

Kesehatan Tanah untuk Perkebunan Kelapa Sawit yang Lestari dan Berkelanjutan

Eko Noviandi Ginting

ABSTRAK

Kelapa sawit merupakan komoditi perkebunan penghasil minyak nabati yang memiliki berbagai keunggulan dibanding tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Dengan berbagai keunggulannya tersebut telah berdampak terhadap perkembangan luasan perkebunan kelapa sawit di Indonesia, dimana pada tahun 2017 tercatat total luas perkebunan kelapa sawit sekitar 12 juta hektar. Namun demikian, pencapaian produktivitas minyak kelapa sawit Indonesia (*crude palm oil/CPO*) secara nasional masih rendah, yaitu sekitar 3,2 ton per hektar. Salah satu faktor penyebab rendahnya pencapaian produktivitas nasional tersebut adalah menurunnya kesehatan tanah pada areal-areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia serta kurang tepatnya pengelolaan dan kegiatan kultur teknis yang dilakukan. Salah satu indikasi penurunan kesehatan tanah di perkebunan kelapa sawit adalah menurunnya kandungan bahan organik tanah pada areal-areal perkebunan kelapa sawit, dimana dalam kurun waktu 5 tahun telah terjadi penurunan sekitar 0,21 % C-organik secara rata-rata. Untuk itu diperlukan pemahaman tentang konsep kesehatan tanah di perkebunan kelapa sawit serta bagaimana menjaga dan meningkatkan kesehatan tanah agar perkebunan kelapa sawit Indonesia dapat lestari dan berkelanjutan.

Kata kunci: kesehatan tanah, kelapa sawit, bahan organik

PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan tanaman perkebunan penghasil minyak nabati yang paling produktif per satuan luas (Zimmer, 2010), dengan biaya produksi yang lebih rendah dan memiliki keragaman manfaat yang luas terhadap produk turunan baik untuk bahan makanan maupun bahan oleokimia dibanding tanaman penghasil minyak nabati lainnya (Cock *et al.*, 2016; Pirker *et al.*, 2016). Dengan berbagai keunggulan itu maka tak heran jika perkembangan luas perkebunan kelapa sawit khususnya di Indonesia sangat pesat, dimana sampai dengan tahun 2017 tercatat total luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia sudah mencapai sekitar 12 juta hektar (Direktorat Jenderal Perkebunan Indonesia, 2017). Selain itu, kebutuhan minyak kelapa sawit dunia diperkirakan akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya populasi dunia, dimana pada tahun 2050 diprediksi kebutuhan minyak kelapa sawit mencapai 250 juta ton dari total produksi minyak dan lemak dunia pada tahun 2050 (Corley, 2009; Zulkifli *et al.*, 2017). Namun, berbagai keunggulan yang dimiliki oleh kelapa sawit tersebut tidak membuat perkembangan kelapa sawit berjalan tanpa hambatan, pada faktanya kelapa sawit dihadapkan oleh berbagai kontroversi baik tentang biodiversitas dan perubahan iklim (Carlson *et al.*, 2013; Savilaakso *et al.*, 2014) maupun tentang pencemaran lingkungan sebagai akibat praktik kultur teknis yang dianggap tidak ramah lingkungan akibat penggunaan pupuk kimia dan bahan kimia lainnya secara rutin.

Kelapa sawit umumnya diusahakan pada jenis-jenis tanah yang telah mengalami pelapukan yang lanjut seperti Ultisol dan Oxisol dengan karakteristik tingkat kesuburan yang rendah dan tingkat kemasaman yang tinggi, oleh sebabnya pemupukan menjadi kegiatan yang rutin untuk mendukung pertumbuhan dan produksi kelapa sawit (Comte *et al.*, 2012). Jika diasumsikan bahwa umur ekonomis perkebunan kelapa sawit dalam satu generasi adalah 25 tahun, berarti sampai dengan

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Eko Noviandi Ginting (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamsi No. 51 Medan, Indonesia
Email: eko81_novandy@yahoo.com

tahun 2018 lahan-lahan yang ada di Pulau Sumatera telah digunakan sebagai perkebunan kelapa sawit selama lebih dari 4 generasi karena kelapa sawit pertama sekali diusahakan secara komersial di Indonesia sejak tahun 1911. Hal ini berarti selama lebih dari 100 tahun tanah pada areal tersebut rutin menerima berbagai perlakuan yang berkaitan dengan kultur teknis pemeliharaan kelapa sawit, termasuk pupuk kimia dan pestisida.

Perlu disadari bahwa tanah merupakan suatu ekosistem yang kompleks yang di dalamnya terjadi berbagai proses dan reaksi yang melibatkan faktor biotik dan abiotik yang saling berinteraksi dan saling mempengaruhi satu dengan yang lainnya. Lebih lanjut Keesstra *et al.*, (2016) menyatakan bahwa tanah memiliki fungsi penting dalam hal ketahanan pangan, restorasi lahan, dan mitigasi perubahan iklim. Setidaknya ada 6 fungsi tanah dalam ekosistem yaitu: (1) sebagai media tumbuh tanaman; (2) sebagai sebuah sistem untuk menyaring dan menyediakan air yang bersih; (3) sebagai sebuah sistem dalam siklus hara dan limbah organik; (4) sebagai habitat bagi organisme tanah; (5) sebagai suatu sistem yang terkait dengan atmosfer; dan (6) sebagai media untuk rekayasa (Brady and Weil, 2008). Di dalam tanah juga terdapat kehidupan berbagai organisme tanah yang sangat beragam, baik dari segi ukuran, jenis, dan jumlah, dimana interaksi yang terjadi baik antar organisme maupun organisme dengan lingkungannya berkontribusi terhadap fungsi utama ekosistem tanah, seperti siklus hara, penyerapan karbon, dan memelihara struktur tanah (Bardgett and van der Putten, 2014). Di sisi lain, penggunaan bahan-bahan kimia (pupuk dan pestisida) secara rutin dan tidak tepat dapat memberikan dampak negatif terhadap kehidupan organisme tanah. Sebagai akibatnya, kualitas dan kesehatan tanah pada perkebunan-perkebunan kelapa sawit semakin menurun yang pada akhirnya juga menurunkan kemampuan tanah untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Hal ini salah satunya diindikasikan oleh rendahnya pencapaian rerata produktivitas minyak sawit (CPO/*crude palm oil*) secara nasional. Berdasarkan uraian di atas, maka di dalam tulisan ini akan didiskusikan mengenai konsep kesehatan tanah ditinjau dari sisi biologi tanah serta bagaimana membangun kesehatan tanah di perkebunan kelapa sawit dalam upaya mewujudkan perkebunan kelapa sawit yang lestari dan berkelanjutan.

ASPEK BIOLOGI TANAH SEBAGAI INDIKATOR KESEHATAN TANAH DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Menurut Nelson *et al.*, (2010), kesehatan tanah biasanya dipahami sebagai cerminan kemampuan tanah untuk mempertahankan pertumbuhan tanaman yang sehat dengan menyediakan sumberdaya yang memadai bagi tanaman. Sumberdaya yang dimaksud berupa sumberdaya fisik, air, oksigen, pasokan hara yang seimbang, aktivitas organisme yang menguntungkan, aktivitas patogen yang rendah, dan tidak adanya zat-zat beracun. Kesehatan tanah juga mengacu kepada ketahanan tanah yang merupakan kemampuannya untuk terus menerus menyediakan sumberdaya di masa depan bahkan dalam menghadapi berbagai tekanan. Tingkat kesehatan tanah dapat diukur dengan menggunakan pendekatan penilaian kesehatan tanah yang telah dikembangkan oleh Universitas Cornell dengan cara mengukur sifat fisik, kimia, dan biologi tanah yang merupakan indikator kunci dari kesehatan tanah (Moebius-Clune *et al.*, 2016). Namun dalam makalah ini, kesehatan tanah lebih ditekankan pada sifat biologi tanah karena bersifat lebih dinamis dan sensitif terhadap perubahan lingkungan tanah.

Berbicara mengenai kesehatan tanah, dalam hal ini di perkebunan kelapa sawit, tentu tidak terlepas dari biodiversitas atau keanekaragaman mahluk hidup baik yang berada di permukaan tanah maupun yang berada didalam tanah. Oleh karenanya, perlindungan terhadap fungsi keanekaragaman hayati dan ekosistem yang ada di perkebunan kelapa sawit perlu dipertimbangkan dalam melakukan kegiatan pengelolaan karena keanekaragaman hayati sangat penting untuk keberlanjutan pertanian dan konservasi keanekaragaman hayati (Foster *et al.*, 2011). Lebih jauh lagi menurut Tayleur *et al.*, (2018) manajemen perkebunan kelapa sawit memiliki kewajiban untuk menerapkan praktik-praktik kultur teknis yang ramah lingkungan karena hal tersebut dengan sendirinya dapat membuka peluang permintaan pasar yang besar akan minyak kelapa sawit dan pada akhirnya akan memberikan keuntungan secara ekonomi.

Biota tanah memiliki peran penting untuk banyak fungsi ekosistem penting seperti siklus hara dalam proses dekomposisi bahan organik tanah, penyerapan karbon, dan serapan hara oleh tanaman (Butt *et al.*, 2018). Salah satu biota tanah adalah mikroorganisme tanah yang memiliki peran sangat

penting untuk mendekomposisi berbagai bentuk konstituen organik yang ada di dalam tanah baik berupa residu tanaman, sisa hewan yang mati, dan produk ekskresi dari makhluk hidup. Konstituen organik ini perlu didekomposisi untuk membuatnya tersedia bagi organisme autotrofik. Proses konversi bahan organik menjadi bentuk anorganik sederhana dikenal dengan istilah mineralisasi yang umumnya dilakukan oleh jamur dan bakteri (Gupta and Germina 1988; Xu *et al.* 2015). Gambar 1 mengilustrasikan bagaimana proses mineralisasi bahan organik tanah dalam sistem tanah dan tanaman.

Selain berperan langsung terhadap proses dekomposisi dan mineralisasi bahan organik tanah, mikroorganisme tanah juga memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap ketersediaan dan penyerapan hara oleh tanaman melalui enzim yang diproduksi yang dapat melarutkan hara selama proses mineralisasi dan dekomposisi bahan organik tanah (Ahmadi *et al.*, 2018). Enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme tanah, selanjutnya disebut sebagai enzim tanah, merupakan biokatalisator yang memainkan fungsi penting dalam menjaga ekologi tanah, sifat fisik dan kimia tanah, kesuburan tanah, dan kesehatan tanah (Kumar and Varma, 2011). Enzim tanah sebagai biokatalisator memiliki peran penting dalam meningkatkan kecepatan reaksi kimia spesifik

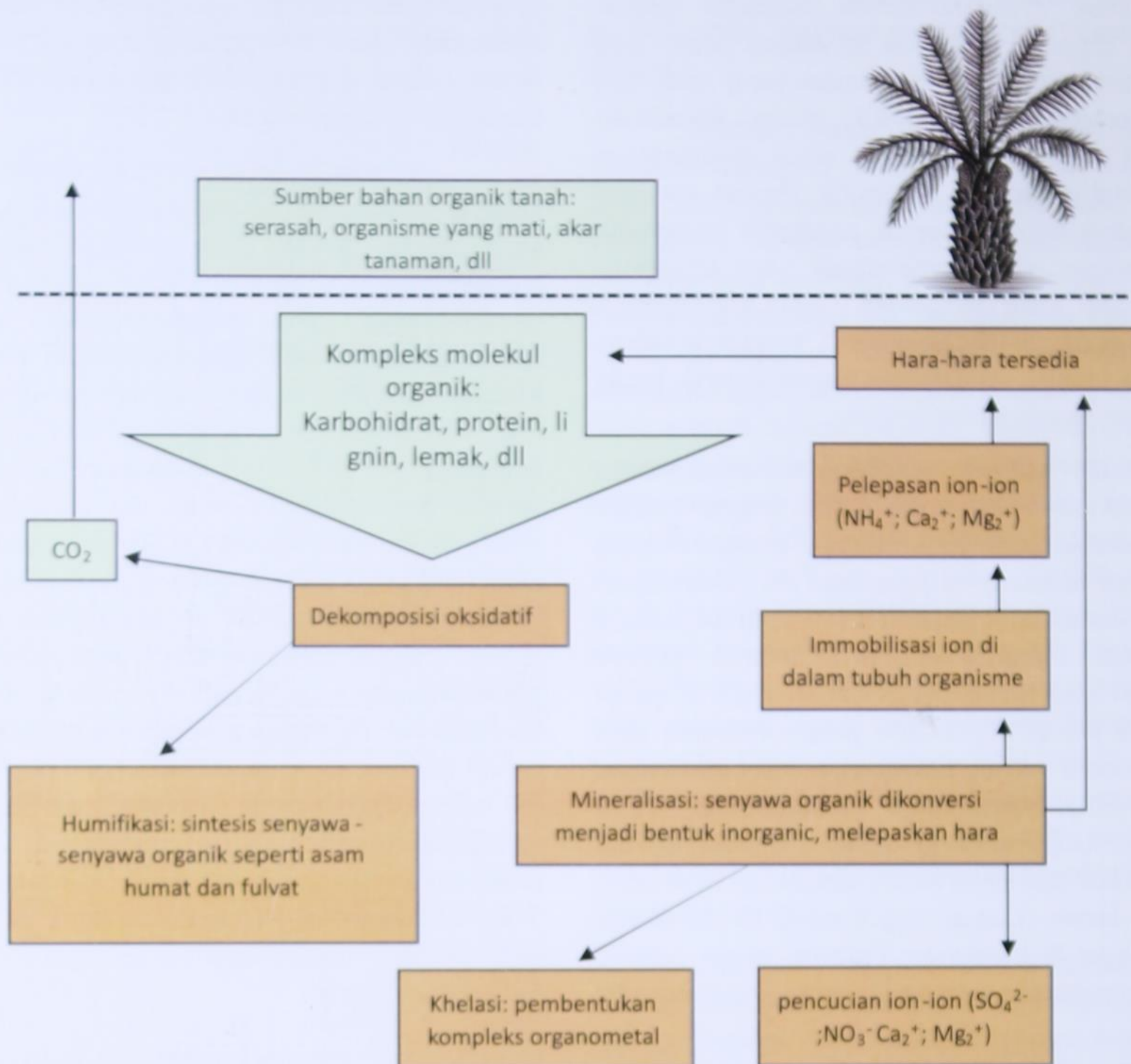
secara nyata. Dengan adanya enzim, energi yang dibutuhkan untuk melangsungkan suatu reaksi kimia tertentu dapat direduksi sehingga proses reaksi dapat berlangsung sangat cepat.

Aktivitas enzim tanah telah banyak digunakan sebagai indikator kesehatan tanah karena perannya yang sangat penting dalam rekasi biokimia yang melibatkan siklus hara di dalam tanah dan tingkat sensitivitasnya yang tinggi terhadap perubahan lingkungan tanah baik akibat perubahan secara alami maupun akibat aktivitas manusia terhadap tanah. Enzim tanah dominannya berasal dari aktivitas dan biomassa mikroba tanah, meskipun terkadang pula berasal dari residu tanaman dan binatang namun dalam jumlah yang relatif kecil. Banyak penelitian yang telah mengungkapkan bagaimana peran enzim tanah terhadap ekosistem tanah, terutama dalam siklus hara di dalam tanah. Sherene (2017) menyatakan bahwa setidaknya ada 4 fungsi penting enzim tanah, yaitu: (i) berperan penting dalam dekomposisi dan transformasi bahan organik; (ii) menyediakan hara bagi tanaman; (iii) berpartisipasi dalam fiksasi N_2 , proses nitrifikasi dan denitrifikasi; dan (iv) berperan dalam detoksifikasi *xenobiotics* seperti pestisida dan limbah industri. Tabel 1 menunjukkan fungsi beberapa jenis enzim tanah dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus hara di dalam tanah.

Tabel 1. Peran beberapa jenis Enzim tanah

Jenis Enzim	Jenis Substrat	Produk Akhir	Kegunaan	Fungsi di dalam tanah
Beta-glucosidase	Senyawa Karbon	Glukosa	Energi untuk mikroorganisme	Dekomposisi bahan organik
FDA hydrolysis	Bahan organik	Karbon dan berbagai hara	Energi dan hara untuk organisme	Dekomposisi bahan organik dan siklus hara
Amidase	Senyawa karbon dan Nitrogen	Amonium (NH_4)	NH_4 tersedia untuk tanaman	Siklus hara
Urease	Nitrogen (urea)	Ammonia (NH_3) dan karbondioksida (CO_2)	NH_4 tersedia untuk tanaman	Siklus hara
Phosphatase	Posfor	Phosphate (PO_4)	P tersedia untuk tanaman	Siklus hara
Sulfatase	Sulfur	Sulfate (SO_4)	S tersedia untuk tanaman	Siklus hara

Sumber: Sherene (2017)



Gambar 1. Ilustrasi proses mineralisasi bahan organik di dalam tanah (diadopsi dari: Sahu *et al.*, 2017).

MEMELIHARA KESEHATAN TANAH DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya, bahwa organisme tanah memiliki peran yang sangat penting dalam proses dekomposisi residu tanaman dan hewan, terlibat dalam siklus biogeokimia unsur hara, termasuk fiksasi nitrogen; berkontribusi pada pembentukan struktur tanah; mengubah bentuk organik dan anorganik yang diterapkan pada tanah dan mengatur produksi dan konsumsi gas rumah kaca di tanah (Manna *et al.*, 2013). Oleh sebab itu, untuk memelihara kesehatan tanah di perkebunan kelapa sawit ada beberapa hal yang dapat dilakukan dan harus diperhatikan khususnya yang berkaitan dengan kegiatan kultur teknis yang rutin dilakukan di perkebunan kelapa sawit. Hal ini dilatar belakangi oleh

tingkat sensitivitas yang tinggi dari organisme tanah terhadap perubahan lingkungan tanah akibat kegiatan kultur teknis tersebut.

Memelihara bahan organik tanah

Walaupun di dalam tanah bahan organik hanya memiliki porsi yang kecil, namun bahan organik memiliki fungsi yang sangat penting di dalam tanah antara lain sebagai sumber makanan dan substrat bagi organisme tanah, penyerap karbon dari atmosfer, memperbaiki struktur tanah, stabilitas agregat tanah, serta meningkatkan kekuatan tanah dalam "memegang" air. Begitu pentingnya bahan organik di dalam tanah sehingga tak jarang kandungan bahan organik tanah dijadikan salah satu tolak ukur untuk menilai kualitas dan kesehatan tanah. Selain itu, aktivitas organisme tanah selalu berkaitan dengan

kandungan bahan organik tanah, hal ini dikarenakan bahan organik tanah merupakan sumber karbon atau sumber energi bagi organisme tanah.

Seperti diketahui bahwa dalam kegiatan budidaya tanaman kelapa sawit sejumlah bio-massa “dikeluarkan” dari areal perkebunan secara rutin dalam kegiatan panen. Sebagai akibatnya, bahan organik tanah semakin terkuras dan tanah semakin miskin akan bahan organik. Gambar 2 menunjukkan perbandingan kandungan bahan organik tanah di beberapa perkebunan kelapa sawit yang ada di Propinsi Sumatera Utara, Indonesia pada tahun 2009 dan 2014. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa dalam kurun waktu 5 tahun umumnya terjadi dinamika kandungan bahan organik dari sekitar 132 titik sampel yang diambil di beberapa perkebunan kelapa sawit, dimana secara umum memperlihatkan kecenderungan menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa memang sangat diperlukan perhatian dan usaha yang serius untuk meningkatkan dan menjaga kandungan bahan organik di perkebunan kelapa sawit dalam kaitannya untuk menjaga kesehatan tanah.

Salah satu produk samping dari pengolahan minyak kelapa sawit yang jumlahnya cukup berlimpah di perkebunan kelapa sawit adalah tandan kosong kelapa sawit. Banyak penelitian yang telah melaporkan pengaruh positif dari aplikasi tandan kosong kelapa sawit terhadap kesuburan tanah, produksi tanaman, juga terhadap fungsi ekosistem tanah. Beberapa dampak positif dari aplikasi tandan kosong kelapa sawit adalah tandan kosong kelapa sawit dapat melepaskan kation-kation basa yang dapat mengurangi pengasaman tanah dan meningkatkan retensi tanah terhadap hara (Bakar *et al.*, 2011; Comte *et al.*, 2013). Aplikasi tandan kosong kelapa sawit juga dapat memperbaiki stabilitas agregat tanah dan menurunkan kepadatan tanah (Moradi *et al.*, 2014a). Hasil penelitian Moradi *et al.*, (2014b) menunjukkan bahwa tandan kosong kelapa sawit dalam proses pelapukannya melepaskan hara N, P, K, Ca, dan Mg dimana proses pelepasan hara tersebut secara umum berlangsung cepat pada 3 bulan pertama dan kecepatannya menurun sampai dengan bulan ke delapan (Tabel 2).



Gambar 2. Perbandingan kandungan C-organik tanah pada tahun 2009 dan 2014 dari beberapa perkebunan kelapa sawit di Sumatera Utara.

Tabel 2. Rerata jumlah hara yang dilepas oleh tandan kosong kelapa sawit selama 8 bulan

Jenis hara	Jumlah hara yang dilepas selama proses dekomposisi (gram/kg)
C	425,13 ± 3,00
N	4,25 ± 0,34
P	0,31 ± 0,10
K	17,99 ± 1,47
Ca	1,30 ± 0,37
Mg	0,86 ± 0,19

Sumber: (Moradi et al., 2014a)

Selain dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, aplikasi tandan kelapa sawit juga terbukti dapat memperbaiki sifat biologi tanah, dimana Tao et al., (2016) mengemukakan bahwa aplikasi tandan kosong kelapa sawit dapat meningkatkan aktivitas organisme tanah dimana peningkatan aktivitas biologi ini berpotensi untuk berkontribusi terhadap fungsi ekosistem seperti dekomposisi serasah, siklus hara, stabilitas karbon organik dan juga pada peningkatan produktivitas tanaman. Selain itu, aplikasi tandan kosong kelapa sawit juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanah terhadap efek perubahan iklim, seperti kekeringan. Lebih lanjut Tao et al., (2018) juga melaporkan bahwa aplikasi tandan kosong kelapa sawit selama 15 tahun di perkebunan kelapa sawit dapat meningkatkan populasi dan aktivitas beberapa organisme tanah. Hasil penelitian Chew dan Rahman (2002) menunjukkan bahwa aplikasi tandan kosong kelapa sawit secara langsung dengan dosis 37,5 ton/hektar/tahun dapat meningkatkan kandungan K, Ca, dan Mg tertukarkan tanah serta memperbaiki pH tanah. Hasil penelitian Tao et al., (2017) juga menunjukkan bahwa blok tanaman yang diaplikasikan tandan kosong kelapa sawit secara rutin selama 15 tahun memiliki produktivitas yang lebih tinggi secara kumulatif dibandingkan dengan blok tanaman yang hanya diaplikasi pupuk kimia.

Di perkebunan kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit dapat diaplikasikan dengan cara aplikasi langsung sebagai mulsa ataupun sebagai kompos setelah melalui proses pengomposan terlebih dahulu. Apabila diaplikasikan langsung biasanya tandan kosong kelapa sawit disusun secara merata satu lapis di antara pohon (gawawan mati), atau dapat juga

disusun mengelilingi pohon di bagian luar piringan pohon (Gambar 3). Namun jika diaplikasikan dalam bentuk kompos maka sebaiknya diaplikasikan dengan cara ditabur merata di dalam piringan pohon (Gambar 4). Adanya beberapa kendala yang mungkin dihadapi oleh manajemen kebun apabila tandan kosong kelapa sawit diaplikasikan langsung dilapangan, diantaranya adalah aplikasinya yang sulit dan mahal serta adanya kemungkinan tumpukan tandan kosong di lapangan menjadi sarang hama dan penyakit. Oleh sebab itu beberapa perkebunan kelapa sawit melakukan pengomposan terhadap tandan kosong kelapa sawit terlebih dahulu sebelum diaplikasikan ke lapangan. Dengan pengomposan selain nilai C/N dapat diturunkan, juga dapat dilakukan pengayaan hara dengan penambahan bahan-bahan bermanfaat lainnya, atau bahkan dapat ditambahkan mikroba bermanfaat. Sabrina et al., (2011) memperlihatkan bahwa kandungan hara pada tandan kosong kelapa sawit yang dikomposkan relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan hara pada tandan kosong kelapa sawit segar (Tabel 3). Hasil penelitian Bessou et al., (2017) menunjukkan bahwa penggunaan kompos tandan kosong kelapa sawit selama 4 tahun berturut-turut dengan dosis 15 ton/ha dapat mereduksi penggunaan pupuk kimia sebesar 15% dan menghasilkan kandungan hara makro serta produksi yang tidak berbeda nyata dengan blok yang menggunakan pupuk kimia sebagai input hara. Penelitian lainnya memperlihatkan penggunaan kompos tandan kosong kelapa sawit sebanyak 10 ton/ha/tahun atau sekitar 70 kg/pohon/tahun dapat mensubsitusi pupuk N dan P serta menghasilkan produksi sekitar 2 ton/ha lebih tinggi dibanding dengan blok tanaman yang menggunakan pupuk kimia pada dosis yang sama (Tohiruddin and Foster, 2013).

Tabel 3. Karakteristik tandan kosong kelapa sawit pada proses pengomposan dengan vermi-kompos (pengomposan dengan menggunakan cacing tanah dan mikroorganisme lain), kompos alami (pengomposan secara alami), dan tanpa pengomposan (tandan kosong yang diperlakukan dengan *rock phosphate*).

Parameter	Tandan Kosong Kelapa sawit		
	Vermi-kompos	Kompos alami	Tanpa pengomposan
Organic C (%)	23.96	23.88	52.27
Total N (%)	1.67	1.54	0.70
pH 1:10 dalam air	8.46	8.54	7.28
Total P (%)	1.48	0.95	0.20
Total K (%)	5.28	4.23	3.16
Humic acid (g/g soil)	0.08	0.04	-

Sumber: Sabrina et al., (2011)



Gambar 3. Aplikasi tandan kosong sawit di piringan pohon (atas) dan di gawangan mati (bawah). Tumpukan tandan kosong sawit yang terlalu tebal berpotensi menimbulkan serangan hama seperti *Oryctes rhinoceros*.



Gambar 4. Proses pengomposan tandan kosong kelapa sawit (kiri) dan aplikasi kompos tandan kosong kelapa sawit di dalam piringan pohon (kanan).

Memelihara keanekaragaman tanaman penutup tanah

Tanaman penutup tanah (*cover crop*) telah lama diketahui memiliki banyak manfaat seperti menjaga kelembaban tanah, membantu fiksasi N bebas dari udara, mencegah erosi dan memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah serta sebagai tempat berkembangnya musuh alami hama kelapa sawit. Pada pengelolaan perkebunan kelapa sawit tanaman penutup tanah umumnya ditanam pada masa tanaman belum menghasilkan (TBM) dan biasanya dipertahankan selama tiga tahun sampai tanaman kelapa sawit memasuki masa tanaman menghasilkan (TM). Namun ketika tanaman kelapa sawit memasuki masa TM, tanaman penutup tanah jarang mendapat perhatian atau bahkan tak jarang ditemukan dalam manajemen kebun, tanaman penutup tanah dengan sengaja dibasmi dengan alasan mengendalikan gulma atau untuk menghemat biaya pemeliharaan khususnya biaya pengendalian gulma. Menurut Baligar and Fageria, (2007) tanaman penutup tanah bukan saja harus dari golongan tanaman *legume*, tetapi dapat juga dari golongan *non-legume*, yang terpenting adalah tanaman penutup tanah tersebut tidak menjadi pesaing bagi tanaman utama.

Penggunaan tanaman penutup tanah dalam dunia pertanian merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan kesehatan tanah, mereduksi polusi lingkungan, dan meningkatkan hasil pertanian (Fageria *et al.*, 2005). Banyak penelitian yang telah membuktikan manfaat tanaman penutup tanah, salah satunya adalah hasil penelitian Ariyanti *et al.*, (2015) yang memperlihatkan bahwa tanaman penutup tanah

Nephrolepis bisserata Kuntze dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah di perkebunan kelapa sawit (Tabel 4). Lebih lanjut Othman *et al.*, (2012) juga mengungkapkan bahwa tanaman penutup tanah juga memberikan pengaruh yang positif terhadap pertumbuhan vegetatif dan produksi tanaman kelapa sawit (Tabel 5). Salah satu manfaat dari tanaman penutup tanah khususnya di perkebunan kelapa sawit yang jarang dibahas adalah fungsinya sebagai "penjaga" ekosistem tanah di perkebunan kelapa sawit. Di dalam tanah, perkembangan dan aktivitas organisme tanah dibatasi oleh ketersediaan C (karbon), terutama dalam bentuk yang mudah tersedia (Marchner, 2012), dimana banyak bentuk C yang mudah tersedia tersebut banyak ditemukan di daerah tanah lapisan atas khususnya pada daerah perakaran tanaman. Itu sebabnya mengapa aktivitas organisme tanah umumnya banyak ditemukan di daerah perakaran tanaman atau dikenal dengan istilah *rhizosphere* (Drenovsky *et al.*, 2004; Kuzyakov and Blagodatskaya, 2015; Pausch and Kuzyakov, 2011).

Di *rhizosphere* terjadi interaksi antara akar tanaman dengan organisme tanah, dimana akar tanaman akan menghasilkan eksudat seperti asam amino, karbohidrat, asam karboksilik, (Farrar *et al.*, 2003; Fischer *et al.*, 2007) dan musigel yang dapat menstimulasi aktivitas mikroba tanah dan mikroba tanah akan menghasilkan berbagai enzim. Eksudat-eksudat akar ini menyediakan energi untuk aktivitas mikroorganisme dan memicu berkumpulnya mikroorganisme di daerah perakaran. Selanjutnya keberadaan eksudat akar akan mengubah sifat biofisik dan biokimia tanah yang pada gilirannya akan mendukung aktivitas mikroba tanah. Eksudat akar



terdiri dari senyawa dengan berat molekul yang rendah yang merupakan sumber karbon yang mudah terdegradasi untuk mikroorganisme serta senyawa dengan berat molekul yang tinggi yang lebih lambat dikonsumsi oleh mikroorganisme, seperti sel akar mati, *lysates*, dan *mucilage* (Kuzyakov, 2002; Walker *et al.*, 2003). Dinesh *et al.*, (2009) juga mengemukakan bahwa tanaman penutup tanah menghasilkan eksudat berupa substrat-substrat yang dibutuhkan mikroorganisme tanah untuk menghasilkan enzim-enzim yang bermanfaat. Eksudat akar merupakan sumber karbon yang memberikan pengaruh signifikan di dalam tanah, lebih dari 50% hasil fotosintesis

tanaman dikeluarkan ke daerah perakaran sebagai eksudat (van Dam and Bouwmeester, 2016). Gambar 5 mengilustrasikan bagaimana interaksi yang terjadi antara tanaman dengan organisme lainnya di daerah perakaran melalui komunikasi kimia yang dilakukan. Dari penjelasan di atas tentang pentingnya tanaman penutup tanah dalam kaitannya dengan menjaga kesehatan tanah, maka manajemen perkebunan kelapa sawit dalam sistem manajemennya perlu membuat kebijakan untuk mempertahankan tanaman penutup tanah, tidak saja pada masa TBM namun juga pada masa TM.

Tabel 4. Sifat fisik dan kimia tanah antara areal yang ditanami dengan tanaman penutup tanah *Nephrolepis bisserata* Kuntze dengan areal yang tidak ditanami tanaman penutup tanah.

Perlakuan	BD (g/cm ³)	Porositas (%)	Permeabilitas (cm/jam)	pH	C-organik (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	C/N
Kontrol	0,91	65,79	17,62	4,20	2,15	0,19	129,02	64,56	11,32
N. Bisserata	1,00	62,10	4,93	4,40	2,39	0,23	215,60	86,91	10,39

Tabel 5. Pengaruh tanaman penutup tanah terhadap performa tanaman kelapa sawit

Perlakuan	Pertumbuhan vegetative			Produktivitas (ton/ha/tahun)
	Panjang Rachis (cm)	Tinggi Tanaman (cm)	Petiole Cross Section (cm ²)	
C1	393,5	60,7	0,167	13,58
C2	402,5	67,2	0,183	15,24
C3	409,7	68,9	0,179	15,11
C4	415,1	66,8	0,177	14,85

Sumber: Othman *et al.*, (2012)

Keterangan: C1: tanpa cover crop; C2: *Pueraria javanica* + *Centrosema Pubescens* + *Colopogonium caeruleum* (4:3:1 kg/ha); C3: *Mucuna brachateata* (320 benih/hektar); C4: *Mucuna brachateata* + *Pueraria javanica* + *Centrosema Pubescens* (320 benih/ha : 3 : 1 kg/ha).

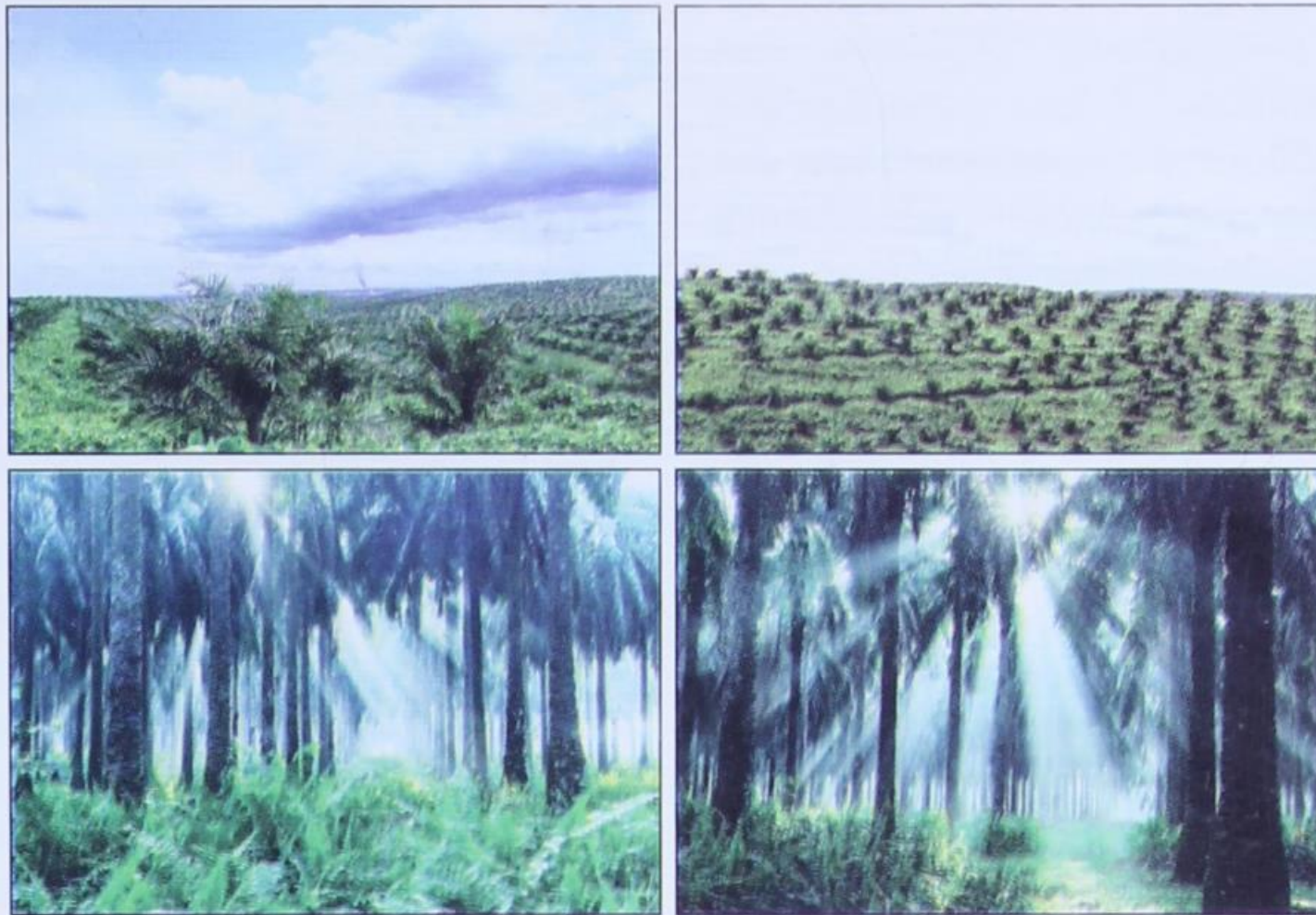


Sumber: (van Dam and Bouwmeester, 2016)

Gambar 5. Komunikasi secara kimia antara tanaman dengan organisme lainnya di daerah perakaran. (A) Eksudat berupa asam phenolic untuk menghambat perkecambahan atau pertumbuhan tanaman lainnya (*allelopathy*); (B) larva serangga yang makan di akar menginduksi produksi bahan-bahan yang bersifat volatil, seperti senyawa yang mengandung belerang atau *terpene E-β-caryophyllene*, menarik nematoda entomopatogenik; (C) eksudat akar yang mempengaruhi kolonisasi dan menginisiasi pembentukan bintil akar oleh rhizobia; (D) eksudat akar menginduksi penetasan nematoda kista dan menarik nematoda remaja ke arah akar; (E) tudung akar yang berada di ujung akar adalah tempat eksudasi paling aktif; (F) *strigolactones* dalam eksudat akar menginduksi percabangan hifa dalam jamur mikoriza arbuskular, suatu proses yang diperlukan untuk kolonisasi; dan (G) perkecambahan tanaman parasit diinduksi oleh *strigolactones* dalam eksudat akar inang mereka.



Gambar 6. Tanaman belum menghasilkan yang ditanam tanpa tanaman penutup tanah (atas) dan areal tanaman menghasilkan tanpa tanaman penutup tanah (bawah).



Gambar 7. Tanaman belum menghasilkan yang ditanam dengan tanaman penutup tanah (atas) dan areal tanaman menghasilkan dengan tanaman penutup tanah yang tetap di pelihara (bawah)

Penggunaan pestisida secara bijaksana

Istilah pestisida dalam makalah ini mencakup beberapa bahan kimia yang biasa digunakan di perkebunan kelapa sawit, meliputi insectisida, fungisida, herbisida, rodentisida, nematisida, dan bahan kimia lainnya. Dalam praktik kultur teknis kelapa sawit, penggunaan bahan-bahan kimia termasuk pestisida memang tidak dapat dihindari karena memang sangat dibutuhkan terutama penggunaan Herbisida untuk pengendalian gulma. Menurut Page dan Lord (2006), umumnya di perkebunan kelapa sawit pestisida yang digunakan dominan dalam bentuk herbisida yaitu sekitar 90% dari seluruh jenis pestisida. Namun demikian, penggunaan herbisida secara tidak bijaksana tentu saja akan memberikan dampak buruk dengan mencemari air dan dapat menimbulkan

ancaman bagi ekosistem alami dan kesehatan manusia (Schiesari and Grillitsch, 2011; Comte *et al.*, 2012). Salah satu contoh penggunaan herbisida secara tidak bijaksana yang sering ditemukan di perkebunan kelapa sawit adalah pengendalian gulma dengan sistem *blanket* yaitu dengan “memusnahkan” seluruh tumbuhan yang ada di areal perkebunan dengan menggunakan herbisida (Gambar 8) (Tohiran *et al.*, 2017). Penggunaan sistem ini diduga disebabkan oleh kurangnya pengetahuan manajemen kebun akan pentingnya tanaman penutup tanah sehingga menganggap seluruh tumbuhan yang ada di areal kelapa sawit merupakan pesaing tanaman kelapa sawit dalam menyerap hara, dan keinginan manajemen kebun untuk menghemat biaya pengendalian gulma.



Gambar 8. Pengendalian gulma dengan sistem *blanket* di perkebunan kelapa sawit yang dapat berdampak negatif terhadap keanekaragaman tumbuhan penutup tanah dan keragaman hayati tanah.

Walaupun penggunaan pestisida dan herbisida sangat dibutuhkan di perkebunan kelapa sawit, namun penggunaannya secara berlebihan dan terus menerus dapat menyebabkan menurunnya kualitas tanah bahkan dapat merusak tanah dan lingkungan di sekitarnya. Niti *et al.*, (2013) menyatakan bahwa sebagian besar pestisida yang diaplikasikan di lahan pertanian tidak "menyentuh" organisme target dengan tepat, sebagian dari pestisida tersebut terakumulasi di dalam tanah, tersebar di air dan udara serta terdeteksi di makanan yang di konsumsi manusia. Bahkan penggunaan herbisida sebagai bahan pengendali gulma dapat mempengaruhi kehidupan organisme tanah dimana Zain *et al.*, (2013) mengungkapkan bahwa penggunaan herbisida dengan bahan aktif *Paraquat*, *Glyphosate*, *Glufosinate-ammonium* dan *metsulfuron-methyl* dapat menyebabkan efek penghambatan yang cukup signifikan terhadap pertumbuhan populasi jamur, bakteri, dan *Actinomycetes* di dalam tanah.

Beberapa hasil penelitian membuktikan bahwa pengurangan penggunaan herbisida dan dengan mempertahankan keanekaragaman tumbuhan yang ada di areal perkebunan kelapa sawit dapat meningkatkan keanekaragaman organisme dengan cara menyediakan habitat tambahan dan sumber makanan bagi berbagai organisme (Chung *et al.*, 2000; Ashrafet *et al.*, 2018; Spear *et al.*, 2018). Hasil penelitian Ashton-Butt *et al.*, (2018) juga menunjukkan bahwa reduksi penggunaan herbisida dan memelihara keanekaragaman tumbuhan penutup tanah dapat meningkatkan keanekaragaman mikroorganisme di dalam tanah serta memelihara fungsi ekosistem perkebunan kelapa sawit. Berdasarkan hal tersebut maka manajemen perlu menerapkan suatu sistem tentang penggunaan pestisida dengan benar dan bijaksana. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan pestisida (termasuk herbisida) antara lain adalah: (1) menentukan jenis hama atau gulma yang menjadi target serta mengidentifikasi siklus hidup dan populasi dari gulma atau hama yang menyerang; (2) setelah hama atau gulma target teridentifikasi maka tentukan jenis pestisida (bahan aktif) yang akan digunakan atau dengan kata lain pestisida yang dipilih bersifat spesifik target; (3) cari waktu yang tepat untuk aplikasi pestisida, waktu disini berkaitan dengan iklim dan siklus hidup serta jumlah populasi dari gulma atau hama target, untuk itu diperlukan pengamatan rutin terhadap siklus hidup,

populasi, tingkat kerusakan yang ditimbulkan; dan (4) aplikasi pestisida dilakukan dengan tepat cara dan dosis atau konsentrasi, biasanya tercantum pada label kemasan pestisida. Dengan demikian penggunaan pestisida di perkebunan kelapa sawit dapat efektif dan efisien sehingga kelestarian dan fungsi ekosistem di perkebunan kelapa sawit dapat tetap terjaga.

PENUTUP

Kelapa sawit merupakan tanaman perkebunan penghasil minyak nabati dengan produktivitas per satuan luas yang tertinggi dibanding dengan tanaman penghasil minyak nabati lainnya. Hal tersebut menjadi salah satu alasan mengapa perkembangan perkebunan kelapa sawit, khususnya di Indonesia menjadi sangat pesat. Di Indonesia, perkebunan kelapa sawit sudah diusahakan lebih dari 4 generasi, yang artinya sudah lebih dari satu abad tanah-tanah di Indonesia, khususnya di Sumatera di usahakan secara terus menerus untuk perkebunan kelapa sawit. Hal tersebut menyebabkan kualitas dan kesehatan tanah di areal perkebunan kelapa sawit menjadi menurun yang di indikasikan dengan semakin menurunnya kandungan bahan organik tanah. Selain itu, semakin terbatasnya areal-areal yang memiliki daya dukung yang tinggi terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman kelapa sawit telah menyebabkan dimanfaatkannya lahan-lahan marginal yang umumnya memiliki tingkat kesuburan yang rendah sebagai perkebunan kelapa sawit. Kondisi ini baik secara langsung maupun tidak langsung ikut berkontribusi terhadap rendahnya pencapaian produktivitas kelapa sawit nasional. Di sisi lain, kegiatan kultur teknis yang tidak tepat selain dapat menyebabkan terjadinya penurunan kesehatan tanah di perkebunan kelapa sawit juga berpotensi menjadi titik yang rentan terhadap serangan isu-isu negatif yang ditujukan kepada kelapa sawit, terutama dari sisi lingkungan. Untuk itu, manajemen di perkebunan kelapa sawit perlu membuat kebijakan dalam sistem pengelolaan perkebunannya untuk memperhatikan kesehatan tanah. Beberapa titik berat kebijakan yang dapat dibuat adalah dengan tetap menjaga keanekaragaman tanaman penutup tanah terutama pada areal TM, memelihara kandungan bahan organik tanah, penggunaan pestisida secara tepat dan bijaksana, serta melakukan pemupukan secara tepat dan berimbang sehingga keanekaragaman hayati di perkebunan kelapa sawit dapat tetap terjaga. Akhirnya, dengan menjaga kesehatan tanah di perkebunan

kelapa sawit maka tanah akan mampu mendukung pertumbuhan dan pencapaian produksi kelapa sawit yang berkelanjutan serta menjalankan fungsinya dengan baik dalam suatu ekosistem kehidupan sebagai penyedia air dan udara yang bersih dan sehat serta banyak fungsi lainnya yang akan memberikan dampak yang positif terhadap kehidupan manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, K., S. Bahar., Razavi, M. Maharjan, Y. Kuzyakov., J. Stanley., Kostka., A. Carminati., M. Zarebanadkouki. 2018. Effects of rhizosphere wettability on microbial biomass, enzyme activities and localization. *Rhizosphere* 7 (2018) 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.06.010>
- Ariyanti, M., S. Yahya., K. Murti Laksono., Suwanto, and H.H. Siregar. 2015. Study of the Growth of *Nephrolepis biserrata* Kuntze and Its Utilization as Cover Crop Under Mature Oil Palm Plantation. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)* (2015) Volume 19, No 1, pp 325-333
- Ashraf, M., R. Zulkifli., R. Sanusi., R. K.A. Tohiran., R. Terhem., R. Moslim. 2018. Alley-cropping system can boost arthropod biodiversity and ecosystem functions in oil palm plantations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 260, 19–26. doi: 10.1016/j.agee.2018.03.017
- Ashton-Butt, A., A.A.K. Aryawan., A.S.C. Hood., M. Naim., D. Purnomo., Suhardi., R. Wahyuningsih., S. Willcock., Guy M. Poppy., J.P. Caliman., E.C. Turner., W.A. Foster., K.S.-H. Peh and J.L. Snaddon. 2018. Understory Vegetation in Oil Palm Plantations Benefits Soil Biodiversity and Decomposition Rates. *Front. For. Glob. Change* 1:10. doi: 10.3389/ffgc.2018.00010
- Bakar, R.A., S.Z. Darus., S. Kulaseharan., N. Jamaluddin. 2011. Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 89, 341–349. <http://dx.doi.org/10.1007/s10705-010-9398-9>.
- Brady, N.C., and R.R. Weil. 2008. The nature and properties of soils, 14th edn. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Bessou, C., A. Verwilghen., L. Beaudoin-Ollivier., R. Marichal., J.Ollivier., V. Baron., X. Bonneau., Marc-Philippe Carron., D. Snoeck., Mohd. Naim., A. A. K. Aryawan., F. Raoul., P. Giraudoux., E. Surya., E. Sihombing., and J.P. Caliman. 2017. Agroecological practices in oil palm plantations: examples from the field. *EDP Sciences*. www.ocl-journal.org. DOI: 10.1051/ocl/2017024.
- Bardgett, R.D., van der Putten, W.H., 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. *Nature* 515, 505–511. <http://dx.doi.org/10.1038/nature13855>.
- Baligar, V.C., and N.K. Fageria. 2007. Agronomy and physiology of Tropical Cover Crops. *Journal of Plant Nutrition*, 30: 1287-1339.
- Chiew, L.K., and Z.A. Rahman. 2002. The Effects Oil Palm Empty Fruit Bunches On Oil Palm Nutrition And Yield, And Soil Chemical Properties. *Journal of Oil Palm Research* Vol. 14 No. 2. P 1-9.
- Chung, A. Y. C., P. Eggleton., M.R. Speight., P.M. Hammond., and V.K.Chey. 2000. The diversity of beetle assemblages in different habitat types in Sabah, Malaysia. *Bull. Entomol. Res.* 90, 475–496. doi: 10.1017/S0007485300000602
- Cock, J., S.P. Kam., S. Cook. 2016. Learning from commercial crop performance: Oil palm yield response to management under well-defined growing conditions. *Agric Syst* 149: 99–111.
- Comte, I., F. Colin., J.K. Whalen., O. Grünberger., and J.P. Caliman. 2012. Agricultural practices in oil palm plantations and their impact on hydrological changes, nutrient fluxes and water quality in Indonesia: a review. *Adv. Agron.* 116, 71–124. doi: 10.1016/B978-0-12-394277-7.00003-8
- Comte, I., F. Colin., O. Grünberger., S. Follain., J.K. Whalen., J.P. Caliman. 2013. Landscape-scale assessment of soil response to long-term organic and mineral fertilizer application in an industrial oil palm plantation, Indonesia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 169, 58–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.010>.
- Corley, R.H.V., 2009. How much palm oil do we need? *Environ. Sci. Policy* 12, 134–139. doi: 10.1016/j.envsci.2008.10.011.
- Dinesh, R., S.G. Chaudhuri., T.E. Sheeja., and K.N. Shiva. 2009. Soil microbial activity and biomass is stimulated by leguminous cover crops. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172: 288-296.

- Direktorat Jenderal Perkebunan Indonesia. 2017. Statistik Perkebunan Indonesia. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan. Kementerian Pertanian.
- Drenovsky, R.E., D. Vo., K.J. Graham., K.M. Scow. 2004. Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition. *Microb. Ecol.* 48, 424–430. <https://doi.org/10.1007/s00248-003-1063-2>.
- Farrar, J., M. Hawes., D. Jones., S. Lindow. 2003. How roots control the flux of carbon to the rhizosphere. *Ecology* 84, 827–837. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2003\)084\[0827:HRCTFO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2003)084[0827:HRCTFO]2.0.CO;2).
- Fageria, N. K., V. C. Baligar, and B. A. Bailey. 2005. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 36:2733–2757.
- Fischer, H., A. Meyer., K. Fischer., Y. Kuzyakov. 2007. Carbohydrate and amino acid composition of dissolved organic matter leached from soil. *Soil Biol. Biochem.* 39, 2926–2935. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.014>.
- Foster, W. A., J.L. Snaddon., E.C. Turner., T.M. Fayle., T.D. Cockerill., M.D. Farnon Ellwood. 2011. Establishing the evidence base for maintaining biodiversity and ecosystem function in the oil palm landscapes of South East Asia. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 366, 3277–3291. doi: 10.1098/rstb.2011.0041
- Gupta, V.V.S.R., R.E. Farrell., J.J. Germida. 1993. Activity of arylsulphatases in Saskatchewan soils. *Can J Soil Sci* 73:341–347
- Keesstra, S., P. Pereira., A. Novara., E.C. Brevik., C. Azorin-Molina., L. Parras-Alcántara, A. Jordán., A. Cerdà. 2016. Effects of soil management techniques on soil water erosion in apricot orchards. *Sci. Total Environ.* 551–552, 357–366. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.182>.
- Kuzyakov, Y., 2002. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 382–396. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<382::AID-JPLN382>3.0.CO;2-#).
- Kuzyakov, Y., and E. Blagodatskaya. 2015. Microbial hotspots and hot moments in soil: concept & review. *Soil Biol. Biochem.* 83, 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025>.
- Manna, MC., S. Rao., and A. Mandal. 2013. Maintenance of soil biological health under different crop production systems. *Ind.J.Soil Cons.* 41(2): 127–135, 2013.
- Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants^{3rd} ed: Rhizosphere Biology. Academic Press Elsevier Ltd.
- Moebius-Clune, B.N., B.K. Gugino., O.J. Idowu., R.R. Schindelbeck., A.J. Ristow., H.M. van Es., J.E. Thies., H.A. Shayler., M.B. McBride., K.S.M. Kur., D.W. Wolfe., and G.S. Abawi. 2016. Comprehensive assessment of soil health: The Cornell framework manual, 3rd edn. Available at: <https://soilhealth.cals.cornell.edu/testing-services/comprehensive-soil-health-assessment/>.
- Moradi, A., C.B.S. Teh., K.J. Goh., M.H.A. Husni., C.F. Ishak., C.TB. Sung., G.K. Joo., M.A.H. Hanif., C.F. Ishak. 2014a. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil Tillage Res.* 145, e62–e71. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2012.0120>.
- Moradi, A., C.B.S. Teh., K.J. Goh., M.H.A. Husni., C.F. Ishak. 2014b. Decomposition and nutrient release temporal pattern of oil palm residues. *Ann. Appl. Biol.* 164, 208–219. <http://dx.doi.org/10.1111/aab.12094>.
- Nelson, P.N., M.J. Webb., I. Orrell., H. van Rees., M. Banabas., S. Berthelsen., M. Sheaves., F. Bakani., O. Pukam., M. Hoare., W. Griffiths., G. King., P. Carberry., R. Pipai., A. McNeill., P. Meekers., S. Lord., J. Butler., T. Pattison., J. Armour., and C. Dewhurst. 2010. Environmental sustainability of oil palm cultivation in Papua New Guinea. ACIAR Technical Reports No. 75. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. 66 pp.
- Niti, C., S. Sunita., K. Kamlesh., K. Rakesh. 2013. Bioremediation: An emerging technology for remediation of pesticides. *Res. J. Chem. Environ* 17, 88–105.
- Othman, H., F.M. Darus., and Z. Hasim. 2012. Best Management Practices for Oil Palm Cultivation

- on Peat: *Mucuna bracteata* as ground cover crop. MPOB Information series. MPOB TT No.501
- Page, B., and S. Lord. 2006. The oil palm industry's approach to the use of pesticides in Papua New Guinea. *Planter* 82:13–21.
- Pausch, J., and Y. Kuzyakov. 2011. Photoassimilate allocation and dynamics of hotspots in roots visualized by ^{14}C phosphor imaging. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 174, 12–19. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900271>.
- Pirker, J., A. Mosnier., F. Kraxner., P. Havlík., M. Obersteiner. 2016. What are the limits to oil palm expansion? *Glob Environ Change* 40: 73–81
- Sabrina, D.T., M.M Hanafi., T.M.M. Mahmud., A.A.N. Azwady. 2011. Evaluation of nutrients released from phosphorus-enriched empty oil palm fruit bunches as growing media using *setaria splendida*. *Compost Sci. Util.* 19 (1), 61–68.
- Sahu, N.D., Vasu, A. Sahu, N. Lal, and S.K. Singh. 2017. Strength of Microbes in Nutrient Cycling: A Key to Soil Health. *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture*, DOI: 10.1007/978-981-10-5589-8_4.
- Savilaakso, S., C. Garcia., and J. Garcia-Ulloa. 2014. Systematic review of effects on biodiversity from oil palm production. *Environ Evidence* 3(1): 4.
- Schiesari, L., and B. Grillitsch. 2011. Pesticides meet megadiversity in the expansion of biofuel crops. *Front. Ecol. Environ.* 9:139. doi: 10.1890/090139
- Sherene, T. 2017. Role of Soil Enzymes in Nutrient Transformation: A Review. *Bio Bulletin*. Vol. 3(1): 109-131
- Spear, D. M., W.A. Foster., A.D. Advento., M. Naim., J.P. Caliman., S. Luke. 2018. Simplifying understory complexity in oil palm plantations is associated with a reduction in the density of a cleptoparasitic spider, *Argyrodes miniaceus* (Araneae: Theridiidae), in host (Araneae: Nephilinae) webs. *Ecol. Evol.* 8, 1595–1603. doi: 10.1002/ece3.3772
- Tao, H.H., L. Jake., Snaddon., M. Eleanor., Slade, L. Henneron., J.P. Caliman., J. K. Willis. 2018. Application of oil palm empty fruit bunch effects on soil biota and functions: A case study in Sumatra, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 256 (2018) 105–113
- Tao, H.H., L. Jake., Snaddon., M. Eleanor., Slade, L. Henneron., J.P. Caliman., R. H. Widodo., Suhardi., J.K. Willis. 2017. Long-term residue application maintains oil palm yield and temporal stability of production. *Agron. Sustain. Dev.* 37:33. DOI 10.1007/s13593-017-0439-5
- Tayleur, C., A. Balmford., G.M. Buchanan., S.H.M. Butchart., C. Corlet Walker., and H. Ducharme. 2018. Where are commodities crops certified, and what does it mean for conservation and poverty alleviation? *Biol. Conserv.* 217, 36–46. doi: 10.1016/j.biocon.2017.09.024
- Tohiruddin, L., H.L. Foster. 2013. Superior effect of compost derived from palm oil mill by-products as a replacement for inorganic fertilisers applied to oil palm. *J Oil Palm Res* 25(1): 123–137.
- Tohiran, K. A., F. Nobilly., R. Zulkifli., T. Maxwell., R. Moslim., and B. Azhar. 2017. Targeted cattle grazing as an alternative to herbicides for controlling weeds in bird-friendly oil palm plantations. *Agron. Sustain. Dev.* 37:62. doi: 10.1007/s13593-017-0471-5
- van Dam, N.M. and H. J. Bouwmeester. 2016. Metabolomics in the Rhizosphere: Tapping into Belowground Chemical Communication. *Trends in Plant Science*, March 2016, Vol. 21, No. 3 <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.008>
- Walker, T.S., H.P. Bais., E. Grotewold., J.M. Vivanco. 2003. Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiol.* 132, 44–51. <https://doi.org/10.1104/pp.102.019661>.
- Xu, Z., and G. Yu. 2015. The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationship with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai mountain. *Appl Soil Ecol* 86:19–29
- Zain, N.M.M., R.B. Mohamad., K. Sijam., Md.M. Morshed., and Y. Awang. 2013. Effects of selected herbicides on soil microbial populations in oil palm plantation of Malaysia: A microcosm experiment. *African Journal of Microbiology Research* Vol. 7(5), pp. 367-374. DOI: 10.5897/AJMR12.1277
- Zimmer, Y. 2010. Competitiveness of rapeseed, soybeans and palm oil. *J. Oilseed Brassica* 1, 84–90.