

Multifungsi Biochar dalam Budidaya Tebu

Budi Hariyono

Balai Penelitian Tanaman Pemanis dan Serat
Jl. Raya Karangploso, Kotak Pos 199, Malang, Indonesia
Email: bdhariyono@yahoo.co.id

Diterima: 20 Februari 2020; direvisi: 29 September 2021; disetujui: 07 Oktober 2021

ABSTRAK

Biochar adalah bahan padat kaya karbon (C), berasal dari pembakaran biomassa melalui proses pirolisis dengan suhu <700°C dalam kondisi tanpa atau sedikit oksigen. Biochar memiliki sifat fisik-kimia yang dapat berfungsi memperbaiki kualitas tanah. Sifat fisik biochar yang penting adalah memiliki luas permukaan yang besar dan didominasi pori mikro sehingga memiliki kemampuan menyerap hara dan air sangat tinggi. Sifat kimia biochar yang penting adalah permukaannya yang memiliki gugus fungsional yang dapat bersifat hidrofilik dan hidrofobik, asam dan basa, sehingga dapat bereaksi dengan larutan di sekitarnya. Kualitas tanah ditentukan oleh kandungan bahan organik (C-organik). Umumnya kadar C-organik lahan pengembangan tebu rendah – sangat rendah. Upaya perbaikan status C-organik tanah dengan biochar lebih efisien dibanding aplikasi bahan organik lainnya, karena biochar tahan terhadap degradasi sehingga karbon lebih stabil di dalam tanah. Aplikasi biochar menyebabkan perubahan sifat fisik tanah, yakni: struktur, porositas, distribusi ukuran pori tanah, agregasi, sehingga dapat memperbaiki aerasi tanah dan kapasitas menyimpan air. Aplikasi biochar mampu memperbaiki sifat kimia tanah diantaranya meningkatkan kapasitas tukar kation, memegang hara, mengurangi pencucian hara, bioremediasi kontaminan logam berat dan pestisida serta mendukung aktivitas mikrobia di rizosfir. Perbaikan sifat fisik dan kimia tanah ini sangat mendukung budidaya tebu. Limbah biomassa tebu sebaiknya tidak dibakar terbuka, melainkan dikonversi menjadi biochar untuk dikembalikan ke dalam tanah, agar dapat meningkatkan atau mempertahankan kandungan C-organik tanah. Tujuan penulisan ini ialah untuk melakukan tinjauan terkait fungsi dan manfaat biochar untuk memperbaiki kualitas tanah dalam rangka budidaya tanaman khususnya tebu.

Kata Kunci: biochar, karbon, sifat tanah, tebu

Biochar Multifunction in Sugarcane Cultivation

ABSTRACT

Biochar is a solid material rich in carbon (C), derived from the combustion of biomass through a pyrolysis process with a temperature <700°C in conditions without or little oxygen. Biochar has physical-chemical properties that can improve soil quality. The important physical property of biochar is that it has a large surface area and is dominated by micro pores so that it has the ability to absorb nutrients and water very high. An important chemical property of biochar is that its surface has functional groups that can be hydrophilic and hydrophobic, acidic and alkaline, so that it can react with the surrounding solutions. Soil quality is determined by the content of organic matter (C-organic). Generally, the C content of sugarcane cultivation land is low - very low. Efforts to improve soil organic C status with biochar are more efficient than the application of other organic materials, because biochar is resistant to degradation so that carbon is more stable in the soil. Biochar application causes changes in soil physical properties, namely: structure, porosity, soil pore size distribution, aggregation, so as to improve soil aeration and water storage capacity. The application of biochar can improve soil chemical properties including: increasing cation exchange capacity, holding nutrients, reducing nutrient leaching, bioremediation of heavy metal contaminants and pesticides

and supporting microbial activity in the rhizosphere. Improvement of the physical and chemical properties of this soil is very supportive of sugarcane cultivation. Sugarcane biomass waste should not be burned open, but converted into biochar to be returned to the soil, in order to increase or maintain the soil organic C content. The purpose of this paper is to review the functions and benefits of biochar to improve soil quality in the context of crop cultivation, especially sugarcane.

Keywords: *biochar, carbon, soil properties, sugarcane*

PENDAHULUAN

Kata "biochar" berasal dari gabungan kata *biomass* (biomassa) dan *charcoal* (arang). Biochar ialah arang yang diproses dari biomassa tanaman yang dimasukkan ke dalam tanah sebagai suatu cara menangkap dan mengurangi karbondioksida dari atmosfer (Oxford Dictionary, 2013). Biochar merupakan bahan padatan yang kaya akan unsur karbon, yang berasal dari biomassa yang dipanaskan dalam kondisi tanpa oksigen atau sangat sedikit oksigen (terbatas), dengan suhu relatif rendah (<700°C), bertujuan untuk memperbaiki kualitas tanah dan menyimpan karbon dalam tanah (Lehmann et al. 2006); Lehmann & Joseph, 2009).

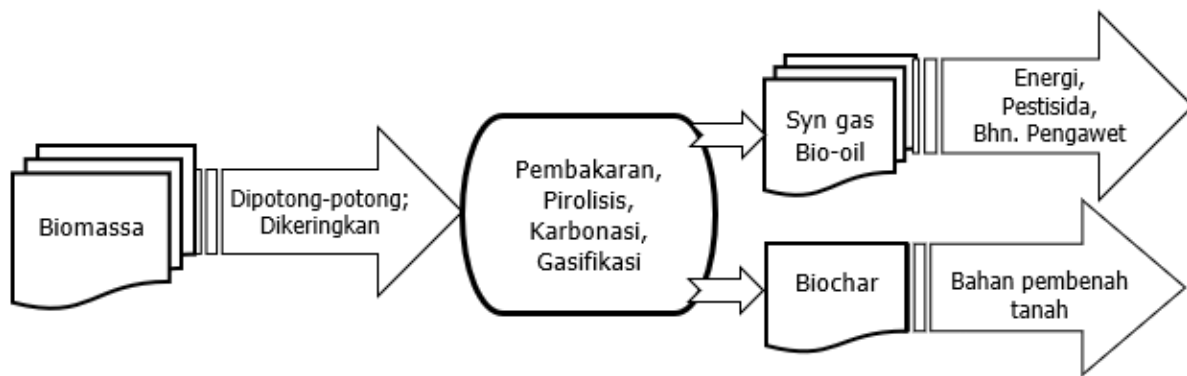
Biochar berpeluang dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas tanaman. Ada beberapa mekanisme yang dapat menyatakan fungsi biochar. Mekanisme langsung, berupa: input hara, induksi resistensi sistemik terhadap hama, pengurangan toksisitas aluminium (Al) karena pH biochar yang tinggi. Mekanisme tidak langsung, berupa: efek ketersediaan hara, pH, mengurangi pencucian N dan emisi N₂O. Mekanisme hipotesis positif, yakni: interaksi biotik (jamur mikoriza, penambat N), peningkatan ketersediaan air (Jeffery et al. 2015).

Perbaikan kualitas tanah perlu dilakukan untuk mendukung peningkatan pertumbuhan dan produksi tanaman. Kualitas tanah dapat ditinjau dari sifat fisik, kimia dan biologinya, kesehatan tanah, serta minim dari

kontaminasi logam berat. Beberapa hasil penelitian menunjukkan peran multifungsi biochar pada perbaikan kualitas tanah dan berperan positif dalam mendukung pertumbuhan tanaman, termasuk tebu. Bagaimana multifungsi biochar dalam budidaya tebu, akan diuraikan dalam beberapa sub bab, yakni: pembuatan biochar, karakteristik biochar, pengaruh aplikasi biochar pada sifat tanah, pengaruh biochar pada pertumbuhan tanaman khususnya tebu, dan fungsi lainnya dari biochar. Tujuan penulisan ini ialah untuk menunjukkan banyaknya fungsi atau manfaat biochar untuk memperbaiki kualitas tanah dalam rangka budidaya tanaman (tebu).

PEMBUATAN BIOCHAR

Biochar umumnya dibuat dengan cara pirolisis, yakni proses dekomposisi biomassa dengan pemanasan tanpa oksigen atau sedikit oksigen. Dalam pembuatan biochar dengan pirolisis lambat dari biomassa berarti mengkonversi CO₂ udara yang diakumulasi menjadi karbon (C) dalam biomassa menjadi karbon yang tahan pelapukan ke dalam tanah. Ada banyak teknologi baik tradisional maupun modern yang digunakan untuk membuat biochar dari biomassa residu hasil pertanian, dengan beberapa proses pembakaran yang tidak sempurna dengan oksigen terbatas, yakni pirolisis, karbonasi dan gasifikasi, dengan hasil persentase biochar yang bervariasi pula. Gambar 1 menggambarkan proses pembuatan biochar dari biomassa (limbah organik).



Gambar 1. Diagram pembuatan biochar

Pirolisis adalah dekomposisi bahan organik dengan memanaskannya tanpa atau sedikit oksigen (O_2). Pirolisis cepat ialah proses pemanasan biomassa dengan temperatur $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam waktu cepat (5 - 10 detik). Pirolisis lambat ialah proses pemanasan biomassa dengan temperatur $<400\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan waktu lebih lambat antara 30 menit hingga beberapa jam. Selama pirolisis, biomassa diubah/dikonversi menjadi tiga produk: 1) produk cair yang biasa disebut bio-oil, minyak pirolisis atau bio-crude; 2) arang padat yang dapat digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk penggunaan sebagai pembenah tanah (kemudian disebut 'biochar') atau sebagai sumber energi dalam proses konversi; dan 3) produk gas yang tidak dapat dikondensasi yang mengandung karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO_2), hidrogen (H_2), metana (CH_4) dan hidrokarbon yang lebih tinggi, disebut 'syngas' atau 'gas pirolisis' (McCarl et al. 2009). Karbonisasi ialah istilah untuk konversi melalui pirolisis dari biomassa organik menjadi karbon atau residu yang banyak mengandung karbon (Rajapaksha et al. 2016), umumnya dikenal dengan proses pembuatan arang. Gasifikasi adalah proses konversi biomassa dengan temperature tinggi $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ menjadi karbon, walaupun menghasilkan karbon padat

(biochar) namun demikian lebih banyak menghasilkan gas (Brown, 2009).

Beberapa pembuatan biochar yang umum dilakukan diantaranya adalah dengan metode *pit kiln* menghasilkan biochar 2,5-30%, *mound kiln* 2-42%, *brick kiln* 12,5-33%. Beberapa model pirolisis juga menghasilkan biochar yang bervariasi, yakni 35% dengan *slow pyrolysis*, 20% dengan *moderate pyrolysis*, dan 12% dengan *fast pyrolysis* (Brown, 2009).

Suhu proses pirolisis, karbonasi, maupun gasifikasi juga mempengaruhi biochar yang dihasilkan, semakin tinggi suhu pirolisis semakin rendah biochar yang diperoleh (Noor et al. 2012; Zeelie, 2012; López et al. 2013). Biochar yang baik diperoleh dengan pirolisis lambat pada suhu $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Biochar yang diproduksi dengan baik akan meningkatkan kapasitas lapangan (*field capacity*) tanah sehingga dapat menjamin ketersediaan air tanah bagi tanaman (Kinney et al. 2012).

Jeong et al. (2016) menyatakan bahwa pada suhu pirolisis $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ akan menghasilkan karakteristik biochar yang stabil dan KTK maksimum. Biochar didominasi dengan pori-pori 20 nm; jika temperatur ditingkatkan maka ukuran pori meningkat, baik yang $<50\text{ cm}$ maupun $>50\text{ nm}$.

KARAKTERISTIK BIOCHAR

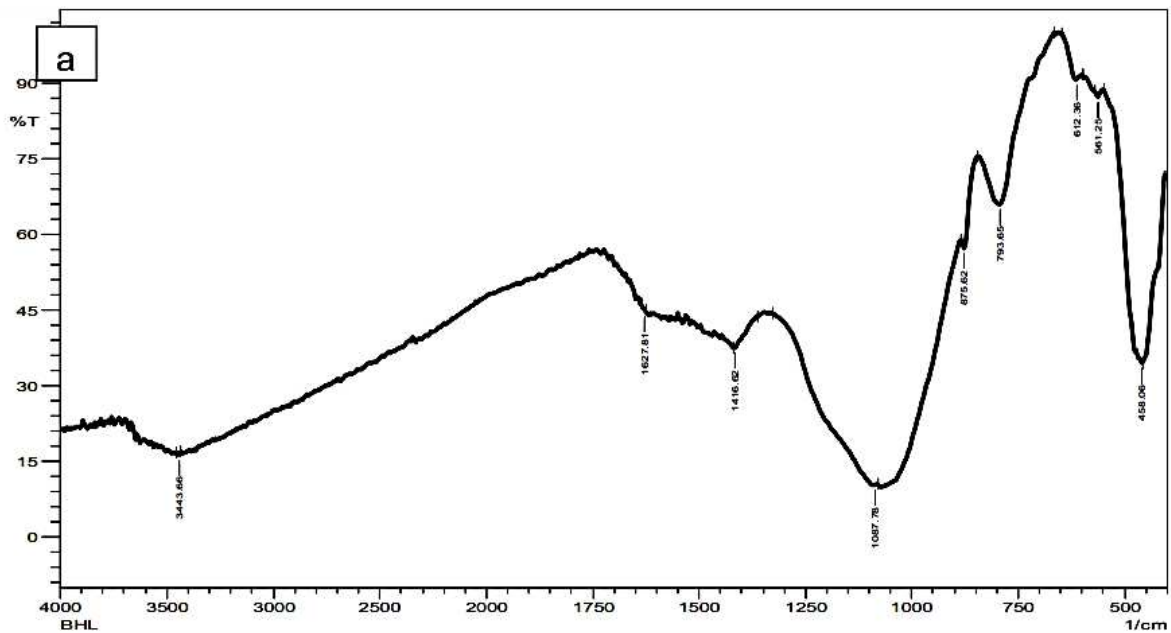
Jenis bahan baku biomassa dan kondisi pembuatan biochar akan menentukan variasi karakteristik biochar (Kinney et al. 2012; Mukherjee & Lal, 2013). Proporsi kandungan lignin, selulose dan hemiselulose dalam biomassa menentukan hasil biochar yang diperoleh dari pirolisis (Brownsort, 2009). Temperatur saat pirolisis sangat mempengaruhi jumlah karbon yang hilang dan karbon yang terkandung dalam biochar, dan menentukan sifat fisika biochar yang dihasilkan (Downie et al. 2009).

Biochar yang diaplikasikan ke dalam tanah akan bertahan lebih lama dibandingkan dengan bahan organik lainnya. Menurut Verheijen et al. (2010) dapat mencapai 10-1.000 kali lebih lama. Menurut Lehmann & Joseph (2009), dengan biochar siklus karbon menjadi lebih lama – sekitar setengahnya – dibanding siklus karbon alami. Oleh karena itu, penambahan biochar ke tanah merupakan potensi sekuestrasi karbon (Jha et al. 2010). Namun demikian stabilitas biochar tergantung pada bahan baku dan

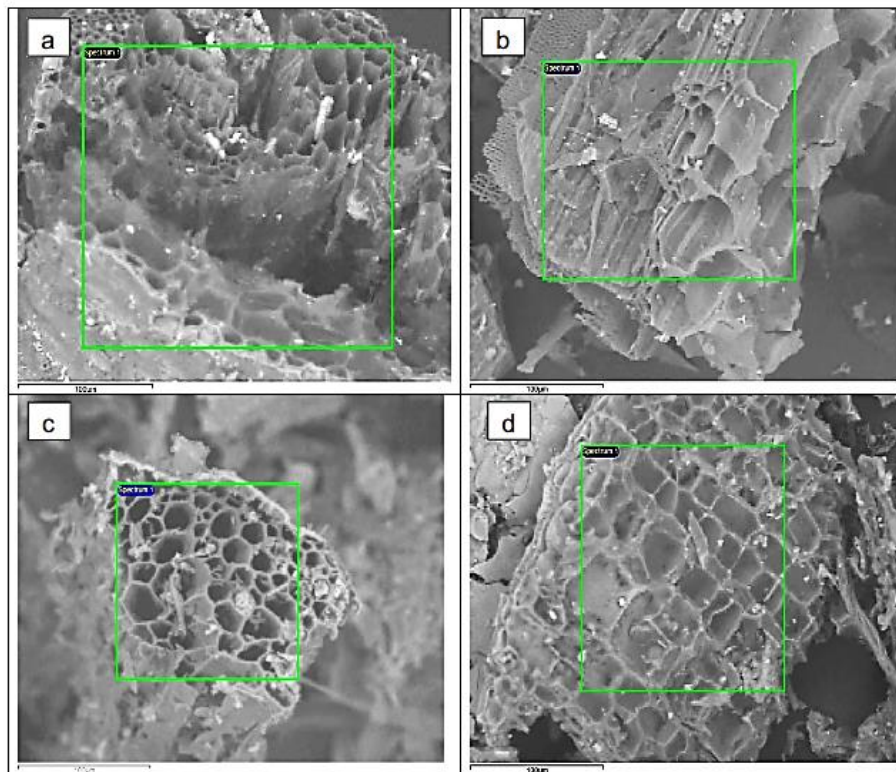
suhu pirolisis, karena mempengaruhi sifat fisik dan kimia biochar yang dihasilkan (Lehmann & Joseph, 2009).

Atkinson et al. (2010) menunjukkan bahwa karakteristik kunci biochar adalah penting untuk pengembangan pemahaman tentang dampaknya dalam bidang pertanian. Sifat kimia biochar yang berperan adalah bahwa permukaan biochar memiliki gugus fungsional yang dapat bersifat hidrofilik hidrofobik, dan dapat bersifat asam dan basa, sehingga dapat bereaksi dengan larutan di sekitarnya. Sifat fisik biochar yang dapat berguna sebagai pembenah tanah adalah luas permukaan yang besar dan adanya pori mikro, yang membuatnya memiliki sifat kemampuan menyerap. Sifat-sifat fisika dan kimia biochar ini berpotensi memperbaiki sifat tanah seperti distribusi pori, bobot isi, kapasitas memegang air tanah (Mukherjee & Lal, 2013).

Berdasarkan analisis fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), biochar yang dibuat dari serasah tebu memiliki gugus fungsional O-H, N-H, C-H alifatik, C=O karboksilat, C=C aromatik, C-O karboksilat,



Gambar 2. Spektrum FTIR biochar serasah tebu yang dibuat dengan *drum kiln* (Hariyono, 2016)



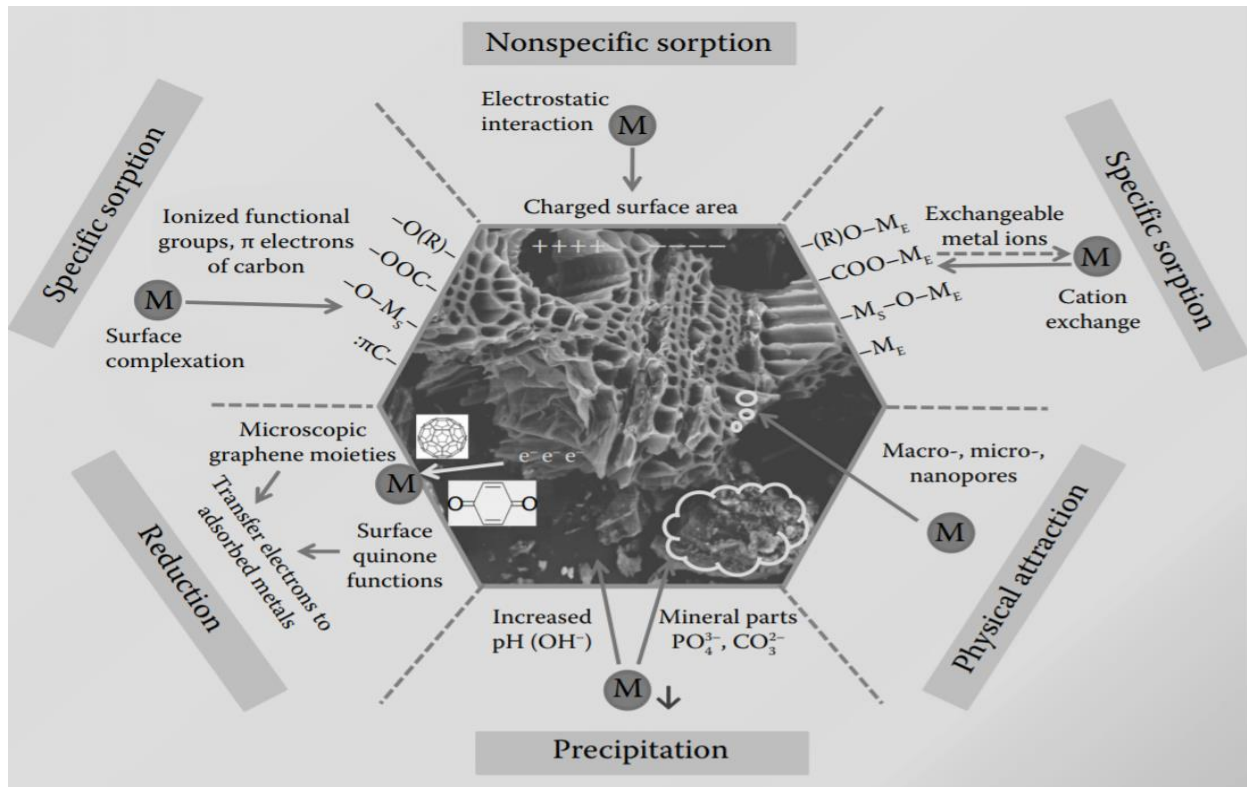
Gambar 3. Mikrografik *Scanning Electron Microscopy* (SEM) biochar serasah tebu yang dibuat dengan: (a) *drum kiln*, (b) *trench kiln*, (c) *mound kiln* dan (d) *vacuum pyrolysis*, dengan perbesaran 500x (Hariyono, 2016)

C=O keton, N-H amida, C=N, N-H amida, C=N, C=C aromatik, C-H alifatik, C-O fenolik, Ester, fenol C-O-C, C-OH, C-H aromatik (Gambar 2). Adanya gugus fungsional pada biochar memberi peluang terjadinya muatan negatif dari permukaan biochar, ketika mengalami hidrolisis di dalam tanah. Muatan negatif yang timbul tersebut dapat meningkatkan kemampuan biochar di dalam tanah untuk mengikat kation hara tanaman yang dapat dipertukarkan. Struktur morfologi permukaan biochar serasah tebu yang diidentifikasi dengan analisis *scanning electron microscopy* (SEM) menunjukkan struktur mikro yang sangat berpori, seperti Gambar 3 (Hariyono, 2016). Dengan struktur demikian, maka dapat berfungsi untuk memegang air; adanya gugus fungsional menyebabkan biochar dapat memiliki muatan negatif atau positif sehingga berpeluang

untuk terjadinya pertukaran kation/anion hara tanah, yang berpeluang dimanfaatkan oleh tanaman (Joseph et al. 2009). Thangarajan et al. (2016) menggambarkan secara detail bagaimana skema penyerapan ion logam dan non logam (termasuk unsur hara) secara kimia oleh gugus fungsional biochar, maupun secara fisik oleh pori berukuran nano, mikro, dan makro dari biochar (Gambar 4).

PENGARUH APLIKASI BIOCHAR PADA SIFAT TANAH

Aplikasi jenis biochar mempengaruhi berbagai jenis tanah di iklim yang berbeda dengan cara yang berbeda, dan efek bervariasi untuk tanaman yang berbeda (Hammond, 2009). Penggunaan biochar menyebabkan perubahan beberapa sifat



Gambar 4. Diagram skematik penyerapan ion logam dan non logam oleh gugus fungsional biochar dan pori nano, mikro, makro biochar (Thangarajan et al. 2016)

fisika tanah, yakni: struktur, porositas, distribusi ukuran pori, dengan demikian dapat memperbaiki udara tanah, kapasitas menyimpan air dan meningkatkan status hara dan mikrobia di rizosfir (Amonette & Joseph, 2009; Jha et al. 2010). Aplikasi biochar ke tanah berpasir dapat meningkatkan kapasitas lapangan karena sifat biochar yang berpori dan terjadi pergeseran proporsi ukuran pori makro, meso dan mikro (Zeelie, 2012; Herath et al. 2013). Namun demikian perlu dilakukan pemantauan perubahan fisik, kimia, pengaturan hidrologi dan ekologi tanah dengan aplikasi jangka panjang biochar, demikian pula respon berbagai jenis tanaman di berbagai wilayah agroekologi (Jha et al. 2010).

Beberapa studi melaporkan terjadinya perubahan sifat fisik tanah akibat pemberian biochar. Asai et al. (2009) melaporkan perbaikan sifat fisik tanah (bobot isi dan konduktivitas hidrolik) setelah aplikasi biochar

yang dibuat dari pengurangan sisa pabrik pengolahan kayu. Cayuela et al. (2010) melaporkan bahwa biochar yang berasal dari proses pirolisis sisa-sisa tanaman sangat baik dalam mempertahankan C dalam tanah yang berdampak pada perbaikan sifat fisik tanah bertekstur pasir, yakni stabilitas agregat tanah dan kemampuan tanah memegang air. Laird et al. (2010) melaporkan bahwa aplikasi biochar yang dibuat dari limbah kayu yang diproses dengan pirolisis lambat, dapat meningkatkan kemampuan tanah memegang air, menurunkan bobot isi tanah dan meningkatkan kemampuan tanah memegang air.

Hasil penelitian Karhu et al. (2011) menunjukkan bahwa aplikasi biochar yang dibuat dari pirolisis kayu dapat memperbaiki sifat fisik tanah bertekstur sedang, yakni aerasi tanah, kemampuan tanah memegang air dan ketersediaan air bagi tanaman. Sika, (2012) menggunakan limbah industri kayu

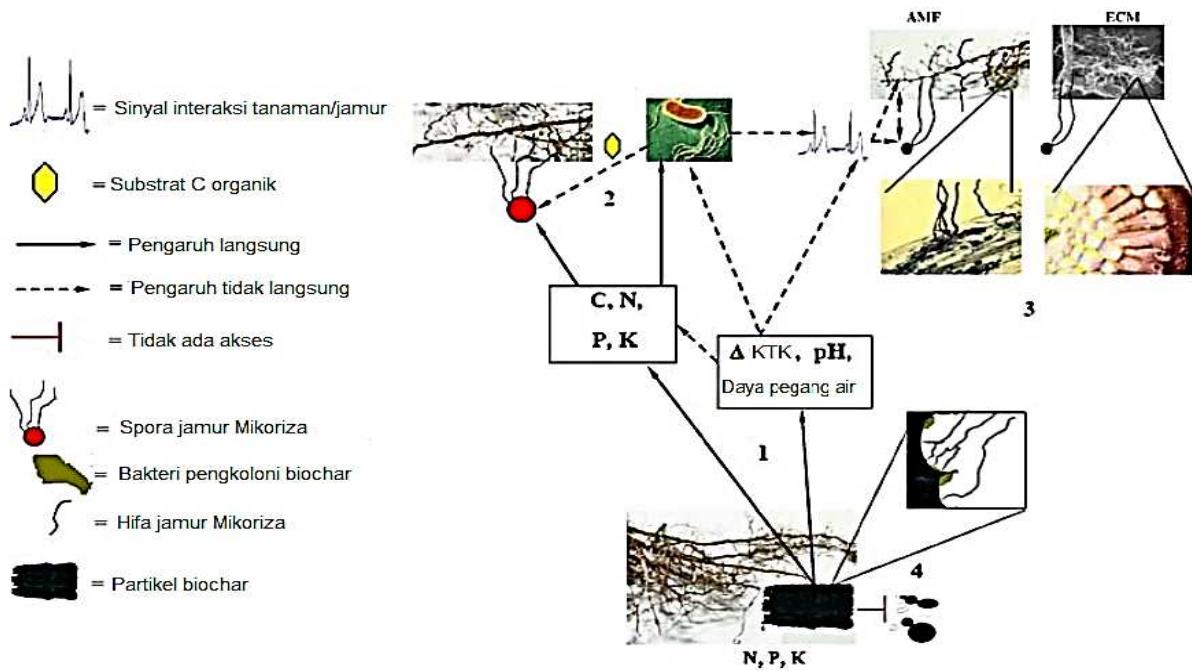
pinus yang dibuat menjadi biochar dengan pirolisis lambat dan diaplikasikan pada tanah bertekstur pasir. Hasilnya, aplikasi 10 ton/ha biochar merupakan dosis terbaik yang dapat memperbaiki sifat fisik tanah yakni kemampuan tanah memegang air. Hasil penelitian Herath et al. (2013), biochar dari pirolisis 350-500°C jerami jagung, dapat meningkatkan stabilitas agregat dan mesopori sehingga memperlancar drainase di tanah yang drainasenya buruk. Mukherjee & Lal (2013) juga melaporkan aplikasi biochar dapat meningkatkan kapasitas menyimpan air tanah. Pemberian biochar biomassa tanaman jagung pada tanah berpasir dapat menurunkan bobot isi tanah dan meningkatkan porositas total, sehingga meningkatkan ketersediaan air tanah. Ukuran partikel biochar mempengaruhi distribusi ukuran pori tanah (Abel et al. 2013).

Biochar meningkatkan retensi air, sehingga meningkatkan kualitas tanah berpasir dan mengurangi kebutuhan irigasi, dengan demikian dapat meningkatkan hasil tanaman (Liang et al. 2006; Uzoma et al. 2011). Aplikasi biochar dapat memperbaiki permeabilitas air tanah (Asai et al. 2009). Bobot isi tanah dapat dimodifikasi dengan aplikasi biochar (Laird et al. 2010; Herath et al. 2013; Mukherjee & Lal, 2013), demikian pula stabilitas agregat (Cayuela et al. 2010; Peng et al. 2011; Herath et al. 2013). Aplikasi biochar dari biomassa tebu hingga 10 ton/ha juga dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, yakni menurunkan bobot isi, meningkatkan porositas total, agregasi, air tersedia, KTK, C-organik, P-tersedia, K-dapat ditukar (Quirk et al. 2010; Quirk et al. 2012; Hariyono et al. 2016; Hariyono et al. 2020).

Perbaikan sifat kimia tanah juga dilaporkan terjadi karena aplikasi biochar ke dalam tanah. Semua unsur hara akan berada dalam bentuk tersedia bagi tanaman dalam jumlah yang cukup pada kirsan pH netral (6-

7); dibawah pH 6 (masam) unsur mikro bersifat toksik dan unsur hara makro tidak tersedia bagi tanaman. Sebaliknya pada pH >7 (basa) hampir semua unsur hara tidak tersedia bagi tanaman. Bagi tanah-tanah masam (pH<6) umumnya aplikasi biochar dapat meningkatkan pH tanah, mengingat sifat dasar biochar adalah basa (pH>7). Bigott et al. (2019) menyatakan bahwa perbaikan pH tanah dapat meningkatkan aktivitas mikrobia yang berasosiasi dengan tebu (seperti mikoriza). Interaksi bahan organik, pH tanah dan unsur hara makro dan mikro dalam tanah mempengaruhi aktivitas mikoriza yang dapat mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tebu. Jika budidaya tebu dilakukan dalam jangka panjang dapat semakin menurunkan produktivitas tebu. Nitrogen tanah bertindak sebagai pemicu yang mengendalikan kemampuan biochar untuk mempengaruhi simbiosis mikoriza (LeCroy et al. 2013).

Aplikasi biochar dapat meningkatkan pH tanah khususnya pada tanam masam (Chen et al. 2010; Novak et al. 2009; Laird et al. 2010; Van Zwieten et al. 2010; Peng et al. 2011; Uzoma et al. 2011; Sika, 2012), sehingga dapat memberi kondisi yang baik untuk ketersediaan hara. Kapasitas tukar kation tanah meningkat dengan aplikasi biochar (Chan et al. 2007; Cayuela et al. 2010; Laird et al. 2010; Van Zwieten et al. 2010; Peng et al. 2011; Uzoma et al. 2011). Peningkatan ini disebabkan peningkatan kerapatan muatan atau peningkatan luas permukaan atau kombinasi keduanya untuk pengikatan (Atkinson et al. 2010). Pemberian biochar meningkatkan C, N, P, K, Ca, Mg (Yamato et al. 2006; Jha et al. 2010; Sika, 2012). Pencucian hara N dilaporkan menurun dengan aplikasi biochar sehingga dapat menghemat pemupukan (Chan et al. 2007; Van Zwieten et al. 2010; Sika, 2012; Filiberto & Gaunt, 2013).

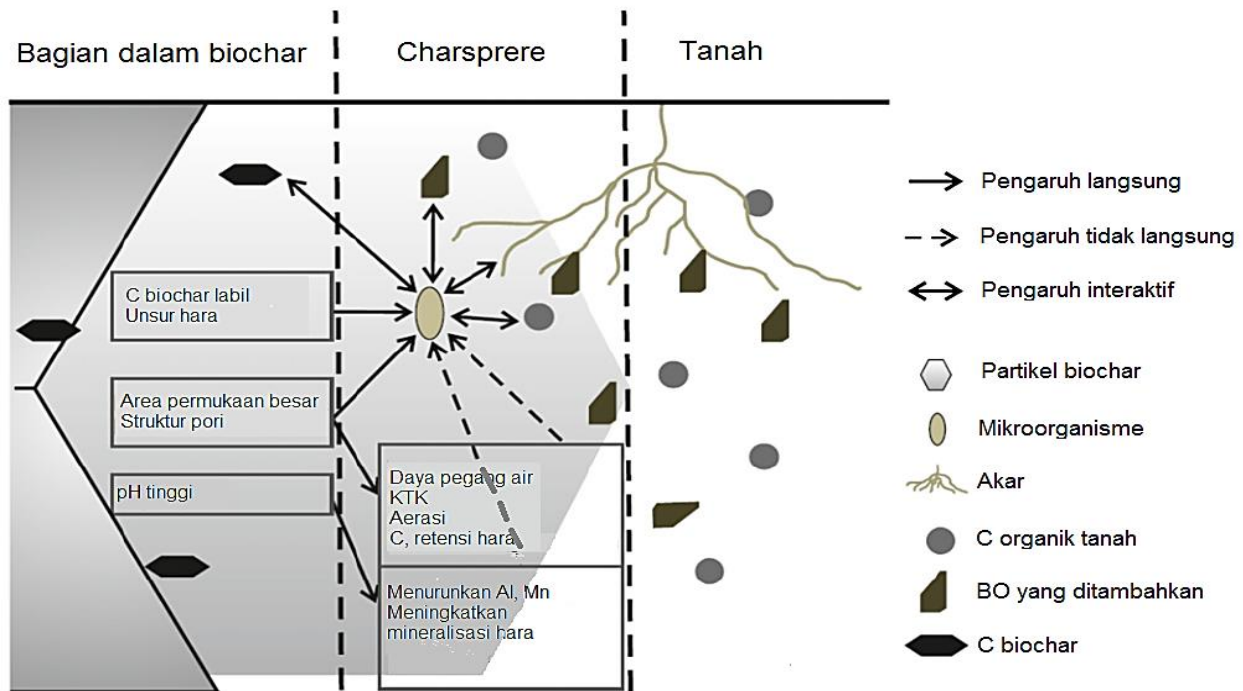


Gambar 5. Mekanisme pengaruh biochar terhadap mikoriza (dimodifikasi dari Warnock et al. 2007).
 (1) pengaruh terhadap sifat fisik-kimia tanah; (2) pengaruh terhadap mikroba tanah lainnya;
 (3) interaksi tanaman-jamur mikoriza; dan (4) penyediaan tempat perlindungan dari jamur patogen.

Warnock et al. (2007) menggambarkan peranan biochar yang memiliki pengaruh langsung terhadap sifat fisik-kimia tanah (C, N, P, K, KTK, pH, daya pegang air) yang selanjutnya mempengaruhi mikrobia tanah, demikian pula interaksinya dengan perakaran tanaman (Gambar 5). Selanjutnya Luo et al. (2013) juga menggambarkan secara skematik interaksi yang terjadi ketika biochar diaplikasikan ke dalam tanah (Gambar 6). Ada ruang diantara permukaan biochar dan partikel tanah (*charsphere*), dimana terjadi interaksi antara biochar dengan tanah yang memperbaiki sifat tanah (daya pegang air, KTK, aerasi, C, retensi hara, menurunkan Al dan Mn), yang selanjutnya mempengaruhi mikrobia tanah dan perakaran tanaman.

Pada tanah berpasir, dimana kesuburannya termasuk kategori rendah, dosis optimum pemberian biochar adalah 10 ton/ha, dimana aplikasi biochar pada dosis tersebut dapat memperbaiki sifat fisik dan

kimia tanah (Sika, 2012; Zeelie, 2012). Aplikasi biochar sekam padi 10 ton/ha di tanah masam yang kesuburannya rendah dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, yakni menurunkan bobot isi tanah, kekuatan tanah, Al yang dapat ditukar, dan Fe terlarut; demikian pula dapat meningkatkan porositas, kadar air tanah tersedia, C-organik, pH tanah, P tersedia, KTK, K-dapat ditukar, dan Ca. Perbaikan sifat tanah tersebut berpengaruh nyata terhadap biomassa tanaman (Masulili et al. 2010). Pada tanah bertekstur pasir di Asembagus dimana tingkat kesuburan tanahnya tergolong rendah, aplikasi biochar serasah tebu 10 ton/ha dapat memperbaiki sifat fisik tanah yakni menurunkan bobot isi, meningkatkan porositas total, agregasi, daya pegang air dan ketersediaan air tanah bagi tanaman; demikian pula dapat memperbaiki sifat kimia tanah, yakni meningkatkan KTK, C-organik, P-terdapat, K-dapat ditukar



Gambar 6. Skema interaksi biochar dengan tanah, mikrobia dan perakaran tanaman (dimodifikasi dari Luo et al. 2013).

(Hariyono, 2016). Walaupun penerapan biochar untuk sistem pertanian yang berproduktivitas tinggi tidak terlihat manfaatnya seperti pada daerah-daerah yang bermasalah, namun demikian aplikasi biochar tidak memiliki aspek negatif (Jones et al. 2012)

PENGARUH APLIKASI BIOCHAR PADA PERTUMBUHAN TANAMAN

Aplikasi biochar pada tanah berpasir meningkatkan efisiensi penggunaan air dan peningkatan pertumbuhan gandum dan kacang hijau, hasil biomassa tertinggi dicapai pada dosis 10 ton/ha. Peningkatan dosis hingga (50-200 ton/ha) justru menurunkan hasil, diduga karena ketidakseimbangan hara (Zeelie, 2012). Terdapat interaksi antara pemberian biochar dengan pupuk pada gandum di tanah ferrosol, dimana hasil biomassa meningkat secara signifikan (Van Zwieten et al. 2010).

Aplikasi biochar serasah tebu 10 ton/ha di Tweed Valley northern NSW dapat memperbaiki kualitas tanah, KTK dan ketersediaan hara dan karakteristik fisik tanah yang lebih baik; serta memperbaiki hasil tebu (Quirk et al. 2012). Aplikasi biochar serasah tebu 10 ton/ha pada tanah bertekstur pasir di Asembagus, baik pada percobaan pot maupun percobaan lapangan, dapat memperbaiki sifat fisik (menurunkan bobot isi, meningkatkan agregasi, porositas total dan air tersedia), dan kimia tanah (meningkatkan KTK, C-organik, P-tersedia, K dapat ditukar), dimana perbaikan kualitas tanah tersebut dapat mendukung pertumbuhan tanaman (Hariyono, 2016; Hariyono et al. 2020).

Aplikasi biochar meningkatkan hasil gabah dan meningkatkan respon padi terhadap pupuk N. Aplikasi biochar sangat tergantung pada kesuburan tanah dan manajemen pupuk (Asai et al. 2009). Pengelolaan hara terpadu antara bahan

organik dan pupuk dapat mencapai hasil tanaman yang lebih baik (Arif et al. 2012).

PERANAN BIOCHAR PADA BUDIDAYA TEBU

Penanaman tebu yang secara terus-menerus dan penggunaan pupuk yang tidak seimbang akan menguras nutrisi tanah, menurunkan kesehatannya dan pada akhirnya membatasi pertumbuhan tebu. Biochar karena sifatnya yang unik dapat meningkatkan kesehatan tanah, pertumbuhan tebu dan distribusi hara (Liao et al. 2018). Penggunaan biochar bagas tebu pada pertanaman tebu menunjukkan bahwa meningkatkan ketersediaan air dan mengurangi kepadatan tanah saat kering, mengurangi nitrat yang terbawa perkolasi. Dengan mempertahankan kadar air tanah yang sesuai, dapat meningkatkan hasil tebu dan kadar gula (Chen et al. 2010).

Penelitian di New South Wales, aplikasi biochar pada budidaya tebu tahun pertama belum menunjukkan pengaruh yang nyata. Namun demikian memiliki potensi untuk mitigasi perubahan iklim melalui stabilisasi karbon dalam tanah, meningkatkan kesuburan tanah dan kinerja agronomis. Dengan dosis biochar 10 ton/ha nyata menurunkan emisi gas N₂O dari tanah yang dipupuk urea (Quirk et al. 2012). Hasil penelitian Yang et al. (2015) menunjukkan bahwa aplikasi biochar menghasilkan perbaikan sifat akar tebu yang lebih baik, dan menghasilkan rasio tajuk/akar yang lebih besar. Aplikasi biochar meningkatkan pH tanah, dan secara signifikan meningkatkan konsentrasi P, K dan bahan organik. Hal ini penting, karena hasil tebu diantaranya ditentukan pertumbuhan awal tebu dan perakaran serta kondisi tanah yang baik.

Alvarez-Campos et al. (2018) membandingkan penggunaan biochar dari bahan baku limbah kayu keras, limbah peternakan kuda dan sekam padi yang diproses dengan

pirolisis 350-400 °C. Biochar tersebut diaplikasikan dengan dosis 1% dan 2% pada tanah bertekstur pasir pada lisimeter bervolume 265 liter, dan ditanami tebu. Hasil penelitian baik pada tanaman tebu tahun pertama (PC) dan ratun pertama (RC-1) menunjukkan bahwa aplikasi 2% biochar sekam padi meningkatkan biomassa dan hasil gula sekitar 30% dibandingkan kontrol tanpa bahan pembenah tanah. Biochar yang berasal dari pirolisis limbah peternakan dan limbah tanaman herbaceous pengaruhnya lebih baik dibanding biochar yang berasal dari limbah kayu keras, karena memiliki kandungan unsur hara yang lebih tinggi; sehingga ketika diaplikasikan sebagai pembenah tanah dapat meningkatkan C-organik, kapasitas tukar kation (KTK), dan ketersediaan hara di tanah, dan dapat mendukung pertumbuhan tanaman.

Aplikasi biochar serasah tebu 10 ton/ha maupun biochar serasah tebu 5 ton/ha yang dikombinasikan dengan kompos atau pupuk kandang 5 ton/ha pada budidaya tebu di lahan bertekstur pasir walaupun dapat meningkatkan sifat fisik-kimia tanah, namun demikian tidak dapat secara nyata meningkatkan hasil tebu, baik pada percobaan lapangan (Hariyono, 2016), maupun pada percobaan pot (Hariyono et al. 2020). Nampaknya dosis 5-10 ton/ha belum mencukupi; dan perbaikan kualitas tanah (sifat fisik dan kimia tanah) yang terjadi masih perlu ditambah input hara dan bahan organik baik dengan pupuk hijau dan pupuk anorganik.

Penambahan biochar ampas tebu dan serasah tebu dengan dosis 4% ke tanah secara konsisten dapat meningkatkan hasil tebu dan rendemen. Aplikasi biochar meningkatkan pH tanah dan hara makro (Ca, K, Mg dan P), meningkatkan C tanah serta kesuburan tanah dan secara konsisten menghasilkan peningkatan baik total hasil tebu maupun total gula. Penambahan biochar ke tanah dapat dipandang sebagai cara yang

berkelanjutan untuk menyimpan C dan meningkatkan kandungan C tanah. Peluang ekonominya baru dapat diperoleh bagi pekebun tebu dari pemanfaatan ampas tebu yang semula dianggap bernilai rendah dengan dikonversi menjadi biochar untuk perbaikan tanah dan peningkatan pertumbuhan tebu (Lima & White, 2017).

Hasil penelitian Islami et al. (2015) selama 3 tahun, menunjukkan bahwa aplikasi biochar berbahan baku blotong dan abu ketel tebu dapat memperbaiki status kesuburan tanah pada lahan kering terdegradasi di Blitar. Perbaikan status kesuburan tanah diikuti dengan peningkatan hasil tebu, serta kadar gula. Setelah tiga tahun penanaman tebu, biochar blotong dan abu boiler secara konsisten menunjukkan produksi tebu yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan bahan pembenah organik lainnya. Hasil penelitian Liao et al. (2018) menunjukkan bahwa penggunaan biochar hingga 20 ton/ha secara signifikan meningkatkan laju fotosintesis bersih dan menurunkan laju transpirasi selama semua tahap pertumbuhan. Aplikasi biochar meningkatkan akumulasi kandungan nitrogen, fosfor dan kalium pada daun, pucuk dan akar.

Perbaikan kualitas tanah yang terjadi akibat aplikasi biochar serasah tebu dan bahan pembenah tanah lainnya khususnya di tanah bertekstur pasir dalam jangka pendek tidak nyata meningkatkan pertumbuhan dan hasil tebu, karena adanya faktor pembatas C-organik dan N-total tanah yang sangat rendah dan KTK rendah. Aplikasi biochar tidak langsung terlihat pengaruhnya pada pertumbuhan dan produksi tebu, perlu waktu yang lebih lama untuk memperoleh pengaruh biochar bagi perbaikan tanah dan pertumbuhan tebu. Untuk meningkatkan kualitas tanah berpasir dalam rangka budidaya tebu, tidak dapat hanya mengandalkan satu teknologi saja seperti biochar. Maka untuk tujuan jangka pendek, perlu dikombinasi dan diintegrasikan dengan teknologi lainnya,

khususnya untuk meningkatkan C-organik dan N tanah, dengan demikian akan terjadi sinergi positif. Kombinasi biochar dengan pupuk kandang dan kompos menunjukkan sinergi positif. Perlu dikaji penggunaan bahan pembenah tanah lainnya yang berfungsi sebagai pemasok C sekaligus N. Tanaman *Legum* seperti *Crotalaria* dapat dijadikan alternatif untuk dikombinasikan dengan biochar (Hariyono, 2016).

PERANAN BIOCHAR UNTUK REMEDIASI TANAH

Biochar yang diproses dari bahan baku limbah pertanian memiliki luas permukaan yang besar dan morfologi yang sangat porous serta gugus fungsional seperti oksida dan hidroksil, berpotensi untuk mengurangi bioavailabilitas dan pencucian logam berat melalui adsorpsi dan reaksi fisikokimia lainnya. Karena biochar bersifat basa maka dapat meningkatkan pH tanah dan berkontribusi terhadap stabilisasi logam berat seperti As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn (Hidayat, 2015). Sifat biochar tersebut juga berfungsi dalam menanggulangi pencemaran pestisida karbaril dan atrazin, karena adanya biochar dapat mempercepat proses hidrolisis dan dekomposisi pestisida di dalam tanah (Zhang et al. 2013)

Biochar dapat bertindak sebagai bioremediasi dengan mengurangi mobilitas kontaminan logam maupun organik seperti insektisida (Hilber et al. 2009). Di tanah yang pelapukannya telah lanjut, biochar meningkatkan adsorpsi dan pengendapan logam berat Cd dan Zn. Pertukaran Cd atau Zn dengan Ca dan Mg dari biochar berperan kecil pada mekanisme retensi, sedangkan pengendapan logam (misalnya dengan fosfat) mungkin menjadi mekanisme sorpsi utama. Oleh karenanya aplikasi biochar serasah tebu pada tanah tropis yang terkontaminasi logam berat tampaknya dapat disarankan karena kapasitas penyerapannya

untuk Cd dan Zn. Perlu aplikasi berulang biochar untuk mengurangi konsentrasi Cd dan Zn dari larutan tanah, sehingga menghindari toksisitas bagi tanaman dan risiko lingkungan lainnya (Melo et al. 2015).

Unsur logam Cd dan Pb dikenal sebagai logam berat yang dikategorikan sebagai bahan pencemar dan tidak termasuk kategori unsur yang dibutuhkan tebu, sedangkan Zn dapat berfungsi untuk tebu dan dikategorikan sebagai unsur hara mikro. Kekurangan Zn dapat menyebabkan pertumbuhan tebu kerdil, perakaran sedikit karena metabolisme terganggu; sedangkan kelebihan Zn menyebabkan nekrosis daun (Kingston, 2014). Jika kandungan Cd dan Pb di dalam tanah kategori tinggi maka berpeluang ikut terserap oleh tanaman dan akan terbawa ke produk gula. Komite Ahli Gabungan FAO/WHO untuk Bahan Tambahan Makanan merekomendasikan asupan harian maksimum yang dapat ditoleransi untuk Cd dan Pb dari semua sumber (makanan, udara, dan air) sebesar 1-1,2 µg dan 3,5-4 µg dalam 1 kg massa tubuh. Dewan Riset Nasional Amerika menetapkan tingkat makanan maksimum yang dapat ditoleransi dari 500 µg Cd dan 30 mg Pb dalam 1 kg gula (Ghandour et al. 2001).

Biochar yang diolah dari serasah tebu mampu menurunkan konsentrasi Zn dalam larutan tanah dan menurunkan ketersediaan Cd, Pb, dan Zn dalam tanah pertambangan yang tercemar. Akibatnya, penyerapan tanaman dan phytotoxicity berkurang. Sebagai unsur hara mikro yang dibutuhkan maka Zn yang terikat pada gugus fungsional dan pori dari biochar dapat dimanfaatkan oleh akar tanaman tebu. Penurunan bioavailabilitas logam dan modifikasi lain terhadap substrat yang disebabkan oleh penerapan biochar dapat bermanfaat bagi pembentukan tanaman hijau di atas tanah tambang untuk membantu remediasi dan mengurangi risiko yang terkait dengan masalah kontaminasi ke lingkungan.

Penelitian lebih lanjut sekarang harus menerapkan hasil ini, dan studi serupa lainnya ke lapangan untuk mencapai manfaat praktis (Puga et al. 2015). Aplikasi 1,5-3 ton/ha biochar dari bagasse tebu dapat membantu upaya remediasi tanah tercemar logam berat Cd, Cu, Pb. Biochar dapat meningkatkan aktivitas mikrobial dan enzim urease, katalase dan invertase di dalam tanah, sehingga dapat memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan hasil tanaman *Brassica chinensis* L. (Nie et al. 2018).

PERANAN BIOCHAR UNTUK MITIGASI PERUBAHAN IKLIM

Walaupun akhir-akhir ini ada peningkatan kesadaran akan dampak bencana yang ditimbulkan oleh perubahan iklim di bumi dan adanya kebijakan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK), namun kenyataannya konsentrasi atmosfer karbondioksida (CO₂) dan GRK lainnya terus meningkat (Peters et al. 2013). Konversi biomassa ke biochar adalah strategi untuk penyerapan C yang dapat berkontribusi terhadap 'emisi negatif' (Cowie et al. 2015). Diyakini biochar dapat memainkan peran penting dalam upaya pencegahan terhadap perubahan iklim. Mineralisasi biochar yang lebih lambat dari biomassa asli dapat mengurangi emisi CO₂ dari sistem dan merupakan kunci untuk mitigasi perubahan iklim. Penangkapan CO₂ oleh tanaman melalui fotosintesis, dan konversi biomassa menjadi biochar secara dramatis dapat mengubah keseimbangan C (Whitman et al. 2010), demikian pula emisi gas lainnya (nitrous oxide N₂O, metana CH₄) dari tanah.

Biochar dapat berperan sebagai agensia yang berpotensi dalam memerangi perubahan iklim, didorong oleh stabilitas karbon yang tinggi dan didukung oleh perannya dalam bioenergi dan kesuburan tanah (Whitman et al. 2010). Biochar serasah tebu yang dikembalikan ke tanah sebagai

karbon untuk penyerapan karbon jangka panjang dan di masa depan, dapat secara signifikan mengurangi emisi nitrous oxide (N_2O) dan GRK lainnya dari lahan pertanian (Quirk et al. 2012). Dengan mengkonversi serasah tebu menjadi biochar, maka sebagian besar karbon (C) yang terkandung dari biomassa (serasah) tebu tidak akan menguap ke udara (sebagai CO_2). Jika biochar tersebut diaplikasikan ke dalam tanah maka karbon yang dihasilkan oleh tanaman tebu dalam biomassa akan kembali ke dalam tanah. Dengan demikian karbon yang ditangkap tanaman dari udara dalam proses fotosintesis dan dikonversi menjadi biomassa, tidak kembali seluruhnya ke udara melainkan dapat disimpan di dalam tanah. Aplikasi biochar 4,2 ton/ha/tahun berpotensi meningkatkan stok C tanah sebesar $2,35 \pm 0,4$ ton/ha/tahun di ladang tebu di Brazil (Lefebvre et al. 2020).

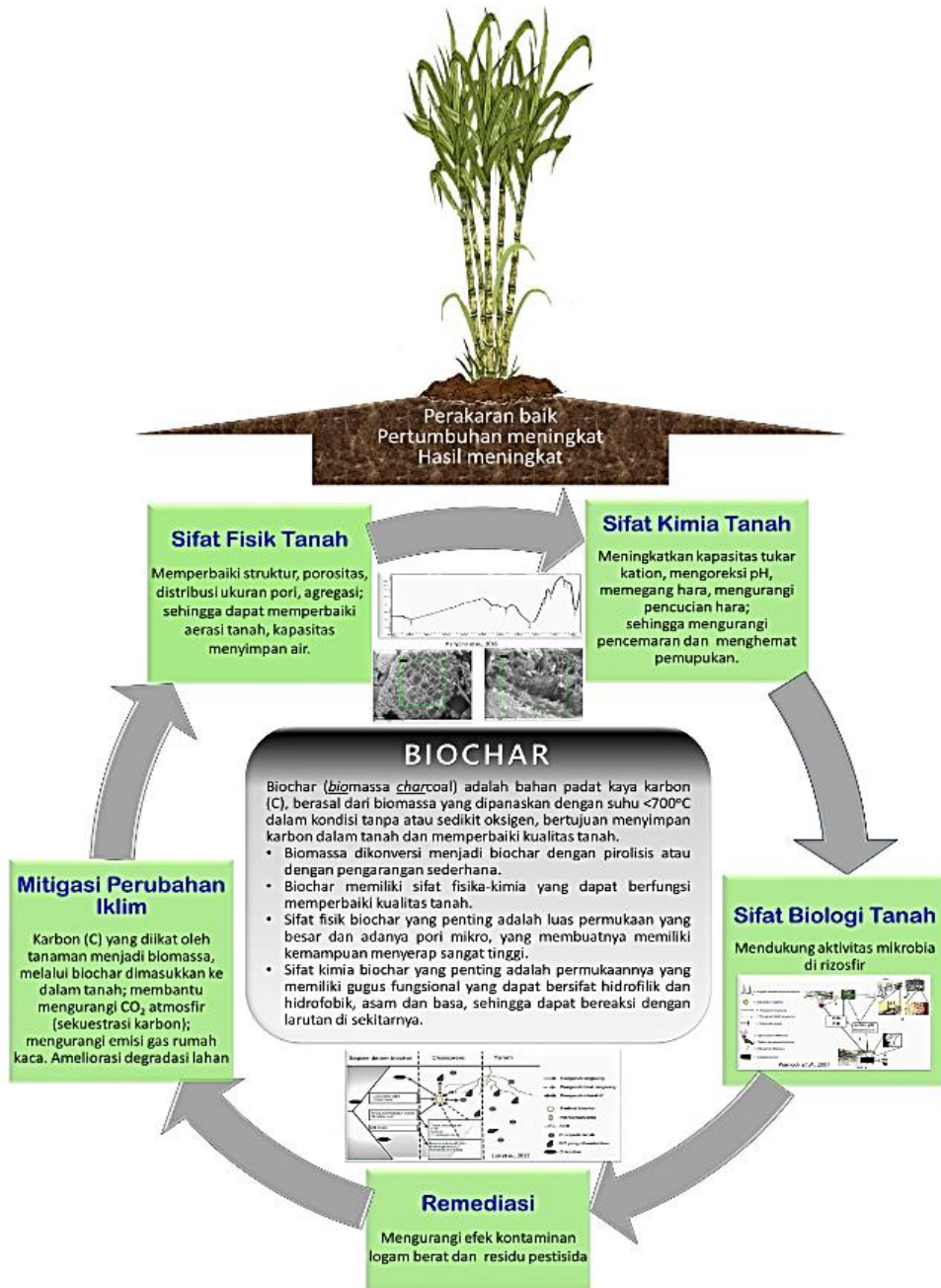
Dibandingkan jika biomassa serasah dibakar maka karbon hampir seluruhnya kembali ke atmosfer (karna karbon dalam abu sisa pembakaran hanya $<1\%$). Sedangkan, jika biomassa dikomposkan, maka ada proses degradasi oleh mikrobia dan respirasi mikrobia yang menghasilkan karbon yang diupkan ke atmosfer, dan sisa karbon dalam kompos relatif sedikit. Di Indonesia yang iklimnya tropis, degradasi mikrobia cenderung lebih cepat. Oleh karena itu, konversi biomassa menjadi biochar menjadi pilihan yang lebih bijak. Baik budidaya tebu di lahan tadah hujan maupun di lahan berpengairan, konversi biomassa menjadi biochar dapat berfungsi sama dalam hal menyimpan karbon dalam tanah sehingga berpotensi mengurangi emisi karbon ke atmosfer.

Dengan demikian biochar dapat dipromosikan sebagai teknologi yang secara bersamaan dapat meningkatkan produktivitas

tanah dan berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Pelaksanaan mitigasi dengan penerapan biochar bergantung pada estimasi emisi dari sistem biochar dibandingkan dengan sistem 'tanpa biochar', termasuk penggunaan biomassa secara konvensional, sistem energi fosil yang akan digantikan, dan pembenah tanah konvensional.

Perlu disadari bahwa penggunaan biochar bukan satu-satunya teknologi untuk memperbaiki kualitas tanah. Biochar, dengan karbon sebagai kandungan utamanya, memang dapat berfungsi memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. Namun demikian biochar tidak banyak mengandung unsur hara, sehingga hanya berfungsi sebagai bahan pembenah tanah, tidak berfungsi sebagai penambah hara yang nyata sebagaimana pupuk. Untuk mencukupi kebutuhan hara tanaman, perlu penambahan hara baik dari pupuk anorganik maupun organik. Biochar dapat berfungsi memperbaiki daya sangga tanah sehingga pemupukan dapat menjadi lebih efektif dan efisien. Borges et al. (2020) menyampaikan bahwa biochar dapat diperkaya dengan unsur hara yang berasal dari pupuk sehingga dapat meningkatkan hasil tanaman.

Berdasarkan uraian diatas, maka peran multifungsi biochar dapat digambarkan seperti diagram di bawah ini (Gambar 7). Diagram ini menggambarkan secara singkat bagaimana karakteristik yang dimiliki biochar, sehingga ketika diaplikasikan ke dalam tanah dapat memperbaiki sifat fisik tanah, sifat kimia tanah, dan sifat biologi tanah, juga dapat berfungsi untuk remediasi tanah dan mitigasi perubahan iklim. Multifungsi biochar tersebut memperbaiki kondisi tanah untuk mendukung pertumbuhan tanaman (tebu) untuk mencapai hasil yang lebih baik. Kelayakan ekonomi penerapan biochar di



Gambar 7. Diagram multifungsi biochar dalam budidaya tebu

Sumber: Warnock et al. (2007); Luo et al. (2013); Hariyono (2016)

lapangan bergantung pada biaya produksi biochar dan bergantung pada berbagai kondisi wilayah. Manfaat biochar harus melebihi biaya prosesnya, sehingga menjadi nilai tambah yang signifikan (Chittakone et al. 2017); Lima & White, 2017; Lima et al. 2019).

KESIMPULAN

Biochar dikonversi dari biomassa tanaman, dengan karakteristik fisik-kimianya yang memiliki struktur mikro sangat porous, kandungan utama karbon (C) dan gugus fungsional di permukaannya, jika diaplikasikan ke dalam tanah dapat memiliki

banyak fungsi khususnya dalam bidang pertanian. Aplikasi biochar ke dalam tanah dapat memperbaiki sifat fisik tanah, yakni menurunkan bobot isi tanah dan meningkatkan porositas total, agregasi dan air tersedia. Aplikasi biochar ke dalam tanah memperbaiki sifat kimia tanah, yakni mengoreksi pH, meningkatkan kapasitas tukar kation dan daya pegang hara sehingga mengurangi pencucian hara dan meningkatkan efisiensi pemupukan. Aplikasi biochar ke dalam tanah dapat memperbaiki sifat biologi tanah, yakni mendukung aktivitas mikrobia tanah di rhizosfir. Aplikasi biochar ke dalam tanah dapat berfungsi sebagai upaya remediasi, yakni mengurangi pengaruh kontaminasi logam berat. Perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah secara bersama-sama dapat mendukung pertumbuhan tanaman tebu yang lebih baik. Aplikasi biochar ke dalam tanah berfungsi pula sebagai upaya mitigasi perubahan iklim, yakni mengurangi pelepasan karbon ke atmosfer dengan menyimpan karbon yang ditangkap tanaman sebagai biomassa menjadi karbon dalam biochar yang disimpan ke dalam tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementerian Pertanian RI atas dukungan biaya dalam penelitian biochar. Terima kasih juga disampaikan kepada semua staf dan teknisi lingkup Balai Penelitian Tanaman Pemanis dan Serat dan semua laboran yang mendukung; sehingga tulisan ini dapat disusun.

DAFTAR PUSTAKA

Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G., 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202–203, 183-191.

Alvarez-Campos, O., Langa, T., Bhadha, J., McCray, J., Barry Glaz, B., Daroub, S., 2018. Biochar and mill ash improve yields of sugarcane on a sand soil in Florida. *Agric. Ecosyst. Environ.* 253, 122–130.

Amonette, J., Joseph, S., 2009. Characteristic of biochar: Microchemical properties. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar for environmental management. Science and Technology*, Earthscan., London, UK.

Arif, M., Ali, A., Umair, M., Munsif, F., Ali, K., Inamullah, Saleem, M., Ayub, G., 2012. Effect of biochar, FYM and mineral nitrogen alone and in combination on yield and yield components of maize. *Sarhad J. Agriculture* 28, 191-195.

Asai, H., Samson, B., Stephan, H., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T., Horie, T., 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. *Soil Phys. Prop. leaf SPAD grain yield. F. Crop Res.* 111, 111:81–84.

Atkinson, C., Fitzgerald, J., Hipps, N., 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337, 1-18.

Bigott, A., Hoy, J., Fultz, L., 2019. Soil properties, microbial communities, and sugarcane yield in paired fields with short- or long-term sugarcane cultivation histories. *Appl. Soil Ecol.* 142, 66–176.

Borges, B., Strauss, M., Camelo, P., Sohi, S., Franco, H., 2020. Re-use of sugarcane residue as a novel biochar fertiliser - Increased phosphorus use efficiency and plant yield. *J. Clean. Prod.* 262(2020), 121406.

Brown, R., 2009. Biochar production technology. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar for environmental management. Science and Technology* Earthscan, London, UK.

- Brownsort, P., 2009. Biomass pyrolysis processes: Review of scope, control and variability. UK Biochar Res. Cent. Work. Pap. 5 38p.
- Cayuela, M., Oenema, O., Kuikman, P., Bakker, R., van Groenigen, J., 2010. Bioenergy by-products as soil amendments? Implications for carbon sequestration and greenhouse gas emissions. *GCB Bioenergy* 2, 201–213.
- Chan, K., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* 45, 629–634.
- Chen, Y., Shinogi, Y., Taira, M., 2010. Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality. *Aust. J. Soil Res.* 48, 526–530.
- Chittakone, I., Xuan Dung, N., Preston, T., 2017. Sugar cane had higher yield when established from node cuttings rather than from long stems and had a higher sugar content when the soil was amended with biochar. *Livest. Res. Rural Dev.* 29, 219–225.
- Cowie, A., Woolf, D., Gaunt, J., Brandão, M., de la Rosa, R., Cowi, A., 2015. Biochar, carbon accounting and climate change. In: Lehmann, J & Joseph, S. *Biochar for environmental management. Sci. Technol. Implement. - Second Ed.* Routledge pp763-794.
- Dictionary, O., 2013. <http://oxforddictionaries.com/definition/english/biochar?q=biochar>. Copyright ©2013 Oxford University Press. All rights reserved.
- Downie, A., Crosky, A., Munroe, P., 2009. Physical properties of biochar. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar for environmental management. Science and Technology*, Earthscan., London, UK.
- Filiberto, D., Gaunt, J., 2013. Practicality of biochar additions to enhance soil and crop productivity. *Agriculture* 3, 715–725.
- Ghandour, M., Ali, A., Farghaly, O., Khodari, M., 2001. Digestion-free determination of trace Cu, Cd, Pb, and Zn ions in Egyptian cane sugar by Differential Pulse Anodic Stripping Voltammetry. *Chem. Pap.* 55, 91–99.
- Hammond, J., 2009. The best use of biomass? Greenhouse gas life cycle analysis of predicted pyrolysis systems. MSc thesis, University of Edinburgh.
- Hariyono, B., 2016. Pemanfaatan biochar untuk memperbaiki kualitas tanah berpasir dan pengaruhnya pada tebu (*Saccharum officinarum* L.). Disertasi. Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya.
- Hariyono, B., Utomo, W., Utami, S., Islami, T., 2020. Utilization of the trash biochar and waste of sugarcane to improve the quality of sandy soil and growth of sugarcane. 1st International Conference on Sustainable Plantation (1st ICSP 2019). *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 418 012067. 8p.
- Hariyono, B., Utomo, W., Utami, S., Islami, T., 2016. Biochar for sugarcane: Simple technology for biochar production from sugarcane trash. *Int. J. Eng. Manag.* 3, 105–113.
- Herath, H., Camps-Arbestain, M., Hedley, M., 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma* 209–210, 188–197.
- Hidayat, B., 2015. Remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan biochar. *J. Pertan. Trop.* 2 1, 51–61.
- Hilber, I., Wyss, G., Mäder, P., Bucheli, T., Meier, I., Vogt, L., Schulin, R., 2009. Influence of activated charcoal amendment to contaminated soil on dieldrin and nutrient uptake by cucumbers. *Environ. Pollut.* 157, 2224–2230.

- Islami, T., Wisnubroto, E., Nugroho, W., 2015. Biochar Derived from Sugarcane Industry Waste Increasing Productivity of Degraded Land. *Int. J. Soil Sci.* 12, 1–9.
- Jeffery, J., Abalos, D., Spokas, K., Verheijen, F., 2015. Biochar effects on crop yield. In: Lehmann, J & Joseph, S. *Biochar for environmental management. Sci. Technol. Implement. - Second Ed.* Routledge 301–325.
- Jeong, C., Dodla, S., Wang, J., 2016. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. *Chemosphere* 142, 4–13.
- Jha, P., Biswas, A., Lakaria, B., Rao, A., 2010. Biochar in agriculture – prospects and related implications. *Curr. Sci.* 99, 1218–1225.
- Jones, D., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T., Murphy, D., 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three-year field trial. *Soil Biol. Biochem.* 45, 113–124.
- Joseph, S., Peacocke, C., Lehmann, J., Munroe, P., 2009. Developing a Biochar Classification and Test Methods. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar for environmental management. Sci. Technol.* Earthscan. London, UK. 107-126.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., Regina, K., 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140, 309–313.
- Kingston, G., 2014. Mineral Nutrition of Sugarcane. In: Moore, PH & Botha, FC. *Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology.* John Wiley Sons, Inc 85-120.
- Kinney, T., Masiello, C., Dugan, B., Hockaday, W., Dean, M., Zygourakis, K., Barnes, R., 2012. Hydrologic properties of biochars produced at different Temperatures. *Biomass and Bioenergy* 41, 34–43.
- Laird, D., Fleming, P., Davis, D., Horton, R., Wang, B., Karlen, D., 2010. Impact of biochar amendments on the quality of typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158, 443–449.
- LeCroy, C., Masiello, C., Rudgers, J., Hockaday, W., Silberg, J., 2013. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface. *Soil Biol. Biochem.* 58248-254. 58, 248–254.
- Lefebvre, D., Williams, A., Meersmans, J., Kirk, G., Sohi, S., Goglio, P., Smith, P., 2020. Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. *Sci Rep* 10, 19479.
- Lehmann, J., Gaunt, J., Rondon, M., 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - a review. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.* 11, 403–427.
- Lehmann, J., Joseph, S., 2009. Biochar for environmental management: An introduction. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar Environ. Manag. Sci. Technol.* Earthscan. London, UK 1–12.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyargi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skemjstad, J., Thies, J., Luizao, F., Peterson, J., Noves, E., 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 1719-1730.
- Liao, F., Yang, L., Li, Q., Xue, J., Li, Y., Huang, D., Yang, L., 2018. Effect of Biochar on Growth, Photosynthetic Characteristics and Nutrient Distribution in Sugarcane. *Sugar Tech.*

- Lima, I., White, Mj., 2017. Sugarcane bagasse and leaf residue biochars as soil amendment for increased sugar and cane yields. *Int. Sugar J.*
- Lima, I., White, P., Webber, C., 2019. Multi-year study on field application of sugarcane bagasse biochar. USBI, Fort Collins, CO Jun 30th - July 3rd 28 p.
- López, F., Rodríguez, O., Urien, A., Lobato, B., Centeno, T., Alguacil, F., 2013. Physico-chemical characteristics of the products derived from the thermolysis of waste *Abies alba* Mill. wood. *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif)*. 4, 26–30.
- Luo, Y., Durenkamp, M., Nobili, M., Lin, Q., Devonshire, B., Brookes, P., 2013. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 oC or 700 oC, in a silty-clay loam soil of high and low pH. *Soil Biol. Biochem.* 57, 513–523.
- Masulili, A., Utomo, W., Syekhfani, 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its Influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *J. Agric. Sci.* 2, 39–47.
- McCarl, B., Peacocke, C., Chrisman, R., Kung, C., Sand, R., 2009. Economics of biochar production, utilization and greenhouse gas offsets. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.). *Biochar for environmental management*. Sci. Technol. Earthscan. London, UK. 341–357.
- Melo, L., Puga, A., Coscione, A., Beesley, L., Abreu, C., Camargo, O., 2015. Sorption and desorption of cadmium and zinc in two tropical soils amended with sugarcane-straw-derived biochar. *J Soils Sediments. Soils, Sec 4 Ecotoxicol. Rersearch Artic.*
- Mukherjee, A., Lal, R., 2013. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions. *Agronomy* 3, 313–339.
- Nie, C., Yang, X., Niazi, N., Xu, X., Wen, Y., Rinklebe, J., YS, O., Xu, S., Wang, H., 2018. Impact of sugarcane bagasse-derived biochar on heavy metal availability and microbial activity: A field study. *Chemosph.* doi 10.1016/j.chemosphere.2018.02.134.
- Noor, N., Shariff, A., Abdullah, N., 2012. Slow pyrolysis of cassava wastes for biochar production and characterization. *Iran. J. Energy Environ.* 3 (Special Issue Environ. Technol. 60–65.
- Novak, J., Busscher, W., Laird, D., Ahmedna, M., Watts, D., Niandou, M., 2009. Impact of biochar bmentment on fertility of a Southeastern coastal plain soil. *Soil Sci.* 174, 105–112.
- Peng, X., Ye, L., Wang, C., Zhou, H., Sun, B., 2011. Temperature-and duration dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. *Soil Tillage Res.* 112, 159–166.
- Peters, G., Andrew, R., Boden, T., Canadell, J., Ciais, P., Le Quéré, C., Marland, G., Raupach, M., Wilson, C., 2013. The challenge to keep global warming below 2°C. *Nat. Clim. Chang.* 3, 4–6.
- Puga, A., Abreu, C., Melo, L., Paz-Ferreiro, J., Beesley, L., 2015. Cadmium, lead, and zinc mobility and plant uptake in a mine soil amended with sugarcane straw biochar. *Env. Sci Pollut Res. Res. Artic.* 1–9.
- Quirk, R., Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Connell, A., Rust, J., 2012. Utilization of Biochar in Sugarcane and Sugar-Industry Management. *Sugar Tech* 14, 321–326.
- Quirk, R., Van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A., Morris, S., Connell, A., Rust, J., Petty, S., 2010. The role of biochar in management of sugarcane. *Proceeding Int. Soc. Sugar Cane Technol.* 27, 1–10.

- Rajapaksha, A., Mohan, D., Igalavithana, A., Lee, S., Ok, Y., 2016. Definitions and fundamentals of biochar. In: Ok et al. (Eds). Biochar Production, Characterization, and Applications. CRC Press Taylor Fr. Gr. 6000 Broken Sound Parkw. NW, Suite 3-16.
- Sika, M., 2012. Effect of biochar on chemistry, nutrient uptake and fertilizer mobility in sandy soil. Thesis Univ. Stellenbosch 139 p.
- Thangarajan, R., Bolan, N., Mandal, S., Kunhikrishnan, A., Choppala, G., Karunanithi, R., Qi, F., 2016. Biochar for Inorganic Contaminant Management in Soil. In: Ok et al. (Eds). Biochar Production, Characterization, and Applications. CRC Press Taylor Fr. Gr. 6000 Broken Sound Parkw. NW, Suite 300 100-138.
- Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Zahoor, A., Nishihara, E., 2011. Influence of biochar application on sandy soil hydraulic properties and nutrient retention. *J. Food, Agric. Environ.* 9, 1137–1143.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., Cowie, A., 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327, 235–246.
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A., van der Velde, M., Diafas, I., 2010. Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. 149. EUR 24099 EN, Off. Off. Publ. Eur. Communities, Luxemb. Warnock, D., Lehmann, J., Kuyper, T., Rillig, M., 2007. Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant Soil* 300, 9–20.
- Whitman, T., Scholz, S., Lehmann, J., 2010. Biochar projects for mitigating climate change: an investigation of critical methodology issues for carbon accounting. *Carbon Manag.* 1, 89–107.
- Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I., Anshori, S., Ogawa, M., 2006. Effects of the application of charred bark of *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci. Plant Nutr.* 52, 489–495.
- Yang, L., Liao, F., Huang, M., Yang, L., Li, Y., 2015. Biochar Improves Sugarcane Seedling Root and Soil Properties Under a Pot Experiment. *Sugar Tech* 17, 36–40.
- Zeelie, A., 2012. Effect of biochar on selected soil physical properties of sandy soil with low agricultural suitability. Thesis Univ. Stellenbosch 145 p.
- Zhang, P., Sun, H., Yu, L., Sun, T., 2013. Adsorption and catalytic hydrolysis of carbaryl and atrazine on pig manure-derived biochars: Impact of structural properties of biochars. *J. Hazard. Mater.* 244–245, 217–224.