

Pengaruh Durasi *Steam* terhadap Kualitas Arang Aktif Limbah Sagu (*The Effect of Steam Duration on Quality and Characteristics of Activated Charcoal of Sago Waste*)

Herman Siruru^{1,2}, Wasrin Syafii^{2*}, Nyoman J Wistara², Gustan Pari³

¹Jurusan Kehutanan, Fakultas Pertanian, UNPATTI, Ambon

²Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor Kampus IPB Darmaga Bogor, 16680

³Pusat Penelitian dan Pengembangan Hasil Hutan Badan Litbang Kehutanan dan Inovasi, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Jl. Gunung Batu No.5 Bogor 16610

*Penulis korespondensi: wasrinsy@indo.net.id

Abstract

Sago waste is a potential biomass that can be used as active charcoal raw material. The objectives of this research were to know the effect of steam duration on quality and characteristics of activated charcoal of sago waste. Carbonization process was carried out at 400 °C for four hours, then activation was carried out at 100 ml bar steam pressure, at a temperature of 800 °C with variations of steam duration 60, 80 and 100 minutes and activation without steam, only heating for 60 minutes. The proximate test used the SNI standard, observed the functional group using Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FTIR) and observed the active charcoal structure using X-ray diffraction (XRD). The results showed that the yield, moisture content, volatile, ash content, fixed carbon, iodine absorption of activated charcoal of sago bark and sago soft core were, respectively, 39.22–84.10%, 4.63–6.39%, 3.03–5.06%, 7.74–33.43%, 61.54–88.63%, 158.60–972.60 mg g⁻¹. XRD analyzes showed that the degree of crystalline activated charcoal of sago bark waste with the highest steam time of 100 minutes (35.98%) compared with the degree of crystalline other activated charcoal is only about 20.57–7.30%. FTIR spectroscopy results from activated charcoal of sago waste also identified nitrogen compounds such as NO₂ at wave numbers 1370-1390 cm⁻¹; 1530-1560 cm⁻¹; 1620-1660 cm⁻¹ and phosphorus compounds such as P-S at 200-500 cm⁻¹ wave number; P=S at the wave number 500-850 cm⁻¹.

Keywords: active charcoal, carbonization, sago, steam

Abstrak

Limbah sagu merupakan biomasa potensial yang dapat digunakan sebagai bahan baku arang aktif. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh lama *steam* terhadap kualitas dan karakteristik arang aktif limbah sagu. Pengarangan dilakukan pada suhu 400 °C selama 4 jam, selanjutnya aktivasi dilakukan dengan tekanan *steam* 100 millibar, pada suhu 800 °C dengan variasi lama steam 60, 80, dan 100 menit serta aktivasi tanpa steam, hanya pemanasan selama 60 menit. Pengujian proximat menggunakan standar SNI, pengamatan gugus fungsi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectrophotometer* (FTIR) dan pengamatan struktur arang aktif menggunakan *X-ray diffraction* (XRD). Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen arang aktif sebesar 39,22–84,10 %; kadar air 4,63–6,39%; zat mudah terbang 3,03–5,06%; kadar abu 7,74–33,43%; karbon terikat 61,54–88,63%; dan daya serap iodium 158,60–972,60 mg g⁻¹. Derajat kristalin arang aktif limbah sagu batang sagu dengan lama *steam* 100 menit yang paling tinggi (35,98%) dibandingkan dengan derajat kristalin arang aktif lainnya yang hanya sekitar 20,57-7,30%. Hasil Spektogram FTIR dari arang aktif limbah sagu juga mengidentifikasi

senyawa nitrogen seperti NO_2 pada bilangan gelombang 1370-1390 cm^{-1} ; 1530-1560 cm^{-1} ; 1620-1660 cm^{-1} ; dan senyawa fosfor seperti P-S pada bilangan gelombang 200-500 cm^{-1} ; P=S pada bilangan gelombang 500-850 cm^{-1} .

Kata kunci: arang aktif, karbonisasi, sagu, *steam*

Pendahuluan

Amelioran adalah suatu bahan yang dapat membantu pertumbuhan tanaman dengan cara memperbaiki sifat tanah seperti kepadatan tanah, porositas tanah, dan temperatur tanah. Bahan yang dapat digunakan sebagai amelioran adalah kompos, arang dan arang aktif. Penelitian arang sebagai bahan amelioran lebih banyak dibandingkan dengan arang aktif.

Gagasan pemanfaatan arang sebagai bahan amelioran tanah untuk melestarikan atau memperbaiki kualitas tanah dimulai setelah ditemukannya tanah *Terra preta de Indio* di lembah Amazon. Tanah-tanah di sekitar daerah ini memiliki kandungan hara yang tinggi dengan jumlah arang yang tinggi juga (Steiner *et al.* 2007). Tanah ini lebih subur dibandingkan dengan tanah asli di sekitarnya (Lehmann 2007), dan juga terdapat keanekaragaman mikroba (Kim *et al.* 2007, O'Neill *et al.* 2009).

Arang memiliki struktur berpori dan area permukaan internal yang besar, sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan mengurangi faktor stres abiotik seperti meningkatkan kapasitas menahan air (Park *et al.* 2018, Koelmanns *et al.* 2006) atau retensi nutrisi dengan meningkatkan kapasitas tukar kation, mengurangi konsentrasi ion logam berat, dan senyawa fitotoksik lainnya (residu pestisida) di tanah dengan adsorpsi ke daerah permukaan (Atkinson *et al.* 2010). Selain itu arang dapat meningkatkan produksi tanaman dengan cara menahan pencucian hara (Loria *et al.* 2013) merangsang aktivitas mikroba

terutama di tanah dengan tingkat kesuburan rendah (Gul *et al.* 2015), merangsang populasi mikroba dan mengaktifkan mikroorganisme tanah yang tidak aktif (Steiner *et al.* 2008; Kuzyakov *et al.* 2009), serta meningkatkan respirasi mikroba (Hilscher *et al.* 2009).

Arang secara tidak langsung dapat merangsang organisme tanah dengan menawarkan habitat yang sangat baik karena strukturnya yang porous (Steinbeiss *et al.* 2009, Lehmann *et al.* 2011) dan mengurangi berbagai racun tanah melalui penyerapan (Graber *et al.* 2011). Penerapan arang dapat meningkatkan KTK tanah (Novak *et al.* 2009) dan dengan demikian meningkatkan ketahanan nutrisi (Major *et al.* 2010) mengubah siklus nutrisi dengan menambahkan nutrisi (N, P, K, Ca, Mg) ke tanah (Gaskin *et al.* 2008) memengaruhi pertukaran nutrisi dengan penambahan permukaan reaktif (Silber *et al.* 2010) meningkatkan konsentrasi OC tanah (Sukartono 2011, Angst *et al.* 2014).

Arang selain memberikan efek positif juga memberikan efek negatif pada perkecambahan tumbuhan (Van Zwieten *et al.* 2010, Kookana *et al.* 2011) dan pertumbuhan mikoriza (Rillig *et al.* 2010). Efek samping arang sebagian dapat disebabkan oleh senyawa organik volatil (VOC) (Busch *et al.* 2011). Zat yang berpotensi membahayakan ekologi tanah seperti *benzofuran* dan *p-cymene* dalam kayu pinus (Becker 2013).

Pengaruh arang pada sifat tanah cenderung bervariasi bergantung pada

karakteristik arang, dan sifat arang dipengaruhi oleh sumber biomassa dan kondisi pirolisa seperti perlakuan suhu dan aktivasi (Nguyen *et al.* 2010). Arang aktif memiliki luas permukaan lebih besar (Marsh 2006) dan senyawa organik volatil (VOC) yang lebih kecil (Monocha *et al.* 2010) dibandingkan dengan arang biasa. Aktivasi arang aktif dapat dilakukan secara fisik dan kimia, secara fisik dapat dilakukan dengan pemanasan suhu tinggi, pemanasan dengan uap air (*steam*), dan pemanasan suhu tinggi dengan CO₂, dan N₂ (Mars 2006).

Limbah sagu terdiri dari batang sagu dan empulur sagu yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan seperti bahan bakar, pakan ternak, media tanam jamur, dan bahan amelioran. Penelitian limbah sagu sebagai bahan amelioran berhasil meningkatkan produksi tanaman (Syakir 2008), namun penggunaan ampas sagu secara langsung mempunyai banyak kendala seperti masalah bau, penyimpanan, dan pengangkutan sehingga penggunaan ampas sagu sebagai bahan amelioran hanya terbatas pada daerah disekitar tempat produksi limbah sagu tersebut. Dengan demikian maka solusi untuk menyelesaikan masalah tersebut dengan cara pengolahan limbah melalui metode karbonisasi maupun aktivasi. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh jenis bahan baku dan durasi *steam* terhadap kualitas arang aktif limbah sagu.

Bahan dan Metode

Penyiapan bahan

Bahan yang digunakan adalah limbah padat sagu (empulur dan batang) yang diperoleh dari petani di Amahai, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku.

Pembuatan dan karakterisasi arang aktif

Limbah sagu yang telah diukur kadar airnya dimasukkan ke dalam *retort* listrik dan dipanaskan pada suhu 400 °C selama 4 jam hingga menjadi arang. Arang dibiarkan selama 24 jam didalam *retort*. Arang diaktivasi dengan suhu 800 °C disertai dengan pemberian *steam* pada tekanan 100 milibar dengan variasi 60, 80, 100 menit, dan tanpa *steam*. Arang aktif dianalisis sifat-sifatnya meliputi parameter rendemen, kadar air, kadar zat mudah menguap, kadar abu, kadar karbon terikat, dan daya serap terhadap iodium. Karakteristik arang aktif limbah sagu meliputi derajat kristalinitas, jarak antar lapisan aromatik, tinggi dan lebar aromatik, pengamatan gugus fungsi, dan pengamatan morfologi arang aktif.

Penentuan struktur arang

Untuk mengetahui derajat kristalinitas (X), sudut difraksi (θ), jarak antar lapisan aromatik (d), tinggi (Lc), lebar (La), dan jumlah lapisan aromatik digunakan XRD Shimadzu 7000 series-49 kV dengan sumber radiasi tembaga/Cu. Perhitungan dan persamaan rumusnya adalah sebagai berikut:

$$X = \frac{\text{bagian kristalin}}{\text{bagian kristalin} + \text{bagian amorf}} \times 100 \%$$

$$d = \lambda / 2 \sin \theta$$

$$Lc_{(002)} = K \lambda / \beta \cos \theta$$

$$La_{(100)} = K \lambda / \beta \cos \theta$$

$$N = Lc / d$$

dengan:

$$\lambda = 0,15406 \text{ nm (panjang gelombang radiasi sinar Cu)}$$

$$\theta = \text{sudut difraksi}$$

$$\beta = \text{Intensitas } \frac{1}{2} \text{ tinggi dan lebar (radian } \theta \text{)}$$

$$K = \text{Tetapan untuk lembaran grafit (0,89)}$$

Penentuan gugus fungsi

Arang aktif dapat menyerap sinar infra merah pada berbagai bilangan gelombang, sinar infra merah yang terserap pada berbagai bilangan gelombang menunjukkan adanya gugus fungsi. Arang aktif digerus bersama dengan tablet KBr kering (arang aktif 0,5–2 mg; KBr 100 mg), selanjutnya campuran tersebut dianalisis dengan FTIR *Spectrophotometer* 8300 buatan Shimadzu untuk mengetahui pola struktur gugus fungsi arang aktif. .

Pengamatan morfologi limbah sagu dan arangnya

Pengamatan morfologi dilakukan menggunakan alat SEM, kemudian hasil pengamatan tersebut dianalisa secara deskriptif.

Hasil dan Pembahasan

Rendemen

Penetapan rendemen arang aktif bertujuan untuk mengetahui jumlah arang aktif yang dihasilkan setelah melalui proses karbonisasi dan aktivasi. Pada penelitian ini rendemen arang aktif yang dihasilkan berkisar 39,77-84,10% (Tabel 1). Rendemen arang aktif terendah diperoleh dari arang aktif limbah batang sagu dengan durasi *steam* selama 100 menit dan rendemen tertinggi diperoleh dari arang aktif limbah empulur sagu tanpa menggunakan *steam*.

Menurut teori kinetik semakin tinggi suhu reaksi yang digunakan laju reaksi akan bertambah cepat dan peningkatan suhu akan mempercepat laju reaksi

antara karbon dengan uap air, sehingga semakin banyak karbon yang terkonversi menjadi gas CO₂ dan semakin sedikit karbon yang tersisa. Semakin lama waktu aktivasi maka pembentukan CO, CO₂, dan H₂ akan semakin banyak sehingga nilai rendemen arang aktif akan semakin menurun. Menurut Lee *et al.* (2003), reaksi kimia antara karbon dengan uap air akan membentuk CO₂ dan H₂O sehingga mempengaruhi rendemen arang aktif yang dihasilkan.

Hasil analisa sidik ragam pada Tabel 2 menunjukkan bahwa interaksi antara kedua faktor, faktor jenis limbah sagu dan durasi *steam* tidak berpengaruh terhadap rendemen arang aktif yang dihasilkan.

Kadar air

Penetapan kadar air arang aktif bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis arang aktif setelah proses aktivasi hingga pengujian kadar air. Kadar air arang aktif yang diperoleh pada penelitian ini berkisar antara 4,49-6,39% (Tabel 1). Kadar air arang aktif terkecil diperoleh dari arang aktif limbah batang sagu dengan durasi *steam* selama 100 menit dan kadar air tertinggi diperoleh dari arang aktif limbah empulur sagu dengan durasi *steam* 60 menit.

Hasil analisa sidik ragam pada Tabel 2 menunjukkan bahwa interaksi antara kedua faktor, faktor jenis limbah sagu dan durasi *steam* berpengaruh terhadap kadar air arang aktif yang dihasilkan.

Tabel 1 Hasil pengujian proximate arang aktif limbah sagu

Arang aktif	Rendemen, %	Kadar air, %	Kadar zat terbang, %	Kadar abu, %	Kadar karbon terikat, %	Daya Serap. Iod, mg g ⁻¹
ES tanpa <i>steam</i>	84,10	4,63	3,03	15,52	81,44	158,60
ES 60 menit	53,77	6,39	5,03	33,43	61,54	831,10
ES 80 menit	46,85	5,59	4,21	22,24	73,55	932,00
ES 100 menit	42,66	5,79	4,30	25,72	69,98	910,90
BS tanpa <i>steam</i>	80,67	5,76	3,63	7,74	88,63	158,70
BS 60 menit	50,17	4,74	5,06	8,61	86,33	891,20
BS 80 menit	44,22	5,00	5,05	17,20	77,75	933,10
BS100 menit	39,77	4,49	4,92	10,64	84,44	972,60

Catatan: ES = Empulur sagu; BS = Batang sagu

Hasil uji Beda Nyata Jujur (BNJ) menunjukkan bahwa kadar air terkecil pada arang aktif batang sagu durasi *steam* 100 menit dan tidak berbeda dengan kadar air pada arang aktif empulur sagu tanpa *steam*, arang aktif batang sagu durasi *steam* 60, dan arang aktif batang sagu durasi *steam* 80 (Tabel 3).

Kadar air arang aktif ditentukan oleh jumlah gugus hidroksil yang terdapat pada permukaan arang aktif. Semakin banyak gugus hidroksil yang berada pada permukaan arang aktif maka semakin banyak juga kadar air pada arang aktif tersebut.

Kadar zat terbang

Penetapan kadar zat terbang arang aktif bertujuan untuk mengetahui kandungan senyawa yang mudah menguap ketika dipanaskan pada suhu 950 °C. Kadar zat mudah menguap arang aktif berkisar antara 3,03-5,06% (Tabel 1). Secara keseluruhan nilai kadar zat terbang arang aktif yang dihasilkan relatif kecil. Kadar zat terbang arang aktif terkecil diperoleh dari arang aktif limbah empulur sagu tanpa *steam* dan kadar zat terbang tertinggi diperoleh dari arang aktif limbah batang sagu dengan durasi *steam* 60 menit.

Hasil analisis sidik ragam menunjukkan bahwa interaksi antara kedua faktor, faktor jenis limbah sagu dan durasi *steam* tidak berpengaruh terhadap kadar zat terbang arang aktif yang dihasilkan (Tabel 2). Komponen yang ada dalam arang aktif adalah air, abu, karbon, nitrogen, dan sulfur. Pemanasan pada suhu ±950 °C menyebabkan nitrogen dan sulfur akan menguap inilah yang disebut sebagai zat terbang. Besar kecilnya zat terbang disebabkan oleh gugus OH dan H yang tetap menempel selama proses aktivasi, sedangkan pada arang aktif dengan zat terbang rendah disebabkan selama proses aktivasi terjadi reaksi karbon dan uap air yang menghasilkan senyawa-senyawa menguap seperti CO, CO₂, CH₄, dan H.

Kadar abu

Penetapan kadar abu arang aktif bertujuan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam arang aktif setelah dipanaskan pada suhu ±600 °C. Kadar abu arang aktif berkisar 7,74-33,43% (Tabel 1). Kadar abu arang aktif terkecil diperoleh dari arang aktif batang sagu tanpa *steam* dan kadar abu arang aktif terbesar diperoleh dari arang aktif limbah empulur sagu dengan durasi *steam* 60 menit. Abu yang terbentuk disebabkan bahan baku memiliki unsur mineral

seperti kalsium, kalium, natrium, magnesium, dan silika. Selama proses karbonisasi dan aktivasi dekomposisi yang terjadi pada biomasa sebagian besar terjadi pada senyawa-senyawa organik seperti C, H, O, dan N. Mineral tidak banyak mengalami perubahan jumlah sehingga kadar abu arang aktif dipengaruhi oleh sifat bahan baku arang aktif. Semakin besar kadar abu bahan baku maka semakin besar juga kadar abu pada arang aktif.

Hasil analisis sidik ragam pada Tabel 2 menunjukkan bahwa interaksi antara kedua faktor, faktor jenis limbah sagu dan durasi *steam* berpengaruh terhadap kadar abu arang aktif yang dihasilkan. Hasil uji BNJ menunjukkan bahwa kadar abu terkecil pada arang aktif batang sagu tanpa *steam* dan tidak berbeda dengan kadar abu pada arang aktif batang sagu durasi *steam* 60 menit dan arang aktif batang sagu durasi *steam* 100 menit (Tabel 3). Hal ini disebabkan waktu pemanasan yang lebih singkat sehingga senyawa organik terutama karbon tetap banyak dan jumlah senyawa anorganik tetap. Kadar abu merupakan rasio antara jumlah senyawa anorganik dengan jumlah senyawa total (organik + anorganik), sehingga besar kecilnya kadar abu selain ditentukan oleh jumlah mineral juga ditentukan oleh besar kecilnya senyawa organik.

Kadar karbon terikat

Penetapan kadar karbon terikat arang aktif bertujuan untuk mengetahui kandungan karbon terikat arang aktif setelah proses aktivasi. Kadar karbon terikat arang aktif berkisar 61,54-88,63% (Tabel 1). Kadar karbon terikat arang aktif terkecil diperoleh dari arang aktif limbah empulur sagu dengan durasi

steam 60 menit dan kadar karbon terikat arang aktif terbesar diperoleh dari arang aktif batang sagu tanpa *steam*.

Hasil analisa sidik ragam pada Tabel 2 menunjukkan bahwa interaksi antara kedua faktor, faktor jenis limbah sagu dan durasi *steam* berpengaruh terhadap kadar air arang aktif yang dihasilkan. Kadar karbon terikat ditentukan oleh jumlah komponen kimia biomasa seperti selulosa dan lignin yang mengandung unsur karbon yang membentuk struktur heksagonal dan kemampuan karbon bereaksi dengan unsur H dan O membentuk gas-gas seperti CO, CO₂, dan CH₄ selama proses aktivasi. Semakin besar kadar karbon terikat menunjukkan semakin banyak struktur heksagonal arang aktif yang terbentuk.

Hasil uji BNJ menunjukkan bahwa kadar karbon terikat terbesar pada arang aktif batang sagu tanpa *steam* dan tidak berbeda dengan kadar karbon terikat pada arang aktif batang sagu durasi *steam* 60 menit (Tabel 3). Hal ini disebabkan waktu pemanasan yang lebih singkat dan jumlah *steam* yang lebih sedikit menghasilkan senyawa-senyawa CO, CO₂, dan CH₄ karena unsur karbon yang beraksi relatif singkat sehingga unsur karbon yang tersisa dalam arang aktif relatif dalam jumlah besar.

Daya serap terhadap iodium

Daya adsorpsi karbon aktif terhadap iodium mengindikasikan luas permukaan arang aktif (Müller 2010, Widihati *et al.* 2010), keberadaan struktur mikropori terutama berukuran 10 *Angstrom* dan kemampuan karbon aktif untuk mengadsorpsi komponen dengan bobot molekul rendah (Suzuki *et al.* 2007).

Tabel 2 Ringkasan sidik ragam kualitas arang limbah sagu

No	Sifat	Perlakuan	Kuadrat tengah	F-hitung
1	Rendemen, %	A	59,22	160,18 ^{**}
		B	2076,82	5617,30 ^{**}
		AB	0,31	0,85 ^{tn}
2	Kadar air, %	A	2,18	6,62 [*]
		B	0,22	0,66 ^{tn}
		AB	2,30	6,92 ^{**}
3	Kadar zat terbang, %	A	1,65	1,75 ^{tn}
		B	3,32	3,51 ^{tn}
		AB	0,18	0,19 ^{tn}
4	Kadar abu, %	A	1042,92	153,98 ^{**}
		B	104,24	15,39 ^{**}
		AB	117,30	17,32 ^{**}
5	Karbon terikat, %	A	961,64	106,61 ^{**}
		B	144,37	16,01 ^{**}
		AB	125,97	13,97 ^{**}

Keterangan: A= Jenis limbah sagu; B= Durasi *steam*; AB= Interaksi antara jenis limbah sagu dan durasi *steam*; ^{**} = berbeda sangat nyata; ^{*} = berbeda nyata; ^{tn} = tidak nyata.

Tabel 3 Hasil uji BNP arang aktif limbah sagu

Sifat - sifat	Jenis limbah sagu	Tanpa <i>steam</i>	Variasi waktu <i>steam</i>		
			60 menit	80 menit	100 menit
Kadar air, %	Empulur sagu	4,63 ^a	6,39 ^d	5,59 ^{bc}	5,79 ^{cd}
	Batang sagu	5,76 ^{cd}	4,74 ^a	5,00 ^{ab}	4,49 ^a
Kadar abu, %	Empulur sagu	15,52 ^b	33,43 ^e	22,24 ^c	25,72 ^d
	Batang sagu	7,74 ^a	8,61 ^a	17,2 ^b	10,64 ^a
Karbon terikat, %	Empulur sagu	81,44 ^{cd}	61,54 ^f	73,55 ^e	69,98 ^e
	Batang sagu	88,63 ^a	86,33 ^{ab}	77,75 ^d	84,44 ^{bc}

Besarnya daya serap arang aktif terhadap iodium yang diperoleh pada penelitian ini berkisar antara 158,60-972,60 mg g⁻¹ (Tabel 1). Daya serap terhadap iodium terkecil diperoleh dari arang aktif empulur sagu tanpa *steam* dan daya serap terhadap iodium terbesar diperoleh dari arang aktif batang sagu durasi *steam* 100 menit. Daya adsorpsi sangat bergantung pada karakteristik karbon aktif seperti kadar karbon terikat, kadar abu, dan luas permukaan. Faktor utama yang sangat berpengaruh terhadap daya adsorpsi tersebut adalah luas permukaan

karbon aktif karena mekanisme adsorpsi berkaitan dengan jumlah pori-porinya. Semakin luas permukaan karbon aktif maka aktivitas daya serapnya tinggi. Semakin banyak pori yang terbentuk, semakin tinggi luas permukaan karbon yang dihasilkan (Pujiyanto 2010).

Struktur kristalit arang aktif

Penetapan struktur kristalit arang aktif bertujuan untuk mengetahui adanya struktur kristal yang berketeraturan tinggi (kristalin) dan yang tidak beraturan (*amorf*). Pola struktur kristalin

arang aktif disajikan dalam bentuk grafik dan tabel difraktogram X-RD, data puncak, sudut theta, jarak antar lapisan aromatik (*Angstrom*), dan intensitas spektrum (*Counts*). Grafik hasil X-RD pada Gambar 1 menunjukkan bahwa semua arang aktif yang diperoleh memiliki pola struktur kristalit yaitu dengan terbentuknya puncak pada sudut difraksi sekitar 20 derajat (θ_{002}) dan puncak pada sudut difraksi sekitar 40 derajat (θ_{100}). Hasil analisis X-RD yang diperoleh pada penelitian adalah kristalinitas (X) berkisar 20,57-35,98%, jarak lapisan aromatik (d_{002}) berkisar 0,335-0,408 nm, tinggi kristal (L_c) berkisar 1,437-2,054 nm, dan jumlah lapisan aromatik (N) berkisar 3,87-6,01 (Tabel 4).

Arang aktif merupakan padatan yang tidak seratus persen memiliki daerah *amorf* (Marsh 2006), tetapi juga memiliki daerah kristalin. Berdasarkan Tabel 1 dan 4 daerah kristalin arang aktif limbah sagu tidak berkorelasi dengan daya serap iodium. Arang aktif yang memiliki daerah kristalin terbesar (35,95%) kemampuan penyerapan terhadap iodium juga yang terbesar (972,60 mg g⁻¹). Jarak lapisan aromatik, jumlah lapisan dan tinggi kristal arang aktif relatif sama namun daya serap arang aktif sangat jauh berbeda. Nilai derajat kristalinitas arang aktif membentuk kurva hiperbola dengan semakin meningkatnya perlakuan durasi *steam*, sedangkan nilai derajat kristalinitas arang aktif limbah batang sagu cenderung lebih besar dari arang aktif limbah empulur sagu. Hal ini disebabkan jumlah selulosa bahan baku yang berbeda, dan selulosa sebagian besar terdiri dari daerah kristalin sekitar 70% (Rowell 2005).

Struktur gugus fungsi arang aktif

Penetapan struktur gugus fungsi arang aktif bertujuan untuk mengetahui kemurnian arang aktif yang dihasilkan. Arang aktif yang diharapkan adalah arang aktif yang memiliki gugus C berikatan dengan C. Pola struktur gugus fungsi arang aktif yang dihasilkan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk grafik analisis spektrofotometri inframerah, bilangan gelombang (cm⁻¹), dan intensitas spektrum (%T) (Gambar 2) serta vibrasi dan gugus fungsi yang terbentuk (Tabel 5 dan 6).

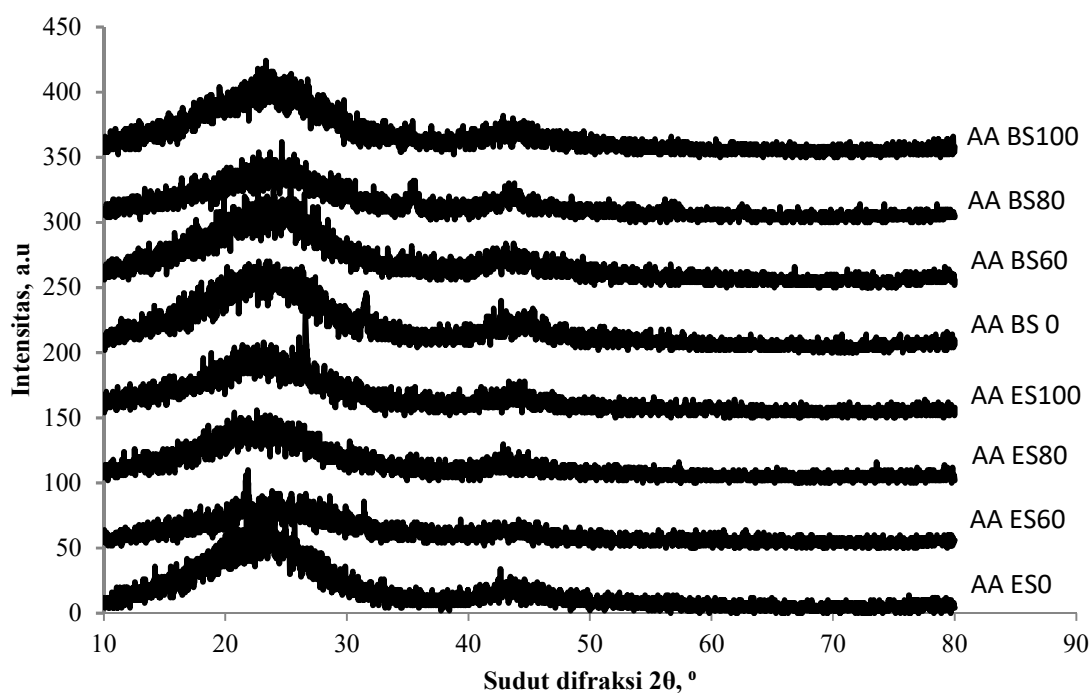
Berdasarkan hasil analisis FTIR pada Tabel 5 dan 6 senyawa-senyawa yang terkandung dalam arang aktif limbah sagu meliputi senyawa hidrokarbon, senyawa aromatik, senyawa nitrogen, dan senyawa fosfor. Arang aktif limbah empulur sagu tanpa *steam* memiliki senyawa paling banyak ditandai dengan banyaknya pita serapan yang terbentuk yang didominasi oleh senyawa-senyawa aromatik, sedangkan arang aktif batang sagu durasi *steam* 60 menit memiliki senyawa yang paling sedikit ditandai dengan terdapatnya 5 pita serapan meliputi senyawa-senyawa hidrokarbon, senyawa nitrogen, dan senyawa fosfor. Hal tersebut juga dapat dilihat pada Gambar 3 yaitu perlakuan arang aktif tanpa *steam* banyak terbentuk puncak dibandingkan dengan perlakuan dengan *steam*. Hal ini disebabkan terjadi pencucian senyawa-senyawa pada pori-pori arang aktif selama proses aktivasi menggunakan *steam*.

Spektrogram FTIR dari arang aktif limbah sagu AAES menunjukkan adanya vibrasi ikatan-ikatan karbon dengan karbon pada bilangan gelombang 1053,81 cm⁻¹ (ikatan karbon tunggal) 1631,61 cm⁻¹

Tabel 4 Struktur arang aktif limbah sagu dari analisis XRD analisis XRD

Arang aktif	X, %	θ_{002} , °	d d_{002} , nm	θ_{100} , °	d d_{100} , nm	Lc, nm	N	La, nm
ES tanpa <i>steam</i>	24,64	23,82	0,37	42,71	0,21	1,76	4,71	4,17
ES <i>steam</i> 60 menit	24,39	21,79	0,41	43,05	0,21	2,05	5,04	3,53
ES <i>steam</i> 80 menit	20,57	22,65	0,39	42,91	0,21	1,84	4,68	5,62
ES <i>steam</i> 100 menit	21,20	26,63	0,34	42,90	0,21	2,01	6,01	4,69
BS tanpa <i>steam</i>	27,30	24,23	0,37	45,18	0,20	1,58	4,29	4,50
BS <i>steam</i> 60 menit	23,99	24,96	0,36	42,35	0,21	1,63	4,57	3,29
BS <i>steam</i> 80 menit	23,60	23,97	0,37	43,04	0,21	1,44	3,87	3,18
BS <i>steam</i> 100 menit	35,98	23,75	0,37	42,82	0,21	1,58	4,21	3,20

Keterangan : ES = Empulur sagu; BS = Batang sagu



Gambar 1 Grafik XRD arang aktif limbah sagu perlakuan durasi *steam*.

dan $1736,23\text{ cm}^{-1}$ (ikatan karbon ganda), AAES 60 menit ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang $1072,59\text{ cm}^{-1}$, AAES 80 menit ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang $1086,09\text{ cm}^{-1}$, ikatan karbon ganda pada bilangan gelombang $1628,84\text{ cm}^{-1}$, AAES 100 menit ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang $1088,76\text{ cm}^{-1}$,

AABS ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang $1056,85\text{ cm}^{-1}$, ikatan karbon ganda pada bilangan gelombang $1632,06\text{ cm}^{-1}$, AABS 60 menit ikatan karbon ganda pada bilangan gelombang $1629,97\text{ cm}^{-1}$, AABS 80 menit ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang $1056,93\text{ cm}^{-1}$, ikatan karbon ganda pada bilangan gelombang $1631,55\text{ cm}^{-1}$, dan

AABS 100 menit ikatan karbon tunggal pada bilangan gelombang 1116,42 cm^{-1} , ikatan karbon ganda pada bilangan gelombang 1631,85 cm^{-1} (Stuart 2004). Menurut Burchell (1999) energi ikatan atom karbon arang aktif dipengaruhi oleh jenis ikatan karbon. Ikatan karbon tunggal memiliki energi sebesar 348 Kj mol^{-1} dan ikatan karbon ganda memiliki energi sebesar 612 Kj mol^{-1} . Perbedaan energi pada ikatan karbon menyebabkan terjadinya daya tarik terhadap molekul di

sekitarnya untuk mencapai kesetimbangan.

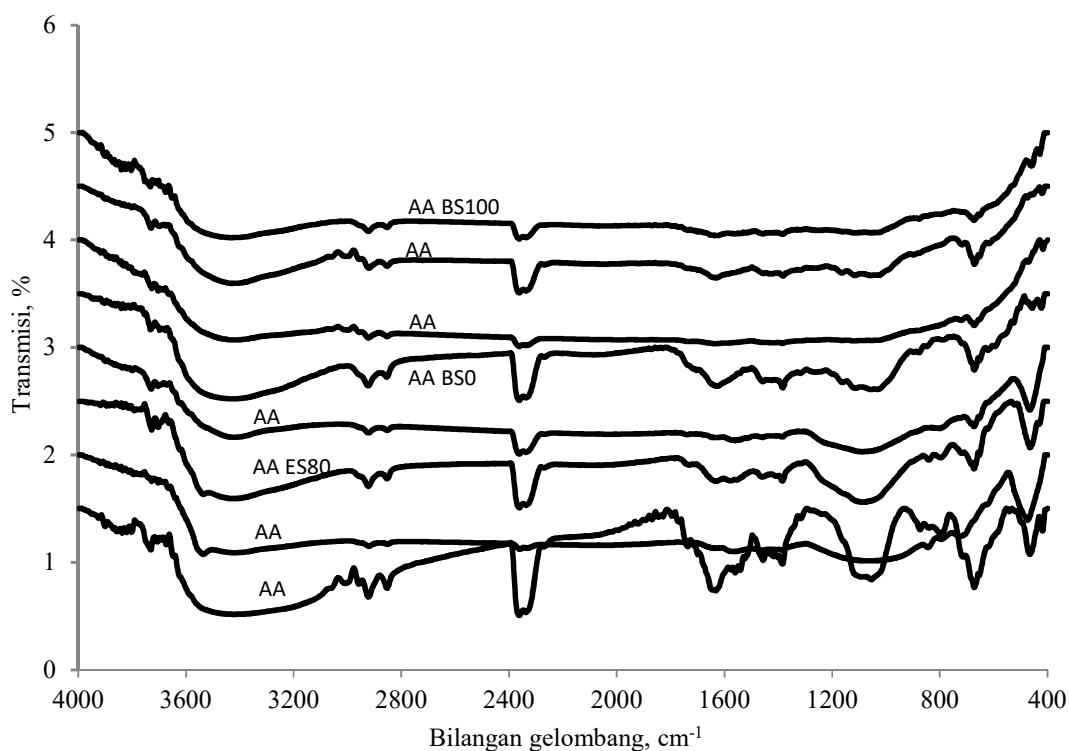
Hasil Spektogram FTIR arang aktif limbah sagu juga mengidentifikasi senyawa nitrogen seperti NO_2 pada bilangan gelombang 1370-1390 cm^{-1} , 1530-1560 cm^{-1} , 1620-1660 cm^{-1} , dan senyawa fosfor seperti P-S pada bilangan gelombang 200-500 cm^{-1} , P=S pada bilangan gelombang 500-850 cm^{-1} (Stuart 2004).

Tabel 5 Gugus fungsi arang aktif empulur sagu dari analisis FTIR

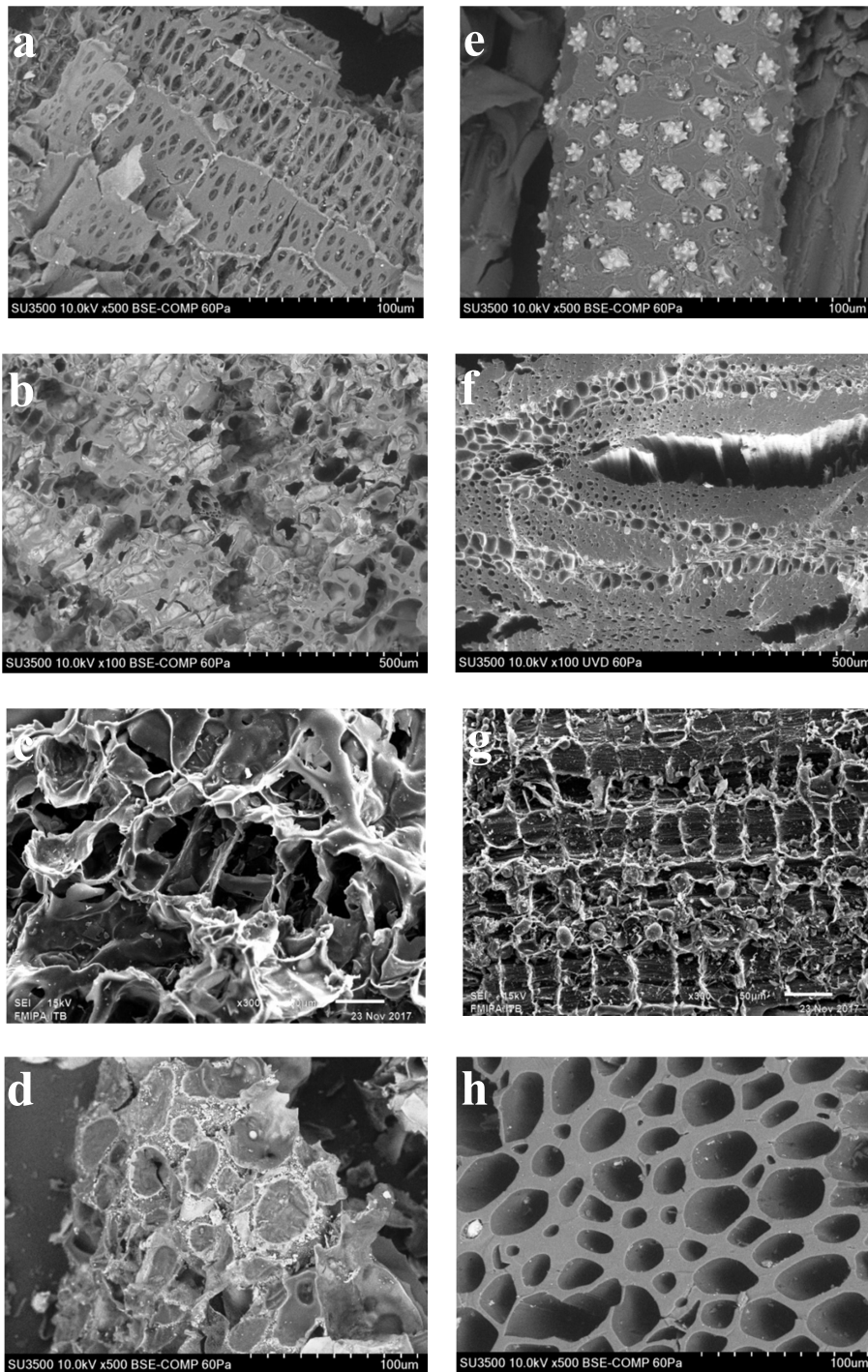
Jenis arang aktif	Bilangan gelombang, cm^{-1}			
	Senyawa hidrokarbon	Senyawa aromatik	Senyawa nitrogen	Senyawa fosfor
AA ES	672,45	794,87	672,45	418,56
	794,87	873,62	1053,81	466,09
	873,62	1053,81	1384,71	541,68
	1631,65	1456,79	1541,18	672,45
	3009,32	1541,18		794,87
		1560,01		2361,39
		1736,23		
		1794,70		
		1844,95		
		1869,26		
	3009,32			
AA ES 60 menit	725,48	725,48	725,48	474,55
		1072,59	1072,59	725,48
		1571,64	1571,64	2359,61
AA ES 80 menit	673,13	797,03	673,13	464,45
	797,03	840,40	797,03	673,13
	840,40	1086,09	840,40	797,03
	1628,84		1086,09	840,40
			1384,97	1086,09
		1628,84	2361,19	
AA ES 100 menit	673,33	1088,76	673,33	466,01
		1559,64	1088,76	673,33
			1559,64	1088,76
				2361,23

Tabel 6 Gugus fungsi arang aktif batang sagu dari analisis FTIR

Jenis arang aktif	Bilangan gelombang, cm^{-1}			
	Hidrokarbon alifatik	Senyawa aromatik	Senyawa nitrogen	Senyawa fosfor
AA BS	672,58	1056,85	672,58	422,20
	1632,06		1056,85	455,41
			1383,49	672,58
			1632,06	2361,63
AA BS 60 menit	672,40	-	672,40	417,09
	1629,97		1629,97	672,40
				2361,02
AA BS 80 menit	671,73	1056,93	671,73	419,92
	1631,55		1382,65	671,73
			1056,93	2361,34
			1631,55	
AA BS 100 menit	673,11	1116,42	673,11	466,01
	1631,85		1116,42	673,33
			1383,63	1088,76
			1631,85	2361,23



Gambar 2 Grafik FTIR arang aktif limbah sagu perlakuan durasi *steam*.



Gambar 3 Empulur sagu (a), arang empulur sagu (b) arang aktif empulur sagu tanpa *steam* (c) arang aktif empulur sagu *steam* (d), limbah batang sagu (e), arang batang sagu (f), arang aktif batang sagu tanpa *steam* (g), arang aktif batang sagu *steam* (h).

Morfologi permukaan

Analisis morfologi permukaan dilakukan pada bahan baku limbah sugu, arang limbah sugu, arang aktif tanpa *steam*, dan arang aktif perlakuan *steam*. Pada Gambar 3a dan 3e menunjukkan bahwa limbah sugu memiliki pori yang sempit dan pori yang tidak terlihat karena ditutupi oleh senyawa-senyawa pengotor seperti mineral. Gambar 3b dan 3f menunjukkan bahwa proses karbonisasi telah merubah struktur permukaan arang sehingga pori-pori telah terlihat namun diameter pori-pori tersebut kecil dan belum seluruhnya terbuka. Ukuran pori arang yang terbentuk masih berukuran kecil karena tertutupi oleh abu, tar, dan resin yang terbentuk selama proses karbonisasi. Gambar 3c dan 3g menunjukkan permukaan arang aktif yang telah diaktivasi dengan permukaan telah memperlihatkan pori-pori yang lebih besar dan bersih namun dinding pori-pori tersebut juga telah mengalami kerusakan. Gambar 3d dan 3h menunjukkan permukaan arang aktif limbah sugu yang diaktivasi dengan perlakuan *steam* lebih baik dengan pori-pori arang aktif yang terbentuk lebih bersih dengan dinding pori-pori yang masih utuh. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Lempang *et al.* (2012) bahwa semakin lama waktu aktivasi semakin bersih permukaan arang aktif.

Menurut Novicio *et al.* (1998) dan Bonelli *et al.* (2001), pembentukan dan pembesaran pori disebabkan oleh penguapan komponen selulosa yang terdegradasi dan lepasnya zat terbang yang mengakibatkan senyawa hidrokarbon berkurang sehingga permukaan arang aktif semakin jelas terlihat. Aktivasi lanjutan secara fisik juga berperan penting dalam

pembentukan pori melalui proses penguraian hidrokarbon membentuk senyawa volatil karena panas. Luas permukaan arang aktif akan meningkat dengan hilangnya senyawa volatil tersebut (Khah & Ansari 2009).

Kesimpulan

Aktivasi pada suhu 800 °C disertai *steam* menghasilkan arang aktif limbah batang sugu dan limbah empulur sugu dengan daya serap iodium yang lebih besar dibandingkan dengan aktivasi tanpa menggunakan *steam*. Kadar abu arang aktif limbah empulur sugu lebih besar dibandingkan dengan kadar abu arang aktif limbah batang sugu.

Daftar Pustaka

- Angst TE, Six J, Reay DS, Sohi SP. 2014. Impact of pine chip biochar on trace greenhouse gas emissions and soil nutrient dynamics in an annual ryegrass system in California. *Agric Ecosyst Environ.* 191:17-26.
- Atkinson JA, Fitzgerald JD, Hipps NA. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil.* 337:1–18.
- Becker R, Dorgerloh U, Helmig M, Mumme J, Diakité M, Nehls I. 2013. Hydrothermally carbonized plant materials: Patterns of volatile organic compounds detected by gas chromatography. *Biores Technol.* 130: 621–628.
- Bonelli PR, Rocca PAD, Cerrela EG, Cukierman AL. 2001. Effect of pyrolysis temperature on composition, surface properties, and thermal degradation rates of Brazil nut shell. *Biores Technol.* 76:15–22.

- Burchell TD. 1999. *Carbon Materials for Advanced Technologies. First edition*. Oxford: Elsevier Science Ltd.
- Busch D, Kammann C, Grünhage L, Müller C. 2011. Simple biotoxicity tests for evaluation of carbonaceous soil additives: establishment and reproducibility of four test procedures. *J Environ Quality*. 40:1–10.
- Gaskin JW, Steiner C, Harris K, Das KC, Bibens B. 2008. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transactions Asabe*. 51: 2061–2069.
- Glaser B. 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biol Sci*. 362:187–196.
- Graber E, Tsechansky L, Gerst, Z, Lew B. 2011. High surface area biochar negatively impacts herbicide efficacy. *Plant Soil*. 353: 95–106.
- Gul S, Whalen JK, Thomas BW, Sachdeva V, Deng H. 2015. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agri Ecosyst Environ*. 206: 46-59.
- Hilscher A, Heister K, Siewert C, Knicker H. 2009. Mineralisation and structural changes during the initial phase of microbial degradation of pyrogenic plant residues in soil. *Organic Geochemi* 40: 332–342.
- Khah AM, Ansari R. 2009. Activated charcoal: preparation, characterization, and application: a review article. *J Chemtech Res*. 1(4):859-864.
- Kim JS, Sparovek G, Longo RM, De Melo WJ, Crowley D. 2007. Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biol Biochemi*. 39: 684–690.
- Koelmans AA, Jonker MTO, Cornelissen G, Bucheli TD, Van Noort PCM, Atkinson JA, Fitzgerald JD, Hipps NA. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*. 337: 1–18.
- Kookana RS, Sarmah AK, Van Zwieten L, Krull E, Singh B. 2011. Biochar application to soil: agronomic and environmental benefits and unintended consequences. *Adv Agron*. 112:103–143.
- Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen HQ, Bogomolova I, Xu XL. 2009. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by C-14 labeling. *Soil Biol Biochem*. 41: 210–219.
- Lee YS, Basova YV, Edie DD, Reid LK, Newcombe SR, Ryu SK, 2003. Preparation and characterization of trilobal activated carbon fibers. *Carbon*. 38: 2573-2584.
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biol Biochemi*. 43: 1812–1836.
- Lehmann J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers Ecol Environ*. 5: 381–387.
- Lempang M, Syafii W, Pari G. 2012. Sifat dan mutu arang aktif tempurung kemiri. *J Penelitian Hasil Hutan*. 30(2): 100-113.

- Major J, Rondon M, Molina D, Riha SJ, Lehmann J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savannah oxisol. *Plant Soil*. 333: 117-128.
- Manocha S, Chavda Aj, Punvar Pd, Patel K. 2010. Activated Carbon From Waste Biomass Of Phyllisum Husk : Effect Of Steam Activation On SurFACE Characteristics. *J Pure Appli Sci*. 18:88-91.
- Manocha S. 2003. Porous carbon. *Sadhana*. 28(1-2): 335-348.
- Marsh H, Reinoso FR. 2006. *Activated Carbon*. Amsterdam : Elsevier.
- Müller BR. 2010. Effect Of Particle Size And Surface Area on the adsorption of albumin-bonded bilirubin on activated carbon. *Carbon*. 48: 3607–3615.
- Nguyen BT, Lehmann J, Hockaday WC, Joseph S, Masiello CA. 2010. Temperature sensitivity of black carbon decomposition and oxidation. *Environ Sci Technol*. 44: 3324–3331.
- Novak JM, Busscher WJ, Laird DL, Ahmedna M, Watts DW, Niandou MAS. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a South-eastern Coastal plain soil. *Soil Sci*. 174: 105–112.
- Novak JM, Lima I, Xing B, Gaskin JW, Steiner C, Das KC, Ahmedna M, Rehrh D, Watts DW, Busscher WJ, Schomberg H. 2009. Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals Environ Sci*. 3: 195–206.
- Novicio LP, Hata T, Kajimoto T, Imamura Y, Ishihara S. 1998. Removal of mercury from aqueous solutions of mercuric chloride using wood powder carbonized at high temperature. *J Wood Res*. 85:48–55
- Park SH, Jang JH, Lee M, Maulana S, Kim NH, Wistara NJ, Febrianto F. 2017. Fuel properties of Indonesian bamboos carbonized at different temperature. *JITKT*. 16(1): 1-11.
- Pujjiyanto. 2010. Pembuatan Karbon Aktif Super dari Batu Bara dan Tempurung Kelapa [tesis]. Depok (ID): Universitas Indonesia.
- Rillig MC, Wagner M, Salem M, Antunes PM, George C, Ramke HG, Titirici MM, Antonietti M. 2010. Material derived from hydrothermal carbonization: effects on plant growth and arbuscular mycorrhiza. *Appl Soil Ecol*. 45:238–242.
- Rowell RM. 2005. Wood Chemistry and Wood Composites. *Handbook*. Florida: CRC Press.
- Silber A, Levkovitch I, Graber ER. 2010. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environ Sci Technol*. 44: 9318–9323.
- Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biol Biochem*. 41: 1301–1310.
- Steiner C, Das KC, Garcia M, Forster B, Zech W. 2008. Charcoal and smoke extract stimulate the soil microbial community in a highly weathered xanthic Ferralsol. *Pedobiologia*. 51: 359–366.
- Steiner C, Teixeira WG, Lehmann G, Nehls T, de Macedo JLV, Blum WEH, Zech W. 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.
- Stuart B. 2004. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd ISBNs: 0-470-85427-8 (HB); 0-470-85428-6 (PB).
- Sukartono S, Utomo WH, Kusuma Z, Nugroho WH. 2011. Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L.) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *J Trop Agric*. 49: 47-52.
- Suzuki RM, Andrade AD, Sousa JC, Rollemberg. 2007. Preparation and characterization of activated carbon from rice bran. *Biores Technol* 98:1985-1991.
- Syakir M, MH. Bintoro, H. Agusta, Hermanto. 2008. Pemanfaatan Limbah Sagu Sebagai Pengendalian Gulma Pada Lada Perdu. *Jurnal Littri* 14(3):107 – 112.
- Van Zwieten L, Kimber S, Morris S, Chan YK, Downie A, Rust J, Joseph S, Cowie A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*. 327: 235–246.
- Widihati IAG, Ratnayani O, Angelina Y. 2010. Karakterisasi keasaman dan luas permukaan tempurung kelapa hijau (*Cocos nucifera*) dan pemanfaatannya sebagai biosorben ion CD^{2+} . *J Kim* 4:7-14.
- Riwayat naskah:
 Naskah masuk (*received*): 27 November 2017
 Diterima (*accepted*): 15 Januari 2018