

Biochar-Kompos Berbasis Limbah Kelapa Sawit: Bahan Amandemen untuk Memperbaiki Kesuburan dan Produktivitas Tanah Di Lahan Rawa

Biochar-Compost Based on Palm Oil Waste: An Amendment Material to Improve Soil Fertility and Productivity in Swamplands

¹Wahida Annisa, ¹ES Hersanti, ¹Ali Pramono, ²Muhammad Saleh, ³Edy Sigit Sutarta, ⁴Evi Setiawati, ⁵Hendri Sosiawan, ⁶Mas Teddy Sutriadi, ⁷Husnain

¹Balai Penelitian Lingkungan Pertanian

²Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa, Banjarbaru

³Pusat Penelitian Kelapa Sawit, Medan (PPKS)

⁴Balai Riset dan Standarisasi Industri

⁵Balai Penelitian Hidrologi dan Agroklimat, Bogor

⁶Balai Penelitian Tanah

⁷Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian

Email: wahidaannisa@pertanian.go.id

Diterima 10 Maret 2021, Direview 4 April 2021, Disetujui dimuat 21 Oktober 2021, Direview oleh Masganti dan Ai dariah

Abstrak. Penambahan bahan amandemen tanah bersumber dari bahan organik atau biochar merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi faktor pembatas tanah di lahan rawa. Tandan buah kosong kelapa sawit merupakan limbah terbesar yang dihasilkan dari perkebunan sawit dibandingkan dengan limbah kelapa sawit lainnya seperti cangkang sawit. Pengelolaan biomassa tandan buah kosong kelapa sawit dalam jumlah besar dengan metode konvensional seperti penimbunan lahan dan pembakaran di pabrik akan menimbulkan masalah dampak lingkungan yang serius. Pengomposan dan mengubah menjadi biochar menjadi salah satu alternatif untuk pengelolaan limbah yang menghasilkan amandemen tanah untuk memperbaiki kesuburan tanah rawa dan produktivitas serta memulihkan daerah yang terkontaminasi dengan logam yang berpotensi beracun. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan biochar sebagai salah satu pendekatan untuk mengurangi pencemaran tanah di lahan rawa melalui proses immobilisasi logam. Pemberian Biochar Sekam Padi yang diperkaya dengan kompos limbah pertanian di lahan rawa eksisting dapat meningkatkan pH tanah, menurunkan unsur toksik Fe serta menurunkan emisi metana (CH₄) dan meningkatkan hasil gabah mencapai 28%. Sebagai amandemen tanah, biochar bisa berperan sebagai penyerap karbon atmosfer akibat konversi karbon bio-degradable (biomassa) menjadi karbon aromatik (biochar) yang kurang terdegradasi. Tujuan studi ini adalah untuk mensintesis seluruh hasil penelitian secara kualitatif untuk menggali potensi biochar dan bahan organik sebagai bahan amandemen untuk meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah di lahan rawa. Studi ini menggunakan metode sistematik review yang merangkum hasil-hasil penelitian primer.

Kata Kunci: biomassa kelapa sawit, unsur toksik, pirolisis, sifat kimia tanah

Abstract. The addition of soil amendment composed from organic matter or biochar is the appropriate solution to overcome soil limiting factors in swamp land. Oil palm empty fruit bunches are the dominant waste in oil palm plantations compared to other wastes such as oil palm shells. The management of large quantities of oil palm empty fruit bunch biomass by conventional methods, such as landfilling and burning in factories, will cause serious environmental impacts. Composting and converting it to biochar is an alternative waste management. This produces soil amendments that could improve swamp soil fertility and productivity as well as recover areas contaminated with potentially toxic metals. Recent research shows that biochar application is an approach to reduce soil pollution in swamps through the process of metal immobilization. Provision of Rice Husk Biochar, enriched with agricultural waste compost in the existing swamp land, can increase soil pH, reduce Fe toxic elements, reduce methane (CH₄) emissions and increase grain yields to 28%. As a soil amendment, biochar acts as an atmospheric carbon sink due to the conversion of bio-degradable carbon (biomass) into less degraded aromatic carbon (biochar). The purpose of this study is to qualitatively synthesize all research to explore the potential of biochar and organic matter as amendments to increase soil fertility and productivity in swamps. This study uses a systematic review method that summarizes the primary research results.

Keywords: oil palm biomass, toxic elements, pyrolysis, chemical properties

INTRODUCTION

Pada masa dan pasca pandemi, pemerintah terus berusaha mengatasi masalah pembangunan ekonomi nasional yang diarahkan untuk mengurangi kemiskinan, mengatasi pengangguran, peningkatan pendapatan, stabilisasi ekonomi, serta pemerataan pembangunan. Pertanian merupakan sektor yang terbukti menjadi penyelamat perekonomian Indonesia di masa pandemi ini. Agribisnis kelapa sawit merupakan subsektor yang paling berperan dalam menjaga pertumbuhan ekonomi sektor pertanian tetap positif. Oleh karena itu pengembangan agribisnis kelapa sawit merupakan salah satu solusi dalam memecahkan permasalahan ekonomi.

Sebelum masa pandemi, industri kelapa sawit juga telah mengambil peranan cukup besar dalam pertumbuhan ekonomi bangsa, diantaranya sebagai salah satu penyumbang devisa terbesar mencapai USD 22.97 miliar pada Tahun 2020. Pemanfaatan lahan rawa untuk budidaya tanaman kelapa sawit dipandang sebagai peluang untuk memacu produksi sawit meskipun disadari bahwa produktivitas di lahan tersebut masih rendah. Lahan rawa merupakan lahan yang selalu dijenuhi air sepanjang tahun, baik yang berasal dari hujan maupun luapan sungai atau pengaruh pasang surut air laut. Keberadaan air tersebut terutama disebabkan oleh bentuk fisiografi datar sampai cekung yang tidak memungkinkan air teratus secara cepat, sehingga air cenderung stagnasi dan kondisi menjadi reduktif (Annisa dan Dariah 2017).

Pengalihfungsian rawa untuk produksi biomassa yang dibudidayakan melalui pembukaan lahan dan pembuatan saluran drainase dapat menyebabkan perubahan suasana reduktif ke arah oksidatif yang disertai oleh pemasaman tanah. Menurut Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 2010) tanah di lahan rawa dimasukkan dalam kelompok besar (great group) (1) tanah alluvial marin (*Sulfaquent*, *Sulfaquept*, *Hydraquent*, *Fluvaquent*), (2) tanah alluvial sungai (*Endoaquent*, *Endoaquept*), dan (3) tanah gambut (*Haplofibrist*/*Hemist*, *Sulfihemist*/*Saprist*, *Sulfohemis*/*Saprist*). Dari ketiga kelompok besar tanah tersebut, kelompok tanah alluvial marin banyak ditemukan pada tipologi rawa pasang surut dan rawa pantai, sedangkan kelompok tanah gambut banyak ditemukan baik pada rawa pasang surut maupun rawa lebak, dan sedikit di tipologi rawa pantai. Tanah sulfat masam merupakan tanah yang terbentuk di daerah rawa pantai dengan vegetasi mangrove

sebagai sumber bahan organik, yang mengakibatkan turunnya potensial redoks tanah (Eh) (Annisa dan Dariah 2017).

Kendala utama pengembangan kelapa sawit di lahan rawa adalah kapasitas menyangga tanah yang kurang stabil, permeabilitas, bahan organik dan tingkat kebasahan rendah, serta pH tanah yang masam, rata-rata pH 3.5-4,0. Penyebab utamanya yaitu keberadaan unsur toksik yang tinggi, dimana pada kondisi tergenang terjadi proses reduksi SO_4^{2-} dan Fe (III) oksida yang dilakukan oleh bakteri pereduksi besi dan sulfat. Kedua komponen tersebut besi dan sulfat membentuk senyawa yang disebut pirit. Agroekologi perkebunan kelapa sawit di lahan rawa merupakan suatu sistem yang sangat kompleks dan dinamis. Dinamika sistem terbentuk dari berbagai interaksi antara vegetasi, siklus hara dan hidrologi. Kondisi ini mengakibatkan sebagian besar produktivitas tanaman tidak dapat dicapai secara optimal sebagai akibat masih rendahnya tingkat penerapan teknologi budidaya tanaman, mulai dari pembibitan, pemeliharaan tanaman sampai dengan panennya serta tindakan ameliorasi tanah.

Menurut Corley *et al.* (1971) produksi optimal yang dapat dicapai kelapa sawit adalah 30 ton TBS/ha/tahun. Sedangkan produktivitas rata-rata tanaman kelapa sawit umur 5 tahun pada lahan rawa pasang surut (sulfat masam) di Sumatera Selatan dengan pengelolaan lahan yang baik dapat mencapai 18,27 ton TBS/ha/tahun. Keseimbangan nutrisi menjadi point penting dalam meningkatkan produktivitas tanaman kelapa sawit khususnya di lahan rawa, sehingga hal yang perlu dilakukan untuk meningkatkan produktivitas yang optimal dan berkelanjutan melalui pemupukan dengan mempertimbangkan status hara tanah dan kebutuhan tanaman. Untuk mendapatkan kondisi tanah yang optimal bagi pertumbuhan tanaman, diperlukan adanya bahan organik (C-total) di lapisan atas minimal 2% (Young 1989). Annisa dan Nursyamsi (2016a) melaporkan bahwa salah satu upaya untuk mengatasi masalah kesuburan tanah di lahan rawa dengan menambahkan bahan amelioran salah satunya biochar. Penggunaan biochar dapat meningkatkan produktivitas pertanian melalui penurunan keasaman tanah (pH) serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik. Selain itu, Kayikcioglu (2013) mengatakan bahwa kebutuhan nutrisi tanaman kelapa sawit dapat dihasilkan salah satunya dari kompos limbah agroindustri untuk mengurangi penggunaan pupuk

kimia. Peranan bahan organik terutama untuk meningkatkan granulasi dan kestabilan agregat melalui aktivitas fraksi humik yang dapat menurunkan sifat plastis, kohesi dan sifat lengket liat sehingga tanah lebih mudah diolah, meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam tanah karena humus sebagai komponen bahan organik umumnya memiliki 50-90% daya adsorpsi kation oleh mineral liat (Husnain dan Nursyamsi 2015).

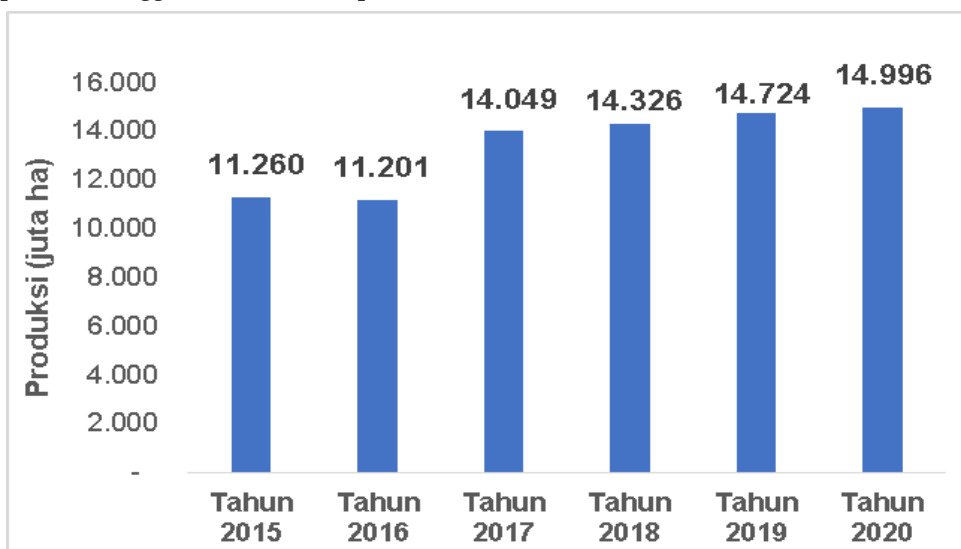
Kombinasi biochar dan bahan organik dapat menjadi titik ungu untuk peningkatan produktivitas tanaman sawit. Sumber biochar dan bahan organik dapat diperoleh dari limbah kelapa sawit seperti cangkang kelapa sawit dan tandan buah kosong yang disebut *dried decanted sludge* (DDS). Kombinasi biochar dengan bahan organik akan memberikan pengaruh positif dan sinergis untuk perbaikan sifat kimia tanah dan peningkatan produktivitas kelapa sawit serta penyerapan karbon untuk sistem penggunaan lahan pada budidaya tanaman kelapa sawit yang berkelanjutan. Tujuan penulisan paper ini adalah untuk mensintesis seluruh hasil penelitian secara kualitatif tentang potensi biochar dan bahan organik sebagai bahan amandemen untuk meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah di lahan rawa. Paper ini disusun dengan menggunakan metode sistematik review yang merangkum hasil-hasil penelitian primer terkait peran biochar dan bahan organik dari biomassa kelapa sawit sebagai bahan amandemen untuk memperbaiki kesuburan tanah. Untuk menyajikan fakta agar lebih komprehensif, paper ini menggunakan pendekatan kualitatif. Langkah-langkah yang digunakan dalam pembuatan paper ini menggunakan metode penulisan

review Francis dan Baldesari (2006). Ada lima tahapan dalam penulisan paper review ini yaitu: 1) memformulasikan semua pertanyaan tentang peran bahan amelioran, 2) mengumpulkan pustaka yang terkait dengan topik review, 3) menyeleksi artikel penelitian yang cocok dengan topik di bahas, 4) melakukan analisis dan sintesis secara kualitatif, 5) menyusun paper.

PERKEMBANGAN AGROINDUSTRI DAN PRODUKSI BIOMASA KELAPA SAWIT

Selama kurun waktu 20 tahun terakhir, industri kelapa sawit Indonesia mengalami perkembangan yang signifikan, dimana jumlah produksi dan ekspor mengalami peningkatan. USDA (2007) dan Yacob (2008) melaporkan bahwa Indonesia dan Malaysia merupakan penyumbang terbesar minyak sawit dunia, mencapai 87% dari total produksi sawit dunia (Gambar 1). Perkembangan industri kelapa sawit juga ditandai dengan semakin luasnya areal perkebunan kelapa sawit. Selama kurun waktu 2015-2020, luas areal perkebunan sawit menunjukkan peningkatan sebesar 2,77 sampai dengan 10,55 persen per tahun, demikian juga produksi crude palm oil (CPO). Hingga tahun 2020, peningkatan areal perkebunan kelapa sawit telah mencapai 14,99 juta hektar dan berdampak terhadap peningkatan limbah yang menjadi produk sampingannya (Gambar 1).

Sebagai gambaran, berdasarkan data dari ESCAP (1997) untuk limbah terbesar yang dihasilkan Malaysia adalah dari minyak sawit mencapai 54,5%

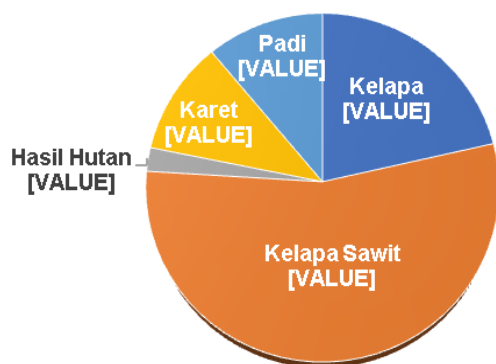


Gambar 1. Perkembangan Luas Areal Kelapa Sawit di Indonesia Kurun Waktu 2015-2020 (Direktorat Jenderal Perkebunan 2019).

Figure 1. The development of Oil Palm Area in Indonesia in the 2015-2020 Period (Direktorat Jenderal Perkebunan 2019).

atau setara dengan 16,77 juta ton dan terendah adalah dari limbah hasil hutan hanya mencapai 2,2% atau sebesar 0,676 juta ton (Gambar 2). Daur ulang limbah adalah mekanisme pembuangan dan pengelolaan sumber daya yang dapat dilakukan dengan mengalihfungsikan limbah kelapa sawit menjadi kompos sebagai sumber nutrisi tanaman, atau biochar yang dapat menjadi bahan pembenah tanah (*soil amendment*).

Istilah biomassa digunakan untuk semua bahan organik yang mudah terbakar di alam, terutama tanaman dan hewan dalam tanah dan lingkungan perairan. Biomassa termasuk produk dan residu pertanian dan industri pengolahan tanaman seperti jerami, sekam, tongkol, batang, daun dan cangkang. Menurut Kwietniewska dan Tys (2014) bahwa biomassa merupakan bahan *organic biodegradable* yang mengandung karbon, hidrogen, oksigen maupun nitrogen. Biomassa tegakan kelapa sawit bervariasi tergantung pada umur pohon dan kepadatan tanam. Sumber biomassa dari tanaman kelapa sawit meliputi:



Gambar 2. Perbandingan produksi tahunan limbah pertanian

Figure 2. Comparison of annual production of agricultural waste

buah, daun, batang, dan akar dengan kontribusi pelepah daun adalah sekitar 78% dan menurun seiring bertambahnya umur pohon, namun dari batang mengalami peningkatan dari 11% mencapai 56%. Sedangkan untuk sumber biomassa dari akar rata-rata adalah 16% (Tabel 1). Sung (2016) melaporkan untuk tanaman kelapa sawit dengan umur 1,5 tahun dan populasi 148 pohon/ha akan menghasilkan biomassa sebesar 10,4 t/ha, dan terus meningkat seiring dengan bertambahnya umur tanaman hingga mencapai >90 t/ha (Tabel 2).

Darnoko (1992) melaporkan bahwa satu ton tandan buah segar akan dihasilkan minyak sawit kasar sebanyak 0,21 ton (21%), minyak inti sawit sebanyak 0,05 ton (0,5%) dan sisanya merupakan limbah dalam bentuk tandan kosong, serat dan cangkang biji yang masing-masing sebanyak 0,23 ton (23%), 0,135 ton (13,5%) dan 0,055 ton (5,5%). Tandan kosong kelapa sawit dan Pelepah kelapa sawit merupakan limbah dengan ketersediaan terbanyak dan melimpah sepanjang tahun yang mengandung komponen kimia seperti selulosa, hemiselulosa dan lignin. Tandan kosong kelapa sawit berwarna cokelat berbentuk tidak seragam dengan bobot rata-rata 3,5 kg dan memiliki ketebalan sebesar 130 mm dengan panjang dan lebarnya tergantung ukuran tandan sawit segar yang masing-masing berkisar dari 170-300 mm dan 250- 350 mm (Sung *et al.* 2010). Sedangkan pelepah kelapa sawit memiliki panjang dari pangkal sampai ujung yang dapat mencapai 9 m dengan bobot rata-rata 7 kg dan lebar 15-20 cm (Intara *et al.* 2005).

Daur ulang residu organik di dalam tanah dapat mengurangi bahaya lingkungan yang ditimbulkan dari pertanian intensif (Ordonez *et al.* 2006). Tandan kosong kelapa sawit mencapai 23% dari jumlah pemanfaatan limbah kelapa sawit tersebut sebagai

Tabel 1. Sumber biomassa kelapa sawit (tanaman dan buah)

Table 1. Sources of oil palm biomass (plant and fruit)

| No | Biomassa | Berat Segar (juta ton/ha) |
|----|--------------------------------|---------------------------|
| 1 | Tandan Buah Segar Kelapa Sawit | 133,6 |
| | - Tandan Buah kosong | 28,1 |
| | - Cangkang kelapa sawit | 8,0 |
| 2 | Pelepah Kelapa Sawit | |
| | - Kegiatan pemangkasan | 277,3 |
| | - Kegiatan replanting | 21,6 |
| 3 | Batang | 134,4 |

Sumber: Sung (2016); Astimar (2014); Conrad dan Prasetyaning (2014)

alternatif pupuk organik. Keunggulan kompos tandan kosong kelapa sawit adalah mampu memperbaiki sifat fisik, kimia dan biologi serta meningkatkan produktivitas tanaman, dimana kandungan hara kompos tandan kosong kelapa sawit meliputi: N total (1,91%), K (1,51%), Ca (0,83 %), P (0,54 %), Mg (0,09%), C- organik (51,23%), dengan C/N ratio 26,82, dan pH 7,13 (Hayat dan Andayani 2014).

Cangkang kelapa sawit adalah biomassa yang terbentuk dari hasil fotosintesis butir-butir hijau daun yang dapat menyerap energi sinar matahari dan mengkonversi karbon dioksida dengan air menjadi suatu senyawa kimia yang terdiri atas karbon, hidrogen dan oksigen yang juga merupakan salah satu limbah padat dari industri kelapa sawit. Senyawa kimia dalam bentuk padatan pada biomassa cangkang kelapa sawit dapat dikonversi menjadi arang cangkang kelapa sawit. Nasution dan Limbong (2019) melaporkan bahwa dari hasil proses produksi minyak kelapa sawit dengan kapasitas 30 ton tandan buah segar per jam akan diperoleh limbah padat 3,0-3,6 ton/jam serat buah sawit dan 2,1-2,7 ton/jam cangkang kelapa sawit. Dengan rata-rata sekitar 3,3 ton/jam serat buah kelapa sawit dan 2,4 ton/jam cangkang kelapa sawit.

Pemakaian serat buah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler adalah maksimal, artinya semua serat buah kelapa sawit terpakai untuk bahan bakar boiler. Sedangkan konsumsi cangkang kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler adalah 1,5 ton/jam, yang mana sewaktu diumpankan ke dapur pembakaran boiler dilakukan bersamaan dengan serat buah kelapa sawit, artinya masih tersisa sekitar 0,9 ton/jam cangkang kelapa sawit. Apabila proses produksi minyak

kelapa sawit dioperasikan selama 24 jam, maka akan diperoleh sekitar 21,6 ton/jam cangkang kelapa sawit yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan. Penanganan limbah industri kelapa sawit dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai produk biomassa ramah lingkungan dan bernilai jual tinggi.

Pengomposan merupakan salah satu teknologi untuk menstabilkan berbagai jenis limbah industry, menghasilkan bahan yang dapat digunakan sebagai sumber nutrisi dan untuk memperbaiki struktur tanah (Castaldi *et al.* 2005). Pengomposan dapat mengurangi volume campuran hingga 40–50%, secara efektif menghancurkan patogen oleh panas metabolik yang dihasilkan dalam fase termofilik, menurunkan sejumlah besar polutan organik berbahaya dan menyediakan produk akhir yang dapat digunakan sebagai amandemen tanah atau pupuk (Epstein 1997). Sedangkan untuk bahan organik yang tinggi kadar ligninnya sehingga menjadikannya tidak mudah terurai, sangat baik untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku biochar. Semakin besar kandungan lignin kayu, semakin besar pula kadar abunya. Lignin mudah mengikat air dan memiliki ikatan lebih lemah terhadap selulosa dibandingkan dengan hemiselulosa. Diantara beberapa teknologi konversi termokimia seperti gasifikasi dan pirolisis cepat, teknologi yang dinilai secara teknis hanya memerlukan sumber daya rendah dan cocok untuk diterapkan untuk skala pertanian adalah teknologi pirolisis lambat.

Produktivitas kelapa sawit dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu faktor lingkungan, faktor genetik, dan faktor teknik budi daya tanaman. Faktor lingkungan yang mempengaruhi produktivitas kelapa sawit meliputi faktor abiotik (curah hujan, hari hujan,

Tabel 2. Pendugaan biomassa buah sawit yang dipanen pada perkebunan kelapa sawit berdasarkan umur kebun

Table 2. Estimation of oil palm fruit biomass harvested in oil palm plantations based on plantation age

| Umur (tahun) | Jumlah pohon/ha | Biomassa yang dipanen (ton/ha) | | | |
|--------------|-----------------|--------------------------------|--------|------|-------|
| | | pelepah | batang | akar | total |
| 1,5 | 148,0 | 8,0 | 1,1 | 1,3 | 10,4 |
| 2,5 | 148,0 | 19,6 | 2,9 | 2,4 | 24,9 |
| 4,5 | 122,0 | 12,7 | 6,0 | 4,4 | 23,1 |
| 6,5 | 122,0 | 14,4 | 10,7 | 5,0 | 30,1 |
| 8,5 | 122,0 | 12,2 | 13,7 | 5,4 | 31,3 |
| 10,5 | 122,0 | 19,7 | 19,0 | 6,0 | 44,7 |
| 14,5 | 122,0 | 20,5 | 29,8 | 8,4 | 58,7 |
| 17,5 | 122,0 | 17,1 | 36,9 | 7,5 | 61,5 |
| 27,5 | 122,0 | 14,1 | 37,7 | 16,0 | 67,8 |

Sumber: Sung (2016), Rees dan Tinker (1963), Corley *et al.* (1971), Dufrene (1989), Lamade dan Setiyo (1996)

tanah, topografi) dan faktor biotik (gulma, hama, jumlah populasi tanaman/ha). Faktor genetik (innate) meliputi varietas bibit yang digunakan dan umur tanaman kelapa sawit. Faktor teknik budi daya meliputi pemupukan, konservasi tanah dan air, pengendalian gulma, hama, dan penyakit tanaman, serta kegiatan pemeliharaan lainnya. Biomassa kelapa sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku sumber energi yang sangat potensial dikarenakan 3 (tiga) hal, antara lain (Cadenas dan Cabezudo 1998, Demirbas 2004): (1) Merupakan sumber bahan baku terbarukan yang berkelanjutan untuk dikembangkan sampai di masa mendatang, (2) memiliki nilai ekonomis mengingat harga bahan bakar fosil meningkat di masa mendatang, (3) bersifat ramah lingkungan karena tidak melepaskan CO₂ dan mempunyai kandungan sulfur rendah. Pemanfaatan biomassa limbah kelapa sawit menjadi produk bioenergi dapat dilakukan melalui proses transformasi bahan baku biomassa secara biokimia, termokimia, dan fisika kimia. Metode termokimia lebih dipilih dalam penanganan biomassa berbasah baku limbah kelapa sawit karena metode ini menjamin keseluruhan biomassa diubah menjadi gas dan kemudian dapat disintesis menjadi bahan tertentu yang diinginkan.

PEMANFAATAN BIOMASSA KELAPA SAWIT SEBAGAI BAHAN AMELIORAN: KOMPOS DAN BIOCHAR

Pertambahan dan peningkatan areal pertanaman kelapa sawit di Indonesia naik pesat, namun terjadi ketidakseimbangan antara industri pengolahan CPO dan turunannya dengan industri pengolahan limbah yang merupakan hasil dari proses pengolahan kelapa sawit tersebut. Limbah yang dihasilkan tentunya menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan, baik terhadap kuantitas dan kualitas sumber daya alam, maupun lingkungan hidup. Susanto *et al.* (2017) melaporkan bahwa satu ton tandan buah segar (TBS) kelapa sawit menghasilkan limbah berupa: tandan kosong sebesar 23% atau 230 kg, cangkang (shell) sebesar 6,5% atau 65 kg, wet decanter solid (lumpur sawit) sebesar 4 % atau 40 kg, serabut (fiber) sebesar 13% atau 130 kg serta limbah cair sebesar 50%. Berdasarkan hal tersebut, perlu dilakukan pengelolaan terhadap limbah, agar dapat menjadi bahan-bahan yang menguntungkan atau mempunyai nilai ekonomi tinggi dan tidak mencemari lingkungan.

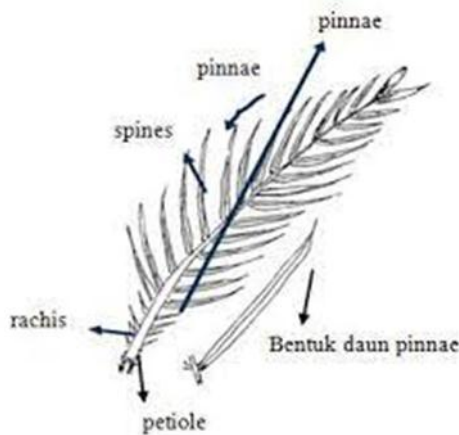
Limbah dari industri kelapa sawit dapat berupa: limbah padat maupun limbah cair. Limbah padat terdiri dari tandan kosong, pelepah, cangkang (*shell*), serat (*fiber*), lumpur sawit (*Wet Decanter Solid*) dan lain-lain, sedangkan limbah cair dapat berupa POME yang tidak mengandung logam B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) karena selama proses pengolahan TBS menjadi minyak sawit mentah tidak menggunakan bahan kimia (Mandiri 2012). Proses pengolahan limbah kelapa sawit dapat dilakukan secara kimia melalui proses koagulasi dan flokulasi, sedangkan secara fisika melalui proses sedimentasi dan secara biologi dengan memanfaatkan bakteri anaerob.

Limbah industri pertanian khususnya industri kelapa sawit mempunyai ciri khas berupa kandungan bahan organik tinggi yang dapat dimanfaatkan untuk pertumbuhan kelapa sawit. Limbah padat yang dihasilkan pabrik kelapa sawit berupa Tandan Kosong Kelapa Sawit yang jumlahnya sekitar 20% dari Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah dan merupakan sumber bahan organik yang kaya akan unsur hara. Dari literatur diketahui bahwa persentase tandan kosong terhadap TBS sekitar 20% dan setiap ton tandan kosong mengandung unsur hara N, P, K, dan Mg berturut-turut setara dengan 3 Kg Urea; 0,6 Kg CIRP; 12 Kg MOP; dan 2 Kg Kieserit (Singh *et al.* 1989). Dengan kandungan unsur hara ini, tandan kosong selain berpotensi sebagai sumber energi juga dapat dimanfaatkan sebagai kompos yang dapat digunakan untuk pemupukan kelapa sawit

Bahan limbah padat kelapa sawit disebut *Dried Decanter Solid* (DDS) mengandung hara seperti N, P, K, dan Mg yang juga bermanfaat untuk menambah unsur hara bagi tanah (Husnain dan Nursyamsi 2005). Pengomposan adalah proses biologis yang menjadi salah satu cara yang tepat untuk mengubah limbah organik menjadi produk yang bermanfaat untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Transformasi berbagai limbah organik menjadi produk bermanfaat melalui pengomposan menghasilkan produk yang dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk mempertahankan kesuburan. Proses pengomposan menyelesaikan sejumlah masalah yang terkait dengan pemanfaatan limbah tandan buah kelapa sawit dimana pada proses ini mineralisasi terjadi dan nutrisi tanaman yang tidak tersedia diubah menjadi bentuk yang tersedia. Parr *et al.* (1992) mengatakan bahwa hasil yang diperoleh pada proses pengomposan adalah terdetoksifikasinya berbagai polutan serta hilangnya bau tidak sedap. Pengomposan yang baik

harus menyediakan bahan yang beragam dengan rasio C/N sesuai standar kualitas kompos yang matang. Keberadaan berbagai macam mikroba akan membantu mempercepat pematangan kompos. Pada proses dekomposisi awal, bahan yang mudah terurai seperti klorofil (daun) dan jaringan epidermis (kulit) adalah yang pertama membusuk diikuti oleh bagian aromatik yang sulit terurai karena kandungan lignin yang tinggi (Annisa dan Nursyamsi 2016a).

Kualitas bahan organik menunjukkan seberapa cepat suatu bahan organik terurai (Swift *et al.* 1979, Brady dan Weil 2002), serta kandungan N, P, lignin, dan polifenol serta rasio C/N, lignin/N, polifenol/N, dan(lignin + polifenol)/N (Yavitt dan Fahey 1986, Taylor *et al.* 1989; Seneviratne 2000, Soon dan Arshad 2002). Namun, indikator kualitas bahan organik yang paling sering digunakan adalah ratio CN dan lignin/N, di mana semakin rendah nilai rasio, semakin tinggi



Gambar 3. Morfologi Daun Kelapa Sawit
Figure 3. Oil palm Leaf Morphology

Tabel 4. Komposisi kimia biomassa kelapa sawit
Table 4. Chemical composition of oil palm biomass

| Sifat Kimia | Daun kelapa sawit | Pelepah sawit | Batang Sawit | Tandan kosong | Rachis |
|----------------|-------------------|---------------|--------------|---------------|--------|
| C (%) | 50,90 | 49,94 | 34,14 | 48,64 | 48,79 |
| N (%) | 2,33 | 1,24 | 0,26 | 0,87 | 0,44 |
| P (%) | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,02 |
| K (%) | 1,34 | 1,51 | 0,26 | 1,89 | 1,72 |
| Ca (%) | 1,09 | 0,64 | 0,56 | 0,20 | 0,42 |
| Mg (%) | 0,16 | 0,07 | 0,04 | 0,12 | 0,03 |
| Lignin (%) | 24,96 | 22,45 | 1,83 | 28,50 | 20,96 |
| Ratio C/N | 22,53 | 41,38 | 176,1 | 56,15 | 112,77 |
| Ratio Lignin/N | 10,74 | 18,16 | 70,38 | 32,65 | 47,53 |
| Kelembaban (%) | 68,02 | 65,57 | 71,20 | 64,17 | 64,10 |

Sumber: Sung (2016)

kualitas bahan organik dan semakin cepat bahan tersebut terurai. Berdasarkan komposisi kimianya, urutan kecepatan terurainya biomassa dari tanaman kelapa sawit adalah: daun kelapa sawit>pelepah kelapa sawit>tandan buah kosong kelapa sawit>tulang belakang (rachis) (Gambar 3). Komposisi kimia sumber biomassa kelapa sawit di tunjukkan pada Tabel 4.

Tingkat dekomposisi keseluruhan (k) untuk biomassa kelapa sawit ditunjukkan pada Tabel 5, dan nilai tersebut dapat memperkirakan berapa lama residu ini akan mencapai 10% dari bobot awal biomassa. Moraidi *et al.* (2012, 2014) melaporkan bahwa laju dekomposisi biomassa daun kelapa sawit memerlukan waktu 9 bulan untuk mencapai 10% dari berat biomassa awalnya diikuti oleh biomassa tandan buah kosong yang memerlukan waktu 12 bulan. Sedangkan untuk biomassa pelepah dan rachis akan memakan masing-masing waktu lebih dari satu tahun yaitu: 15 dan 19 bulan.

Biochar (bioarang) merupakan salah satu produk selain Bio-Crude Oil (BCO) yang dihasilkan melalui pembakaran biomassa dan terbentuk akibat proses degradasi dari kandungan senyawa yang ada pada biomassa yang berupa Hemiselulosa, Selulosa, dan Lignin. Penggunaan biochar pada lapisan tanah di pertanaman kelapa sawit sebagai bahan pengganti atau campuran pupuk organik dan pupuk komersial akan memberikan manfaat yang besar selain dapat memperbaiki struktur tanah, menahan air dan

tanah dari erosi karena luas permukaannya lebih besar, memperkaya karbon organik dalam tanah serta meningkatkan pH tanah, sehingga secara tidak langsung meningkatkan produksi tanaman (Mateus *et al.* 2017). Produksi biochar biasanya berasal dari pembakaran biomasa. Salah satu biomasa yang biasa digunakan adalah biomasa dari limbah kelapa sawit. Dari ketiga limbah padat kelapa sawit yang dihasilkan, cangkang kelapa sawit memiliki potensi lebih baik untuk diolah menjadi biochar dikarenakan struktur fisiknya dan kandungan biopolimer yang ada pada biomassa tersebut.

Cangkang kelapa sawit baik digunakan sebagai bahan bakar ataupun arang yang mampu menghasilkan suhu maksimal 694 °C, karena memiliki bahan lignoselulosa yang tinggi, mempunyai berat jenis yang lebih tinggi dari kayu yaitu 1,4 g/cm³ (Diputra 2011). Pada saat sekarang ini sedang berkembang penelitian tentang pemanfaatan arang cangkang kelapa sawit sebagai bahan pembantu untuk media tanaman, sementara menurut Endriani *et al.* (2013), bahwa pemakaian arang cangkang kelapa sawit juga dapat mengurangi kemasaman tanah. Santi (2017), menerangkan bahwa aplikasi arang pirolisis asal cangkang kelapa sawit yang dicobakan kepada tanaman kelapa sawit, memberikan hasil yang positif terhadap produktivitasnya. Penelitian tentang pembuatan arang cangkang kelapa sawit telah dilakukan oleh Apriyanti (2009) dan Halim *et al.* (2009).

PENGARUH BAHAN AMELIORAN BERBASIS LIMBAH KELAPA SAWIT TERHADAP PERBAIKAN KESUBURAN TANAH DI LAHAN RAWA

Pemanfaatan lahan rawa untuk budidaya tanaman perkebunan masih terkendala oleh berbagai faktor seperti kemasaman yang tinggi, kesuburan yang rendah, ketebalan gambut, keberadaan bahan sulphidik, lapisan tanah dibawah gambut (*substratum*) yang berupa pasir kuarsa dan sistem tata air yang mengakibatkan produktivitas tanaman tidak optimal. Pemasaman tanah di lahan rawa terjadi akibat teroksidasinya senyawa pirit. Proses oksidasi senyawa pirit menghasilkan asam sulfat yang berakibat terjadi proses pemasaman yang hebat. Pirit sebagai senyawa FeS₂ akan stabil dalam kondisi an aerob pada tanah tanah rawa (sulfat masam dan gambut). Overdrainage pada saluran dan melampaui batas lapisan kedalaman pirit akan berakibat oksidasi pirit.

Pirit yang teroksidasi akan menghasilkan racun Jarosit dan menampakan warna karat atau kuning kemerahan pada genangan air atau warna karat kekuningan pada singkapan tanah yang mengandung lapisan pirit. Pirit yang teroksidasi akan meningkatkan kemasaman air hingga mencapai pH 3 bahkan bisa mempunyai pH 2 dan mengakibatkan kelaruran Fe dan Al pada air meningkat. Bila pirit teroksidasi, unsur besi yang terkandung di dalam pirit berubah bentuk dan bersifat racun bagi tanaman. Bukan hanya itu,

Table 5. Konstanta kecepatan dekomposisi (k) untuk beberapa bagian biomassa dari tanaman kelapa sawit

Table 5. Decomposition rate constants (k) for various parts of biomass from oil palm plantations

| Jenis Biomassa | k (% per bulan) |
|--------------------------|-----------------|
| Leaflet (LFT) | 0,26 |
| Rachis (RAC) | 0,12 |
| Pelepah (OPF) | 0,15 |
| Tandan Buah Kosong (EFB) | 0,20 |
| Ecomat (ECO) | 0,18 |
| Batang (OPF) | |
| - Diparut (dihaluskan) | 0,11 |
| - Cincang | 0,07 |

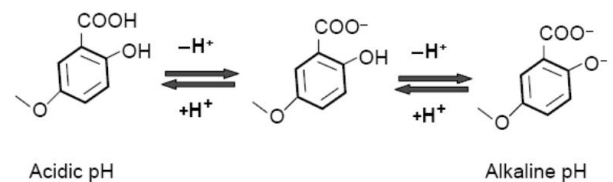
Sumber: Sung (2016)

proses oksidasi pirit juga menyebabkan tanah menjadi lebih masam karena ion hidrogen (H) yang merupakan penentu tingkat kemasaman tanah banyak dilepaskan selama proses oksidasi tersebut. Selanjutnya, tanah yang masam menyebabkan ion aluminium (Al) yang ada di dalam tanah terlepas dan bersifat racun bagi tanaman.

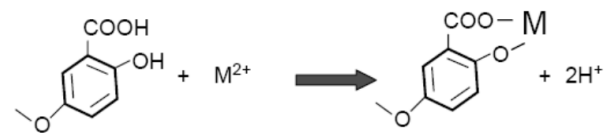
Kondisi di dalam tanah yang jenuh akan ion besi dan aluminium yang terlepas akibat oksidasi pirit, ibarat magnet yang selalu mencari logam di dekatnya dan segera mengikatnya, ion besi dan aluminium yang jenuh di dalam tanah akan menarik dan mengikat ion fosfat (PO_4) yang ada di dalam tanah sehingga tidak dapat diserap oleh akar tanaman. Akibatnya, akan terjadi kekurangan unsur fosfor (P) dalam tanah, padahal unsur fosfor diperlukan tanaman untuk pembentukan bunga dan buah. Pemberian bahan organik ke lahan rawa dapat menjadi salah satu solusi untuk menekan kelarutan unsur toksik. Tandan kosong kelapa sawit dapat menjadi sumber bahan organik melalui proses pengomposan. Di lahan rawa, pemberian bahan organik yang sudah terdekomposisi sempurna akan meningkatkan pH tanah disebabkan terjadinya pembebasan OH^- dan konsumsi H^+ yang diikuti dengan penurunan aktivitas dari ion H^+ (Reddy dan De Laune 2008) dan diiringi dengan peningkatan konsentrasi Fe^{2+} dalam tanah. Hal ini disebabkan karena bahan organik yang ditambahkan ke dalam tanah mendorong proses reduksi Fe^{3+} menjadi Fe^{2+} berjalan cepat sehingga selain konsentrasi Fe^{2+} meningkat, pH tanah juga meningkat, selain itu keberadaan bahan organik memiliki peranan sangat penting karena hasil oksidasi bahan organik di lahan rawa akan menyumbangkan muatan negatif tanah yang mampu untuk mengkhelat Fe^{2+} sehingga konsentrasinya dalam tanah dapat ditekan. Penekanan terhadap konsentrasi Fe^{2+} dalam tanah penting artinya bagi pertumbuhan tanaman di lahan rawa yang berpotensi meracuni bagi tanaman pangan.

Proses pengkhelatan oleh muatan negatif dari bahan organik yang terdekomposisi dan sumber muatan negatifnya adalah gugus karboksil

dan gugus phenolik. Kedua gugus fungsi inilah yang menentukan reaksi pengkhelatan. Gugus karboksil terdisosiasi pada $\text{pH}=3$ yang akan menghasilkan muatan negatif. Sedangkan gugus phenolik terdisosiasi pada $\text{pH}=9$ dan menghasilkan muatan negatif yang tinggi. Reaksinya adalah sebagai berikut (Reddy dan De Laune 2008):



Kedua gugus fungsional ini yang menentukan reaksi pengkhelatan. Tan (2003) mengatakan bahwa jumlah gugus karboksil dan phenolik dikatakan sebagai total kemasaman, oleh karena itu total kemasaman mencerminkan tingkat muatan negatif dari bahan humik dan pengkhelatan terhadap metal lebih efektif oleh asam humat dibandingkan oleh asam fulvat. Reaksinya digambarkan sebagai berikut:



Pada umumnya bahan organik secara signifikan mampu menambah resistensi nutrisi esensial untuk pertumbuhan tanaman. Kandungan hara N, P, dan K dalam satu ton kompos setara dengan 19,2 kg Urea, 10,86 kg TSP, dan 92,52 KCl per ton kompos dan dapat mensubstitusi pupuk anorganik setara lima pokok pohon kelapa sawit (Husnain dan Nursyamsi 2015).

Penambahan biochar dalam tanah dapat meningkatkan sifat fisik tanah melalui peningkatan water holding capacity, selain itu juga meningkatkan agregat, struktur dan porositas tanah (Lehmann dan Joseph 2010), serta jangkauan perakaran tanaman sehingga tanaman mudah mendapatkan air dan nutrisi selama pertumbuhan. Oleh karena itu biochar berpengaruh langsung terhadap produktivitas tanaman. Mutu biochar ditentukan oleh bahan baku dan kondisi rekasi pembakaran, dan cara

pembakaran. Secara umum, biochar yang diaplikasikan pada lahan rawa mampu meningkatkan kadar pH, P tersedia, dan KTK tanah. Penambahan biochar berpengaruh positif terhadap karakteristik tanah dan produktivitas tanaman khususnya pada tanah di lahan rawa karena kemampuannya dalam menurunkan keaktifan ion logam di larutan tanah yang tergantung dari kualitasnya (Annisa *et al.* 2021). Mekanisme adsorpsi unsur toksik di lahan rawa menggunakan biochar salah satunya melalui proses pembentukan kompleks permukaan (kompleks innersphere) dimana unsur logam yang ada di lahan rawa bereaksi dengan gugus fungsi (-OH, -SH, dan -COOH) di permukaan biochar (Anjarsari dan Sugiarso 2015).

Biochar mengandung karbon dan memiliki pori yang dapat meningkatkan pH karena terdiri dari abu dan bertindak sebagai liming agent, namun tidak mengandung nutrisi penting yang dibutuhkan oleh tanaman, baik yang sifatnya makro maupun mikro. Menurut Hunt *et al.* (2010)

bahwa karakteristik utama dalam menentukan biochar yang paling baik dilihat dari kapasitas adsorpsi dan KTK, dimana semakin rendah kapasitas adsorpsi, semakin tinggi nilai KTK. Biochar yang diperkaya dengan nutrisi dipercaya berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah terutama di lahan rawa, sehingga selain dapat mengurangi kebutuhan pupuk dan emisi dampak lingkungan, juga berdampak terhadap peningkatan produktivitas tanaman. Thi *et al.* (2015) melaporkan bahwa penambahan biochar tanpa diperkaya dengan nutrisi seperti nitrogen (N) dan lainnya, tidak dapat meningkatkan hasil panen.

Sampai saat ini, keseimbangan antara gas CO₂ yang masuk dan keluar atmosfer belum terjadi dan lebih banyak yang masuk yang mengakibatkan konsentrasi gas CO₂ di atmosfer mengalami kenaikan secara kontinyu. Oleh karena itu, perlu adanya penyimpanan karbon di dalam tanah yang sekaligus berperan sebagai amandemen tanah. Biochar merupakan

Tabel 6. Pengaruh Kompos dan Biochar Berbasis Limbah Kelapa Sawit terhadap sifat kimia tanah rawa
 Table 6. The effect of Compost and Biochar made from Oil Palm Waste on the chemical properties of swamp soil

| Sumber bahan organik | Sifat kimia tanah | komoditas | Pertumbuhan tanaman | Tipe Tanah | Pustaka |
|--|---|-----------|--|------------------------|------------------------------|
| Biochar Tandan Kosong Kelapa Sawit | <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pH tanah • Meningkatkan kadar bahan organik tanah • Meningkatkan KTK tanah | Padi | <ul style="list-style-type: none"> • Memperbaiki pertumbuhan tanaman • Meningkatkan hasil padi | Tanah rawa | Bakar <i>et al.</i> (2015) |
| Biochar Sekam Padi + Kompos Limbah Pertanian | <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pH tanah • Menurunkan emisi metana (CH₄) • Menurunkan kandungan unsur toksik Fe | Padi | <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan hasil gabah mencapai 28% | Tanah rawa eksisting | Annisa dan Mukhlis, (2020) |
| Biochar Sekam Padi + Kompos Limbah Pertanian | <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pH tanah • Menurunkan emisi metana (CH₄) | Padi | <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan hasil gabah mencapai >20% | Tanah rawa bukaan baru | Annisa dan Nursyamsi (2016b) |

recalcitrant yang sukar teroksidasi dengan kandungan karbon yang tinggi memiliki peran sebagai penyimpan karbon dalam waktu yang lama. Konversi biomasa menjadi biochar merupakan transformasi dinamis yang berhubungan dengan karbon sequestration. Karbon sequestration adalah proses penangkapan gas CO_2 dari atmosfer dan kemudian menyimpannya dalam waktu yang lama di dalam bumi agar supaya konsentrasi gas CO_2 di atmosfer tidak meningkat. Dari aspek lingkungan biochar berperan sebagai: (1) pengabsorpsi ion-ion NO_3^- dan NH_4^+ yang mudah hilang akibat leaching, 2) karbon sequestration yang dapat mengurangi produksi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh tanah, serta 3) penyerap logam berat dan pestisida di dalam tanah. Beberapa hasil penelitian pemberian biochar yang diperkaya dengan nutrient dari kompos berbasis bahan local spesifik lokasi di lahan rawa yang dapat meningkatkan hasil dan aman terhadap lingkungan di tunjukkan pada Tabel 6.

KESIMPULAN

Pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit sebagai amandemen tanah berupa kompos maupun biochar merupakan pendekatan yang efektif untuk pengelolaan limbah organik. Sebagai amandemen tanah, biochar bisa berperan sebagai penyerap karbon atmosfer akibat konversi karbon bio-degradable (biomassa) menjadi karbon aromatik (biochar) yang kurang terdegradasi. Pengomposan sebagai cara lain dalam pengelolaan limbah mempercepat degradasi biologis dan fisiokimia dari bahan limbah organik. Proses yang terintegrasi dengan menambahkan biochar dan kompos sebagai bahan amandemen tanah memiliki potensi untuk meningkatkan produktivitas tanaman terkait dengan meningkatnya pH, kadar bahan organik serta KTK tanah, serta menurunnya kelarutan unsur meracun, sehingga meningkatkan produktivitas tanaman di lahan rawa.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisa W, Mukhlis, Hairani A. 2021. Biochar-materials for remediation on swamplands: mechanisms and effectiveness. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(1): 13-22. Doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v15n1.2021.13-22>.
- Annisa W, Mukhlis 2020. Water management and rice husk biochar application to solve acid sulfate soil problems to promote rice yield and reduce greenhouse gas emission. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 980 012067
- Annisa W, Dariah A. 2017. Pengembangan kearifan lokal untuk optimalisasi lahan rawa mendukung pembangunan pertanian. *Hlm : 408-425. Dalam Buku Pembangunan Pertanian Wilayah Berbasis Kearifan Lokal dan Kemitraan. Badan Penelitian Pengembangan Pertanian. IAARD Press.*
- Annisa W, Nursyamsi D. 2016a. Iron dynamics and its relation to soil redox potential and plant growth in acid sulphate soil of South Kalimantan, Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Science* 17 (1): 1–8.
- Annisa W, Nursyamsi D. 2016b. Pengaruh amelioran, pupuk dan sistem pengelolaan tanah sulfat masam terhadap hasil padi dan emisi metana. *Jurnal Tanah Dan Iklim* 40 (2): 135–45. Doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jti.v40n2.2016.135-145>.
- Anjarsari N, Sugiarto RDKS. 2015. Analisa gangguan ion merkuri (II) terhadap kompleks besi(II)-fenantrolin menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis. *Jurnal Sains dan Seni ITS.* 4(2): 139-140. Doi: 10.12962/j23373520.v4i2.14027.
- Astimar AA. 2014. Green technology on oil palm biomass. *Asia Palm Oil Magazine*, 4: 56-59.
- Apriyanti S, Budiyanto, Zuki M. 2009. Kajian pemanfaatan fraksi berat hasil pirolisis cangkang sawit (tar) sebagai bahan perekat

- dalam proses pembuatan briket arang cangkang sawit (Abstrak), diakses tgl. 20 November 2016.
- Bakar RA, Razak ZA, Ahmad SH, Seh-Bardan BJ, Tsong LC, Meng CP. 2015. Influence of oil palm empty fruit bunch biochar on floodwater pH and yield components of rice cultivated on acid sulphate soil under rice intensification practices. *Plant Production Science*, 18(4): 491-500. Doi: 10.1626/ppls.18.491.
- Brady NC, Weil RR. 2002. *The Nature and Properties of Soils*. 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson-Prentice Hall.
- Cadenas A, Cabezudo S. 1998. Biofuels as sustainable technologies: perspectives for less developed countries. *Technol Forecast Social Change*, 58:83–103.
- Castaldi P, Alberti G, Merella R, Melis P. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal waste solid composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Manage*, 25: 209–213. Doi: 10.1016/j.wasman.2004.12.011.
- Corley RHV, Gray BS, Ng SK. 1971. Productivity of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Malaysia. *Experimental Agriculture*, 7: 129-136.
- Conrad L, Prasetyaning I. 2014. Overview of The Waste-to Energy Potential for Grid-Connected Electricity Generation (Solid Biomass And Biogas) In Indonesia. Jakarta, Indonesia: Directorate General for New and Renewable Energy and Energy Conservation (DG NREEEEC), Ministry of Energy and Mineral Resources.
- Darnoko, 1992. Potensi pemanfaatan limbah lignoselulosa kelapa sawit melalui biokonversi. *Berita Penelitian Perkebunan*. Vol. 2(2): 85 – 87.
- Demirbas A. 2004. Hydrogen rich gas from fruit shells via supercritical water extraction. *Int J Hydrogen Energy*, 29:1237-1243.
- Direktorat Jenderal Perkebunan. 2019. *Statistik Perkebunan Indonesia 2018-2020. Kelapa Sawit (Palm Oil)*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan.
- Dufrêne E. 1989. Photosynthèse, consommation en eau et modélisation de la production chez le palmier à huile (*Elaeis guineensis* Jacq). PhD Dissertation. Orsay, Paris: Université de Paris XI
- Epstein E. 1997. *The science of composting*. Technomic publishing, Lancaster.
- Endriani, Sunarti dan Ajidirman. 2013. Pemanfaatan biochar cangkang kelapa sawit sebagai soil amandement Ultisol Sungai Bahar Jambi. *Jurnal Penelitian Universitas Jambi Seri Sains*. 15(1):39-46.
- ESCAP [Economic and Social Survey of Asia and The Pacific]. 1997. *Asia and the pacific into the twenty-first century: Development challenges and opportunities*. United Nation. ISBN:92-1-1 19739-2. ISSN: 02525704. p 211.
- Francis C, Baldesari. 2006. *Systematic Reviews of Qualitative Literature*. Oxford: UK Cochrane Centre.
- Halim M, Darmadji, Indrati R. 2009. Fraksinasi dan identifikasi senyawa volatil asap cair cangkang sawit. *Agritech* 23(3): 117 – 123.
- Hayat ES, Andayani S. 2014. Pengelolaan limbah tandan kosong kelapa sawit dan aplikasi biomassa *Chromolaena Odorata* terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman padi serta sifat tanah Sulfaquent. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 17(2): 44-51.
- Husnain, Nursyamsi D. 2015. Peranan Bahan Organik dalam Sistem Integrasi Sawit-Sapi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 9 (1): 27-36. Doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jsdl.v9n1.2015.%25p>.
- Intara YI, Suastawa IN, Setiawan RPA. 2005. Sidat fisik dan mekanik parenkim pelepah dan batang tandan sawit. *Jurnal Keteknik Pertanian*, 19(2): 117-126.

- Kayikcioglu HH. 2013. Effects of composts from agro industrial wastes on microbial activity of a typic xerofluvent soil under Mediterranean conditions, SE Turkey. *Geomicrobiol J* 30(9): 228– 236.
- Kwietniewska E, Tys J. 2014. Process, characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on micro-algal biomass fermentation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34: 491–500.
- Lamade E, Setiyo IE. 1996 Test of dufrêne's production model on two contrasting families of oil palm in North Sumatra. pp 427-435. *In Proceedings of the 1996 PORIM International Palm Oil Congress: Competitiveness for the 21st century*, Ariffin (Eds.). Kuala Lumpur, Malaysia: Palm Oil Research Institute of Malaysia.
- Lehmann J, Joseph S. 2010. *Biochar for Environmental Management*. 2nd Ed. Earthscan Pub. Co. London, UK. 416 pp.
- Mandiri. 2012. *Manual Pelatihan Teknologi Energi Terbarukan*, Jakarta, DANIDA
- Mateus A, Treyer A, Wegler C, Karlgren M, Matsson P, Artursson P. 2017. Intracellular drug bioavailability: a new predictor of system dependent drug disposition. *Sci Rep.* 22; 7:43047. PMID: 28225057; PMCID: PMC5320532. Doi: 10.1038/srep43047.
- Moraidi A, Teh CBS, Goh KJ, Husni MHA., Fauziah CI. 2012. Evaluation of four soil conservation practices in a nonterraced oil palm plantation. *Agronomy Journal*, 104, 1727-1740.
- Moraidi A, Teh CBS, Goh KJ, Husni MHA, Fauziah CI. 2014. Decomposition and nutrient release temporal pattern of oil palm residues. *Annals of Applied Biology*, 164: 208-219.
- Nasution ZA, Limbong HP. 2019. Karakterisasi arang cangkang kelapa sawit sebagai bahan pembantu untuk meningkatkan kesuburan tanah berdasarkan kromatografi GC-MS. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, 14 (1): 62-68.
- Ordenez C, Tejada M, Benitez C, Gonzalez JL. 2006. Characterization of a phosphorus-potassium solution obtained during a protein concentrate process from sunflower flour application on ryegrass. *Bioresour Technol*, 97: 522–528.
- Parr JH, Papendick RI, Hannock SB and Meyer RE. 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7: 1-2: Doi: <https://doi.org/10.1017/S0889189300004367>.
- Reddy KR, Delaune RD. 2008. *The Biogeochemistry of Wetland; Science and Application*. CRC Press. New York
- Rees AR, Tinker PB. 1963. Dry-matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria. I. Growth and dry-matter production. *Plant and Soil*, 19:19–32.
- Santi LP. 2017. Pemanfaatan arang pirolisis asal cangkang kelapa sawit untuk retensi hara dan karbon pada media tanah Typic Hapludult. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 41(1): 9-16. Doi: <http://dx.doi.org/10.21082/jti.v41n1.2017.9-16>.
- Seneviratne G. 2000. Litter quality and nitrogen release in tropical agriculture: a synthesis. *Biology and Fertility of Soils*, 31: 60–64.
- Singh G, Manoharan S, Toh TS. 1989. United plantations approach to palm oil mill by product management and utilization, pp 225-234. *In Proceedings of International Palm Oil Development Conference*, Palm Oil Research Institute of Malaysia, Kuala Lumpur.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Eleventh Edition. Handbook. 336, Natural Resources Conservation Service-USDA. 346 p.
- Soon Y, Arshad M. 2002. Comparison of the decomposition and N and P mineralization

- of canola, pea and wheat residues. *Biology and Fertility of Soils*, 36: 10–17.
- Sung CTB, Joo GK, Kamarudin KN. 2010. Physical changes to oil palm empty fruit bunches (EFB) and EFB Mat (Ecomat) during their decomposition in the field. *Pertanika J. Trop. Agric. Sci.*, 33(1): 39 - 44.
- Sung CT. 2016. Availability, use, and removal of oil palm biomass in Indonesia. Working paper. Report prepared for the International Council on Clean Transportation (ICCT). <https://theicct.org/publications/availability-use-and-removal-oil-palm-biomass-indonesia>.
- Susanto JS, Santoso AD, Suwedi N. 2017. Perhitungan potensi limbah padat kelapa sawit untuk sumber energi terbarukan dengan metode LCA. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 18(2): 165-172. Doi: 10.29122/jtl.v18i2.2046.
- Swift MJ, Heal OW, Anderson JM. 1979. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems: Studies in Ecology*. Volume 5. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications.
- Taylor BR, Parkinson D, Parsons WFJ. 1989. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: a microcosm test. *Ecology*, 70: 97–104.
- Tan KH. 2003. *Humic Matter in Soil and Environment. Principles and Controversies*. University of Georgia. Athens, Georgia, USA. Marcel Dekker. Medison Avenue, New York.
- Thi NBD, Kumar G, Lin CY. 2015. An overview of food waste management in developing countries: current status and future perspective. *J. Environ. Manage*, 157: 220–229.
- USDA [United States Department of Agriculture]. 2007. Indonesia: palm oil production prospects continue to grow. Available at http://www.pecad.fas.usda.gov/highlights/2007/12/Indonesia_palmoil/
- Yacob S. 2008. Progress and challenges in utilization of palm biomass, Advanced Agriecological Research Sdn. Bhd. http://www.jst.go.jp/asts/asts_j/files/ppt/15_ppt.pdf. Accessed 27 Nov 2008
- Yavitt JB, Fahey TJ. 1986. Litter decay and leaching from the forest floor in *Pinus contorta* (lodgepole pine) ecosystems. *Journal of Ecology*, 74: 525–545.
- Young A. 1989. *Agroforestry for Soil Conservation*. CAB International, Oxford, England. 276 p.