Pembuatan dan pemanfaatan arang limbah kayu untuk menyerap gas metan pada lahan tanaman padi

The production and utilization of charcoal derived from wood waste to absorb methane gas in rice fields

Heri Soedarmanto^a, Evy Setiawati^{b,*}, Wahida Annisa^c, Dwi Harsono^b

^a Politeknik Negeri Banjarmasin

Jl. Brigjen H. Hasan Basri Kayu Tangi Banjarmasin-Indonesia

^b Balai Riset dan Standardisasi Industri Banjarbaru

Jl. Panglima Batur Barat No.2 Banjarbaru-Indonesia

^c Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa

Jl. Kebun Karet Loktabat Utara Banjarbaru-Indonesia

*E-mail: evy.kemenperin@gmail.com

Diterima 10 April 2020 Direvisi 10 Mei 2020 Disetujui 28 Juni 2020

ABSTRAK

Lahan padi merupakan sumber terbesar dari emisi CH_4 dan berkontribusi terhadap 12% total emisi tahunan. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas metan adalah dengan pemberian arang. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh arang perendaman berbahan baku serbuk limbah kayu terhadap penurunan emisi gas metan pada lahan padi. Limbah serbuk kayu yang digunakan dalam penelitian ini berukuran 0,42-1,00 mm dan dipirolisis selama 2 jam pada suhu $(350-550)^\circ\text{C}$. Arang yang dihasilkan (kondisi panas) kemudian direndam menggunakan air selama 30 menit. Arang hasil perendaman kemudian disaring dan dikering-udarkan. Tanah sulfat masam ditambahkan arang hasil perendaman sesuai dosis perlakuan. Perlakuan penelitian adalah (1) kontrol tanah, tanpa arang perendaman (K0); (2) 30 gram arang perendaman + tanah (K1); (3) 60 gram arang perendaman + tanah (K2); (4) 90 gram arang perendaman + tanah (K3); (5) 120 gram arang perendaman + tanah (K4); (6) 150 gram arang perendaman + tanah (K5). Pengamatan terhadap emisi gas metan dilakukan selama 30, 60, dan 90 Hari Setelah Tanam (HST). Untuk mengetahui pengaruh suhu dan perendaman arang terhadap kualitas arang yang dihasilkan serta mengetahui dosis arang terhadap emisi gas metan digunakan Rancangan Acak Lengkap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, nilai pH, kadar abu, dan *fixed-C* semakin meningkat, sedangkan hidrogen dan oksigen menurun. Perendaman arang menghasilkan produk arang dengan pori-pori relatif lebih banyak dan terstruktur. Fluks metan menurun seiring bertambahnya dosis arang perendaman, yaitu 22,57 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 9,73 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 30 HST, 55,07 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 13,40 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 60 HST, dan 92,51 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 19,59 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 90 HST.

Kata Kunci : arang perendaman; limbah kayu; fluks metan

ABSTRACT

Rice fields are the largest source of CH_4 emissions and contribute to 12% of total annual emissions. Providing charcoal treatment is one way to reduce methane emissions. The purpose of this study was to analyze the soaked charcoal derived from wood waste to reduce methane gas emissions of rice fields. The sawdust used in this study was 0.42-1.00 mm and pyrolyzed for 2 hours at $(350-550)^\circ\text{C}$. The resulted charcoal in a heat condition was then soaked using water for 30 minutes, filtered, and dried. The soaked charcoal was added according to the dosage given. The research treatments were (1) soil control, without soaked charcoal (K0); 30 grams soaked charcoal + soil (K1); (3) 60 grams

soaked charcoal + soil (K2); (4) 90 grams soaked charcoal + soil (K3); (5) 120 grams soaked charcoal + soil (K4); (6) 150 grams soaked charcoal + soil (K5). Observations on methane gas emissions were carried out for 30, 60, and 90 Days After Planting (DAP). The Completely Randomized Design was used to determine the effect of temperature and soaking of charcoal on the charcoal quality and to determine the dose of charcoal on methane gas emissions. The results showed that with the increase in pyrolysis temperature, pH, ash content, and fixed-C increased, while hydrogen and oxygen increased. The soaked charcoal had larger and higher structured pore. Methane flux was increased as the increasing of soaked charcoal at 30, 60, 90 DAP, which were (22.57 to 9.73) $\text{mg/m}^2/\text{day}$, (55.07 to 13.40) $\text{mg/m}^2/\text{day}$, and (92.51 to 19.59) $\text{mg/m}^2/\text{day}$, respectively.

Keywords : soaked charcoal; wood waste; methane flux

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim adalah salah satu masalah lingkungan utama yang disebabkan terutama oleh meningkatnya emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Salah satu sumber emisi GRK adalah metan (CH_4), yang merupakan penyumbang 70% emisi global (Wang *et al.*, 2017). Metan adalah hidrokarbon sederhana dengan empat ikatan C-H yang setara, yang dihasilkan dari dekomposisi anaerobik bahan organik dengan bantuan bakteri pembentuk metan. Konsentrasi gas metan di atmosfer telah meningkat 3 (tiga) kali lipat (Towprayoon, Smakgahn, & Poonkaew, 2005), dan bersifat destruktif kedua dibandingkan dengan emisi karbon dioksida (CO_2), karena memiliki indeks potensi pemanasan global 25 kali lipat dari CO_2 dan diperkirakan dalam 100 tahun ke depan menjadi 20% kontributor gas rumah kaca (Mohajan, 2012; Tian *et al.*, 2012).

Sektor pertanian menyumbang sekitar 10-20% dari total konsentrasi GRK atmosfer saat ini (Tubiello, 2013). Lahan padi merupakan sumber terbesar dari emisi CH_4 dan berkontribusi terhadap 12% total emisi tahunan padi (Zhao *et al.*, 2015). Pengurangan emisi gas metan dari ekosistem padi adalah langkah pencegahan paling utama untuk mengatasi pemanasan global. Beberapa cara untuk mengurangi emisi gas metan adalah memelihara ketinggian air tanah, pemberian amandemen tanah dan sebagainya (Parthasarathi, Vanitha, Mohandass, & Vered, 2019). Arang, yang merupakan bahan amandemen tanah, telah diusulkan sebagai cara

penanggulangan yang mutakhir untuk mengurangi masalah perubahan iklim karena mampu menghambat emisi gas rumah kaca lahan pertanian (Xiao *et al.*, 2018).

Arang adalah bahan organik karbon hitam, produk pirolisis yang mengandung konstituen bahan baku (abu) yang tidak mudah terbakar. Arang memiliki berbagai kegunaan dan telah digunakan sebagai karbon aktif untuk filtrasi polutan air limbah, sumber bahan bakar, retensi nutrisi tanah, meningkatkan produktivitas tanaman, meningkatkan kapasitas menahan air, sumber penyerapan karbon, serta mengurangi emisi tanah. Arang sebagai sumber penyerapan karbon, bersumber pada stabilitas karbonnya. Stabilitas karbon dalam arang mencegah dekomposisi jangka pendek menjadi hidrokarbon yang lebih ringan, seperti CO_2 atau CH_4 ke atmosfer yang merupakan emisi gas rumah kaca. Semakin lama arang dapat mempertahankan strukturnya (stabilitas karbon lebih tinggi) dan mencegah karbonnya memasuki kembali atmosfer, semakin besar peran arang dalam rencana penyerapan karbon (Woolley & Hallowell, 2018).

Arang dapat diperoleh dari berbagai macam biomassa, seperti limbah pertanian, kotoran hewan, limbah kehutanan, dan sebagainya. Biomassa yang mengandung lignoselulosa, seperti kayu mengandung lebih tinggi lignin dibanding biomassa lainnya sehingga mampu menghasilkan rendemen yang tinggi saat dipirolisis (Edmunds, 2012). Produksi kayu yang dihasilkan oleh industri

penggergajian kayu di Kalimantan Selatan yaitu sebesar 71.777.759 m³, dengan limbah yang dihasilkan sebesar 40,48%. Dari industri pengolahan kayu dihasilkan serbuk kayu rata - rata sebesar 2,21% volume (Purwanto, 2016). Beberapa penelitian terdahulu telah menyebutkan bahwa pengaruh arang berbahan baku kayu memiliki potensi terbesar untuk mengurangi emisi N₂O dari tanah yang diberi pupuk (Ramlow & Cotrufo, 2017). Semakin tinggi suhu pirolisis biomassa kayu, akan menghasilkan arang yang lebih efisien untuk mengurangi emisi GRK (Stensson, 2018). Arang kayu durian yang dipirolisis pada suhu 550°C mampu menurunkan emisi gas metan sebesar 9,57-73,25% (Setiawati, Priyono, Mardiana, & Soemarno, 2019).

Dalam rangka meningkatkan kualitas produk, arang dapat diaktivasi secara fisika maupun kimia (Johnston, 2018) sebelum diaplikasikan ke tanah. Pada penelitian ini, digunakan bahan organik berupa arang limbah serbuk kayu hasil perendaman. Aplikasi bahan organik untuk lahan pertanian yang ditanami padi, dapat mengurangi emisi CH₄ sebesar 40-50% di lahan tergenang yang ditanami padi (Maf'tuah, Simatupang, Subagio, & Nursyamsi, 2016). Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik arang perendaman berbahan baku limbah serbuk kayu dan aplikasinya terhadap penurunan emisi gas metan pada lahan tanaman padi.

II. BAHAN DAN METODE

2.1. Bahan dan alat

Bahan dari penelitian ini adalah limbah serbuk kayu, yang terdiri dari campuran kayu keras (kayu ulin) dan kayu lunak (kayu durian), *crusher*, ayakan, reaktor pirolisis, sungkup, pot, padi varietas Inpara 2, dan alat uji emisi.

2.2. Metode

Limbah kayu ulin (*Eusideroxylon zwageri*) dihaluskan menggunakan *crusher* hingga menghasilkan serbuk berukuran 0,42-1,00 mm. Sebanyak 1500 g serbuk kayu ulin dipirolisis dengan oksigen terbatas menggunakan reaktor listrik 500

W pada suhu 350, 450, dan 550°C selama 2 jam dengan laju pemanasan 10°C/min. Arang panas yang dihasilkan, terdiri dari arang 350°C (NON350), 450°C (NON450), dan 550°C (NON550) kemudian direndam menggunakan air selama 30 menit. Arang hasil perendaman kemudian disaring dan dikeringkan udara untuk menghasilkan arang perendaman 350°C (AKT350), 450°C (AKT450), dan 550°C (AKT550). Analisis karakteristik arang hasil perendaman sebelum dan setelah perendaman terdiri dari kadar abu (ASTM Standard D.3174), *volatile matter* (ISO 562), *fixed-C (by difference)*, karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen (ASTM Standar D.5373), dan pH. Morfologi arang dianalisis menggunakan *scanning electron microscopic* (SEM) method (Tescan Vega 3SB) pada perbesaran 1000x.

Tanah yang digunakan untuk menanam padi adalah tanah sulfat masam. Sebanyak 12 kg tanah sulfat masam kering udara yang diambil dari Stasiun Percobaan Belandean, Kabupaten Barito Kuala, Kalimantan Selatan pada kedalaman 0-20 cm dimasukkan ke dalam pot percobaan. Tanah tersebut digenangi air setinggi kurang lebih 2 cm dari permukaan tanah. Varietas padi Inpara 2 lebih dipilih dalam penelitian ini karena tahan terhadap tanah masam dengan umur tanaman yang singkat (Susilawati & Rumanti, 2018). Pot tersebut ditambahkan arang perendaman sesuai dosis perlakuan. Perlakuan penelitian adalah (1) kontrol tanah tanpa arang perendaman (0 t/ha) (K0); (2) 30 gram arang perendaman (4 t/ha) + tanah (K1); (3) 60 gram arang perendaman (8 t/ha) + tanah (K2); (4) 90 gram arang perendaman (12 t/ha) + tanah (K3); (5) 120 gram arang perendaman (16 t/ha) + tanah (K4); (6) 150 gram arang perendaman (20 t/ha) + tanah (K5). Pengamatan terhadap emisi gas metan dilakukan selama 30, 60, dan 90 Hari Setelah Tanam menggunakan sungkup yang dibaca oleh detektor *portable*. Percobaan dilakukan di rumah kaca Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa Banjarbaru (BALITTRA) pada suhu (T) ruangan (26-38)°C dan kelembaban relatif 50-80%. Analisis statistik penelitian ini menggunakan Rancangan Acak

Lengkap (RAL) model faktorial (Oramahi, 2016) dengan tiga kali ulangan. Jika ada perbedaan perlakuan, maka dilakukan analisis DMRT (Duncan's Multiple Range Test) menggunakan software SAS versi 9.1. Pengaruh suhu dan perendaman arang terhadap kualitas arang yang dihasilkan serta dosis arang perendaman terhadap emisi gas metan dianalisis menggunakan analisis varian dua arah dengan tingkat signifikansi 5%.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sifat dan mutu arang hasil perendaman

Karakteristik arang setelah perendaman disajikan pada Tabel 1 yang menunjukkan saat suhu pirolisis meningkat, pH dan kadar abu juga semakin meningkat, berturut-turut bernilai 4,4-8,8 dan (1,1-6,9)%. Peningkatan suhu pirolisis akan meningkatkan pH arang yang dihasilkan karena menghasilkan kadar abu yang lebih tinggi (Hasan, Bachmann, Loh, Manroshan, & Ong, 2019; Gezahegn, Sain, & Thomas, 2019) akibat dari perubahan unsur hara menjadi bentuk oksida dan karbonat sehingga meningkatkan alkalinitas arang (Berek & Hue, 2016). Zhao, Ta & Wang (2017) juga menyatakan bahwa suhu pirolisis yang tinggi menyebabkan adanya sisa kandungan mineral anorganik sehingga menyebabkan kadar abu dan pH makin meningkat.

Metode perendaman arang juga dapat meningkatkan pH arang akibat dari pencucian mineral abu dari arang panas. Arang yang diproduksi pada suhu antara 400 dan 600°C mengandung kadar *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAH) maksimum, namun semakin tinggi suhu pirolisis memberikan lebih banyak kemungkinan kehilangan PAH dalam bentuk gas ke atmosfer, sehingga *volatile matter* juga berkurang (Dutta *et al.*, 2017). Kandungan *volatile matter* menunjukkan adanya karbon yang tersedia, sementara *fixed-C* menunjukkan fraksi karbon yang masih terikat (Basso, Miguez, Laird, Horton, & Westgate, 2013). *Volatile matter* diubah menjadi fase gas dan uap air (Promdee, Vitidsant, Vanpetch, & Ruengvilairat, 2012), sedangkan *fixed-C* menunjukkan bahwa karbon telah dikonversi menjadi karbon yang lebih stabil yang tidak dapat terdegradasi dengan mudah. *Volatile matter* telah dikonversi selama proses pirolisis menghasilkan karbon yang lebih stabil, disebut *fixed-C* (Bridges, 2013). Seiring meningkatnya suhu pirolisis, kandungan *volatile matter* dalam karbon menurun, sedangkan *fixed-C* sebaliknya. Ketika suhu pirolisis meningkat, karbon akan mempunyai karbon terikat yang besar karena terjadinya dekomposisi selulosa dan hemiselulosa (Dufour *et al.*, 2012). Selain itu, karbon terikat semakin tinggi seiring dengan meningkatnya suhu pirolisis, disebabkan oleh tingginya *volatile*

Tabel 1. Analisis Arang Sebelum dan Setelah Perendaman

Parameter	NON350	AKT350	NON450	AKT450	NON550	AKT550
pH	4,4 ± 0,1 ^e	5,4 ± 0,3 ^d	6,8 ± 0,1 ^c	8,5 ± 0,1 ^a	8,0 ± 0,1 ^b	8,8 ± 0,2 ^a
Kadar abu (%)	2,3 ± 0,3 ^b	1,1 ± 0,07 ^e	2,0 ± 0,0 ^c	1,4 ± 0,04 ^d	6,9 ± 0,0 ^a	1,9 ± 0,11 ^c
<i>Volatile matter</i> (%)	38,3 ± 0,8 ^b	45,7 ± 0,50 ^a	23,2 ± 0,6 ^c	23,2 ± 0,05 ^c	14,4 ± 0,2 ^d	16,2 ± 0,84 ^e
Fixed-C (%)	54,4 ± 0,5 ^d	47,5 ± 0,57 ^e	69,1 ± 0,3 ^c	69,3 ± 0,5 ^c	74,1 ± 0,8 ^b	78,3 ± 0,47 ^a
Carbon (%)	68,4 ± 0,6 ^c	65,4 ± 1,7 ^d	76,4 ± 1,1 ^b	76,5 ± 0,7 ^b	78,9 ± 0,9 ^a	79,9 ± 1,1 ^a
Hydrogen (%)	4,3 ± 0,6 ^{ab}	5,0 ± 0,4 ^a	3,5 ± 0,1 ^{bc}	3,9 ± 0,5 ^{bc}	3,2 ± 0,3 ^c	3,2 ± 0,6 ^c
Nitrogen (%)	0,4 ± 0,1 ^a	0,3 ± 0,1 ^b	0,5 ± 0,0 ^a	0,44 ± 0,1 ^a	0,5 ± 0,1 ^a	0,5 ± 0,0 ^a
Oksigen (%)	24,5 ± 1,0 ^b	28,3 ± 0,2 ^a	17,5 ± 0,5 ^c	17,8 ± 0,65 ^c	10,6 ± 0,7 ^e	14,5 ± 0,4 ^d

Catatan: Nilai di baris yang sama diikuti dengan *superscript* huruf yang sama berarti tidak signifikan pada $p < 0.05$ berdasarkan nilai uji DMRT ($n=3$); arang non perendaman hasil pirolisis suhu 350 °C (NON350), 450 °C (NON450), dan 550 °C (NON550); arang perendaman hasil pirolisis suhu 350 °C (AKT350), 450 °C (AKT450), dan 550 °C (AKT550)

matter yang terlepas pada saat pirolisis (Crombie, Mašek, Sohi, Brownsort, & Cross, 2013) dan berubah menjadi gas dan molekul halus.

Kandungan *volatile matter* arang sebelum dan setelah perendaman berturut-turut bekisar antara (14,4-38,3)% dan (16,2-45,7)%, sedangkan *fixed-C* pada arang sebelum dan setelah perendaman berturut-turut bekisar antara (54,4-74,1)% dan (47,5-78,3)%. Tampak bahwa *volatile matter* arang setelah perendaman sedikit mengalami peningkatan dikarenakan adanya oksigen selama proses pendinginan pasca pirolisis (Wang, Wang, & Herath, 2017). *Fixed-C* dan *volatile matter* yang dihasilkan pada penelitian ini lebih tinggi daripada hasil penelitian arang kayu durian (Chowdhury, Karim, Ashraf, & Khalid, 2016), yaitu sebesar (36,88-70,89)% dan (6,77-45,88)%. Tingginya *fixed-C* pada arang dinilai tidak hanya mampu untuk mengatasi emisi gas rumah kaca, tetapi juga mampu mempertahankan aktivitas penyerapan karbon dalam tanah dari waktu ke waktu (Calamai, Chiaramonti, Casini, & Masoni, 2020). Kandungan *volatile matter* yang tinggi dianggap sebagai penyebab utama tingginya mineralisasi karbon/hara (Ronsse, Van Hecke, Dickinson, & Prins, 2013).

Kandungan C arang sebelum dan setelah perendaman berturut-turut bekisar antara (68,4-78,9)% dan (65,4-79,9)%, meningkat seiring dengan peningkatan suhu dan sebaliknya, kandungan hidrogen dan oksigen menurun. Seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, terjadi pelepasan produk samping yang mengandung hidrogen dan oksigen serta terjadi dekomposisi ikatan oksigen (Suliman *et al.*, 2016). Perendaman arang mampu menghasilkan arang yang kaya akan karbon (Omri & Benzina, 2012). Kandungan nitrogen juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu pirolisis (Kloss *et al.*, 2012), sebaliknya, hidrogen dan oksigen semakin menurun. Pada suhu pirolisis yang tinggi, terjadi pelepasan senyawa yang mengandung hidrogen dan oksigen berbobot molekul rendah (Suliman *et al.*, 2016).

Morfologi bahan baku limbah kayu disajikan pada Gambar 1, sedangkan morfologi arang limbah kayu sebelum dan setelah perendaman disajikan pada Gambar 2. Pada Gambar 2, tampak bahwa semakin tinggi suhu pirolisis, semakin banyak terbentuk pori-pori. Semakin tinggi suhu pirolisis, struktur aromatis terbentuk lebih stabil (Lehmann & Joseph, 2009). Graber *et al.* (2010) menyatakan bahwa perlakuan secara fisika menggunakan pendinginan arang kondisi panas mampu menghindari adanya *blocking*/kondensasi senyawa tar. Selama proses perendaman, air mempunyai efek pengaktifan karena mampu menghilangkan PAH dari pori-pori arang (Asian Development Bank, 2016). Uap air panas yang dihasilkan saat perendaman mampu menembus partikel arang dari bawah ke atas sehingga menjadikan pori-pori arang lebih banyak. Oleh karena itu, pori-pori arang perendaman lebih banyak (Gambar 2 d-f) dibandingkan sebelum perendaman (Gambar 2 a-c). Pada pirolisis suhu 550°C, pori-pori arang perendaman yang dihasilkan pada penelitian ini tampak secara visual tersusun secara teratur, jelas, dan berbentuk sarang lebah (Gambar 2f) serta sangat berbeda jika dibandingkan dengan morfologi bahan baku (Gambar 1) yang didominasi oleh serat panjang longitudinal. Semakin tinggi suhu pirolisis maka pori arang akan berbentuk seperti sarang lebah (Brewer, Schmidt-rohr, Satrio, & Brown, 2009). Apabila dibandingkan dengan sebelum perendaman, tampak bahwa arang sebelum perendaman pada suhu 350 °C hanya memiliki sedikit pori-pori, dan masih mempertahankan bentuk serat panjang longitudinal kayu (Gambar 2a). Struktur berpori arang memungkinkan terbentuknya habitat baru bagi mikroba tanah (Pietikainen, Kiikkilä, & Fritze, 2000) untuk melakukan aktivitas metanotropik. Struktur berpori arang dapat mengadsorpsi CH₄ sambil memfasilitasi pertumbuhan dan aktivitas metanotropik mikroba (Wu *et al.*, 2020). Lebih lanjut, proses aktivasi struktur pori karbon memudahkan arang untuk menyerap material berbentuk cairan maupun gas (Saletnik *et al.*, 2019).

Gambar 1. Morfologi Bahan baku Limbah Kayu

Gambar 2. Morfologi Arang Perendaman: (a) NON350; (b) NON450; (c) NON550 ; (d) AKT350; (e) AKT450; (f) AKT550

Dalam hal ini, gas metan dapat disimpan dalam pori-pori arang secara berkepanjangan (Steinbeiss, Gleixner, & Antonietti, 2009). Sebagai akibatnya, aktivitas metanotropik meningkat seiring dengan penambahan arang, karena aktivitas menggunakan metan sebagai satu-satunya sumber energi (Feng, Xu, Yu, Xie, & Lin, 2012). Selain pori arang,

adanya kandungan *volatile matter* yang tinggi juga dapat berkontribusi pada penurunan gas CH_4 melalui mekanisme yang dimediasi secara mikro. Mekanisme ini berkaitan dengan peran kandungan *volatile matter* sebagai substrat mikroba untuk mendukung aktivitas metanotropik. Peningkatan pH arang yang diaplikasikan ke tanah dimungkinkan juga telah

menyebabkan peningkatan aktivitas metanotropik. Kisaran toleransi pH tanah untuk aktivitas metanotropik adalah antara 5 dan 7 (Butnan, Deenik, Toomsan, Antal, & Vityakon, 2016).

3.2. Uji emisi gas metan

Pada penelitian ini digunakan tanah sulfat masam karena jenis tanah basah ini menyumbang sekitar 90% dari total fluks gas metan. Emisi gas metan pada lahan tanaman padi pada yang diberi perlakuan dosis arang perendaman disajikan pada Tabel 2. Fluks gas metan diuji pada 30, 60, dan 90 HST.

Pada Tabel 2 terlihat bahwa secara umum seiring bertambahnya dosis arang perendaman, tampak bahwa fluks gas metan menurun, sebaliknya fluktuasi penurunannya meningkat. Penurunan fluks metan disebabkan adanya interaksi antara tanah dan arang yang ditambahkan. Emisi CH_4 dikendalikan oleh serangkaian proses biogeokimia, termasuk interaksi antara kelembaban tanah, keadaan redoks tanah, tekstur tanah, pH tanah, dan ketersediaan senyawa organik dan konstituen anorganik, serta efek kombinasi faktor-faktor tersebut (Cong, Meng, & Ying, 2018). Serangkaian proses biogeokimia yang kompleks yang terjadi secara bersamaan, di mana persaingan antara proses metanogenik dan metanotropik telah dianggap sebagai penentu utama fluks CH_4 (Feng *et al.*, 2012). Metanogenesis dapat dirangsang atau dihambat oleh sejumlah faktor tanah termasuk perubahan kelembaban tanah dan tekstur tanah. Kelembaban tanah mempengaruhi keadaan redoks tanah,

kandungan organik tanah dapat mempengaruhi ketersediaan sumber karbon untuk mendorong pertumbuhan dan metabolisme mikroba. Pembentukan metan merupakan proses mikrobiologi (Jeffery, Verheijen, Kammann, & Abalos, 2016). Penambahan arang dapat menambah aktivitas metanotropik, dimana arang dapat menyerap spesies karbon organik labil (Spokas, 2013) untuk keperluan metabolisme mikroba. Apabila dilihat dari jenis tanah, dalam penelitian ini menggunakan tanah sulfat masam yang memiliki tingkat toksisitas Al^{3+} . Pada saat pH tanah rendah, kelarutan Al^{3+} akan meningkat sehingga beracun bagi mikroba metanotropik (Tamai, Takenaka, & Ishizuka, 2007). Dengan penambahan arang, pH tanah meningkat, sehingga mengurangi kelarutan Al^{3+} sehingga mengurangi tingkat toksisitas untuk aktivitas metanotropik. Interaksi sifat-sifat tanah cenderung mengatur emisi CH_4 tanah terhadap penambahan charcoal. Sejalan dengan penelitian terdahulu, dalam penelitian ini arang mampu menurunkan kepadatan tanah dan meningkatkan porositas tanah yang mendukung oksidasi CH_4 dan aktivitas penyerapan oleh mikroba tanah. Sejalan dengan penelitian ini, Jeffery *et al.* (2016), menyatakan bahwa berdasarkan hasil meta studi, penambahan arang dapat menurunkan fluks metan pada lahan padi/tanah masam. Arang yang dihasilkan dari limbah lignoselulosa penurunan metan secara signifikan, namun mekanisme yang mendasari efek ini masih belum jelas dan memerlukan penelitian lebih lanjut.

Tabel 2. Fluks Harian Emisi CH_4

Dosis Arang Perendaman (t/ha)	Hari Setelah Tanam ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{hari}$)		
	30	60	90
0	$22,57 \pm 2,16^a$	$55,07 \pm 4,95^a$	$92,51 \pm 8,38^a$
4	$17,91 \pm 4,71^{ab}$	$24,72 \pm 2,63^b$	$56,76 \pm 2,54^b$
8	$15,95 \pm 1,73^b$	$18,73 \pm 1,41^c$	$23,72 \pm 1,01^c$
12	$13,66 \pm 3,62^{bc}$	$19,04 \pm 1,32^c$	$24,54 \pm 1,42^c$
16	$10,13 \pm 1,59^c$	$13,13 \pm 1,48^d$	$16,47 \pm 1,62^d$
20	$9,73 \pm 2,65^{ac}$	$13,40 \pm 1,28^d$	$19,59 \pm 0,91^{cd}$

Catatan: Nilai di kolom yang sama diikuti dengan *superscript* huruf yang sama berarti tidak signifikan pada $p < 0.05$

Pada penelitian ini, secara umum seiring bertambahnya dosis arang perendaman, tampak bahwa fluks gas metan menurun. Sejalan dengan penelitian Teoh *et al.* (2019) menyebutkan bahwa penambahan charcoal pada dosis lebih tinggi cenderung menurunkan emisi gas metan. Semakin banyak arang yang ditambahkan, semakin banyak pula gas metan yang diikat dan diserap masuk ke dalam pori arang. Luas permukaan dan volume pori arang mampu meningkatkan aerasi tanah dan meningkatkan penyerapan CH_4 dalam campuran tanah-arang (Sadasiyam & Reddy, 2015). Pengkayaan relatif O_2 dan CH_4 oleh charcoal dalam lingkungan mikro tanah berperan untuk oksidasi CH_4 (Wu *et al.*, 2019). Oksidasi CH_4 oleh mikroba methanotrof dapat mengurangi konsentrasi emisi CH_4 di udara bebas (Purwanta, Soemantojo, Widanarko, & Bismo, 2012). Secara keseluruhan, penambahan arang di tanah padi dapat meningkatkan aktivitas oksidasi CH_4 dengan memperbaiki kondisi tanah untuk metanotrof. Pada Tabel 2 terlihat bahwa fluks metan menurun seiring bertambahnya dosis arang perendaman, yaitu 22,57 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 9,73 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 30 HST, 55,07 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 13,40 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 60 HST, dan 92,51 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 19,59 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 90 HST. Pada saat tanam awal padi berumur 30 HST, fluks gas metan masih rendah karena padi masih beradaptasi dengan kondisi lingkungan di sekelilingnya. Dengan bertambahnya masa tanam padi, fluks gas metan juga meningkat. Hal ini disebabkan karena pada saat jumlah anakan telah maksimal, akan menghasilkan banyak media sebagai cerobong jalur emisi (Setyanto & Susilawati, 2007).

Pola pemupukan NPK 100% yang biasa dilakukan oleh petani memberikan sumbangan emisi gas metan tertinggi (Annisa & Nursyamsi, 2016). Pemanfaatan arang mampu mereduksi kebutuhan pupuk sebagai sumber emisi. Pada Gambar 2, terlihat bahwa telah terjadi peningkatan penurunan fluks metan pada lahan padi, yaitu sebesar (4,66-12,84)% saat 30 HST; (30,35-41,94)% saat 60 HST; dan (35,75-

76,04)% saat 90 HST. Sejalan dengan Setiawati *et al.* (2019) yang menyatakan bahwa emisi gas metan yang dihasilkan dari lahan padi yang diberi perlakuan arang kayu lunak telah menurun sebesar 9,57-18,08% (30 HST); 33,13-35,23% (60 HST); dan 46,08-73,25% (90 HST) dibandingkan dengan kontrol.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, pH, kadar abu, dan *fixed-C* semakin meningkat, berturut-turut 4,4-8,8, (1,1-6,9)%, dan (14,4-45,7)%. Sebaliknya, seiring dengan peningkatan suhu pirolisis, hidrogen dan oksigen menurun. Peningkatan suhu pirolisis yang dilanjutkan dengan proses perendaman arang mampu meningkatkan kualitas arang limbah kayu. Perendaman arang menghasilkan produk arang dengan pori-pori relatif lebih banyak dan terstruktur. Pemanfaatan arang hasil perendaman sebagai pupuk organik mampu mengurangi kebutuhan pupuk kimia sebagai sumber emisi. Fluks metan menurun seiring bertambahnya dosis arang perendaman, yaitu 22,57 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 9,73 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 30 HST, 55,07 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 13,40 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 60 HST, dan 92,51 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ menjadi 19,59 $\text{mg/m}^2/\text{hari}$ pada 90 HST.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Kepala Baristand Industri Banjarbaru dan BALITTRA-Banjarbaru Kalimantan Selatan yang telah memberikan dukungan sarana dan prasarana pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada LPDP yang telah mendanai penelitian serta semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Annisa, W., & Nursyamsi, D. (2016). Pengaruh amelioran, pupuk dan sistem pengelolaan tanah sulfat masam terhadap hasil padi dan emisi metana. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 40(2), 135–145.

- Asian Development Bank. (2016). *Nepal: mainstreaming climate change risk management in development TA - 7984 NEP: Mainstreaming climate change risk management in development - Consultants for Sustainable Rural Ecology for Green Growth*. UK.
- Basso, A. S., Miguez, F. E., Laird, D. A., Horton, R., & Westgate, M. E. (2013). Assessing potential of charcoal for increasing water- holding capacity of sandy soils. *GCB Bioenergy*, 5(2), 132–143.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12026>.
- Berek, A. K., & Hue, N. (2016). Characterization of charcoals and their use as an amendment to acid soils. *Soil Science*, 181(10), 1–15.
<https://doi.org/10.1097/SS.000000000000000177>
- Brewer, C. E., Schmidt-rohr, K., Satrio, J. A., & Brown, R. C. (2009). Characterization of charcoal from fast pyrolysis and gasification systems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 28(3), 386–396.
<https://doi.org/10.1002/ep>
- Bridges, R. (2013). *Design and characterisation of an 'open source' pyrolyser for charcoal production*. Massey University, Auckland, New Zealand
- Butnan, S., Deenik, J., L., Toomsan, B., Antal, M. J., Vityakon, P. (2016). Charcoal properties influencing greenhouse gas emissions in tropical soils differing in texture and mineralogy. *Journal of Environmental Quality*, 45, 1509-1519.
[doi:10.2134/jeq2015.10.0532](https://doi.org/10.2134/jeq2015.10.0532)
- Calamai, A., Chiaramonti, D., Casini, D., & Masoni, A. (2020). Short-term effects of organic amendments on soil properties and maize (*Zea mays* L.) growth. *Agriculture*, 10(158), 1–15.
<https://doi.org/10.3390/agriculture10050158>
- Chowdhury, Z. Z., Karim, M. Z., Ashraf, M. A., & Khalid, K. (2016). Influence of carbonization temperature on physicochemical properties of charcoal derived from slow pyrolysis of durian wood (*Durio zibethinus*) sawdust. *Bioresources*, 11(2), 3356–3372.
- Cong, W., Meng, J., & Ying S C. (2018). Impact of soil properties on soil methane flux response to charcoal addition: a meta- analysis. *Environmental Science: Process & Impacts*, 20(9): 1202-1209.
<https://doi.org/10.1039/C8EM00278A>
- Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S. P., Brownsort, P., & Cross, A. (2013). The effect of pyrolysis conditions on charcoal stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy*, 5(2), 122–131.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12030>
- Dufour, A., Castro-Diaz, M., Marchal, P., Brosse, N., Olcese, R., Bouroukba, M., & Snape, C. (2012). In situ analysis of biomass pyrolysis by high temperature rheology in relations with 1 H NMR. *Energy & Fuels*, 6432–6441.
- Dutta, T., Kwon, E., Bhattacharya, S. S., Jeon, B. H., Deep, A., Uchimiya, M., & Kim, K-H. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in charcoal and charcoal-amended soil: a review. *GCB Bioenergy*, 9(6), 990-1004
- Edmunds, C. W. (2012). *The effects of charcoal amendment to soil on bioenergy crop yield and biomass composition*. University of Tennessee.
- Feng, Y., Xu, Y., Yu, Y., Xie, Z., & Lin, X. (2012). Mechanisms of charcoal decreasing methane emission from Chinese paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 80–88.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.016>
- Gezahegn, S., Sain, M., & Thomas, S. C. (2019). Variation in feedstock wood chemistry strongly influences charcoal liming potential. *Soil Systems*, 3(26), 1–16.
<https://doi.org/10.3390/soilsystems3020026>
- Graber, E. R., Harel, Y. M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D. R., ... Elad, Y. (2010). Charcoal impact on development and productivity of

- pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 337(1), 481–496.
<https://doi.org/10.1007/s11104-010-0544-6>
- Hasan, M. H. M., Bachmann, R. T., Loh, S. K., Manroshan, S., & Ong, S. K. (2019). Effect of pyrolysis temperature and time on properties of palm kernel effect of pyrolysis temperature and time on properties of palm kernel shell-based charcoal. In *International Rubber Conference* (pp. 1–11). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 548.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/548/1/012020>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., Kammann, C., & Abalos, D. (2016). Charcoal effects on methane emissions from soils: a meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, (101), 251–258.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.021>
- Johnston, K. (2018). *The Production, characterization, and upgrading of charcoals into activated carbon*. The University of Maine, Orono, Maine
- Kloss, S., Zehetner, F., Dellantonio, A., Hamid, R., Ottner, F., Liedtke, V., ... Soja, G. (2012). Characterization of slow pyrolysis charcoals: Effects of feedstocks and pyrolysis temperature on charcoal properties. *Journal of Environmental Quality*, 41, 990–1000.
<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0070>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Charcoal for environmental management: science and technology*. Science And Technology. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=w-CUty_JlfcC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Charcoal+for+environmental+management:+science+and+technology&ots=cIlXBZWZBa&sig=nGtpUY7VXBOi-m4f6uKPuIBlaLg%5Cnhttp://books.google.com/books?hl=en&lr=
- Maf'tuah, E., Simatupang, R. S., Subagio, H., & Nursyamsi, D. (2016). Effectiveness of some ameliorants to reduce CO₂ and N₂O emission at corn planting in peat land. *Journal of Wetlands Environmental Management*, 4(1), 55–64.
- Mohajan, H. K. (2012). Dangerous effects of methane gas in atmosphere. *International Journal of Economic and Political Integration*, 2(1), 3–10.
- Omri, A., & Benzina, M. (2012). Characterization of Activated Carbon Prepared from a New Raw Lignocellulosic Material: Ziziphus Spina-Christi Seeds. *Journal de La Societe Chimique de Tunisie*, 14, 175–183.
- Oramahi, H. A. (2016). *Optimasi dengan RSM dan rancangan percobaan*. Yogyakarta: Gava Media.
- Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S., & Vered, E. (2019). Mitigation of methane gas emission in rice by drip irrigation. *F1000Research*, 8(2023).
- Pietikainen, J., Kiiikkilla, O., & Fritze, H. (2000). Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *OIKOS*, 89(2), 231–242.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.890203.x>
- Promdee, K., Vitidsant, T., Vanpetch, S., & Ruengvilairat, P. (2012). Physicochemical of bio-oil from three residual plants produced by continuous pyrolysis reactor. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 3(2), 104–107.
- Purwanta, W., Soemantojo, R. W., Widanarko, S., & Bismo, S. (2012). Uji eliminasi gas metana (CH₄) dengan biofiltrasi pada unggun kompos dan tanah penutup landfill. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 1–10.
- Purwanto, D. (2016). Sifat fisis dan mekanis papan partikel dari limbah campuran serutan rotan dan sebuk kayu. *Jurnal Riset Industri*, 10(3), 125–133.
- Ramlow, M., & Cotrufo, M. F. (2017). Woody charcoal's greenhouse gas mitigation potential across fertilized and unfertilized agricultural soils and soil moisture regimes. *GBC*

- Bioenergy*, 10, 108122.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12474>
- Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis charcoal: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *Global Change Biology Bioenergy*, 5, 104–115.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12018>
- Sadasivam, B. Y., & Reddy, K. R. (2015). Adsorption and transport of methane in charcoals derived from waste wood. *Waste Management*, 43, 218–229.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.025>
- Saletnik, B., Zagula, G., Bajcar, M., Tarapatsky, M., Bobula, G., & Puchalski, C. (2019). Charcoal as a multifunctional component of the environment — A review. *Applied Science*, 9(1139), 1–20.
<https://doi.org/10.3390/app9061139>
- Setiawati, E., Prijono, S., Mardiana, D., & Soemarno. (2019). Pengaruh charcoal serbuk kayu durian terhadap karakteristik tanah sulfat masam dalam mengurangi emisi gas metana. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 6(2), 1251–1260.
<https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2019.006.2.6>
- Setyanto, P., & Susilawati, H. L. (2007). Mitigasi emisi gas metan pada tanah gambut dengan varietas padi. In *Prosiding Seminar Pertanian Lahan Rawa “Revitalisasi kawasan PLG dan lahan rawa lainnya untuk membangun lumbung pangan nasional”* (pp. 293–300).
- Spokas, K. A. (2013). Impact of charcoal field aging on laboratory greenhouse gas production potentials. *GCB Bioenergy*, 5, 165–176.
<https://doi.org/10.1111/gcbb.12005>
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., & Antonietti, M. (2009). Effect of charcoal amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(6), 1301–1310.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.016>
- Stensson, M. (2018). *Charcoal: a win-win solution for sustainable small-scale farming in Sweden*, Lund University, Lund, Sweden
- Suliman, W., Harsh, J. B., Abu-Lail, N. I., Fortuna, A. M., Dallmeyer, I., & Garcia-Perez, M. (2016). Influence of feedstock source and pyrolysis temperature on charcoal bulk and surface properties. *Biomass and Bioenergy*, 84, 37–48.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.010>
- Susilawati, & Rumanti, I. A. (2018). Potential and constraints of rice farming in tidal swamp land. In *Proceedings of 162nd The IIER International Conference, Yokohama, Japan* (pp. 46–50).
- Tamai, N., Takenaka, C., & Ishizuka, S. (2007). Water-soluble Al inhibits methane oxidation at atmospheric concentration levels in Japanese forest soil. *Soil & Tillage Research*, 39, 1730–1736.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.01.029>
- Teoh, R., Caro, E., Holman, D. B., Joseph, S., Meale, S. J., & Chaves, A. V. (2019). Effects of hardwood charcoal on methane production, fermentation characteristics, and the rumen microbiota using rumen simulation. *Frontiers in Microbiology*, 10(July), 1–13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01534>
- Tian, H., Chen, G., Lu, C., Xu, X., Ren, W., Zhang, B., ... Wofsy, S. (2012). Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes. *Ecosystem Health and Sustainability*, 1(1).
- Towprayoon, S., Smakgahn, K., & Poonkaew, S. (2005). Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. *Chemosphere*, 59, 1547–1556.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.02.009>
- Tubiello, F. N. (2013). The FAOSTAT database of greenhouse gas emissions from agriculture.

- Environmental Research Letters*, 8, 015009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015009>
- Wang, C., Lai, D. Y. F., Sardans, J., Wang, W., Zeng, C., & Pe, J. (2017). Factors Related with CH₄ and N₂O emissions from a paddy field: clues for management implications. *Plos*, 12(1), e0169254. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169254>
- Wang, C., Wang, Y., Herath, H. M. S. K. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in charcoal – their formation, occurrence and analysis: A review. *Organic Geochemistry*, 114, 1-11
- Woolley, S., & Hallowell, B. (2018). *Charcoal: An Overview*. Retrieved from https://biomasscontrols.com/wp-content/uploads/2019/01/CharcoalOverview_2.18_v2.pdf
- Wu, Z., Song, Y., Shen, H., Jiang, X., Li, B., & Xiong, Z. (2019). Charcoal can mitigate methane emissions by improving methanotrophs for prolonged period in fertilized paddy soils. *Environmental Pollution*, 253, 1038–1046. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.073>
- Wu, B., Xi, B., He, X., Sun, X., Li, Q., O., Q., Zhang, H., & Xue, C. (2020). Methane emission reduction enhanced by hydrophobic charcoal-modified soil cover. *Processes*, 8, 162
- Xiao, Y., Yang, S., Xu, J., Ding, J., Sun, X., & Jiang, Z. (2018). Effect of charcoal amendment on methane emissions from paddy field under water-saving irrigation. *Sustainability*, 10, 1371. <https://doi.org/10.3390/su10051371>
- Zhao, S. H., Ta, N., & Wang, X. D. (2017). Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of charcoal with apple tree branches as feedstock material. *Energies*, 10(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/en10091293>
- Zhao, Z., Yue, Y., Sha, Z., Li, C., Deng, J., Zhang, H., ...Cao, L. (2015). Assessing impacts of alternative fertilizer management practices on both nitrogen loading and greenhouse gas emissions in rice cultivation. *Atmospheric Environment*, 119, 393–401. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.060>