

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Arthropoda dan Peranannya di Ekosistem

Borror dkk. (1989) menjelaskan bahwa arthropoda berasal dari bahasa Yunani *arthro* yang artinya ruas dan *poda* berarti kaki, jadi arthropoda adalah kelompok hewan yang mempunyai ciri utama kaki beruas-ruas. Selain ciri tersebut, arthropoda mempunyai ciri: tubuh beruas, simetri bilateral, mempunyai rangka luar dari kitin, mempunyai saluran pencernaan yang berbentuk tabung mulai dari mulut sampai dubur, sistem peredaran darah terbuka, dan ekresi dengan buluh Malpighi.

Arthropoda adalah hewan bersegmen yang mempunyai eksoskeleton. Segmen tubuh dikelompokkan ke dalam bagian yang disebut tagmata (tunggal tagma), misalnya, kepala, dada dan perut. Eksoskeleton menutupi seluruh tubuh, biasanya mengeras dan tidak fleksibel pada sebagian besar tubuhnya, tetapi tetap fleksibel pada sendi (Moore, 2006).

Eisenbeis & Wichard (1987) menjelaskan bahwa arthropoda tanah merupakan kelompok arthropoda yang mendiami tanah dari kelas: Crustacea, Arachnida, Myriapoda dan Insekta. Bentuk kehidupan telah dikembangkan arthropoda tanah sebagai adaptasi terhadap faktor-faktor ekologi menjadi eudafik, epidafik dan hemiedafik.

1. Eudafik

Sistem pori tanah dan faktor ekologi yang efektif memberikan bentuk karakter khusus kehidupan eudafik. Artropoda tanah eudafik kecil dan dapat dikenali dari bentuk tubuhnya seperti cacing. Diameter tubuhnya sesuai dengan sistem pori. Mereka tidak dapat menghindari predator, sehingga banyak hewan eudafik memiliki kelenjar bertahan atau beracun.

2. Epidafik

Artropoda tanah yang hidup di permukaan dan di lapisan serasah memiliki bentuk kehidupan epidafik. Mereka tidak teradaptasi dengan sistem pori tanah, karena ukurannya. Artropoda tanah epidafik seringkali terbatas pada permukaan tanah dan serasah yang berongga besar. Artropoda tanah epidafik memiliki mobilitas yang besar dan beraktivitas secara diurnal.

3. Hemiedafik

Hemiedafik merupakan bentuk sementara kehidupan, diadopsi oleh arthropoda epidafik dan atmobiotik untuk menempati liang yang ada atau buatan sendiri di dalam tanah. Adaptasi ekologi ini memerlukan kemampuan untuk menggali menggunakan mulut

atau kaki fossorial, atau kekuatan gerak dari artropoda tanah yang dapat memperbesar retak dan pori-pori yang ada untuk menggali lebih dalam ke tanah.

Borror dkk. (1989) menjelaskan bahwa serangga tanah bervariasi dalam kebiasaan makannya. Banyak serangga yang makan tumbuhan yang membusuk, beberapa makan bagian tumbuhan yang ada di bawah tanah dan sebagian lagi makan zat organik yang sedang membusuk. Serangga yang makan di atas tanah menggunakan tanah hanya sebagai tempat bersarang, seperti semut, tawon penggali, dan lebah, membawa makanan ke dalam tanah untuk memberi makan kepada yang muda.

1. Arthropoda Tanah sebagai Herbivora

Arthropoda (termasuk serangga, laba-laba, dan tungau) secara keseluruhan berpengaruh terhadap produksi tanaman, karena mereka ada yang menjadi hama dan ada juga spesies yang menguntungkan (Olfert dkk., 2002). Diplopoda merupakan fitofagus, tetapi sebagian besar spesies tidak menyebabkan kerusakan serius pada tanaman (Gibb & Oseto, 2006).

2. Arthropoda Tanah sebagai Pengurai

Posisi artropoda tanah pada ekosistem sesuai dengan tingkat trofik pada rantai makanan, yaitu sebagai konsumen yang berada antara produsen dan pengurai, dan berperan pada jaring-jaring makanan dengan menguraikan sisa-sisa tanaman (Eisenbeis & Wichard, 1987). Arthropoda kelompok tungau, luing, dan kolembola terlibat dalam proses penguraian bahan organik, sehingga dapat memperbaiki struktur tanah (van Straalen, 1998).

3. Arthropoda Tanah sebagai Predator

Arachnida adalah kelompok terbesar kedua dari arthropoda dalam jumlah spesies dan peranan penting spesies pada pertanian. Sebagian besar arachnida, termasuk laba-laba adalah predator. Sedangkan Chilopoda adalah predator dan memiliki sepasang gigi yang beracun untuk menangkap dan membunuh mangsanya (Gibb & Oseto, 2006).

4. Arthropoda Tanah sebagai Bioindikator

Arthropoda tanah adalah indikator integritas dan keanekaragaman hayati yang efektif pada ekosistem hutan. Keanekaragaman dan struktur komunitas arthropoda menunjukkan kompleksitas struktur habitat, termasuk perkembangan dan perbaikan ekosistem hutan setelah terjadi gangguan. Arthropoda merupakan indikator yang baik terhadap integritas berbagai macam fungsi ekosistem, seperti jaring-jaring makanan, dekomposisi, polinator dan reproduksi (Maleque dkk., 2006).

2.2 Bioindikator

Bioindikator adalah organisme atau kelompok organisme yang sesuai untuk menentukan keadaan lingkungan secara kualitatif maupun kuantitatif, yang menunjukkan tekanan lingkungan akibat kegiatan manusia. Spesies indikator adalah organisme yang digunakan sebagai indikator kualitatif fenomena alam tertentu atau tekanan akibat kegiatan manusia (Franzle, 2003). Bioindikator harus mencerminkan struktur dan/atau fungsi proses ekologis dalam tanah dan secara umum berlaku untuk semua jenis tanah dan lokasi geografis, menanggapi perubahan kesehatan tanah, tersedia metodologi untuk pengamatan, mudah diinterpretasikan dan sampel dapat diambil dengan biaya yang wajar (Pankhurst, 1998).

Penggunaan bioindikator merupakan sebuah pendekatan inovatif untuk menilai berbagai jenis kesalahan dalam pengelolaan lingkungan, termasuk pencemaran, masukan pertanian yang tinggi, pembuangan limbah yang tidak sesuai, kontaminasi, dan ketidakseimbangan ekosistem. Pendekatan ini menggunakan organisme hidup dan keanekaragaman hayati sebagai alat untuk menilai situasi yang sedang berlangsung di lingkungan. Meskipun diperlukan penelitian laboratorium, namun studi bioindikator mengandalkan penilaian lapangan dari spesies yang ditemukan dalam jumlah sedikit atau terbatas. Studi bioindikator memiliki potensi kontribusi besar dalam mengoptimalkan sistem pertanian yang berbeda, teknik budi daya baru, tanaman baru dan rotasi tanaman (Paoletti, 1999).

Markert dkk. (2003) menjelaskan bahwa bioindikator adalah organisme yang dapat memberikan informasi tentang kualitas lingkungan. Biomarker adalah perubahan struktural atau fungsional pada bagian organisme (genetik, enzimatik, fisiologi, morfologi) yang menunjukkan pengaruh dari lingkungan secara umum dan khususnya pengaruh polutan. Indikator taksa (indikator ekologi) adalah spesies yang diketahui peka terhadap proses atau polutan yang menyebabkan perubahan dalam keanekaragaman hayati, dan diambil sebagai pengganti bagi masyarakat yang lebih besar dan bertindak sebagai ukuran untuk kondisi habitat, komunitas atau ekosistem tertentu. Adaptasi organisme dan komunitas terhadap tekanan lingkungan ada tiga, yaitu: toleran, resisten dan sensitif.

1. Toleran

Kemampuan yang dimiliki oleh suatu organisme atau komunitas untuk menyesuaikan diri terhadap stres faktor abiotik (iklim, radiasi, polusi) atau faktor biotik (parasit, patogen), di mana melibatkan perubahan adaptasi fisiologi (seperti induksi enzim, respon imun).

2. Resisten

Kemampuan yang diturunkan secara genetik untuk menahan stres. Ini berarti bahwa semua organisme toleran resisten, tapi tidak semua organisme yang resisten toleran.

3. Sensitif

Suatu organisme atau komunitas yang rentan terhadap perubahan faktor biotik maupun abiotik. Sensitifitas rendah jika toleransi atau resistensi terhadap stresor lingkungan tinggi, dan sensitifitas tinggi jika toleransi atau resistensi terhadap stresor lingkungan rendah.

Sifat yang harus dipenuhi oleh suatu organisme untuk dijadikan sebagai bioindikator tanah adalah: memiliki peran penting dalam fungsi tanah, ada dalam jumlah terukur dan tersebar luas, memiliki teknik yang sesuai untuk penghitungan, dan cukup sensitif dalam menanggapi perubahan praktek pengelolaan tanah (Gupta & Yeates, 1998). Menurut Doran & Zeiss (2000), indikator kesehatan tanah atau kualitas tanah harus memenuhi lima kriteria, yaitu:

1. Sensitifitas terhadap variasi dalam pengelolaan

Indikator harus cukup sensitif untuk mencerminkan pengaruh pengelolaan dan iklim terhadap perubahan jangka panjang dalam kualitas tanah, tetapi tidak begitu sensitif untuk dipengaruhi oleh pola cuaca jangka pendek. Organisme tanah memenuhi kriteria ini karena mereka memiliki repon yang sensitif terhadap gangguan pengelolaan manusia.

2. Berkorelasi baik dengan fungsi tanah

Kelimpahan dan keragaman organisme tanah sering berkorelasi baik dengan banyak fungsi tanah, walaupun dibutuhkan kehati-hatian untuk memilih organisme mana atau parameter komunitas yang mana untuk digunakan sebagai suatu ukuran fungsi tanah.

3. Dapat menjelaskan proses ekosistem

Indikator seharusnya dapat menjelaskan mengapa tanah dapat atau tidak dapat berfungsi seperti yang diinginkan. Organisme tanah dapat berperan langsung dalam banyak proses ekosistem termasuk konversi hara ke bentuk yang tersedia untuk tanaman.

4. Dapat dipahami dan berguna untuk pengelola lahan

Pengukuran kelimpahan dan keragaman dari nematoda, tungau (mite) dan bakteri menyediakan banyak informasi terhadap fungsi tanah dan prosesnya tetapi juga dibutuhkan pelatihan yang cukup untuk pengelola lahan.

5. Mudah dan murah dalam pengukuran

Karena penentu utama kualitas dan kesehatan tanah adalah pengelola lahan, indikator kualitas tanah dan keberlanjutannya harus mudah diakses oleh mereka dan secara

ekonomi mudah didapatkan dan murah. Umumnya kuantifikasi organisme tanah tidak terlalu mahal dan tidak membutuhkan banyak peralatan khusus.

Sifat yang harus dipenuhi oleh suatu organisme untuk dijadikan sebagai bioindikator tanah adalah: memiliki peranan penting dalam fungsi tanah, ada dalam jumlah banyak dan tersebar luas, terdapat teknik yang sesuai untuk penghitungan, dan cukup sensitif dalam menanggapi perubahan praktek pengelolaan tanah (Gupta & Yeates, 1998). Menurut Schloter dkk. (2003), penggunaan kelompok fauna sebagai indikator kualitas tanah memerlukan pemilihan organisme yang membentuk kelompok dominan dan terjadi pada semua jenis tanah, memiliki kelimpahan dan keanekaragaman hayati yang tinggi dan memainkan peran penting pada fungsi tanah, misalnya dalam jaring-jaring makanan.

Van Straalen (1998) menyatakan bahwa pengembangan bioindikator harus memperhatikan hubungan antara faktor lingkungan dan parameter biologi. Tahapan untuk mengembangkan arthropoda tanah sebagai bioindikator adalah:

1. Sebuah komunitas yang terdiri dari beberapa spesies yang memberikan reaksi mereka terhadap beberapa faktor tertentu.
2. Respon masing-masing spesies terhadap faktor tertentu diperkirakan, baik dari distribusi spesies di lapangan atau dari percobaan laboratorium, untuk mengetahui respon spesies pada berbagai tingkat faktor.
3. Tanggapan dirangkum dalam beberapa bentuk, misalnya: rentang toleransi untuk setiap spesies. Spesies yang menunjukkan tanggapan serupa dapat dijadikan satu kelompok.
4. Berdasarkan ringkasan informasi, dikembangkan indeks yang menggabungkan kelimpahan spesies dengan toleransinya. Indeks harus peka terhadap penggantian spesies dengan toleransi yang berbeda.
5. Indeks tersebut dikalibrasi menggunakan data lapangan, di mana komposisi spesies diukur dalam hubungannya dengan faktor yang dikehendaki. Kalibrasi akan mengoptimalkan daya prediksi indeks, dan pada saat yang sama akan memberikan informasi tingkat akurasi yang dicapai.
6. Menggunakan indeks, untuk memperkirakan secara kuantitatif dari faktor yang dikehendaki berdasarkan hasil survei komposisi komunitas.

Cara lama yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas tanah didasarkan pada penggunaan indikator fisika, kimia dan mikrobiologi. Metode baru berdasarkan mikroarthropoda tanah telah diusulkan untuk mengevaluasi kualitas tanah. Mikroarthropoda tanah dipilih karena memberikan respon sensitif terhadap praktik pengelolaan lahan dan berkorelasi positif dengan fungsi tanah (Parisi dkk., 2005).

2.3 Arthropoda Tanah sebagai Bioindikator

Penggunaan bioindikator penting untuk memonitoring lingkungan. Karakteristik utama spesies sebagai bioindikator adalah kekayaan dan keanekaragaman spesies, mudah ditangkap, secara ekologi mempunyai peran penting, sensitif terhadap sedikit perubahan lingkungan dan mempunyai respon yang baik terhadap perubahan lingkungan. Serangga memberikan respon yang baik, namun responnya berbeda-beda tergantung spesies dan perubahan lingkungan yang terjadi. Klas insekta yang berpotensi digunakan sebagai bioindikator lingkungan, diantaranya ordo Coleoptera, Diptera, Lepidoptera, Hymenoptera, Hemiptera dan Isoptera (da Rocha dkk., 2010).

Struktur komunitas mikroarthropoda dapat digunakan sebagai bioindikator kualitas tanah, mengingat hubungan yang rumit antara mikroarthropoda dan nichenya dalam tanah. Arthropoda tanah banyak yang hidup menetap, seperti: Collembola, Oribatida, Isopoda, dan Diplopoda, sehingga dapat mencerminkan kondisi habitat yang lebih baik dari pada organisme dengan kapasitas penyebaran tinggi, seperti serangga yang aktif terbang (van Straalen, 1998).

Hasil penelitian Santorufo dkk. (2012) menunjukkan bahwa taksa yang lebih tahan terhadap urbanisasi dan paling banyak ditemukan adalah acarina, enchytraeids, colembola dan nematoda. Yang paling sensitif terhadap perubahan sifat tanah adalah collembola. Formicidae ditemukan melimpah di tanah dengan kandungan logam yang rendah, sedangkan isopoda mampu mentoleransi kontaminasi logam.

Tingginya karbon organik tanah dan kadar air tanah bertanggung jawab atas lebih tingginya kepadatan dan total keragaman mikroarthropoda, yaitu Collembola, Acarina dan kelompok mikroarthropoda lainnya dan menunjukkan kualitas tanah yang lebih tinggi. Selain ini, suhu tanah juga menjadi faktor pembatas bagi keberadaan dan kelimpahan berbagai kelompok mikroarthropoda (Begum dkk., 2011).

Arthropoda tanah sangat sensitif terhadap perubahan ekosistem hutan. Syaufina dkk. (2007) meneliti pengaruh kebakaran hutan terhadap arthropoda tanah di Hutan Pendidikan Gunung Walat. Kebakaran yang terjadi menyebabkan penurunan jumlah ordo dari 17 menjadi 10 ordo (41,18%). Ordo yang tidak ditemukan di hutan bekas terbakar adalah Blattaria, Homoptera, Mantodea, dan Thysanoptera. Ardillah dkk. (2014) melakukan penelitian di area restorasi Ranu Pani Kabupaten Lumajang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arthropoda tanah yang mendominasi lokasi penelitian pada tahun pertama adalah famili *Gryllidae* yaitu 73,06 %, sedangkan pada tahun kedua diduduki oleh *Talitridae*, yaitu 72,66 %.

Menurut Gerlach dkk. (2013), kelompok arthropoda yang berpotensi sebagai bioindikator adalah:

1. Araneae

Laba-laba mempunyai keanekaragaman yang tinggi. Beberapa famili mempunyai ukuran besar dan relatif mudah untuk diidentifikasi, namun ada beberapa yang berukuran kecil dan sulit diidentifikasi. Laba-laba telah digunakan sebagai bioindikator di beberapa lokasi. Famili yang digunakan sebagai bioindikator adalah Gnaphosidae dan Theridiidae. Kedua famili tersebar luas dan berpotensi untuk diaplikasikan secara luas.

2. Diplopoda

Kelabang agak sulit diidentifikasi dan ada beberapa kelompok yang belum teridentifikasi. Kelabang berpotensi sebagai bioindikator di beberapa lokasi, terutama di hutan tropis dan subtropis. Kelabang berpotensi sebagai indikator keanekaragaman komunitas dekomposer di seresah daun dan lapisan atas tanah.

3. Chilopoda

Kaki seribu berperan sebagai predator hewan yang hidup di seresah dan tanah. Keanekaragaman kaki seribu berkorelasi dengan kelompok arthropoda yang lain. Kaki seribu berpotensi sebagai bioindikator keanekaragaman hewan di suatu habitat.

4. Orthoptera

Belalang dan jengkerik berpotensi sebagai indikator perubahan ekosistem dan pengaruh pengelolaan habitat. Belalang sangat sensitif terhadap perubahan kondisi padang rumput dan mempunyai peluang besar untuk diteliti.

5. Blattodea

Kecoa berpotensi sebagai indikator adanya gangguan keanekaragaman spesies. Kecoa dapat digunakan untuk memonitor perubahan di ekosistem, khususnya yang berhubungan dengan ketebalan dan kualitas seresah.

6. Coleoptera

Kumbang adalah kelompok serangga yang mempunyai keanekaragaman sangat tinggi dan tersebar luas. Kumbang dapat digunakan sebagai indikator terjadinya gangguan di suatu habitat.

7. Hymenoptera

Semut adalah kelompok Hymenoptera yang mempunyai potensi bagus sebagai indikator. Semut mempunyai keanekaragaman yang tinggi, melimpah, mudah ditemukan dan ada di semua habitat. Semut dapat digunakan sebagai indikator perubahan yang terjadi pada suatu sistem.

8. Apterygota (Collembola)

Collembola telah digunakan sebagai indikator karakteristik suatu habitat. Collembola mempunyai kelimpahan yang tinggi dan sensitif terhadap perubahan tipe dan ketebalan seresah.

2.4 Karakteristik Tanah

Tanah adalah suatu benda alam yang terdapat di permukaan kulit bumi, yang tersusun dari bahan-bahan mineral sebagai hasil pelapukan batuan, dan bahan-bahan organik sebagai hasil pelapukan sisa-sisa tumbuhan dan hewan, yang merupakan medium atau tempat tumbuhnya tanaman dengan sifat-sifat tertentu, yang terjadi akibat dari pengaruh kombinasi faktor-faktor iklim, bahan induk, jasad hidup, bentuk wilayah dan lamanya waktu pembentukan (Yulipriyanto, 2010).

Kualitas tanah adalah kemampuan tanah untuk berfungsi dalam ekosistem dan berinteraksi secara positif dengan ekosistem sekitarnya. Kualitas tanah juga diartikan sebagai cara yang sensitif dan dinamis untuk mencatat keadaan tanah, tanggapan terhadap pengelolaan, atau ketahanan terhadap tekanan yang diberikan oleh alam atau penggunaan manusia. Dua faktor penting yang terkait dengan konsep kualitas tanah adalah bahwa tanah memiliki sifat dan proses bawaan dan dinamis, dan penilaian kualitas tanah harus mencerminkan proses dan interaksi dari sifat biologi, kimia, dan fisik (Karlen dkk., 2003).

Doran & Safley (1998) menjelaskan bahwa kualitas tanah ditentukan oleh kemampuan tanah untuk menyediakan media pertumbuhan tanaman dan aktifitas biologi, mengatur dan membagi aliran air dan menyimpan di lingkungan, dan berfungsi sebagai lingkungan penyangga dalam pembentukan dan penghancuran senyawa berbahaya lingkungan. Fungsi ekologi tanah meliputi:

1. Produksi biomassa (makanan, serat, dan energi)
2. Tanah sebagai sebuah reaktor yang menyaring, menahan, dan mengubah materi untuk melindungi lingkungan, tanah, dan rantai makanan dari polusi.
3. Tanah sebagai habitat biologi dan cadangan genetik bagi banyak tanaman, hewan, dan organisme yang harus dilindungi dari kepunahan.

Fungsi tanah yang berhubungan dengan kegiatan manusia meliputi:

1. Tanah sebagai media fisik, yang dipakai sebagai dasar tata ruang untuk struktur teknis dan industri dan aktivitas sosial-ekonomi, seperti: perumahan, pengembangan industri, sistem transportasi, rekreasi dan pembuangan limbah.

2. Tanah sebagai sumber bahan baku penyediaan air, tanah liat, pasir, kerikil, mineral dan lain-lain.
3. Tanah sebagai bagian dari warisan budaya kita, yang berisi harta palaeontologi dan arkeologi penting untuk melestarikan sejarah bumi dan umat manusia.

Menurut Akinrinde (2004), ada beberapa karakteristik yang dimiliki oleh tanah, yaitu:

1. Warna tanah

Warna tanah adalah karakteristik tanah pertama yang diamati selama penelitian profil dan sering digunakan untuk menggambarkan tanah. Warna tanah memiliki pengaruh tidak langsung terhadap pertumbuhan tanaman melalui efeknya pada suhu dan kelembaban. Pada kebanyakan kasus, kapasitas produksi tanah yang dapat dinilai dari warnanya. Lapisan atas tanah seragam, warna gelap karena adanya humus, sedangkan lapisan tanah sebelah bawah memiliki warna yang lebih mencolok.

2. Tekstur tanah

Tekstur merupakan karakteristik yang paling permanen dan penting pada tanah. Tekstur tanah menunjukkan ukuran relatif dari partikel-partikel tanah, yaitu proporsi relatif dari berbagai fraksi ukuran butir utama tanah (pasir, debu dan liat) dan berhubungan juga dengan persentase relatif pasir, debu dan liat dalam tanah.

3. Porositas

Porositas berkaitan erat dengan *bulk density*, yaitu volume ruang pori dalam tanah dan dengan demikian berbanding terbalik dengan kepadatan kemasan partikel. Porositas merupakan jumlah ruang yang ditempati oleh udara pada suatu volume total sampel.

4. Arsitektur tanah

Butiran mineral atau partikel (yang merupakan fase padat tanah) tidak terbentuk secara individu, tetapi terikat bersama oleh zat penguat tertentu (partikel tanah liat, bahan organik, dan beberapa penguat kimia, seperti kalsium karbonat dan pengikat organik yang dihasilkan oleh hewan tanah dan bahan tanaman yang membusuk) untuk membentuk agregat tanah.

5. Aerasi dan drainase tanah

Aerasi dan drainase tanah dipengaruhi oleh berat tanah, jumlah ruang pori dan hubungannya dengan udara. Inilah sebabnya mengapa mereka semua biasanya dibahas bersama. Tanah terdiri dari berbagai ukuran partikel yang dikemas bersama-sama, dengan ruang antara partikel yang dikenal sebagai rongga, pori-pori atau ruang udara yang merupakan campuran antara udara dan air.

6. Suhu tanah

Suhu tanah merupakan faktor penting untuk pertumbuhan tanaman. Suhu mempengaruhi pertumbuhan tanaman secara langsung pada benih, akar tanaman dan mikroba yang hidup di tanah. Suhu mempengaruhi pertumbuhan tanaman secara tidak langsung dengan mempengaruhi kelembaban tanah, aerasi struktur, mikroba dan aktivitas enzim, dekomposisi residu tanaman dan ketersediaan nutrisi tanaman.

Ada dua metode yang biasa digunakan untuk menilai kesehatan ekosistem, yaitu metode spesies indikator, sederhana dan mudah digunakan dalam praktek. Satus kesehatan ekosistem digambarkan berdasarkan kuantitas, produktivitas, fungsi struktural, dari spesies indikator dalam ekosistem tertentu. Tetapi metode ini tidak sepenuhnya mencerminkan status kesehatan ekosistem, karena kriteria seleksi spesies indikator dan indikasinya tidak jelas terhadap status kesehatan ekosistem. Metode sistem indikator, melakukan evaluasi kuantitatif menurut sistem indikator khusus. Sistem indikator dibuat berdasarkan karakteristik ekosistem dan fungsi layanan. Indikator yang dipilih mencakup indikator-indikator mengenai struktur ekosistem, fungsi, dan proses serta indikator tentang, pola lanskap sosial-ekonomi, dan penggunaan lahan. Metode ini dapat diterapkan secara luas dalam evaluasi kesehatan pada semua jenis ekosistem, karena tersedia informasi yang komprehensif dan terpadu (Jian dkk., 2007).

2.5 Analisis Bioindikator Kualitas Tanah

Arshad (2002) menyatakan bahwa kualitas tanah adalah kemampuan tanah untuk berfungsi sesuai dengan kapasitasnya, pada ekosistem alami atau ekosistem yang dikelola untuk mendukung produktifitas tumbuhan dan hewan, menjaga atau meningkatkan kualitas air dan udara dan mendukung kesehatan dan tempat tinggal manusia.

Parisi dkk. (2005) menggunakan indeks *Qualità Biologica del Suolo* (QBS) untuk mengetahui kualitas tanah dengan menggunakan mikroarthropoda. Penentuan bentuk biologi menggunakan skor *Eco-Morphologic Indices* (EMI), dengan cara: kelompok mikroarthropoda eudafik diberi skor 20, hemiedafik bervariasi tergantung kelompoknya dan epidafik diberi skor 1.

Kualitas tanah dapat diketahui dari keragaman komunitas fauna tanah bersama dengan sifat fungsional dan kelimpahan anggotanya dengan menggunakan *Faunal Index* (FAI) (Yan dkk., 2012), rumus dari FAI adalah:

$$FAI' = S_o \times \sum_{i=1}^{S_o} \left(\frac{d_{io}}{d_{imax}} \times \sum_{k=1}^n (t_k w_k) \right) \quad (1)$$

$$F'_{EMI} = S_o \times \sum_{i=1}^{S_o} \left(\frac{d_{io}}{d_{imax}} \times EMI_i \right) \quad (2)$$

$$F'_C = S_o \times \sum_{i=1}^{S_o} \left(\frac{d_{io}}{d_{imax}} \times C_i \right) \quad (3)$$

FAI' : indeks fauna

F'_{EMI} : indeks fauna EMI

F'_C : indeks fauna kejadian

S_o : kekayaan spesies pada lokasi pengamatan o

d_{io} : kelimpahan spesies-i pada lokasi pengamatan o

d_{imax} : kelimpahan spesies-i maksimum yang ditemukan pada seluruh lokasi pengamatan

t_k : nilai sifat fungsional spesies-k

w_k : bobot spesies-k

EMI_i : nilai EMI spesies-i

C_i : jumlah lokasi yang terdapat spesies-i

Nuria dkk. (2011) menggunakan *Biological Index of Soil Quality* (IBQS) berdasarkan pada komunitas makroinvertebrata tanah untuk menilai kualitas tanah dengan rumus:

$$IBQS = \sum_{i=1}^n \left[\ln \frac{(Di+1)}{N} / \ln (Di + 1)_{max} \right] \times Si \quad (4)$$

IBQS : indeks biologi kualitas tanah

Di : total kelimpahan taksa indikator ke-i pada plot

N : jumlah total sampel pada plot

Si : nilai indikator dari taksa indikator (IndVal)

Rousseau dkk. (2013) menggunakan metode *Indicator Value Index* (IndVal) untuk mengetahui suatu spesies indikator. Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Specifitas} = A_{ij} = \frac{N.ind (ij)}{N.ind (i)} \quad (5)$$

$$\text{Fidelitas} = B_{ij} = \frac{N.sample (ij)}{N.sample (j)} \quad (6)$$

$$\text{IndVal} = A_{ij} \times B_{ij} \quad (7)$$

N. ind (ij) : jumlah rata-rata dari tiap spesies (i) dalam kelompok sampel (j)

N. ind (i) : jumlah rata-rata tiap spesies (i) dalam seluruh kelompok

N. sample (ij) : jumlah sampel dalam kelompok (j) dimana spesies (i) berada

N. sample (j) : total jumlah sampel dalam kelompok

2.6 Teori Keanekaragaman

Keanekaragaman adalah jumlah spesies yang ada pada suatu waktu dalam komunitas tertentu (Pielou, 1975). Keanekaragaman terdiri dari dua komponen, yaitu komponen varietas dan kelimpahan relatif dari spesies. Keanekaragaman dapat diukur dengan mencatat jumlah spesies, dengan menggambarkan kelimpahan relatif atau dengan menggunakan suatu ukuran yang mengkombinasikan kedua komponen tersebut (Magurran, 1988). Keanekaragaman menurut Odum (1971) mempunyai beberapa komponen, komponen pertama adalah kekayaan jenis (*richness*) atau komponen varietas, seperti jenis seluruhnya (S) dan jumlah seluruhnya (N), komponen kedua adalah kesamarataan (*equitabilitas*), yaitu pembagian individu yang merata diantara jenis. Pielou (1975) mengemukakan bahwa keanekaragaman suatu komunitas tergantung pada jumlah jenis (*richness*) dan tingkat pemerataan jumlah individu dari tiap jenis yang ada.

Keanekaragaman hayati di ekosistem menyangkut tiga tingkat integrasi kehidupan, yaitu:

1. Keanekaragaman Genetik

Keanekaragaman genetik merupakan keanekaragaman intraspesifik yang terbentuk dari adanya variabilitas genetik populasi, sehingga spesies mampu merespon perubahan lingkungan (Leveque & Mounolou, 2004). Pada populasi suatu spesies yang terpisah, kisaran variabilitas genetik dapat berbeda, sehingga terbentuk strain, ras, varietas, dan subspecies yang berbeda pada suatu spesies. Isolasi reproduksi dari populasi tersebut merupakan langkah pertama menuju pembentukan spesies baru (spesiasi) (Slootweg, 2010).

2. Keanekaragaman Spesies

Spesies ada dalam berbagai macam bentuk, dengan berbagai ukuran dan karakteristik biologis. Beroperasi secara individu atau kelompok dalam jaring trofik, sifat ini mempengaruhi alam dan besarnya aliran materi dan energi dalam ekosistem. Interaksi antara spesies yang berbeda, tidak hanya kompetisi, tapi juga simbiosis mutualisme dan berkontribusi secara kolektif dengan dinamika suatu ekosistem (Leveque & Mounolou, 2004). Keanekaragaman spesies dapat digambarkan dalam bentuk jumlah spesies yang ada di daerah tertentu, pemerataan distribusi spesies (ukuran kelimpahan spesies), atau dalam bentuk hubungan evolusioner spesies (keanekaragaman filogenetik) (Slootweg, 2010).

3. Keanekaragaman Ekosistem

Keanekaragaman ekosistem merupakan ekspresi secara tidak acak, di mana spesies hidup secara berdampingan, berinteraksi dengan dan antara satu sama lain, dan berinteraksi dengan lingkungan fisik mereka (Slootweg, 2010). Sesuai dengan variasi habitat dan

variabilitasnya dari waktu ke waktu. Kekayaan yang spesifik biasanya dianggap fungsi keragaman habitat dan jumlah berpotensi tersedia relung ekologi. Karena keanekaragaman hayati mereka, ekosistem berperan dalam regulasi siklus geokimia global (fiksasi, penyimpanan, transfer, daur ulang nutrisi) dan siklus air (Leveque & Mounolou, 2004).

Keanekaragaman berdasarkan skala ruang dibagi menjadi tiga, yaitu keanekaragaman α (alfa), keanekaragaman beta (β) dan keanekaragaman γ (gama).

1. Keanekaragaman α (Alfa)

Keanekaragaman alfa adalah keanekaragaman spesies dalam suatu komunitas atau habitat (Southwood & Henderson, 2000). Sloomweg (2010) menyatakan bahwa keanekaragaman alfa mengacu pada keanekaragaman di suatu daerah, berupa kekayaan spesies.

2. Keanekaragaman β (Beta)

Keanekaragaman beta adalah perbedaan keanekaragaman spesies antara dua daerah atau lebih (Sloomweg, 2010). Keanekaragaman beta merupakan ukuran laju dan besarnya perubahan spesies dari satu habitat ke habitat yang lain (Southwood & Henderson, 2000). Smith (1992) menyatakan bahwa keanekaragaman beta atau keanekaragaman antar komunitas dapat dihitung dengan menggunakan beberapa teknik, yaitu kesamaan komunitas dan indeks keanekaragaman.

3. Keanekaragaman γ (Gama)

Keanekaragaman gama adalah ukuran dari seluruh keanekaragaman berbagai ekosistem yang ada di suatu daerah (Sloomweg, 2010). Menurut Southwood & Henderson (2000), keanekaragaman gama merupakan kekayaan spesies dari berbagai habitat di wilayah geografis (misalnya pulau), yang merupakan konsekuensi dari keanekaragaman habitat, bersama-sama dengan luasnya keanekaragaman beta di antara keduanya.

Keanekaragaman spesies dapat digunakan untuk menyatakan struktur komunitas. Ukuran keanekaragaman dan penyebabnya mencakup sebagian besar pemikiran tentang ekologi. Hal itu terutama karena keanekaragaman dapat menghasilkan kestabilan dan dengan demikian berhubungan dengan pemikiran sentral ekologi, yaitu tentang keseimbangan suatu sistem. Keanekaragaman yang tinggi menyebabkan jaring-jaring makanan yang terbentuk lebih kompleks, sehingga kestabilan meningkat (Price, 1997).

2.7 Bentuk-bentuk Ekosistem

Ekosistem adalah hubungan erat yang saling mempengaruhi antara organisme hidup (biotik) dengan lingkungan tidak hidupnya (abiotik) di suatu daerah. Ekosistem merupakan satuan fungsional dasar dalam ekologi, karena baik organisme hidup maupun lingkungan abiotik, masing-masing mempengaruhi sifat yang lain. Secara fungsional, ekosistem dapat dengan baik dianalisis berdasarkan: transfer energi, rantai makanan, pola keanekaragaman, daur makanan, evolusi dan pengendalian (Odum, 1971)

Di biosfer terdapat beberapa macam ekosistem, namun secara umum dibagi menjadi 2 kelompok, yaitu: ekosistem alami dan ekosistem binaan manusia. Ekosistem alami merupakan ekosistem yang pembentukan dan perkembangannya murni berjalan secara alami tanpa campur tangan manusia. Hutan tropis adalah salah satu contoh dari ekosistem alami. Ekosistem binaan manusia adalah ekosistem yang proses pembentukan, peruntukan dan perkembangannya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Campur tangan manusia menjadi unsur yang sangat dominan di ekosistem ini. Ekosistem pertanian (agroekosistem) merupakan salah satu bentuk ekosistem binaan manusia (Untung, 2006).

2.7.1 Hutan

Hutan adalah suatu kesatuan ekosistem berupa hamparan lahan berisi sumber daya alam hayati yang didominasi pepohonan dalam persekutuan alam lingkungannya, yang satu dengan lainnya tidak dapat dipisahkan (Undang-Undang, 1999). Kawasan hutan dibagi menjadi hutan konservasi, hutan lindung dan hutan produksi. Hutan konservasi terdiri dari: kawasan hutan suaka alam, kawasan hutan pelestarian alam dan taman buru. Kawasan hutan suaka alam terdiri dari hutan cagar alam dan hutan suaka margasatwa. Kawasan hutan pelestarian alam terdiri dari taman nasional, taman hutan raya dan taman wisata alam (Peraturan Pemerintah, 2002).

Menurut Peraturan Pemerintah (2011), kawasan suaka alam adalah kawasan dengan ciri khas tertentu, baik di daratan maupun di perairan yang mempunyai fungsi pokok sebagai kawasan pengawetan keanekaragaman tumbuhan dan satwa serta ekosistemnya yang juga berfungsi sebagai wilayah sistem penyangga kehidupan. Kawasan pelestarian alam adalah kawasan dengan ciri khas tertentu, baik di daratan maupun di perairan yang mempunyai fungsi pokok perlindungan sistem penyangga kehidupan, pengawetan keanekaragaman jenis tumbuhan dan satwa, serta pemanfaatan secara lestari sumber daya alam hayati dan ekosistemnya.

Cagar Alam adalah kawasan suaka alam yang karena keadaan alamnya mempunyai kekhasan/keunikan jenis tumbuhan dan/atau keanekaragaman tumbuhan beserta gejala alam dan ekosistemnya yang memerlukan upaya perlindungan dan pelestarian agar keberadaan dan perkembangannya dapat berlangsung secara alami. Suaka Margasatwa adalah kawasan suaka alam yang mempunyai kekhasan/keunikan jenis satwa liar dan/atau keanekaragaman satwa liar yang untuk kelangsungan hidupnya memerlukan upaya perlindungan dan pembinaan terhadap populasi dan habitatnya.

Taman Nasional adalah kawasan pelestarian alam yang mempunyai ekosistem asli, dikelola dengan sistem zonasi yang dimanfaatkan untuk tujuan penelitian, ilmu pengetahuan, pendidikan, menunjang budidaya, pariwisata, dan rekreasi. Taman Hutan Raya adalah kawasan hutan pelestarian alam untuk tujuan koleksi tumbuhan dan/atau satwa yang alami atau bukan alami, jenis asli dan/atau bukan jenis asli, yang tidak invasif dan dimanfaatkan untuk kepentingan penelitian, ilmu pengetahuan, pendidikan, menunjang budidaya, budaya, pariwisata, dan rekreasi. Taman Wisata Alam adalah kawasan hutan pelestarian alam yang dimanfaatkan terutama untuk kepentingan pariwisata alam dan rekreasi.

Menurut Indriyanto (2006), hutan merupakan suatu ekosistem yang kompleks. Hubungan yang terjadi antara tumbuh-tumbuhan pembentuk hutan dengan satwa liar dan alam lingkungannya sangat erat. Berdasarkan faktor lingkungan yang memiliki pengaruh dominan terhadap bentuk susunan ekosistem hutan, maka ekosistem hutan dikelompokkan ke dalam formasi klimatis dan formasi edafik.

1. Formasi Klimatis

Formasi klimatis adalah formasi hutan yang dalam pembentukannya sangat dipengaruhi oleh unsur-unsur iklim, misalnya temperatur, kelembaban udara, intensitas cahaya dan angin. Ekosistem hutan yang termasuk dalam formasi klimatis adalah hutan hujan tropis dan hutan musim.

2. Formasi Edafis

Formasi edafis adalah formasi hutan yang dalam pembentukannya sangat dipengaruhi oleh keadaan tanah, misalnya sifat fisika, sifat kimia dan sifat biologi tanah. Ekosistem hutan yang termasuk ke dalam formasi edafis adalah hutan rawa, hutan payau dan hutan mangrove.

Ninan & Inoue (2013) menjelaskan bahwa jasa ekosistem yang diberikan oleh hutan adalah:

1. Perlindungan Daerah Aliran Sungai (DAS)

Hutan membantu melindungi daerah aliran sungai dan menyediakan layanan hidrologi, seperti: penyediaan air untuk konsumsi rumah tangga dan industri, irigasi, dan pembangkit tenaga listrik. Hutan juga menyediakan layanan lain, seperti: pemurnian air, pencegahan banjir, dan rekreasi.

2. Perlindungan tanah

Hutan memainkan peran penting dalam mencegah erosi tanah. Deforestasi menyebabkan semakin luas erosi dan kerusakan akibat hilangnya top soil dan nutrisi, penurunan produktivitas lahan dan tanaman, pendangkalan sungai dan bendungan.

3. Penyerapan karbon

Hutan adalah penyerap utama karbon. Hutan mengatur atmosfer dengan menyimpan karbon dan melepaskan oksigen. Karbon dan nutrisi terakumulasi di hutan melalui proses biogeokimia yang kompleks. Deforestasi yang didorong oleh penebangan dan kegiatan lainnya, dan pembakaran karena penyebab alami atau buatan manusia mengakibatkan pelepasan karbon yang tersimpan di hutan ke atmosfer sebagai karbon dioksida, yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca.

4. Rekreasi

Manfaat rekreasi yang disediakan oleh hutan cukup besar. Banyak manfaat yang diperoleh oleh pengunjung cagar alam dan perlindungan kehidupan liar dari kegiatan rekreasi yang berkaitan dengan hutan, seperti: melihat satwa liar, safari berburu, menikmati keindahan pemandangan dan berjalan di alam, dan manfaat yang diperoleh pengelola taman nasional dan industri pariwisata yang signifikan.

5. Menjaga keseimbangan unsur hara

Hutan juga membantu dalam menjaga keseimbangan unsur hara. pohon menyerap hara mineral dari tanah saat mereka tumbuh dan mengumpulkan di tubuhnya. Sejalan dengan perubahan musim, beberapa akumulasi hara yang ada di cabang dan daun meranggas kembali ke tanah, sedangkan sisanya dipertahankan di batang dan akar.

6. Penyerbukan

Jasa penyerbukan adalah jasa penting lain yang disediakan oleh ekosistem hutan yang jarang dipelajari. Serangga hutan memainkan peran penting dalam menambah hasil panen di kebun yang terletak di sekitar hutan.

2.7.2 Agroforestri

Agroforestri adalah suatu bentuk pengelolaan sumberdaya yang memadukan kegiatan pengelolaan hutan atau pohon kayu-kayuan dengan penanaman komoditas

(tanaman jangka pendek), seperti tanaman pertanian dengan model-model wanatani bervariasi mulai dari wanatani sederhana berupa kombinasi penanaman sejenis pohon dengan satu-dua jenis komoditas pertanian, hingga ke wanatani kompleks yang memadukan pengelolaan banyak spesies pohon dengan aneka jenis tanaman pertanian, dan bahkan juga dengan ternak atau perikanan (Peraturan Menteri Kehutanan, 2013).

Sifat yang terdapat pada sistem agroforestri menurut Nair (1993), adalah:

1. Produktivitas

Pada umumnya sistem agroforestri bertujuan untuk mempertahankan atau meningkatkan produksi komoditas serta produktivitas lahan. Agroforestri dapat meningkatkan produktivitas dengan berbagai cara, termasuk: peningkatan output produk pohon, meningkatkan hasil dari tanaman terkait, pengurangan masukan sistem pertanaman, dan peningkatan efisiensi tenaga kerja (Nair, 1993).

Penelitian Rice (2008) mengungkapkan bahwa di samping keuntungan secara ekonomi yang nyata dari kopi, sistem agroforestri memberikan habitat yang potensial untuk tempat berlindung berbagai macam taksa, serta memberikan produk kayu. Sistem naungan kopi tidak hanya memberikan nilai pengaturan lingkungan seperti hutan, tetapi juga memberikan manfaat sosial ekonomi yang signifikan.

2. Sustainability

Agroforestri dapat mencapai dan mempertahankan tujuan konservasi dan kesuburan. Hal tersebut dapat tercapai melalui pelestarian potensi produksi yang berbasis pada sumber daya, terutama melalui efek menguntungkan dari tanaman berkayu terhadap tanah (Nair, 1993).

Penelitian de Souza dkk. (2012) pada sistem agroforestri kopi menunjukkan adanya potensi sistem agroforestri untuk merekonsiliasi produksi kopi dengan konservasi keanekaragaman hayati di bawah perubahan iklim dan berkontribusi terhadap pengaturan dan pendukung jasa ekosistem.

3. Adaptabilitas

Agroforestri adalah istilah baru pada praktek yang sudah lama dilakukan. Berarti bahwa dalam beberapa kasus, agroforestri sudah diterima oleh masyarakat petani. Sehingga perbaikan teknologi agroforestri atau teknologi baru yang diperkenalkan ke daerah juga harus sesuai dengan praktek pertanian lokal (Nair, 1993).

Petani memiliki pemahaman yang kompleks dari pengaruh kebakaran terhadap tanah, vegetasi, hasil panen dan biota tanah, yang mungkin diperoleh dari pengalaman langsung, interaksi dengan penyuluh pertanian, dan informasi yang diperoleh dari petani

lainnya. Pengetahuan ekologi lokal terhadap pengaruh spesies yang berbeda terhadap kualitas tanah, interaksi antar spesies, dan peran vegetasi dalam mempertahankan produktifitas pertanian dan integritas lanskap, merupakan komponen penting dari adopsi dan keberhasilan sistem agroforestri (Pauli dkk., 2012).

Terdapat dua kelompok sistem agroforestri, yaitu: sistem agroforestri sederhana dan sistem agroforestri kompleks.

1. Sistem Agroforestri Sederhana

Sistem agroforestri sederhana mengacu pada asosiasi yang melibatkan sejumlah kecil komponen yang diatur dengan jelas, biasanya pola tertata dengan baik, misalnya satu atau beberapa jenis pohon sebagai penutup dengan jarak yang sama atau pada tepi dan beberapa spesies tahunan untuk penutup tanah. Komponen pohon dapat menjadi sangat penting secara ekonomi, seperti kelapa, karet, cengkeh, jati, atau memiliki peran yang lebih berorientasi layanan seperti *Erythrina*, *Leucaena* dan *Calliandra* yang ditanam untuk pakan ternak serta untuk kesuburan tanah. Spesies semusim yang ditanam memiliki nilai ekonomi penting, seperti padi, jagung, sayuran, dan pakan ternak. Spesies bawah juga dapat semi-tahunan, seperti pisang, kakao dan kopi (Michon & de Foresta, 1999).

Karakteristik sistem agroforestri sederhana adalah sebidang tanah yang ditanami campuran antara tanaman tahunan dan tanaman semusim, misal: satu jenis pohon dan satu atau beberapa jenis tanaman semusim, pohon sebagai tanaman utama (misalnya kelapa) dengan jagung atau kacang tanah, serta kombinasi antara pohon dan semak, misalnya sebidang tanah yang ditanami kopi yang berasosiasi dengan pohon *Erythrina* atau *Gliricidia* (de Foresta dkk., 2000).

2. Sistem Agroforestri Kompleks

Sistem agroforestri kompleks didasarkan pada pohon dengan konfigurasi seperti hutan yang mengasosiasikan sejumlah besar komponen, di antaranya pohon serta pohon kecil, liana, dan herba yang memiliki fisiognomi dan fungsi sama dengan ekosistem alami. Sistem kompleks banyak ditemukan di lahan pertanian daerah tropis yang lembab (Michon & de Foresta, 1999). Karakteristik sistem agroforestri kompleks adalah mempunyai struktur vegetasi yang kompleks, jumlah komponen (pohon serta semai, semak, liana, herba) tinggi dan fungsi ekologi serupa dengan yang ada di hutan alam (siklus nutrisi, proses penyebaran dan regenerasi) (de Foresta dkk., 2000).

Kohli dkk. (2008) menyatakan bahwa agroforestri merupakan salah satu pendekatan pengelolaan lahan yang berkelanjutan, di mana pertanian dan kehutanan digabungkan ke dalam sistem produksi yang terintegrasi untuk mendapatkan manfaat

maksimal. Pengaruh positif dari interaksi antara pohon dan tanaman pada sistem agroforestri adalah:

1. Peningkatan Kesuburan Tanah

Degradasi lahan dan penurunan kesuburan tanah menjadi ancaman besar bagi produktivitas pertanian. Penggunaan pupuk sintetis untuk menambah nutrisi tanah gagal memberikan solusi yang memadai. Penggabungan pohon di lahan pertanian dapat membantu dalam menjaga ketersediaan nutrisi dan meningkatkan kesuburan tanah (Kohli dkk., 2008).

Sistem agroforestri sangat penting di daerah di mana pupuk komersial yang mahal atau tidak tersedia, karena kemampuan mereka untuk pulih, mendaur ulang, atau efisien menggunakan nutrisi. Kemampuan ini sering dikaitkan dengan mekanisme daur ulang nutrisi, terutama melalui serasah dan dekomposisi (Montagnini, 2008).

2. Menjaga Kualitas Air

Agroforestri juga dapat membantu dalam meningkatkan kualitas air dengan mengurangi tingkat polusi dan erosi tanah. Pohon meningkatkan kapasitas menahan air tanah, mengurangi penguapan tanah, meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah dan efisien menangkap air hujan dibandingkan dengan praktek pertanian tradisional (Kohli dkk., 2008).

Hasil penelitian Paudel dkk. (2011) menunjukkan bahwa aktivitas mikroba dan keanekaragaman yang ada di daerah vegetasi tahunan lebih besar dibandingkan dengan daerah baris tanaman. Praktek konservasi dapat meningkatkan parameter kualitas tanah, seperti kandungan bahan organik, agregasi dan infiltrasi air tanah, keberlanjutan dan produktivitas tanah, dan konsekuensi dari fungsi tanah dan ekosistem.

3. Pengelolaan Gulma dan Hama

Kehadiran pohon di lahan pertanian dapat mengurangi populasi gulma karena: efek bayangan pohon, tersedia sedikit ruang untuk pertumbuhan gulma, pergeseran komposisi jenis, dan kondisi lingkungan yang berubah. Pohon dapat menahan angin sehingga bertindak sebagai penghalang terhadap hama dan patogen udara, mengusir mereka, dan dengan demikian memiliki tindakan protektif. Pohon juga dapat memberikan habitat bagi musuh alami hama, sehingga memberikan nilai lebih untuk pengelolaan hama (Kohli dkk., 2008).

Keanekaragaman tumbuhan yang lebih besar dalam agroforestri diharapkan dapat meningkatkan arthropoda yang menguntungkan, walaupun keranekaragaman tidak dapat mengurangi hama dengan sendirinya. Dalam sistem agroforestri, sejumlah faktor yang

mengatur interaksi pohon, tanaman dan lingkungan, seperti keragaman jenis tumbuhan, inang berbagai hama, iklim mikro, penataan ruang dan pengelolaan pohon memodifikasi infestasi hama dengan mempengaruhi populasi herbivora dan musuh alami. Pohon juga mempengaruhi infestasi hama dengan bertindak sebagai hambatan untuk gerakan serangga, pengeluaran bau dan perlindungan herbivora dan musuh alami (Rao dkk., 2000).

4. Konservasi Keanekaragaman Hayati

Agroforestri membantu mengurangi hilangnya keanekaragaman hayati dengan menyediakan tutupan pohon pelindung di sepanjang lahan pertanian. Keberadaan pohon-pohon lebih meningkatkan keragaman dengan menyediakan tempat perlindungan dan habitat bagi keanekaragaman flora dan fauna. Hal ini dapat membantu dalam melestarikan keanekaragaman genetik dan pohon yang berada dalam bahaya kepunahan dan memerlukan konservasi (Kohli dkk., 2008).

Menurut Jose (2009), agroforestri mempunyai lima peran utama dalam melestarikan keanekaragaman hayati, yaitu:

1. Agroforestri menyediakan habitat bagi spesies yang dapat mentolerir gangguan pada tingkat tertentu
2. Agroforestri membantu melestarikan plasma nutfah spesies yang sensitif
3. Agroforestri membantu mengurangi tingkat konversi habitat alami dengan menyediakan sistem pertanian yang lebih produktif dan berkelanjutan dibandingkan sistem tradisional yang membuka habitat alami
4. Agroforestri menyediakan konektivitas dengan membentuk koridor antara habitat yang tersisa dan konservasi spesies flora dan fauna pada daerah yang sensitif
5. Agroforestri membantu melestarikan keanekaragaman hayati dengan menyediakan jasa ekosistem lainnya, seperti pengendalian erosi dan resapan air, sehingga mencegah degradasi dan hilangnya habitat sekitarnya

Jha dan Vandermeer (2010) menemukan bahwa faktor yang paling penting terhadap kelimpahan lebah pada sistem agroforestri kopi terkait dengan keragaman vegetasi dalam sistem agroforestri. Lebah soliter paling melimpah di habitat dengan tutupan tajuk tinggi, sedangkan lebah sosial paling melimpah di habitat dengan kekayaan spesies pohon yang lebih tinggi. Kelimpahan lebah yang bersarang di rongga dan kayu dipengaruhi secara positif oleh jumlah tutupan tajuk di lahan, sedangkan lebah yang bersarang di tanah paling melimpah di habitat dengan spesies pohon bunga dalam jumlah yang besar.

5. Meningkatkan Ketahanan Pangan dan Pengentasan Kemiskinan

Pohon adalah sumber dari sejumlah produk berharga yang dipasarkan. Agroforestri membantu dalam memberikan kesempatan kepada petani marjinal dan berpenghasilan rendah untuk meningkatkan kehidupan mereka dengan memasarkan produk, seperti: pangan, obat-obatan, kayu kecil, pasokan kayu dalam negeri, serat, atau bahan bakar (Kohli dkk., 2008).

Rice (2008) menyatakan bahwa di daerah yang menerapkan intensifikasi sistem agroforestri, pohon-pohon yang tersedia (termasuk tanaman kopi sendiri) dieksploitasi sebagai sumber kayu, yang merupakan hasil samping dari produksi kopi. Ketika harga kopi tinggi, petani akan menikmati pendapatan lebih besar, sehingga pendapatan petani meningkatkan.

6. Penyerapan Karbon dan Mitigasi Gas Rumah Kaca

Ilmuwan menghadapi masalah serius terhadap kehilangan stok karbon (C) di ekosistem darat dan peningkatan kadar gas rumah kaca di atmosfer. Sistem agroforestri memiliki peran yang besar dalam penyerapan C di atas tanah dan bawah tanah serta membantu dalam mengurangi efek rumah kaca dengan mengurangi emisi C (Kohli dkk., 2008).

Perbaikan tanah di bawah pohon pada sistem agroforestri sebagian besar berkaitan dengan peningkatan bahan organik, dalam bentuk serasah permukaan atau karbon tanah. Oleh karena itu, sistem agroforestri berperan dalam penyerapan karbon di atas tanah dan juga memiliki potensi besar untuk meningkatkan cadangan karbon dalam tanah (Pinho dkk., 2012).

7. Fitoremediasi dan Pembersih Lingkungan

Pohon pada sistem agroforestri dapat bermanfaat sebagai tanaman sela, tanaman tepi sungai, sabuk perlindungan, dan penahan angin yang memiliki potensi yang baik untuk membersihkan kontaminasi (Kohli dkk., 2008).

Menurut Jose (2009), praktek agroforestri memiliki banyak manfaat, seperti penahan angin dan sabuk perlindungan yang efektif melindungi bangunan dan jalan raya dari salju, menghemat produksi ternak, melindungi tanaman, menyediakan habitat satwa liar, mengikat karbon dioksida dan menghasilkan oksigen, mengurangi kecepatan angin, mengurangi polusi suara dan bau.

Pengaruh negatif dari interaksi antara pohon dan tanaman pada sistem agroforestri menurut Kohli dkk. (2008), adalah:

1. Pengaruh Naungan

Naungan pohon pada agroforestri umumnya memiliki efek negatif terhadap produktivitas tanaman budi daya, tetapi itu tergantung juga pada jenis tanah, iklim, tanaman atau jenis pohon, dan praktek pengelolaannya (Kohli dkk., 2008).

Charbonnier (2013) mengukur kompetisi terhadap cahaya, yaitu kepadatan aliran foton fotosintesis antara pohon peneduh (*Erythrina poeppigiana*) dan kopi (*Coffea arabica*), dengan menggunakan model untuk menilai heterogenitas radiasi yang diakibatkan oleh pohon peneduh serta persaingan pada tanaman kopi. Kehadiran pohon peneduh memperlambat pembukaan stomata dan proses fotosintesis, bila dibandingkan dengan perkebunan di tempat terbuka.

2. Kompetisi Sumber Daya

Persaingan untuk mendapatkan zat-zat penting yang diperlukan untuk pertumbuhan merupakan salah satu pengaruh negatif yang terjadi pada agroforestri. Pohon bersaing dengan tanaman untuk mendapatkan cahaya, sumber daya, dan air, sehingga dapat berdampak buruk pada hasil panen (Kohli dkk., 2008).

Berdasarkan penelitian Reynolds dkk. (2007), kompetisi pohon secara signifikan mengurangi radiasi fotosintesis, asimilasi bersih, pertumbuhan dan hasil tanaman dan kelembaban tanah.

3. Alelopati

Alelopati merupakan pengaruh negatif yang lain dari interaksi antara pohon dan tanaman agroforestri. Alelopati adalah senyawa kimia yang dikeluarkan oleh salah satu tanaman ke lingkungan sekitarnya dan pengaruhnya dapat menghambat atau menekan pertumbuhan tanaman lainnya (Kohli dkk., 2008).

Jose dkk. (2006) menyatakan bahwa gangguan kimia melalui alelopati memainkan peran dalam mengendalikan produktivitas beberapa perkebunan campuran. Alelokimia yang terdapat pada berbagai jenis tanaman dilepaskan ke rizosfer melalui berbagai mekanisme, yaitu: dekomposisi residu, penguapan, dan eksudasi akar. Kemampuan alelopati dalam menghambat pertumbuhan tergantung pada tingkat produksi dan waktu tinggal serta kombinasi di mana mereka dilepaskan ke ekosistem.

4. Serbuan Spesies Asing

Salah satu masalah utama terkait dengan pohon pada agroforestri adalah beberapa diantaranya memiliki kecenderungan untuk menjadi gulma dan menyerang ekosistem lainnya. Pohon tersebut ketika ditanam pada agroforestri dapat menghilangkan keuntungan ekonomi yang didapatkan, karena bersaing dengan vegetasi asli dan mengancam komunitas tanaman asli (Kohli dkk., 2008).

Conyza canadensis merupakan tanaman invasif yang mampu menyebar dan mendominasi ke daerah lain. Alelopati memainkan peran yang menentukan dalam penyebaran tumbuhan ini di daerah baru, sehingga perlu diukur produksi alelokimia dalam jaringan dan akumulasinya dalam tanah pada interval sesingkat mungkin dan menghubungkannya dengan fase perkembangan tanaman (Djurdjevic, 2012).

2.7.3 Agroekosistem

Menurut Untung (2006), agroekosistem merupakan salah satu bentuk ekosistem binaan manusia yang ditujukan untuk memperoleh produksi pertanian dengan kualitas dan kuantitas tertentu. Agroekosistem umumnya mempunyai keanekaragaman hayati yang rendah dan cenderung seragam. Agroekosistem sangat peka terhadap berbagai perubahan, baik yang terjadi di dalam maupun di luar ekosistem. Agroekosistem dalam beberapa hal berbeda dari ekosistem alami, yaitu:

1. Agroekosistem digerakkan oleh subsidi energi, air dan materi yang dimasukkan oleh manusia dari luar melalui penerapan teknologi kimiawi dan mekanik, serta pemasukan sumber-sumber gen baru.
2. Agroekosistem tidak memiliki kontinuitas temporal. Keberadaannya dalam waktu yang terbatas, dan sering mengalami perubahan iklim mikro yang mendadak sebagai akibat berbagai tindakan manusia.
3. Struktur agroekosistem didominasi oleh jenis tanaman tertentu yang dipilih dan dimasukkan oleh manusia dari luar ekosistem dengan alasan produktifitas dan harga.
4. Unsur-unsur hara tanaman dimasukkan dari luar melalui pemupukan.
5. Agroekosistem merupakan ekosistem yang sangat sederhana, diversitas rendah, sehingga tidak stabil dan lebih sering mengalami serangan hama, penyakit dan gulma.

Ada 4 sifat agroekosistem, yaitu: produktifitas, stabilitas, sustainabilitas, dan ekuitabilitas (Conway, 1986).

1. Produktivitas

Produktivitas adalah kenaikan bersih dalam produk dihargai per unit sumber daya (lahan, tenaga kerja, energi atau modal). Hal ini biasanya diukur sebagai hasil tahunan atau laba bersih per hektar atau jam manusia atau unit energi atau investasi (Conway, 1986). Zhu dkk. (2006) menjelaskan suatu konsep produktifitas pertanian yang dapat memprediksi pengaruh agroekosistem terhadap kesejahteraan manusia. Produktifitas pertanian pada skala ekosistem berhubungan dengan emergi dan eksergi yang digunakan untuk pengukuran indeks. Emergi adalah energi yang tersedia yang digunakan secara

langsung dan tidak langsung untuk membuat jasa atau produk. Emergi dapat digunakan untuk mengukur total biaya, termasuk di dalamnya modal alam dan modal sosial. Eksergi adalah sifat dari suatu sistem, yang menunjukkan pengukuran kerja maksimum yang dapat diekstrak dari suatu sistem ketika menuju ke keseimbangan termodinamik. Eksergi dapat digunakan untuk mengukur kontribusi dari seluruh komponen manusia dan habitatnya pada dimensi yang seragam, tereksresi pada material, energi, informasi, organisasi, polusi dan kerusakannya, positif atau negatif.

2. Stabilitas

Stabilitas adalah sejauh mana produktivitas tetap konstan terlepas dari normal, fluktuasi skala kecil pada variabel lingkungan, seperti iklim, atau dalam kondisi ekonomi pasar, hal ini sangat mudah diukur dengan kebalikan dari koefisien variasi dalam produktivitas (Conway, 1986). Secara umum sifat dinamis suatu sistem, seperti stabilitas dan resiliensi dapat dirangkum dalam bentuk sifat dinamis dari beberapa variabel. Sebagai contoh dalam sistem predator/prey hubungan dinamis antara spesies predator dan prey dapat di rangkum dalam bentuk perubahan populasi atau kepadatan tiap spesies sepanjang waktu. Konsekuensinya, keberlanjutan sistem predator/prey dapat digambarkan melalui ukuran stabilitas dan resiliensi populasi atau kepadatan tiap spesies sepanjang waktu (Kaine & Tozer, 2005)

3. Sustainability

Sustainability dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem untuk mempertahankan produktivitas ketika terjadi pada stres atau kekacauan. Stres didefinisikan sebagai gangguan yang rutin, kadang-kadang, terus menerus, relatif kecil dan dapat diprediksi, misalnya pengaruh salinitas tanah terhadap pertumbuhan. Kekacauan adalah gangguan yang tidak teratur, jarang, relatif besar dan tak terduga, seperti yang disebabkan oleh kekeringan, banjir atau hama baru (Conway, 1986). Belcher dkk. (2004) menyatakan bahwa sustainability agroekosistem tergantung pada terpeliharanya komponen ekonomi, biologi dan fisika yang menyusun sistem tersebut. Integrasi dari komponen-komponen tersebut mengimplikasikan bahwa evaluasi sustainability agroekosistem harus mempertimbangkan dinamika multi komponen. Sustainability agroekosistem ditentukan oleh karakteristik spesifik biofisik dari sistem yang mempengaruhi keputusan penggunaan lahan, yang pada gilirannya berpengaruh pada fungsi tanah dan pola hasil berikutnya. Dengan mengintegrasikan fungsi tanah dan keputusan ekonomi dapat mengurangi batas antara sustainability ekonomi dan lingkungan. Sustainability sistem ekonomi dan

lingkungan tergantung pada tekanan biofisik yang menentukan pilihan pengelolaan, yaitu secara teknis, agronomi dan ekonomi dapat tetap berjalan.

4. Ekuitabilitas

Pemerataan merupakan ukuran seberapa merata produktivitas agroekosistem didistribusikan di antara manusia penerima manfaat. Semakin merata sistem semakin merata produk pertanian, makanan atau pendapatan atau sumber daya dibagi di antara populasi pertanian, desa, wilayah atau bangsa (Conway, 1986). Wirsenius dkk. (2010) menjelaskan bahwa pertumbuhan populasi dan pendapatan per kapita secara global mengimplikasikan peningkatan kebutuhan makanan dan tekanan untuk membuka lahan pertanian baru. Ekspansi pertanian ke ekosistem alami berpengaruh terhadap keanekaragaman hayati dan menyebabkan peningkatan emisi karbon dioksida. Perhatian diberikan kepada peningkatan ketersediaan pangan, dan membatasi ekspansi pertanian, melalui peningkatan hasil yang lebih tinggi pada lahan pertanian. Prospek diberikan untuk perbaikan efisiensi dalam perubahan seluruh rantai makanan dan perubahan makanan terhadap kebutuhan makanan yang belum dieksplorasi secara luas.

Menurut Pretty (2008), ada beberapa bentuk konservasi sumber daya yang dapat dilakukan dalam pengelolaan agroekosistem, yaitu:

1. Pengelolaan hama terpadu, menggunakan kelentingan ekosistem dan keragaman pengendalian hama, penyakit dan gulma, dan pestisida hanya digunakan pada saat pilihan yang lain tidak efektif.
2. Pengelolaan hara terpadu, bertujuan menyeimbangkan kebutuhan nitrogen dalam sistem pertanian dengan menambahkan sumber hara anorganik dan organik, dan mengurangi kehilangan unsur hara melalui pengendalian erosi.
3. Konservasi pengolahan tanah, mengurangi jumlah pengolahan tanah, sehingga tanah dapat dikonservasi dan tersedia kelembaban sehingga digunakan lebih efisien.
4. Agroforestri, menggabungkan multifungsi pohon ke dalam sistem pertanian dan pengelolaan kolektif dengan sumber daya hutan di dekatnya.
5. Budidaya Perikanan, yang mencakup ikan, udang dan sumber daya air lain ke dalam sistem pertanian, seperti ke sawah dan kolam ikan, sehingga menyebabkan peningkatan produksi protein.
6. Pemanenan air di kawasan kering, lahan yang sebelumnya ditinggalkan dan terdegradasi dapat dibudidayakan, dan tanaman tambahan dapat tumbuh di lahan kecil irigasi karena retensi air hujan yang lebih baik dan air meningkatkan produktivitas tanaman.

7. Integrasi ternak ke dalam sistem pertanian, seperti sapi perah, babi dan unggas, menggunakan sistem bukan penggembalaan dan sistem pindah.

Zhu dkk., (2012) menyatakan bahwa pengelolaan agroekosistem terpadu dapat dilakukan dengan menggabungkan pengelolaan mikroskopis dan makroskopis ke dalam satu bentuk pengelolaan, yaitu:

1. Pengelolaan Mikroskopik

Berdasarkan teori agroekologi, perilaku optimal agroekosistem tergantung pada tingkat interaksi antara berbagai komponen biotik dan abiotik sumber daya alam, seperti: matahari, udara, air, tanah, siklus energi dan materi mengalir dalam suatu agroekosistem. Beberapa teknis pengelolaan mikroskopik yang dapat dilakukan adalah:

a. Pengelolaan Hara Tanaman Terpadu

Pengelolaan Hara Tanaman Terpadu adalah sistem yang digunakan oleh petani untuk mengelola jumlah, sumber, penempatan, bentuk, dan waktu aplikasi unsur hara (baik berupa pupuk kandang, pupuk komersial, atau bentuk lainnya). Tujuannya adalah menyediakan unsur hara tanaman untuk pertumbuhan optimal dan produksi tanaman, meminimalkan sumber pencemaran, kontaminasi air tanah, dan mempertahankan dan/atau meningkatkan kondisi tanah.

b. Pengelolaan Tanah Terpadu

Kualitas tanah adalah faktor penting dalam pengelolaan sumber daya alam. Tanah memberikan media bagi tanaman untuk tumbuh, menyerap, menyaring, dan perlahan-lahan melepaskan air, mendaur ulang nutrisi dan limbah organik, dan menyimpan dan melepaskan gas rumah kaca. Pengelolaan Tanah Terpadu dapat dilakukan dengan cara: mengurangi pengolahan tanah, mulsa tanah sepanjang tahun, menambahkan bahan organik ke tanah lempung, menghindari budidaya pada tanah liat saat basah, membuat bedengan, meningkatkan kontribusi nitrogen dari kacang-kacangan dan menggunakan pupuk kandang atau penutup tanaman.

c. Pengelolaan Air Terpadu

Kurangnya sumber daya air, bencana banjir dan pencemaran air meningkat sejalan dengan perkembangan pertanian. Solusi untuk mengatasi ini adalah melestarikan sumber daya air yang ada dengan lebih efisien dalam penggunaan air dan mencegah pencemaran air. Teknologi pengelolaan sumber daya air yang ada, seperti irigasi tetes, mulsa, mengurangi pengolahan tanah, penahan angin, manajemen naungan dan pemanenan air, memiliki potensi untuk meningkatkan hasil tanaman pada tadah hujan.

d. Pengelolaan Hama Terpadu

Hama pertanian (berupa: gulma, jamur, vertebrata) sudah lama menjadi kendala utama dalam pengembangan dan perluasan lahan pertanian. Pengelolaan Hama Terpadu menggunakan pendekatan komprehensif dalam pengendalian hama, yaitu memantau hama dan mengontrol untuk mengurangi dampak ekonomi dari serangan hama agar kualitas lingkungan tetap terjaga. PHT merupakan pendekatan ekologi dengan tujuan utama mengurangi atau menghilangkan penggunaan pestisida pada saat yang sama mengelola populasi hama pada tingkat yang dapat diterima.

2. Pengelolaan Makroskopik

Pengelolaan agroekosistem tidak hanya berhubungan dengan praktek biotik dan abiotik, tetapi juga disebabkan oleh kekuatan pendorong ekonomi, kekuatan pendorong sistemik, kekuatan pendorong sosial, penggerak kekuatan pendorong budaya, berorientasi pada kebijakan, dan menghubungkan produsen dan konsumen. Dengan demikian, sebuah strategi pengelolaan agroekosistem yang baik dapat mencapai tujuan melalui pelaksanaan mekanisme berikut:

a. Mekanisme Pengambilan Keputusan

Pengelolaan agroekosistem berkelanjutan berorientasi pada kebijakan, formula standar pengendalian pemerintah, dan hukum. Pemerintah harus memainkan peran hakim di daerah produksi, pengembangan aturan manajemen pengelolaan agroekosistem dan bertindak sebagai fasilitator. Pengawasan pemerintah dan hukum yang relevan adalah jaminan untuk melaksanakan pengelolaan agroekosistem yang sehat.

b. Mekanisme Hukum

Mekanisme hukum sangat diperlukan untuk mencapai tujuan pengelolaan yang berkelanjutan. Hukum harus meletakkan dasar untuk membangun proses pengambilan keputusan pengelolaan agroekosistem.

c. Mekanisme Partisipatif

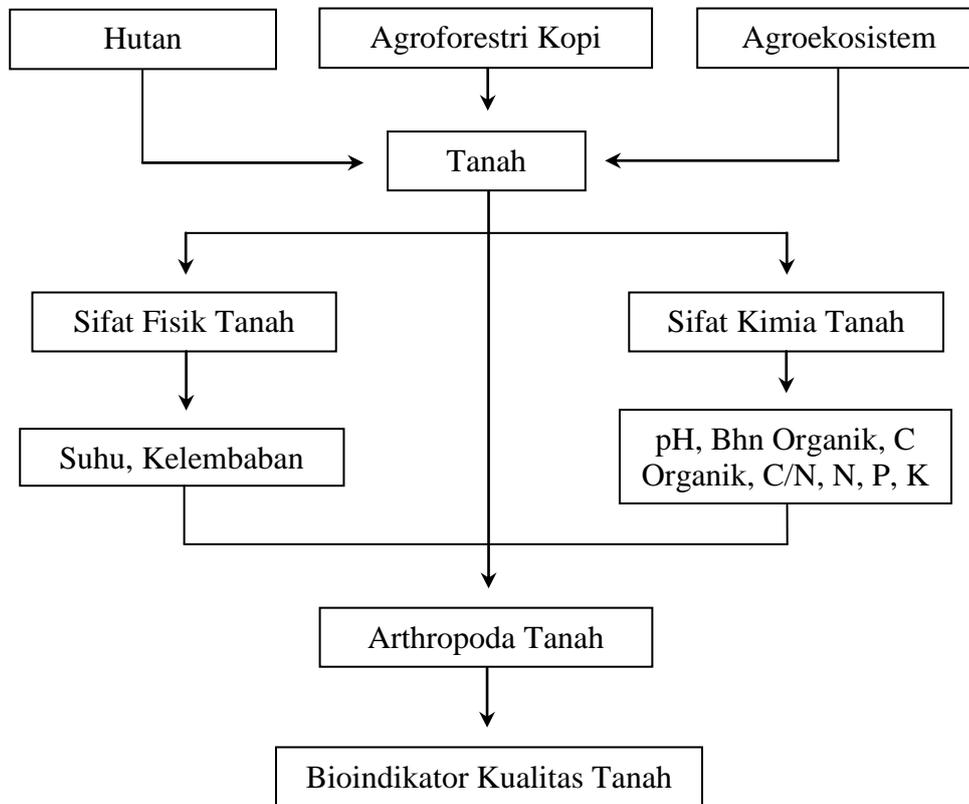
Pengelolaan agroekosistem harus memperkuat kerjasama dari semua kekuatan dalam pengembangan keputusan pengelolaan agroekosistem, meningkatkan kesadaran ekologis dan lingkungan dari konsumen dan produsen, memperkuat penelitian kapasitas teknologi dan membuat fungsi pengawasan publik lebih baik.

d. Mekanisme Ekologi

Pengelolaan agroekosistem bertujuan untuk mengkoordinasikan stabilitas produksi dan keberlanjutan lingkungan. Berdasarkan pemahaman yang baik dari proses ekologi produksi pertanian, mengambil penuh manfaat sifat mekanisme keadaan mantap

(Homeostasis), kekuatan sosial manusia yang komprehensif (pengetahuan multidisiplin), diperlukan untuk membangun mekanisme ekologi yang efektif.

2.8 Kerangka Konsep Penelitian



Gambar 1. Kerangka konsep penelitian

Hutan merupakan suatu ekosistem yang kompleks, terjadi hubungan yang erat antara tumbuh-tumbuhan pembentuk hutan dengan hewan dan lingkungannya. Hutan adalah salah satu contoh ekosistem alami, yaitu ekosistem yang pembentukan dan perkembangannya berlangsung secara alami tanpa campur tangan manusia. Ekosistem yang pengelolaannya dilakukan oleh manusia disebut ekosistem binaan. Agroforestri Kopi dan Agroekosistem adalah contoh dari ekosistem binaan manusia.

Agroforestri Kopi memadukan tanaman kopi dengan pohon kayu-kayuan, sehingga Agroforestri Kopi memiliki keanekaragamannya lebih tinggi dibandingkan dengan Agroekosistem. Agroforestri Kopi dapat membantu menyediakan nutrisi bagi tanaman yang dibudidayakan, sedangkan di Agroekosistem hal itu hanya dapat dipenuhi melalui proses pemupukan. Sistem pengelolaan lahan, terutama pemberian pupuk akan

berpengaruh terhadap kualitas tanah. Kualitas tanah dapat dilihat dari sifat fisik tanah (suhu dan kelembaban tanah), sifat kimia tanah (pH, bahan organik, C organik, C/N, N, P dan K) dan biologi tanah (Arthropoda tanah).

Arthropoda tanah adalah hewan yang hidup di tanah. Arthropoda tanah sensitif terhadap perubahan yang terjadi terhadap sifat fisik dan kimia tanah. Arthropoda tanah berpotensi sebagai bioindikator kualitas tanah di Agroforestri Kopi, karena memiliki kekayaan dan keanekaragaman spesies yang tinggi, mudah ditangkap, mempunyai peran penting di ekosistem, sensitif terhadap sedikit perubahan lingkungan dan mempunyai respon yang baik terhadap perubahan lingkungan.