

PRODUKSI DAN APLIKASI ARANG KOMPOS BIOAKTIF DI LAHAN PERTANIAN SEBAGAI MODEL PEMBERDAYAAN MASYARAKAT

(Production and Application of Bioactive Compost Charcoal as A Model of Community Empowerment Mechanism)

Nur Adi Sapura*, Gusmailina, Sri Komarayati, & Gustan Pari

Pusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Km 36 Cibinong 16911, Telp.: (0251) 8633378

E-mail: nadisaputra@gmail.com

Diterima 8 Februari 2022, direvisi 11 Maret 2022, disetujui 31 Mei 2022

ABSTRACT

Community empowerment has been carried out at the Kumala Lestari Islamic boarding school, located in Sukaresmi Village, Cianjur Regency, Indonesia. The community was involved in the manufacture of bioactive compostable charcoal (ARKOBA) and its application in agricultural areas. The study was conducted through comparison of rice planting using chemical fertilizers-pesticides and those with ARKOBA-liquid smoke. The yield amount was measured by paddy crop productivity per hectare after 4 month period. The study was conducted by production of biochar from sawmill waste using a modified drum reactor. The reactor temperature was set into 400–450°C, while the retention time was set into 6 hours. The process produces charcoal and liquid smoke. ARKOBA production was carried out by mixing compost: charcoal: activator, with a composition of 85%: 10%: 5%. Meanwhile, the ARKOBA dose was set to 400 kg/1000m². The result shows that the productivity of rice threated was higher than those of chemical fertilizers. Rice productivity was recorded at 3.2 tons/ha against 2.98 tons/ha in the Ciranjang and 4 tons/ha compared to 3.1 tons/ha in the Sukaresmi demonstration plot. Mixing ARKOBA and liquid smoke threatment provides a surplus of around 7.4–29% than chemical applications and becomes recommended technology for increasing rice productivity.

Keywords: ARKOBA, pesticide, fertilizer, rice field, productivity

ABSTRAK

Pemberdayaan masyarakat telah dilakukan di sekitar pesantren Kumala Lestari, Desa Sukaresmi Kabupaten Cianjur, Indonesia. Masyarakat dilibatkan dalam pembuatan arang kompos bioaktif (ARKOBA) dan aplikasinya di lahan pertanian. Studi dilakukan dengan membandingkan hasil padi yang menggunakan pupuk–pestisida kimia dan aplikasi ARKOBA–asap cair. Efektivitas hasil diukur dengan produktivitas tanaman padi per hektar setelah 4 bulan. Studi dilakukan dengan produksi biochar dari limbah kayu industri penggergajian menggunakan reaktor drum-modifikasi. Temperatur reaktor adalah 400–450°C, dengan retensi 6–8 jam. Proses produksi menghasilkan arang dan asap cair. Produksi ARKOBA dilakukan melalui pencampuran kompos: arang: aktivator, dengan komposisi 85%: 10%: 5%. Dosis ARKOBA yang diberikan adalah 400 kg/1000 m². Hasil pengamatan menunjukkan bahwa produktivitas padi menggunakan ARKOBA–asap cair lebih tinggi dari produktivitas padi pupuk–pestisida kimia. Produktivitas padi sebanyak tercatat 3,2 ton/ha dibandingkan 2,98 ton/ha di demplot Ciranjang dan 4 ton/ha berbanding 3,1 ton/ha di demplot Sukaresmi. Aplikasi ARKOBA mampu memberikan surplus sekitar 7,4–29% daripada aplikasi pupuk kimia dan menjadi teknologi yang direkomendasikan untuk peningkatan produktivitas padi.

Kata kunci: ARKOBA, pestisida, pupuk, padi, produktivitas

I. PENDAHULUAN

Tanah berfungsi sebagai situs penting untuk pertumbuhan tanaman dan memiliki karakteristik unik berdasarkan lokasi dan asal pembentuknya. Unsur hara mempengaruhi tingkat kesuburan tanah, berhubungan linear dengan produktivitas tanaman. Praktiknya, petani memiliki alternatif dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui skema pupuk kimia atau organik. Kedua mekanisme

memiliki keunggulan masing–masing, juga memiliki sifat yang bertentangan (Selvakumar, Yi, Lee, Han, & Chung, 2018). Pemberian pupuk kimia akan meningkatkan produktivitas namun meninggalkan residu yang berpengaruh buruk terhadap mikroorganisme tanah. Penggunaan pupuk organik dipandang strategis dalam meningkatkan produktivitas tanaman tanpa efek buruk terhadap mikroorganisme tanah. Hal serupa terjadi pada kasus

pestisida pembasmi hama-penyakit, kimia dan organik (Anawar, Strezov, Akter, & Kader, 2017).

Penggunaan arang hidro (Basso & Pavanetto, 2017), arang (Anawar et al., 2017; Bayabil, Stoof, Lehmann, Yitaferu, & Steenhuis, 2015; Gale, Halim, Horsburgh, & Thomas, 2017; Igalavithana et al., 2017; Kerré, Bravo, Leifeld, Cornelissen, & Smolders, 2016; Bart Kerré, Willaert, Cornelis, & Smolders, 2017; Koyama, Katagiri, Minamikawa, Kato, & Hayashi, 2016; Leal et al., 2015), kompos hijau (Primandari, Islam, Yaakob, & Chakrabarty, 2018; Selvakumar et al., 2018; Weijia, Yaning, Junyu, & Xiangfei, 2017) atau penambahan arang kompos (Agegnehu, Bird, Nelson, & Bass, 2015; Anawar et al., 2017; Sigmund, Poyntner, Piñar, Kah, & Hofmann, 2018) bertujuan untuk memperbaiki profil tanah. Bahkan, studi amandemen arang dipelajari secara khusus (Bonanomi, Ippolito, & Scala, 2015). Dinamika jangka pendek berupa perubahan karbon-nitrogen (C/N) dari efek pemberian kompos, arang kompos dan campuran lainnya telah diobservasi sebelumnya (Agegnehu, Bass, Nelson, & Bird, 2016; Bass, Bird, Kay, & Muirhead, 2016; Coban, Miltner, Centler, & Kästner, 2016; Darby et al., 2016; Zainul, Koyro, Huchzermeyer, Gul, & Khan, 2017). Sebuah perbaikan tanah dalam hal sifat fisik, kimia dan biologi yang akan meningkatkan produksi lahan secara berkesinambungan. Studi berbeda memperlihatkan ada sinergitas antara arang dan kompos, namun tidak dapat mendukung performa tanaman (Seehausen et al., 2017).

Serangkaian penelitian panjang telah dilakukan dalam mempelajari arang dan arang kompos menggunakan bahan baku limbah kehutanan (Gusmailina, 2009, 2010b; Gusmailiana & Pari, 2002; Junaedi, Rojedin, & Sutrisno, 2009; Sri Komarayati, 1996, 2004; Komarayati, Gusmailina, & Pari, 2002, 2003; Komarayati & Indrawati, 2003; Komarayati & Pari, 2014; Komarayati & Santoso, 2011; Pasaribu, 1987; Sudrajat, 1992; Winarni & Waluyo, 2010). Perubahan sifat tanah dan produktivitas tanaman, baik kehutanan maupun pertanian, menjadi parameter utama yang dinyatakan secara jelas dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Upaya ini kemudian disempurnakan dengan pengayaan mikroorganisme untuk mempercepat degradasi biomassa. Keberadaan kelompok bakteri (*Cytophaga* sp., *Bacillus* sp.), kompos (*Bacillus* sp.), fungi kompos (*Penicillium* sp., *Aspergillus* sp.) dan fungi (*Penicillium* sp., *Fusarium* sp.) (Komarayati & Indrawati, 2003) termasuk ke dalam kelompok pengurai selulosa,

menyediakan nutrisi tambahan bagi tanaman. Karakteristik pori arang diduga menjadi habitat mikroorganisme tanah, ditandai pertambahan koloni dibanding tanah kontrol. Penambahan mikroba bertanggung jawab terhadap penyediaan nutrisi pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Produktivitas lahan pertanian memiliki ikatan erat dengan ketahanan pangan, menyediakan bahan pokok sebagai sumber makanan di Indonesia. Salah satu sentra penyedia beras adalah Kabupaten Cianjur, memiliki sekitar 66 ribu hektar lahan produktif pada tahun 2018 (Badan Pusat Statistik, 2018). Produktivitas lahan pertanian intensif-irigasi berada pada kisaran 6–7 ton/ha, sementara lahan pertanian intensif-non irigasi sekitar 5–6 ton/ha. Kondisi kontradiksi terdapat di lahan pertanian masyarakat, dimana pertanian intensif sulit dilakukan karena keterbatasan biaya. Petani memberlakukan aplikasi pupuk organik berbahan jerami atau pupuk kandang-kombinasi arang jerami secara tradisional. Pemerintah Daerah Kabupaten Cianjur mencatat produktivitas lahan masyarakat masih di bawah 3 ton/hektar. Sebuah kondisi yang mengganggu program ketahanan pangan di level nasional. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan ARKOBAsap cair terhadap produktivitas padi di lahan pertanian konvensional yang tergenang. Petani dan pengelola pesantren Kumalasari dilibatkan secara aktif melalui mekanisme pemberdayaan masyarakat.

II. BAHAN DAN METODE

A. Produksi Arang

Reaktor drum modifikasi digunakan untuk memproduksi biochar (Pari, Roliadi, & Komarayati, 2013). Reaktor terdiri dari 2 drum (1 drum karbonisasi, 1 drum pendingin), cerobong pada tutup drum, kondensor dan lubang di bagian ruang pembakaran untuk pembakaran awal. Pipa kondensor menggunakan bahan *stainless steel*, terdiri dari 2 jalur: asap dan air pendingin. Proses kondensasi akan mengubah asap menjadi fase cair, kondensat cair, sebuah produk sampingan dari proses karbonisasi. Sebuah upaya ramah lingkungan untuk mereduksi gas CO dan CO₂ ke atmosfer. Gas H₂ dan uap air H₂O termasuk fase lainnya yang terlibat dalam pembentukan kondensat. Proses karbonisasi sendiri berjalan sekitar 6–8 jam dengan interval suhu fluktuatif antara 400–500°C. Material karbonisasi adalah limbah penggergajian kayu yang terdapat di sekitar lokasi studi. Profil produk arang dan asap cair



Gambar 1. Reaktor drum modifikasi
Figure 1. Modified drum reactor

studi yaitu: rendemen 24%, kadar air 5,5%, kadar abu 2,4%, zat terbang 11,6%, dan karbon tetap 85,9%; sementara rendemen asap cair adalah 30%.

B. Produksi ARKOB

Limbah kulit kayu dari industri penggergajian ditetapkan sebagai material pembuatan ARKOB (Gusmailina & Komarayati, 2011). Material dicacah secara manual dan dimasukkan ke dalam *pile-composting* dengan menambahkan 10% arang dan 5% aktivator (*w/w*). Aktivator kompos mengandung mikroorganisme termofilik *Trichoderma* sp. dan *Cytophaga* sp., agen bioaktif, yang tumbuh baik pada suhu 30–90°C. *Cytophaga* sp. berperan baik dalam degradasi selulosa untuk akselerasi pengomposan. Kontrol homogenitas antara aktivator dan material dilakukan setiap minggu, sementara pengukuran suhu dan penyusutan *pile-composting* pada waktu yang sama. Parameter pengomposan ditandai dengan stabilitas suhu mencapai 34°C dan penyusutan *pile-composting* mencapai 20%. Periode akhir pengomposan ditandai dengan suhu *pile-composting* setara dengan lingkungan. Analisis nutrisi ARKOB dilakukan di Balai Penelitian Tanah, Kementerian Pertanian.

C. Desain Penelitian

Masyarakat dilibatkan dalam produksi arang dan ARKOB untuk memberikan pengetahuan teknologi pertanian ramah lingkungan. Total 3000 m² demplot padi dipilih di Desa Ciranjang dan Desa Sukaresmi 2000 m² demplot aplikasi ARKOB–asap cair dan 1000 m² sebagai demplot kimia. Studi dilakukan pada musim tanam pertama, yaitu di bulan Juni. Varietas padi Ciherang dipilih pada tahun 2017, sementara varietas Pak Tiwi dipilih pada tahun 2018, sesuai arahan penyuluh setempat. Teknik penanaman padi di

Ciranjang menggunakan tanam bibit (2–5 batang), sementara teknik Tanam Benih Langsung (TABELA) diberlakukan di Sukaresmi. Sistem irigasi tergenang diterapkan di Ciranjang, sementara Sukaresmi menggunakan sistem irigasi berselang (*intermittent*). Penambahan ARKOB ke dalam tanah dilakukan selama 1 minggu sebelum musim tanam, dosis yang ditetapkan adalah 400kg/1000 m² di semua lokasi penelitian. Perlakuan pupuk kimia yang biasa dilakukan petani adalah: N=14, 5kg/1000 m², urea 32,5kg/1000 m², dan SP36 7,5 kg/1000 m². Insektisida yang mengandung bahan aktif imidacloprid diterapkan petani untuk mengatasi hama wereng coklat dengan dosis 0,05kg/1000 m². Aplikasi asap cair studi ini menggunakan dosis 3% yang disemprotkan per 10 hari sampai periode panen. Volume asap cair yang digunakan per 1000 m² adalah 0,8 liter, sehingga total volume sampai masa panen adalah sekitar 9,6 liter. Produktivitas dan kualitas padi yang dihasilkan kemudian dibandingkan antara perlakuan organik dan non organik.

D. Simulasi Finansial

Simulasi kelayakan investasi dilakukan melalui analisis NPV, IRR, BCR, BEP, dan simulasi arus kas berdasarkan parameter-parameter yang telah ditetapkan. Beberapa asumsi diterapkan sebagai pembatas studi dan pendekatan pasar yang lebih rasional. Jumlah unit reaktor pirolisis kubah adalah 10-unit dengan kapasitas masing-masing adalah 2 m³. Kapasitas produksi mencapai 60% kapasitas terpasang dengan rendemen arang sekitar 14%. Produksi arang dilakukan selama 2 kali dalam 1 bulan. Sementara diskonto faktor sebesar 14% untuk 3 tahun investasi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Manfaat Arang sebagai Tambahan Kompos

Sifat arang studi ini ditampilkan pada Tabel 1. Kelembapan diartikan kandungan air yang tidak hilang pada kondisi suhu ambien atau suhu spesifik di bawah 100°C. Bahkan kandungan air-kelembapan tidak akan berkurang pada kondisi penggilingan, tanpa intervensi lingkungan. Sifat kelembapan hampir terikat kepada struktur molekul material, sehingga berhubungan dengan adsorpsi secara signifikan. Berbeda dengan kelembapan yang dapat berinteraksi dengan lingkungan, kadar abu bersifat mandiri. Kadar abu mencerminkan mineral pembentuk bahan baku, sehingga akan sangat bervariasi. Mineral dideskripsikan sebagai unsur yang menempel di rantai karbon, sebagai substitusi hidrogen (kation) dan akan menjadi sisa pembakaran. Zat terbang berasal dari pemecahan struktur molekul di rantai alifatik, didominasi oleh gas hidrokarbon. Zat terbang menjadi parameter awal dari nilai efektivitas energi, bahkan menunjukkan level aglomerasi. Demikian pada tahap awal studi, konten zat terbang sering dipakai dalam penilaian bahan baku. Perhitungan karbon tetap bersifat relatif terhadap zat terbang dan tidak sama dengan karbon total. Karbon tetap adalah karbon yang tidak terdekomposisi, sehingga dapat dijadikan sebuah rasio untuk tujuan tertentu

Arang, secara terpisah, merupakan komponen penting dalam produksi ARKOB. Sifat permukaan pori yang lebih luas meningkatkan resistensi tanah terhadap perubahan drastis lingkungan sekitarnya. Amandemen arang ke dalam tanah telah dibuktikan dapat meningkatkan produktivitas tanaman melalui perbaikan karakteristik tanah (Anawar et al., 2017), sifat konduktivitas hidrolik (Bayabil et al., 2015; Igalavithana et al., 2017), restorasi tanah (Gale et al., 2017), meningkatkan stok karbon tanah (B. Kerré et al., 2016; Koyama et al., 2016), sifat fisik (Bart Kerré et al., 2017), sifat kimia (Leal et al., 2015), biologi

tanah (Sun, Lan, Xu, Meng, & Chen, 2016) dan resiko mineral logam (Rehman et al., 2017). Bahkan dampak nyata terhadap pertumbuhan tanaman telah dipelajari secara khusus, seperti 13 jenis tanaman pionir (Gale et al., 2017), jagung (Bart Kerré et al., 2017), *Eusideroxylon zwageri* dan *Aquilaria malaccensis* (Gusmailina, 2010a), anakan *Gyneros* sp. (Gusmailina, Komarayati, & Wibisono, 2018), anakan *Neolamarckia cadamba* dan *Albizia chinensis* (Komarayati & Pari, 2012), *Capsicum annuum* sp. (Gusmailiana & Pari, 2002) dan *Morinda citrifolia* (Komarayati & Santoso, 2011) yang menjadi bukti kuat terhadap kemampuan pori arang dapat meningkatkan afinitas nutrisi tanah, yang menyebabkan reduksi nutrisi secara lambat (*slow release*). Namun masih ada pencilan efek ameliorasi arang tanpa pupuk terhadap penurunan produktivitas lobak (Spokas et al., 2012). Karakteristik porimikro dan gugus fungsional arang diduga berpengaruh terhadap kemampuan sorpsi senyawa *xenobiotic* yang tidak diinginkan (Anawar et al., 2017). Eksplorasi pengetahuan interaksi arang dan senyawa *xenobiotic* perlu ditingkatkan, dan gugus fungsi arang dipercaya memiliki pengaruh vital.

Konduktivitas hidrolik tanah mendapatkan bagian untuk mengelola pergerakan dan penyimpanan air permukaan tanah (Bayabil et al., 2015), sementara tekstur tanah menjadi kata kunci. Penambahan arang berpeluang menambah stok air tanah, berkat kapiler aliran air diantara arang-tanah dan antar pori di dalam arang itu sendiri. Amandemen arang memiliki hubungan timbal balik positif dengan kemampuan penyimpanan air (Igalavithana et al., 2017) untuk perbaikan fisik tanah. Sebuah mekanisme yang bersamaan antara reduksi kerapatan tanah (*bulk density*) dengan peningkatan porositas tanah. Semakin banyak amandemen arang ke dalam tanah, akan semakin meningkatkan retensi air tanah. Bahkan dalam periode yang lama, arang menjadi bahan pengikat untuk kestabilan mikroagregat tanah. Di sisi

Tabel 1. Karakteristik arang dengan teknik dan bahan baku yang berbeda

Table 1. Characteristics of biochar in different techniques and materials

Peneliti (Researcher)	Prosedur Eksperimental (Experimental Procedure)	a	b	c	d	e	pH
This study	Sawmill Modified drum kiln 400–450°C 6–8 jam	24	5,5	2,4	11,6	85,9	
Gale et al., (2017)	Maple & Betula Screw-feedpyrolizer 500–600°C		2,7	2,74	29,87	64,68	7,39
Leal et al., (2015)	Purchaseddown-gradebiochar			8,22	84,16	7,62	7,59

Keterangan (Remarks): ^a hasil, %; ^b kandungan air, %; ^c abu, %; ^d zat terbang, %; ^e karbon tetap, % (^a yield, %; ^b moisture, %; ^c ash, %; ^d volatile, %; ^e fixed carbon, %)

lain, bentuk karbon stabil (*recalcitrant*) arang mencegah proses kehilangan C oleh pencucian dan dekomposisi mikrobial (Citraresmini & Bachtiar, 2016).

Perbaikan karakteristik kimia tanah, pH dan kapasitas tukar kation (KTK), menjadi perhatian berikutnya. Studi Kang et al. (2018) membuktikan peningkatan pH (7,95–8,09) dan peningkatan KTK secara signifikan. Status pH erat kaitannya dengan kehidupan mikroorganisme tanah, dan arang menyediakan habitat untuk mikroorganisme tanah tersebut. Namun, hal yang menjadi perdebatan adalah proses produksi arang superior. Teknik karbonisasi (pirolisis) dan tipe material akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik arang. Lebih lanjut, suhu karbonisasi tinggi ($>500^{\circ}\text{C}$) telah dibuktikan menghasilkan sifat lebih hidrofilik, dengan transformasi gugus fungsi alifatik menjadi aromatik. Sifat hidrofilik besar kemungkinan terjadi karena pori arang tidak tersumbat oleh zat mudah menguap (*volatile*). Perbedaan kadar *volatile* berkorelasi dengan suhu karbonisasi (pirolisis) telah didemonstrasikan secara nyata oleh peneliti sebelumnya. Kandungan bahan *volatile* pada karbonisasi $400\text{--}450^{\circ}\text{C}$ adalah 16,49–20,29% (Komarayati, Gusmailina, & Pari, 2011), sementara bahan *volatile* sebesar 84,16% berasal dari pirolisis kayu *hard wood* (Leal et al., 2015). Suhu rendah pada produksi arang akan menyebabkan karbon bersifat labil (Sun et al., 2016). Keunggulan arang dapat dinyatakan secara jelas berasal dari luas permukaan pori (SEM) dan pola distribusi pori melalui analisis BET.

Kontaminasi mineral logam di tanah pertanian menjadi perhatian global karena bersifat racun. Akumulasi mineral logam dari sistem irigasi, Cd khususnya, disebabkan oleh aktivitas antropogenik. Transfer Cd dari tanah ke tanaman akan dikonsumsi oleh manusia, terutama bahan pokok. Tanaman padi merupakan salah satu bahan pangan pokok di Asia Tenggara, khususnya Indonesia. Paparan Cd yang melebihi kadar minimal akan merugikan kesehatan manusia. Berbagai upaya telah ditempuh untuk mengurangi kadar Cd melalui mekanisme pengaturan pH dan peningkatan ikatan mikro agregat dalam tanah (Leal et al., 2015). Arang menjadi salah satu material yang dipromosikan untuk tujuan mulia ini, tanpa memiliki kontradiksi dengan produktivitas tanaman itu sendiri. Bahkan, superioritas arang mengungguli amandemen tanah oleh bahan organik dan anorganik lainnya (Rehman et al., 2017).

B. Proses Pengomposan

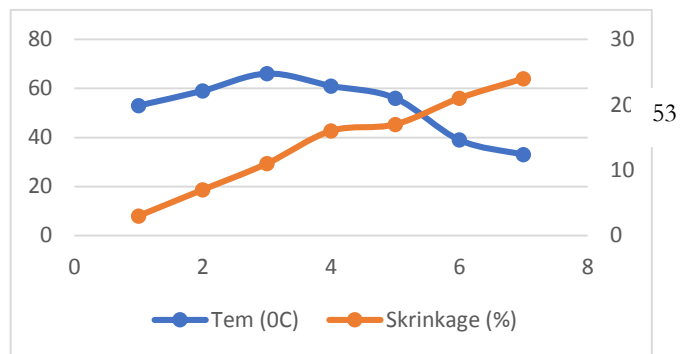
Material kompos mengandung N dalam jumlah banyak, sehingga digolongkan ke dalam nutrisi makro. Tantangan utama terjadi pada awal proses

pengomposan, dimana inisiasi kenaikan suhu terjadi secara ekstrim. Hal ini menjadi penanda penguraian material oleh mikroorganisme. Proses pengomposan dan dinamika suhu ditampilkan pada

Gambar 2. Tercatat 3 minggu pertama pengomposan, suhu mencapai 60°C lebih, stagnasi pada minggu ke-4 dan menurun gradual sampai minggu ke-6 pada suhu maksimal 35°C (Gusmailina & Komarayati, 2011). Volatilisasi N menjadi ammonia menjadi rawan di tahap awal pengomposan, dipicu kenaikan suhu (Sánchez, Ospina, & Montoya, 2017). Degradasi N menjadi ammonia mendorong sifat alkalin dan menghambat aktivitas pengurai selulosa, termasuk menambah waktu proses pengomposan. Walaupun kandungan atmosfer didominasi oleh gas N (77%), namun tidak dapat langsung digunakan oleh tanaman. Berbeda dengan tanaman, bakteri memiliki kemampuan menarik N dari udara tanpa perlu proses konversi ke nitrat atau nitrit. Upaya penambahan garam atau bakteri pengurai ammonia menjadi nitrat/nitrit perlu mendapatkan perhatian besar dalam proses pengomposan. Ini menjadi perlakuan konservasi kandungan N agar mempertahankan kualitas kompos. Namun kandungan garam yang terlalu tinggi dapat membahayakan kesehatan tanaman, sebagai pengguna kompos. Jalan pintas ditempuh pupuk pertanian kimia dalam menyediakan nutrisi makro (N, P, K). Selain dampak meninggalkan residu berbahaya terhadap lingkungan, pertanian kimia menyebabkan perubahan status kimia tanah. Sebuah kondisi yang merugikan produktivitas tanaman dalam jangka panjang. Observasi akhir pengomposan ditandai rendemen produk akhir kompos berada pada kisaran 24% terhadap bahan baku (*w/w*) (Gusmailina & Komarayati, 2011).

B. Manfaat Ekologi

Pengelolaan pertanian ramah lingkungan berkembang sangat cepat. Pupuk atau pestisida anorganik dikesampingkan dan lebih mengutamakan penggunaan bahan berbasis alam. Penggunaan arang (Gupta, 2017; Pari, 2014) atau pupuk hijau (Agegnehu et al., 2016; Sri Komarayati & Pari, 2014; Ohsowski, Dunfield, Klironomos, & Hart, 2018) telah digunakan untuk meningkatkan produktivitas tanaman. Penggunaan bahan organik secara masih dilakukan



Gambar 2. (a) proses pengomposan (b) dinamika suhu selama produksi ARKOB
Figure 2. (a) pile-composting (b) temperature behavior during composting

mengingat dampak buruk bahan anorganik terhadap lingkungan. Para peneliti telah mempelajari kombinasi arang-kompos (Agegnehu et al., 2016, 2015; Bass et al., 2016; Gusmailina & Komarayati, 2011; Junaedi et al., 2009; Komarayati & Pari, 2014; Ohsowski et al., 2018; Sigmund et al., 2018; Zainul et al., 2017) dalam serial manfaat yang lebih luas. ARKOB adalah kombinasi antara arang dan kompos dengan bantuan aktivator mikroba lignoselulolitik (Gusmailina & Komarayati, 2011). Aktivator *Trichoderma* sp. dan *Cytophaga* sp. digunakan sebagai agen bioaktif. Peranan bioaktif dimaksud mencakup biofungisida untuk melindungi tanaman dari serangan mikroba tanah. Arang dalam BCB memiliki peran ganda: agen perbaikan tanah (Agegnehu et al., 2016; Gusmailina & Komarayati, 2011; Kang et al., 2018) dan mengontrol aktivitas mikroorganisme pengurai kompos (Sun et al., 2016).

Ameliorasi tanah oleh ARKOB menyediakan sumber energi dan mikrohabitat (melalui arang) bagi mikroorganisme tanah. Populasi dan aktivitas bakteri tanah memberikan respon linear dengan penambahan dosis kompos-arang. Bakteri pengurai fosfat dalam kompos-arang melepaskan P ke dalam tanah dan menjadi nutrisi untuk mikroorganisme tanah. Mekanisme pelepasan P dipicu oleh zona rhizosfer perakaran padi yang bersifat aerobik, melepaskan O_2 dan mengubah status pH tanah. Prosedur serupa terjadi pada pelepasan P yang terikat sistem koloid dan mineral logam (Citraresmini & Bachtiar, 2016). Kelasi mineral logam memberikan dampak buruk terhadap tanaman, namun risikonya diturunkan oleh bahan organik kompos. Dual pelepasan P, berasal dari ARKOB dan tanah itu sendiri, direspon oleh padi sebagai sekuel sumber energi berkelanjutan. Sistem perakaran tanaman akan memanfaatkan P kompos,

berikutnya adalah P tanah (Citraresmini & Bachtiar, 2016). Demikian, kandungan P dipercaya mendapat perhatian khusus dibanding rasio C/N.

Arang, kompos, dan campuran keduanya telah didemonstrasikan dalam perbaikan tanah, air tanah, pH dan peningkatan produktivitas. Sebuah peningkatan 23,3–40,8% untuk volume air tanah dan kenaikan pH yang signifikan ditemukan di tanah chromosol kritis (Bass et al., 2016). Peningkatan air tanah terjadi karena dipertahankan material organik di permukaan, tidak penetrasi ke lapisan bawah. Sementara pengaturan pH ditentukan kehadiran arang yang memiliki sifat basa superior, bukan berasal dari kompos. Karakteristik permukaan pori arang paling bertanggung jawab dalam masalah ini. Bagaimana pun penambahan arang kepada campuran material organik (limbah organik, pupuk kandang) memberikan karakter paling unggul.

Kompos menempati bagian sebagai penyedia konten makro, seperti: N, P, K, Ca, Mg atau mineral untuk lahan kritis. N dan P merupakan foliar signifikan yang mengalami peningkatan dengan kehadiran kompos (Agegnehu et al., 2016). Kehadirannya menjadi sangat penting di tahun pertama pertumbuhan tanaman. N berkontribusi dalam pertumbuhan vegetatif tanaman, pembentukan klorofil dan perombakan asam amino menjadi protein. P dapat berasal dari mineralisasi batuan, namun sangat terbatas, sisanya didapat dari perombakan material organik, kompos. Peran P yang tidak bisa dikesampingkan terhadap pembentukan sistem perakaran, ketahanan terhadap hama penyakit dan membantu proses asimilasi-respirasi tanaman. K diserap dalam bentuk ion K^+ , berperan dalam ketahanan terhadap kekurangan air, ketegaran bagian tanaman dan memperbaiki kualitas buah pada fase

generatif. Ca mendapat bagian pada perbaikan sistem perakaran, pembentukan sel baru dan menetralkan asam organik dari metabolisme tanaman. Peran

penting melekat pada Mg: aktivator enzim tanaman, membentuk warna hijau klorofil, penyerapan unsur hara lain (P dan K) dan transportasi P ke seluruh

Tabel 2. Komposisi nutrisi beberapa arang-kompos
Table 2. Nutrient characteristic of co-composted biochar

54	Parameter	a	b	c	d
	Material	Kulit kayu	Limbah tebu	Patchouli leafwaste	<i>Salix</i> sp. waste
	pH (1: 1)	7,68	7,5	8,7–8,9	7,5
	Moisture content %	25	58,8	-	-
	C organik %	16		20,2-22,32	34,7
	Total N %	1,03	1,15	2,09-2,17	7,8
	C/N ratio %	23	30,2	9,31-10,68	-
	P ₂ O ₅ %	1,61	-	1,34-1,52	-
	CaO %	1,08	-	0,13-0,85	-
	MgO %	1,86	-	-	-
	K ₂ O %	1,09	-	0,69-0,77	-
	CTC	3,58 meq 100/g	2 dS/m	-	8,81 cmol/kg
	Unsur logam	mg/kg	mg/kg	-	-
	Zn	9,31	133	-	133
	Cu	3,23	44	-	44
	Co	-	-	-	<0,05
	Mo	-	-	-	<0,2
	Se	-	0,6	-	-
	Pb	0,21	50	-	-
	Cr	-	28	-	-
	Cd	-	<0,5	-	-
	Ni	-	11	-	-
	Hg	-	0,1	-	-
	As	-	8	-	-

Keterangan (*Remark*): ^a Gusmailina & Komarayati (2011) ^b Bass et al. (2016) ^c Junaedi et al. (2009) ^d Agegnehu et al., (2016)

bagian tanaman. Penyediaan nutrisi mikro dilakukan juga oleh kompos, namun dalam taraf lebih kecil. Kondisi berbeda pada pupuk komersial, penyedia makro dibanding mikro, sehingga menimbulkan masalah nutrisi dalam penggunaan jangka panjang.

Produktivitas tanaman menjadi krusial didiskusikan setelah mengetahui karakteristik arang, kompos dan kombinasi diantara keduanya. Pembuktian terakhir dampak pemberian material organik terhadap ameliorasi tanah. Peningkatan biomassa total dan produktivitas panen telah didiskusikan meningkat (Agegnehu et al., 2016), dikecualikan tanah terdegradasi. Membutuhkan waktu sekitar 3–6 tahun untuk mengembalikan tanah terdegradasi, spesifik terhadap karbon organik tanah, menjadi produktif (Simarmata et al., 2016).

Aplikasi penambahan material organik sudah dilakukan sejak dulu, namun nilai lebih studi ini adalah kehadiran bioaktif yang mengungguli praktik sebelumnya di masyarakat. Kehadiran aktivator *Trichoderma* sp. dan *Cytophaga* sp. memberikan pengayaan mikroorganisme pengurai selulosa (Gabi-mirela, Matei, Victoria, & Sorina, 2017) pada proses composting (Gusmailina & Komarayati, 2011;

Simarmata et al., 2016). Aktivitas penting mikroorganisme adalah degradasi material organik, berasal dari penambahan maupun organik tanah, yang berlangsung di daerah rhizosphere. Serial studi telah sampai kepada pernyataan dampak positif dari penambahan arang, kompos dan kombinasi diantaranya (Agegnehu et al., 2016; Simarmata et al., 2016), tidak termasuk dinamika panen pisang (Bass et al., 2016). Studi ini mencatat produktivitas padi adalah 3,2 ton/ha berbanding 2,98 ton/ha di demplot Ciranjang dan 4 ton/ha terhadap 3,1 ton/ha di demplot Sukaresmi, memberikan surplus relatif 7,4–29% terhadap aplikasi kimia.

C. Simulasi Finansial

Analisis ekonomi merupakan bagian strategis menentukan kelayakan dalam sebuah prospek usaha. Besaran modal, harga bahan baku, harga produk, jangka waktu pengembalian modal dan fragmentasi pasar menjadi hal yang diuji dalam menentukan kelayakan sebuah usaha. Produksi arang setidaknya memiliki 2 produk, arang dan asap cair, jika arang tidak diolah lebih lanjut menjadi ARKOKA. Kedua produk ini akan memiliki manfaat lebih, karena dalam

1 proses produksi dihasilkan produk arang dan produk asap cair. Pendekatan lebih empiris menggunakan NPV, IRR, Net B/C, dan PBP akan menunjukkan kelayakan sebuah usaha. Berdasarkan

pendekatan manfaat biaya, investasi produksi arang dapat kembali setelah 15 bulan dengan menggunakan limbah potongan penggergajian dan limbah penebangan (Nurhayati, Sylviani, & Mahpudin, 2003).

Tabel 3. Simulasi kelayakan usaha arang terpadu skala menengah (10-unit tungku)

Table 3. Feasibility study of integrated charcoal in home industry scale (10 units production)

Parameter	Skenario 1 (Scenario 1)	Skenario 2 (Scenario 2)	Skenario 3 (Scenario 3)	Skenario 4 (Scenario 4)	Skenario 5 (Scenario 5)
NPV (14%), Rp	3,454,142,979	902,101,804	106,138,680	(171,828,515.4)	(369,786,134)
IRR	280,42%	86,45%	22,77%	-0,40%	-17,40%
Net B/C	7,03	2,60	1,19	0,69	0,33
PBP, tahun	0,5	1,6	2,7	3,5	4,5

Keterangan (Remarks): Skenario 1= 100% kapasitas produksi, 100% harga pasar; Skenario 2= 60% kapasitas produksi, 60% harga pasar; Skenario 3= 40% kapasitas produksi, 40% harga pasar; Skenario 4= 30% kapasitas produksi, 30% harga pasar; Skenario 5= 20% kapasitas produksi, 20% harga pasar

Tabel 4. Simulasi arus kas usaha arang terpadu selama 3 tahun

Table 4. integrated charcoal business cash flow in 3 years simulation

No	Uraian (Description)	Tahun (Year)			
		0	1	2	3
A	Arus Masuk				
	1. Total Penjualan		729,797,161	729,797,161	729,797,161
	2. Kredit				
	a. Investasi	394,072,123			
	b. Modal Kerja		12,789,000		
	3. Modal Sendiri				
	a. Investasi	168,888,053			
	b. Modal Kerja		5,481,000		
	4. Nilai Sisa Proyek				424,380,714
	Total Arus Masuk	562,960,176	748,067,161	729,797,161	1,154,177,875
	Arus Masuk untuk Menghitung IRR	-	729,797,161	729,797,161	1,154,177,875
B	Arus Keluar				
	1. Biaya Investasi	562,960,176	-	-	15,000
	2. Biaya Variabel		94,560,000	94,560,000	94,560,000
	3. Biaya Tetap		45,600,000	45,600,000	45,600,000
	4. Angsuran Pokok		135,620,374	135,620,374	135,620,374
	5. Angsuran Bunga		48,258,250	29,271,397	10,284,545
	6. Pajak		73,365,362	76,213,390	79,061,418
	7. Biaya Pemasaran/Distribusi		6,000,000	6,000,000	6,000,000
	Total Arus Keluar	562,960,176	403,403,986	387,265,162	371,141,337
	Arus Keluar untuk Menghitung IRR	562,960,176	219,525,362	222,373,390	225,236,418
C	Arus Bersih (NCF)	-	344,663,174	342,531,999	783,036,538
D	Cashflow untuk menghitung IRR	(562,960,176)	510,271,799	507,423,771	928,941,457
	Discount Factor (14%)	1.0000	0.8772	0.7695	0.6750
	Present Value	(562,960,176)	447,606,841	390,446,115	627,009,024
E	Cummulative	(562,960,176)	(115,353,335)	275,092,780	902,101,804
F	Analisis kelayakan usaha				
	NPV (14%)	902,101,804			
	IRR	86.45	%		

No	Uraian (Description)	Tahun (Year)			
		0	1	2	3
	Net B/C	2.60			
	PBP	1.6	tahun		

Keterangan (Remark): Angka dalam tanda kurung bernilai negatif (*Numbers in parentheses are negative*)

Lebih lanjut, pengembalian investasi arang terpadu diperoleh setelah 35 bulan, menggunakan limbah sebetan dengan suku bunga maksimum 13% hayati & Adalina, 2009).

elayakan usaha ARKOBAs dilakukan dengan menggunakan asumsi-asumsi empiris sebagai berikut:

1. Reaktor pirolisis menggunakan sistem kubah berkapasitas 2 m³ sebanyak 10 unit
2. Material biochar berasal dari limbah dan pemangkasan hutan tanaman (akasia)
3. Harga limbah material Rp.120.000/ m³
4. Kapasitas produksi arang per bulan sebanyak 60% kapasitas terpasang (2,114 kg/bulan)
5. Kapasitas produksi asap cair per bulan sebanyak 60% kapasitas terpasang (2,322 liter/bulan)
6. Rendemen produksi arang sebanyak 14,68%
7. Rendemen produksi asap cair sebanyak 16,13%
8. Waktu produksi selama 14 hari, sehingga produksi sebanyak 2 kali dalam 1 bulan
9. Acuan harga arang 60% harga pasar (Rp. 5.700/kg)
10. Acuan harga asap cair 60% harga pasar (Rp. 21.000/kg)

Hasil simulasi kelayakan usaha menunjukkan bahwa usaha arang terpadu layak dijalankan, oleh pengusaha maupun masyarakat. Investasi arang terpadu sebesar Rp. 562,960,176 dengan potensi pendapatan sebesar Rp. 729,797,161/tahun, yang berasal dari penjualan produk arang dan produk asap cair. Nilai investasi arang terpadu mencapai 902 juta, menggunakan diskonto faktor (DF) sebesar 14% dan waktu investasi selama 3 tahun (Tabel 4). Usaha arang terpadu memenuhi kelayakan secara finansial sampai skenario 3, nilai IRR > DF (Tabel 3). Fakta ini lebih diperkuat oleh nilai Net B/C yang memiliki nilai di atas 1 sampai skenario ketiga. Waktu pengembalian investasi skenario dinilai masih menguntungkan sampai skenario kedua. Data simulasi menunjukkan bahwa, usaha arang terpadu masih layak dilakukan sampai skenario ketiga, namun nilai perbandingan biaya-manfaat dan waktu pengembalian investasi semakin lama, 33 bulan.

IV. KESIMPULAN

Sebuah pembelajaran teknologi sederhana dan ramah lingkungan telah di demonstrasikan dengan

baik di Kabupaten Cianjur. Masyarakat dilibatkan dalam produksi arang dan ARKOBAs secara aktif. Sifat arang dan kompos, secara terpisah atau bekerjasama, memberikan dampak ameliorasi tanah dan peningkatan produktivitas tanaman padi. Sifat fisik, kimia dan biologis tanah mendapatkan perbaikan dari kehadiran arang dan kompos berkontribusi sebagai penyedia nutrisi tanaman. Sementara itu, transfer inokulan *Trichoderma* sp. dan *Cytophaga* sp. menghasilkan keunggulan ARKOBAs terhadap aplikasi kimia. Fakta bahan organik lebih unggul daripada bahan sintesis dibuktikan dalam studi ini. Kasus inkonsistensi dampak ARKOBAs terhadap fluktuatif panen hanya sedikit, namun sinergi arang-kompos ditemukan di setiap kasus. Sebuah peningkatan produktivitas tanaman padi relatif adalah sekitar 7,4–29%. Pendekatan simulasi finansial dilakukan dengan menerapkan beberapa asumsi. Pre-assume menyatakan aktivitas produksi arang termasuk kategori layak dilakukan, bahkan pada beberapa skenario. Studi lanjutan perlu diinisiasi secara lebih komprehensif dari pendekatan sosial, lingkungan, dan ekonomi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dana dan fasilitas dari Pusat Standardisasi Instrumen Pengelolaan Hutan Berkelanjutan (PUSTARHUT), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan selama pelaksanaan penelitian.

KONTRIBUSI PENULIS

Ide, desain, dan rancangan percobaan dilakukan oleh G, SK dan GP; percobaan dan perlakuan pengujian dilakukan oleh NAS, G, SK dan GP; pengumpulan data dan analisis data dilakukan oleh G, SK dan GP; penulisan manuskrip oleh NAS, G, SK dan GP; perbaikan dan finalisasi mansukrip dilakukan oleh NAS.

DAFTAR PUSTAKA

- Agegehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar-compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 543, 295–306. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.

- 11.054.
- Agegehu, G., Bird, M. I., Nelson, P. N., & Bass, A. M. (2015). The ameliorating effects of biochar and compost on soil quality and plant growth on a Ferralsol. *Soil Research*, 53(1), 1. doi: 10.1071/sr14118.
- Anawar, H. M., Strezov, V., Akter, F., & Kader, A. (2017). Impact of biochar on soil fertility and behavior of xenobiotics in soil. In *Xenobiotics in the Soil Environment* (49), 299–318. doi: 10.1007/978-3-319-47744-2.
- Badan Pusat Statistik. (2018). Luas tanaman padi menurut kecamatan di kabupaten Cianjur (hektar). <https://cianjurkab.bps.go.id/indicator/53/86/1/luas-tanam-padi-menurut-kecamatan-di-kabupaten-cianjur-hektar-2018.html>.
- Bass, A. M., Bird, M. I., Kay, G., & Muirhead, B. (2016). Soil properties, greenhouse gas emissions and crop yield under compost, biochar and co-composted biochar in two tropical agronomic systems. *Science of the Total Environment*, 550, 459–470. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.143.
- Basso, D., & Pavanetto, R. (2017). Greenpeat: An innovative sustainable material recovered from waste. *The 21th International Trade Fair of Material & Energy Recovery and Sustainable Development*, 9–16.
- Bayabil, H. K., Stoof, C. R., Lehmann, J. C., Yitaferu, B., & Steenhuis, T. S. (2015). Assessing the potential of biochar and charcoal to improve soil hydraulic properties in the humid Ethiopian Highlands: The Anjeni watershed. *Geoderma*, 243–244, 115–123. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.12.015.
- Bonanomi, G., Ippolito, F., & Scala, F. (2015). A “black” future for plant pathology? Biochar as a new soil amendment for controlling plant diseases. *Journal of Plant Pathology*, 97(2), 223–234. doi: 10.4454/jpp.v97i2.3381.
- Citraresmini, A., & Bachtiar, T. (2016). Dinamika fosfat pada aplikasi kompos jerami-biochar dan pemupukan fosfat pada tanah sawah. *Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 12(2), 133–146.
- Coban, H., Miltner, A., Centler, F., & Kästner, M. (2016). Effects of compost, biochar and manure on carbon mineralization of biogas residues applied to soil. *European Journal of Soil Science*, 67(2), 217–225. doi: 10.1111/ejss.12326.
- Darby, I., Xu, C. Y., Wallace, H. M., Joseph, S., Pace, B., & Bai, S. H. (2016). Short-term dynamics of carbon and nitrogen using compost, compost-biochar mixture and organo-mineral biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(11), 11267–11278. doi: 10.1007/s11356-016-6336-7.
- Gabi-mirela, M., Matei, S., Victoria, M., & Sorina, D. (2017). Microbiological characterization of suppressive forest soil from Enisala. *Annals of the University of Craiova-Agriculture, Montanology, Cadastre Series* 46, 46(1), 341–347.
- Gale, N., Halim, A., Horsburgh, M., & Thomas, S. C. (2017). Comparative responses of early-successional plants to charcoal soil amendments. *Ecosphere*, 8(10). doi: 10.1002/ecs2.1933.
- Gupta, T. (2017). Historical production and use of carbon materials: The activated carbon. dalam *Carbon*. doi: 10.1007/978-3-319-66405-7.
- Gusmailina. (2009). Isolasi dan seleksi mikroba potensial sebagai aktivator pengomposan untuk mendekomposisi limbah kulit mangium. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 27(4), 352–368.
- Gusmailina. (2010a). Pengaruh arang kor 57 bioaktif terhadap pertumbuhan anakan buana dan gaharu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 28(2), 93–110.
- Gusmailina. (2010b). Pengaruh arang kompos bioaktif terhadap pertumbuhan anakan bulian dan gaharu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 28(2), 1–26.
- Gusmailina, Komarayati, S., & Wibisono, H. S. (2018). Pengaruh arang dan asap cair terhadap pertumbuhan anakan *Gyrinops* sp. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 36(3), 23–31.
- Gusmaliana & Gustan Pari. (2002). Pengaruh pemberian arang terhadap pertumbuhan tanaman cabai merah (*Capsicum annum*). *Buletin Penelitian Hasil Hutan*, 20(3), 217–229.
- Igalavithana, A. D., Ok, Y. S., Niazi, N. K., Rizwan, M., Al-Wabel, M. I., Usman, A. R. A., ... Lee, S. S. (2017). Effect of corn residue biochar on the hydraulic properties of sandy loam soil. *Sustainability (Switzerland)*, 9(2), 1–10. doi: 10.3390/su9020266.
- Junaedi, A., Rojedin, A., & Sutrisno, E. (2009). Pembuatan arkoba dari limbah penyulingan nilam. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 27(6), 106–114.
- Kang, S.-W., Kim, S.-H., Park, J.-H., Seo, D.-C., Ok, Y. S., & Cho, J.-S. (2018). Effect of biochar derived from barley straw on soil physicochemical properties, crop growth, and nitrous oxide emission in an upland field in South Korea. *Environmental Science and Pollution Research*. 25, 25813–25821 (2018). doi: 10.1007/s11356-018-1888-3.
- Kerré, B., Bravo, C. T., Leifeld, J., Cornelissen, G., & Smolders, E. (2016). Historical soil amendment

- with charcoal increases sequestration of non-charcoal carbon: A comparison among methods of black carbon quantification. *European Journal of Soil Science*, 67(3), 324–331. doi: 10.1111/ejss.12338.
- Kerré, Bart, Willaert, B., Cornelis, Y., & Smolders, E. (2017). Long-term presence of charcoal increases maize yield in Belgium due to increased soil water availability. *European Journal of Agronomy*, 91(April), 10–15. doi: 10.1016/j.eja.2017.09.003.
- Komarayati, S., & Pari, G. (2012). Arang hayati dan turunannya sebagai stimulan pertumbuhan jabon dan sengon. *Buana Sains*, 12(1), 1–6.
- Komarayati, S. (1996). Pemanfaatan serbuk gergaji limbah industri sebagai kompos. *Penelitian Hasil Hutan*, 14(9), 337–343.
- Komarayati, S. (2004). Penggunaan arang kompos pada media tumbuh anakan mahoni. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 22(4), 193–203.
- Komarayati, S., Gusmailina, G., & Pari, G. (2011). Produksi cuka kayu hasil modifikasi tungku arang terpadu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29, 234–247.
- Komarayati, S., Gusmailina, & Pari, G. (2002). Pembuatan kompos dan arang kompos dari serasah dan kulit kayu tusam. *Buletin Penelitian Hasil Hutan*, 20(3), 231–242.
- Komarayati, S., Gusmailina, & Pari, G. (2003). Aplikasi arang kompos pada anakan tusam (*Pinus merkusii*). *Buletin Penelitian Hasil Hutan*, 21(1), 15–21.
- Komarayati, S., & Indrawati, I. (2003). Isolasi dan identifikasi mikroorganisme dalam arang kompos. *Buletin Penelitian Hasil Hutan*, 21(3), 251–258.
- Komarayati, S., & Pari, G. (2014). The combination of additions of biochar and wood vinegar on jabon and sengon growth. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 32(1), 12–20.
- Komarayati, S., & Santoso, E. (2011). Arang dan cuka kayu: Produk HHBK untuk stimulan pertumbuhan mengkudu (*Morinda citrifolia*). *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29(2), 155–178.
- Koyama, S., Katagiri, T., Minamikawa, K., Kato, M., & Hayashi, H. (2016). Effects of rice husk charcoal application on rice yield, methane emission, and soil carbon sequestration in andosol paddy soil. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 50(4), 319–327. doi: 10.6090/jarq.50.319.
- Leal, O. dos A., Dick, D. P., Lombardi, K. C., Maciel, V. G., González-Pérez, J. A., & Knicker, H. (2015). Soil chemical properties and organic matter composition of a subtropical Cambisol after charcoal fine residues incorporation. *Journal of Soils and Sediments*, 15(4), 805–815. doi: 10.1007/s11368-014-1040-z.
- Nurhayati, T., & Adalina, Y. (2009). Analisis teknis dan finansial produksi arang dan cuka kayu dari limbah industri penggergajian dan pemanfaatannya. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 27(4), 337–351.
- Nurhayati, T., Sylviani, & Mahpudin. (2003). Analisis teknis dan ekonomis produksi terpadu arang dan cuka kayu dari tiga jenis kayu. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 21, 155–166.
- Ohsowski, B. M., Dunfield, K., Klironomos, J. N., & Hart, M. M. (2018). Plant response to biochar, compost, and mycorrhizal fungal amendments in post-mine sandpits. *Restoration Ecology*, 26(1), 63–72. doi: 10.1111/rec.12528.
- Pari, G. (2014). Biochar technology as a go green movement in Indonesia. *Indonesian Journal of Wetlands Environmental Management*, 2(1), 84–91.
- Pari, G., Roliadi, H., & Komarayati, S. (2013). Biochar for forestry and agricultural production. *Biochar for Future Food Security: Learning from Experiences and Identifying Research Priorities*, 5–10.
- Pasaribu, R. A. (1987). Pemanfaatan serbuk gergaji jeungjing sebagai kompos untuk pupuk tanaman. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 4(4), 15–21.
- Primandari, S. R. P., Islam, A. K. M. A., Yaakob, Z., & Chakrabarty, S. (2018). *Jatropha curcas* L. biomass waste and its utilization. Dalam *Advances in Biofuels and Bioenergy* (273–282). doi: 10.5772/intechopen.72803.
- Rehman, M. Z. ur, Khalid, H., Akmal, F., Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., ... Azhar, M. (2017). Effect of limestone, lignite and biochar applied alone and combined on cadmium uptake in wheat and rice under rotation in an effluent irrigated field. *Environmental Pollution*, 227, 560–568. doi: 10.1016/j.envpol.2017.05.003.
- Sánchez, Ó. J., Ospina, D. A., & Montoya, S. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management*, 69(26), 136–153. doi: 10.1016/j.wasman.2017.08.012.
- Seehausen, M., Gale, N., Dranga, S., Hudson, V., Liu, N., Michener, J., ... Thomas, S. (2017). Is there a positive synergistic effect of biochar and compost soil amendments on plant growth and physiological performance? *Agronomy*, 7(1), 13. doi: 10.3390/agronomy7010013.
- Selvakumar, G., Yi, P. H., Lee, S. E., Han, S. G., &

- Chung, B. N. (2018). Hairy vetch, compost and chemical fertilizer management effects on red pepper yield, quality, and soil microbial population. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 59(5), 607–614. doi: 10.1007/s13580-018-0078-z.
- Sigmund, G., Poyntner, C., Piñar, G., Kah, M., & Hofmann, T. (2018). Influence of compost and biochar on microbial communities and the sorption/degradation of PAHs and NSO-substituted PAHs in contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 345, 107–113. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.010.
- Simarmata, T., Hersanti, Turmuktini, T., Fitriatin, B. N., Setiawati, M. R., & Purwanto. (2016). Application of bioameliorant and biofertilizers to increase the soil health and rice productivity. *HAYATI Journal of Biosciences*, 23(4), 181–184. doi: 10.1016/j.hjb.2017.01.001.
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., ... Nichols, K. A. (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environment Quality*, 41(4), 973. doi: 10.2134/jeq2011.0069.
- Sudrajat, R. (1992). Aneka manfaat penggunaan kompos cair (larutan draco) hasil proses fermentasi anaerobik dengan bahan baku sampah kota. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 10(3), 71–76.
- Sun, D., Lan, Y., Xu, E. G., Meng, J., & Chen, W. (2016). Biochar as a novel niche for culturing microbial communities in composting. *Waste Management*, 54, 93–100. doi: 10.1016/j.wasman.2016.05.004.
- Weijia, S., Yaning, L., Junyu, L., & Xiangfei, M. (2017). Use of *Ginkgo biloba* leaf compost for promoting soil properties and rooting of New Guinea impatiens cuttings. *Biological Agriculture and Horticulture*, 33(4), 258–268. doi: 10.1080/01448765.2017.1339639.
- Winarni, I., & Waluyo, T. K. (2010). Aplikasi arang kompos bioaktif pada budidaya nilam terhadap kualitas produk minyak nilam. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 28(12), 406–414.
- Zainul, A., Koyro, H.-W., Huchzermeyer, B., Gul⁵⁹ & Khan, M. A. (2017). Impact of a biochar or a compost-biochar mixture on water relation, nutrient uptake and photosynthesis of *Phragmites karka*. *Pedosphere*, (August). doi: 10.1016/s1002-0160(17)60362-x.