

© 2004 Sarifuddin
Makalah Pribadi Falsafah Sains (PPS 702)
Sekolah Pasca Sarjana / S3
Institut Pertanian Bogor
Desember 2004

Posted: 14 December, 2004

Dosen:
Prof Dr Ir Rudy C Tarumingkeng, M F (Penanggung Jawab)
Prof. Dr. Ir. Zahrial Coto, M.Sc
Dr. Ir. Hardjanto, M.S

MIKROBIA SEBAGAI INDIKATOR KESEHATAN TANAH

Oleh:

Sarifuddin
A 261030011
sarif2000@yahoo.com

RINGKASAN

Kesehatan tanah didefinisikan sebagai kapasitas secara berlanjut dari suatu tanah untuk berfungsi sebagai suatu sistem hidup yang vital dalam ekosistem dan batas-batas tataguna untuk menopang produktivitas biologi, menaikkan kualitas lingkungan udara dan air dan menjaga kesehatan tanaman, hewan dan manusia

suatu indikator biologi dari ekologi tanah yang sehat harus mencerminkan struktur dan atau fungsi proses ekologi dan respon terhadap perubahan kondisi tanah yang dihasilkan oleh praktek pengelolaan lahan dan dapat digunakan untuk menilai status saat ini dari proses ekologi dalam tanah yang penting dan perubahan prosesnya pada suatu rentang waktu.

Organisme tanah cukup baik sebagai bioindikator tanah karena memiliki respon yang sensitip terhadap praktek pengelolaan lahan dan iklim, berkorelasi baik terhadap sifat tanah yang menguntungkan dan fungsi ekologis dapat menggambarkan rantai sebab-akibat yang menghubungkan keputusan pengelolaan lahan terhadap produktivitas akhir dan kesehatan tanaman dan hewan. Tetapi pengukuran organisme tanah memerlukan banyak kriteria supaya dapat digunakan sepenuhnya sebagai indikator pengelolaan lahan yang sesuai, termasuk kelimpahannya, keragaman, struktur jaringan dan stabilitas komunitas.

Sifat mikrobial sebagai bioindikator dapat diukur melalui aktivitas dari keseluruhan populasi mikrobial, seperti respirasi, mineralisasi N dan aktivitas enzim tanah dan melalui ukuran populasi mikrobial pada level organisme tunggal, level kelompok dan level komunitas

Bakteri, fungi dan algae merupakan mikroflora tanah yang berpotensi sebagai indikator penting untuk kualitas dan kesehatan tanah karena mereka berperan penting dalam fungsi ekosistem dan salah satu penanda (marker) biologi yang sangat berguna dan sensitif dalam menilai gangguan dan kerusakan dalam ekosistem. Protozoa, nematoda, collembola berukuran kecil serta *mite* adalah mikrofauna tanah yang memiliki keuntungan sebagai bioindikator tanah karena mampu membentuk jaringan makanan antara dekomposer mikroflora dan fauna yang lebih besar, agen utama pembebasan hara yang diimmobilisasi oleh mikroflora tanah, terlibat dalam proses dekomposisi/turnover bahan organik, mineralisasi hara dan pengaturan kerapatan populasi mikroflora. Nematoda adalah mikrofauna yang sangat sering digunakan sebagai indikator biologis, karena informasi taksonomi dan peranan makanannya cukup tersedia dan menempati posisi sentral pada jaringan makanan serasah

Pengelolaan untuk memperbaiki kesehatan tanah prinsipnya adalah bagaimana mengurangi stress tanaman dan meningkatkan daya tahan tanah terhadap berbagai organisme musuh tanaman dan bahan yang bersifat meracun. Diperlukan pendekatan menyeluruh dan terpadu serta komitmen jangka panjang dan tidak terfokus hanya pada suatu strategi tetapi diperlukan tindakan kombinasi dengan menggunakan kombinasi berbagai sifat biologi, kimia dan fisika. Dan seringkali tanpa disadari, suatu kegiatan yang dilakukan untuk memperbaiki tanah sebenarnya berpengaruh ganda terhadap ekosistem pertanian

PENDAHULUAN

Tanah adalah benda alami heterogen yang terdiri atas komponen-komponen padat, cair dan gas serta mempunyai sifat dan perilaku yang dinamik (Arsyad, 2000). Pada komponen tersebut selain terdiri dari komponen mati (abiotik) terdapat juga bagian yang hidup (biotik) berupa organisme tanah yang menjalin suatu sistem hubungan timbal balik antar berbagai komponen sebagai suatu ekosistem yang cukup kompleks. Hubungan antara beberapa sifat tanah abiotik dan fungsi ekosistem dapat dijadikan sebagai fungsi yang berhubungan langsung terhadap produksi tanaman dan erosi tanah. Oleh karenanya praktek pengelolaan tanah untuk abad 21 mendatang harus diformulasikan berdasarkan suatu pemahaman dari konsep ekosistem (Herrick (2000).

Istilah kesehatan tanah atau kualitas tanah yang diaplikasikan pada agroekosistem menunjuk kepada kemampuan tanah untuk mendukung secara terus-

menerus pertumbuhan tanaman pada kualitas lingkungan yang terjaga (Magdoff, 2001).

Menurut The Soil Science Society of Amerika, yang dimaksud dengan Kualitas Tanah (*soil quality*) adalah kapasitas dari suatu jenis tanah yang spesifik untuk berfungsi di alam atau dalam batas ekosisten terkelola, untuk mendukung produktivitas biologi, memelihara kualitas lingkungan dan mendorong kesehatan hewan dan tumbuhan (Herrick, 2000).

Jhonson *et. al.* (1997 dalam Doran dan Zeiss, 2000) mendefinisikan kualitas tanah sebagai suatu ukuran kondisi relatif tanah untuk kebutuhan satu atau lebih spesies biologi dan atau untuk suatu tujuan manusia.

Untuk aplikasi di bidang pertanian, yang dimaksud dengan kualitas tanah adalah kemampuan tanah untuk berfungsi dalam batas-batas ekosistem yang sesuai untuk produktivitas biologis, mampu memelihara kualitas lingkungan dan mendorong tanaman dan hewan menjadi sehat (Magdoff, 2001).

Secara lebih terinci, Doran dan Safley (1997) mendefinisikan kualitas tanah sebagai kecocokan sifat fisik, kimia dan biologi yang bersama-sama (1) menyediakan suatu medium untuk pertumbuhan tanaman dan aktivitas biologi, (2) mengatur dan memilah aliran air dan penyimpanan di lingkungan serta (3) berperan sebagai suatu penyangga lingkungan dalam pembentukan dan pengrusakan senyawa-senyawa yang meracuni lingkungan.

Tanah disebut berkualitas tinggi bila memiliki sifat-sifat sebagai berikut: (1) cukup tapi tidak berlebih dalam mensuplai hara (2) memiliki struktur yang baik (3) memiliki kedalaman lapisan yang cukup untuk perakaran dan drainase (4) memiliki drainase internal yang baik (5) populasi penyakit dan parasit rendah (6) populasi organisme yang mendorong pertumbuhan tinggi (7) Tekanan tanaman pengganggu (*gulma*) rendah (8) tidak mengandung senyawa kimia yang beracun untuk tanaman (9) tahan terhadap kerusakan dan (10) elastis dalam mengikuti suatu proses degradasi (Magdof, 2001).

Selain istilah kualitas tanah, dikenal juga istilah kesehatan tanah. Terdapat berbagai definisi tentang kesehatan tanah, bahkan sering dicampur-adukkan dengan kualitas tanah. Menurut Elliott (1997) sehat berarti bebas dari penyakit dan mampu berfungsi secara normal. Jadi Tanah yang sehat (*healthy soil*) adalah tanah yang

mampu memberikan daya guna (performance) dan fungsi intrinsik dan ekstrinsik (Madoff, 2001).

Kesehatan tanah didefinisikan sebagai kapasitas secara berlanjut dari suatu tanah untuk berfungsi sebagai suatu sistem hidup yang vital dalam ekosistem dan batas-batas tataguna untuk menopang produktivitas biologi, menaikkan kualitas lingkungan udara dan air dan menjaga kesehatan tanaman, hewan dan manusia (White dan Maccaughton, 1997).

Ciri-ciri tanah yang sehat adalah : (1) populasi organismenya beragam dan aktif (2) memiliki dalam jumlah tinggi residu yang relatif segar sebagai sumber makanan organisme. dan (3) memiliki dalam jumlah tinggi bahan organik yang terhumifikasi untuk mengikat air dan muatan negatif untuk pertukaran kation (Magdoff, 2001).

Aspek lain dari tanah yang sehat adalah kondisi fisiknya yaitu tingkat kepadatan, jumlah air tersimpan dan drainase. Kondisi fisik tanah terutama mempengaruhi bahan organik karena polisakarida dan poliuronida selama proses dekomposisi mendorong pembentukan agregat tanah. Disamping itu sekresi dari fungi mikoriza juga penting dalam mendorong agregasi tanah (Magdoff, 2001). Jumlah hara tersedia, pH, kandungan garam dan lain lain juga penting dalam menentukan tanah yang sehat. Tanaman dapat tertekan pertumbuhannya akibat rendahnya jumlah hara, tingginya senyawa yang bersifat meracun seperti Al atau tingginya konsentrasi garam (Magdoff, 2001). Kesemua aspek biologi, kimia dan fisika saling berinteraksi dan memberikan pengaruh satu dengan lainnya.

Tampaknya cukup banyak pengertian tentang kualitas tanah dan kesehatan tanah, namun istilah kualitas tanah umumnya akan diasosiasikan dengan tanah sebagai suatu kecocokan untuk suatu penggunaan yang spesifik, sedang kesehatan tanah digunakan secara lebih luas untuk menunjukkan kapasitas tanah terhadap fungsinya sebagai sistem hidup yang vital untuk produktivitas biologi secara terus menerus, mendorong kualitas lingkungan dan memelihara kesehatan tanaman dan hewan. Dalam pengertian tersebut kesehatan tanah sinonim dengan kesesuaian (sustainability). Menurut Wander dan Drinkwater (2000) kualitas tanah bukan suatu teknologi yang dapat dibeli tetapi suatu konsep yang dapat digunakan untuk membuat keputusan dalam pengelolaan lahan.

Kerusakan tanah dapat terjadi oleh (1) kehilangan unsur hara dan bahan organik dari daerah perakaran, (2) terkumpulnya garam di daerah perakaran, terkumpul

atau terungkapnya unsur atau senyawa yang meracun bagi tanaman dan (3) penjenjutan tanah oleh air dan (4) erosi (Arsyad, 2000) dan manusia berperan dalam menurunkan mutu lahan seluas hampir 40 % dari lahan pertanian di dunia melalui erosi tanah, polusi atmosfer, pengolahan tanah intensif, pengembalaan ternak yang berlebihan (*over grazing*), pembukaan lahan, salinisasi dan penggurunan (Oldeman, 1994 *dalam* Doran dan Zeiss, 2000). Dan saat ini penambahan lahan untuk meningkatkan produksi umumnya adalah pada lahan dengan kualitas yang lebih rendah dan dengan resiko untuk terdegradasi yang lebih besar dibandingkan dengan lahan yang saat ini digunakan (Sherwood dan Uphoff, 2000).

Untuk mengekspresikan kualitas tanah, berbagai indikator yang berbeda telah digunakan baik parameter yang bersifat statis seperti kerapatan ruang (*bulk density*), porositas dan kandungan bahan organik, ataupun yang bersifat dinamis menggunakan model simulasi. Kerapatan ruang atau porositas bukan kriteria yang dapat dipercaya untuk membedakan pengaruh penggunaan lahan yang berbeda dalam jangka panjang, tetapi bahan organik tanah merupakan parameter yang relatif stabil yang menggambarkan pengaruh pengelolaan dan tipe tanaman pada periode yang cukup lama dan ini secara esensial penting untuk kualitas tanah (Pulleman *et. al.*, 2000).

Penilaian kualitas dan kesehatan tanah melalui pengukuran sifat fisik dan kimia seperti kelembaban tanah, kemantapan agregat, kepadatan tanah, jumlah air tersimpan, hara tersedia, sifat meracun AI dan lain sebagainya tersebut seringkali memiliki kelemahan-kelemahan antara lain karena diukur oleh peralatan dan ekstraktan kimia yang diasumsikan memiliki kemampuan kerja yang hampir sama dengan kemampuan kerja akar tanaman atau organisme lain dan hanya menggambarkan kondisi pada saat tersebut. Oleh sebab itu pemanfaatan mikrobial sebagai indikator atau alat ukur kondisi tanah sudah seharusnya dikembangkan sebagai salah satu pilihan. Sebagaimana dikatakan Jaenicke (1998 *dalam* Herrick, 2000) bahwa terdapat hubungan sebab akibat antara kualitas tanah dan fungsi ekosistem. Dan kebanyakan indikator kualitas tanah yang ada saat ini memiliki kemampuan yang terbatas dalam menduga respon tanah terhadap suatu gangguan.

Neher (2001) berpendapat bahwa indikator biologi dari ekologi tanah yang sehat harus dapat digunakan untuk menilai status saat ini dari proses ekologi dalam tanah yang penting dan perubahan prosesnya pada suatu rentang waktu. Suatu indikator harus mencerminkan struktur dan atau fungsi proses ekologi dan respon terhadap

perubahan dalam kondisi tanah yang dihasilkan oleh praktek pengelolaan lahan. Untuk itu diperlukan pengetahuan taksonomi yang cukup untuk mengidentifikasi secara akurat dan efisien. Komunitas mikrobial selain berperan penting dalam proses-proses ekologi seperti siklus hara juga respon terhadap gangguan pada lingkungan tanah seperti kontaminasi terhadap logam berat dan pestisida.

Singkatnya, sistem biologi sangat sensitif terhadap degradasi yang baru terjadi sekalipun, sehingga perubahan status biologi dari sistem tersebut dapat menjadi peringatan dini atas kemunduran lingkungan dan mendorong kita untuk bereaksi sebelum kerusakan yang tidak dapat dipulihkan terjadi (Pankhurst dan Doube, 1997).

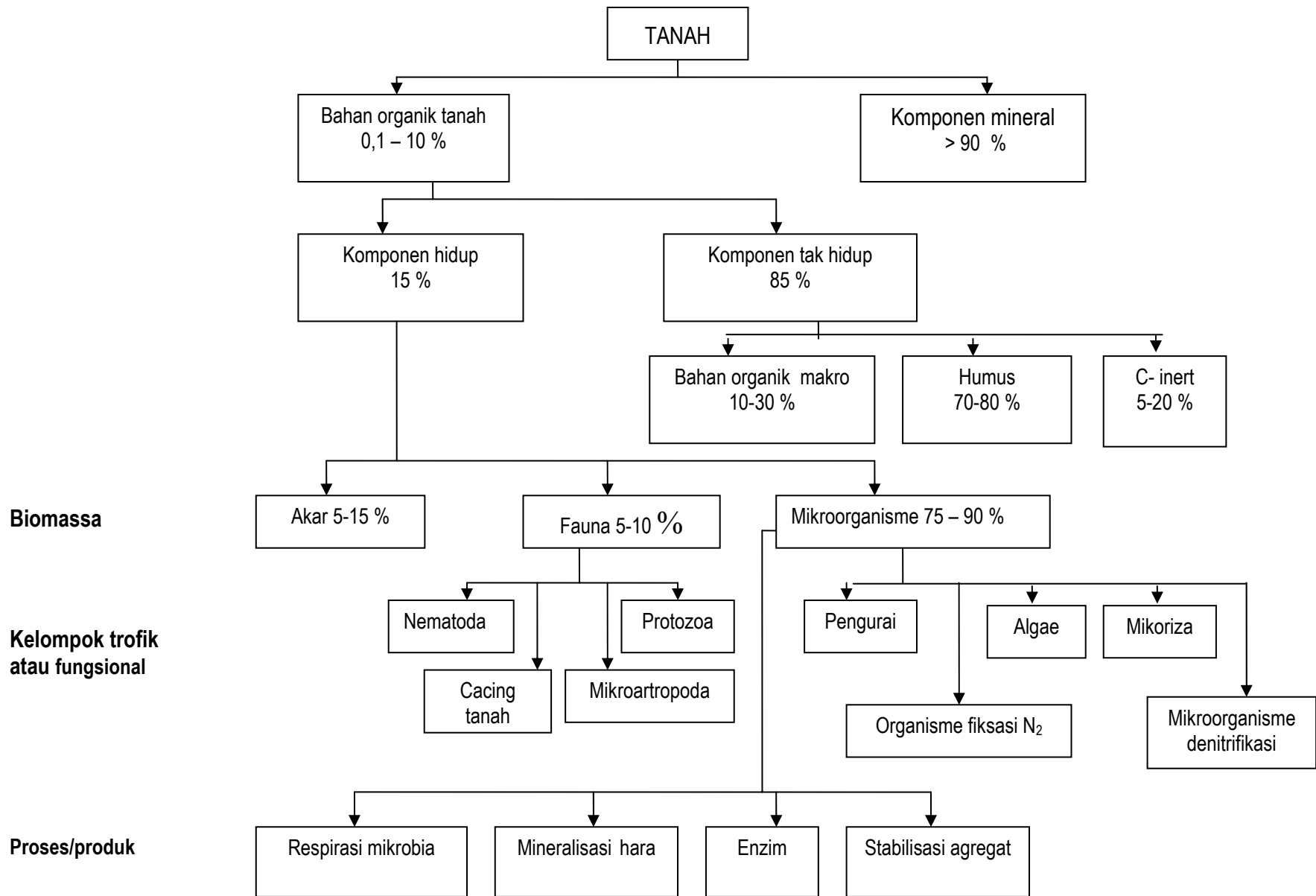
Gambaran komposisi suatu tipikal tanah subur dalam hubungan dengan biotanya, kelompok fungsional mikroorganisme dan proses/produk yang dihasilkan mikroorganisme disajikan pada Gambar 1.

SYARAT SEBAGAI ORGANISME INDIKATOR KESEHATAN TANAH

Bioindikasi didefinisikan sebagai penggunaan suatu organisme baik sebagai bagian dari suatu individu atau suatu kelompok organisme untuk mendapatkan informasi terhadap kualitas seluruh atau sebagian dari lingkungannya. Dan bioindikator adalah organisme yang memberikan informasi tersebut (Hornby dan Bateman, 1997)

Selama satu abad terakhir ini para peneliti telah berkonsentrasi pada faktor kimia dan fisika dengan mengabaikan faktor yang bertautan dengan faktor biologi. Konsekuensinya terdapat pemahaman yang relatif terbatas tentang bagaimana cara terbaik untuk kapitalisasi terhadap dinamika dan potensi biologi tanah seperti meningkatkan kapasitas regenerasi sistem tanah untuk pertanian. (Sherwood dan Uphoff, 2000).

Banyak peneliti telah mengembangkan indikator kesehatan tanah dengan mengukur berbagai sifat tanah dan menghubungkannya dengan praktek pengelolaan yang berbeda, produktivitas, kualitas lingkungan atau tingkat serangan penyakit tanaman. Doran *et. al.* (1996) menyajikan daftar sifat-sifat tanah yang dapat mempengaruhi kualitas dan fungsi ekologi tanah. Misalnya kerapatan ruang (bulk density), infiltrasi dan kapasitas memegang air, C organik dan N total, daya hantar listrik, pH, hara tersedia, dan pengukuran aktivitas dan biomassa mikrobial. (van Bruggen dan Semenov, 2000). Walaupun sifat-sifat tersebut berguna sebagai indikator



Gambar1. Komposisi suatu tipikal tanah subur dalam hubungan dengan biotanya, kelompok fungsional mikroorganisme dan proses/produk yang dihasilkan mikroorganisme. Theng *et. al.* 1989 dalam Pankhurst *et. al.* 1997) Angka dalam % berat kering

untuk kualitas tanah, tetapi tidak diasosiasikan secara penting dengan kesehatan tanah dan pemeliharaan fungsi ekologi tanah esensial.

Pendekatan umum untuk mengukur sebanyak mungkin variabel dan menghubungkannya dengan penggunaan yang berbeda (alamiah vs tanah pertanian) atau praktek pengelolaan tanah (konvensional vs alternatif untuk pengolahan, nutrisi tanaman atau pengelolaan hama) tidak menghasilkan indikator yang berkorelasi konsisten dalam hubungan dengan kesehatan tanah. Alasan inkonsistensi adalah sensitivitas pengukuran tersebut terhadap waktu pengambilan sampel dalam hubungannya terhadap pengelolaan yang berbeda atau lingkungan yang sama (pengolahan, irigasi, pemasukan residu, pupuk, curah hujan dll).

Suatu pendekatan yang berbeda telah dilakukan untuk mencari organisme indikator yang diasosiasikan dengan kesehatan atau kerusakan tanah. Spesies dasar atau kelompok taksonomi yang lebih tinggi dapat berfungsi sebagai indikator untuk kesehatan tanah karena mengontrol interaksi antar spesies lain dalam suatu ekosistem. Contohnya spesies *springtail* diidentifikasi sebagai spesies dasar pada tanah hutan oak karena kemampuannya mendorong detoksifikasi senyawa phenolik dan meningkatkan aktivitas mikrobial dan siklus hara. Organisme yang sensitif terhadap pengaruh antropogenik dan hanya mampu berkembang pada kondisi lingkungan dengan kisaran sempit juga dapat digunakan sebagai spesies indikator. Contohnya rhizobium dan bakteri nitrifikasi dapat digunakan sebagai indikator karena sensitivitasnya terhadap bahan kimia untuk pertanian (agrochemical). Kelompok fauna tanah seperti cacing tanah dan nematoda, collembola atau mite-predator dapat menjadi indikator potensial untuk kesehatan tanah. Alga tanah, bakteri-feeding nematoda *predacious* atau fungi basidiomycetes dapat berfungsi sebagai indikator polusi industri dalam tanah.

Disarankan untuk mengaplikasikan faktor stres seperti kekeringan, pembasahan kembali, kerusakan mekanis, kelebihan hara atau polutan atau membanjirinya dengan mikroorganisme terhadap sampel tanah yang berbeda dalam sejarah pengelolaannya dan kemudian memonitor amplitudo perubahan populasi mikrobial dan waktu yang diperlukan untuk mengembalikan kepada kondisi dinamik yang tetap sebagaimana kondisi sebelum diberi perlakuan stres. Satu hal yang perlu dipertimbangkan untuk pendekatan ini, karena kecenderungan populasi mikrobial dapat menjadi salah atau

salah interpretasi jika pengumpulan data tidak terlalu sering, terutama jika pada fluktuasi yang dihasilkan dari suatu gangguan (pedoturbasi). Alternatifnya batas minimal peningkatan level stres dapat ditentukan hingga ekosistem tanah tidak akan memantul dalam waktu yang rasional (beberapa minggu).

Pengaruh peningkatan konsentrasi logam berat atau hidrokarbon pada komunitas fungi telah dipelajari oleh Guzev dan Levin (1995), tetapi pengamatan hanya dalam beberapa hari setelah perlakuan dan dapat diamati daerah respon yang berbeda yaitu homeostatis, stress, resisten dan daerah represi yang berhubungan dengan kisaran konsentrasi polutan. Respon komunitas mikrobia terhadap stress dapat diukur dengan variasi teknik mikrobiologi. Pengukuran mikrobia yang paling umum secara tradisional seperti aktivitas mikrobia dan pernafasan biomassa atau ekstraksi-fumigasi atau profil metabolik tidak termasuk kelompok mikrobia penting seperti oligotrof. Metoda tersebut memiliki banyak keterbatasan sebagai indikator untuk respon terhadap stres karena transisi dari kondisi eutropik ke oligotropik merupakan sifat penting untuk kesehatan tanah. (van Bruggen dan Semenov, 2000).

Pengukuran organisme tanah memerlukan banyak kriteria supaya dapat digunakan sepenuhnya sebagai indikator pengelolaan lahan yang sesuai, termasuk kelimpahannya, keragaman, struktur jaringan dan stabilitas komunitas harus menjadi perhatian.

Organisme tanah cukup baik sebagai bioindikator tanah karena memiliki respon yang sensitip terhadap praktek pengelolaan lahan dan iklim, berkorelasi baik terhadap sifat tanah yang menguntungkan dan fungsi ekologis seperti penyimpanan air, dekomposisi dan siklus hara, netralisasi bahan beracun dan penekanan organisme patogen dan berbahaya. Organisme tanah juga dapat menggambarkan rantai sebab-akibat yang menghubungkan keputusan pengelolaan lahan terhadap produktivitas akhir dan kesehatan tanaman dan hewan (Doran dan Zeiss, 2000).

Menurut Doran dan Zeiss (2000) ada 5 kriteria yang harus dipenuhi oleh suatu indikator termasuk bioindikator untuk dapat menilai kualitas tanah dan kesehatan tanah yaitu :

(1) Sensitivitas terhadap variasi dalam pengelolaan.

Organisme tanah memenuhi kriteria ini karena mereka memiliki respon yang sensitip terhadap gangguan antropogenik.

(2) Berkorelasi baik dengan fungsi tanah yang menguntungkan.

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 untuk fungsi tanah.

(3) Dapat digunakan dalam menguraikan proses-proses ekosistem.

Indikator seharusnya dapat menguraikan 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 diukur dan tidak mahal.

Umumnya kuantifikasi organisme tanah tidak terlalu mahal dan tidak membutuhkan banyak peralatan yang khusus.

Yang perlu diingat adalah bahwa kualitas tanah meliputi komponen inheren, ditentukan oleh sifat fisika dan kimia tanah dalam keterkaitan dengan iklim dan ekosistem. Kualitas tanah termasuk suatu komponen yang juga dipengaruhi oleh pengelolaan dan keputusan penggunaan lahan (Doran dan Zeiss, 2000).

Kapasitas suatu tanah untuk terus mendukung potensi penggunaan yang sama dimasa depan, tergantung pada ketahanan (resistance) terhadap degradasi dan kekenyalan (resilience) yaitu potensinya untuk pulih dari suatu degradasi. Ketahanan didefinisikan sebagai kapasitas suatu sistem untuk melanjutkan fungsinya tanpa mengalami perubahan yang muncul sebagai suatu gangguan. Resisten dapat dianggap sebagai sifat tanah tetapi kekenyalan (resilience) lebih sering dianggap sebagai fungsi suatu proses termasuk proses yang tidak dapat diukur hingga terjadinya suatu kerusakan seperti dekomposisi, mineralisasi, pembentukan pori makro dll. (Herrick, 2000). Sebagai contoh, proses pemulihan pemadatan tanah dihubungkan dengan kerapatan cacing tanah dan komposisi spesiesnya.

Bakteri pembentuk bintil akar juga dapat digunakan sebagai indikator kesehatan tanah dengan dasar bahwa pembentukan bintil akar aktif, membutuhkan jenis dan jumlah hara tertentu pada lingkungan tertentu untuk dapat terjadinya fiksasi N₂ disamping untuk proses metabolisme dan kelangsungan hidup saprofit tanah dan hubungan simbiosisnya dengan tanaman legum. Rendahnya jumlah hara dapat membatasi bakteri bintil akar atau terdapat jumlah hara yang cukup tetapi suplai hara ke rhizobia terbatas akibat pengaruh faktor lingkungan lain (pH, hara lain, aerasi, bahan organik) terhadap ketersediaan hara, atau karena menurunnya kelarutan, perubahan bentuk senyawa kimia, interaksi antar hara atau terikat dengan senyawa khelat akan menyebabkan strain bakteri bintil akar terbatas kemampuannya untuk mendapatkan makanan (O'Hara, 2001).

BEBERAPA ORGANISME BIOINDIKATOR TANAH

Bioindikator tanah adalah sifat-sifat atau proses biologis dalam komponen tanah dari suatu ekosistem yang menggambarkan beberapa kondisi ekosistem sebagai suatu sebab tertentu. (Elliott, 1997). Oleh karena itu mengukur kesehatan tanah secara langsung tidaklah mungkin, karena harus ditentukan terlebih dahulu melalui suatu percobaan berupa perubahan suatu sistem yang sehat lalu menentukan bagaimana perubahan dari ukuran yang terjadi lalu diekstrapolasi untuk mengetahui sistem yang tidak berfungsi tersebut.

Fungsi mikrobiologi kemungkinan lebih mudah diinterpretasi sebagai bioindikator kesehatan tanah karena proses yang diukur berpengaruh langsung terhadap produktivitas tanah (Roper dan Ophel-keller, 1997).

Pengukuran biomassa mikrobia tanah telah digunakan untuk menilai pengaruh kontaminasi fungisida, herbisida dan logam berat. Biomassa mikrobia dalam tanah tidak sensitif terhadap pengaruh pestisida jika diberikan sesuai jumlah anjuran. Tetapi dalam jumlah berlebih akan terjadi penurunan biomassa dan respirasinya. Tanah yang diberi limbah terkontaminasi selama 30 tahun memiliki biomassa mikrobia yang lebih rendah dibanding yang tidak terkontaminasi (Sparling 1997).

Sifat mikrobia yang berpotensi sebagai bioindikator polutan logam berat dalam tanah dibagi menjadi 2 kelompok, yang pertama adalah yang mengukur aktivitas dari keseluruhan populasi mikrobia, seperti respirasi, mineralisasi N dan aktivitas enzim-enzim tanah. Kelompok kedua adalah mengukur ukuran populasi mikrobia pada level

organisma tunggal, pada level kelompok dan pada level komunitas (Mhatre dan Pankhurst, 1997).

Aktivitas mikroorganisme tanah memberi pengaruh negatif terhadap logam berat terutama Cu dan Zn dan pengaruh logam berat ini dapat bertahan hingga beberapa tahun. Karenanya jumlah bahan organik pada tanah yang terkontaminasi logam dapat terakumulasi (Mhatre dan Pankhurst, 1997)

Terjadi penurunan fiksasi N_2 oleh cyanobakteria dalam responnya terhadap polusi logam berat yang tinggi, kemungkinan karena jumlah kehadiran cyanobacteria. Secara umum algae dan bakteri fotosintetik lebih sensitip terhadap logam berat tetapi actinomycetes, fungi saprofit dan bakteri heterotropik kurang berpengaruh, kemungkinan karena kerapatan populasi predator mikroorganisme seperti protozoa tertekan (Mhatre dan Pankhurst, 1997).

Mikroflora Tanah

Mikroflora tanah termasuk bakteri, fungi dan algae berpotensi sebagai indikator yang penting untuk kualitas dan kesehatan tanah. Komponen mikrobia tanah ini penting dalam fungsi ekosistem, karena mereka salah satu penanda (marker) biologi yang sangat sensitip dan sangat berguna dalam menilai gangguan dan kerusakan dalam ekosistem (Roper dan Ophel-Keller, 1997).

Beberapa peneliti telah mempelajari perubahan struktur komunitas fungi dan bakteri dalam jangka panjang sebagai respon terhadap gangguan atau stress. Diperoleh kesimpulan bahwa tanah dengan keragaman fungi dan fungsi yang berlebihan mempengaruhi respirasi dalam tanah. Dan dekomposisi substrat umumnya berumur pendek karena spesies tidak sensitip terhadap fungisida yang mengambil alih fungsi spesies yang dipengaruhi. Contoh lain adalah eutrofikasi akibat pemasukan bahan organik segar atau kering dan pembasahan kembali secara sementara meningkatkan aktivitas mikrobia, CFU (colony forming unit) dan rasio CFU terhadap jumlah total sel (van Bruggen dan Semenov, 2000).

Ada sejumlah contoh dimana secara individu atau kelompok mikroorganisme ini digunakan sebagai bioindikator dalam tanah. Misalnya bakteri coliform telah digunakan secara luas sebagai bioindikator limbah feses, walaupun tidak dianggap sebagai indikator ekologi yang sebenarnya karena bukan bagian dari ekosistem tanah alami.

Pengujian pengaruh residu tanaman jagung terhadap populasi mikrobia ditemukan bahwa fungi dan actinomycetes diperpengaruhi secara langsung oleh residu tersebut sebagai sumber hara dan sangat sensitip terhadap tingkat kelembaban tanah.

Bakteri genus *Mettalogenium* mengakumulasi Fe, Al atau Mn menjadi bentuk tidak larut dan dapat tumbuh dalam lingkungan dimana logam terlarut tersebut dalam jumlah tinggi. Perkembangan bakteri ini berkorelasi positif terhadap konsentrasi logam berat. Sehingga aktivitas spesies ini menjadi indikator yang sangat baik terhadap transformasi mineral dalam tanah (van Bruggen dan Semenov, 2000).

Algae terutama diatom, telah digunakan sebagai indikator kualitas air dan sedimen. Diatom terdapat pada hampir semua lingkungan perairan dan sangat sensitip terhadap perubahan sifat kimia air. Diatom juga dapat menginformasikan tentang perubahan kimia pada masa lalu yang dapat mempengaruhi kesehatan tanah saat ini (van Bruggen dan Semenov, 2000).

Lichens merupakan simbiosis tanaman dengan algae fotosintetik atau cyanobakteri yang dikelilingi oleh jaringan fungi, diketahui sensitip terhadap polusi udara dan telah digunakan selama satu abad yang lalu karena lebih seperti wool dan spesies frondose pada atmosfer yang terpolusi rendah. (Roper dan Ophel-Keller 1997).

Beberapa fungi basidiomycetes seperti spesies *Lepista*, *Lycoperdon* dan *Mycena* sebagai indikator polusi tanah oleh logam berat relatif baru dan saat ini masih terbatas oleh perlunya informasi yang lebih mendetail tentang faktor yang mempengaruhi serapan dan translokasi logam berat. Mikoriza ektotropik berguna sebagai indikator penurunan hutan misalnya melalui pengaruh langsung dan tidak langsung polutan pada simbiosis akar (Hornby dan Bateman, 1997).

Bakteri aerob di dalam tanah bagai "ruang mesin" karena pada tanah yang sehat, bakteri ini memineralisasi bahan organik membebaskan N P K dan hara lainnya. Selain itu juga berfungsi sebagai penampung (sink) hara melalui pengikatan hara dan meminimalkan pencuciannya. Selain itu beberapa jenis bakteri aerob menghasilkan senyawa kimia yang mencegah perkembangbiakan organisme patogen. Walaupun hanya sedikit yang dapat dibiakkan, perubahan populasi bakteri yang dapat dikulturkan memberi informasi berguna terhadap kesehatan tanah. Tanah sehat akan mengandung bakteri aerob lebih 10 juta per gram tanah dan bakteri anaerob harus 10 kali lebih rendah dari bakteri aerob. Populasi actinomycetes berada di urutan kedua setelah

bakteri aerob, tetapi jumlahnya rendah pada tanah basah dan pada tanah masam (pH , 5,0), sedangkan jumlah fungi sekitar 10.000 CFU per gram tanah (Celentis Analytical, 2003).

Mikrofauna Tanah

Mikrofauna tanah terdiri dari protozoa, nematoda dan collembola berukuran kecil serta *mite*. Mereka membentuk suatu mata rantai antara dekomposer seperti mikroflora dan fauna yang lebih besar dalam jaringan makanan serasah dalam tanah. Mereka merupakan agen utama untuk membebaskan hara yang diimmobilisaasi oleh mikroflora tanah. Mikrofauna terlibat dalam berbagai proses ekosistem termasuk dekomposisi/turnover bahan organik, mineralisasi hara, pengaturan kepadatan populasi mikroflora termasuk organisme patogen tanaman dan dekomposisi agrokimia (Gupta dan Yeates 1997).

Fauna tanah memiliki keuntungan sebagai bioindikator tanah karena satu atau dua tingkat lebih tinggi dalam rantai makanan, dimana mereka berperan sebagai pemadu sifat kimia dan biologi yang berhubungan dengan sumber makanannya. Kemudian waktu regenerasinya lebih panjang (hari hingga tahun) dibanding mikrobia metabolik aktif lainnya (jam hingga hari) sehingga membuat mereka lebih stabil dan tidak mudah berfluktuasi akibat perubahan hara yang sesaat dan tiba-tiba (Neher, 2001).

Pengaruh pengolahan dan pengelolaan residu tanaman terhadap ukuran, aktivitas dan struktur komunitas populasi mikrofauna dapat dihubungkan terhadap satu atau lebih faktor-faktor berikut:

1. Suplai makanan (misalnya populasi bakteri dan fungi lebih tinggi dimana residu berada)
2. Perubahan populasi dekomposer sekunder (misalnya mikroarthropoda sebagai predator nematoda dan nematoda sebagai predator protozoa)
3. Perubahan sifat fisik tanah (misalnya perubahan stabilitas agregat pengolahan tanah rendah dan perbaikan ketersediaan kelembaban dengan retensi residu).
4. Perubahan distribusi residu bahan organik pada bagian bawah profil tanah. Misalnya distribusi bahan organik pada tanah diolah dibandingkan terhadap

pengolahan tanah minimum, dimana residunya terkonsentrasi dipermukaan tanah (Gupta dan Yeates 1997).

Beberapa sifat protozoa yang membuatnya sesuai untuk pengujian keracunan khususnya logam berat, pestisida dan pencemar lainnya adalah :

1. Dalam bentuk aktif, protozoa memiliki membran luar yang lembab dan sangat sensitif terhadap senyawa beracun dalam kisaran yang luas.
2. Relatif mudah diamati dan dihitung dalam kultur murni
3. Memiliki waktu generasi yang pendek (hitungan jam) dibanding fauna tanah lain dan responnya yang cepat terhadap gangguan (Gupta dan Yeates, 1997).

Nematoda adalah kelompok mesofauna yang sangat sering digunakan sebagai indikator biologis. Nematoda yang hidup bebas atau yang hidup sebagai parasit sangat berguna sebagai indikator karena informasi taksonomi dan peranan makanannya cukup tersedia. Nematoda tanah menempati posisi sentral pada jaringan makanan serasah. Fraksi fauna tanah berukuran kecil tergantung secara langsung pada produser primer, mencari makan pada akar tanaman dan eksudatnya (Neher, 2001).

Nematoda sangat cocok sebagai bioindikator karena:

1. Memiliki kulit permeabel sehingga respon terhadap reaksi polutan dan berhubungan dengan kapasitas penyembuhan ekosistem tanah.
2. Beberapa nematoda memiliki ketahanan seperti cryptobiosis yang dapat inaktif selama lingkungan tidak sesuai untuk pertumbuhan. Sedangkan Dorylamidae tidak memiliki tahap resisten sehingga lebih sensitif terhadap perubahan lingkungan. Nematoda juga memiliki protein kejutan panas (heat shock protein) yang dapat sangat dihemat. Tanda protein ini diperkaya ketika terjadi stress karena panas, ion logam dan racun organik
3. Sebagian lain kelompok ini membentuk hubungan parasitik dengan tanaman dan akarnya dan telah diketahui dengan baik sebagai organisme tanah karena dapat merusak tanaman pertanian seperti menurunkan produksi, memutus transfer air dan hara serta menurunkan kualitas dan ukuran buah. Namun demikian kebanyakan nematoda memiliki peran yang menguntungkan dalam proses ekosistem dan tidak bersifat parasit atau hama, seperti mempengaruhi

kecepatan dekomposisi dan mineralisasi hara. Tidak seperti cacing tanah, nematoda ada dimana-mana dan spesies tertentu sering sekali menjadi hewan terakhir yang mati pada suatu daerah yang tercemar atau terganggu. Hal ini karena mereka masih dapat hidup pada kondisi kekeringan dan hidup kembali dengan adanya kelembaban

4. Nematoda dapat dipisahkan dengan mudah, terutama berdasarkan struktur morfologinya yang diasosiasikan dengan berbagai macam variasi makanan. Kelimpahan relatif dan ukurannya yang khusus membuat pengambilan sampel dan ekstraksinya lebih mudah dan murah dibanding fauna tanah lain.(Neher, 2001).

Struktur komunitas nematoda yang terdapat dalam tanah dapat digunakan sebagai ukuran kesehatan tanah. Ada 7 kelompok nematoda yaitu algae dan pemakan lumut (moss feeder), pemakan fungi (fungal feeder), pemakan bakteri (bacterial feeder), predator, parasit serangga, omnivora dan parasit tanaman. Proporsi relatif dari kebanyakan kelompok ini menunjukkan aktivitas kelompok yang berbeda dari mikroorganisme. Tanah yang didominasi oleh bakteri dan nematoda pemakan fungi adalah tanah yang sehat karena dapat mensuplai hara tersedia untuk pertumbuhan bakteri dan fungi dan selanjutnya juga dapat menopang populasi nematoda ini, tetapi jika tanah mengandung populasi nematoda parasit tanaman yang tinggi, hal tersebut menunjukkan tanah yang tidak sehat (Celentis Analytical, 2003).

Sejak tahun 70-an, nematoda telah digunakan untuk indikator lingkungan perairan. *Panagrellus redivivus* untuk mendeteksi konsentrasi racun yang mempengaruhi kulit atau ukuran organisme melalui stimulasi, penghambatan atau kematian dan sebagai bioassai yang murah. Nematoda juga telah digunakan untuk menentukan pengaruh racun 400 senyawa tunggal.

Pada tanah pertanian, keragaman yang lebih besar dari kelompok trofik dikorelasikan dengan peningkatan frekwensi relatif dari kelompok trofik yang kelimpahannya kurang umum (seperti fungivorous, omnivorous dan predator) terhadap kelompok trofik yang kelimpahannya lebih umum (seperti bakteriovorous dan kelompok parasit tanaman). Pada percobaan di petridis, terdapat lebih banyak N tersedia dalam bentuk amonium ketika terdapat nematoda bakteriovorus dan fungivorous. Pada kondisi lapangan nematoda bakteriovorous dan predator diduga menyumbang secara

langsung dan tidak langsung 8 hingga 19 % mineralisasi pada masing-masing sistem pertanian konvensional dan terpadu. Nematoda menyumbangkan mineralisasi N secara tidak langsung melalui mikrobia dekomposer, ekskresi amonium dan immobilisasi N melalui biomassa hidup. Tetapi walaupun tanaman tergantung pada N untuk hidup dan pertumbuhannya, pengolahan tanah dan penambahan pupuk mineral yang berlebihan atau tidak sesuai dengan kebutuhann tanaman dapat dianggap sebagai gangguan ekologis (Neher, 2001).

Kerusakan lingkungan dalam agroekosistem dapat dikelompokkan dalam katagori kimia dan fisika yang dapat mengubah komunitas nematoda secara kualitatif. Kerusakan secara kimia antara lain adalah terjadi pengayaan hara dan polutan kimia, sedangkan gangguan fisik adalah pengolahan tanah. Dengan asumsi bahwa pengaruh langsungnya adalah karena pengolahan tanah, maka pengaruh tidak langsung berupa respon komunitas suatu nematoda yang diasosiasikan dengan menurunnya kandungan bahan organik. Pengolahan tanah dianggap sebagai gangguan negatif dan pemupukan adalah pengaruh positif. Pengaruh negatif dan positif ini masing-masing dapat meningkatkan dan menurunkan populasi pada kelompok tertentu. Hal ini menjadikan struktur nematoda sulit dijadikan indikator dalam proses perubahan ekologi (Neher, 2001).

Kelimpahan dan aktivitas kebanyakan kelompok fauna tanah (seperti protozoa, nematoda, mikroartropoda (seperti collembola) dan makrofauna (seperti cacing tanah) dipengaruhi oleh polusi logam berat dalam tanah. Nematoda umumnya menunjukkan sedikit pengaruh akibat logam berat dan pada beberapa contoh misalnya setelah pemberian limbah cair terkontaminasi logam, jumlahnya secara substansial meningkat. Perubahan kelimpahan relatif nematoda menjadi lebih banyak ini berhubungan dengan perubahan jumlah hara tersedia dalam tanah (Mhatre dan Pankhurst, 1997).

Pertumbuhan *Colpoda stenii* akibat keracunan logam berat makin tertekan dengan urutan Ni > Cd > Cu > Zn. Dilaporkan juga bahwa spesies protozoa *Yttrahymena pyriformis* dan *Auplotes vannus* tertekan akibat peningkatan konsentrasi logam berat. (Gupta dan Yeates 1997). Logam Cu dan Cd bersifat sangat beracun terhadap bakteri, terutama rhizobia dan Zn paling menekan pada *R. leguminosorum* (Alloway, 1995).

BEBERAPA STRATEGI DALAM PENGELOLAAN TANAH SEHAT

Pengelolaan yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kesehatan tanah membutuhkan pendekatan yang menyeluruh dan terpadu yang melibatkan para pelaksana dengan komitmen jangka panjang dan menggunakan kombinasi berbagai sifat biologi, kimia dan fisika. Tindakan yang dilakukan pada prinsipnya adalah bagaimana mengurangi stres tanaman dan meningkatkan daya tahan tanah terhadap berbagai organisme musuh tanaman dan bahan yang bersifat meracun. Tanaman yang tumbuh pada lingkungan yang sehat sehingga tidak mengalami stress akan memiliki pertumbuhan dan daya tahan terhadap serangan hama penyakit yang lebih baik.

Menurut Magdoff (2001) ada beberapa strategi dasar yang dapat dilakukan untuk memperbaiki kesehatan tanah yaitu :

- a. Penambahan dalam jumlah besar bahan organik yang berasal dari residu tanaman termasuk tanaman penutup tanah, kotoran hewan dan kompos. Jenis bahan organik yang berbeda memiliki pengaruh yang berbeda terhadap sifat fisik, kimia dan biologi tanah. Kompos yang telah terdekomposisi lanjut tidak mempengaruhi agregasi tetapi dapat menekan penyakit tanaman.
- b. Menjaga tanah agar selalu tertutup vegetasi dan residu tanaman. Penggunaan penutup tanah ini akan melindungi permukaan tanah dari kelembaban dan temperatur yang ekstrim serta meningkatkan infiltrasi tanah sehingga akan lebih banyak menyediakan air untuk tanaman dan pada waktu yang sama juga akan mengurangi aliran permukaan (run off) dan erosi. Mengurangi intensitas pengolahan tanah sehingga akan lebih banyak residu tanaman tertinggal dipermukaan tanah dan ini akan mengurangi oksidasi bahan organik tanah
- c. Melakukan rotasi tanaman pada sistem pertanaman semusim termasuk menanam tanaman tahunan (biasanya rumput makanan ternak) jika memungkinkan.
- d. Melakukan berbagai praktek lainnya untuk mengurangi erosi seperti sistem tanaman lorong. Sebab erosi selain merusak tanah secara fisik juga mengurangi kesehatan tanah melalui pengangkutan tanah yang kaya bahan organik dari lapisan atas tanah.

- e. Mengurangi pengaruh yang berlebihan akibat pemadatan tanah yang dapat dilakukan dengan menghindari tanah terlalu basah, dengan menggunakan jalur pengontrol.

Seringkali tanpa disadari, suatu kegiatan yang dilakukan untuk memperbaiki tanah sebenarnya berpengaruh ganda terhadap ekosistem pertanian. Penanaman suatu tanaman penutup tanah selain mengurangi erosi juga akan menambah jumlah N tersedia, mengurangi pencucian nitrat ke air bawah tanah, meningkatkan jumlah spora mikoriza arbuskular, menyediakan habitat bagi organisme yang menguntungkan, menekan pertumbuhan gulma, mengurangi penyakit akar dan mengurangi nematoda parasit (Phatak, 1998 *dalam* Magdoff, 2001).

Seharusnya perbaikan kualitas tanah tidak terfokus pada hanya suatu strategi seperti mengurangi pengolahan tanah atau penggunaan tanaman penutup tanah, tetapi perlu tindakan kombinasi. Selain itu penting diketahui hingga ditingkat petani tentang kombinasi yang paling baik dari suatu rotasi tanaman, pengaruh penggunaan rutin dari tanaman penutup tanah, dan keuntungan yang diperoleh dengan dilakukannya pengolahan tanah minimum pada suatu lokasi . Penerapan aspek lain adalah penggunaan suatu teknik yang dapat mengurangi pemadatan tanah, perbaikan pengelolaan hara dan lain sebagainya.

Kegiatan yang mendorong kepada kesehatan tanah yang lebih baik juga akan mengurangi stress tanaman sehingga akan meningkatkan secara inheren kemampuan tanaman terhadap serangan hama penyakit. Tanah yang lebih sehat akan memiliki keragaman dan populasi yang lebih aktif, akibatnya patogen tanah dapat ditekan menjadi lebih rendah melalui kompetisi dengan organisme lain.

Banyak peneliti yang sudah mempelajari pengaruh berbagai jenis perusakan seperti pengolahan tanah, rotasi tanaman, irigasi, amandemen bahan organik atau aplikasi pupuk atau pestisida terhadap proses dalam tanah atau kelompok organisme dalam tanah. Sebagai contoh, indeks kedewasaan nematoda menurun kemudian meningkat kembali setelah suatu gangguan berakhir. Ketika suatu struktur komunitas rusak permanen, hal tersebut menunjukkan kematian nematoda sebagai akibat stress yang cukup lama. Pada kondisi hara yang diperkaya, indeks kedewasaan menurun ketika indeks parasit tanaman meningkat. Sifat-sifat di atas menyifatkan kesehatan tanah yang buruk (van Bruggen dan Semenov, 2000).

KESIMPULAN

Kesehatan tanah atau kualitas tanah menunjuk kepada kemampuan tanah untuk mendukung secara terus-menerus pertumbuhan tanaman pada kualitas lingkungan yang terjaga, dimana kualitas tanah umumnya diasosiasikan sebagai kecocokan tanah untuk penggunaan yang spesifik, sedang kesehatan tanah digunakan secara lebih luas untuk menunjukkan kapasitas tanah terhadap fungsinya sebagai sistem hidup untuk produktivitas biologi secara terus menerus, mendorong kualitas lingkungan dan memelihara kesehatan tanaman dan hewan.

Bioindikator tanah adalah sifat atau proses biologis dalam komponen tanah dari suatu ekosistem yang menggambarkan kondisi ekosistem sebagai suatu sebab tertentu. Indikator biologi memiliki keunggulan dalam menilai ekologi tanah yang sehat karena dapat digunakan untuk menilai status saat ini dan perubahan prosesnya pada suatu rentang waktu, mampu mencerminkan struktur dan atau fungsi proses ekologi dan respon terhadap perubahan kondisi tanah akibat praktek pengelolaan lahan. Sangat sensitip terhadap degradasi bahkan yang baru terjadi, sehingga perubahan status biologi dari sistem tersebut dapat menjadi peringatan dini atas kemunduran lingkungan sehingga dapat bereaksi sebelum terjadi kerusakan yang tidak dapat dipulihkan.

Pengukuran organisme tanah memerlukan banyak kriteria seperti kelimpahan, keragaman, struktur jaringan dan stabilitas komunitas sehingga diperlukan pemahaman taksonomi yang cukup. Namun karena memiliki respon yang sensitip terhadap pengelolaan lahan dan iklim, berkorelasi baik terhadap sifat tanah yang menguntungkan dan fungsi ekologis seperti penyimpanan air, dekomposisi dan siklus hara, netralisasi bahan beracun dan penekanan organisme patogen dan berbahaya, maka cukup baik digunakan sebagai bioindikator tanah. Organisme tanah juga dapat menggambarkan rantai sebab-akibat yang menghubungkan keputusan pengelolaan lahan terhadap produktivitas akhir dan kesehatan tanaman dan hewan

Sifat mikrobial sebagai bioindikator dapat diukur melalui aktivitas dari keseluruhan populasi mikrobial, seperti respirasi, mineralisasi N dan aktivitas enzim tanah dan melalui ukuran populasi mikrobial pada level organisma tunggal, level kelompok dan level komunitas

Bakteri, fungi dan algae merupakan mikroflora tanah yang berpotensi sebagai indikator penting untuk kualitas dan kesehatan tanah karena mereka berperan penting dalam fungsi ekosistem dan salah satu penanda (marker) biologi yang sangat berguna dan sensitip dalam menilai gangguan dan kerusakan dalam ekosistem

Protozoa, nematoda, collembola berukuran kecil serta *mite* adalah mikrofauna tanah yang memiliki keuntungan sebagai bioindikator tanah karena mampu membentuk jaringan makanan antara dekomposer mikroflora dan fauna yang lebih besar, agen utama pembebasan hara yang diimmobilisaasi oleh mikroflora tanah, terlibat dalam proses dekomposisi/turnover bahan organik, mineralisasi hara dan pengaturan kerapatan populasi mikroflora. Disamping itu fauna tanah satu atau dua tingkat lebih tinggi dalam rantai makanan, dan berperan sebagai pemadu sifat kimia dan biologi yang berhubungan dengan sumber makanannya. Waktu regenerasinya lebih panjang sehingga lebih stabil dan tidak mudah berfluktuasi akibat perubahan hara yang sesaat dan tiba-tiba. Nematoda adalah mikrofauna yang sangat sering digunakan sebagai indikator biologis, karena informasi taksonomi dan peranan makanannya cukup tersedia dan menempati posisi sentral pada jaringan makanan serasah.

Pengelolaan yang dilakukan untuk memperbaiki kesehatan tanah membutuhkan pendekatan menyeluruh dan terpadu serta komitmen jangka panjang dan tidak terfokus hanya pada suatu strategi tetapi diperlukan tindakan kombinasi dengan menggunakan kombinasi berbagai sifat biologi, kimia dan fisika.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B. J. (1995) Soil processes and the behavior of metal. *In* B.J. Alloway (ed.) Heavy Metal in Soils. 2nd edition. Blackie Academic & Professional. UK. 11-37.
- Arsyad, S. (2000) Konservasi tanah dan air. IPB Press.
- Celentis Analytical (2003) Biological soil test-definitions. e-lab.limited. [http://www.lifestyleblock.co.nz/general/sfs/213 Soil biological Testdefinition.htm](http://www.lifestyleblock.co.nz/general/sfs/213%20Soil%20biological%20Testdefinition.htm)
- Doran, J. W and M. R. Zeiss (2000) Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* (15). 3-11. www.Elsevier.com/locate/apsoil.
- Elliot, E. T. (1997) Rationale for developing bioindicators of soil health. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). Biological indicators of Soil Health. CAB International. UK 49-78
- Gupta, V. V. S. R. dan G. W. Yeates (1997) Soil microfauna as bioindicators of soil health. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). Biological Indicators of Soil Health. CAB International. UK.201-233
- Hornby, D and G. L. Bateman. (1997) Potensial use of plant root pathogens as bioindicators of soil health. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). Biological Indicators of Soil Health. CAB International. UK.179-200.
- Herrick, J. E. (2000) Soil Quality: an indicator of sustainable land management ?. *Applied Soil Ecology*. (15) 75-83. www.Elsevier.com/locate/apsoil.
- Magdoff, F. (2002) Concept, componen and strategies of soil health in agroecosystems. *Journal of Nematology* 33 (4); 169-172.
- Mhatre, G. N. and C. E. Pankhurst. (1997) Bioindicators to detect contamination of soils with special reference to heavy metals. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). Biological Indicators of Soil Health. CAB International. UK. 349-369
- Neher, D. A. (2001) Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *Journal of Nematology* 33 (4); 161-168.
- O'Hara, G. W. (2001) Nutritional constrains on root nodule bacteria effecting symbiotic nitrogen fixation: a review. *Aust. J. of Exp. Agric.* (41), 417-433.
- Pankhurst, C. E., B. M. Doube and V.V. S. R. Gupta. (1997) Biological indicators of soil health: Synthesis. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). Biological Indikators of Soil Health. CAB International. UK. 419-435

- Pulleman, M. M., J. Bouma, E. A. van Essan and E. W. Meijles. (2000) Soil organic matter content as a function of different land use history. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64; 689-693
- Roper, M. M and K. M. Ophel-Keller (1997) Soil microflora as bioindicators of soil health *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International. 157- 177
- Sparling, G. P. (1997) Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International. UK. 97-119
- Sherwood, S and N. Uphoff (2000) Soil helath: research, practice and policy fore a more regenerative agriculture. *Aplied Soil Ecology*. (15). 85-97. www.Elsevier.com/locate/apsoil.
- van Bruggen, A. H. C. and A. M. Semenov. (2000) In research of biological indicators for soil health and disease suppression. *Aplied Soil Ecology*. (15). 13-24. www.Elsevier.com/locate/apsoil.
- Wander, M. M. and L.E. Drinkwater. (2000) Fostering soil stewardship through soil quality assessment. *Applied Soil Ecology* (15), 61-73. www.Elsevier.com/locate/apsoil.
- White D. C. and S. J. Maccaughton, (1997) Chemical and molecular approaches for rapid assessment of the biological status of soils. *In* C. Pankhurst, B.M. Doube and V.V.S.R. Gupta (eds). *Biological Indicators of Soil Health*. CAB International. UK. 371- 396.