

Penilaian mutu tanah secara cepat berdasarkan faktor penentu aktivitas biologinya

Rapid assessment of soil quality as based on its biology activity determining factors

Didiek Hadjar GOENADI^{*)}

PT. Riset Perkebunan Nusantara, Jl. Salak No 1A, Bogor 16182, Indonesia

Diterima tanggal 12 Maret 2014/Disetujui tanggal 7 Juli 2014

Abstract

Agricultural practices are still heavily dependent on the use those so-called marginally-suitable soils with low soil fertility level. On the other hand, fertilization has been long known offering fertility solution, but it is indicative that its efficiency is low without soil amelioration. The conditions have been intensified by climatic change phenomena particularly increased atmospheric CO₂ concentration which widely affects the soilbiological activity and crop performance as well. This review tries to discuss a thought to find the right method to assist management in determining the right solution for the problems encountered in the field based on soil and plant indicators. The method should be simple, fast, and reliable to express close relationship between soil characteristics and plant performance. The indicators should be those of very important soil characteristics determining soil biological activities as a measure for its fertility. Moreover, the indicators used must have highly sensitive to climatic change, anthropogenic activities, and their impacts on soil biological activity are significant. Soil organic matter (chemistry), bulk density, soil texture, and infiltration rate(physics), and worm population and soil respiration (biology) are main characters related to whole soil productivity. In addition, chlorophyll content and root density are the most potentiallyrelated indicators to crop per-formance.

[Keywords : Soil productivity, climatic change, soil biology CO₂ concentration]

Abstrak

Kegiatan pertanian masih banyak tergantung pada pemanfaatan tanah-tanah sub-optimal yang memiliki hambatan berupa rendahnya kesuburan tanah. Di sisi lain, pemupukan telah menawarkan solusi untuk mengatasinya, tetapi pada tanah-tanah seperti itu tidak akan banyak manfaatnya jika kemampuan tanah tidak diperbaiki. Kondisi ini diperparah dengan fenomena perubahan iklim, khususnya peningkatan kadar CO₂ atmosfer yang berpengaruh luas terhadap aktivitas biologi tanah dan kinerja tanaman. Tulisan ini mengulas tentang perlunya perangkat pengambilan keputusan di lapangan untuk memilih solusi praktis yang tepat untuk menyelesaikan hambatan pertumbuhan dan/atau produksi tanaman dengan memanfaatkan indikator tanah dan/atau tanaman secara tepat. Metode yang dikembangkan adalah berdasarkan teknik penetapan yang mudah, cepat, dan cukup akurat dalam menggambarkan hubungan antara indikator terpilih dan kinerja tanaman. Indikator yang dimaksud adalah

^{*)}Penulis korespondensi: Tlp. 0251-8333382

sifat tanah yang paling penting dalam menentukan aktivitas biologi di dalam tanah sebagai penanda dari kesuburannya. Selain itu, indikator yang digunakan harus cukup peka dalam menanggapi perubahan iklim dan perlakuan budidaya dan pengaruhnya nyata terhadap aktivitas biologi di dalam tanah. Kadar bahan organik tanah (kimia), bobot isi, tekstur tanah, dan laju infiltrasi (fisik), dan populasi cacing dan respirasi tanah (biologi) merupakan faktor tanah yang secara praktis mewakili daya dukung tanah secara keseluruhan. Di sisi lain, indikator tanaman yang diperkirakan memiliki hubungan erat dengan pertumbuhan dan produktivitas adalah kadar khlorofil daun dan kerapatan akar.

[Kata Kunci : Produktivitas tanah, perubahan iklim, biologi tanah, kadar CO₂]

Pendahuluan

Tanah sebagai satu bagian aset dari lahan pertanian memegang peranan kunci dalam sistem usaha tani berbasis tanaman berskala luas. Oleh karenanya banyak upaya telah dilakukan untuk melakukan penilaian tentang daya dukungnya terhadap usaha tani tertentu. Fungsi tanah digambarkan oleh Seybold *et al.* (1997) sebagai: (a) pendukung aktivitas biologi, keanekaragaman flora dan fauna, serta produktivitas, (b) mengatur serta membagi aliran air dan larutan nutrisi, (c) menyaring dan menyangga, melapukkan, mengimobilisasi, detoksifikasi bahan organik dan an-organik, termasuk produk samping industri perkotaan dan deposisi atmosfer, (d) menyimpan dan mendaur-ulang unsur hara, unsur lain di dalam lapisan biosfir bumi, dan (e) menyediakan dukungan struktur sosial-ekonomi serta proteksi harta arkeologi yang terkait dengan hunian manusia.

Sebagai tubuh alami yang dinamis sifat dan ciri tanah berubah secara aktif berdasarkan perubahan bahan induknya, perubahan suhu dan curah hujan, dan perubahan pengelolaan oleh manusia (*antrophogenic*). Proses ini secara potensial dan aktual mampu mengubah mutu tanah. Menurut USDA (2001) mutu tanah merupakan ciri dari setiap jenis tanah dan dibedakan atas dua pengertian, yaitu mutu turunan dan mutu dinamis. Mutu turunan adalah sifat dan ciri tanah yang dihasilkan oleh faktor-faktor pembentuk tanah seperti

tekstur dan mineralogi tanah. Sebaliknya, mutu dinamis adalah kondisi tanah yang diakibatkan oleh aktivitas manusia seperti penggunaan tanaman penutup tanah kacang-kacangan dan pengolahan tanah di saat basah. Mutu tanah ini ditentukan berdasarkan sifat dan/atau ciri tanah yang relatif peka terhadap perubahan akibat pembudidayaannya.

Prinsip dasar dalam penilaian mutu tanah adalah bahwa indikatornya harus mudah diukur, mampu mengekspresikan perubahan fungsi tanah, tidak perlu waktu lama dalam penetapannya, mewakili sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, dan peka terhadap perubahan iklim dan pengelolaan tanah. Khusus tentang perubahan iklim, beberapa kajian telah menunjukkan potensi perubahan iklim dalam mempengaruhi sifat dan ciri tanah yang terkait dengan produktivitasnya (University of Toronto, 2008; Brevik, 2013). Pengaruh perubahan iklim, dalam hal ini suhu dan curah hujan, banyak merujuk pada kadar bahan organik tanah dan kesesuaian suhu udara bagi pertumbuhan tanaman tertentu di wilayah tertentu. Perubahan bahan organik akan secara beruntun mengakibatkan perubahan sifat-sifat lain pada tanah yang mempengaruhi produktivitas tanaman. Oleh karena itu, penetapan indikator mutu tanah akan sangat bermanfaat dalam menentukan langkah-langkah praktis untuk mengatasi hambatan terkait. Bagaimanapun juga, sifat tanah yang dipilih sebagai indikator harus memiliki peran penting dalam menentukan aktivitas biologi tanah, seperti yang terkait dengan bahan organik dan status air tanah, dan terimplikasikan pada kehidupan mesofauna dan mikroba.

Tulisan ini bertujuan menyajikan diskusi tentang perlunya metode penetapan mutu tanah yang praktis, cepat, dan akurat untuk dimanfaatkan oleh para pengelola usaha tanaman pertanian, khususnya tanaman perkebunan. Secara khusus, pengaruh perubahan iklim terhadap sifat tanah disajikan dengan pertimbangan peran pentingnya aspek ini saat ini hingga ke masa depan dalam menentukan teknik budidaya berbasis tanaman.

Pengaruh peningkatan kadar CO₂ atmosfer terhadap sifat tanah

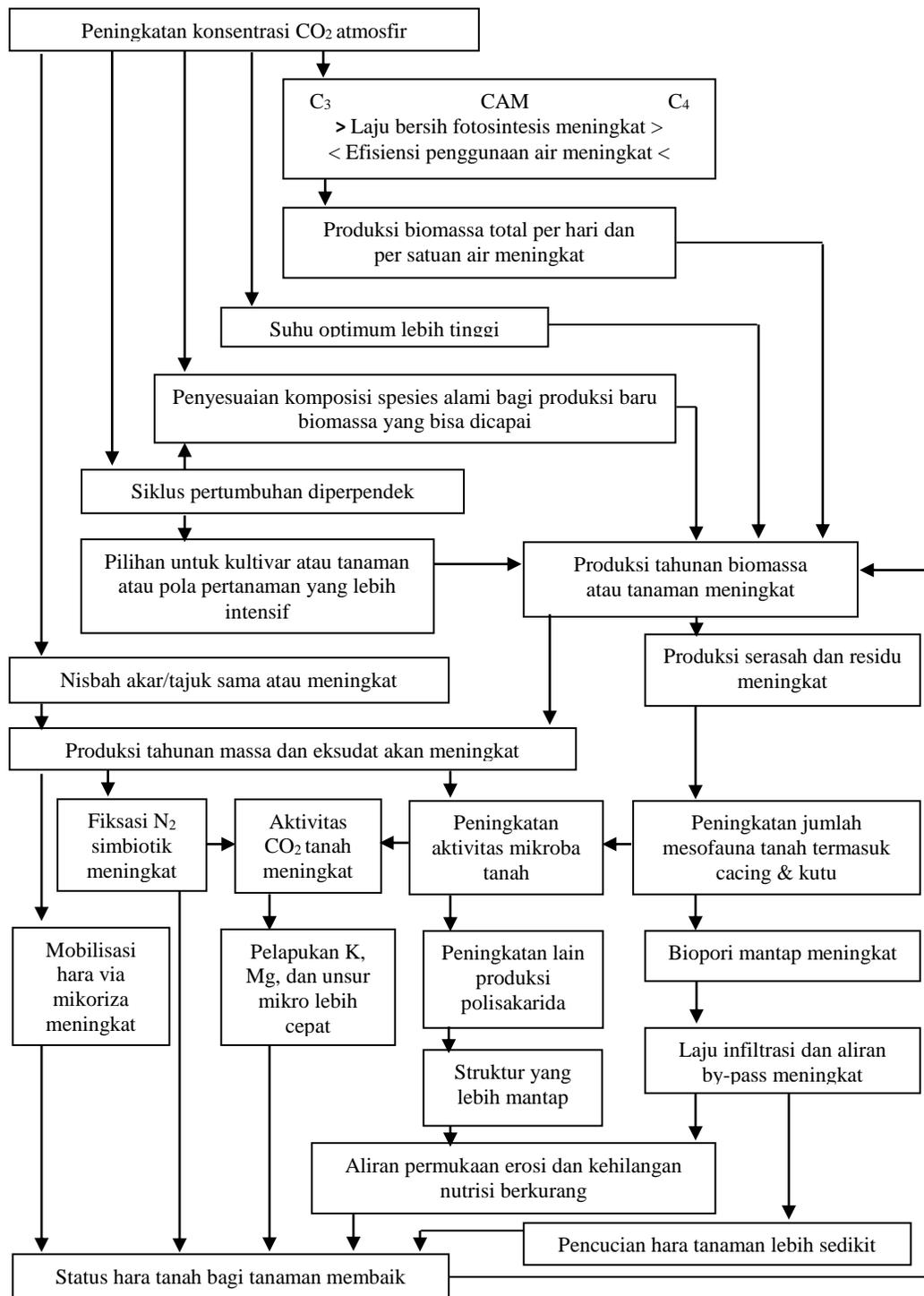
Menurut ramalan *International Panel on Climatic Change (IPCC)* suhu global diperkirakan naik antara 1,1 dan 6,4 °C selama abad ke 21 dan pola curah hujan akan berubah. Tanah yang sangat erat kaitannya dengan sistem iklim atau atmosfer melalui siklus karbon (C), nitrogen (N), dan hidrologi akan mengalami perubahan sifat-sifat secara nyata. Beberapa kajian telah menunjukkan bahwa beberapa tanah-tanah menjadi sumber C atmosfer yang berdampak penurunan kadar C tanah (Brevik, 2013). Bagaimanapun juga, proses selanjutnya dari pengaruh perubahan iklim terhadap siklus N dan

pada gilirannya mempengaruhi cadangan C dalam tanah masih belum begitu jelas. Brinkman & Sombroek (1996) menyajikan satu pemikiran lengkap tentang dampak dari peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer (Gambar 1).

Respons tanaman terhadap fenomena ini berbeda, laju fotosintesis meningkat dari jenis tanaman C₄ ke jenis *crassulacean acid metabolism* (CAM) dan paling tinggi pada jenis C₃. Sebaliknya, peningkatan efisiensi penggunaan air oleh tanaman C₄ lebih tinggi daripada CAM dan C₃. Konsekuensinya, produksi biomassa total per hari dan per satuan volume air meningkat dan pada gilirannya produksi serasah dan residu meningkat pula. Peningkatan bahan organik ini kemudian mendorong peningkatan jumlah mesofauna tanah termasuk cacing tanah dan kutu sehingga biopori yang mantab meningkat, laju infiltrasi dan aliran bebas juga meningkat sehingga pencucian hara tanaman lebih sedikit dan pada akhirnya status hara tanah bagi tanaman membaik. Peningkatan kadar hara tanah ini juga dipicu oleh peningkatan fiksasi N bebas dari atmosfer dan mobilisasi hara via mikroriza serta pelapukan unsur K, Mg, dan unsur mikro lebih cepat akibat meningkatnya produksi CO₂ oleh peningkatan respirasi tanah. Peningkatan aktivitas mikroba juga mendorong meningkatnya produksi polisakarida yang bertanggung-jawab untuk pembentukan agregat dan struktur tanah yang lebih mantap. Struktur tanah yang mantap akan memfasilitasi peningkatan infiltrasi sehingga erosi oleh aliran permukaan berkurang dan nutrisi yang hilang makin kecil. Di pihak lain Singh *et al.* (2010) menyajikan ulasan tentang hubungan erat antara mikroba dan perubahan iklim yang secara khusus terkait pada peran utama mikroba dalam emisi gas rumah kaca.

Pengaruh peningkatan CO₂ atmosfer terhadap kinerja tanaman

Taub (2010) melaporkan bahwa konsentrasi CO₂ atmosfer secara mantap naik dan akan membawa pengaruh nyata terhadap tanaman. Kadarnya disebutkan meningkat dari 315 ppm pada tahun 1959 menjadi 385 ppm pada tahun 2009 (Keeling *et al.*, 2009). Pada tahun 2100 kelak kadar CO₂ diprediksi terus meningkat hingga mencapai 500-1000 ppm (IPCC, 2007). Salah satu pengaruh yang paling konsisten dari peningkatan kadar CO₂ terhadap tanaman adalah peningkatan laju pengikatan karbon C untuk fotosintesis oleh daun. Proses ini selanjutnya dilaporkan mampu meningkatkan pertumbuhan bagian atas tanaman 17% dan bagian bawah tanaman sebesar 30-40% (Ainsworth & Long, 2005; Ainsworth, 2008). Kedua peneliti ini secara terpisah juga melaporkan hasil risetnya yang menunjukkan bahwa produksi gandum, padi, dan kedelai naik 12-14% pada kondisi kadar CO₂ yang ditingkatkan.



Gambar 1. Cakupan pengaruh berantai dari peningkatan CO2 di atmosfer terhadap sifat-sifat tanah dan kinerja tanaman (Brinkman & Sombroek, 1996).

Figure 1. Scopes of multiple effects of elevated atmospheric CO2 level on soil properties and crop performances (Brinkman & Sombroek, 1996).

Peningkatan CO₂ juga mengakibatkan perubahan komposisi kadar hara di dalam daun. Akibat peningkatan aktivitas fotosintesis, karbohidrat non-struktural (gula dan pati) per satuan luas daun meningkat rata-rata 30-40%. Kadar N daun sebaliknya menurun 13% dan diduga hal ini sebagai akibat antara lain dari pengenceran kadar protein dengan meningkatkan kadar karbohidrat daun. Taub & Wang (2008) dan Bloom *et al* (2010) melaporkan bahwa penurunan N tersebut juga bisa akibat dari menurunnya serapan hara dari tanah, menurunnya konduktan stomata, menurunnya serapan air oleh tanaman, dan menurunnya laju asimilasi nitrat menjadi senyawa organik. Perlu dicermati pula dalam Gambar 1 tersebut bahwa perubahan bahan organik tanah akibat perubahan laju fotosintesis juga berpengaruh terhadap aktivitas mesofauna dan mikroba. Dengan kata lain, aktivitas biologi tanah tergolong peka terhadap perubahan iklim melalui rangkaian logika yang tertera dalam gambar tersebut. Aktivitas mesofauna dapat didekati atas dasar populasi cacing tanah, sedang aktivitas mikroba dapat ditetapkan secara cepat melalui penetapan respirasi tanah.

Fakta di lapangan yang terjadi beberapa tahun terakhir ini menunjukkan aspek positif dan negatif dari perubahan suhu dan curah hujan di berbagai wilayah. Salah satu contoh adalah Negara Ukraina, sebuah Negara baru bekas bagian dari Uni Soviet. Sebelum terjadi perubahan iklim Negara ini bukan tergolong penghasil gandum penting di dunia akibat cuaca yang suhunya terlalu rendah. Dengan peningkatan suhu udara pada beberapa tahun terakhir tiba-tiba Ukraina menjadi Negara penghasil gandum yang diperhitungkan dunia akibat wilayah-wilayah yang semula tidak cocok karena suhunya terlalu rendah menjadi cocok untuk tanaman gandum. Contoh kedua adalah konversi perkebunan teh di Jawa Barat di wilayah dengan ketinggian antara 600-800 m dpl yang dulu masih cukup sesuai untuk tanaman teh, beberapa tahun terakhir produktivitasnya merosot akibat meningkatnya suhu udara. Daerah ini yang semula tidak cocok untuk pertanaman buah-buah tropis dataran rendah kemudian menjadi sesuai untuk manggis, durian, dan pisang. Hasil pengamatan lainnya menunjukkan bahwa perubahan iklim berpengaruh nyata terhadap kinerja tanaman kelapa sawit (Siregar *et al.*, 2013) dan tanaman karet di Indonesia (Widjaja, 2013). Di wilayah yang memiliki empat musim, perubahan iklim di musim dingin mengakibatkan perubahan aktivitas mikroba selama musim tanam (Duran *et al.*, 2014). Hasil riset lainnya menunjukkan bahwa pengolahan tanah dan pemupukan N mempengaruhi emisi gas rumah kaca di lahan kering (Sainju *et al.*, 2012).

Manfaat orientasi mutu tanah

Dalam pengelolaan tanah untuk mencapai produktivitas yang ekonomis diperlukan perangkat untuk membantu pengambilan keputusan terhadap tindakan-tindakan praktis di lapangan. Bagaimanapun juga, riset secara integral untuk tujuan ini masih belum banyak dilakukan sehingga masih banyak aspek dalam hubungan antara sifat tanah dan iklim yang belum diketahui. Aspek ini sangat penting artinya untuk menjawab keamanan pangan di masa mendatang (Brevik, 2013). Seperti yang telah diuraikan di atas bahwa satu parameter iklim berubah, yaitu kadar CO₂ di atmosfer, dampak berganda terhadap sifat tanah dan kinerja tanaman sangat luas dan ekstensif.

Menurut *Soil Quality Institute-Natural Resources Conservation Services*, Kementerian Pertanian Amerika Serikat (USDA, 2001), mutu tanah didefinisikan sebagai kapasitas tanah untuk bermanfaat dalam kondisi alami atau budidaya dalam: (a) mendukung produktivitas tanaman dan ternak, (b) mempertahankan atau meningkatkan kualitas air dan udara, dan (c) mendukung kesehatan dan pemukiman manusia. Dari pengertian ini mutu tanah sangat dekat konteksnya dengan kesehatan tanah. Dengan demikian, pemahaman terhadap pentingnya orientasi mutu tanah bukan saja berpusat pada salah satu sifat fisiko-kimia dan biologi tanah, tetapi lebih luas daripada itu karena menyangkut sifat tanah yang berperan penting dalam menunjukkan dan/atau menentukan sifat-sifat lain secara terpisah. Manfaat orientasi mutu tanah adalah dapat merumuskan langkah-langkah perbaikan dan perlindungan lingkungan berdasarkan sifat dinamis tanah. Dalam praktek sehari-hari indikator mutu tanah sudah menjadi perhatian para praktisi pengelolaan tanah. Evaluasi mutu tanah merupakan sebuah model yang sangat berguna untuk menilai dan meningkatkan sumberdaya tanah melalui pendekatan komprehensif. Sebagai contoh, perbaikan mutu tanah dengan meningkatkan kadar bahan organik tanah melibatkan penurunan aktivitas pengolahan tanah yang merupakan cara dasar mengurangi erosi.

Penurunan laju erosi akan meningkatkan mutu air melalui penurunan jumlah sedimen dalam aliran permukaan yang pada gilirannya untuk daerah yang berlereng menekan laju kehilangan nutrisi tanaman melalui aliran permukaan dan/atau aliran dalam lapisan permukaan tanah. Selain itu, pemahaman terhadap tingkat mutu tanah dapat memberikan jaminan tercapainya efisiensi pemupukan yang makin mahal. Penilaian mutu tanah juga dianggap bermanfaat untuk menilai dampak budidaya jangka panjang terhadap kesuburannya (Stott *et al.*, 2013).

Perangkat uji mutu tanah

Konsep kunci dalam penilaian mutu tanah terletak pada indikator yang digunakan. Jenis indikator bisa sifat fisik, kimia, dan biologi, proses, atau ciri-ciri tanah, bentuk atau kenampakan tanaman untuk menilai perubahan akibat pembudidayaan tanah. Prinsip utamanya adalah bahwa indikator termaksud harus mudah diukur, mampu mengekspresikan perubahan fungsi tanah, tidak perlu waktu lama, mewakili sifat fisiko-kimia-biologi, dan peka terhadap perubahan iklim dan pengelolaan. Contohnya bahan organik tanah yang mencerminkan kesuburan tanah, struktur tanah, kemantapan tanah, dan retensi unsur hara. Indikator tanaman seperti kedalaman perakaran mencerminkan bobot isi atau pemampatan tanah. Di sisi lain, sifat yang terkait dengan kemampuan menahan air menjadi salah satu kunci penting di samping bahan organik di dalam mengindikasikan tingkat kesuburan tanah. Kesuburan tanah secara biologi diekspresikan oleh aktivitas cacing tanah dan respirasi tanah (Salehi *et al.*, 2013; McDaniel *et al.*, 2013; Kernecker *et al.*, 2014). Dikembangkan oleh *Agricultural Research Service (ARS)* dari Pelayanan Konservasi Sumberdaya Alam, Departemen Pertanian, AS, perangkat uji mutu tanah (PUMT) merupakan sebuah perangkat penilaian mutu tanah di lahan petani (*on-farm*).

Salah satu tujuan penggunaannya adalah sebagai penyaring informasi untuk memperoleh arah secara umum atau kecenderungan mutu tanah, yaitu apakah cara pengelolaan yang digunakan oleh pihak petani

tergolong mempertahankan, meningkatkan atau merusak mutu tanah. Termasuk di dalamnya adalah perangkat untuk mengukur indikator baku mutu tanah seperti respirasi, infiltrasi air, bobot isi, konduktivitas listrik, pH, kemantapan agregat, konsistensi, dan aktivitas cacing tanah. Dengan pengertian seperti ini, maka pihak manajemen mampu memperoleh informasi akurat tentang implementasi kebijakan pengelolaan tanahnya dan sekaligus mendapatkan gambaran tentang adanya penyimpangan dari pelaksanaan implementasi kebijakan yang bersangkutan. Hal ini akan sangat bermanfaat pada kondisi terjadi penurunan produksi akibat perubahan pola pengelolaan tanah dan/atau pergantian manajemen di tingkat terbawah (blok atau afdeling). Contoh data minimal indikator untuk penilaian mutu tanah disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan pola hubungan indikator dengan kesehatan tanah dalam daftar tersebut di atas maka penetapan indikator dengan jangkauan luas terhadap sifat-sifat tanah yang mempengaruhi produktivitasnya menjadi sangat penting. Secara teoritis dan pengalaman empiris penulis, indikator mutu tanah yang dianggap memadai dari sifat-sifat tanah adalah kadar bahan organik tanah, tekstur tanah, bobot isi, respirasi tanah, populasi cacing tanah, dan infiltrasi. Selain itu, indikator tanaman yang menunjukkan respon terhadap sifat-sifat tanah terkait adalah kadar klorofil daun dan kerapatan akar tanaman di lapisan atas. Dalam implementasinya, sebuah ilustrasi rumusan solusi untuk mengatasi masalah gangguan kesehatan tanah disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 1. Contoh data minimal indikator untuk mutu tanah (Doran *et al.*, 1996; Larson & Pierce, 1991 & Seybold *et al.*, 1997).

Table 1. Illustrations of minimum indicator data of soil quality (Doran *et al.*, 1996; Larson & Pierce, 1991 & Seybold *et al.*, 1997).

Indikator	Sifat Tanah	Hubungan dengan Kesehatan Tanah
Bahan Organik Tanah	Fisik :	
	• Struktur	• Retensi dan transpor air dan unsur hara, habitat untuk mikroba, dan erosi tanah
	• Tebal solum dan perakaran	• Perkiraan potensi produktivitas tanaman, pemampatan, dan lapisan padat (plow pan)
	• Infiltrasi dan bobot isi	• Pergerakan air, porositas, dan keringanan olah
	• Kapasitas menahan air	• Penyimpanan dan ketersediaan air
	Kimia :	
	• Kemasaman	• Ketersediaan biologi dan unsur hara
	• Konduktivitas listrik	• Pertumbuhan tanaman, aktivitas mikroba, dan tahan terhadap garam
	• NPK terekstrak	• Unsur hara tersedia bagi tanaman dan potensi kehilangan N & P
	Biologi :	
	• C/N biomas mikroba	• Potensi katalitis mikroba dan pengumpulan C & N
	• Potensi mineralisasi N	• Produktivitas tanah dan potensi pasokan N
• Respirasi Tanah	• Ukuran aktivitas mikroba	

Tabel 2. Contoh solusi untuk sebuah masalah mutu tanah.
 Table 2. Some examples for a soil quality problem's solution.

Masalah/Indikator	Kemungkinan Penyebab	Saran Perbaikan
Penyakit Tanaman	<ul style="list-style-type: none"> • Lapisan padat • Tanah jenuh • Masalah Patogen 	<ul style="list-style-type: none"> • Analisis tanah- perbaiki hara & pH • Periksa patogen/hama • Kurangi pemadatan setelah panen
Indikator yg diuji:		
<ul style="list-style-type: none"> • Kesehatan tanaman • Vigor tanaman • Hasil panen 	<ul style="list-style-type: none"> • Defisiensi dan ketidak-seimbangan hara • Bahan organik rendah • Monokultur • Keragaman hayati rendah 	<ul style="list-style-type: none"> • Perbaiki drainase • Tingkatkan residu organik • Gunakan pupuk kandang • Tambahkan LCC • Gunakan rotasi tanaman • Diversifikasi sistem tanaman

Dalam praktek, perbaikan sifat tanah dapat memanfaatkan teknologi yang sudah tersedia mulai yang sederhana hingga yang merupakan hasil riset mutakhir. Teknologi sederhana antara lain dengan aplikasi kompos biomassa tanaman. Sebaliknya, pendekatan bioteknologi terapan telah banyak menawarkan teknik-teknik baru dalam ameliorasi tanah, termasuk bio-ameliorasi untuk perbaikan sifat tanah seperti agregasi dan imobilisasi logam berat (Santi & Goenadi, 2009 & 2010).

Indikator tersebut perlu dikuantifikasi dalam kaitannya dengan kinerja tanaman. Sebagai contoh, nilai bobot isi pada tanah-tanah berpasir, berdebu, dan berklei yang menghambat pertumbuhan akar tanaman masing-masing adalah > 1,8, > 1,65, dan > 1,47 g/cm³ (USDA-NRSC, 2008). Peran penting bobot isi terhadap kinerja beberapa jenis tanaman telah banyak dilaporkan (Goodman & Ennos, 1999; Liu & Shan, 2003; Ji *et al.*, 2013).

Penutup

Mutu tanah merupakan sebuah gambaran menyeluruh tentang kesehatan tanah dalam perannya menjadi tumpuan tumbuh dan produksi tanaman di atasnya. Sifat-sifat tanah terbukti memiliki keterkaitan satu dengan yang lain yang secara integral menentukan daya dukung kesuburannya. Pada gilirannya, dampak dari faktor-faktor termaksud harus dapat tergambar dengan indikator lainnya yang menunjukkan tingkat aktivitas biologi di dalam tanah, seperti cacing tanah dan respirasi tanah. Pemahaman tentang hal ini perlu ditempatkan sebagai landasan untuk mengambil keputusan strategis untuk mengatasi kendala sub-optimalnya sifat tanah, khususnya yang mempengaruhi produksi. Bagaimanapun juga, meskipun metode penetapan sifat tanah sebagai indikator mutu tanah sudah tersedia dan hampir semua dapat ditetapkan di lapang secara cepat (30 menit – 6 jam), tetapi yang

terkait dengan produktivitas belum tersedia, khususnya untuk tanaman perkebunan. Oleh karena itu, kegiatan riset ke depan perlu mencakup formulasi perangkat penetapan mutu tanah yang dapat diterapkan secara mudah, cepat, dan tepat di lapangan.

Sifat tanah yang menjadi kandidat untuk indikator mutu tanah adalah yang memiliki pengaruh penting dalam mempengaruhi aktivitas biologi tanah dan menunjukkan tingkat kesuburan alami tanah secara menyeluruh, seperti kadar bahan organik terlarut tanah, tekstur, bobot isi, respirasi tanah, laju infiltrasi, dan populasi cacing tanah. Untuk melengkapi data sifat tanah tersebut, kadar khlorofil dan kerapatan akar di lapisan atas tanah diperkirakan memiliki hubungan erat dengan sifat-sifat tanah yang digunakan sebagai indikator mutu tanah. Metode ini dapat diterapkan untuk berbagai jenis tanah yang dikaitkan dengan persyaratan tumbuh tanaman terkait secara optimal sehingga dapat dirumuskan solusi yang tepat seperti rekomendasi pemupukan yang efisien. Bagaimanapun juga, batasan kuantitatif untuk indikator yang digunakan sangat tergantung pada jenis tanaman dan saat ini untuk tanaman perkebunan masih perlu ditetapkan.

Daftar Pustaka

- Ainsworth EA (2008). Rice production in a changing climate: a meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration. *Global Change Biol* 14, 1642-1650.
- Ainsworth EA & SP Long(2005). What we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties, and plant production to rising CO₂. *New Phytol* 165, 351-372.
- Bloom AJ, M Burger, RJS Asensio & AB Cousins (2010). Carbon dioxide inhibits nitrate assimilation in wheat and Arabidopsis. *Sci* 328, 899-903.

- Brevik CE (2013). The potential impact of climate change on soil properties and processes and corresponding influence on food security. *Agric* 3(3), 398-417.
- Brinkman R & WG Sombroek (1996). The effect of global change on soil conditions in relation to plant growth and food production. In: F. Bazzaz & W. G. Sombroek (Eds.). *Global Change and Agricultural Production*. New York, JW & Sons. 345p.
- Doran JW, DC Coleman, DF Bezdicek & BA Stewart (1996). *Defining Soil Quality for A Sustainable Environment*. Madison, WI, SSSA Inc.
- Duran J, JL Morse, PM Groffman, JL Campbell, LM Christenson, CT Driscoll, TF Fahey, MC Fisk, MJ Mitchell & PH Templer (2014). Winter climate change affects growing-season soil microbial biomass and activity in northern hardwood forests. *Global Change Biol* 20, 3568-3577.
- Goodman AM & AR Ennos (1999). The effects of soil bulk density on the morphology and anchorage mechanics of the roots systems of sunflower and mize. *Ann Bot* 83, 293-302.
- IPCC (2007). Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK, Cambridge Univ Press.
- Ji B, Y Zhao, X Mu, K Liu & C Li (2013). Effects of tillage on soil properties and root growth of maize in loam and clay central China. *Plant Soil Environ* 59, 295-302.
- Keeling RF, SC Piper, AF Bollenbacher & JS Walker (2009). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: *Trends: A Compendium of Data Global Change*. USDE. Oak Ridge, TN.
- Kernecker M, JK Whalen & RL Bradley (2014). Litter controls earthworm-mediated carbon and nitrogen transformations in soil from temperate riparian buffers. *App Environ Soil Sci* 2014, 12p.
- Larson WE & FJ Pierce (1991). *Conservation and Enhancement of Soil Quality. Evaluation of Sustainable Land Management in the Developing World*. Bangkok, Internat. Board Soil Res Manag.
- Liu W & L Shan (2003). Effect of soil bulk density on the maize growth under different water regimes. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 14, 1906-10.
- McDaniel JP, KA Barbarick, ME Stromberger & W Cranshaw (2013). Survivability of *Aporrectodea caliginosa* in response to drought stress in a Colorado soil. *Soil Sci Soc Am J* 77, 1667-1672.
- Sainju UM, TC-T That, AW Lessen & JL Barsotti (2012). Dryland soil greenhouse gas emissions affected by cropping sequence and nitrogen fertilization. *Soil Sci Soc Am J* 76, 1741-1757.
- Salehi A, N Ghorbanzadeh & E Kahneh (2013). Earthworm biomass and abundance, soil chemical and physical properties under different poplar plantation in the north of Iran *J Forest Sci* 59, 223-229.
- Santi LP & DH Goenadi (2009). Potensi *Pseudomonas fluorescens* strain KTSS untuk bioremediasi merkuri di dalam tanah. *Menara Perkebunan* 77(2), 110-124.
- Santi LP & DH Goenadi (2010). Pemanfaatan *bio-char* sebagai pembawa mikroba untuk pemantap agregat tanah Ultisol dari Taman Bogo-Lampung. *Menara Perkebunan* 78(2), 11-22.
- Seybold CA, MJ Mausbach, DL Karlen & HH Rogers (1997). Quantification of soil quality. In: R Lal *et al.* (Eds.). *Soil Physics and Carbon Cycle*. Washington, DC, CRC Press.
- Siregar HH, NH Darlan & IY Harahap (2013). Pemanfaatan aws di perkebunan kelapa sawit. *Dalam: Workshop Aplikasi Automatic Weather Station untuk Meningkatkan Presisi Manajemen Kebun*. Bogor, PT Riset Perkebunan Nusantara.
- Stott DE, DL Karlen, CA Cambardella & RD Harmel (2013). A soil quality and metabolic activity assessment after fifty-seven years of agricultural management. *Soil Sci Soc Am J* 77, 903-913.
- Taub D (2010). Effects of rising atmospheric concentrations of carbon dioxide on plants. *Nat Edu Knowledge* 3(10), 21.
- Taub D & XZ Wang (2008). Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂? A critical examintaion of the hypotheses. *J Integ Plant Biol* 50,1365-1374.
- University of Toronto (2008). Global warming is changing organic matter. In: *Soil Atmospheric Could Change As A Result. Sci Daily* Nov 28. Toronto, Canada.
- USDA (2001). *Soil Quality Assessment*. Washington, DC SQI-NRCS.
- USDA-NRCS (2008). *Soil Quality Indicators*. Washington, DC. Bulk Density. 2pp. .
- Widjaja,T (2013). Pemanfaatan data iklim pada perkebunan karet. In: *Workshop Aplikasi Automatic Weather Station untuk Meningkatkan Presisi Manajemen Kebun*. Bogor, PT Riset Perkebunan Nusantara.