

Potensi Pemanfaatan Biochar untuk Rehabilitasi Lahan Kering di Indonesia

Potency of Utilizing Biochar for Dryland Rehabilitation in Indonesia

Neneng Laela Nurida

Peneliti Badan Litbang Pertanian di Balai Penelitian Tanah, Jl. Tentara Pelajar No. 12, Bogor 16114; email: lelanurida@yahoo.com

Diterima 13 Agustus 2014; Direview 15 September 2014; Disetujui 17 November 2014

Abstrak. Pemanfaatan biochar merupakan salah satu upaya pengelolaan limbah pertanian yang prospektif untuk mendorong optimalisasi lahan-lahan suboptimal dan lahan terdegradasi. Tulisan ini bertujuan untuk memberikan informasi tentang potensi biochar di bidang pertanian khususnya dalam upaya merehabilitasi lahan-lahan suboptimal di Indonesia. Di Indonesia, berbagai sumber bahan baku biochar berupa limbah pertanian tersedia cukup banyak yang diperkirakan mencapai 10,7 juta t th⁻¹, di antaranya berupa sekam padi, kulit buah kakao, tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, tongkol jagung. Kualitas biochar yang diproduksi sangat tergantung pada jenis bahan baku, alat pembakaran, suhu pembakaran, dan lamanya pembakaran. Aplikasi biochar pada lahan pertanian berfungsi sebagai pembenah tanah yang mampu memperbaiki sifat kimia tanah (pH, kapasitas tukar kation, N-total, P-tersedia dan Al_{exch}), sifat fisik tanah (*Bulk density*, porositas dan kemampuan tanah memegang air). Perbaikan kualitas sifat kimia dan fisik tanah tersebut berdampak pada ketersediaan hara dan air melalui kemampuan biochar meretensi hara dan air. Pada akhirnya, penambahan biochar berimplikasi pada peningkatan produktivitas tanaman pangan. Ke depan, diharapkan dengan aplikasi biochar akan semakin luas lahan-lahan suboptimal dan lahan terdegradasi yang dapat dipulihkan dan ditingkatkan produktivitasnya.

Kata kunci: Limbah Pertanian / Biochar / Kualitas Tanah / Pertanian

Abstract. Biochar utilization is prospective land management to encourage optimization of sub-optimal land. The objective of this paper is to inform of potency of biochar in agricultural aspect especially for rehabilitating of degraded land in Indonesia. In Indonesia, the various sources of raw materials such as agricultural wastes available biochar is quite large reaching 10.7 million t / year, such as rice husks, cacao shell, coconut shell, oil palm shell, and corn cob, etc. Quality of biochar produced depends on the type of raw materials, equipment used, combustion temperature, and duration of combustion. Biochar application on agricultural land serves as soil amendment that can improve soil chemical properties (pH, cation exchange capacity, total-N, available P and Al_{exch}), soil physical properties (bulk density, porosity and water holding capacity). Improvement soil physical and chemical properties impacted on the nutrient availability and water availability through nutrient and water retention. Finally the addition of biochar have been impacted for increasing crop productivity. It is expected that addition of biochar will recover widespread of suboptimal land and then land productivity can be increased.

Keywords: Agricultural Waste / Biochar / Soil Quality / Agriculture

PENDAHULUAN

Sebagai negara agraris, Indonesia mempunyai modal potensial untuk menghasilkan pangan yang cukup, yaitu berupa lahan pertanian yang luas. Laju konversi lahan sawah yang mencapai sekitar 132.000 ha.th⁻¹ (Agus dan Irawan 2006) harus menjadi pendorong untuk lebih meningkatkan produktivitas lahan-lahan sub optimal untuk penyediaan pangan nasional. Lahan sub optimal yang paling luas sebarannya adalah lahan kering, yaitu sekitar 122,1 juta ha yang terdiri dari lahan kering masam seluas 108,8

juta ha dan lahan kering iklim kering seluas 13,3 juta ha (Mulyani dan Muhrizal 2013).

Lahan kering masam dicirikan oleh pH tanah <5, C-organik dan tingkat kesuburan tanah rendah dengan curah hujan relatif tinggi >2000 mm.th⁻¹ (Rochayati dan Dariah 2012). Lahan kering iklim kering dicirikan oleh terbatasnya ketersediaan air akibat curah hujan yang sangat rendah. Umumnya lahan kering di Indonesia, utamanya yang telah dikelola untuk pertanian, baik lahan kering masam maupun lahan kering iklim kering telah mengalami degradasi dan salah satunya disebabkan kurang tepatnya sistem pengelolaan (Suwardjo dan Nurida 1993). Salah satu indikator penting degradasi lahan adalah kemerosotan

status bahan organik tanah (Sudirman dan Vadari 2000; Kurnia *et al.* 2005), sehingga perbaikan status bahan organik harus menjadi prioritas dalam pemulihan lahan terdegradasi. Peningkatan kadar bahan organik tanah juga merupakan opsi untuk penanggulangan faktor pembatas lahan kering suboptimal.

Upaya perbaikan kualitas tanah yang relatif murah adalah pemanfaatan sumber bahan organik *in situ*, seperti pengembalian sisa tanaman. Selama ini upaya pemulihan dilakukan dengan menggunakan berbagai pembenah tanah organik berupa pupuk kandang, kompos, dan biomas tanaman. Dosis yang digunakan masih tergolong cukup tinggi yaitu sekitar 10-20 t ha⁻¹ pupuk kandang (Nursyamsi *et al.* 1995; Kurnia 1996) dan 12-25 t ha⁻¹ biomas flemingia (Santoso *et al.* 2004; Nurida 2006), sehingga dibutuhkan jumlah yang cukup besar dan seringkali sulit dalam pengadaannya.

Di Indonesia yang merupakan negara tropis, laju dekomposisi (pelapukan) bahan organik tergolong tinggi sehingga bahan pembenah tanah organik alami yang digunakan lebih bersifat sementara (*temporary*). Saat ini telah mulai berkembang di dunia, penggunaan biochar/arang limbah pertanian sebagai bahan pembenah tanah alternatif. Biochar mampu bertahan lama di dalam tanah atau mempunyai efek yang relatif lama, atau relatif resisten terhadap serangan mikroorganisme, sehingga proses dekomposisi berjalan lambat (Tang *et al.* 2013). Beberapa tahun silam penduduk asli Amazon telah memberikan charcoal ke dalam tanah dan hingga saat ini (100-1000 tahun kemudian) terbukti bahwa kualitas sifat fisik dan kimia tanah tersebut jauh lebih baik dibandingkan dengan tanah sekitarnya (Steiner *et al.* 2007). Oleh karena itu, biochar dapat menjadi pembenah tanah alternatif yang potensial untuk memperbaiki kualitas lahan yang telah terdegradasi khususnya di lahan-lahan suboptimal.

Salah satu upaya mitigasi dalam menghadapi perubahan iklim adalah dengan meningkatkan sekuestrasi karbon diantaranya dalam bentuk biochar. Biochar terbukti efektif dalam menurunkan kemasaman tanah pada lahan kering masam yang banyak ditemui pada lahan pertanian di Indonesia. Kemasaman tanah pada lahan kering masam umumnya disebabkan tingginya konsentrasi aluminium yang menyebabkan pertumbuhan tanaman menjadi terhambat dan mengurangi potensi lahan untuk menghasilkan pangan. Biochar juga mampu mengurangi pencucian pestisida dan unsur hara dan pada akhirnya berdampak pada peningkatan kualitas lingkungan.

Tulisan ini bertujuan untuk memberikan informasi tentang potensi biochar di bidang pertanian khususnya dalam upaya merehabilitasi lahan-lahan suboptimal di Indonesia. Produksi biochar merupakan salah satu pengelolaan limbah pertanian yang dapat dikembangkan mengingat sumber bahan bakunya cukup melimpah. Ke depan diharapkan pemulihan lahan-lahan suboptimal dan lahan terdegradasi dapat dilakukan dengan memanfaatkan limbah pertanian yang tersedia *in situ*.

SUMBER BAHAN BAKU BIOCHAR

Sumber biochar terbaik adalah limbah organik khususnya limbah pertanian. Hingga saat ini pemanfaatan limbah organik dilakukan melalui proses pembakaran sempurna/tidak sempurna menjadi biochar (menghasilkan CO₂), terdegradasi/ terdekomposisi di lingkungan aerobik (juga menghasilkan CO₂), atau terdegradasi/terdekomposisi dalam lingkungan anaerobik (menghasilkan CO₂ serta CH₄). Saat ini belum ada manfaat lainnya dari bahan-bahan yang miskin hara selain dimanfaatkan menjadi biochar melalui proses pembakaran tidak sempurna dan digunakan sebagai bahan untuk memperbaiki lahan-lahan marjinal.

Potensi bahan baku biochar tergolong melimpah yaitu berupa limbah sisa pertanian, terutama yang sulit terdekomposisi atau dengan rasio C/N tinggi. Di Indonesia potensi penggunaan *charcoal* atau *biochar* cukup besar, mengingat bahan baku seperti residu kayu, tempurung kelapa, sekam padi, kulit buah kakao, tongkol jagung, cukup tersedia. Thahir *et al.* (2008) menginformasikan bahwa setiap kali proses penggilingan gabah mampu menghasilkan 16,3-28% sekam. Potensi tempurung kelapa pun sangat besar mengingat luas areal tanaman kelapa mencapai 3,79 juta hektar dengan produksi setara kopra sebesar 2,94 juta t th⁻¹ (Badan Pusat Statistik 2013), dimana proporsi tempurung dari satu buah kelapa sekitar 15-19%. Luas areal tanaman kakao sekitar 1,85 juta ha (Badan Pusat Statistik 2013) dengan produksi kulit buah kering sekitar 830 ribu ton/ tahun (Ditjen Bina Produksi 2007) dan proporsi tongkol jagung 21% dari bobot tongkol kering (Nurida *et al.* 2012). Selama ini, limbah pertanian tersebut belum dimanfaatkan secara optimal, hanya terbatas digunakan sebagai sumber energi terbarukan (Okimori *et al.* 2003) dan pakan ternak.

Hasil analisis Sarwani *et al.* (2013) menginformasikan bahwa secara nasional, potensi biomas

pertanian yang bisa dikonversi menjadi biochar diperkirakan sekitar 10,7 juta ton yang akan menghasilkan biochar 3,1 juta ton. Potensi tertinggi berasal dari sekam padi yaitu mencapai 6,8 juta t th⁻¹ dan akan menghasilkan biochar sebesar 1,77 juta t th⁻¹ atau sekitar 56,48% dari total potensi biochar nasional (Tabel 1). Tingginya potensi biomas untuk dijadikan biochar sangat tergantung pada ketersediaan dan kompetisi dengan penggunaan lain. Biomas tempurung kelapa banyak dimanfaatkan untuk kepentingan lain yaitu sumber energi, sedangkan tongkol jagung dapat dimanfaatkan untuk pakan ternak. Sumber lain yang dapat dimanfaatkan adalah sisa ranting kayu, batang ubi kayu, tandan kosong kelapa sawit, batang tanaman bakau. Pada prinsipnya, sumber bahan baku biochar adalah limbah pertanian dan sangat dihindari penggunaan bahan baku dari hasil penebangan tanaman hutan atau tanaman lainnya, namun demikian pemanfaatan limbah dari industri kayu masih sangat memungkinkan.

PRODUKSI BIOCHAR

Biochar merupakan bahan padatan kaya karbon yang terbentuk melalui proses pembakaran bahan organik atau biomasa tanpa atau dengan sedikit oksigen (*pyrolysis*) pada temperatur 250-500°C. Berbeda dengan bahan organik, biochar stabil selama ratusan hingga ribuan tahun bila dicampur ke dalam tanah dan mampu mensekuestrasi karbon dalam tanah (Lehmann 2007; Renner 2007; Fraser 2010;).

Kualitas *charcoal* atau *biochar* sangat tergantung pada sifat kimia dan fisik *biochar* yang ditentukan oleh jenis bahan baku (kayu lunak, kayu keras, sekam padi dll.) dan metode karbonisasi (tipe alat pembakaran, temperatur), dan bentuk *biochar* (padat, serbuk, karbon

aktif) (Ogawa 2006). Pembakaran dengan temperatur yang lebih tinggi akan menurunkan produksi *biochar* namun meningkatkan *fixed carbon* (Tanaka 1963), proporsi abu *biochar* berpengaruh langsung terhadap nilai pH. Kuwagaki dan Tamura (1990) menyarankan penggunaan 7 kriteria untuk menilai kualitas *biochar* yang akan digunakan untuk pembenah tanah yaitu (1) pH, (2) kandungan bahan mudah menguap (*volatile content*), (3) kadar abu, (4) kapasitas memegang air, (5) BD, (6) volume pori, dan (7) luas permukaan spesifik.

Hasil penelitian Nurida *et al.* (2009) menunjukkan bahwa produksi biochar dari 4 jenis limbah pertanian pada tiga lama pembakaran yaitu 1, 2 dan 3,5 jam menghasilkan perbedaan persentase biochar yang diproduksi, persentase abu, asap cair dan kemampuan retensi air. Alat pembakaran yang digunakan berupa kiln stainless dengan kapasitas 40 L dan suhu 250-350°C. Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa produksi biochar tertinggi dihasilkan pada pembakaran selama 3,5 jam untuk seluruh jenis limbah pertanian yaitu sekitar 22,0-48,4%.

Alat pembakaran untuk menghasilkan biochar yang umum digunakan adalah drum sederhana tanpa pengatur suhu dan dengan pengatur suhu. Produksi biochar dengan alat-alat tersebut masih memproduksi emisi CO₂, namun belum ada data yang menunjukkan besarnya emisi tersebut. Hasil penelitian Adam (2009) di India dan Afrika Selatan telah mampu menghasilkan alat pembakaran berupa retort kiln yang lebih ramah lingkungan terutama dalam produksi emisi (Eco charcoal). Faktor emisi CO₂ dari pembuatan charcoal dari Adam retort kiln adalah sebesar 641 g.kg⁻¹ jauh lebih rendah dibandingkan bila dilakukan pembakaran biasa yaitu 1.370 g.kg⁻¹ (Adam 2009).

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan bahan baku dan proses produksi biochar

Tabel 1. Estimasi jumlah biomas pertanian dan potensinya sebagai bahan baku biochar

Table 1. Estimated annual by product of agricultural biomass by product and their potential as raw materials for producing biochar

Biomass pertanian	Jumlah	Asumsi proporsi biomas yang bisa dikonversi	Potensi biomas yang dapat dikonversi menjadi biochar	Rasio biochar/ biomas	Potensi biochar	Proporsi
	t th ⁻¹	%	t th ⁻¹		t th ⁻¹	%
Sekam padi	13.612.343	50	6.806.172	0,26	1.769.605	56,48
Tempurung kelapa	539.644	50	269.822	0,25	67.456	2,15
Tempurung kelapa sawit	6.400.000	30	1.920.000	0,5	960.000	0,03
Kulit buah kakao	1.208.553	50	604.277	0,33	199.411	6,35
Tongkol jagung	3.652.372	30	1.095.712	0,13	142.443	4,54
Total	25.412.912		10.695.982		3.138.914	100,00

Sumber: Sarwani *et al.* (2013)

Tabel 2 Produksi biochar pada lama waktu pembakaran yang berbeda

Table 2. Biochar production at different burning time

Variabel	Tempurung kelapa			Kulit buah kakao			Tempurung kelapa sawit			Sekam padi		
	Lama pembakaran (jam)											
	1	2	3,5	1	2	3,5	1	2	3,5	1	2	3,5
	%											
Persentase biochar	23.3	25.0	25.3	18.7	18.0	22.0	53.5	45.6	48.4	23.3	23.3	30.4
Persentase abu	2.0	1.7	1.3	4.7	3.3	4.7	2.5	2.8	3.3	13.3	11.7	11.2
Persentase asap cair	20.0	25.0	38.3	33.3	36.7	40.0	30.0	32.0	26.7	29.2	25.0	40.0
Kemampuan retensi air	55.1	48.2	49.6	47.6	49.4	50.5	63.2	63.1	62.6	37.5	38.3	40.0

Sumber : Nurida *et al.* (2009)

Tabel 3. Karakteristik sifat fisik-kimia biochar

Table 3. Physico-chemical characteristics of biochar

Karakteristik	Sekam padi ¹	Kulit buah kakao ¹	Tempurung kelapa ²	Tempurung kelapa sawit ¹	Sampah organik kota ³	Ranting legume pohon ⁴	Cangkang kelapa sawit ⁵
pH	8,3	10,8	9,9	8,2	9,60	9,4	td
C-total (%)	30,76	33,04	80,59	49,18	31,41	18,11	25,62
N	0,05	0,83	0,34	1,61	1,67	0,58	1,32
P	0,23	0,33	0,10	0,25	0,72	0,1	0,07
K	0,06	11,25	8,4	0,04	0,93	1,11	0,08
KTK	td	Td	11,78	td	23,87	7,05	4,58
Kapasitas memegang air (%)	40,0	50,5	td	62,6	td	td	25,3
Suhu pembakaran (°C)	250-350	250-350	190-280	250-350	300-400	td	500

Sumber : ¹Nurida *et al.* (2009); ²Sukartono dan Utomo (2012); ³Widowati *et al.* (2012); ⁴Dariah *et al.* (2013); ⁵Santi dan Goenadi (2012), td= tidak ada data

(metode karbonisasi: tipe alat pembakaran dan suhu pembakaran) akan menghasilkan sifat fisik-kimia biochar yang berbeda (Brewer *et al.* 2010; Laird *et al.* 2010; Spokas *et al.* 2012; Rutherford *et al.* 2012). Temperatur selama proses produksi biochar sangat menentukan kandungan C, pH dan Kapasitas Tukar Kation (KTK) biochar yang dihasilkan (Chen *et al.* 2008; Van Zwieten *et al.* 2010). Pada Tabel 3 dapat dilihat bahwa produksi biochar dengan lama pembakaran yang berbeda yaitu masing-masing 3,5, 8 dan 10 jam, menghasilkan kualitas fisiko kimia yang berbeda (Nurida *et al.* 2009; Sukartono dan Utomo 2012; Widowati *et al.* 2012). Waktu yang dibutuhkan untuk proses pembakaran hingga terbentuk biochar tergantung pada kadar air serta bentuk dan komposisi kimia limbah pertanian yang digunakan.

PERANAN BIOCHAR DALAM REHABILITASI LAHAN TERDEGRADASI DAN PERBAIKAN KUALITAS LAHAN PERTANIAN

Aplikasi biochar sebagai pembenah tanah telah banyak diteliti, baik di Indonesia maupun di dunia internasional. Berbagai hasil penelitian telah

membuktikan bahwa biochar sangat bermanfaat bagi pertanian terutama untuk perbaikan kualitas lahan (sifat fisik, kimia dan biologi tanah). Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan biochar dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mampu memulihkan kualitas tanah yang telah terdegradasi (Atkinson *et al.* 2010; Glaser *et al.* 2002). Penambahan charcoal/biochar pada tanah-tanah pertanian berfungsi untuk: (1) meningkatkan ketersediaan hara, retensi hara, dan retensi air (Glaser *et al.* 2002), dan 2) menciptakan habitat yang baik untuk mikroorganisma simbiotik (Ogawa 1994). Selain berpengaruh positif terhadap sifat tanah, pemberian biochar juga berpengaruh terhadap peningkatan produktivitas tanaman (Backwell *et al.* 2010; Jones *et al.* 2012; Haeefe *et al.* 2011), khususnya pada tanah masam (Jeffery *et al.* 2011; Atkinson *et al.* 2010, Spokas *et al.* 2012), namun tidak berpengaruh nyata pada tanah dengan pH netral di Mid-West USA (Gaskin *et al.* 2010). Selain itu, aplikasi biochar pada lahan pertanian mengurangi laju emisi CO₂ dan N₂O (Zhu *et al.* 2014 dan Yanai *et al.* 2007), serta berkontribusi terhadap cadangan karbon (± 52,8%), artinya biochar mampu menyimpan karbon dalam waktu yang cukup lama dan dalam jumlah yang cukup besar (Ogawa *et al.* 2006).



Gambar 1. Alat pembuat biochar (*pirolisator*): *mobile* (drum) dan permanen (Foto: Nurida)

Figure 1. *Equipment for biochar production; mobile and permanent*

Perbaiki Sifat Kimia Tanah

Penambahan biochar juga dilaporkan mampu meningkatkan pH tanah dan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Peningkatan KTK tanah dengan penambahan biochar akan meminimalkan resiko pencucian kation seperti K^+ dan NH_4^+ (Yamato *et al.* 2006; Novak *et al.* 2009a). Beberapa penelitian telah menguji kemampuan biochar sekam padi, tempurung kelapa, kotoran sapi, kulit buah kakao dan jerami dalam meningkatkan pH dan KTK tanah. Pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa pemberian biochar mampu memperbaiki sifat kimia tanah diantaranya meningkatkan pH (H_2O) dan KTK tanah pada berbagai

tekstur tanah berpasir. Pada lahan kering masam, pengaruh pemberian biochar signifikan meningkatkan pH (Nurida *et al.* 2012; Nurida *et al.* 2013; Zhu *et al.* 2014) namun tidak berpengaruh nyata pada tanah non masam (Nurida *et al.* 2013). Haefele *et al.* (2011) mendapatkan hasil yang sebaliknya dimana pemberian biochar sekam padi $43 t ha^{-1}$ tidak berpengaruh pada pH dan KTK tanah. Hal tersebut disebabkan kualitas tanahnya relatif cukup baik. Hasil penelitian Sukartono dan Utomo (2012) membuktikan bahwa pemberian biochar mampu meningkatkan pH tanah dan KTK tanah pada tanah lempung berpasir di Nusa Tenggara Barat.

Hasil penelitian selama ini melaporkan bahwa peningkatan karbon tanah setelah aplikasi biochar selama satu musim tanam tidak selalu dapat dilihat. Hasil penelitian di beberapa lokasi menunjukkan bahwa kadar C-organik tanah bisa meningkat, stabil atau menurun setelah diberi biochar seperti dapat dilihat pada Tabel 5. Demikian juga dengan hara N dan P, peningkatan kedua hara tersebut juga bervariasi. Penambahan biochar sekam padi dan kulit buah kakao belum mampu meningkatkan hara N dan P pada tanah berpasir Pangandaran karena buruknya kondisi tanah awal (Nurida *et al.* 2013). Ketersediaan hara akibat pemberian *biochar* terjadi melalui tiga mekanisme yaitu (1) suplai hara langsung dari *biochar* (Mukherjee dan Zimmerman 2013), (2) kemampuan *biochar* meretensi hara, dan (3) dinamika mikroorganisme dalam tanah (Lehmann *et al.* 2003; Lehmann dan Rondon 2006). Hale *et al.* (2013) membuktikan bahwa *biochar* mampu

Tabel 4. Pengaruh pemberian biochar terhadap pH H_2O dan KTK tanah

Table 4. *Effect of biochar added on soil pH H_2O and CEC*

Perlakuan	pH H_2O	KTK cmol.kg ⁻¹	Tekstur tanah	Sumber
Tanpa biochar	4,15	4,75	Lempung liat berpasir	Nurida <i>et al.</i> (2012)
Biochar Sekam padi $7,5 t ha^{-1}$	4,22	5,91		
Tanpa biochar	6,29	13,34	Lempung berpasir	Sukartono dan Utomo (2012)
Biochar tempurung kelapa $15 t ha^{-1}$	6,49	15,04		
Biochar kotoran sapi $15 t ha^{-1}$	6,45	15,10		
Sebelum aplikasi biochar	4,10	4,98	Lempung liat berpasir	Nurida <i>et al.</i> (2013)
Biochar kulit buah kakao $5 t ha^{-1}$	4,61	3,67		
Sebelum aplikasi biochar	7,20	5,09	Berpasir	Nurida <i>et al.</i> (2013)
Biochar kulit buah kakao $5 t ha^{-1}$	8,03	5,77		
Tanpa biochar	4,60	34,30	-	Haefele <i>et al.</i> (2011)
Biochar sekam padi $43 t ha^{-1}$	4,50	34,60		
Tanpa biochar	3,81	5,0	Pasir berlempung	ZHU <i>et al.</i> (2014)
Biochar jerami $24 t ha^{-1}$	4,05	4,7		

meretensi N dan P sehingga tidak mudah hanyut terbawa air dan akan lebih tersedia bagi tanaman.

Hasil penelitian lain yang dilakukan Zhu *et al.* (2014) pada empat jenis tanah dengan tekstur yang berbeda di China memberikan bukti nyata kemampuan biochar jerami 24 t ha⁻¹ dalam meningkatkan ketersediaan P dalam tanah dan penurunan Aluminium dapat ditukar (Al_{dd}). Peningkatan P_{tersedia} berkisar antara 4,9-142,9% dan tertinggi terjadi pada Typic kanhapludox dengan proporsi pasir hanya 12,5%. Jenis tanah Oxisol dan Ultisol pada umumnya bersifat masam, disebabkan tingginya konsentrasi aluminium sehingga pertumbuhan tanaman menjadi terhambat dan mengurangi potensi produksi tanaman. Aplikasi biochar mampu menurunkan konsentrasi Al_{dd} sekitar 47,4-61,5%.

Di Indonesia jenis-jenis tanah yang dominan dijumpai pada pertanian lahan kering adalah Ultisol dan Oxisol, mencapai 41,99% dari total luas lahan kering (Hidayat dan Mulyani 2005) dengan faktor pembatas utama adalah kemasaman tanah yang berdampak terhadap tingginya konsentrasi Al_{dd} dalam tanah. Hasil penelitian Zhu *et al.* (2014) pada tanah Ultisol dan Oxisol menginformasikan bahwa kemasaman tanah dapat dikurangi dengan aplikasi biochar. Biochar bersifat basa (saat disintesis di bawah kondisi yang tepat) dan sebagian kaya akan komponen basa (Ca, Mg, dan K) dapat berkontribusi untuk netralisasi kemasaman tanah dan mengurangi kelarutan logam-logam beracun seperti aluminium dalam tanah (Gruba dan Mulder 2008). Hal ini akan menjadi sangat penting dalam konteks tanah sulfat masam dan lahan

Tabel 5. Pengaruh pemberian biochar terhadap C-organik, N-total dan P_{tersedia} di lahan kering

Table 5. Effect of biochar added on organic Carbon, total N and available P at upland

Perlakuan	C-organik%.....	N-total	P _{tersedia} ppm	Tekstur tanah	Sumber
Tanpa biochar	td	0,11	23,59		
Biochar tempurung kelapa 15 t ha ⁻¹	td	0,12	26,48	Lempung berpasir, Lombok Utara	Sukartono dan Utomo (2012)
Biochar kotoran sapi 15 t ha ⁻¹	td	0,16	26,24		
Sebelum aplikasi biochar	0,09	0,07	3,20		
Biochar kulit buah kakao 5 t ha ⁻¹	1,14	0,09	4,71	Lempung liat berpasir Lampung Timur	Nurida <i>et al.</i> (2013)
Biochar sekam padi 5 t ha ⁻¹	1,09	0,10	8,14		
Sebelum aplikasi biochar	0,72	0,06	4,00		
Biochar kulit buah kakao 5 t ha ⁻¹	0,40	0,04	3,34	Berpasir Pangandaran	Nurida <i>et al.</i> (2013)
Biochar sekam padi 5 t ha ⁻¹	0,40	0,04	3,33		
Tanpa biochar	3,96	0,28	5,20		
Biochar sekam padi 43 t ha ⁻¹	3,99	0,31	6,30	-	Haefele <i>et al.</i> (2011)

Keterangan: td=tidak ada data

Tabel 6. Perubahan kandungan P_{tersedia} dan Al_{dd} akibat pemberian biochar jerami 24 t ha⁻¹ pada berbagai jenis tanah dan tekstur di China

Table 6. Changes of available P content and Al_{exch} caused by addition of rice straw biochar 24 t ha⁻¹ at various soil type and texture in China

Jenis tanah	Pasir	Debu	Liat	P _{tersedia}			Al _{dd}		Penurunan
				Tanpa biochar	Dengan biochar	Peningkatan	Tanpa biochar	Dengan biochar	
		%	 ppm	% cmol.kg ⁻¹	%
Typic kanhapludox	12,5	44,2	43,6	1,4	3,4	142,9	4,53	2,38	47,5
Typic kanhapludult	26,7	50,7	22,6	51,8	56,2	8,5	0,19	0,10	47,4
Typic plinthudult	35,7	45,0	19,3	207,4	217,6	4,9	0,24	0,10	58,3
Typic plinthudult	25,2	38,9	35,9	12,5	16,4	31,2	3,61	2,14	40,7
Typic kanhapludult	73,7	14,1	12,2	18,1	21,1	16,6	2,63	1,07	59,3
Typic paleudult	62,6	27,8	9,6	23,2	26,8	15,3	0,52	0,20	61,5

Sumber : diolah dari Zhu *et al.* (2014)

kering masam di Indonesia. Dengan demikian, biochar dapat dijadikan sebagai bahan amelioran untuk menurunkan konsentrasi Al_{dd} pada lahan kering masam di Indonesia. Namun demikian, kemampuan biochar dalam menurunkan konsentrasi Al_{dd} tanah sangat tergantung pada jenis biochar dan dosis yang digunakan. Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa efektivitas pemberian biochar terhadap perbaikan sifat kimia tanah sangat tergantung pada jenis biochar dan dosis yang diberikan serta kualitas tanah awal.

Perbaikan Sifat Fisik Tanah

Kemampuan biochar dalam memperbaiki sifat fisik tanah belum banyak diuji, kecuali terhadap peningkatan kemampuan tanah memegang air (Sutono dan Nurida 2012; Sukartono dan Utomo 2012; Yu *et al.* 2013). Aplikasi biochar dalam meningkatkan kemampuan memegang air atau retensi air sangat berguna untuk meningkatkan ketersediaan air pada tanah bertekstur pasir dan lahan kering di wilayah iklim kering. Beberapa penelitian melaporkan bahwa kandungan air kapasitas lapang meningkat secara nyata setelah aplikasi biochar (Glaser *et al.* 2002; Chan *et al.* 2007). Efektivitas aplikasi biochar terhadap perbaikan retensi air tanah nyata terlihat bila diaplikasikan pada tanah berpasir (Atkinson *et al.* 2010; Sutono dan Nurida 2012; Suwardji *et al.* 2012).

Yu *et al.* (2013) menguji efektivitas biochar dalam meningkatkan kemampuan tanah memegang air (*water holding capacity*), dengan menggunakan berbagai proporsi biochar pada tanah bertekstur pasir

berlempung. Novak *et al.* (2009b) melaporkan bahwa terjadi peningkatan *water holding capacity* (WHC) pada tanah pasir berlempung setelah diberi biochar sebesar 2% (% berat). Pada Tabel 7 dapat dilihat bahwa semakin tinggi proporsi biochar maka kemampuan tanah memegang air semakin tinggi. Pada tanah tanpa biochar kemampuan tanah memegang air hanya sekitar 16%, dengan menambah biochar maka kemampuan tanah memegang air meningkat menjadi 47,3-1212,6%. Dengan demikian, dari Tabel 7 dapat disimpulkan bahwa setiap peningkatan 1% biochar akan meningkatkan WHC sebesar 1,775 % pada tanah pasir berlempung. Sukartono dan Utomo (2012) melaporkan adanya peningkatan kapasitas air tersedia sekitar 16% akibat penambahan biochar kotoran sapi. Sifat biochar yang kaya pori mikro akan sangat bermanfaat jika diaplikasikan pada tanah berpasir yang luas permukaan spesifik tanahnya relatif terbatas.

Penelitian untuk menguji pengaruh pemberian biochar terhadap sifat fisik tanah masih terbatas, hanya beberapa hasil penelitian yang melaporkan efektivitas biochar terhadap sifat fisik tanah. Nurida dan Rachman (2012) dan Dariah *et al.* (2013) telah menguji pengaruh biochar terhadap perbaikan sifat fisik tanah lainnya seperti *Bulk Density* (BD), porositas, dan permeabilitas; masing-masing di lahan kering masam Lampung (Ultisol) dan lahan kering iklim kering, Kupang (Alfisol). Biochar mampu menurunkan BD tanah dan meningkatkan pori drainase cepat (PDC), pori air tersedia (PAT) baik di lahan kering masam maupun lahan kering iklim kering. Respon permeabilitas terhadap pemberian biochar sulit disimpulkan karena data yang diperoleh tidak konsisten.

Tabel 7. Kemampuan tanah memegang air pada berbagai proporsi biochar untuk tanah pasir berdebu/berlempung
Table 7. *Water holding capacity at various biochar proportion for silty sand soil texture*

Proporsi Biochar	Kemampuan memegang tanah	Standar deviasi	Peningkatan
0	16,0	0,7	-
5	23,5	0,3	47,3
10	32,3	1,4	102,1
15	44,4	0,6	178,0
20	50,4	1,3	215,5
25	60,1	3,0	276,6
30	78,3	8,7	390,2
35	81,0	3,5	407,4
40	91,2	2,0	470,8
45	92,4	1,9	478,8
50	124,9	9,3	681,7
75	209,6	7,8	1212,6
100	274,1	9,5	1616,1

Sumber: Diolah dari Yu *et al.* (2013)

Tabel 8. Perbaikan sifat fisik tanah akibat aplikasi biochar

Table 8. Soil physical improvement caused by biochar application

Dosis Biochar	BD	PDC	PAT	Permeabilitas	BD	PDC	PAT	Permeabilitas
	g.cm ⁻³ % Vol.....		cm.jam ⁻¹		Peningkatan (%)*		
Biochar sekam padi, Lahan kering masam, Lampung Timur**								
0 t ha ⁻¹	1,39	11,85	6,69	4,78	-	-	-	-
2,5 t ha ⁻¹	1,32	13,40	7,46	4,62	-5,1	13,1	11,5	-3,3
5,0 t ha ⁻¹	1,33	12,75	10,01	5,41	-3,3	7,6	49,6	13,2
7,5 t ha ⁻¹	1,32	12,24	9,18	4,58	-5,0	3,3	37,2	-4,2
Biochar ranting legume, lahan kering iklim kering, Kupang***								
0 t ha ⁻¹	1,00	16,75	2,73	9,86	-	-	-	-
5,0 t ha ⁻¹	0,91	20,83	3,62	13,23	-9,0	24,4	32,6	34,2
10,0 t ha ⁻¹	0,82	28,23	4,62	8,96	-18,0	68,5	69,2	-9,1

Keterangan: BD= Bulk density; PDC= Pori drainase cepat; PAT= Pori air tersedia;

*dibandingkan kontrol (0 t ha⁻¹); **Nurida dan Rachman (2012); ***Dariah *et al.* (2013)

Perbaikan sifat fisik tanah akibat pemberian biochar sekam padi 2,5-7,5 t ha⁻¹ di lahan kering masam, yang dominan adalah peningkatan pori air tersedia, sedangkan penurunan BD dan peningkatan PDC belum signifikan hanya berkisar masing-masing 3-5% dan 3-17%. Sementara itu, hasil pengujian di lahan kering iklim kering dengan menggunakan biochar ranting legum berdampak positif terhadap pori drainase cepat dan pori air tersedia. Pada lahan kering iklim kering, perbaikan pori drainase cepat akan sangat membantu pada saat terjadi curah hujan yang tinggi dan bersifat erosif karena sebagian air akan mudah bergerak ke lapisan bawah tanah. Pada saat yang bersamaan, biochar yang ada di lapisan atas akan membantu meretensi air sehingga air lebih tersedia untuk tanaman.

Mitigasi Gas Rumah Kaca (GRK)

Fungsi lain biochar di lahan pertanian adalah mengurangi emisi gas rumah kaca seperti N₂O dan CH₄. Pari (2009) menginformasikan bahwa penambahan biochar mampu mereduksi emisi yang dikeluarkan oleh tanah seperti gas N₂O dan CH₄ melalui pengikatan gas tersebut ke dalam pori arang. Yanai *et al.* (2007) menginformasikan bahwa penurunan emisi N₂O melalui aplikasi biochar terjadi akibat menurunnya aktivitas bakteri denitrifikasi, sedangkan hasil penelitian Zwieten *et al.* (2014) menyimpulkan bahwa terjadinya perubahan kondisi tanah seperti porositas, luas permukaan tanah dan sifat redoks (oxic dan anoxic) mampu mentransfer electron ke organisme denitrifikasi. Lebih lanjut, beberapa penelitian di tanah Tenosol (Inceptisol atau Entisol) and Acrisol (Ultisol atau Oxisol) membuktikan adanya efek peningkatan pH

yang mampu menekan emisi N₂O akibat meningkatnya aktivitas enzim reductase N₂ (Zwieten *et al.* 2014).

Peningkatan Produktivitas Tanaman

Perbaikan kualitas tanah akibat penambahan biochar harus berimplikasi pada peningkatan produktivitas tanaman. Produktivitas tanaman pangan seperti padi gogo dan jagung telah terbukti meningkat setelah diberi biochar. Peningkatan produktivitas tanaman dibandingkan tanpa diberi biochar sangat bervariasi. Pada Humic Nitisol (Alfisol) yang tergolong cukup baik, peningkatan produktivitas padi gogo hanya 6,27% (Haefele *et al.* 2011), sementara hasil penelitian Asai *et al.* (2009) melaporkan terjadi peningkatan produktivitas padi gogo sebesar 14,29-32,14%. Efektivitas biochar terhadap peningkatan produktivitas jagung sangat signifikan yaitu mencapai 524,32% (Nurida *et al.* 2012), sedangkan di lahan kering iklim kering sekitar 57,55-95,20 (Dariah *et al.* 2013). Dampak pemberian biochar terhadap produktivitas tanaman sangat tergantung pada karakteristik sifat biochar, dosis yang digunakan dan kemampuannya menanggulangi kendala utama tanah dimana biochar diaplikasikan.

Efektivitas aplikasi biochar di lapangan juga sangat tergantung pada cara pemberian biochar dan jenis tanaman yang diusahakan. Pada tanaman jagung, misalnya, aplikasi biochar pada larikan atau lubang tanaman lebih efektif dibandingkan dengan cara disebar (Dariah *et al.* 2013). Takaran biochar yang akan diaplikasikan bergantung pada tingkat degradasi tanah dan karakteristiknya seperti pH, kapasitas tukar kation (KTK), tekstur dan kadar C-organik tanah. Hasil penelitian Balai Penelitian Tanah (2009) pada lahan kering masam di Lampung menunjukkan aplikasi

Tabel 9. Peningkatan produktivitas tanaman pangan setelah diberi biochar

Table 9. Increasing of crop productivity after biochar application

Perlakuan	Padi gogo (GKP) t ha ⁻¹	Jagung (pipilan kering) t ha ⁻¹	Peningkatan %	Keterangan
Tanpa biochar	3,03		-	Humic Nitisol.
Biochar sekam padi 41 t ha ⁻¹	3,22		6,27	Haefele <i>et al.</i> (2010)
Tanpa biochar		0,37	-	Typic Kanhapludult.
Biochar sekam padi 7.5 t ha ⁻¹		2,31	524,32	Nurida <i>et al.</i> (2012)
Tanpa biochar		4,5	-	Lempung berpasir.
Biochar tempurung kelapa 15 t ha ⁻¹		5,2	15,56	Sukartono dan Utomo (2012)
Biochar kotoran sapi 15 t ha ⁻¹		5,0	11,11	
Tanpa biochar		4,17	-	Alfisol.
Biochar legum 5 t ha ⁻¹		6,57	57,55	Dariah <i>et al.</i> (2013)
Biochar legum 10 t ha ⁻¹		8,14	95,20	
Tanpa biochar	2,8		-	
Biochar residu kayu 4 t ha ⁻¹	3,2		14,29	
Biochar residu kayu 8 t ha ⁻¹	3,3		17,86	Asai <i>et al.</i> (2009)
Biochar residu kayu 16 t ha ⁻¹	3,7		32,14	

biochar dengan takaran 5-10 t ha⁻¹ memberikan hasil dengan stabil hingga tiga musim tanam berturut-turut tanpa penambahan biochar pada musim tanam kedua dan ketiga. Pada lahan kering beriklim kering di Kupang NTT, pemberian 5-10 t ha⁻¹ biochar meningkatkan ketersediaan air di tanah sehingga intensitas tanam jagung meningkat dari satu kali menjadi dua kali per tahun (Balai Penelitian Tanah, 2012). Namun, aplikasi biochar secara bertahap setiap musim, sesuai dengan ketersediaan bahan baku di lapangan, akan lebih baik meningkatkan kualitas lahan karena biochar dapat bertahan lama dalam tanah. Akumulasi biochar dalam jangka waktu tertentu di tanah dapat memperbaiki lahan yang sudah terdegradasi.

KESIMPULAN

Dengan semakin tingginya laju konversi lahan sawah irigasi untuk keperluan non pertanian, lahan kering menjadi tumpuan penyediaan pangan ke depan. Namun di beberapa daerah, sebagian besar lahan kering sudah terdegradasi akibat tidak cermatnya pengelolaan. Oleh karena itu, optimalisasi pemanfaatan lahan kering untuk budi daya tanaman pangan perlu diawali dengan upaya rehabilitasi lahan agar tanaman dapat berproduksi optimal.

Teknologi rehabilitasi lahan kering yang berdasarkan atas sumberdaya lokal, sangat diperlukan agar lahan mampu berproduksi tinggi tanpa mengganggu kelestarian lingkungan. Penggunaan

pembenah tanah yang murah, mudah tersedia dan mampu bertahan lama dalam tanah diharapkan akan mampu memicu laju peningkatan produktivitas lahan kering. Potensi limbah pertanian untuk dikonversi menjadi pembenah tanah (*biochar*) di Indonesia cukup besar.

Pemanfaatan biochar merupakan salah satu bagian utama dari pengelolaan limbah pertanian. Upaya pengelolaan limbah, produksi bioenergi, dan pengelolaan tanah yang berkelanjutan diharapkan dapat berhasil dengan memanfaatkan biochar. Bahan yang dianjurkan untuk dikonversi menjadi biochar adalah limbah organik (limbah pertanian) bukan produk pangan sehingga tidak akan terjadi kompetisi penggunaan lahan antara limbah produksi (untuk biochar) dengan produk pangan. Peluang pemanfaatan biochar di lahan pertanian sangat besar, baik ditinjau dari ketersediaan bahan baku maupun fungsinya. Aplikasi biochar terbukti mampu meningkatkan kualitas sifat fisik dan kimia tanah, serta meningkatkan ketersediaan air. Produktivitas tanaman juga meningkat sejalan dengan terjadinya pemulihan kualitas lahan. Peningkatan kualitas tanah berpotensi untuk mengurangi kebutuhan lahan untuk deforestasi karena pemanfaatan tanah suboptimal yang terdegradasi dapat ditingkatkan melalui penggunaan biochar. Aplikasi biochar pada lahan pertanian bukanlah praktek baru, namun disadari bukan hal yang mudah untuk meyakinkan para pihak khususnya petani untuk mengaplikasikan biochar secara rutin di lahan pertanian mereka.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, J.C. 2009. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). *Renewable Energy* 34:1923-1925
- Agus, F., dan Irawan. 2006. Agricultural land conversion as a threat to food security and environmental quality. Prosiding seminar Multifungsi dan Revitalisasi Pertanian. Kerjasama Badan Ltbang Pertanian, MAFF, dan ASEAN Sekretariat. Hal 101-121.
- Asai H., B. K. Samson, H.M. Stephan, K. Songyikhangsuthor, K. Homma, Y. Kiyono, Y. Inoue, T. Shiraiwa, T. Horie. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111: 81-84.
- Atkinson ,C. J., J.D. Fitzgerald, N.A. Higgs. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337:1-18.
- Backwell, P., E. Krull, G. Butter, A. Herbert, and Z. Solaiman. 2010. Effect os banded biochar on dryland wheat production and fertilizer use in South-western Australia: an agronomic and economic perspective. *Australian Journal of Soil Research* 48:531-545
- Badan Pusat Statistik. 2013. Statistik Indonesia
- Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya lahan. 2012. Lahan sub optimal: potensi, peluang dan permasalahan pemanfaatannya untuk mendukung program ketahanan pangan. Disampaikan dalam Seminar Lahan Suboptimal, Palembang, Maret 2012. Kementerian Ristek dan Teknologi.
- Balai Penelitian Tanah. 2009. Laporan akhir penelitian penelitian formulasi pembenah tanah berbahan baku biochar untuk meningkatkan kualitas tanah, retensi air dan produktivitas tanaman > 25% pada lahan kering terdegradasi. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
- Brewer, C.E., R. Unger, K. Schmidt-Rohr, and R.C. Brown. 2011. Criteria to Select *Biochars* for Field Study based on *Biochar* Chemical Properties. *Bioenergy Research*, 4(4):312-323
- Chan, K.Y., L. van Zwietter, I. Meszaros, A. Downie, and S. Joseph. 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Australian Journal of Soil Research* 45:629-634.
- Chen, B., D. Zhou, and L. Zhu. 2008. Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by *Biochars* of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures. *Environmental Science & Technology*, 42, 5137-5143.
- Dariah, A., N.L. Nurida and Sutono. 2013. The effect of biochar on soil quality and maize production in upland in dry climate region. In Proceeding 11th international Conference the East and Southeast Asia federation of Soil Science Societies. Bogor, Indonesia
- Direktorat Jenderal Bina Produksi. 2007. Statistik Perkebunan Indonesia.
- Fraser, B. 2010. High-tech Charcoal Fights Climate Change. *Environ. Sci. Technol.* 2010, 548.
- Gaskin, J.W., R.A Speir, K. Harris, K.C. Das, R.D. Lee., L.A. Morris, and D.S. Fisher. 2010. Effect of Peanut Hull and Pine Chip *Biochar* on Soil Nutrients, Corn Nutrient Status, and Yield. *Agronomy Journal*, 102, 623-633.
- Glaser, B., J. Lehmann, and W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biol. Fertil. Soils* 35:219-230.
- Gruba, P., J. Mulder. 2008. Relationship between Aluminum in Soils and Soil Water in Mineral Horizons of a Range of Acid Forest Soils. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72: 1150-1157
- Haefele, S.M., Y. Konboon, W. Wongboon, S. Amarante, A.A. Maarifat, E.M. Pfeiffer, and C. Knoblauch. 2011. Effects and fate of biochar from rice residues in ricebased systems. *Field Crop. Res.* 123 (3): 430-440.
- Hale S. E., V. Alling, V. Martinsen, J. Mulder, G.D. Breedveld , and G. Cornelissen. 2013. The sorption and desorption of phosphate-P, ammonium-N and nitrate-N in cacao shell and corn cob *biochars*. *Chemosphere* 91 (2013) 1612-1619
- Hidayat, A. dan A. Mulyani. 2005. Lahan kering untuk pertanian. *Teknologi Pengelolaan Lahan Kering: Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor. Hal 7-37.
- Jeffery, S., F.G.A Verheijen, M. van der Velde, and A.C. Bastos. 2011. A quantitative review of the effects of *biochar* application to soil on crop productivity using meta-analysis, *Agriculture Ecosystems&Environment*, 144(1):175-187
- Jones, D. L., J. Rousk, G. Eswards-Jones, T.H. Deluca, D.V. Murphy. 2012. Biochar-mediated change in soil quality and plant growth in a year field trial. *Soil Biology and Biochemistry*. 45, 113-124.
- Kurnia, U. 1996. Kajian metode rehabilitasi lahan untuk meningkatkan dan melestarikan produktivitas tanah. Disertasi Fakultas Pasca Sarjana, IPB. Bogor.
- Kurnia, U., Sudirman, H. Kusnadi. 2005. Rehabilitasi dan reklamasi lahan terdegradasi dalam Teknologi Pengelolaan Lahan kering. Editor Adimihardja dan Mappaona. Hal 141-168. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Kuwagaki, H. and K. Tamura. 1990. Aptitude of wood charcoal to a soil improvement and other non fuel use. In Technical report on the research development of the new uses of charcoal and pyroligneous acid, technical research association for multiuse of carbonized material, p. 27-44.
- Laird, D.A., P. Fleming, D.D. Davis, R. Horton, B.Q. Wang, B.Q. and D.L. Karlen. 2010. Impact of *biochar* amandement on quality of typical Midwestern Agricultural Soil. *Geoderma* 158 (3-4) 443-449

- Lehmann, J., J.P. da Silva Jr., C. Steiner, T. Nehls, W. Zech and B. Glaser. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of the Central Amazon Basin: fertilizer, manure and charcoal amend. *Plant and Soil* 249: 342-357.
- Lehmann, J. and M. Rondon. 2006. Bio-char soil management on highly weathered soils in humid tropic In N. Uphoff (Eds.). *Biological Approaches to Sustainable Soil System*. P 517-530. CRP Press. USA.
- Lehmann, J. 2007. A Handful of Carbon. *Nature*. Vol.447 (7141), pp143-144.
- Lehmann, J., Matthias, C.R., T. Janice, A.M. Caroline, C.H. William, and C. David. 2011. Biochar effects on biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*. 43:1812-1836
- Mukherjee, A., A.R. Zimmerman. 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars. *Geoderma* 163, 247-255.
- Mulyani, A. dan M. Sarwani. 2013. Karakteristik dan potensi lahan suboptimal untuk pengembangan pertanian di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 7(1):47-58.
- Novak, J.M., W.J. Busscher, D.L. Laird, M. Ahmedna, D.W. Watts, and M.A.S. Niandou. 2009a. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain. *Soil Science* 174:105-111.
- Novak, J.M, I. Lima, B. Xing, J.W. Gaskin, C. Steiner, K. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D.W. Watts, W.J. Busscher. 2009b. Characterization of designer biochar produced at different temperature and their effect on a loamy sand. *Annals of Environmental Science* 3 (1);195-206
- Nurida, N.L. 2006. Peningkatan Kualitas Ultisol Jasinga Terdegradasi dengan pengolahan Tanah dan Pemberian bahan Organik. Disertasi Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Nurida, N.L., A. Dariah dan A. Rachman. 2009. Kualitas limbah pertanian sebagai bahan baku pembenah berupa biochar untuk rehabilitasi lahan. *Prosiding Seminar Nasional dan dialog Sumberdaya Lahan Pertanian*. Tahun 2008. Hal 209-215.
- Nurida, N.L., dan A. Rachman. 2012. Alternatif Pemulihan Lahan Kering Masam terdegradasi dengan Formula Pembenah Tanah Biochar di Typic Kanhapludults Lampung. *Prosiding Teknologi Pemupukan dan Pemulihan Lahan terdegradasi*. 2012. Hal 639-648
- Nurida., N.L., A. Rachman dan Sutono. 2012. Potensi pembenah tanah biochar dalam pemulihan sifat tanah terdegradasi dan peningkatan hasil jagung pada Typic Kanhapludults Lampung. *Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains*. Trihuana Press. Vol 12:No. 1. Hal: 69-74
- Nurida, N.L., A. Dariah dan A. Rachman. 2013. Peningkatan kualitas tanah dengan pembenah tanah biochar limbah pertanian. *Jurnal tanah dan Iklim* 37(2); 69-78.
- Nursyamsi D., O. Sopandi, D. Erfandi, Sholeh dan I P.G. Widjaja-Adhi. 1995. Penggunaan bahan organik, Pupuk P dan K untuk meningkatkan Produktivitas tanah Podsolik (Typic Kandiodults). *Risalah Seminar Hasil Penelitian tanah dan Agroklimat*. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor
- Ogawa, M. 1994. Symbiosis of people and nature in tropics. *Farming Japan* 28(5):10-34.
- Ogawa, M. 2006. Carbon sequestration by carbonization of biomass and forestation: three case studies. p 133-146.
- Okimori, Y., M. Ogawa, and F. Takahashi. 2003. Potential of CO₂ reduction by carbonizing biomass waste from industrial tree plantation in South Sumatra, Indonesia. *Mitigation and Adaption Strategies for Global Change* 8. p 261-280.
- Pari, G. 2009. Laporan mengikuti 1st Asia Pasific Biochar Conference Gold Coast. Australia. 17-20 Mei 2009. Tidak diterbitkan.
- Renner, R. 2007. Rethinking Biochar. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 5932-5933.
- Rochayati S. dan A. Dariah. 2012. Perkembangan Lahan Kering masam: Peluang, Tantangan dan Strategi serta Teknologi Pengelolaan dalam Prospek Pertanian Lahan Kering dalam mendukung Ketahanan Pangan. Editor Dariah *et al.* hal 187-206. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
- Rutherford, D.W., R.L. Wershaw, C.E. Rostad, and C.N. Kelly. 2012. Effect of formation conditions on biochar: compositional and structural properties of cellulose, lignin and pine biochars. *Biomass and Bioenergy*. 46:693-701.
- Santi, L.P. dan D.H. Goenadi. 2012. Pemanfaatan biochar cangkang sawit sebagai pembawa mikroba pemantap agregat. *Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains*. Trihuana Press. Vol 12:No. 1. Hal: 7-14
- Santoso D., J. Purnomo, I G.P. Wigena dan E. Tuherkih. 2004. Teknologi konservasi tanah vegetative dalam Teknologi Konservasi Tanah pada Lahan Kering Berlereng. Editor Kurnia *et al.* Hal 77-108. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.
- Sarwani, M., N.L. Nurida, and F. Agus. 2013. Greenhouse emissions and land use issues related to the use of bioenergy in Indonesia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian* 32(2):56-66
- Spokas, K.A., K.B. Cantell, J.M. Novak, D.W. Archer, Ippolito, J.A., Collin, H.P., Boateng, A.A., Lima, I.M., Lamb, M.C., A.J. Mc Aloon, R.D. Lentz, and K.A. Nichols. 2012. *Biochar: A synthesis of Its Agronomic Impact beyond Carbon Sequestration*. *J. Environ Qual* 41 (4):973-989.
- Steiner, C., W.G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J.L.V. de Macêdo, W.E.H. Blum, W. Zech. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant soil* 291: 275-290
- Strubel, J.D., H.P. Collins, M. Garcia-Peiz, J. Tarara, D. Granatstein, and C.E. Kruger. 2011. In fluence of contrasting biochar types on five soils at increasing

- rate of application . Soil Sci.Soc. Am. J. 75(4):1402-1413.
- Sudirman dan T. Vadari. 2000. Pengaruh kekritisan lahan terhadap produksi padi dan kacang tanah di Garut Selatan. Prodising Kongres Nasional Himpunan Ilmu Tanah Indonesia ke VII Hal. 411-418. Bandung, 2-4 Nopember 1999.
- Sukartono dan W.H. Utomo. 2012. Peranan biochar sebagai pembenah tanah pada pertanaman jagung di tanah lempung berpasir (sandy loam) semiarid tropis Lombok Utara. Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains. Tribhuana Press. Vol 12:No. 1. Hal: 91-98
- Sutono dan N.L. Nurida. 2012. Kemampuan biochar memegang air pada tanah bertekstur pasir. Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains. Tribhuana Press.Vol 12:No. 1. Hal: 45-52
- Suwardji, Sukartono dan W.H. Utomo. 2012. Kemantapan agregat setelah aplikasi biochar di tanah lempung berpasir pada pertanaman jagung di lahan kering Kabupaten Lombok Utara. Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains. Tribhuana Press. Vol 12:No. 1. Hal: 61-68
- Suwardjo H., and N.L. Nurida. 1993 Land degradation in Indonesia: Data Collection and Analysis. p 121-135. In. Report of the Experts Consultation of the Asian Network on Problem Soils. Bangkok, 25 – 29 Oct 1993.
- Tanaka, S. 1963. Fundamental study on wood carbonization. Bull. Exp. Forest of Hokkaido University.
- Tang, J., W. Zhu, R. Kookana, A. Katayama. 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. Journal of Bioscience and Bioengineering. 116(6), 653-659.
- Thahir, R., R. Rachmat dan Suismono. 2008. Pengembangan Agroindustri Padi. Dalam Suyamto dkk. (Ed). Padi: Inovasi Teknologi dan Ketahanan Pangan. Balai Besar Penelitian Padi, Subang. Hal 34-76.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie. 2010. Effect of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. Plant and Soil 327:235-246
- Van Zwieten, L., B.P. Singh, S.W.L. Kimber, D.V. Murphy, L.M MacDonald, J. Rust, S. Moris. 2014. An incubation study investigating the mechanisms that impact N₂O flux soil following biochar application. Agriculture, Ecosystems & Environment 191:53-63.
- Widowati, Asnah dan Sutoyo. 2012. Pengaruh penggunaan biochar dan pupuk kalium terhadap pencucian dan serapan kalium pada tanaman jagung. Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Kelaman: Buana Sains. Tribhuana Press. Vol 12:No. 1. Hal: 83-90
- Yanai, Y., K. Toyota, M. Okazaki. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. Soil Science and Plant Nutrition 53:181-188
- Yu Ok-You. R. Brian and S. Sam. 2013. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. 4:44. <http://www.journal.ijeee.com/content/4/1/44> (downloaded 24 Mei 2014)
- Yuan, J.H., W.R.K. Quan, and R.H. Wang. 2011. Comparison of ameliorating effect on an acidic ultisol between four crop straw and their biochars. Journal of soil and Sediment 11(5);741-750
- Zhu, Q., X. Peng, T. Huang., Z. Xie and N.M Holden. 2014. Effect of biochar addition on maize growth and nitrogen use efficiency in Acid Red Soil. Pedosphere 24 (6): 699-708.