of National Academy of Sciences (USA)* 85, 156-159.
- Gibbs, H. K., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 16732–16737.
- Grammatikopoulou, I., Eija, P., Myyrä, S. 2015. Exploring the determinants for adopting water conservation measures. What is the tendency of landowners when the resource is already at risk?. *Journal of Environmental Planning and Management*: 1-22.
- Griffiths, B. S. 1994. "Microbial-Feeding Nematodes and Protozoa in Soil: Their Effects on Microbial Activity and Nitrogen Mineralization in Decomposition Hotspots and the Rhizosphere." *Plant and Soil*, vol. 164, no. 1, 1994, pp. 25–33. *JSTOR*, <http://www.jstor.org/stable/42939605>. Accessed 29 Dec. 2022.
- Gueadi. 2020. Anelida. Jenis net. <https://jenis.net/annelida/>
- G. Geografi. 2017. Tipe-Tipe Agregat Tanah dan Pengaruhnya Bagi Kestabilan Erosi. <https://www.gurugeografi.id/2017/02/tipe-tipe-agregat-tanah-dan-pengaruhnya.html>

- Hahn I (2015). Arthropods. Hoffman R.S., & Howland M, & Lewin N.A., & Nelson L.S., & Goldfrank L.R.(Eds.), Goldfrank's Toxicologic Emergencies, 10e. McGraw Hill.
- Hanafiah, K. A. 2014. *Dasar – Dasar Ilmu Tanah*. Jakarta : PT Raja Grafindo Persada: 386 Hal.
- Hanafiah, K.A. 2005. *Dasar-Dasar Ilmu Tanah*. Jakarta : PT. Raja Grafindo Persada.
- Harper, R., Gilkes, R., Hill, M., Carter, D. 2010. Wind erosion and soil carbon dynamics in south-western Australia. *Aeolian Research* 1(3-4): 129-141.
- Heinen, R., A.Biere., T. M. Bezemer. 2020. Plant traits shape soil legacy effects on individual plant–insect interactions. *Oikos* 129(2): 261-273.
- Hendersen, F.R. 1994. MOLES: PREVENTION AND CONTROL OF WILDLIFE DAMAGE. University of Nebraska - Lincoln: 8 p
- Hermansah., T. Masunaga., T.Wakatsuki., and Aflizar. 2003. Dynamics of Litter Production and its Quality in Relation to Soil Chemical Properties in a Super Wet Tropikal Rain Forest, West Sumatera Indonesia. *Tropiks* 12(2): 115-130.
- Hooper, D.U., Chapin, F.S., Ewel, J.J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J.H., Lodge, D.M., Loreau, M., Naeem, S., Schmid, B., Setälä, H., Symstadt, A.J., Vandermeer, J., Wardle, D.A. 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol Monogr* 75: 3–35.
- Hotta, M. R. 1989. Diversity and Plant-Animal Interaction in Equatorial Rain Forest. Sumatera Nature Study (Botany). Kangoshima University, Kangoshima: 302pp.
- Hulvey, K.B., Hobbs, R.J., R.J. Standish., D.B. Lindenmayer, L.Lach., M.P. Perring. 2013. Benefits of tree mixes in carbon plantings. *Nature Climate Change* 3: 869–874.
- Hunt HW and DH Wall. 2002. Modelling the effects of loss of soil biodiversity on ecosystem function. *Global Change Biol* 8: 33-50.
- Huot H, Joyner J, Córdoba A, Shaw RK, Wilson MA, Walker R, Muth TR, Cheng Z (2017) Characterizing urban soils in New York City: profile properties and bacterial communities. *J Soils Sediments* 17(2): 393–407.

- Indriyanto. 2006. *Ekologi Hutan*. Jakarta. Penerbit PT Bumi Aksara.
- IPCC. 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014; p. 151.
- Ismaini, L, M. Lailati, Rustandi, D.Sunandar. 2015. Composition and plant diversity analysis on Mount Dempo, South Sumatra. *Pros Sem Nas Masy Biodiv Indon* 1(6): 1397-1402.
- Isbell, F., P.R. Adler, N.Eisenhauer, D.Fornara, K.Kimmel, C.Kremen, D.K. Letourneau, M.Liebman, H. Wayne Polley, S.Quijas, M.Scherer-Lorenzen. 2017. Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology* 105(4): 871-879.
- Jacobs, J. 2008. Comparing Communities: Using α -diversity and similarity/dissimilarity indices to measure diversity across sites, communities, and landscapes. <http://userwww.sfsu.edu/~efc/classes/biol710/similarity/Similarity.pdf>. [18 Juni 2022].
- Jelery S, Gardi C, Jones A, Montanarella L, Marmo L, Miko L, Ritz K, Peres G, Römbke J, van der Putten W (2010) European atlas of soil biodiversity. European Commission, Brussels
- Jucker, T., Caspersen, J., Chave, J., Antin, C., Barbier, N., Bongers, F., Dalponte, M., van Ewijk, K.Y., Forrester, D.I., Haeni, M., Higgins, S.I., Holdaway, R.J., Iida, Y., Lorimer, C., Marshall, P.L., Momo, S., Moncrieff, G.R., Ploton, P., Poorter, L., Rahman, K.A., Schlund, M., Sonké, B., Sterck, F.J., Trugman, A.T., Usoltsev, V.A., Vanderwel, M.C., Waldner, P., Wedeux, B.M.M., Wirth, C., Wöll, H., Woods, M., Xiang, W., Zimmermann, N.E. and Coomes, D.A. (2017), Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes. *Glob Change Biol*, 23: 177-190.
- Kartawinata, K. 2005. Six Decades of Natural Vegetation Studies in Indonesia. In *SixDecades of Science and Scientists in Indonesia* ed. Subagjo Soemodihardjo and Setijati D. Sastrapradja.
- Kaushal, S.S.; Mayer, P.M.; Vidon, P.G.; Smith, R.M.; Pennino, M.J.; Newcomer, T.A.; Duan, S.; Welty, C.; Belt, K.T. 2014. Land use and climate variability amplify carbon, nutrient, and contaminant pulses: a review with management implications. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 2014, 50, 585–614. [

- Kennedy, C.M., Eric, V.L., Neel, M.C., Williams, N.M. 2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild bee pollinators in agroecosystems. *Ecology Letters* **16(5): 584–599**.
- Kerry, B. R., 2000. Rhizosphere interactions and the exploitation of microbial agents for the biological control of plant parasitic nematodes. *Annual Review of Phytopathology* 38: 423-441.
- Koh, L. P., Kettle, C. J., Sheil, D., Lee, T. M., Giam, X., Gibson, L., & Clements, G. R. (2013). Biodiversity state and trends in Southeast Asia. In S. Levin (Ed.), *Encyclopedia of biodiversity* 1: 509–527.
- Kozłowski, T.T. 2002. PHYSIOLOGICAL-ECOLOGICAL IMPACTS OF FLOODING ON RIPARIAN FOREST ECOSYSTEMS. *WETLANDS* 22(3): 550-561.
- Kremen, C and A.Miles. 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecology and Society* 17(4): 40.
- Kubota, D., Masunaga, T., Hermansah, Hotta, M., Shinmura, Y., Wakatsuki, T. 1998. Soil Environment and Tree Species Diversity in Tropical Rainforest, West Sumatra, Indonesia. *Soil of Tropical forest ecosystem* Springer. Berlin: 159-167.
- Kuzevic, S., Bobikova, D. and Kuzevicova, Z. 2022. Land cover and vegetation coverage changes in the mining area-a case study from Slovakia. *Sustainability* 14:1-14.
- Lanno, R., Wells, J., Conder, J., Bradham, K., & Basta, N. (2004). The bioavailability of chemicals in soil for earthworms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 57(1): 39-47.
- Lavelle, P. and Spain, A.V. (2001) *Soil Ecology: Chapter 4. Functioning of the Soil System*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Lavelle, P., Bignell, D. E., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O. W. & Dhillion, S. (1997): Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil. Biol.* 33: 159–193.
- Lavelle, P., C. Rouland, F. Binet, M. Diouf, A. Kersanté, Regulation of microbial activities by roots and soil invertebrates, in: F. Buscot, A Varma (Eds.), *Microorganisms in soils: roles in genesis and functions*. Soil Biology series, vol. 3, Springer Verlag, Berlin, 2005, pp.291-305.
- Lavelle, P., Dangerfield, M., Fragoso, C. 1994. The relationships between soil macrofauna and tropical soil fertility. In: Noomer,

- P.L., Swift, M.J. (Eds.), *The Management of Tropical Soil Biology and Fertility*. Wiley Sayce Publication, New York.
- Lavelle, P., Decaens, T., Aubert, M., Barat, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., dan Rossi, J. P. 2006. Soil Invertebrata and Ecosystem Services. *European Journal of Soil Biology* 42: S3-S15.
- Lavelle, P., E. Blanchart, A. Martin, S. Martin, I. Barois, F. Toutain, A. Spain, and R. Schaefer, 1993. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystems. Application to soils in the humid tropics, *Biotropica* 25: 130-150
- Leininger, M.M. and McFarland, M.R. (2006) *Culture Care Diversity and Universality: A Worldwide Nursing Theory*. 2nd Edition, Jones and Bartlett, Sudbury.
- Leonard, MA; Anderson, JM. 1991. Growth Dynamics Of Collembola (Folsomia-Candida) And A Fungus (Mucor-Plumbeus) In Relation To Nitrogen Availability In Spatially Simple And Complex Laboratory Systems. *Pedobiologia*: 163-173 .
- Leroux, J.P., Hambleton-Jones, B.B. 1991. The analysis of termite hills to locate uranium mineralization in the Karoo Basin of South Africa. *Journal of Geochemical Exploration* 41: 341-347.
- Letourneau, D.K., Julie A. Jedlicka, Sara G. Bothwell, and Carlo R. Moreno. 2009. Effects of Natural Enemy Biodiversity on the Suppression of Arthropod Herbivores in Terrestrial Ecosystems. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics** Vol. 40:573-592.
- Li, F., Li, X., Hou, L. and Shao, A. 2018. Impact of the coal mining on the spatial distribution of potentially toxic metals in farmland tillage soil. *Scientific Reports* 8:1-10.
- Lichter, J.M. and Lindsey, P.A. 1994 . Soil compaction and site construction: assessment and case studies. In: *The Landscape Below Ground* in: Watson, G.W. and Neely, D., Editors, 1994. *Proceedings of an International Workshop on Root Development in Urban soils*, The International Society of Arboriculture, Savoy, IL, pp. 126–130.
- Liebman, Matt, Charles L. Mohler, and Charles P. Staver, editors. 2001. *Ecological management of agricultural weeds*. Cambridge University Press, New York. xi + 532 p
- Lindberg, N. and Bengtsson, J. 2005. Population responses of oribatid mites and collembolans after drought. *Applied soil ecology* : a

section of Agriculture, Ecosystems & Environment 28(2): 163-174

- Liu, R. T., H. L. Zhao, and X. Y. Zhao. 2012. "Effects of Different Afforestation Types on Soil Faunal Diversity in Horqin Sand Land. *Chinese Journal of Applied Ecology* 23: 1104–1110.
- Loranger G, Bandyopadhyaya L, Razaka B, Ponge JF (2001) Does soil acidity explain altitudinal sequences in collembolan communities? *Soil Biol Biochem* 33: 381–393
- Lövei, G. L., and Sunderland, K. D. 1996. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae). *Annual Review of Entomology*, 41(1), 231-256.
- Lulu, Y., Hermansyah, H., Eddy, I. and Marsi, M. 2022. Analysis on the characteristics of ex-mining soil after 5 years and 10 years of revegetation. *Media Konservasi* 26: 239-247.
- Ma, K., Zhang, Y., Ruan, M., Guo, J. and Chai, T. 2019. Land subsidence in a coal mining area reduced soil fertility and led to soil degradation in arid and semi-arid regions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16:1-4.
- Maguran, A.E. 1998. *Ecology Diversity and it's Measurement*. Princeton University Press, New Jersey.
- Margono, B. A., Potapov, P. V, Turubanova, S., Stolle, F., & Hansen, M. C. (2014). Primary forest cover loss in Indonesia over 2000-2012. *Nature Climate Change*, 4, 730–735.
- Maron PA, Mougél C, Ranjard L (2011) Soil microbial diversity: methodological strategy, spatial overview and functional interest. *CR Biol* 334(5–6): 403–411.
- Marsandi, F., Hermansah, Agustian, Yasin, S. 2020. *Perubahan Keanekaragaman Biota Tanah pada Beberapa Tipe Penggunaan Lahan Kawasan Hutan Hujan Tropik Bukit Pinang-Pinang Padang, Indonesia (Tesis)*. Universitas Andalas. Padang.
- Marshall, S. 2017. Micropezidae (Insecta, Diptera, Acalyptratae) of Madagascar and a revision of the genus *Paramimegralla* Hennig. *Zootaxa* **4290(2): 244-280**.
- Masunaga, T., D. Kubota, M. Hotta and T. Wakatsuki. 1998. Nutritional Characteristic of Minerals Element in Tree Species of Tropical Rain Forest, West Sumatera, Indonesia. Shimane University. Japan: 315-329 pp.
- McDonnell M, Pickett S (1990) *Ecosystem*

- structure and function along urbanrural gradients: an unexploited opportunity for ecology. *Ecology* 71(4):1232–1237.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Menta, C. 2012, Soil Fauna Diversity-Function, Soil Degradation, Biological Indices, Soil Restoration, INTECH. In book: *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*
- Middleton, B.A. Differences in impacts of Hurricane Sandy on freshwater swamps on the Delmarva Peninsula, Mid-Atlantic Coast, USA. *Ecol. Eng.* 2016, 87, 62–70
- Minnesota Stormwater Manual (MSM). 2021. Soil health indicator sheet - Soil compaction (bulk density).https://stormwater.pca.state.mn.us/images/9/9d/Soil_health_indicator_sheet_-_Soil_compaction_%28bulk_density%29_-_Minnesota_Stormwater_Manual.pdf.
- Mira, G and Terezija, H. 2007. Glycolipoprotein extract of *Eisenia foetida* (G-90): A source of biological active molecules. *European Journal of Soil Biology* 43 (2007): S104-S109
- Monde A., N. Sinukaban., K. Murti Laksono., dan N. H. Pandjaitan. 2008. Dinamika Kualitas Tanah, Erosi, dan Pendapatan Petani Akibat Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Kakao di Das Napu, Sulawesi Tengah. *Jurnal Forum Pasca Sarjana* 31: 215-225.
- Mora, P.; Miambi, E.; Jimenez, J.J.; Decaëns, T.; Rouland, C. 2005. Functional complement of biogenic structures produced by earthworms, termites and ants in the neotropical savannas. *Soil Biology and Biochemistry* 37: 1043-1048.
- Morel JL, Chenu C, Lorenz K (2015) Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *J Soils Sediments* 15(8):1659–1666.
- Mourinha, C., Palma, P., Alexandre, C., Cruz, N., Rodrigues, S.M. and Alvarenga, P. 2022. Potentially toxic elements' contamination of soils affected by mining activities in the Portuguese Sector of the Iberian pyrite belt and optional remediation actions: a review. *Environments* 9:1-35.
- Mthimunye, T.A and Munyai, T.C. 2022. Can Monoculture Timber

Plantations Conserve More Ant Communities Than Adjacent Natural Forests?. *Diversity* 14, 430.

- Mukhtar E, Suwardi AB, Syamsuardi S. 2013. Komposisi jenis dan cadangan karbon di hutan tropis dataran rendah, Ulu Gadut, Sumatera Barat. *Berita Biologi* 12 (2): 169-172 .
- Murase, J. and P. Frenzel .2008. Selective grazing of methanotrophs by protozoa in a rice field soil. *Fems Microbiology Ecology* 65(3): 408-414.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mitterleier, C. G., da Fonseca, G. A. B., Kent, J., Mittermeier, C. G., Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853–858.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., da Fonseca, G.A.B., Kent, J. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853–858.
- Nahmani, J., Hodson, M.E., Black, S. 2007. Effects of metals on life cycle parameters of the earthworm *Eisenia fetida* exposed to field-contaminated, metal-polluted soils. *Environmental Pollution* 149(1): 44-58.
- Nannipieri, P., Ascher, M., T. Ceccherini., L. Landi., G. Pietramellara and G. Renella.2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, December 2003, 54, 655–670.
- Nannipieri, P., Ascher, M., T. Ceccherini., L. Landi., G. Pietramellara and G. Renella.2003. Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science* 54: 655–670.
- Navarro, L.M., Fernández, N., Carlos, Guerra, R.Guralnick, W.Daniel, Kissling, Maria Cecilia, Londoño., Frank, Muller-Karger, Eren, Turak., Patricia, Balvanera, Mark.J.Costello., Aurelie, Delavaud., Serafy, Simon, Ferrier, Ilse, Geijzendorffer, Gary N.Geller, Walter, Jetz., Eun-Shik, Kim., Hye.J.Kim., Corinne.S.Martin., Melodie AMcGeoch.2017. Monitoring biodiversity change through effective global coordination. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 29: 158-169.
- Nghiem LTP, Soliman T, Yeo DCJ, Tan HTW, Evans TA, Mumford JD, et al. (2013) Economic and Environmental Impacts of Harmful Non-Indigenous Species in Southeast Asia. *PLoS ONE* 8(8): e71255.
- Nishimura, Y., T. Shinji, Mukhtar, E., Hishashi, A., Kubota, D., Tamin, R., and Watanabe, H. 2006. Altitudinal Zonation of Vegetation in Padang Region, West Sumatera. *Tropiks* 15(2): 137-155.

- Nunan N, Wu KJ, Young IM, Crawford JW, Ritz K.. Spatial distribution of bacterial communities and their relationships with the micro-architecture of soil. *FEMS Microbiol Ecol* 44(2): 203-215.
- O'Connor, M.I., Gonzalez, A., Byrnes, J.E.K.et al. 2017. A general biodiversity–function relationship is mediated by trophic level. *Oikos*,126: 18–31.
- Odum, E. P. 1996. *Dasar-Dasar Ekologi*. Edisi Ketiga. Diterjemahkan oleh Ir.T. Samingan. Gajah Mada Univ. Press. Yogyakarta.
- Odum, E. P. 1998. *Dasar-Dasar Ekologi*. Edisi Ketiga. Diterjemahkan oleh Ir.T. Samingan. Gajah Mada Univ. Press. Yogyakarta.
- Olden, J. D., N. L. Poff, and K. R. Bestgen. 2006. Life-history strategies predict fish invasions and extirpations in the Colorado River Basin. *Ecological Monographs* 76:25–40.
- Olden, J.D., Poff, N.F., Douglas, M.R., Douglas, M.E. 2004. Ecological and evolutionary consequences of biotic homogenization. *Trends in Ecology & Evolution* 19(1):18-24.
- Olf, H., Hoorens, B., de Goede, R. G. M., van der Putten, W. H., & Gleichman, J. M. (2000). Small-scale shifting mosaics of two dominant grassland species: the possible role of soil-borne pathogens. *Oecologia*, 125(1), 45-54.
- Orford, K.A., P.J, Murray., I.P. Vaughan., J.Memmott. 2016. Modest enhancements to conventional grassland diversity improve the provision of pollination services. *Journal of Applied Ecology* 53(3): 906-915.
- Orgiazzi, A., Dunbar, M.B., Panagos, P., de Groot, A.G. & Lemanceau, P. 2015. Soil biodiversity and DNA barcodes: opportunities and challenges.*Soil Biology & Biochemistry* 80: 244–250.
- Packer, A. and Clay, K. 2000. Soil pathogens and spatial patterns of seedling mortality in a temperate tree. *Nature* 404(6775):278-81
- Pape, T., Blagoderov, V., Mostovski, M.B. 2011. Order Diptera Linnaeus, 1758. *Zootaxa* 3148: 222-229.
- Parker, S.S. 2010. Buried treasure: soil biodiversity and conservation. *Biodiversity and Conservation* **19(13):3743-3756**.
- Peh, K.S-H. (2010). Invasive species in Southeast Asia: the knowledge so far. *Biodiversity and Conservation* 19: 1083-1099.
- Pérès, G., Vandenbulcke, F., Guerniona, M. , Heddec, M. , Beguiristaind,

- T., Douaye, F., Houot, S., Pirona, D., Richard, A., Bispo, A., Cécile, G., L. Galsomies, D. Cluzeau. 2011. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia* 54S (2011): S77–S87
- Perring, M.P., Rachel J. Standish, Jodi N. Price, Michael D. Craig, Todd E. Erickson, Katinka X. Ruthrof, Andrew S. Whiteley, Leonie E. Valentine, Richard J. Hobbs. 2015. Advances in restoration ecology: rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere* 6(8): 1-25.
- Pasut, C.; Tang, F.H.; Maggi, F. A. 2020. Mechanistic Analysis of Wetland Biogeochemistry in Response to Temperature, Vegetation, and Nutrient Input Changes. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2020, 125, e2019JG005437.
- Petersen, H. and Luxton, M. (1982) A comparative analysis of soilfauna populations and their role in decomposition processes. *Oikos* 39: 287-388.
- Phillips, H.R.P., Guerra, C.A., Bartz, M.L.C., Briones, M.J.I., Brown, G., Crowther, T.W., Ferlian, O., Gongalsky, K.B., van den Hoogen, J., Krebs, J., Orgiazzi, A., Routh, D., Schwarz, B., Bach, E.M., Bennett, J., Brose, U., Decaëns, T., König-Ries, B., Loreau, M., Mathieu, J., Mulder, C., van der Putten, W.H., Ramirez, K.S., Rillig, M.C., Russell, D., Rutgers, M., Thakur, M.P., de Vries, F.T., Wall, D.H., Wardle, D.A., Arai, M., Ayuke, F.O., Baker, G.H., Beaulieu, R., Bedano, J.C., Birkhofer, K., Blanchart, E., Blossey, B., Bolger, T., Bradley, R.L., Callahan, M.A., Capowiez, Y., Caulfield, M.E., Choi, A., Crotty, F.V., Dávalos, A., Cosin, D., Dominguez, A., Duhour, A.E., van Eekeren, N., Emmerling, C., Falco, L.B., Fernández, R., Fonte, S.J., Fragoso, C., Franco, A., Fugère, M., Fusilero, A.T., Gholami, S., Gundale, M.J., Lopez, M.G., Hackenberger, D.K., Hernández, L.M., Hishi, T., Holdsworth, A.R., Holmstrup, M., Hopfensperger, K.N., Lwanga, E.H., Huhta, V., Hurisso, T.T., Iannone, B.V., Iordache, M., Joschko, M., Kaneko, N., Kanianska, R., Keith, A.M., Kelly, C.A., Kernecker, M.L., Klaminder, J., Koné, A.W., Kooch, Y., Kukkonen, S.T., Lalthanzara, H., Lammel, D.R., Lebedev, I.M., Li, Y., Lidon, J., Lincoln, N.K., Loss, S. R., Marichal, R., Matula, R., Moos, J.H., Moreno, G., Moron-Ríos, A., Muys, B., Neirynck, J., Norgrove, L., Novo, M., Nuutinen, V., Nuzzo, V., Rahman, P. M., Pansu, J., Paudel, S., Pêres, G., Pérez-Camacho, L., Pineiro, R., Ponge,

- J.F., Rashid, M.I., Rebollo, S., Rodeiro-Iglesias, J., Rodríguez, M.A., Roth, A.M., Rousseau, G.X., Rozen, A., Sayad, E., van Schaik, L., Scharenbroch, B.C., Schirrmann, M., Schmidt, O., Schroder, B., Seeber, J., Shashkov, M.P., Singh, J., Smith, S.M., Steinwandter, M., Talavera, J.A., Trigo, D., Tsukamoto, J., de Valença, A.W., Vanek, S.J., Virto, I., Wackett, A.A., Warren, M.W., Wehr, N.H., Whalen, J.K., Wironen, M.B., Wolters, V., Zenkova, I.V., Zhang, W., Cameron, E.K., Eisenhauer, N., 2019. Global distribution of earthworm diversity. *Science* 366 (80): 480–485.
- Pietramellara G, Ascher J, Borgogni F, Ceccherini MT, Guerri G, Nannipieri P (2009) Extracellular DNA in soil and sediment: fate and ecological relevance. *Biol Fert Soils* 45(3):219–235
- Pires, J.M., and Prance, G.T. 1985. Chapter 7: The vegetation types of the Brazilian Amazon- In book: Amazonia: Key Environments Series. Pergamon Press (pp.109-145).
- Pollak L (2006) The landscape for urban reclamation-infrastructures for the every days pace that includes nature. *Lotus Int* 128: 32–45.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 2000. Sumberdaya Lahan dan Pengolahannya. Pusat Tanah dan Agroklimat. Bogor
- Pywell, R.F., Heard, M.S., Woodcock, W.A., Hinsley, S., Lucy Ridding¹, Marek Nowakowski² and James M. Bullock. 2015 Wildlifefriendly farming increases crop yield: evidence for ecological intensification. *Proc. R. Soc. B* 282: 20151740.
- Rafdinal, Erizal, M., Syamsuri, Hermansah. 2015. Survival and Growth Rate of Several Climax Species of Tree in Tropical Rain Forest Ulu Gadut West Sumatera. *Pakistan Journal of Biological Science* 17(10): 1130-1135.
- Rahayuningsih, M., Oqtafiana, R., B. Priyono. 2012. Keanekaragaman jenis kupu-kupu superfamili papilionoidae di Dukuh banyuwindu desa limbangan kecamatan limbangan Kabupaten Kendal. *Jurnal MIPA* 35 (1): 1-10.
- Randrup, T.B. 1997 . Soil compaction on construction sites. *Journal of Arboriculture* 23 (5) , pp. 207-210.
- Rembold, K., Tjitrosoedirdjo, S.S., Kreft, H., Mangopo, H. 2017. Plant diversity, forest dependency, and alien plant invasions in tropical agricultural landscapes. *Biological Conservation* **213: 234-242**.
- Rinnofner, T., R. de Kruijff, Jürgen K.F., G. Pietsch. 2008. Effect of catch

- crops on N dynamics and following crops in organik farming. *Agronomy for Sustainable Development* 28(4): 551-558.
- Root, R.B. 1973. Organization of a Plant-Arthropod Association in Simple and Diverse Habitats: The Fauna of Collards (Brassica Oleracea). *Ecological Monographs* 43(1): 95-124.
- Rosa, N., Iswan, D., Hari, P. 2019. Diversity of Ant (Famili Formicidae) on Peatland at The New Building of The Forestry Faculty Of Tanjungpura University in Pontianak. *Jurnal Hutan Lestari* 7 (2) : 723 - 732.
- Ruiz Camacho, N. (2004). "Mise au point d'un système de bio-indication de la qualité du sol basé sur l'étude des peuplements de macro-invertébrés." *Ecology*: 270.
- Rusch, A., R. Chaplin-Kramer, M.M.Gardiner, V. Hawro., J. Holland, D. Landis., C. Thies., T.T.Wolfang., W. Weisser, C.Winqfist., Woltz, M., Bommarco, R. 2016. Agricultural landscape simplification reduces natural pest control: A quantitative synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*221(2016): 198-204.
- Salaki, C., Situmoran, J., Sembiring, L., and Handayani, N.S. 2010. Isolation and characterization Indonesian indigeneous bacteria (*Bacillus thuringiensis*) potentially as biological pest controlling insect (*Crocidolomia binotalis*). *Journal of Agricultural Science AGRIVITA* 31 (2): 174-181.
- Sanchez, P. A. 1992. Sifat dan Pengelolaan Tanah Tropika. Terjemahan Hamzah, A. Institut Teknologi Bandung: Bandung. 397 hal.
- Sanderson, H., D. J. Johnson., T.Reitsma., R.A, Brain., C.J, Wilson, K.R, Solomon. 2004. Ranking and prioritization of environmental risks of pharmaceuticals in surface waters. *Regul Toxicol Pharmacol* 39(2):158-83.
- Santorufu, L., van Gasto, C.A.M., Rocco, A., Maisto, G. 2012. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. *Environmental Pollution* 161: 57-63.
- Schaefer, M and J. Schaueremann. 1990. The soil fauna of beech forests: comparison between a mull and a moder soil. *Pedobiologia* 34(5): 299-314.
- Scherer-Lorenzen, M. (2014). The functional role of biodiversity in the context of global change. In D. Coomes, D. Burslem, & W. Simonson (Eds.), *Forests and Global Change* (Ecological Reviews, pp. 195-238). Cambridge: Cambridge University Press.

- Scheu S and Schaefer M (1998) Bottom-up control of the soil macrofauna community in a beechwood on limestone: manipulation of food resources. *Ecology* 79:1573–1585.
- Schomberg, H., Julia, W., Gaskin., Keith, H., K.C. Das., Jeff, M., Novak, W.J., Busscher, D.W., Watts, R.H., Woodroof, I.M., Lima, M.A., Djaafar, R and Baoshan, X. 2012. Influence of Biochar on Nitrogen Fractions in a Coastal Plain Soil. *Journal of Environmental Quality* 41: 1087-1095.
- Schueler, T. R. and H.K. Holland. 2000 . Can urban soil compaction be reversed?, Article 37, *The Practice of Watershed Protection*. Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD. 1(4) : 666-669.
- Seto KC, Dhakal S, Bigio A, Blanco H, Delgado GC, Dewar D, Huang L, Inaba A, Kansal A, Lwasa S, McMahon JE, Müller DB, Murakami J, Nagendra H, Ramaswami A.(2014). Human settlements, infrastructure and spatial planning. In: Edenhofer O, Pichs Madruga R, Sokona Y , Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC (eds) *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Shear, W.A. 2015. The chemical defenses of millipedes (diplopoda): Biochemistry, physiology and ecology. *Biochemical Systematics and Ecology* 61 (2015): 78-117.
- Shiliang, L., Yijie, Y., Xuehua, L., Fangyan, C., Juejie, Y., Junran, L., Shikui, D., Annah, Z. 2017. Ecosystem Services and landscape change associated with plantation expansion in a tropical rainforest region of Southwest China. *Ecological Modelling* 353: 129–138.
- Smith, L.C., Orgiazzi, A., Cesarz, N., Lochner, A., Jones, A., Bastida, F., Pattoine, G., T. Reitz., F. Buscot., M.C. Rillig., A. Heintz-Buschart., A. Lehmann, C.A. Gurra. 2021. Large-scale drivers of relationships between soil microbial properties and organic carbon across Europe. *Global Ecology and Biogeography* 30(10): 2070-2083.
- Snowdon, P.; Ryan, P.J.; Raison, R.J. 2005. Review of C : N ratios in vegetation, litter and soil under Australian native forests and plantations. *Research Publications Repository CSIRO*. 57 p

- Sodhi, N.S., Posa, M.R.C., Lee, T.M., Bickford, D. 2010. The state and conservation of Southeast Asian biodiversity. *Trends in Ecology & Evolution* 19: 317-328.
- Sofo, A., Zanella, A., Ponge, J.F. 2021. Soil quality and fertility in sustainable agriculture, with a contribution to the biological classification of agricultural soils. *Soil Use Manage.* 00(2021):1-28.
- Sounding Soil. 2019. Sounding Soil-Project: Fascinating Soil. German. <https://www.soundingsoil.ch/en/know/>: 23 December 2022.
- Stork, N.E., and Eggleton, P. 1992. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture* 7(1 and 2): 38-47.
- Sugiyarto. 2001. Keanekaragaman makroinvertebrata tanah pada berbagai umur tegakan sengon di RPH Jatirejo, Kabupaten Kediri. *Biodiversitas* 1 (2): 11-15.
- Suin, N. M. 2006. *Ekologi Hewan Tanah*. Jakarta. Bumi Aksara.
- Suin, N. M. 2012. *Ekologi Hewan Tanah edisi 2*. Jakarta. Bumi Aksara.
- Surya, J. A., Nuraini, Y., & Widiyanto. (2017). Kajian Porositas Tanah Pada Pemberian Beberapa Jenis Bahan Organik Di Perkebunan Kopi Robusta. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 4(1), 463-471.
- Swift, M. J.; Heal, O. W.; Anderson, J. M. 1982. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. University of California Press (Bibliography): California, USA: 372 p.
- Swift, M.J., Heal, O.J. and Anderson, J.M. (1979) *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell, Oxford.
- Tahirna. 2012. *Dinamika Akumulasi dan Fraksinasi Serasah Menurut Tingkat Pelapukkan Serta Hubungannya dengan Keragaman Spesies Tumbuhan Lantai Hutan Hujan Tropik Super Basah, Padang* [Thesis]. Padang. Andalas University.
- Taylor, M. 2019. WHAT'S IN YOUR WORMERY? (Reviews). wigglywigglers. <https://www.wigglywigglers.co.uk/blogs/blog/whats-in-your-wormery>
- Tian, L and Shi, W. 2014. Short-term effects of plant litter on the dynamics, amount, and stoichiometry of soil enzyme activity in agroecosystems. *Eur J Soil Biol* 65:23-29.
- Tilman, D., Reich, P.B., Isbell, F. 2012. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(26):

10394–10397.

- Tooley, J., and Brust, G. E. (2002). Weed predation by carabid beetles. In J. M. Holland, (Ed.), *The agroecology*.
- Torsvik V, and Ovreas L. 2002. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Curr Opin Microbiol* 5(3): 240-245.
- Tsiafouli, M.A., E. Thébault., Stefanos, P., Sgardelis, P.C. de Ruiter, Wim. H. van der Putten., K.Birkhofer., Lia,H., Franciska,T.deVries., R .D.Bardgett., M.V.Brady., L.Bjornlund., H. B. Jørgensen., S.Christensen., T.D'.Hertefeldt., Stefan, H., W.H. Gera Hol., J.F, Mira., S.R. Mortimer., H. Setälä., J. Tzanopoulos., K.Uteseny., V. Pižl., J. Sary., V.Wolters., K. Hedlund. 2015. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. *Global Change Biologi* 21(2): 973-985.
- Tsujino, R., Takakazu, Y., Shumpei, K., Ibrahim, D., Dedy, D. 2016. History of forest loss and degradation in Indonesia. *Land Use Policy* 57: 335–347.
- Tugel, A.J., A.M. Lewandowski, and D. Happe-vonArb, eds. 2000. *Soil Biology Primer*. Ankeny, IA: Soil and Water Conservation Society.
- Turbe´ A, De Toni A, Benito P, Lavelle P, Lavelle P, Ruiz N, Van der Putten W, Labouze E, S M. 2010. Soil biodiversity: functions, threats and tools for policy makers. In Bio Intelligence Service, IRD, and NIOO, Report for European Commission (DG Environment).
- Turnbull LA, Isbell F, Purves DW, Loreau M, Hector A. 2016 Understanding the value of plant diversity for ecosystem functioning through niche theory. *Proc. R. Soc. B* 283: 20160536.
- van der Plas, F, Manning, P, Allan, E., Scherer-Lorenzen, M., Verheyen, K., Wirth, C., Zavala, M.A., Hector, A., Ampoorter, E., Baeten, L., Barbaro, L., Bauhus, J., Benavides, R., Benneter, A., Berthold, F., Bonal, D., Bouriaud, O., Bruelheide, H., Bussotti, F., Carnol, M., Castaneyrol, B., Charbonnoier, Y., Coomes, D., Coopi, A., FsicHER, M. 2016. Jack-of-all-trades effects drive biodiversity–ecosystem multifunctionality relationships in European forests. *Nat Commun* 7, 11109.
- Veen, G.F, Fry EL, ten Hooven FC, Kardol P, Morriën E and De Long JR . 2019. The Role of Plant Litter in Driving Plant-Soil Feedbacks. *Front. Environ. Sci.* 7(168): 1-10.
- Verheyen, K., De Frenne, P., Beaten, L., Waller, D.M. 2017. Combining Biodiversity Resurveys across Regions to Advance Global Change

Research. *BioScience* 67(1):73-83.

- Wahyu, R. 2022. Masyarakat adat Papua Jaga Hutan sebagai MAMA. Greeners.co. <https://www.greeners.co/aksi/masyarakat-adat-papua-jaga-hutan-sebagai-mama/>
- Wall, D. H., R. D. Bardgett, and E. Kelly. 2010. Biodiversity in the dark. *Nature Geoscience* 3:297-298.
- Wall, D. H., R. D. Bardgett, and E. Kelly. 2010. Biodiversity in the dark. *Nature Geoscience* 3:297-298.
- Wardle, D.A. 2002. *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*. Princeton University Press, USA.
- Warnecke, F., P.Luginbühl., N. Ivanova., M. Ghassemian., T. H. Richardson., J.T. Stege., M.Cayouette., A.C.McHardy., G. Djordjevic., N.Aboushadi., R.Sorek., S.G.Tringe., M. Podar., H.G.Martin., V. Kunin., D.Dalevi, J.Madejska, E.Kirton, et al. 2007. Metagenomic and functional analysis of hindgut microbiota of a wood-feeding higher termite. *Nature* 450(7169): 560-5.
- Wasis, B., B.H, Saharjo, F, Kusumadewi, N.H, Utami., M.H.W, Putra. 2018. Analysis of economic valuation of environmental damage due to sand mine in Gumulung Tonggoh, Cirebon District, West Java Province, Indonesia. *Archives of Agriculture and Environmental Science* 3(4): 360-366.
- Watt, A., Fuller, R., Chamberlain, D., van Swaay, C., Scheidegger, C., Stofer, S., FernandezGonzalez, F, Niemela, J., Lavelle, P., Dubs, F., Sousa, J.P, Koch, B., Ivits, E., Sanz, P.G., Bolger, T., Korsos, Z., Vanbergen, A. (2004). Biodiversity assessment—final report of the BioAssess project, Submitted to Research DG DI-2 Biodiversity and Global Change.
- Weigelt, A., W. W. Weisser., N. Buchmann., and M. Scherer-Lorenzen. 2009. Biodiversity for multifunctional grasslands: equal productivity in high-diversity low-input and low-diversity high-input systems. *Biogeosciences*, 6, 1695–1706.
- Weldon C.W., Perez-Staples D., Taylor P.W. (2008) Feeding on yeast hydrolysate enhances attraction to cue-lure in Queensland fruit flies (*Bactrocera tryoni*). *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 129, 200–209.
- Whalen, J.K., Kernecker, M.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V., and Ngosong,

- C. 2013. Soil food web controls on nitrogen mineralization are influenced by agricultural practices in humid temperate climates. *CAB Reviews* 8(23): 1-18.
- Wibowo, A., and A.N, Gintings. 2009. Degradasi dan Upaya Pelestarian Hutan. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Kehutanan.
- Wibowo, C., and Slamet, S.A. 2017. Keanekaragaman Makrofauna Tanah Pada Berbagai Tipe Tegakan Di Areal Bekas Tambang Silika Di Holcim Educational Forest, Sukabumi, Jawa Barat. *Jurnal Silvikultur Tropika* 08(1): 26-34.
- Wikiwand. 2022. Isopoda. <https://www.wikiwand.com/id/Isopoda>
- Williams, A.A.; Stone, R.C. An assessment of relationships between the Australian subtropical ridge, rainfall variability, and highlatitude circulation patterns. *Int. J. Climatol. J. R. Meteorol. Soc.* 2009, 29, 691–709.
- Wilson, E.O. 1987. The Little Things That Run the World (The Importance and Conservation of Invertebrates). *Conservation Biology* 1(4): 344-346.
- Wilson, E.O. 1992. The Diverisity of Life. Harvard University Press, Cambridge, MA. 464 p.
- Wu, T., Lu, M., Lu, X., Guan, Q., He, X. 2015. Interactions between earthworms and mesofauna has no significant effect on emissions of CO₂ and N₂O from soil. *Soil Biol. Biochem* 88: 294–297.
- Yadav, R.S., B., R, Chhipa., S.K, Dhyani and M. Ram. 2011. Soil biological properties under different tree based traditional agroforestry systems in a semiarid region of Rajasthan, India. *Agroforest Syst* 81: 195-202.
- Yeo, K. 2006. Spatial dynamics and diversity of ants in the litter and soil in a forest-savanna in Ivory Coast. Thesis, University Pierre and Marie Curie and the University of Abobo-Adjame: 212 p.
- Yin, X., Chen, M., Hongshi, H., Zhenhai, W., Xiaoqiang, L., Guanqiang, F., Jing, L., Yanmiao, Z. 2017. Distribution and diversity patterns of soil fauna in different salinization habitats of Songnen Grasslands, China. *Applied Soil Ecology* 09(34): 1-9.
- Yulnafatmawita, A., Daulay. F. 2008. Pengaruh Pemberian Bebe-rapa Jenis Bahan Organik terhadap Stabilitas Agregat Tanah Ultisol Limau Manis. *Jurnal Solum* 5(1): 7–13.
- Yulnafatmawita., Detafiano, D., Afner, P. and Adrinal. 2014. Dynamics of physical properties of Ultisol under maize cultivation in

- wet tropical area. *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology* 4 (5): 11- 15.
- Zak, R., Kurt, S., Kurtis, P.S., Holmes, W.E. 2000. **ATMOSPHERIC CO2 AND THE COMPOSITION AND FUNCTION OF SOIL MICROBIAL COMMUNITIES**. *Ecological Application* 10(1): 47-59
- Zhang, P., Zhang, C., Ding, S.; Bian, Z., Li, P., Zhang, J., Ding, S. 2022. **Response of Soil Fauna Diversity to Agricultural Landscape Het-Erogenicity in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River—A Case Study in Gongyi City, China**. *Diversity* 14: 1-22.
- Zuraya, N. 2019. **Pemerintah Terbitkan Izin 18 Juta Ha Lahan Selama Moratorium**. *Republika*: <https://www.republika.co.id/berita/puq88k383/pemerintah-terbitkan-izin-18-juta-ha-lahan-selama-moratorium>

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Hermansah, dilahirkan di Mahat Kabupaten Lima Puluh Kota, yang sering disebut dengan Luak 50, tanggal 25 Desember 1964, dari Ayah dan Umi seorang pedagang kain dan tukang jahit di desa. Saat ini sebagai Guru Besar Ilmu Tanah di Fakultas Pertanian Universitas Andalas. Alamat rumah di Jalan Ngurahrai No. 22 Air Tawar Timur Padang. Menamatkan Sarjana Pertanian dengan gelar Insinyur (Ir) di Fakultas Pertanian Universitas Andalas, Padang, dengan predikat sebagai Lulusan Terbaik Universitas Andalas pada Wisuda 13 September 1989. Magister Sain (MS) Ilmu Tanah diperoleh di Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor (IPB) Tahun 1993. Pada Tahun 1995, dari 20 Maret sampai dengan 10 Juni, Mengikuti pelatihan dibidang Pedology yang di sponsori oleh JICA Japan di Osaka International Center dan Shimane University, Japan. Pada tahun 1997 melanjutkan lagi pendidikan S2 (MSc) di Faculty of Life and Environmental Science, Shimane University, Matsue Japan. Dan dilanjutkan dengan S3 (Dr) di Totori, University, Japan, dan tamat tahun 2003. Mengikuti pelatihan-pelatihan seperti Analisis Mengenai Dampak Lingkungan Hidup (AMDAL), pelatihan Free Overseas Training di Bogor, tahun 1996. Pelatihan Free Prior Informed and Consent (FPIC) untuk REDD+, proses penguatan para pihak dalam pelaksanaan REDD+ yang dilaksanakan Satuan Tugas REDD+ dan RECOFTC (Satgas REDD+ Idonesia dan RECOFTC-The Center for People and Forest) pada 17-21 September 2012, di Bogor dan berbagai pelatihan lainnya. Kegiatan ilmiah yang dilakukan meliputi penelitian yang didanai Unand, Dikti dan kolaborasi Penelitian dengan Shimane University dan Kindai Univeristy, Japan. Menulis artikel dan publikasi ilmiah baik di Jurnal Nasional dan Internasional yang banyak terkait dengan siklus dan pengelolaan unsur hara pada agroekosistem di kawasan tropika basah.



Dr. Fenky Marsandi. Lahir di Pagar Alam, Sumatera Selatan pada tanggal 03 Maret 1990. Menyelesaikan S1 di Jurusan Biologi, FMIPA Universitas Sriwijaya pada tahun 2012. Pada tahun 2012-2015, penulis pernah bekerja di Departemen Agronomy dan Sustainability Palm Oil, PT. SMART Tbk. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan Pendidikan S2 dan S3 melalui program Magister Menuju Doktoral Sarjana Unggul (PMDSU) di Program Studi Ilmu Pertanian Program Pascasarjana, Universitas Andalas dan meraih gelar Doktor pada tahun 2020. Pada tahun 2021 penulis pernah menjadi dosen tetap di Fakultas Sain dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Syarif Hidayatullah Jakarta dan menjadi dosen tidak tetap Fakultas Pertanian Universitas Respati Indonesia (URINDO). Saat ini penulis bekerja sebagai periset di Pusat Riset Ekologi dan Etnobiologi, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).



Agustian, lahir di Padang tanggal 7 Agustus 1961. Memperoleh gelar insinyur pertanian (Ir) tahun 1985 pada program studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Andalas Padang. Gelar Doktor diperoleh dari Université de Henry Poincare Nancy I, Nancy-Perancis tahun 1994 dengan beasiswa pemerintah Perancis (Boursier Gouvernement Francais) pada program studi Biologie Végétale et Forestier dengan judul disertasi “Contribution à la Connaissance de la Taxonomie des Armillaires Africaines : Etude Enzymatique et en Particulier des β -glucosidases. Dalam penyelesaian studinya di Perancis penulis pernah bekerja pada Laboratoire de Recherche Sur les Symbiotes des Racines-Institute National de Recherche Agronomique (INRA) di Montpellier tahun 1989-1990 dan kembali melaksanakan penelitian dalam Program Academic Recharging (C) pada Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Biogéochimie des Sols INRA-IRD-SupAgro Montpellier tahun 2010.

Penulis menjadi dosen pada Fakultas Pertanian Universitas Andalas sejak Maret 1986. Selain mengajar pada program studi S1 (Ilmu Tanah dan Agroekoteknologi) di Fakultas Pertanian penulis juga tercatat sebagai dosen pada Program Pascasarjana Universitas Andalas. Mata kuliah yang diampu antara lain Dasar-dasar Ilmu Tanah,

Biologi Tanah, Pengantar Bioteknologi Pertanian, Bioteknologi Tanah, Kesuburan Tanah dan Pemupukan, Reklamasi dan Bioremediasi Tanah serta Sistem Pertanian Organik. Penelitian yang dilakukan penulis berfokus pada interaksi mikroorganisme tanah dengan tanaman. Hasil-hasil penelitian dari penulis dipublikasikan pada jurnal nasional dan internasional antara lain *New Phytologist*, *Journal of General and Applied Microbiology*, *Forest Pathology*. Training dan short course yang pernah diikuti penulis antara lain: Bioinformatics and DNA Data Bank of Japan, dilaksanakan oleh DNA Data Bank of Japan kerjasama dengan LIPI (2006), Short course on Bioremediation: Principles and methods (2007) kerjasama Nichols University-USA dengan ITB Bandung, Workshop on DNA and Its prospect in Biotechnology diselenggarakan oleh Permi-cabang Sumatera Barat (2010), dan Training of Trainers IGN-TTRC Biodiversity (Kassel University Germany-Andalas University Indonesia, 2011). Penulis pernah menjabat Sekretaris Jurusan Tanah (1999-2003) dan menjadi Ketua Jurusan Tanah (2003-2007) dan Ketua Program Studi Ilmu Tanah (S2) Program Pascasarjana Unand, Kepala Laboratorium Biologi Tanah dan sejak 2021 menjadi Wakil Dekan 1 pada Fakultas Pertanian Unand. Penulis merupakan anggota Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI) dan juga anggota Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia (PERMI). Pernah menjadi Pengurus Pusat Permi periode 2000-2004 dan menjadi ketua PERMI cabang Sumatera Barat periode 2007-2011 dan 2011-2015, anggota masyarakat Biodiversitas Indonesia (2017-sekarang), serta sejak 2016 menjadi member of Asian PGPR Society for Sustainable Agriculture Email: agustian@agr.unand.ac.id

Prof.Dr.Ir.Hermansah,MS.MSc.

*Buku ini sebagai inspirasi dan motivasi buat anak-anak ku
dr.Liganda Endo Mahata.M.Biomed
dr.M.Luthfi dan
Fagaseno Endo Mahata*

Dr.Fenky marsandi,Ssi.

Buku ini saya persembahkan kepada Istri saya (Dr. Hidayatul Fajri MS), Ayah (Diharman, S.Pd), Ibu (Sistianah), Adik-Adik (Desi Anugrah Sari, S.IP dan Aura Hidayah Putri) atas dukungan, doa dan motivasi yang telah diberikan.

Dr.Ir.Agustian

Dipersembahkan buat anak dan menantuku drg. Aryani Agiza Agustian, Muhammad Ihsan, SE; Albert Agiza Agustian, SE. MM dan Retno Melani Putri, SE.MM serta cucuku Haaniya Amaira Arsan semoga buku ini dapat menginspirasi dan memotivasi mereka untuk memiliki karya intelektual sendiri di masanya.