

## PELUANG DAN TANTANGAN PEMANFAATAN PRODUK HAYATI DI PERKEBUNAN KELAPA SAWIT

Fandi Hidayat, Fadilla Sapalina, Rizki Desika Putri Pane, dan Winarna

**Abstrak** - Selama empat generasi penanaman kelapa sawit, penggunaan pupuk anorganik dan pestisida di perkebunan kelapa sawit merupakan praktik standar yang umum. Penggunaan pupuk dan pestisida sebagai intensifikasi pertanian akan menimbulkan tantangan tersendiri, di satu sisi produktivitas akan meningkat, tetapi di sisi lain, lingkungan akan menghadapi ancaman serius. Untuk mengatasi penggunaan pupuk kimia dan pestisida, produk hayati muncul sebagai alternatif untuk meminimalkan bahaya terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pada tulisan ini akan diulas secara ringkas mengenai produk hayati khususnya pupuk hayati dengan tujuan untuk memberikan informasi pemanfaatan produk hayati di perkebunan kelapa sawit, peluang, dan tantangannya.

**Kata kunci:** kelapa sawit, mikroorganisme, produk hayati

### PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit memiliki peran strategis terhadap perekonomian Indonesia, antara lain penghasil devisa terbesar, lokomotif perekonomian nasional, kedaulatan energi, pendorong sektor ekonomi kerakyatan, dan penyerapan tenaga kerja. Kelapa sawit ditanam di Indonesia pada tahun 1848 di Kebun Raya Bogor dan ditanam secara komersil pada tahun 1911 (Lubis, 2008). Tanaman kelapa sawit saat ini memasuki penanaman kembali generasi keempat. Selama bertahun-tahun, perhatian para pekebun selalu terfokus pada hasil panen, sehingga penggunaan pupuk anorganik dan pestisida di perkebunan kelapa sawit merupakan praktik standar yang umum (Khatu et al., 2017).

Penggunaan pupuk anorganik sebagai intensifikasi pertanian akan menimbulkan tantangan tersendiri, di satu sisi produktivitas akan meningkat, tetapi di sisi lain, lingkungan akan menghadapi ancaman serius (Wahyuningsih et al., 2019). Dampak pupuk kimia pada tanah dapat meningkatkan salinitas, mengurangi kesuburan tanah, menurunkan potensi menahan air dan

---

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

Fandi Hidayat (✉)  
Pusat Penelitian Kelapa Sawit  
Jl. Brigjen Katamsno No. 51 Medan 20158, Indonesia  
Email: fandihidayat87@gmail.com

inkonsistensi nutrisi tanah (Savci, 2012). Beberapa masalah degradasi tanah juga muncul di perkebunan seperti pengurangan jasa ekosistem, penurunan aktivitas biologis tanah, dan emisi gas rumah kaca (Feller et al., 2012). Selanjutnya pestisida yang digunakan secara terus menerus juga memberikan dampak buruk terhadap mikroflora alami seperti bakteri, jamur, sianobakteria, dan protozoa yang ada di rizosfer, serta menyebabkan ketidakseimbangan dalam ekosistem alami (Dash et al., 2017). Aplikasi pupuk kimia dan pestisida kimia jangka panjang dapat mempengaruhi kesehatan tanah, tekstur tanah, produktivitas tanaman, dan pada akhirnya merusak lingkungan serta kesehatan dan status kesejahteraan manusia (Dash et al., 2017; Joko et al., 2017). Di sisi lain, penting untuk menjaga kualitas tanah, karena kualitas tanah memegang peranan penting dalam ekosistem tanah dan pertanian yang berkelanjutan.

Pada perkebunan kelapa sawit diketahui bahwa limbah tandan kosong kelapa sawit (TKS) dan limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) tidak diolah secara efektif. Menurut Sakiah & Wahyuni (2018) dan Siddiquee et al. (2017) setiap 1 liter LCPKS mengandung rata-rata 457 mg nitrogen, 12 mg fosfat, 375 mg kalium dan 56 mg magnesium, sementara itu TKS mengandung 0,91% N, 2,13% P, dan 6,68% K. Berdasarkan kandungan tersebut, maka limbah dari perkebunan kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai bahan organik.

Selain input bahan organik, untuk mengatasi penggunaan pupuk kimia, pupuk hayati muncul sebagai alternatif untuk meminimalkan bahaya terhadap lingkungan. Pupuk hayati tersebut mengandung strain mikroorganisme yang dapat meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman melalui peningkatan ketersediaan nutrisi (N, P, K, dan lainnya). Penelitian Holmes & Mandjiny (2016) juga melaporkan bahwa mikroorganisme sebagai agen pengendali hayati dapat meminimalkan penggunaan pestisida kimia, aman bagi manusia, musuh alami, dan lingkungan. Oleh karena itu, pada tulisan ini akan diulas secara ringkas mengenai produk hayati dengan tujuan untuk memberikan informasi pemanfaatan produk hayati di perkebunan kelapa sawit, peluang, dan tantangannya.

## Berbagai pemanfaatan produk hayati di pertanian

### 1. Produk pupuk hayati

Pemanfaatan produk hayati di pertanian khususnya berupa pupuk hayati telah dilakukan dengan menggunakan berbagai mikroorganisme. Pupuk hayati atau *biofertilizer* adalah pupuk yang mengandung mikroorganisme dengan sifat-sifat pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR: *plant growth promoting rhizobacteria*), dalam konteks agronomi istilah ini berkaitan dengan produk yang terdiri dari strain bakteri bermanfaat untuk ketersediaan nutrisi tanaman, termasuk carrier dengan masa penyimpanan pada waktu yang ditentukan oleh produsen (Macik et al., 2020).

Mikroorganisme yang terkandung dalam pupuk hayati menjadi penentu jenis pupuk tersebut. Itelima et al. (2018) mengklasifikasikan pupuk berdasarkan kelompok mikroorganisme yang dikandungnya yaitu pupuk hayati yang mengandung bakteri penambat nitrogen (NFB: *nitrogen fixing bacteria*), pupuk hayati fosfor (*phosphorus biofertilizers*) yang terdiri dari PSB (*phosphorus solubilizing bacteria*) dan PMB (*phosphorus mobilizing bacteria*), pupuk hayati pemacu pertumbuhan tanaman (PGPB: *plant growth promoting biofertilizers*), pupuk hayati kalium (*potassium biofertilizers*), pupuk hayati pelarut zinc (ZSB: *zinc solubilizing biofertilizers*), pupuk hayati pengoksidasi sulfur (SOB: *sulfur oxidizing biofertilizers*), dan pupuk hayati pelarut silika (SSB: *silicate solubilizing biofertilizers*).

Nitrogen merupakan unsur yang penting bagi pertumbuhan tanaman, namun tidak dapat diserap langsung. Proses reduksi nitrogen menjadi bentuk yang dapat digunakan tanaman oleh makhluk hidup disebut sebagai fiksasi nitrogen biologis (BNF: *biological nitrogen fixation*). BNF dilakukan dengan bantuan mikroorganisme yang mengkonversi nitrogen atmosfer tidak aktif menjadi bentuk yang berguna secara metabolik, seperti ammonia dan dikatalisis oleh metaloenzim kompleks, yang disebut nitrogenase. Mikroorganisme yang mampu memfiksasi nitrogen dibagi menjadi simbiosis dan non-simbiosis. Pada umumnya mikroorganisme penambat nitrogen simbiosis berasal dari famili *Rhizobiaceae*, membentuk hubungan mutualisme dengan tanaman polong-polongan. Sementara itu, BNF bersifat non-simbiosis dilakukan oleh mikroorganisme endofit yang hidup bebas seperti *Azotobacter* sp., *Azospirillum* sp., dan *Cyanobacteria* sp. (Garcia-Fraile et al., 2015).

Fosfor termasuk makronutrien yang berperan dalam proses metabolisme tanaman. Menurut Barea (2015) pupuk hayati berbasis strain mikroba yang memiliki aktivitas pelarutan fosfat adalah pendekatan yang menjanjikan dan ramah lingkungan untuk meningkatkan ketersediaan fosfor di tanah. Pupuk hayati yang mengandung bakteri pelarut fosfat disebut dengan PSB (*phosphate solubilizing bacteria*), seperti *Pseudomonas* spp., *Agrobacterium* spp., *Bacillus circulans*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Kushneria*, *Paenibacillus*, *Ralstonia*, *Rhizobium*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Bradyrhizobium*, *Salmonella*, *Sinomonas*, dan *Thiobacillus* (Macik et al., 2020). Sementara itu, pupuk hayati yang mengandung mikroorganisme sebagai P-mobilizer disebut dengan PMB (*phosphorus mobilizing biofertilizers*). Mikroorganisme P-mobilizer memiliki kemampuan untuk meningkatkan serapan fosfor dengan memobilisasinya dari tanah dan bukan melarutkan senyawa P (Kumar et al., 2018). Kelompok jamur mikoriza adalah contoh mikroorganisme P-mobilizer, termasuk genus *Acaulospora*, *Entrophospora*, *Gigaspora*, *Glomus*, *Sclerocystis*, dan *Scutellospora* (Sadhana, 2014).

Selain BNF dan pupuk hayati fosfor, PGPB juga terdiri atas mikroorganisme yang mampu meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan memproduksi berbagai zat seperti siderofor, 1-aminosiklopropana-1-karboksilat deaminase (ACC), fitohormon, misalnya asam

indolasetat (IAA), asam giberelat (GA), senyawa organik yang mudah menguap (VOC: *volatile organic compounds*), antibiotik, sianida dan enzim pendegradasi dinding sel jamur. Rhizobakteri pemacu pertumbuhan tanaman, seperti *Agrobacterium*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Actinoplanes*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas* sp., *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Erwinia*, *Enterobacter*, *Amorphosporangium*, *Cellulomonas*, dan *Xanthomonas* (Vejan et al., 2016).

Makronutrien lainnya yang berperan dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah kalium. Unsur ini terlibat dalam proses fotosintesis, aktivasi enzim, sintesis protein dan degradasi gula. Kalium (K) di tanah dalam bentuk mineral K, K yang tidak dapat ditukar (*non-exchangeable* K), K yang dapat ditukar (*exchangeable* K) dan K larutan. Mikroorganisme yang telah dilaporkan memiliki aktivitas pelarutan K antara lain *Bacillus circulans*, *Bacillus edaphicus* and, *Burkholderia* sp., *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Arthrobacter* sp., *Paenibacillus mucilaginosus*, *P. frequentans*, *Cladosporium* sp., *Aminobacter* sp., *Sphingomonas* sp., *Pacanolyticus* sp., dan *Enterobacter hormaechei* (Macik et al., 2020).

Mikroorganisme juga diketahui sebagai penghasil EPS (*extracellular polymeric substances*). Produksi eksopolisakarida efektif dalam pembentukan agregasi rizosfer tanah, menentukan volume makropori tanah, meningkatkan plastisitas tanah liat dan meningkatkan kekuatan mekanik mineral lempung. Bakteri yang diketahui sebagai penghasil EPS yaitu *Sphingomonas*, *Rhizobium*, *Pseudomonas*, *Bacillus* dan *Streptococcus*, *Azotobacter vinelandii*, *A. chroococcum*, *Acetobacter xylinum*, *Burkholderia caribensis*, dan *Azospirillum* (Kucuk, 2020).

## 2. Pengendalian hama penyakit

Pengendalian hama penyakit tanaman secara biologis merupakan metode non-kimiawi untuk pengelolaan penyakit tanaman dengan menggunakan makhluk hidup lain, seperti mikroorganisme. Mikroorganisme yang bertindak sebagai agen biokontrol dapat menghasilkan senyawa antibiotik atau enzim yang mampu melisis dinding sel jamur (kitinase, 1,3-glukanase, protease, atau lipase), penipisan zat besi dari rizosfer, dan menginduksi resisten sistemik

(Parani & Saha, 2012). Produksi satu atau lebih antibiotik adalah mekanisme yang paling sering dikaitkan dengan kemampuan biokontrol.

Pada tanaman kelapa sawit telah dilakukan upaya pengendalian *Ganoderma boninense* yang umumnya melalui kultur teknis, yaitu membersihkan atau menghancurkan kelapa sawit yang terinfeksi serta penggunaan fungisida. Namun, kegiatan tersebut memerlukan tenaga kerja yang banyak dan mahal, sedangkan penggunaan fungisida memerlukan pemakaian berulang dan berdampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan pengguna. Oleh karena itu, perlu dicari alternatif dengan menerapkan pengendalian yang ramah lingkungan. Agen pengendalian hayati adalah salah satu cara yang menjanjikan untuk mengendalikan patogen, yang ramah lingkungan. Menurut (Holmes & Mandjiny (2016) keunggulan penggunaan agen pengendali hayati adalah meminimalkan penggunaan pestisida kimia, aman bagi manusia, musuh alami, dan lingkungan. Beberapa spesies yang digunakan untuk mengendalikan patogen tanaman, seperti *Trichoderma* (*T*) *harzianum*, *T. viride*, dan *T. koningii*, *Trichoderma* sp., *Pseudomonas fluorescens*, dan *Gliocladium virens* pada rizosfer. Spesies tersebut diketahui dapat mengendalikan patogen pada tanaman kelapa sawit, tomat, bunga matahari, beras, kentang, lada, kubis, dan lainnya (Rajeshkumar, 2019).

## 3. Dekomposer limbah kelapa sawit

Mikroorganisme merupakan agen perombak residu organik menjadi kompos yang umumnya disebut dengan proses pengomposan. Jamur merupakan mikroba dekomposer utama yang mempercepat proses dekomposisi substrat yang kompleks (Purahong et al., 2016). Selain itu, bakteri dari golongan *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Firmicutes* dan *Bacteroidetes* ditemukan dapat memproduksi enzim ekstraseluler yang aktif dalam mendegradasi substrat organik (Bani et al., 2018). Pola suksesi tiap mikroba berbeda dalam proses dekomposisi tergantung dari daya adaptasi lingkungan dan kebutuhan substratnya (Buresova et al., 2019). Akan tetapi, aktinobakteria diidentifikasi sebagai *substrate generalist* yaitu aktinobakteria yang dapat memecah atau melakukan dekomposisi pada berbagai jenis dan kualitas substrat, sedangkan jamur

diidentifikasi memiliki sifat *site generalism* yaitu dalam proses dekomposisi jamur lebih tahan terhadap pengaruh lingkungan (Buresova et al., 2019). Enzim yang berperan dalam proses dekomposisi adalah arylsulfatase, kitinase, laktase, dan mangan peroksidase.

Pengomposan dianggap sebagai salah satu cara yang paling tepat untuk mengurangi penumpukan limbah biomassa (Mohammad et al., 2012). Menurut Carron et al. (2015) aplikasi TKS pada lahan akan meningkatkan kesuburan tanah dan keanekaragaman hayati setidaknya dua tahun setelah aplikasi. Tao et al., (2016) menunjukkan bahwa aplikasi kompos TKS dapat mempertahankan tingkat produktivitas yang tinggi. Akan tetapi aplikasi TKS segar akan meningkatkan serangan *Oryctes* ssp. dibandingkan TKS kompos (Supriatna et al., 2018), sehingga penggunaan kompos dibanding aplikasi TKS langsung dapat berkontribusi untuk mengurangi penggunaan pestisida.

Pengomposan produk sampingan pabrik kelapa sawit untuk pemupukan blok komersial dapat meningkatkan daur ulang nutrisi, mengurangi biaya pemupukan, meningkatkan efisiensi nutrisi melalui pelepasan yang lebih lambat dan meningkatkan kualitas tanah dari sudut pandang fisik dan biologis (Baron et al., 2019). Penggunaan kompos juga dapat dikaitkan dengan mitigasi perubahan iklim (Nasution et al., 2014), dengan menghindari kondisi anaerobik. Tandan kosong kelapa sawit dari pabrik kelapa sawit telah banyak dimanfaatkan untuk produksi pupuk organik dan praktik ini juga mengurangi volume TKS hingga 50% (Chavalparit et al., 2006).

#### 4. Pengolahan limbah cair

Industri kelapa sawit menghasilkan limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) dalam jumlah besar dan akan diberi sanksi apabila membuang LCPKS mentah atau sebagian yang diolah ke aliran air (Khatun et al., 2017). Saat ini sebagian besar pabrik melakukan pengolahan anaerobik parsial di kolam atau metanisasi di tangki digester anaerobik, diikuti dengan aplikasi LCPKS di lapangan. Namun, pengolahan kolam terbuka akan menghasilkan emisi metana yang tinggi (Bessou et al., 2014) dan aplikasi LCPKS mentah sebagai pupuk di lahan dapat menyebabkan kemacetan perkolasi dan genangan air, sehingga

menghasilkan kondisi anaerobik (Mohammad et al., 2012; Zahrim et al., 2014). Pengelolaan limbah yang lebih baik bertujuan untuk menghindari kontaminasi air permukaan dan air tanah karena limpasan tanah dan meningkatkan nutrisi (Singh et al., 2010; Zahrim et al., 2014).

Dibandingkan dengan pengolahan LCPKS di kolam anaerobik, pengomposan LCPKS dalam kondisi aerobik akan secara signifikan mengurangi emisi metana (Norhasmillah et al., 2013). Kompos diterapkan di lapangan sebagai pengganti pupuk mineral NPK-Mg, dan karenanya akan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan eksternalitas negatif lainnya dari pemupukan anorganik (Wicke et al., 2008). Penelitian Oviasogie dan Aghimien (2003) menegaskan bahwa penggunaan LCPKS yang tepat pada lahan akan secara langsung meningkatkan kesuburan tanah. Hasil penelitian Oviasogie dan Aghimien juga menunjukkan pengayaan tanah berkaitan dengan fosfor, nitrogen, kalsium, magnesium setelah aplikasi LCPKS. Penggunaan LCPKS sebagai pupuk organik yang murah dapat menawarkan alternatif untuk aplikasi pupuk kimia yang berlebihan, terutama fosfor (Ta et al., 2009).

#### Peluang dan tantangan pemanfaatan produk hayati

##### 1. Peluang pemanfaatan produk hayati

Produk hayati khususnya pupuk hayati secara global diperkirakan bernilai USD 2,6 miliar pada tahun 2021 dan akan mencapai nilai USD 4,5 miliar pada tahun 2026 (Research & Markets, 2021). Peningkatan minat pasar pupuk hayati tersebut dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor, seperti meningkatnya luas pertanian organik, adanya dukungan oleh lembaga pemerintah dan meningkatnya kesadaran tentang perlunya keberlanjutan dalam pertanian modern (Research & Market, 2021). Produk hayati yang ramah lingkungan mendorong berbagai aplikasi mikroorganisme seperti rizobakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR), jamur endo dan ektomikoriza, dan sianobakteria. Namun, masih banyak yang harus dikembangkan lebih lanjut untuk mendapatkan manfaat potensial dari produk hayati.

Dalam beberapa tahun terakhir, produksi dan penggunaan biopestisida semakin meningkat dan menggantikan beberapa pestisida kimia sintetik yang diaplikasikan pada komoditas pangan (De La Cruz



Quiroz et al., 2015). Dalam tinjauan ini, pengendalian hayati difokuskan sebagai alternatif, untuk beberapa perawatan kimia sintetis untuk mengurangi risiko pencemaran lingkungan, kesehatan manusia, dan meningkatkan kualitas makanan (Ruano-Rosa & Lo'pezHerrera, 2009). Selain itu, beberapa mikroorganisme fitopatogen telah resisten terhadap beberapa bahan kimia sintetis ini dan menjadi lebih sulit untuk dikendalikan (De La Cruz Quiroz et al., 2015). Di seluruh dunia, pasar biopestisida tumbuh setiap tahun pada tingkat 44% di Amerika Utara, 20% di Eropa dan Oseania, 10% di negara-negara Amerika Latin dan Selatan dan 6% di Asia (De La Cruz Quiroz et al., 2015).

## 2. Tantangan pemanfaatan produk hayati

Ketertarikan pada pupuk hayati meningkat dan begitu pula potensi penggunaannya dalam pertanian berkelanjutan. Namun, banyak produk yang saat ini tersedia di seluruh dunia sering kali berkualitas sangat buruk yang berdampak pada hilangnya kepercayaan petani akan efektivitas produk hayati tersebut. Di sisi lain, formulasi inokulan adalah proses multistep penting yang harus menghasilkan satu atau beberapa galur mikroorganisme yang termasuk dalam pembawa yang sesuai. Upaya menyediakan lingkungan (medium) yang aman untuk mikroorganisme dari kondisi yang sering kali sulit selama penyimpanan dan memastikan kelangsungan hidup dan pembentukan setelah dimasukkan ke dalam tanah juga menjadi tantangan ke depannya (Herrmann & Lesueur, 2013).

Selain itu, pupuk hayati menjadi kurang efektif ketika diaplikasikan di lapangan sebab rendahnya kandungan bahan organik tanah dapat menekan populasi sumber daya hayati yang berperan penting sebagai agen pengendali kesuburan tanah alami (Subowo et al., 2013). Selanjutnya, dalam sistem budidaya pertanian intensif sering kali dilakukan aplikasi bahan-bahan pestisida, sehingga dapat mengganggu populasi organisme tanah bukan target (Subowo et al., 2013). Oleh karena itu, masalah yang harus dihadapi dalam aplikasi pupuk hayati adalah kesiapan tanah/habitat untuk mendukung kehidupan organisme pupuk hayati. Penerapan kultur teknis yang baik, penggunaan pestisida yang bijak dan pengembalian C-organik dalam bentuk seresah dan tandan kosong dapat membantu meningkatkan efektivitas pupuk hayati dan secara langsung dapat

meningkatkan kesehatan tanah serta memperbaiki lingkungan.

Produk pupuk hayati dapat dikembangkan melalui *next generation sequencing* (NGS), kandungan DNA suatu organisme atau profil seluruh organisme dalam sampel dapat diketahui, sehingga digunakan untuk menyaring kandidat mikroba yang menguntungkan dan membantu dalam memahami bagaimana pupuk hayati berinteraksi dengan lingkungan mikro alami. Menurut Igiehon & Babalola (2017) NGS dapat digunakan untuk mengetahui bagaimana fungsi mikoriza arbuskular (FMA) berinteraksi dengan indigenous FMA dan menyaring kandidat mikroba yang menguntungkan. Selain NGS, teknologi lainnya yang berkembang saat ini, seperti teknologi mikroenkapsulasi, liofilisasi, dan nano-biofertilizer.

Teknologi mikroenkapsulasi adalah salah satu teknik yang memungkinkan pelepasan terkontrol dari pupuk hayati ke lingkungan. Mikroenkapsulasi dapat menjadi pelindung (penutup) seperti kapsul yang memiliki kemampuan untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan umur simpan pupuk hayati. Sel bakteri terlindungi di dalam matriks polimer, sehingga melindungi agen hayati terhadap kondisi lingkungan (Campos et al., 2014). Liofilisasi adalah metode pengeringan beku (*freeze-drying*) untuk pengawetan dan penyimpanan mikroorganisme. Metode ini adalah cara yang efisien untuk meningkatkan tingkat kelangsungan hidup bakteri, sehingga dapat disimpan dalam waktu yang lebih lama (Çakmakçı, 2019). Seiring berkembangnya teknologi, saat ini sudah dikembangkan pupuk hayati berbasis nano-teknologi yang disebut dengan nano-biofertilizer. Teknologi ini merupakan gabungan sifat potensial dari bahan nano dan pupuk hayati, membantu pengembangan pupuk hayati nano yang baru, murah, dan ramah lingkungan (Kumari & Singh, 2020).

## KESIMPULAN

Pemanfaatan produk hayati pada perkebunan kelapa sawit meliputi produk pupuk hayati, pengendalian hama penyakit tanaman, dekomposer limbah kelapa sawit, dan pengolahan limbah cair. Peluang dari produk hayati dapat dilihat dari semakin meningkatnya minat pasar, yang dipengaruhi oleh meningkatnya luas pertanian organik, adanya dukungan oleh lembaga pemerintah, meningkatnya

kesadaran tentang perlunya keberlanjutan dalam pertanian modern, mengurangi risiko pencemaran lingkungan, kesehatan manusia, dan meningkatkan kualitas makanan. Sementara itu, tantangan yang dihadapi untuk produk hayati pada masa yang akan datang yaitu meningkatkan kepercayaan petani akan efektivitas produk hayati tersebut dan aplikasi teknologi terbaru untuk mendukung pengembangan agen hayati yang unggul.

## DAFTAR PUSTAKA

- Bani, A., Pioli, S., Ventura, M., Panzacchi, P., Borruso, L., Tognetti, R., Tonon, G., & Brusetti, L. (2018). The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and deadwood. *Applied Soil Ecology*, 126(2018), 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.017>
- Baron, V., Supriatna, J., Marechal, C., Sadasiban, R., & Bonneau, X. (2019). Waste reduction and nutrient recovery during the co-composting of empty fruit bunches and palm oil mill effluent. *E-Journal Menara Perkebunan*, 87(2), 77–86. <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v87i2.338>
- Barea, J. M. (2015). Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(2), 261-282
- Bessou, C., Chase, L.D.C., Henson, I.E., Abdul-Manan, A.F.N., Milà i Canals, L., & Agus, F. (2014). Pilot application of PalmGHG, the RoundTable on Sustainable Palm Oil greenhouse gas calculator for oil palm products. *Journal of Cleaner Production*, 73(2014), 136-45
- Buresova, A., Kopecky, J., Hrdinkova, V., Kamenik, Z., Omelka, M., & Sagova-Mareckova, M. (2019). Succession of microbial decomposers is determined by litter type, but site conditions drive decomposition rates. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(24), 1–16. <https://doi.org/10.1128/AEM.01760-19>
- Çakmakçı, R. (2019). A Review of Biological Fertilizers Current use, New Approaches, and Future Perspectives. *International Journal of Innovative Studies in Sciences and Engineering Technology*, 5(7), 83–92.
- Campos, D. C., Acevedo, F., Morales, E., Aravena, J., Amiard, V., Jorquera, M. A., & Rubilar, M. (2014). Microencapsulation by spray drying of nitrogen-fixing bacteria associated with lupin nodules. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30(9), 2371–2378. <https://doi.org/10.1007/s11274-014-1662-8>
- Carron, M. P, Pierrat, D., Snoeck, Villenave, C., Ribeyre, F., Suhardi, R., Marichal, & Caliman (2015). Temporal variability in soil quality after organic residue application in mature oil palm plantations. *Soil Research*, 53(2), 205-215.
- Chavalparit O, Rulkens WH, Mol APJ, & Khaodhair, S. (2006) Option for environmental sustainability of the crude palm oil industry in Thailand through enhancement of industrial ecosystem. *Environment, Development and Sustainability* 8(2006): 271–287
- Dash, N., Pahari, A., & Dangar, T. Kanti. (2017). Functionalities of Phosphate-Solubilizing Bacteria of Rice Rhizosphere: Techniques and Perspective. In *Recent advances in Applied Microbiology*, (pp. 151–163). <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5275-0>
- De La Cruz Quiroz, R., Roussos, S., Hernández, D., Rodríguez, R., Castillo, F., & Aguilar, C. N. (2015). Challenges and opportunities of the biopesticides production by solid-state fermentation: Filamentous fungi as a model. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(3), 326–333. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.857292>
- Feller, C., Blanchart, E., Bernoux, M., Lal, R., & Manlay, R. (2012). Soil fertility concepts over the past two centuries: The importance attributed to soil organic matter in developed and developing countries. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 58(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/03650340.2012.693598>
- Garcia-Fraile, P., Menéndez, E., & Rivas, R. (2015). Role of bacterial biofertilizers in agriculture and forestry. *AIMS Bioengineering*, 2(3), 183–205. <https://doi.org/10.3934/bioeng.2015.3.183>
- Herrmann, L., & Lesueur, D. (2013). Challenges of formulation and quality of biofertilizers for

- successful inoculation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(20), 8859–8873. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8>
- Holmes, L., & Mandjiny, S. (2016). Biological Control of Agriculture Insect Pests. *European Scientific Journal*, 1(1), 216–225.
- Igiehon, N. O., & Babalola, O. O. (2017). Biofertilizers and sustainable agriculture: exploring arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 101(12), 4871–4881. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8344-z>
- Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbere, O. J. (2018). Bio-fertilizers as Key Player in Enhancing Soil Fertility and Crop Productivity: A Review. *Journal of Microbiology*, 2(1), 74–83. Retrieved from <https://dspace.unijos.edu.ng/jspui/bitstream/123456789/1999/1/Itelima-et-al%281%29.pdf>
- Joko, T., Anggoro, S., Sunoko, H. R., & Rachmawati, S. (2017). Pesticides usage in the soil quality degradation potential in wanasari subdistrict, Brebes, Indonesia. *Applied and Environmental Soil Science*, 2(2017), 1-7
- Khatun, R., Reza, M.I.H., Moniruzzaman, M., & Yaakob, Z., (2017). Sustainable oil palm industry: The possibilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(2017), 608–619.
- Kucuk, C. (2020). In vitro Exopolysaccharide Production of Some Soil Bacteria Isolated from Soil Affected by Salt. *European Journal of Biology and Biotechnology*, 1(4), 1–6.
- Kumar, S. M., Reddy, C. G., Phogat, M., & Korav, S. (2018). Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(6), 1915–1921.
- Kumari, R., & Singh, D. P. (2020). Nano-biofertilizer: An Emerging Eco-friendly Approach for Sustainable Agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences*, 90(4), 733–741. <https://doi.org/10.1007/s40011-019-01133-6>
- Lubis, A. U. (2008). Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* jacq.) di Indonesia. Medan: Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Macik, M., Gryta, A., & Frac, M. (2020). Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms. *In Advances in Agronomy* 162(2020). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001>
- Mohammad, N., Alam, M. Z., Kabbashi, N. A., & Ahsan, A. (2012). Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 58(3), 69–78. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.10.009>
- Nasution, H., Hanum, C., & Lahay, R. (2014). Pertumbuhan Bibit Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.) Pada Berbagai Perbandingan Media Tanam Sludge Dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Di Preenursery Pree Nur Sersey. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, 2(4), 1419–1425. <https://doi.org/10.32734/jaet.v2i4.8436>
- Norhasmillah, A.H., Puah C.W., Ibrahim N.A., Baharuddin, A.S., & Choo, Y.M., (2013). Life cycle inventory of the commercial production of compost from oil palm biomass: a case study. *Environment, Development and Sustainability*, 15(6), 1663-70.
- Oviasogie, P. O, & Aghimien, A. E. (2003). Macronutrient status and speciation of Cu, Fe, Zn and Pb in soil containing palm oil mill effluent. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 9(2003), 71–80
- Parani, K., & Saha, B. K. (2012). Prospects of Using Phosphate Solubilizing Pseudomonas as Bio Fertilizer. *European Journal of Biological Sciences*, 4(2), 40–44. <https://doi.org/10.5829/idosi.ejbs.2012.4.2.63117>
- Purahong, W., Wubet, T., Lentendu, G., Schloter, M., Pecyna, M. J., Kapturska, D., & Buscot, F. (2016). Life in leaf litter: novel insights into community dynamics of bacteria and fungi during litter decomposition. *Molecular Ecology*, 25(16), 4059–4074. <https://doi.org/10.1111/mec.13739>
- Rajeshkumar, S. (2019). Antifungal Impact of Nanoparticles Against Different Plant Pathogenic Fungi. In *Nanomaterials in Plants*,

- Algae and Microorganisms Concepts and Controversies*, 2(1), 197-217.
- Research & Markets. (2021). Global Biofertilizers Market (2021 to 2026) - Increase in the Production and Yield of Crops Presents Opportunities. Retrieved from Global Biofertilizers Market website: <https://www.globenewswire.com/en/newsrelease/2021/06/14/2246312/28124/en/Global-Biofertilizers-Market-2021-to-2026-Increase-in-the-Production-and-Yield-of-Crops-Presents-Opportunities.html>
- Ruano-Rosa, D. & Lo'pez-Herrera, C.J. (2009). Evaluation of *Trichoderma* spp. as biocontrol agents against avocado white root rot. *Biological Control*, 51(2009), 66–71.
- Sadhana, B. (2014). Review Article Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) as a Biofertilizer- a Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(4), 384 – 400. Retrieved from <http://www.ijcmas.com>
- Sakiah & Wahyuni, M. (2018). Analysis of C-Organic, Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Application Areas and Without Application of Palm Oil Mill Effluent. *Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 11(4), 23–27. <https://doi.org/10.9790/2380-1104012327>
- Savci, S. (2012). An Agricultural Pollutant: Chemical Fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Development*, 3(1), 73–80. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2012.v3.191>
- Siddiquee, S., Shafawati, S. N., & Naher, L. (2017). Effective composting of empty fruit bunches using potential *Trichoderma* strains. In *Biotechnology Reports*, 13(2017), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.11.001>
- Singh, R.P., Hakimi, I. M., & Esa, N. (2010) Composting of waste from palm oil mill: a sustainable waste management practice. Reviews in *Environmental Science and Biotechnology*, 9(2010), 331–344
- Subowo, Purwani, J., & Rochayati, S. (2013). Prospek dan Tantangan Pengembangan Biofertilizer untuk Perbaikan Kesuburan Tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 7(1), 15–26. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v7i1.6422>
- Supriatna, J., Baron, V., Sadasiban, R., & Bonneau, X., (2018). Composting For Sustainable Palm Oil Production, In International Conference Oil Palm Environment (ICOPE), Nusa Dua, Indonesia, 26-27.
- Ta, Y.W., Mohammad, A.W., Jahim J.M., & Anuar N. (2009) A holistic approach to managing palm oil mill effluent (LCPKS): biotechnological advances in the sustainable reuse of LCPKS. *Biotechnology Advances*, 27(2009), 40–52.
- 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 & Environment*, 218(2016), 133-40.
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Nasrulhaq Boyce, A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability-A review. *Molecules*, 21(5), 1–17. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>
- Wahyuningsih, R., Marchand, L., & Caliman, J. P. (2019). Impact of inorganic fertilizer to soil biological activity in an oil palm plantation. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 336(1), 1-8
- Wicke, B., Dornburg, V., Junginger, M., & Faaij, A., (2008). Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass Bioenergy*, 32(12), 1322-1337.
- Zahrim A.Y, Nasimah, A., & Hilal, N. (2014). Pollutants analysis during conventional palm oil mill effluent (LCPKS) ponding system and decolourisation of anaerobically treated LCPKS via calcium lactate-polyacrylamide. *Journal of Water Process Engineering*, 4(2014), 159-165.