

## PENTINGNYA BAHAN ORGANIK UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI DAN EFEKTIVITAS PEMUPUKAN DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Eko Noviandi Ginting

**Abstrak** - Sumber bahan organik di perkebunan kelapa sawit cukup besar, utamanya tandan kosong sawit (TKS) dan Palm Oil Mill Effluent (POME), yang merupakan produk samping dari pengolahan TBS di pabrik kelapa sawit. Sayangnya sejauh ini perhatian pekebun kelapa sawit terhadap pemanfaatan bahan organik di perkebunan kelapa sawit hanya dititik beratkan pada pengaruh langsung bahan organik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman yaitu terhadap kandungan hara yang ada pada bahan organik tersebut. Padahal, bahan organik memiliki peranan yang lebih penting dari hanya sekedar sebagai sumber hara, yaitu peranannya terhadap perbaikan kualitas tanah agar tanah memiliki kapasitas yang tinggi untuk menyediakan hara bagi tanaman sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemupukan. Telah banyak hasil penelitian yang mengungkapkan bahwa bahan organik dapat memperbaiki efisiensi dan efektivitas pemupukan melalui perannya dalam memperbaiki kualitas tanah. Dalam tulisan ini diuraikan secara ringkas bagaimana mekanisme bahan organik dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemupukan. Dari sifat fisik kimia misalnya, bahan organik berperan dalam memperbaiki struktur tanah sehingga tanah sebagai media tumbuh memberikan kondisi aerasi perakaran yang baik untuk mendukung perkembangan akar tanaman. Dari sifat kimia tanah, bahan organik berperan untuk meningkatkan KTK tanah sehingga hara yang diaplikasikan lewat pupuk tidak segera hilang tercuci dan dapat diserap oleh akar tanaman. Sementara itu dari sifat biologi tanah, bahan organik merupakan sumber energi bagi biota tanah untuk melakukan berbagai aktivitasnya di dalam tanah, disamping sebagai penghasil enzim, hormon, dan senyawa-senyawa organik yang mempengaruhi dinamika dan ketersediaan hara di dalam tanah.

**Kata kunci:** bahan organik, kelapa sawit, pemupukan, efisiensi pemupukan

### PENDAHULUAN

Kelapa sawit membutuhkan input hara yang rutin dan cukup besar untuk mendukung pertumbuhan dan produktivitas yang tinggi, terutama apabila diusahakan pada jenis tanah dengan tingkat kesuburan yang rendah (Pauli et al., 2014; Suprihatin & Waluyo, 2015). Sebagai contoh, untuk produktivitas lebih dari 28 ton TBS/ha/tahun dibutuhkan pupuk sekitar 124 kg N/ha/tahun (Choo et al., 2011), sementara secara umum untuk tanaman menghasilkan (TM) kebutuhan hara N berkisar antara 56 - 206 kg N/ha/tahun (Pardon et al., 2016; Yusoff & Hansen, 2007; Foster, 2003). Lebih lanjut, Goh et al., (1999) menyatakan bahwa untuk menghasilkan TBS sebesar 30 ton/ha dibutuhkan hara setidaknya 162,5 kg N; 21,6 kg P; 279,2 kg K; dan 49,1 kg Mg. Jumlah tersebut tentunya

tidak sedikit sehingga tidak heran jika beberapa hasil penelitian menyatakan bahwa pemupukan merupakan kegiatan pemeliharaan tanaman kelapa sawit yang memerlukan biaya yang sangat tinggi yaitu antara 50 - 70% dari biaya lapangan atau sekitar 25% dari total biaya produksi kelapa sawit (Caliman et al., 2001; Goh, 2005; Goh dan Teo, 2011; Pardon et al., 2016; Silalertruksa et al., 2012).

Di sisi lain, tingkat efisiensi pemupukan di perkebunan kelapa sawit tergolong rendah, sebagian besar hara yang diberikan lewat pupuk akan hilang akibat penguapan, tercuci, maupun *run-off*. (Jin et al., (2011) memperkirakan bahwa antara 30-70% hara dari pupuk konvensional yang diaplikasikan akan hilang melalui berbagai cara tergantung pada metode aplikasi dan kondisi tanah. Rendahnya efisiensi pemupukan tersebut selain merugikan secara ekonomi karena biaya pupuk yang mahal dan tidak optimalnya pencapaian produksi tanaman, hilangnya hara dari pupuk juga berpotensi menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan (Azeem et al., 2014; Eghbali Babadi et al., 2015; Kuscu et al., 2014;

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

Eko Noviandi Ginting (✉)  
Pusat Penelitian Kelapa Sawit  
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan, Indonesia  
Email: eko.novandy@gmail.com

Rashidzadeh & Olad, 2014; Zhang et al., 2011). Oleh karenanya, peningkatan efisiensi pemupukan menjadi sangat penting untuk mengurangi biaya pemupukan sekaligus menjaga kelestarian lingkungan khususnya di areal perkebunan.

Secara umum efisiensi dan efektivitas pemupukan ditentukan oleh dua aspek besar yaitu kemampuan tanaman itu sendiri dalam menyerap hara yang berhubungan dengan jenis dan varietas tanaman, serta kapasitas atau kemampuan tanah untuk menyediakan hara bagi tanaman. Pada aspek yang pertama, petani atau pekebun kelapa sawit dapat memilih varietas kelapa sawit unggul yang diperoleh dari produsen benih kelapa sawit resmi. Untuk aspek yang kedua, semakin terbatasnya ketersediaan lahan yang memiliki daya dukung yang tinggi untuk budidaya kelapa sawit mengakibatkan kelapa sawit telah banyak diusahakan pada lahan atau tanah dengan kapasitas menyediakan hara rendah. Maka dari itu diperlukan upaya untuk memperbaiki tingkat kesuburan tanah agar tanah memiliki kapasitas yang tinggi dalam hal menyediakan hara bagi tanaman, salah satunya melalui aplikasi bahan organik.

Perkebunan kelapa sawit yang dilengkapi pabrik pengolahan kelapa sawit memiliki sumber bahan organik cukup melimpah sebagai produk samping pengolahan buah kelapa sawit. Bahan organik merupakan salah satu komponen tanah yang memiliki peran vital terhadap seluruh proses dan reaksi yang terjadi di dalam tanah, termasuk proses penyerapan hara oleh akar tanaman. Menurut (Anwar & Sudadi, (2013) setidaknya ada lima fungsi utama bahan organik di dalam tanah terhadap pertumbuhan tanaman, yaitu: (1) fungsi hara, sebagai sumber hara terutama N, P, dan S; (2) fungsi biologi, sebagai sumber energi bagi aktivitas mikroba tanah; (3) fungsi fisik, memperbaiki struktur tanah; (4) fungsi kimia, sebagai penyumbang sifat aktif koloid tanah; dan (5) fungsi fisiologis, sebagai sumber senyawa-senyawa organik yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Keseluruhan fungsi bahan organik tersebut berhubungan erat dengan proses metabolisme akar tanaman termasuk kemampuan akar untuk menyerap hara dari dalam tanah. Kajian ini bertujuan untuk menguraikan secara sederhana peran bahan organik tanah terhadap efisiensi dan efektivitas pemupukan, khususnya di perkebunan kelapa sawit, ditinjau dari aspek kapasitas atau kemampuan tanah untuk menyediakan hara bagi tanaman.

## POTENSI SUMBER BAHAN ORGANIK DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Dalam pengolahan tandan buah segar (TBS) akan dihasilkan beberapa produk samping baik yang berbentuk padat seperti tandan kosong sawit (TKS), kernel, cangkang inti sawit, dan produk samping berbentuk cair berupa POME (*Palm Oil Mill Effluent*) (Anyoaha et al., 2018). Dua jenis bahan organik produk samping dari pabrik pengolahan kelapa sawit dengan jumlahnya melimpah adalah TKS dan POME yang mengandung karbon organik, hara, dan mikroorganisme (Comte et al., 2013). Yusoff, (2006) melaporkan bahwa pengolahan TBS akan dihasilkan produk samping berupa TKS sekitar 22%, 67% limbah cair atau POME, dan beberapa produk samping lainnya (Tabel 1). Sementara itu (Conrad & Prasetyaning, (2014) memperkirakan bahwa dari setiap TBS yang diolah di pabrik kelapa sawit (PKS) akan dihasilkan produk samping berupa POME sebesar 58%, TKS sebesar 21%, *mesocarp fibre* sebesar 15% dan kernel *shells* sebesar 6%. Diantara beberapa produk samping yang dihasilkan, TKS dan POME merupakan produk samping yang paling umum digunakan sebagai bahan pembenah tanah di perkebunan kelapa sawit.

Jika suatu PKS memiliki kapasitas olah sebesar 60 ton/jam dengan jam pengolahan selama 20 jam sehari, maka akan dihasilkan 264 ton TKS dan 804 ton POME dalam sehari (dengan asumsi setiap pengolahan TBS dihasilkan 22% TKS dan 67% POME). Dengan hasil produk samping sebanyak itu, tentunya dapat dihitung potensi TKS dan POME yang dihasilkan oleh PKS dalam sebulan bahkan setahun dan luasan areal kebun kelapa sawit yang dapat di-cover dengan memanfaatkan produk samping tersebut sebagai bahan pembenah tanah. Untuk produk samping berupa TKS misalnya, jika TKS diaplikasikan secara langsung sebagai mulsa di lapangan dengan dosis 40 ton/ha, maka dalam sebulan sekitar 165 hektar areal kebun dapat "dibenahi" melalui aplikasi TKS tersebut (Tabel 2). Luasan areal tersebut masih dapat bertambah jika POME juga diaplikasikan di lapangan walaupun aplikasi POME relatif lebih sulit dibanding aplikasi TKS. Artinya dalam kurun waktu satu tahun, jika luas suatu perkebunan kelapa sawit sekitar 7500 ha, sekitar 26% areal dapat ter-cover hanya dengan memanfaatkan TKS sebagai bahan pembenah tanah dengan cara aplikasi langsung sebagai mulsa. Namun apabila TKS dikomposkan dengan asumsi

kompos yang dihasilkan sebesar 20% dari TKS maka dengan dosis kompos 15 ton/ha, areal yang dapat ter-cover sekitar 14% dari total luas areal perkebunan kelapa sawit. Walaupun covering areal menggunakan kompos lebih kecil namun kompos TKS mengandung lebih banyak hara karena ada

“pengayaan” dalam proses pembuatan kompos TKS. Dengan kata lain, dengan menggunakan kompos TKS tidak saja memperbaiki fisik tanah namun juga menyumbang hara yang jumlahnya relatif lebih besar dibanding aplikasi TKS secara langsung di lapangan.

Tabel 1. Jenis produk yang dihasilkan pabrik kelapa sawit

Produk	Kondisi Basah	% TBS	Kondisi kering	% TBS
	(ton/ha)		(ton/ha)	
TBS	20,08	100	10,6	100
Minyak (CPO)	4,42	22,0	4,42	41,7
Kernel	1,20	6,0	1,20	11,4
TKS	4,42	22,0	1,55	14,6
POME	13,45	67,0	0,67	6,3
Cangkang	1,10	5,5	1,10	10,4
Fiber	2,71	13,5	1,63	15,4
<b>Total</b>	<b>27,3</b>	<b>136,0</b>	<b>10,6</b>	<b>99,8</b>

Ket: TBS (tandan buah segar); CPO (crude palm oil); TKS (tandan kosong sawit); POME (palm oil mill effluent). (sumber: Yusoff 2006).

Tabel 2. Estimasi hasil by-product dari PKS dan covering areal.

Kapasitas Olah Pabrik (ton/jam)	Kebutuhan TBS/Hari (ton)	Kebutuhan TBS/Bulan (ton)	Luas Areal (Ha)	Hasil By Product*		Covering Luas Areal Aplikasi TKS (Ha)**	
				Ton TKS/Bulan	Ton POME/Bulan	Per Bulan	Per Tahun
30	600	15,000	3,750	3,300	10,050	82.50	990
45	900	22,500	5,625	4,950	15,075	123.75	1,485
60	1,200	30,000	7,500	6,600	20,100	165.00	1,980

Asumsi: Operasional Pabrik 20 jam/hari dan 25 hari/bulan; \*) 22% TKS; 67% POME; \*\*) Dosis TKS 40 ton/ha

Selain berfungsi sebagai bahan pembenah tanah, POME dan TKS juga memiliki kandungan hara yang tergolong tinggi. Beberapa hasil penelitian memperlihatkan bahwa baik TKS

maupun POME memiliki kandungan hara makro seperti N, P, K dan Mg yang tinggi disamping juga mengandung hara mikro seperti B, Cu, Zn, dan Fe. Dalam satu ton TKS memiliki kandungan hara

Tabel 3. Komposisi dan kandungan hara pada TKS

Parameter	Atas dasar berat kering		Atas dasar berat basah*
	Kisaran	Rerata	Rerata
Kadar Abu (%)	4.8–8.7	6.3	2.52
Minyak (%)	8.1–9.4	8.9	3.56
C (%)	42.0–43.0	42.8	17.12
N (%)	0.65–0.94	0.80	0.32
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.18–0.27	0.22	0.09
K <sub>2</sub> O (%)	2.0–3.9	2.90	1.16
MgO (%)	0.25–0.40	0.30	0.12
CaO (%)	0.15–0.48	0.25	0.10
B (mg/kg)	9–11	10	4
Cu (mg/kg)	22–25	23	9
Zn (mg/kg)	49–55	51	20
Fe (mg/kg)	310–595	473	189
Mn (mg/kg)	26–71	48	19
C/N ratio	45–64	54	54

\*) Kandungan air 60 - 65%; Sumber: (sumber: Gurmit et al., 1999).

Tabel 4. Kandungan hara makro N,P,K,Mg POME pada setiap jenis kolam

Jenis Kolam	BOD (mg/L)	N (mg/L)	P (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)
Fat-pit	25.000	500 - 900	90 - 140	1.000 - 1.975	250 - 340
Kolam Anaerob Primer	3.500 - 5000	500 - 675	90 - 110	1.000 - 1.850	250 - 320
Kolam Anaerob Sekunder	2.000 - 3.500	325 - 450	62 - 85	875 - 1.250	160 - 215
Kolam Aerob Permukaan	100 - 200	55 - 80	5 - 15	420 - 670	25 - 55
Kolam Aerob Dasar	150 - 300	1.495	461	2.378	1.000
Kolam Pengendapan	75 - 125	30 - 70	3 - 15	330 - 650	17 - 40

Sumber: Tobing (1997)

setara dengan 6 - 7 kg urea; 1,7 kg TSP atau 2,8 kg Rock Phosphate (RP); 19,3 kg Muriate of potash (MoP); dan 3 - 4,4 kg kieserite (Caliman et al., 2001; Singh et al., 1999). Lebih Lanjut (Teh & Sung, 2016) juga menyatakan bahwa satu ton TKS setara dengan 6,8 kg urea (46%N); 1,3 kg RP ( $P_2O_5$  30%); 13,6% MoP ( $K_2O$  60%); dan 2,5 kg kieserite (Mg 17%). Sementara menurut (Rosenani et al., 2016) dalam 1 ton TKS mengandung hara setara dengan 17 kg urea, 86 kg superfosfat tunggal, dan 50 kg MoP (*Muriate of Potash*). Dari beberapa jenis hara yang terkandung pada POME dan TKS, kalium merupakan hara yang paling besar persentasenya (Tabel 3 dan 4).

## PERAN BAHAN ORGANIK TERHADAP EFISIENSI DAN EFEKTIVITAS PEMUPUKAN

Bahan organik memiliki pengaruh langsung dan tidak langsung terhadap pertumbuhan tanaman termasuk penyerapan hara oleh tanaman. Contoh pengaruh langsung adalah tanaman menyerap hara nitrogen dan fosfor sebagai senyawa organik yang larut serta beberapa hormon pemicu tumbuh sebagai hasil dari dekomposisi bahan organik. Sementara itu, pengaruh tidak langsung dari bahan organik adalah melalui peran bahan organik terhadap perbaikan sifat fisik dan biogeokimia tanah sehingga tanah memiliki kapasitas yang besar untuk menyediakan air dan hara bagi tanaman. Hal yang sering kurang disadari oleh pekebun kelapa sawit adalah pengaruh tidak langsung dari bahan organik, yaitu peranan yang sangat besar dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemupukan. Berikut ini diuraikan pengaruh dan mekanisme bahan organik dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemupukan.

### Perbaikan Sifat Fisik Tanah

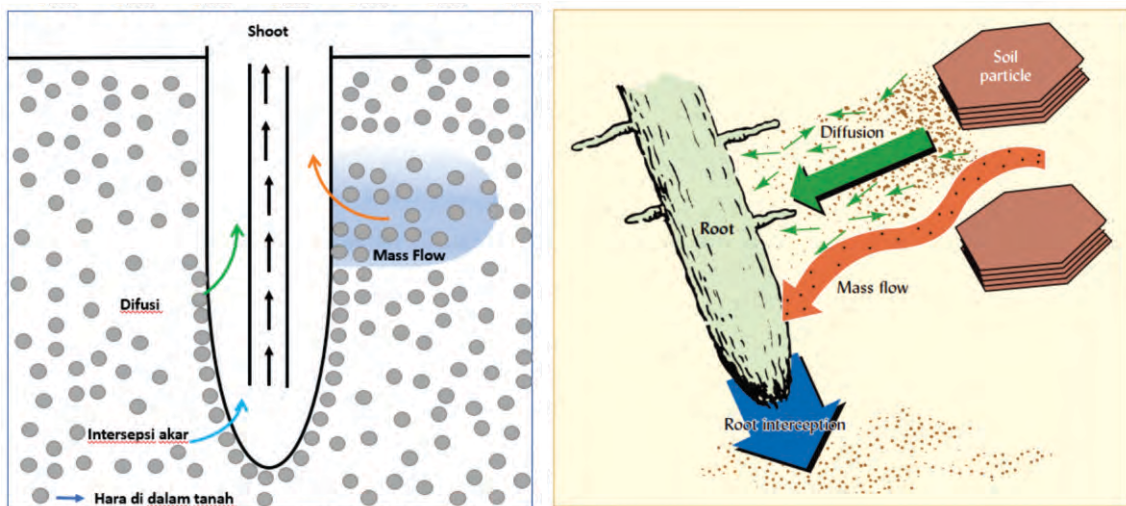
Sifat fisik tanah sangat penting untuk mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman secara berkelanjutan. Menurut (Almendro-Candel et al., 2018), jumlah dan kecepatan penyerapan air, oksigen, dan unsur hara oleh tanaman tergantung pada kemampuan akar menyerap larutan tanah serta kemampuan tanah untuk mensuplai air, oksigen, dan hara ke akar tanaman. Ada tiga mekanisme tanaman menyerap hara dari dalam tanah, yaitu: aliran massa, difusi dan intersepsi akar. Penyerapan hara melalui

mekanisme aliran massa dan difusi berkaitan dengan pergerakan air di dalam tanah dan pergerakan air di dalam tanah dipengaruhi oleh distribusi ruang pori tanah. Artinya jika tanah terlalu padat maka pergerakan air di dalam tanah terhambat sehingga penyerapan hara oleh tanaman melalui mekanisme aliran massa dan difusi juga akan terhambat. Demikian juga dengan penyerapan hara melalui mekanisme intersepsi akar, akar-akar tanaman akan melakukan penetrasi di dalam tanah melalui pori-pori tanah untuk mencari sumber hara di dalam tanah, permukaan akar akan bersinggungan dengan permukaan partikel tanah dimana terdapat ion-ion yang terjerap dan kemudian terjadi pertukaran secara langsung. Kemampuan akar dalam melakukan penetrasi di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh kepadatan (*bulk density*) tanah. Semakin padat struktur tanah maka akan semakin besar energi yang dibutuhkan oleh akar untuk menembus tanah (Bengough et al., 2011; Colombi & Walter, 2017; Ruiz et al., 2015, 2016). Dampak selanjutnya terhadap fenotif akar adalah pertumbuhan akar menjadi terhambat, terjadi penebalan akar, dan penurunan jumlah akar lateral dan aksial (Chen et al., 2014; Colombi & Walter, 2015, 2017; Hernandez-Ramirez et al., 2014; Nosalewicz & Lipiec, 2014; Pfeifer et al., 2014; Tracy et al., 2012). Kondisi tersebut akan menyebabkan menurunnya kemampuan akar tanaman untuk melakukan eksplorasi didalam tanah dalam mencari sumber-sumber energi seperti air dan hara (Colombi et al., 2018). (Weil & Brady, 2017) menyatakan bahwa tanah yang terlalu padat dapat menurunkan kapasitas intersepsi akar, aliran massa dan difusi sehingga tanaman penyerapan hara oleh akar tanaman menjadi buruk meskipun terdapat hara yang mencukupi di dalam tanah. (Chapman et al., 2012) menambahkan bahwa seluruh proses yang mempengaruhi penyerapan hara oleh akar tanaman termasuk perkembangan dan perpanjangan akar, produksi eksudat akar, asosiasi dan simbiosis akar tanaman dengan organisme tanah, aliran massa ke akar, dan difusi ion atau hara ke permukaan akar sangat bergantung dan dipengaruhi oleh karakteristik sifat fisik tanah. Lebih lanjut (Zuraidah et al., 2017) menyatakan bahwa tanah yang padat menyebabkan menurunnya biomassa tegakan kelapa sawit akibat menurunnya biomassa pelepah, dimeter dan biomassa batang. Oleh karenanya, tanaman membutuhkan struktur tanah yang baik agar akar tanaman dapat tumbuh dan berkembang, baik secara



vertikal maupun secara horizontal. Proses serapan hara oleh tanaman merupakan proses metabolisme aktif, sehingga kondisi yang menghambat metabolisme akar juga dapat menghambat serapan hara. Untuk dapat melangsungkan proses metabolismenya dengan baik, akar tanaman membutuhkan air dan oksigen dalam jumlah yang cukup dan kondisi tersebut dapat terpenuhi jika tanah memiliki struktur yang baik. Air dan oksigen merupakan komponen penting yang sangat mempengaruhi berbagai macam proses fisik, kimia, dan biologi di dalam tanah. Sebagai contoh, salah satu peran penting air di dalam tanah adalah untuk menjaga kelembaban tanah yang diperlukan baik untuk aktivitas metabolisme mikroorganisme tanah maupun akar tanaman. Ketika akar tanaman memanjang ke zona tanah yang kering misalnya, maka apikal akar akan mengalami defisit air dan kehilangan turgornya sehingga laju pembelahan sel menjadi terhambat (Westgate & Boyer, 1984). Sebaliknya ketika ketersediaan oksigen di dalam tanah terbatas atau bahkan tidak ada, maka proses fisiologi tanaman seperti penyerapan air, hara, respirasi, potensi redox unsur hara serta aktivitas mikroorganisme akan terganggu (Neira et al., 2015).

Ketika kadar oksigen tanah rendah maka tanah berada dalam kondisi reduktif. Pada kondisi reduktif, beberapa hara seperti N dalam bentuk ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), P, K, Ca, Mg, Mn, dan Fe akan meningkat kelarutannya sehingga konsentrasinya di dalam tanah juga meningkat. Namun konsentrasi hara yang terlalu tinggi terutama hara mikro, contohnya besi (Fe) dalam bentuk fero ( $\text{Fe}^{2+}$ ), dapat menyebabkan tanaman mengalami keracunan besi. Keracunan besi pada tanaman dapat terjadi secara langsung maupun secara tidak langsung (dos Santos et al., 2017). Keracunan secara langsung terjadi ketika besi terlalu banyak diserap oleh tanaman dan terakumulasi di dalam jaringan (Aung et al., 2018). Sementara, secara tidak langsung konsentrasi besi yang tinggi dapat menyebabkan terhambatnya penyerapan, pengangkutan, dan pemanfaatan unsur hara lainnya seperti N, P, K, Ca, Mg, Mn dan Zn dikarenakan terjadinya akumulasi  $\text{Fe}^{3+}$  (*iron plaque*) pada apoplast akar tanaman (Zhang et al., 2014). Dengan demikian kekurangan oksigen di dalam tanah dapat menyebabkan berbagai permasalahan salah satunya adalah terhambatnya penyerapan hara oleh akar dan terganggunya transport hara dari akar ke organ bagian atas tanaman.



Gambar 1. Ilustrasi mekanisme penyerapan hara dari dalam tanah oleh akar tanaman; Mass flow terjadi dipicu oleh transpirasi tanaman dan merupakan pergerakan larutan tanah; difusi terjadi karena adanya gradient konsentrasi hara; dan intersepsi akar terjadi saat akar mengeksplor tanah untuk mencari sumber hara. (Berdasarkan Marschner (2012); Weil dan Brady (2017))

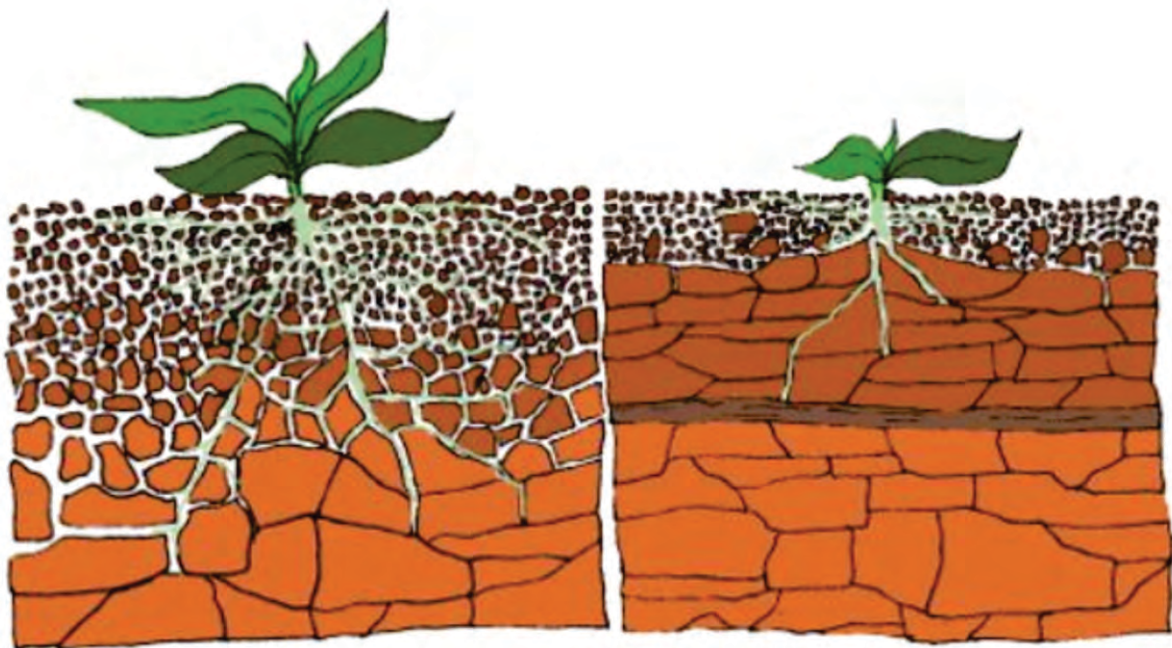
Tanah dengan struktur terlalu padat akan didominasi pori mikro yang menyebabkan

rendahnya porositas tanah sehingga berdampak pada terhambatnya pertukaran gas (oksigen dan

CO<sub>2</sub>), sementara tanah dengan struktur yang terlalu porous didominasi oleh pori makro dimana air bersama hara terlarut mudah hilang tercuci. Pemberian bahan organik pada tanah dengan struktur padat akan meningkatkan pori meso tanah sehingga kondisi aerasi tanah menjadi lebih baik yang akan berdampak pada perkembangan akar dan penyerapan hara oleh akar yang lebih baik pula. Sementara penambahan bahan organik pada tanah dengan struktur yang terlalu porous akan memperbaiki agregat tanah sehingga dapat meningkatkan kemampuan tanah menahan air yang artinya memperkecil potensi kehilangan hara dari dalam tanah akibat tercuci. (Weil & Magdoff, (2004) menyatakan bahwa penambahan bahan organik pada tanah dapat mengurangi dampak buruk dari efek terlalu banyaknya fraksi halus (*clay*) atau terlalu banyak fraksi kasar (pasir), sehingga dapat

meningkatkan porositas total dan kepadatan (*bulk density*) tanah. (Gunawan et al., (2020) juga menyatakan bahwa aplikasi bahan organik sebagai bahan amelioran tanah dapat memperbaiki agregasi dan porositas tanah melalui peyeimbangan antara pori makro dan pori mikro.

Serapan hara oleh tanaman tidak terlepas dari perkembangan akar tanaman. (Erktan et al., (2018) menyatakan bahwa akar tanaman memiliki banyak fungsi yang sangat penting seperti menyerap air, hara, sebagai penyangga, dan sebagai pendukung perkembangan mikroba tanah. Tanaman dengan perkembangan akar yang baik tentunya akan menyerap hara lebih banyak dibanding tanaman dengan perkembangan akar yang terhambat. Secara fisik, struktur tanah mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman kelapa sawit (Gambar 2).



Gambar 2. Ilustrasi perbandingan perkembangan akar tanaman pada tanah dengan struktur yang gembur (kiri) dan tanah dengan struktur padat (kanan). Pada tanah dengan struktur tanah gembur, akar dapat berkembang baik secara vertikal maupun horizontal sehingga luas kontak permukaan akar dengan tanah menjadi tinggi dan hal itu memberi kesempatan akar untuk menyerap hara lebih banyak. Sementara pada struktur tanah yang padat akar perkembangan akar terhambat terutama secara vertikal, akibatnya akar tanaman cenderung berkembang secara horizontal.

Sumber gambar: <https://www.motherearthnews.com/organic-gardening/measure-soil-compaction-with-a-carrot-test-zbcz1511>

Yahya et al., (2010) menyatakan bahwa pada tanah dengan struktur yang terlalu padat akar tanaman cenderung tumbuh secara horizontal, dan hal tersebut akan membatasi volume tanah yang dapat dieksplorasi oleh akar tanaman yang berarti akses akar untuk menyerap air dan hara yang berada pada tanah yang lebih dalam menjadi terbatas. Lebih lanjut Pradiko et al., (2016) juga melaporkan bahwa terdapat korelasi positif antara porositas tanah dengan distribusi akar tanaman kelapa sawit, terutama terhadap perkembangan akar tersier, yang mana akar tersier merupakan akar yang aktif dalam menyerap hara dari dalam tanah. Kheong et al., (2010b) juga melaporkan bahwa penambahan bahan organik berupa TKS secara nyata meningkatkan total biomassa akar kelapa sawit terutama pada kedalaman 30 - 45 cm dimana peningkatan biomassa akar tersebut akan memberikan kesempatan yang lebih tinggi bagi akar tanaman kelapa sawit untuk menyerap hara dari dalam tanah. Dalam penelitian lainnya Kheong et al., (2010a) juga menambahkan bahwa peningkatan massa akar pada kedalaman 30 - 45 cm memberikan dampak positif terhadap penyerapan hara oleh akar terutama pada jenis hara yang sangat mobil seperti hara kalium.

Peran utama bahan organik terhadap sifat fisik tanah adalah untuk meningkatkan granulasi dan kestabilan agregat tanah melalui aktivasi fraksi humik yang dapat menurunkan sifat plastis, kohesi dan sifat lengket dari clay sehingga tanah menjadi lebih gembur (Husnain & Nursyamsi, 2014). Dengan struktur tanah yang gembur maka ruang pori dan aerasi tanah menjadi baik pula yang berdampak positif terhadap perkembangan akar tanaman. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Rosenani, et al., (2016b) yang melaporkan bahwa penambahan kompos TKS pada media tanam bibit kelapa sawit dapat meningkatkan jumlah ruang pori dan aerasi tanah sehingga meningkatkan berat kering akar bibit kelapa sawit. Selanjutnya, Moradi et al., (2014) melaporkan bahwa penambahan bahan organik berupa TKS di perkebunan kelapa sawit selama dua tahun mampu meningkatkan stabilitas agregat tanah, dan meningkatkan air tersedia dan total kandungan air tanah. melalui penelitiannya juga menyatakan bahwa aplikasi TKS secara relatif dapat memperbaiki sifat fisikokimia tanah. (Carron et al., 2015) Oleh karenanya, bahan organik memiliki peranan yang sangat penting untuk memperbaiki sifat fisik tanah,

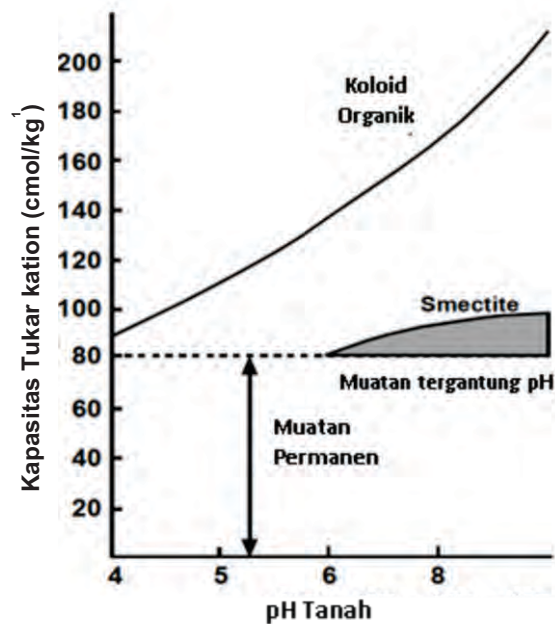
sehingga akar tanaman dapat berkembang dengan baik dan pada akhirnya serapan hara tanaman menjadi lebih baik yang berarti efektivitas dan efisiensi pemupukan akan meningkat.

### **Perbaikan reaksi biokimia di dalam tanah**

Sebagian besar hara esensial, baik makro maupun mikro, yang dibutuhkan tanaman diserap dalam bentuk kation, seperti  $\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{K}^+$ ;  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , dan  $\text{Zn}^{2+}$  dan beberapa jenis hara makro dan mikro lainnya. Kemampuan atau kapasitas tanah untuk menahan dan mempertukarkan kation (hara) dikenal dengan istilah kapasitas tukar kation (KTK). Menurut Adugna, (2016) KTK merupakan salah satu indikator terpenting kesuburan suatu tanah yang menggambarkan kemampuan tanah untuk meretensi hara sehingga mencegah hara segera hilang tercuci. Oleh karenanya tanah dengan KTK yang tinggi akan memiliki kemampuan atau kapasitas yang tinggi untuk menahan lebih banyak hara dalam bentuk kation sehingga tersedia untuk dapat diserap akar tanaman dalam waktu yang lama (Meetei et al., 2017).

Di dalam tanah, koloid tanah merupakan konstituen tanah yang bertanggungjawab terhadap proses pertukaran hara. Meetei, (2020) menyatakan bahwa ada tiga jenis koloid yang bertanggungjawab terhadap pertukaran hara (anion dan kation) di dalam tanah yaitu koloid liat, koloid amorf, dan koloid organik (humus). Berkaitan dengan hal tersebut, bahan organik memiliki peran penting dalam hal meningkatkan KTK tanah melalui gugus-gugus fungsional (-OH dan -COOH) yang banyak terkandung pada humus (Agegnehu et al., 2014). Weil & Brady, (2017) menyatakan bahwa humus dapat memperbesar kapasitas tanah dalam menyerap kation hingga 50 - 90%, dimana kation yang dijerap pada humus berada dalam bentuk yang mudah ditukar tetapi tidak mudah lepas dan hilang tercuci sehingga kation-kation tersebut mudah diserap oleh akar tanaman. Lebih lanjut Adugna, (2016) juga menambahkan bahwa KTK dari koloid organik sangat besar, yaitu antara 300 - 1400 cmol/kg, dimana nilai tersebut jauh lebih besar dibanding KTK koloid anorganik. Lebih lanjut Weil & Brady, (2017) menambahkan bahwa pada pH 4,0 - 4,5; setiap kenaikan 1 gram C-organik, berkontribusi terhadap peningkatan KTK sebesar 0,13 cmolc/kg tanah (Gambar 3).





Gambar 3. Pengaruh pH terhadap KTK dari koloid anorganik (*smectite*) dan koloid organik. Pada pH di bawah 6 muatan dari koloid anorganik relatif konstan (muatan permanen); pada pH di atas 6 muatan dari koloid anorganik sedikit naik sebagai hasil dari ionisasi ion H<sup>+</sup> dari fungsional group hidroksil. Sebagai perbandingan, hampir seluruh muatan pada koloid organik merupakan muatan tergantung pH dimana muatan tersebut akan naik seiring dengan naiknya pH.

Sumber: Weil dan Brady (2017) dimodifikasi

Hasil penelitian Bakar et al., (2011) memperlihatkan bahwa aplikasi TKS sebanyak 150 dan 300 kg TKS/pokok/tahun selama 10 tahun dapat meningkatkan pH menjadi 5,5 dan 6,5 serta KTK tanah menjadi 11 dan 13,3 cmol/kg dibanding dengan perlakuan hanya menggunakan pupuk kimia dengan KTK tanah hanya sebesar 8,2 cmol/kg. Oleh karenanya aplikasi TKS dapat meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman secara berkelanjutan dalam jangka waktu yang lama. Dengan demikian peran bahan organik terhadap peningkatan efisiensi dan efektivitas pemupukan adalah melalui mekanisme peningkatan kapasitas tanah menahan hara, dimana hara yang diaplikasikan lewat pupuk dapat tertahan dalam jumlah yang besar dan dalam waktu yang cukup lama sehingga kesempatan bagi akar tanaman untuk menyerap hara dalam jumlah yang lebih banyak (Gambar 4).

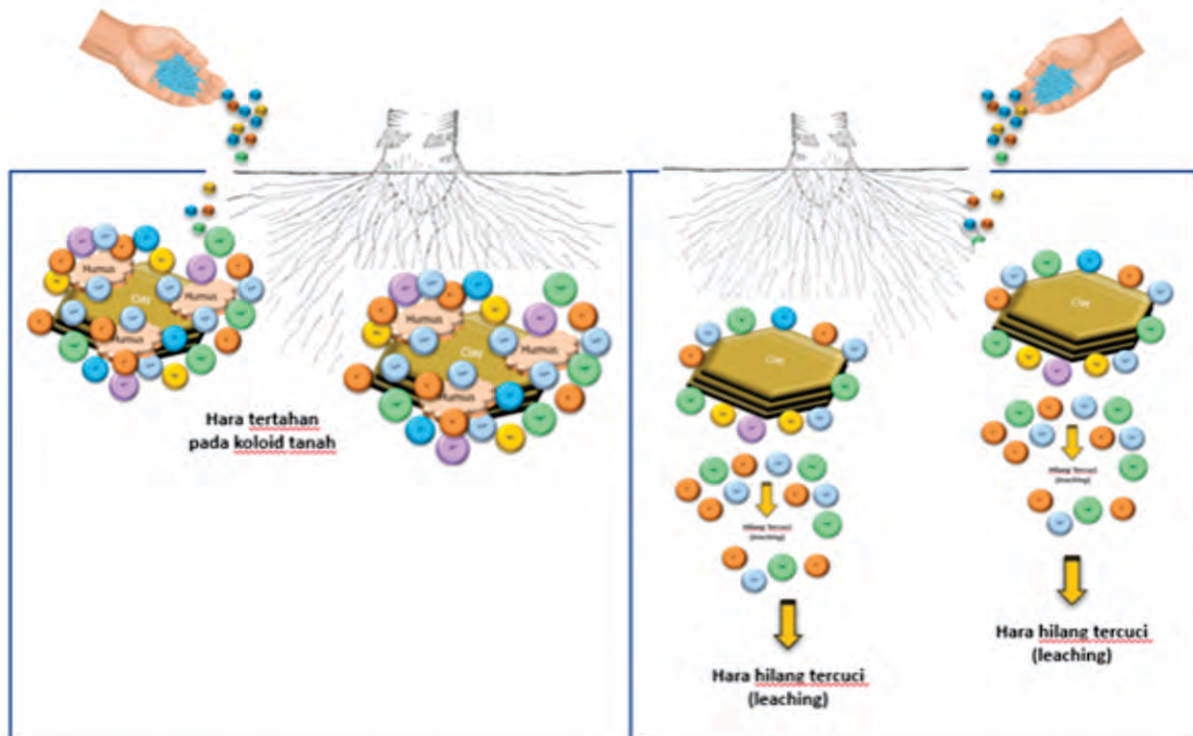
Bahan organik merupakan sumber energi bagi biota tanah, dimana biota tanah memiliki peran penting terhadap banyak proses yang terjadi di dalam tanah

termasuk penyerapan hara oleh tanaman (Ashton-Butt et al., 2018). Beberapa penelitian terdahulu melaporkan bahwa aplikasi bahan organik dapat meningkatkan diversitas dan kelimpahan dari mikroorganisme tanah seperti cacing tanah yang memiliki banyak manfaat untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Carron et al., 2015a; 2015b; Situmorang et al., 2014) Lebih lanjut Hal yang sama juga dilaporkan oleh Tao et al., (2016) yang menyatakan bahwa aplikasi TKS dapat meningkatkan aktivitas fauna tanah dan terjadi peningkatan kelimpahan makrofauna tanah termasuk semut, cacing tanah, dan beberapa jenis kumbang.

Dalam melakukan aktivitasnya mendekomposisi bahan organik di dalam tanah, biota tanah akan menghasilkan berbagai enzim dan senyawa organik lainnya baik langsung maupun tidak langsung dimana enzim dan senyawa organik tersebut mempengaruhi siklus hara di dalam tanah dan penyerapan hara oleh tanaman. Weil & Magdoff, (2004) menyatakan bahwa selain sebagai sumber hara, terutama C, N, P, dan S,

bahan organik juga berperan penting membentuk agregat tanah yang lebih stabil serta dapat menghasilkan zat-zat pengatur tumbuh yang bermanfaat bagi tanaman. Selain itu, bahan organik tanah juga berperan dalam mempengaruhi mobilitas, kelarutan, dan serapan unsur-unsur metal oleh tanaman melalui mekanisme chelating. Kelasi (*Chelation*) merupakan proses alami yang mencegah

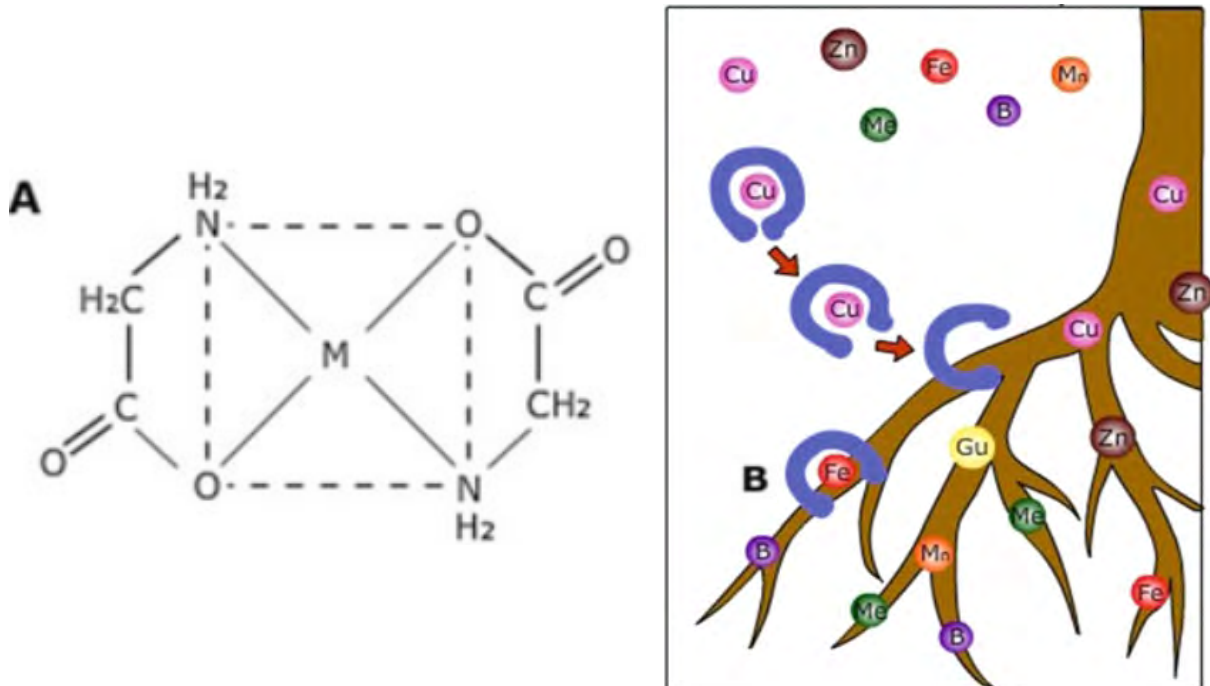
hara terpresipitasi agar dapat diserap oleh tanaman. Ada beberapa keuntungan dari proses *chelation* di dalam tanah, diantaranya mengurangi toksisitas beberapa ion logam pada tanaman, mencegah pencucian hara, meningkatkan mobilitas hara dan ketersediaan beberapa jenis hara, dan menekan pertumbuhan patogen tanaman (Gambar 5) (Kathpalia & Bhatla, 2018).



Gambar 4. Ilustrasi peran bahan organik dalam meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan dan menyediakan hara; sebelah kiri, tanah dengan kapasitas menahan hara (KTK) yang besar akibat peran bahan organik sehingga hara yang diberikan lewat pupuk akan tertahan dalam jumlah yang besar dan dalam waktu yang lama; sementara sebelah kanan, tanah dengan kapasitas menahan hara yang kecil, dimana hara yang diberikan lewat pupuk hanya tertahan dalam jumlah yang relatif kecil sementara sebagian besar hara hilang tercuci (*leaching*) dan tidak dapat diserap tanaman.

Kelapa sawit banyak dibudidayakan pada jenis-jenis tanah masam dengan kapasitas penyangga yang rendah dimana kondisi tersebut diperburuk dengan penggunaan pupuk kimia secara rutin dan curah hujan serta tingkat pencucian yang tinggi (Nelson et al., 2011; Ng et al., 2011). Pada tanah-tanah masam seperti Ultisol, dimana perkebunan kelapa sawit banyak diusahakan pada jenis tanah ini, kelarutan Al yang tinggi menjadi salah satu faktor pembatas terhadap pertumbuhan tanaman. Dalam proses dekomposisi bahan organik akan

dihasilkan senyawa-senyawa humat yang dapat mengurangi kelarutan Al di dalam tanah dengan cara mengikat Al menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Dalam proses dekomposisi bahan organik akan dihasilkan asam-asam organik seperti asam melonik glukonik, sitrat, malat, yang berperan sebagai *chelating agent*. Asam-asam organik tersebut, terutama asam sitrat dan malat, akan mengkhelat unsur Al dan Fe di dalam tanah sehingga unsur P menjadi lebih tersedia bagi tanaman.



Gambar 5. Ilustrasi chelator dengan dua molekul ligan (glycine) membentuk struktur cincin yang mengelilingi metal (M) yang berada di tengah (A); chelator mengikat hara mikro di dalam tanah, mencegah hara mengendap dan tercuci dan meningkatkan mobilitasnya sehingga tersedia untuk diserap oleh akan tanaman. Sumber: Kathpalia dan Bhatla, (2018)

## PENUTUP

Sumber bahan organik di perkebunan kelapa sawit cukup besar, utamanya TKS dan POME yang merupakan produk samping dari pengolahan TBS di pabrik kelapa sawit. Namun demikian, sejauh ini perhatian pekebun kelapa sawit terhadap pemanfaatan bahan organik di perkebunan kelapa sawit hanya dititikberatkan pada pengaruh langsung bahan organik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman yaitu terhadap kandungan hara yang ada pada bahan organik tersebut. Padahal, bahan organik memiliki peranan yang lebih penting dari hanya sekedar sebagai sumber hara, yaitu perannya terhadap perbaikan kualitas tanah agar tanah memiliki kapasitas yang tinggi untuk menyediakan hara bagi tanaman sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemupukan. Peran penting bahan organik dalam kaitannya dengan upaya peningkatan efisiensi pemupukan di perkebunan kelapa sawit adalah melalui pengaruhnya terhadap sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Dari sifat fisik kimia misalnya, bahan organik berperan dalam memperbaiki struktur tanah

sehingga tanah sebagai media tumbuh memberikan kondisi aerasi perakaran yang baik untuk mendukung perkembangan akar tanaman. Dari sifat kimia tanah, bahan organik berperan untuk meningkatkan KTK tanah sehingga hara yang dipalokasikan lewat pupuk tidak segera hilang tercuci dan dapat diserap oleh akar tanaman. Sementara itu dari sifat biologi tanah, bahan organik merupakan sumber energi bagi biota tanah untuk melakukan berbagai aktivitasnya di dalam tanah, disamping sebagai penghasil enzim, hormon, dan senyawa-senyawa organik yang mempengaruhi dinamika dan ketersediaan hara di dalam tanah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adugna, G. (2016). A review on impact of compost on soil properties, water use and crop productivity. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, 4(3), 93–104. <https://doi.org/10.14662/ARJASR2016.010>
- Agegnehu, G., vanbeek, C., & Bird, M. I. (2014). Influence of integrated soil fertility management

- in wheat and tef productivity and soil chemical properties in the highland tropical environment. In *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* (Vol. 14, Issue 3, pp. 532–545). <https://doi.org/10.4067/s0718-95162014005000042>
- Almendro-Candel, M. B., Lucas, I. G., Navarro-Pedreño, J., & Zorpas, A. A. (2018). Physical Properties of Soils Affected by the Use of Agricultural Waste. In *Agricultural Waste and Residues* (pp. 9–27). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77993>
- Anwar, S., & Sudadi, U. (2013). Kimia Tanah. In *Kimia Tanah* (Issue November). Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan Fakultas Pertanian IPB, Bogor.
- Anyaocha, K. E., Sakrabani, R., Patchigolla, K., & Mouazen, A. M. (2018). Critical evaluation of oil palm fresh fruit bunch solid wastes as soil amendments: Prospects and challenges. In *Resources, Conservation and Recycling* (Vol. 136, Issue January, pp. 399–409). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.04.022>
- Ashton-Butt, A., Aryawan, A. A. K., Hood, A. S. C., Naim, M., Purnomo, D., Suhardi, Wahyuningsih, R., Willcock, S., Poppy, G. M., Caliman, J.-P., Turner, E. C., Foster, W. A., Peh, K. S.-H., & Snaddon, J. L. (2018). Understorey Vegetation in Oil Palm Plantations Benefits Soil Biodiversity and Decomposition Rates. *Frontiers in Forests and Global Change*, 1(December). <https://doi.org/10.3389/ffgc.2018.00010>
- Aung, M.S., Masuda, H., Kobayashi, T., & Nishizawa, NK. (2018). Physiological and transcriptomic analysis of responses to different levels of iron excess stress in various rice tissues. *Soil Science and Plant Nutrition*. Taylor & Francis, 64(3): 370–385. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1443754>.
- Azeem, B., Kushaari, K., Man, Z. B., Basit, A., & Thanh, T. H. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 181(1), 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2014.02.020>
- Bakar, R. A., Darus, S. Z., Kulaseharan, S., & Jamaluddin, N. (2011). Effects of ten year application of empty fruit bunches in an oil palm plantation on soil chemical properties. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(3), 341–349. <https://doi.org/10.1007/s10705-010-9398-9>
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., & Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59–68. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>
- Caliman, J. P., Aliman, M. B., & Saletes, and S. (2001). Dynamics of nutrient release from empty fruit bunches in field conditions and soil characteristics changes. *Proceedings of the 2001 PIPOC International Palm Oim Congress, MPOB, Bangi (2001)*, 550–556.
- Carron, M. P. A., Pierrat, M. A., Snoeck, D. A., Villenave, C. C., & Ribeyre, F. D. (2015a). *Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations*. 205–215.
- Carron, M. P., Auriac, Q., Snoeck, D., Villenave, C., Blanchart, E., Ribeyre, F., Marichal, R., Darminto, M., & Caliman, J. P. (2015b). Spatial heterogeneity of soil quality around mature oil palms receiving mineral fertilization. *European Journal of Soil Biology*, 66, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2014.11.005>
- Chapman, N., Miller, A. J., Lindsey, K., & Whalley, W. R. (2012). Roots, water, and nutrient acquisition: let's get physical. *Trends in Plant Science*, 17(12), 701–710. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2012.08.001>
- Chen, Y. L., Palta, J., Clements, J., Buirchell, B., Siddique, K. H. M., & Rengel, Z. (2014). Root architecture alteration of narrow-leafed lupin and wheat in response to soil compaction. *Field Crops Research*, 165, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.04.007>
- Choo, Y. M., Muhamad, H., Hashim, Z., Subramaniam, V., Puah, C. W., & Tan, Y. (2011). Determination of GHG contributions by subsystems in the oil palm supply chain



- using the LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(7), 669–681. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0303-9>
- Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of the Total Environment*, 626, 1026–1035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>
- Colombi, T., & Walter, A. (2015). Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions. *Functional Plant Biology*, 43(2), 114–128. <https://doi.org/10.1071/FP15194>
- Colombi, T., & Walter, A. (2017). Genetic diversity under soil compaction in wheat: Root number as a promising trait for early plant vigor. *Frontiers in Plant Science*, 8(March), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00420>
- Comte, I., Colin, F., Grünberger, O., Follain, S., Whalen, J. K., & Caliman, J. P. (2013). Landscape-scale assessment of soil response to long-term organic and mineral fertilizer application in an industrial oil palm plantation, Indonesia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 169, 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.02.010>
- Conrad, L., & Prasetyaning, I. (2014). *Promotion of Least Cost Renewables in Indonesia Overview of the Waste-to-Energy Potential for Grid-connected Electricity Generation ( Solid Biomass and Biogas ) in Indonesia* (Issue March).
- dos Santos, R.S., De Araujo, A.T., Pegoraro, C., & de Oliveira AC. (2017). Dealing with iron metabolism in rice: From breeding for stress tolerance to biofortification. *Genetics and Molecular Biology*, 40(1): 312–325. <https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2016-0036>.
- Eghbali Babadi, F., Yunus, R., Abdul Rashid, S., Mohd Salleh, M. A., & Ali, S. (2015). New coating formulation for the slow release of urea using a mixture of gypsum and dolomitic limestone. *Particuology*, 23, 62–67. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.12.011>
- Erktan, A., McCormack, M. L., & Roumet, C. (2018). Frontiers in root ecology: recent advances and future challenges. *Plant and Soil*, 424(1–2), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3618-5>
- Foster H. 2003. Assessment of oil palm fertiliser requirements. In: Fairhurst TH, Hardter R, eds. Oil palm management for large and sustainable yields. Potash and Phosphate Institute, pp. 231–257.
- Goh, K. ., Teo, C. B., Chew, P. S., & Chiu, S. B. (1999). *Fertiliser Management In Oil Palm – Agronomic Principles And Field Practices* (AAR-News).
- Goh, K. J. (2005). Fertilizer Recommendation Systems For Oil Palm: Estimating The Fertilizer Rates. In C. P. Soon & T. Y. Pau (Eds.), *Proceedings of MOSTA best practices workshops: agronomy and crop management* (pp. 1–37). Malaysian Oil Scientists' and Technologists' Association.
- Goh, K.J., Teo, C.B., 2011. Agronomic principles and practices of fertilizer management of oil palm. In: Goh, K.J., Chiu, S.B., Paramanathan, S. (Eds.), *Agronomic Principles & Practices of Oil Palm Cultivation*. Agricultural Crop Trust, Petaling Jaya, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, pp. 241–338
- Gunawan, S., Budiastuti, M. T. S., Sutrisno, J., & Wirianata, H. (2020). Effects of organic materials and rainfall intensity on the productivity of oil palm grown under sandy soil condition. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 10(1), 356–361. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.1.11001>
- Hernandez-Ramirez, G., Lawrence-Smith, E. J., Sinton, S. M., Tabley, F., Schwen, A., Beare, M. H., & Brown, H. E. (2014). Root Responses to Alterations in Macroporosity and Penetrability in a Silt Loam Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 78(4), 1392–1403. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0005>
- Husnain, H., & Nursyamsi, D. (2014). Peranan Bahan Organik dalam Sistem Integrasi Sawit-Sapi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 9(1), 27–36. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v9i1.6517>



- Jin, S., Yue, G., Feng, L., Han, Y., Yu, X., & Zhang, Z. (2011). Preparation and properties of a coated slow-release and water-retention biuret phosphoramidate fertilizer with superabsorbent. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 322–327. <https://doi.org/10.1021/jf1032137>
- Kathpalia, R., & Bhatla, S. C. (2018). Plant Mineral Nutrition. In S. C. Bhatla, M. A. Lal, M. A. Lal, R. Kathpalia, R. Sisodia, & R. Shakya (Eds.), *Plant Physiology, Development and Metabolism* (pp. 37–81). Springer Nature Singapore Pte Ltd. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1\\_32](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_32)
- Kheong, L. V., Rahman, Z. A., Musa, M. H., & Hussein, A. (2010a). Empty fruit bunch application and oil palm root proliferation. *Journal of Oil Palm Research*, 22(APRIL), 750–757.
- Kheong, L. V., Rahman, Z. A., Musa, M. H., & Hussein, A. (2010b). Nutrient absorption by oil palm primary roots as affected by empty fruit bunch application. *Journal of Oil Palm Research*, 22(APRIL), 711–720.
- Kuscu, H., Turhan, A., Ozmen, N., Aydinol, P., & Demir, A. O. (2014). Optimizing levels of water and nitrogen applied through drip irrigation for yield, quality, and water productivity of processing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Horticulture Environment and Biotechnology*, 55(2), 103–114. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0180-9>
- Meetei, T. T. (2020). *Soil Organic Matter: A Vital Component of a Healthy Soil*. May.
- Meetei, T. T., Kundu, M. C., Devi, Y. B., & Kumari, N. (2017). Soil Organic Carbon Pools as Affected by Land Use Types in Hilly Ecosystems of Manipur. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 8(2), 220–225. <https://doi.org/10.23910/ijbsm/2017.8.2.1800>
- Moradi, A., Teh, C. S. B., Goh, J. K., Mohd Hanif, A. H., & Ishak, F. C. (2014). Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil & Tillage Research*, 145, 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.08.005>
- Neira, J., Ortiz, M., Morales, L., & Acevedo, E. (2015). Oxygen diffusion in soils: Understanding the factors and processes needed for modeling. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 75(August), 35–44. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392015000300005>
- Nelson, B. P. N., Rhebergen, T., Berthelsen, S., Webb, M. J., Banabas, M., Oberthür, T., Donough, C. R., Indrasuara, K., & Lubis, A. (2011). Soil Acidification under Oil Palm: Rates and Effects on Yield. In *Slides* (Issue 4).
- Ng, H. C. P., Gan, H. H., & Goh, K. J. (2011). *Journal of Oil Palm & The Environment Soil nutrient changes in Ultisols under oil palm in Johor, Malaysia. September*, 93–104. <https://doi.org/10.5366/jope.2011.10>
- Nosalewicz, A., & Lipiec, J. (2014). The effect of compacted soil layers on vertical root distribution and water uptake by wheat. *Plant and Soil*, 375(1–2), 229–240. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1961-0>
- Pardon, L., Bessou, C., Nelson, P. N., Dubos, B., Ollivier, J., Marichal, R., Caliman, J. P., & Gabrielle, B. (2016). Key unknowns in nitrogen budget for oil palm plantations. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0353-2>
- Pauli, N., Donough, C., Oberthür, T., Cock, J., Verdooren, R., Abdurrohman, G., Indrasuara, K., Lubis, A., Dolong, T., & Pasuquin, J. M. (2014). Agriculture, Ecosystems and Environment Changes in soil quality indicators under oil palm plantations following application of 'best management practices' in a four-year field trial. *"Agriculture, Ecosystems and Environment,"* 195, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.05.005>
- Pfeifer, J., Faget, M., Walter, A., Blossfeld, S., Fiorani, F., Schurr, U., & Nagel, K. A. (2014). Spring barley shows dynamic compensatory root and shoot growth responses when exposed to localised soil compaction and fertilisation. *Functional Plant Biology*, 41(6), 581–597. <https://doi.org/10.1071/FP13224>

- Pradiko, I., Hidayat, F., Darlan, N. H., Santoso, H., Winarna, W., Rahutomo, S., & Sutarta, E. S. (2016). Distribusi Perakaran Kelapa Sawit Dan Sifat Fisik Tanah Pada Yang Berbeda Ukuran Lubang Tanam Dan Aplikasi Tandan Kosong Sawit Yang Berbeda. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 24 ( 1 ) , 23 – 38 .  
<https://doi.org/10.22302/10.22302/iopri.jur.jpks.v24i1.4>
- Rashidzadeh, A., & Olad, A. (2014). Slow-released NPK fertilizer encapsulated by NaAlg-g-poly(AA-co-AAm)/MMT superabsorbent nanocomposite. *Carbohydrate Polymers*, 114, 269–278.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.010>
- Rosenani, A. B., Rabuni, W., Cheah, P., & Noraini, J. (2016a). Mass loss and release of nutrient from empty fruit bunch of oil palm applied as mulch to newly transplanted oil palm. *Soil Research*, 54 ( 8 ) , 985 – 996 .  
<https://doi.org/10.1071/SR15143>
- Rosenani, A. B., Rovica, R., Cheah, P. M., & Lim, C. T. (2016b). Growth Performance and Nutrient Uptake of Oil Palm Seedling in Prenursery Stage as Influenced by Oil Palm Waste Compost in Growing Media. *International Journal of Agronomy*, 1 – 8 .  
<https://doi.org/10.1155/2016/6930735>
- Ruiz, S., Or, D., & Schymanski, S. J. (2015). Soil penetration by earthworms and plant roots - Mechanical energetics of bioturbation of compacted soils. *PLoS ONE*, 10(6), 1–26.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128914>
- Ruiz, S., Straub, I., Schymanski, S. J., & Or, D. (2016). Experimental Evaluation of Earthworm and Plant Root Soil Penetration-Cavity Expansion Models Using Cone Penetrometer Analogs. *Vadose Zone Journal*, 15(3), 1–14.  
<https://doi.org/10.2136/vzj2015.09.0126>
- Silalertruksa, T., Bonnet, S., & Gheewala, S. H. (2012). Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 28, 225 – 232 .  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.022>
- Singh G, Kow DL, Lee KH, Lim KC, Loong SG. 1999. Empty fruit bunches as mulch. In: Oil palm and the environment – a Malaysian perspective. Kuala Lumpur. Kuala Lumpur: Malaysian Palm Oil Growers' Council, pp. 171–183.
- Situmorang E.C., Nugroho Y.A., Wicaksono W.A., Toruan-Mathius N., Liwang T., Darminto M., Pujianto Caliman J.P., (2014). Impact of empty fruit bunches application on soil bacterial biodiversity in oil palm plantation, in: ICOPE 2014: Oil Palm Cultivation: Becoming a Model for Tomorrow's Sustainable Agriculture. Cirad, PT-smart and WWF, Bali, Indonesia.
- Suprihatin, A., & Waluyo. (2015). Kebutuhan Hara Tanaman Kelapa Sawit Menghasilkan Di Lahan Kering Masam Sumatera Selatan Nutrient Needs of Producing Oil Palm Crops In Sour Dry Land Of South Sumatra Agus Suprihatin dan Waluyo. *Prosiding Seminar Nasional Swasembada Pangan, April*, 337–342.
- Tao, H. H., Slade, E. M., Willis, K. J., Caliman, J. P., & Snaddon, J. L. (2016). Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 218, 133–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.012>
- Teh, C., & Sung, B. (2016). *Availability , use , and removal of oil palm biomass in Indonesia Working paper Availability , use , and removal of oil palm biomass in Indonesia. January.*  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4697.4485>
- Tobing, P.L. 1997. Minimalisasi dan pemanfaatan limbah cair-padat pabrik kelapa sawit dengan cara daur ulang. Pelatihan Calon Manajer Pabrik Kelapa Sawit . Direktorat Jenderal Perkebunan dan Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Tracy, S. R., Black, C. R., Roberts, J. A., Sturrock, C., Mairhofer, S., Craigon, J., & Mooney, S. J. (2012). Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. *Annals of Botany*, 110(2), 511–519.  
<https://doi.org/10.1093/aob/mcs031>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (R. R. Weil & N. C. Brady

- (eds.); Fifteenth). Pearson Education Limited.
- Weil, R. R., & Magdoff, F. (2004). Significance of Soil Organic Matter to Soil Quality and Health. In F. Magdoff & R. R. Weil (Eds.), *Soil Organic Matter In Sustainable Agriculture* (pp. 1–36). CRC Press LLC. [www.crcpress.com](http://www.crcpress.com)
- Westgate, M. E., & Boyer, J. S. (1984). Transpiration- and Growth-Induced Water Potentials in Maize. *Plant Physiology*, 74(4), 882–889. <https://doi.org/10.1104/pp.74.4.882>
- Yahya, Z., Husin, A., Talib, J., Othman, J., Ahmed, O. H., & Jalloh, M. B. (2010). Oil palm (*Elaeis guineensis*) roots response to mechanization in Bernam series soil. *American Journal of Applied Sciences*, 7(3), 343–348. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.343.348>
- Yusoff, S. (2006). Renewable energy from palm oil - Innovation on effective utilization of waste. *Journal of Cleaner Production*, 14(1), 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.07.005>
- Yusoff, S., & Hansen, S. B. (2007). Feasibility study of performing an life cycle assessment on crude palm oil production in Malaysia. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(1), 50–58. <https://doi.org/10.1065/lca2005.08.226>
- Zhang, M., Pinson, S.R.M., Tarpley, L., Huang, X.Y., Lahner, B., Yakubova, E., Baxter, I., Guerinot, M. Lou., & Salt, D.E. (2014). Mapping and validation of quantitative trait loci associated with concentrations of 16 elements in unmilled rice grain. *Theoretical and Applied Genetics*, 127(1): 137–165. <https://doi.org/10.1007/s00122-013-2207-5>
- Zhang, T. Q., Liu, K., Tan, C. S., Warner, J., & Wang, Y. T. (2011). Processing Tomato Nitrogen Utilization and Soil Residual Nitrogen as Influenced by Nitrogen and Phosphorus Additions with Drip-Fertigation. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2), 738–745. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0365>
- Zuraidah, Y., Haniff, M. H., & Zulkifli, H. (2017). Does soil compaction affect oil palm standing biomass? *Journal of Oil Palm Research*, 29(3), 352–357. <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.2903.07>