

Pengaruh Kompos Dikombinasikan Limbah Agroindustri terhadap Perbaikan Tanah, Pertumbuhan Padi, dan Emisi CH₄ dan CO₂ di Tanah Mineral Pasang Surut

Effects of Compost Combined with Agro-industrial Wastes on Soil Improvement, Paddy's Growth, and CH₄ and CO₂ Emissions from Tidal Swamp Mineral Soils

Muhammad Helmy Abdillah

Politeknik Hasnur, Jl. Brigjend H. Hasan Basri KM 11 Kabupaten Barito Kuala 70582, Kalimantan Selatan - Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 11 Oktober 2021
Disetujui: 21 Januari 2022
Dipublikasi online: 16 Februari 2022

Kata Kunci:

Bahan organik
Emisi gas rumah kaca
Lahan pasang surut

Keywords:

Gas emission
Organic matter
Tidal swamp

Direview oleh:

Anicetus Wihardjaka,
Muhammad Hikmat

Abstrak. Aplikasi bahan organik lokal dinyatakan mampu meminimalkan masalah biogeokimia dan meningkatkan hasil padi, namun menjadi sumber gas rumah kaca seperti CH₄ dan CO₂ di lahan sawah pasang surut. Limbah agroindustri berpotensi dikombinasikan untuk mengurangi serat kasar dari bahan organik lokal. Penelitian ini bertujuan membandingkan pengaruh jenis kompos organik dikombinasikan limbah agroindustri terhadap perbaikan sifat tanah, meningkatkan pertumbuhan padi dan menurunkan emisi gas CH₄ dan CO₂. Penelitian ini dilakukan di rumah kaca Politeknik Hasnur pada November 2020 sampai Juli 2021 dengan desain rancangan acak lengkap pola tersarang yang diuji menggunakan beda nyata jujur pada $\alpha = 5\%$, dengan bahan perlakuan jerami, tandan sawit, dan purun tikus yang dikomposkan dan diaplikasikan pada 15 kg tanah mineral pasang surut masing-masing sebanyak 253,7 dengan kombinasi 126,8 g limbah karet remah ataupun 126,8 g *solid decanter*. Terdapat 6 kombinasi dan 1 kontrol yang diulang 5 kali sehingga menjadi 35 satuan percobaan. Peubah yang diamati yakni tinggi tanaman, jumlah anakan produktif, volume akar, persentasi pirit, berat isi tanah, fluks gas CH₄ dan CO₂. Pada 15 kg tanah yang diaplikasikan kompos jerami 253,7 g dikombinasikan 126,8 g *solid decanter* meningkatkan tinggi tanaman, menurunkan berat isi tanah dan fluks CH₄ pada 60 dan 90 hst. Aplikasi 253,7 g kompos jerami dikombinasikan 126,8 g limbah karet remah yang diaplikasikan pada 15 kg tanah mineral pasang surut meningkatkan jumlah anakan produktif, volume akar dan menurunkan pirit. Aplikasi 253,7 g kompos purun tikus dikombinasikan 126,8 g limbah padat karet remah yang diaplikasikan pada 15 kg tanah mineral pasang surut dapat menurunkan fluks CO₂ pada 60 hst.

Abstract. Application of local organic matter is expected to be able to minimize soil biogeochemical constraints and increase rice yields but it could also be a source of greenhouse gases such as CH₄, and CO₂ from tidal swamp paddy fields. Agroindustrial wastes have the potentials to be combined with the local organic matter to reduce crude fiber content of the local organic matter. This study aimed to compare the effects type organic of compost combined with agroindustrial solid wastes on improving soil properties, increasing paddy growth and reducing greenhouse gas emissions. This research was conducted at Polytechnic Hasnur's greenhouse from November 2020 to July 2021 using a nested completely randomized design with Tukey's HSD test at the $\alpha 5\%$, with the treatments are paddy straw compost, oil palm empty fruit bunch compost, and compost of "purun tikus" (*Eleocharis dulcis*), each of which 253.7 g combined with 126.8 g of crumb rubber solid waste or 126.8 g of solid decanter on applied in 15 kg of tidal swamp mineral soil. There were 6 combinations and 1 control which was repeated 5 times to make 35 experimental units. The variables observed were plant height, number of productive tillers, root volume, percentage of pyrite, soil bulk density, methane flux, and carbon dioxide flux. In 15 kg of tidal swamp mineral soil applied 253.7 g paddy straw compost, combined with 126.8 g of solid decanter increased plant height, decreased soil bulk density and CH₄ flux at 60 and 90 DAP. Application of 253.7 g of straw compost combined with 126.8 g of crumb rubber waste applied in 15 kg tidal swamp mineral soil increased number of tillers, root volume, and decreased pyrite. Application 253.7 g compost of purun tikus combined with 126.8 g crumb rubber solid waste applied in 15 kg tidal swamp mineral soil was able to reduce CO₂ flux 60 DAP.

Pendahuluan

Pertumbuhan dan produksi padi pasang surut di kawasan Sungai Barito yang bertipe A dan B sering terkendala oleh tingginya cekaman kelarutan logam Fe, Al, dan keberadaan pirit (Mawardi *et al.* 2020). Aplikasi

substrat bahan organik merupakan salah satu upaya untuk membenahi kondisi tanah pada budidaya padi di tanah mineral pasang surut. Substrat organik berfungsi sebagai modulator penyedia hara dan berperan dalam memperbaiki sifat fisikokimia. Kompos merupakan substrat organik yang telah terdekomposisi sebagian maupun sempurna

* Corresponding author: abdillah.helmy21@gmail.com

melalui proses demineralisasi sehingga mempermudah ketersediaan hara untuk tanaman. Aplikasi kompos pada tanah mineral lahan pasang surut telah banyak diteliti dan memberikan manfaat positif dalam mendorong ketersediaan hara, menurunkan pH dan kelarutan logam serta memperbaiki karakter fisika dan biologi tanah (Saidy 2018). Namun disisi lain, aplikasi kompos dengan rasio C/N >12 pada kondisi anaerob akan meningkatkan CO₂, CH₄, dan N₂O yang dihasilkan dari bakteri heterotrof (Eliasson *et al.* 2005), bakteri metanogen (Conrad 2020) dan bakteri denitrifikasi (Wang *et al.* 2021), yang berpotensi menjadi sumber emisi gas rumah kaca (GRK) (Setyanto dan Abubakar 2006; Jiao *et al.* 2006; Liu *et al.* 2021). Selain itu, eksudat akar juga meningkatkan emisi gas seiring dengan lamanya penggenangan tanah dan fase umur tanaman (Aulakh *et al.* 2001; Sutrisna *et al.* 2016; Chirinda *et al.* 2018).

Pemberian bahan organik yang intensif dan lambat terdekomposisi ke lahan sawah dengan pengairan yang tidak tepat dapat menstimulasi proses dekomposisi aerobik oleh bakteri heterotroph dan anaerobik oleh bakteri metanogen (Panjaitan *et al.* 2015; Sutrisna *et al.* 2016) yang menghasilkan GRK (Zhang *et al.* 2019). Menurut Ramesh dan Selvaraj (2020), budidaya padi di lahan tergenang menjadi sumber GRK antropogenik terutama CH₄ dan N₂O masing-masing sebesar 29% dan 52%. Hou *et al.* (2000) melaporkan bahwa kenaikan fluks CH₄, N₂O dan CO₂ dipengaruhi oleh radiasi yang diterima lahan, temperatur tanah, potensial redoks dan kandungan bahan organik tanah yang tergenangi air.

Anshori *et al.* (2018) melaporkan produksi potensial dari CH₄ dan N₂O pada pertanian organik lebih tinggi dibandingkan pertanian konvensional, yang berkorelasi positif dengan total karbon organik dan kadar nitrogen. Menurut Annisa dan Nursyamsi (2016), munculnya CO₂ dan CH₄ dari mikroorganisme tanah dapat terjadi karena proses penyederhanaan polimer (polisakarida dan protein) menjadi monomer (asam amino, asam lemak dan monosakarida) yang selanjutnya termineralisasi menjadi CO₂ dan CH₄.

Pengairan yang tepat, penggunaan varietas umur genjah, memilah jenis bahan organik, mengurangi aplikasi substratum organik dari C/N rasio yang tinggi serta mengkombinasikan bahan organik lain yang telah terdekomposisi sempurna, akan berperan positif terhadap perbaikan tanah, meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman serta menurunkan emisi gas rumah kaca di lahan sawah. Oleh karena itu diperlukan penelitian tentang pengaplikasian kombinasi kompos dengan limbah agroindustri yang telah terdekomposisi sempurna sehingga

diharapkan mampu mengambil peran tersebut.

Limbah agroindustri merupakan produk samping berupa bahan organik dari pengolahan hasil pertanian/ perkebunan. Limbah agroindustri banyak ditemukan di Kalimantan Selatan khususnya di pabrik pengolahan hasil perkebunan seperti limbah padat karet remah (LPKR) dari pengolahan gumpalan lateks dan limbah padat *decanter* dari mesin *decanter (centrifuge machine)* yang memisahkan air, minyak, dan padatan berdasarkan massa jenisnya sehingga menjadi *crude oil*. Limbah-limbah tersebut telah terdekomposisi sempurna, memiliki unsur hara yang tinggi serta mengandung banyak mikroba pengurai (Abdillah *et al.* 2020; Kittikun *et al.* 2021). Potensi limbah tersebut dapat dikombinasikan dengan substrat organik *in situ* seperti jerami padi dan purun tikus yang menjadi bahan kearifan lokal petani suku *Banjar* serta tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang melimpah dan tidak termanfaatkan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan pengaruh berbagai kompos substrat organik lokal dikombinasikan jenis limbah agroindustri terhadap perbaikan sifat tanah, meningkatkan pertumbuhan padi dan menurunkan emisi gas rumah kaca.

Bahan dan Metode

Waktu, Tempat, dan Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di *Screen House* Politeknik Hasnur, Kabupaten Barito Kuala, Provinsi Kalimantan Selatan pada November 2020 sampai Juli 2021. Kegiatan ini merupakan penelitian awal yang dilakukan di dalam ember berkapasitas 28 L yang masing-masing ember memuat 15 kg tanah mineral pasang surut dengan berbagai perlakuan masing-masing 0,0255 g/kg tanah mineral pasang surut. Perlakuan didesain menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) pola tersarang dengan 7 perlakuan terdiri atas kontrol + 15 kg tanah (K0); 253,7 g kompos jerami ditambahkan 126,8 g *solid decanter* (JKD) + 15 kg tanah; 253,7 g kompos jerami ditambahkan 126,8 g LPKR (JKR) + 15 kg tanah; 253,7 g kompos TKKS ditambahkan 126,8 g *solid decanter* (SKD) + 15 kg tanah; 253,7 g kompos TKKS ditambahkan 126,8 g LPKR (SKR) + 15 kg tanah; 253,7 g kompos purun tikus ditambahkan 126,8 g *solid decanter* (PKD) + 15 kg tanah; 253,7 g kompos purun tikus ditambahkan 126,8 g LPKR (PKR) + 15 kg tanah. Perlakuan dalam penelitian ini diulang sebanyak 5 kali sehingga terdapat 35 satuan tanaman percobaan. Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan membuat kompos dari jerami padi, tandan kosong kelapa sawit, dan tumbuhan purun tikus menggunakan mikroorganisme lokal (MOL).

Persiapan Bahan dan Media Tanam

Dalam penelitian ini, varietas Inpara-3 dipilih sebagai bahan tanam karena satu dari tiga varietas unggul baru yang disukai oleh petani suku *Banjar* berdasarkan uji preferensi kuisisioner (Koesrini *et al.* 2020; Rumanti *et al.* 2020). Umur varietas Inpara-3 dari persemaian sampai panen 127 hari (Kementerian Pertanian 2019). Benih Inpara-3 disemai terlebih dahulu pada media tanah *top soil* yang dicampur dengan LPKR dan *solid decanter* sebagai sumber unsur hara. Sembari menunggu pertumbuhan semaian benih Inpara-3, maka dilakukan persiapan media tanam berupa tanah mineral dari lahan rawa pasang surut dan bahan perlakuan berupa pengomposan tandan kosong kelapa sawit (Abdillah 2021), jerami padi dan purun tikus yang telah dikomposkan 2 bulan sebelumnya. Dari masing-masing bahan kompos yang telah dibuat tersebut diambil sebanyak 1,3 kg untuk 5 kali ulangan. Limbah *solid decanter* diperoleh dari PT. X dan limbah padat agroindustri berupa LPKR diperoleh dari PT. Y yang kemudian dikombinasikan dengan masing-masing kompos dan diaplikasikan sebagai perlakuan. Tanah yang digunakan dalam penelitian ini diambil secara acak pada berbagai kedalaman tanah mineral lahan pasang surut zona luapan air tipe B yang berasal dari Desa Sungai Lumbah Kabupaten Barito Kuala. Tanah tersebut dalam kondisi basah disatukan dalam wadah dan ditimbang sebanyak 15 kg tiap ember berkapasitas 28 liter, hal ini diasumsikan bahwa pertumbuhan akar dapat terpenuhi seperti kondisi alamiah. Setelah 2 hari kemudian, dilakukan aplikasi kombinasi kompos dan limbah padat agroindustri disesuaikan dengan perlakuan rancangan penelitian yang diberikan ke tanah yang telah disiapkan tersebut. Media tanam dengan perlakuan tersebut digenangi air secara periodik agar kondisi hidrologinya menyerupai kondisi alamiahnya di lahan rawa. Penggenangan air dilakukan dengan ketinggian 4 cm di atas permukaan tanah yang diberikan interval 4 hari sekali. Periode penggenangan air tersebut dilakukan terus-menerus hingga 15 hari sebelum tanaman padi dipanen. Kondisi media tanam selalu basah namun tidak selalu tergenangi air. Tanaman dipindahkan ke dalam ember setelah umur 16 hst di persemaian. Selama penelitian berlangsung, tanaman tidak diberikan pupuk anorganik. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh alami dari perlakuan yang diberikan.

Variabel Pengamatan

Peubah dari tanaman yang diamati yakni tinggi tanaman, jumlah anakan produktif dan volume akar. Peubah yang diamati pada sifat fisikokimia tanah yakni konsentrasi pirit (FeS₂) dan berat isi tanah (BD). Pengukuran tinggi tanaman dilakukan bersamaan dengan

perhitungan jumlah anakan produktif tanaman padi. Pengambilan sampel tanah untuk analisis senyawa pirit (FeS₂) dan berat isi volume tanah (BD) yang dilakukan 30 hari sebelum tanaman dipanen, hal ini dilakukan untuk mengetahui kadar pirit dan indeks BD yang berpengaruh pada pertumbuhan tinggi dan akar tanaman serta pertumbuhan generatif anakan produktif, sedangkan untuk pengukuran volume akar dilakukan setelah tanaman dipanen.

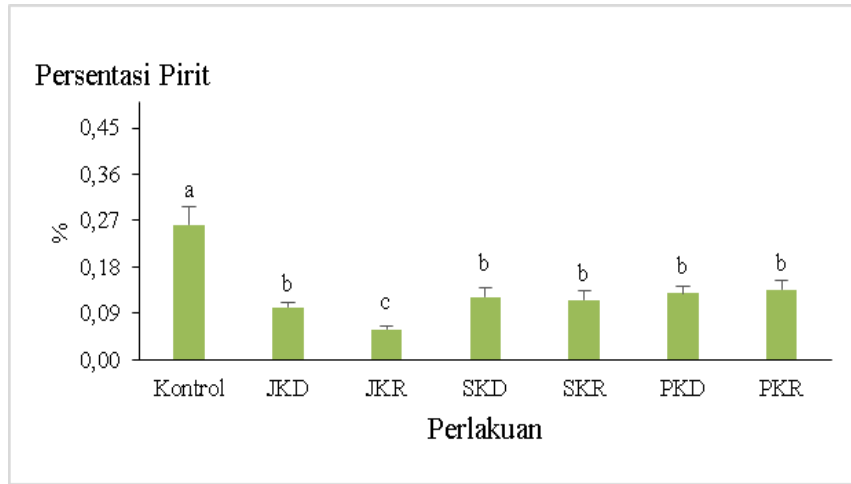
Peubah dari GRK yang diukur yakni fluks emisi CH₄ dan CO₂ yang diambil gasnya setiap 30 hari sekali selama fase vegetatif (30 dan 60 hst) hingga fase generatif (90 hst). Pengambilan sampel gas dilakukan pada pukul 15.00 – 16.00 dengan 3 kali pengambilan (menit ke-10; menit ke-20 dan menit ke-30) sesuai penelitian (Hervani dan Wiharjaka 2014) yang melaporkan bahwa pada *range* waktu tersebut yang paling efektif untuk mengambil dan mengukur CH₄ dan CO₂ dalam kondisi *intermittent*. Pengambilan contoh gas menggunakan *close chamber* berbahan PVC berdiameter 10 inch dengan tinggi 120 cm. Bagian dasar yang disungkup ditutup rapat menggunakan *fitting dop* dan karet. Contoh gas diambil dengan menggunakan *syringe* 10 ml. Sampel gas dimasukkan ke dalam vial plastik berpenutup karet untuk diukur konsentrasinya dengan kromatograf gas FID (*Flame Ionization Detector*) untuk gas CH₄ dan TCD (*Thermal Conductivity Detector*) untuk gas CO₂ (Hervani dan Wiharjaka 2014; Zaman *et al.* 2021) dengan persamaan dari (IAEA 1992) sebagai berikut:

$$E = \frac{dc}{dt} \times \frac{V_{ch}}{A \times h} \times \frac{mW}{mV} \times \frac{273,2}{273,2+T} \dots\dots (1)$$

dengan, E adalah emisi CH₄ atau CO₂ (mg.m².hari⁻¹), dc/dt adalah perbedaan konsentrasi emisi per waktu (ppm.s⁻¹), V_{ch} adalah volume sungkup (m³), A×h adalah tinggi sungkup (m), mW adalah berat molekul senyawa CH₄ (16,04 g.mol⁻¹) atau CO₂, (44,00 g.mol⁻¹), mV adalah volume molekul CH₄ atau CO₂ pada kondisi standar 273 °K/ 0 °C (22,41 liter.10⁻³.m³), dan T adalah rerata temperatur dalam sungkup (°C).

Analisis Data

Data penelitian diuji normalitasnya menggunakan model *Kolmogrov-Smirnov* dan uji homogenitas menggunakan model *Barlett*. Jika data dinyatakan normal dan homogen, maka dilanjutkan dengan *analysis of variance* untuk menguji perbedaan antar perlakuan yang mempengaruhi peubah dari pengamatan tersebut. Apabila terdapat perbedaan nilai signifikan antar perlakuan, maka



Gambar 1. Rerata persentasi pirit (FeS₂) di tanah mineral pasang surut pada perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri. Garis di atas batang menunjukkan simpangan baku (n=5). Huruf yang sama pada diagram batang menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

Figure 1. Average pyrite percentage (FeS₂) in tidal mineral soil on treatment of compost from various local organic materials combined with agroindustrial solid waste. The line above each bar indicates standard deviation (n=5). The same letter above the line in each treatment showed not significant difference based on Tukey's HSD $\alpha = 5\%$.

dilanjutkan dengan uji beda nilai tengah menggunakan model BNJ taraf $\alpha = 5\%$ menggunakan aplikasi SPSS 25.

Hasil dan Pembahasan

Konsentrasi Pirit (FeS₂)

Aplikasi kombinasi kompos dan limbah padat agroindustri dapat menurunkan konsentrasi senyawa pirit (FeS₂) dalam tanah. Gambar 1 menunjukkan bahwa perlakuan JKR memberikan respon penurunan pirit lebih signifikan dari perlakuan kontrol. Persentasi pirit pada perlakuan kontrol 0,26% lebih rendah dibandingkan pada perlakuan JKR sebesar 0,07%. Pada perlakuan, selain kontrol tidak berbeda nyata menurut uji BNJ $\alpha = 5\%$. Hal ini mungkin disebabkan kompos jerami padi yang lebih banyak mengeluarkan senyawa organik untuk mengkelat Fe dan mempertahankan misel tanah agar tetap basah, sedangkan perlakuan lain seperti kompos tandan sawit dan purun tikus memiliki kandungan Fe yang cukup tinggi.

Konsentrasi pirit pada uji pendahuluan di lapangan adalah 0,24%, dimana lapisan pirit ditemukan pada kedalaman rata-rata 59 cm dengan kondisi air ± 10 cm di atas permukaan tanah. Air pada lahan tersebut berasal dari luapan air sungai maupun naiknya permukaan air tanah akibat air pasang-surut dari Sungai Barito. Pada lahan sawah bukaan baru, oksidasi pirit belum nyata terjadi, dimana belum ada intensifikasi lahan dan sistem pengairan

terpadu sehingga sulfat masam masih berstatus potensial. Menurut Suastika *et al.* (2014), lapisan sulfidik terbagi menjadi sulfidik potensial dengan ciri sulfidik pada kedalaman > 50 cm dengan persentasi < 2% dan statusnya masih tereduksi, sedangkan lapisan sulfidik yang ditemukan pada kedalaman < 50 cm dengan persentasi kandungan pirit > 2% termasuk dalam kategori lahan sulfat masam aktual yang sewaktu-waktu akan teroksidasi.

Kombinasi kompos jerami dan limbah padat karet remah adalah perlakuan terbaik dalam mengendalikan dinamika senyawa pirit dalam tanah. Kompos dari berbagai bahan organik lokal yang dikombinasikan dengan limbah padat agroindustri mampu meningkatkan keberadaan asam organik yang dapat menjaga pirit tidak mudah teroksidasi (Annisa dan Hanudin 2013). Pemberian kompos juga menjaga kadar air tanah agar tidak cepat hilang terevapotranspirasi sehingga kadar oksigen tetap terbatas di dalam tanah. Tingginya persentasi pirit pada perlakuan kontrol mungkin disebabkan oleh rendahnya bahan organik dan evapotranspirasi yang besar. Selain itu, peranan tanaman khususnya pada fase generatif juga berpengaruh pada kondisi biogeokimia tanah. Senyawa Besi (Fe) dapat terlarut karena adanya O dari aktivitas rhizosfer yang menghasilkan FeOOH dalam kondisi anaerobik. Jika intensitas ini berlangsung terus-menerus maka akan meningkatkan pembentukan Fe dan pelepasan karbonat. Apabila ada lapisan sulfidik di dalam tanah,

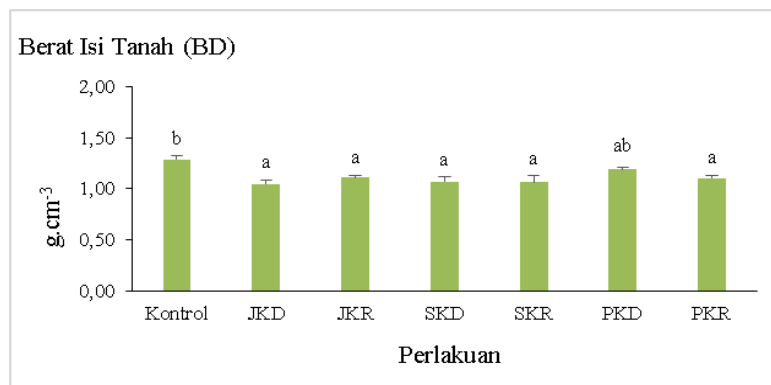
maka Fe akan bereaksi dengan sulfidic tersebut membentuk senyawa FeS seperti tergambar pada reaksi berikut: $Fe_2O_3 + 4SO_4^{2-} + 8CH_2O + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow 2FeS_2 + 8HCO_3^- + 4H_2O$. Pemberian bahan organik yang telah terdekomposisi mampu menurunkan reduksi Fe³⁺ menjadi Fe²⁺ yang akan meracuni tanaman (Susilawati dan Fahmi 2013), sehingga reaksi $FeOOH + 2H^+ + \frac{1}{4}CH_2O \rightarrow Fe^{2+} + \frac{7}{4}H_2O + \frac{1}{4}CO_2$ dapat diminimalkan melalui proses kelatisasi logam tersebut.

Berat Isi Tanah (BD)

Aplikasi kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri mampu menurunkan kepadatan tanah yang berdampak pada berat

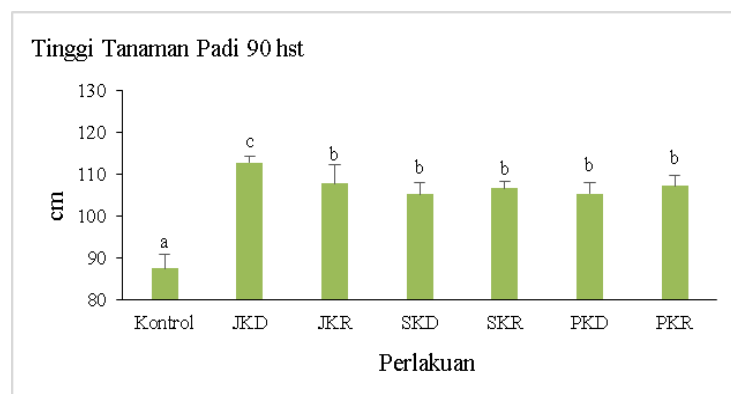
isi tanah (BD). Gambar 2 menunjukkan bahwa perlakuan JKD berpengaruh signifikan dalam menurunkan indeks BD tanah dari 1,32 g.cm⁻³ pada perlakuan kontrol menjadi 1,12 g.cm⁻³ pada perlakuan JKD, namun tidak berbeda nyata dibandingkan perlakuan JKR, SKD, SKR, dan PKR, sedangkan terdapat perbedaan nyata dibandingkan perlakuan PKD dan kontrol.

Berat isi tanah menggambarkan total pori dan kepadatan yang terukur di dalam tanah pada wadah yang berbentuk silinder guna memudahkan penganalogan luas area perakaran tanaman dalam tanah. Indeks BD tanah sangat berhubungan dengan volume akar tanaman. Selain itu fungsi pengamatan BD diantaranya mengetahui kemudahan penetrasi akar dalam tanah. Akar sulit berkembang pada tanah dengan indeks BD tanah besar.



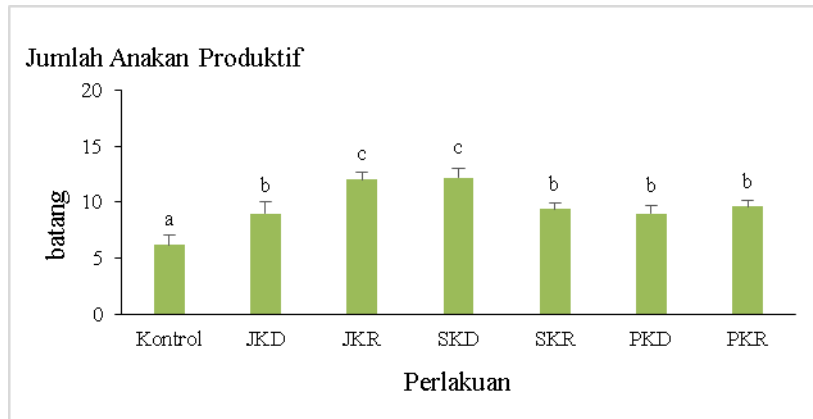
Gambar 2. Rerata berat isi tanah mineral pasang surut pada perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri. Garis di atas batang menunjukkan simpangan baku (n=5). Huruf yang sama pada diagram batang menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

Figure 2. Average bulk density (BD) in tidal mineral soil on treatment of compost from various local organic materials combined with agroindustrial solid waste. The line above each bar indicates standard deviation (n=5). The same letter above the line in each treatment showed not significant difference based on Tukey's HSD $\alpha = 5\%$.



Gambar 3. Rerata Rerata tinggi tanaman Inpara-3 yang ditanam di tanah mineral pasang surut pada perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri. Garis di atas batang menunjukkan simpangan baku (n=5). Huruf yang sama pada diagram batang menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

Figure 3. Average plant hight of Inpara-3 planted in tidal mineral soil on treatment of compost from various local organic materials combined with agroindustrial solid waste. The line above each bar indicates standard deviation (n=5). The same letter above the line in each treatment showed not significant difference based on Tukey's HSD test $\alpha = 5\%$.



Gambar 4. Rerata jumlah anakan produktif tanaman Inpara-3 yang ditanam di tanah mineral pasang surut pada perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri. Garis di atas batang menunjukkan simpangan baku (n=5). Huruf yang sama pada diagram batang menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

Figure 4. Average number of productive tillers of Inpara-3 planted in tidal mineral soil on treatment of compost from various local organic materials combined with agroindustrial solid waste. The line above each bar indicates standard deviation (n=5). The same letter above the line in each treatment showed not significant difference based on Tukey's HSD $\alpha = 5\%$.

Nilai BD tanah juga menggambarkan kualitas aerasi dan infiltrasi tanah. Indeks BD dipengaruhi oleh persentase bahan organik dan tekstur tanah (Barbosa *et al.* 2021). Bahan organik mampu menurunkan indeks BD sehingga dengan mudah mencari hara. Selain itu, bahan organik dapat meningkatkan kadar air yang mempertahankan dinamika biogeokimia tanah tetap stabil (Celik *et al.* 2010; Saputra *et al.* 2018). Berat isi tanah yang tinggi biasanya terbentuk dari gaya adhesi antar misel tanah oleh ikatan kation dan anion. Logam berat dapat membentuk ikatan kompleks dengan gaya adhesi. Melalui peran bahan organik, gaya adhesi yang membentuk ikatan tersebut dapat terbuka sehingga terbentuk porositas yang baik dan hara akan tersedia melalui pelepasan dari mineral logam.

Tinggi Tanaman

Hasil analisis uji beda nyata menunjukkan bahwa perlakuan JKD memberikan kontribusi terhadap pertumbuhan tinggi yang maksimal dengan hasil berbeda nyata dibandingkan perlakuan lain (Gambar 3). Rerata tinggi tanaman padi Inpara-3 pada perlakuan JKD adalah 112,8 cm, yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol yang hanya 87,4 cm serta lebih rendah daripada rerata tinggi tanaman Inpara-3 pada deskripsi tanaman yang dirilis oleh Kementerian Pertanian (2019) dengan rata-rata tinggi 108 cm, sedangkan pada perlakuan JKR, SKD, SKR, PKD, dan PKR relatif tinggi yang masing-masing 107,8 cm; 105,2 cm; 106,6 cm; 105,4 cm dan 107,2 cm. Hal ini mungkin disebabkan kompos jerami mampu menyediakan unsur hara lebih optimal serta

mengkelat logam lebih tinggi seperti dalam penelitian (Sutrisna *et al.* 2016), selain itu *solid decanter* diketahui juga memiliki keharaan yang tinggi (Kittikun *et al.* 2021). Hasil penelitian Koesrini *et al.* (2017) dan Rumanti *et al.* (2020) melaporkan bahwa tinggi Inpara-3 pada musim kering dan musim hujan masing-masing adalah 101,8 cm dan 132,5 cm.

Tinggi tanaman terendah terlihat pada perlakuan kontrol, mungkin disebabkan masih tingginya senyawa Al dan Fe pada tanah perlakuan tersebut sehingga menghambat metabolisme tanaman dibandingkan perlakuan aplikasi bahan organik yang mampu mengkelat logam. Semakin tinggi kadar logam di tanah maka menghambat pertumbuhan padi. Mekanisme tanaman yang adaptif keracunan logam akan sedikit menyerap dan mentranslokasikannya dibandingkan tanaman yang rentan sehingga mekanisme *avoidance* akan terjadi pada tanaman yang tahan terhadap cekaman abiotik (Noor *et al.* 2012; Sumardi *et al.* 2021).

Jumlah Anakan Produktif

Aplikasi kompos dari bahan organik lokal yang dikombinasikan limbah padat agroindustri memberikan pengaruh signifikan terhadap jumlah batang anakan produktif padi Inpara-3. Gambar 4 menunjukkan bahwa perlakuan SKD memberikan pengaruh signifikan terhadap perkembangan jumlah batang anakan yang produktif sebanyak 12,2 batang dibandingkan perlakuan lain, tetapi tidak berbeda nyata dengan perlakuan JKR yang berjumlah 12 batang anakan produktif. Tanaman yang memiliki

jumlah anakan produktif terendah terlihat pada perlakuan kontrol yang hanya 6,2 batang. Perkembangan jumlah anakan produktif pada perlakuan SKD dan JKR terlihat tidak berbeda nyata mungkin disebabkan banyak hal, diantaranya faktor fotosintesis dan serapan hara yang optimal pada perlakuan tersebut. Pada tanaman padi yang berfotosintesis menggunakan sistem C3 akan menghasilkan laju fotosintesis yang sangat reaktif terhadap cahaya dan hara sehingga akan membentuk organ-organ baru dalam proses pertumbuhannya (Halim *et al.* 2018; Zheng *et al.* 2021).

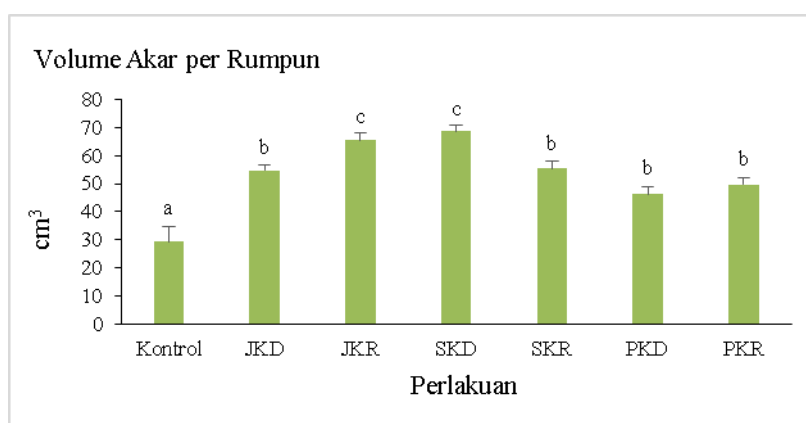
Mekanisme adaptasi pada batas tertentu oleh Inpara-3 juga berperan penting saat fase pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ada 4 respon tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik yakni *sensitive* (rentan/ peka), *escape* (menghindari), *avoidance* (tahan) dan *tolerance* (menenggang). Dalam penelitian ini, sifat *escape* yang muncul dari Inpara-3 ditunjukkan oleh perlakuan tanpa aplikasi kompos dimana tanaman mampu bertahan dari cekaman abiotik, menyelesaikan siklus hidupnya secara cepat sebelum cekaman abiotik terlalu tinggi namun belum mengoptimalkan pembentukan jumlah anakan produktif seperti yang dijelaskan oleh Lestari (2006). Hal ini disebabkan perlambatan laju fotosintesis pada fase generatif akibat cekaman sehingga menurunkan indeks fotosintesis (IF) dan akhirnya mengakibatkan pertumbuhan generatif dan produksi tanaman tidak optimal (Hidayati *et al.* 2016). Tanaman padi yang diberi perlakuan aplikasi kombinasi kompos terlihat menghasilkan jumlah anakan produktif yang optimal mendekati jumlah anakan produktif yang tercantum pada deskripsi varietas Inpara-3

(Kementerian Pertanian 2019), hal ini disebabkan terjadi pengaruh positif perlakuan dalam meminimalisir cekaman.

Peningkatan indeks fotosintesis memerlukan pengelolaan tanah yang tepat sehingga mengurangi cekaman yang terjadi, salah satunya dengan pemberian pembenah tanah untuk memaksimalkan pertumbuhan akar. Yuan-zhi (2015) menyatakan terdapat pengaruh pengolahan tanah terhadap karakter akar sehingga memengaruhi indeks fotosintesis. Oleh sebab itu aplikasi pembenah tanah berupa kombinasi kompos berbahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri dalam perlakuan ini ternyata mampu memberikan pengaruh positif terhadap perkembangan dan pembentukan malai tanaman padi dibandingkan perlakuan kontrol.

Volume Akar Tanaman

Volume akar tanaman merupakan salah satu indikator agronomis penting yang menggambarkan kapasitas dan kapabilitas akar dalam menyerap dan menyimpan air maupun unsur hara. Volume akar dipengaruhi oleh sifat genotif tanaman dan keadaptifan terhadap cekaman. Berdasarkan perhitungan volume akar menunjukkan bahwa perlakuan SKD memberikan respon terbaik untuk meningkatkan volume akar tanaman dari 29,4 mm³ pada perlakuan kontrol menjadi 68,6 mm³ pada perlakuan SKD dan berdasarkan uji BNJ $\alpha = 5\%$ dinyatakan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lain tetapi tidak berbeda dengan perlakuan JKR yang menghasilkan volume akar sebesar 65,4 mm³ (Gambar 5). Hal ini disebabkan oleh sifat *avoidance* tanaman yang mampu menahan cekaman dalam batas tertentu dengan perlakuan SKD dan JKR, sedangkan



Gambar 5. Rerata volume akar per rumpun tanaman Inpara-3 yang ditanam di tanah mineral pasang surut pada perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri. Garis di atas batang menunjukkan simpangan baku (n=5). Huruf yang sama pada diagram batang menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

Figure 5. Average root volume of clump Inpara-3 planted in tidal mineral soil on treatment of compost from various local organic materials combined with agroindustrial solid waste. The line above a bar indicated of standard deviation (n=5). The same letter above the line in each treatment showed not significant difference based on Tukey's HSD $\alpha = 5\%$.

Tabel 1. Fluks CH₄ harian dari tanah persawahan di pasang surut yang diberi perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri.Table 1. Daily CH₄ flux from paddy field of tidal swamp soil treated in combination of compost from various local organic materials with agro-industrial solid waste

Perlakuan	Fluks CH ₄ (mg.m ⁻² .hari ⁻¹)		
	30 hst	60 hst	90 hst
Kontrol	52,73 ± 2,16 ^a	70,18 ± 5,39 ^c	63,87 ± 4,06 ^b
JKD	69,81 ± 1,76 ^{ab}	40,89 ± 3,14 ^a	49,92 ± 2,73 ^a
JKR	64,89 ± 3,03 ^a	44,27 ± 2,22 ^a	51,96 ± 3,27 ^a
SKD	73,44 ± 2,89 ^b	52,03 ± 3,42 ^b	58,32 ± 4,51 ^{ab}
SKR	78,92 ± 3,21 ^b	56,12 ± 2,73 ^b	64,74 ± 2,96 ^b
PKD	66,18 ± 3,57 ^a	39,54 ± 1,92 ^a	44,65 ± 2,58 ^a
PKR	64,56 ± 2,85 ^a	41,68 ± 2,77 ^a	51,89 ± 2,83 ^a

*hst adalah hari setelah tanam

Keterangan: Angka di kanan simbol ± menunjukkan simpangan baku (n=5). Nilai pada setiap kolom diikuti huruf yang sama antar perlakuan menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ $\alpha = 5\%$.

perlakuan lain belum optimal dalam meminimalisir cekaman abiotik yang terjadi.

Volume akar tinggi bilamana cakaman biotik maupun abiotik dapat dikelola dengan baik. Abdillah (2017) dan Ha (2020) melaporkan bahwa indeks volume akar berbanding lurus dengan jumlah anakan tanaman padi, yang semakin banyak anakan padi maka semakin tinggi indeks volume akar. Tanaman dengan indeks volume akar besar mampu mengabsorpsi air dan unsur hara yang lebih banyak sehingga tanaman dapat tumbuh dan berkembang secara maksimal. Akar tanaman padi yang berserabut secara genotif peka terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan dan konsentrasi logam yang tinggi. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa cekaman abiotik memengaruhi pertumbuhan akar dan indeks volume akar tanaman (Maulidiya *et al.* 2015; Prianto *et al.* 2019).

Fluks Metana (CH₄)

Pemberian kompos yang dikombinasikan dengan limbah padat agroindustri berpengaruh terhadap penurunan fluks metana. Tabel 1 menunjukkan bahwa fluks metana dari tanaman saat 30 hst pada perlakuan SKR adalah paling tinggi sebesar 78,92 mg.m⁻².hari⁻¹, sedangkan fluks emisi terendah pada perlakuan kontrol yang hanya 52,73 mg.m⁻².hari⁻¹. Emisi CH₄ yang tinggi pada perlakuan tersebut diduga dipengaruhi LPKR dan *solid decanter* yang masih mengandung bakteri *acetogenic* dan *acidogenic* secara anaerobik yang membuat pelepasan emisi gas relatif tinggi. Proses digestasi anaerobik ini sering digunakan untuk melepaskan emisi gas metan menjadi bioenergi (Meegoda *et al.* 2018; Zhang *et al.*

2020). Fluks metana pada perlakuan SKR tidak berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan SKD dan JKD, sedangkan JKR, PKD dan PKR dinyatakan berbeda berdasarkan $p < 0,05$. Pada tanaman padi berumur 60 hst, terlihat penurunan fluks metana terendah terjadi pada perlakuan PKD yang menghasilkan fluks 39,54 mg.m⁻².hari⁻¹ namun tidak berbeda nyata dibandingkan perlakuan JKD, JKR dan PKR masing-masing 40,89 mg.m⁻².hari⁻¹; 44,27 mg.m⁻².hari⁻¹; dan 41,68 mg.m⁻².hari⁻¹ (Tabel 1). Fluks metana pada tanaman umur 90 hst lebih tinggi daripada saat 60 hst. Perlakuan kontrol menghasilkan fluks metana tertinggi yakni 70,18 mg.m⁻².hari⁻¹ pada umur 60 hst dan menurun pada 90 hst menjadi 63,87 mg.m⁻².hari⁻¹, namun tidak berbeda nyata dibandingkan perlakuan SKD dan SKR pada 90 hst, sedangkan emisi metana terendah diperoleh dari perlakuan PKD sebesar 44,65 mg.m⁻².hari⁻¹. Hal ini disebabkan oleh rejim air yang rendah sehingga suasana aerobik lebih mendominasi dibandingkan suasana anaerobik, Sapkota *et al.* (2020) menyatakan bahwa aktivitas bakteri dalam kondisi anaerobik meningkat dengan meningkatnya rejim air sehingga terjadi peningkatan emisi CH₄.

Perlakuan kontrol terlihat dalam kondisi hampir jenuh air setiap pekannya disebabkan air yang evapotranspirasi lebih sedikit dibandingkan perlakuan lain dikarenakan pertumbuhan tanaman tidak optimal. Kondisi air yang terus menerus tergenang dengan bahan organik yang tersimpan dalam tanah sangat memengaruhi fluks emisi gas rumah kaca terutama CH₄ yang dihasilkan dari aktivitas bakteri metanogen dan sekresi perakaran di lahan padi sawah (Xu *et al.* 2020; Mehmood *et al.* 2021). Abdul

Tabel 2. Fluks CO₂ harian dari tanah persawahan di pasang surut yang diberi perlakuan kombinasi kompos dari berbagai bahan organik lokal dengan limbah padat agroindustri
 Table 2. Daily CO₂ flux from paddy's field soil in tidal land treated with a combination of compost from various local organic materials with agro-industrial solid waste

Perlakuan	Fluks CO ₂ (mg.m ⁻² .hari ⁻¹)		
	30	60	90
Kontrol	332,82 ± 3,71 ^a	528,63 ± 5,22 ^b	602,29 ± 2,84 ^a
JKD	498,27 ± 2,90 ^c	521,77 ± 2,81 ^{ab}	698,31 ± 3,59 ^b
JKR	466,64 ± 4,77 ^c	554,93 ± 5,23 ^c	742,88 ± 3,91 ^c
SKD	382,66 ± 5,92 ^b	561,22 ± 4,02 ^c	739,24 ± 5,82 ^c
SKR	371,35 ± 4,01 ^{ab}	552,82 ± 4,23 ^{bc}	681,76 ± 3,51 ^b
PKD	352,18 ± 5,37 ^a	468,45 ± 4,88 ^a	669,53 ± 4,11 ^b
PKR	348,82 ± 3,71 ^a	454,70 ± 5,39 ^a	667,68 ± 5,03 ^b

*hst adalah hari setelah tanam

Keterangan: Angka di kanan simbol ± menunjukkan simpangan baku (n=5). Nilai pada setiap kolom diikuti huruf yang sama antar perlakuan menunjukkan tidak berbeda nyata berdasarkan BNJ α = 5%.

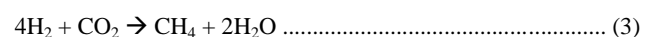
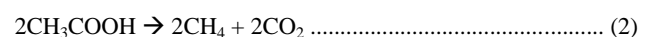
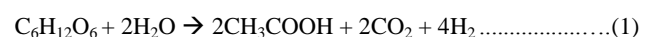
dan Annisa (2017) melaporkan bahwa aplikasi kompos jerami padi dapat meningkatkan fluks metana pada budidaya padi Inpara-3 dan Inpari 30 dibandingkan dengan tanpa kompos jerami padi diawal pertanaman, hal ini diduga karena genangan air yang diberikan pada tanah menciptakan suasana yang anaerobik, mungkin selain itu keragaan varietas juga berpengaruh terhadap emisi gas yang ditimbulkan.

Fluks Karbondioksida (CO₂)

Tabel 2 menunjukkan bahwa pemberian kompos berbahan organik lokal dikombinasikan dengan limbah padat agroindustri menghasilkan rerata fluks karbondioksida relatif tinggi dibandingkan dengan kontrol. Pada 30 hst, fluks karbondioksida paling tinggi terlihat pada perlakuan JKD sebesar 498,27 mg.m⁻².hari⁻¹ yang tidak berbeda dengan perlakuan JKR sebesar 466,64 mg.m⁻².hari⁻¹, sedangkan fluks terendah terlihat pada kontrol yang tidak berbeda nyata dengan PKR, PKD dan SKR dengan nilai fluks masing-masing sebesar 332,82 mg.m⁻².hari⁻¹; 352,18 mg.m⁻².hari⁻¹; 348,82 mg.m⁻².hari⁻¹ dan 371,35 mg.m⁻².hari⁻¹. Dibandingkan 30 hst, fluks karbondioksida meningkat pada 60 hst yang terjadi pada semua perlakuan. Fluks tertinggi saat 60 hst terlihat pada perlakuan SKD sebesar 561,22 mg.m⁻².hari⁻¹, sedangkan fluks terendah pada perlakuan PKR sebesar 454,70 mg.m⁻².hari⁻¹ yang tidak berbeda nyata dengan PKD dan JKD dengan nilai fluks masing-masing 468,45 mg.m⁻².hari⁻¹ dan 521,77 mg.m⁻².hari⁻¹. Fluks karbondioksida tertinggi pada 90 hst dihasilkan dari perlakuan JKR dengan fluks 742,88 mg.m⁻².hari⁻¹ dan terendah pada kontrol sebesar 602,29 mg.m⁻².hari⁻¹. Hal ini mungkin disebabkan kandungan

bahan organik pada perlakuan selain kontrol yang memengaruhi respirasi bakteri, sekresi eksudat akar dan transpirasi tanaman yang sangat aktif sehingga CO₂ meningkat seiring kapasitas rejim air dan durasi kegiatan budidaya (Kuzyakov dan Larionova 2006; Girkin *et al.* 2018)

Fluktuasi emisi karbondioksida mungkin disebabkan oleh kondisi rejim air yang cepat maupun lambat mengering. Pada perlakuan kompos yang dikombinasikan limbah padat agroindustri mampu meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan maksimal sehingga menyebabkan tingginya transpirasi dari akar dan daun serta fotosintesis yang optimal pada stomata daun. Selain itu, sekresi dari rhizosfer diduga memengaruhi fluks CO₂, khususnya pada perlakuan yang diberikan kompos dari tandan kosong kelapa sawit maupun kompos dari jerami padi yang didominasi oleh serat selulosa. Diduga proses dekomposisi yang tinggi masih terjadi pada perlakuan tersebut, sedangkan pada kompos purun tikus telah terjadi stagnansi dekomposisi akibat bahan yang tidak lebih keras dibandingkan jerami padi dan TKKS yang memang tinggi selulosa dan lignin. Aplikasi bahan organik berdampak terhadap peningkatan fluks CO₂ (Yuan *et al.* 2019). Degradasi bahan organik menghasilkan CH₄ dan CO₂ yang berpengaruh pada besarnya emisi dengan persamaan reaksi dekomposisi secara acidogenesis dan metanogenesis sebagai berikut (Yuan *et al.* 2014):



Dari persamaan tersebut dapat dinyatakan bahwa setiap dekomposisi bahan organik yang dibantu oleh bakteri membentuk emisi gas. Bahan organik yang belum terdekomposisi secara maksimal dalam tanah pengairan berselang (*intermittent*) akan membentuk emisi gas dari tanah ke atmosfer akibat proses biologis mikroba di rhizosfer maupun sekresi perakaran hasil metabolisme dan respirasi tanaman (Thangarajan *et al.* 2013; Khalil *et al.* 2015).

Kesimpulan

Aplikasi kompos jerami dikombinasikan *solid decanter* pada tanah sawah dari lahan pasang surut meningkatkan tinggi tanaman, menurunkan berat isi tanah dan menurunkan fluks CH₄ pada 60 dan 90 hst. Aplikasi kompos jerami dikombinasikan limbah karet remah meningkatkan jumlah anakan produktif, volume akar dan menurunkan konsentrasi pirit. Aplikasi perlakuan berbagai jenis kompos yang dikombinasikan limbah solid agroindustri tidak nyata menurunkan fluks CO₂ pada 30 dan 90 hst. Aplikasi kompos purun tikus dikombinasikan limbah padat karet remah mampu menurunkan fluks CO₂ pada 60 hst.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih sebesarnya kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia, Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi Wilayah XI Kalimantan, unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat Politeknik Hasnur serta berbagai pihak sehingga Penelitian Dosen Pemula dengan Nomor Kontrak 072/E4.1/AK.04.PT/2021 ini dapat terlaksana.

Daftar Pustaka

- Abdillah MH. 2017. Pengaruh Aplikasi Abu Batubara terhadap Perkembangan dan Produksi Tanaman Padi pada Tiga Tipologi Tanah Sawah. Thesis Program Pascasarjana Fakultas Pertanian ULM
- Abdillah MH. 2021. Composting of oil palm empty bunches using various effective local microorganisms. *Agrotechno.* 6(1): 17-24. <https://doi.org/10.24843/JITPA.2021.v06.i01.p03>
- Abdillah MH, Effendi NR, Rusnandar N. 2020. Karakteristik fisik dan kimia limbah padat industri karet remah dengan masa inkubasi berbeda. *Agrisains.* 6(1): 1–7. <https://doi.org/10.46365/agrs.v6i01.377>
- Abdillah MH, Saidy AR, Wahdah R. 2020. Pertumbuhan dan produksi tanaman padi varietas Inpara-3 pada tanah tergenang yang diberikan abu batubara. *Rawa Sain.* 10(1): 1-8. <https://doi.org/10.36589/rs.v10i1.108>
- Abduh AM, Annisa W. 2017. Interaction of paddy varieties and compost with flux of methane in tidal swampland. *Journal of Tropical Soils.* 21(3): 179. <https://doi.org/10.5400/jts.v21i3.2206>
- Annisa W, Hanudin E. 2013. Peran ligan organik terhadap pembentukan oksida besi di tanah sulfat masam. *Jurnal Sumberdaya Lahan.* 7(1): 37–46. <https://doi.org/10.2018/jSDL.v7i1.6428>
- 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. <https://doi.org/10.21082/jti.v40n2.2016.135-145>
- Anshori A, Sunarminto BH, Haryono E, Mujiyo. 2018. Potential production of CH₄ and N₂O in soil profiles from organic and conventional rice fields. *Sains Tanah: Journal of Soil and Agroclimatology.* 15(1): 54–60. <https://doi.org/10.15608/stjssa.v15i1.19324>
- Aulakh MS, Wassmann R, Bueno C, Rennenberg H. 2001. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil. *Int. J. Plant and Soil.* 230: 77-86. <https://doi.org/10.1023/A:1004817212321>
- Barbosa RS, de Souza ZM, Carneiro MP, Farhate CVV. 2021. Root system and its relations with soil physical and chemical attributes in orange culture. *Appl. Sci.* 11(1790). <https://doi.org/10.3390/app11041790>
- Celik I, Gunal H, Budak M, Akpınar C. 2010. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid mediterranean soil conditions. *Geoderma.* 160(2): 236–243. <https://doi.org/10.1016/J.Geoderma.2010.09.028>
- Chirinda N, Arenas L, Katto M, Loaiza S, Correa F, Isthitani M, Loboguerrero AM, Martínez-Barón D, Graterol E, Jaramillo S, Torres CF, Arango M, Guzmán M, Avila I, Hube S, Kurtz DB, Zorrilla G, Terra J, Irisarri P, Bayer C. 2018. Sustainable and low greenhouse gas emitting rice production in latin america and the caribbean: A Review on the transition from ideality to reality. *Sustainability.* 10(671): 1–16. <https://doi.org/10.3390/su10030671>
- Conrad R. 2020. Methane production in soil environments: Anaerobic biogeochemistry and microbial life between flooding and desiccation. *Microorganisms.* 8(6): 1–12. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8060881>

- Eliasson PE, McMurtrie RE, Pepper DA, Strömngren M, Linder S, Ågren GI. 2004. The response of heterotrophic CO₂ flux to soil warming. *Global Change Biology*. 11: 167-181, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00878.x>
- Girkin NT, Ostle N, Tunner, BL, Sjögersten S. 2018. Root exudates and carbon emissions from tropical peatland. *Soil Biology and Biochemistry*. 117:48-55. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.11.008>
- Ha DH. 2020. Correlation between root development and rice growth (KD18) under the influence of different irrigation regimes. *TNU J. Sci. Tech*. 225(8): 487-493. <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.2020.08.3282>
- Halim NSA, Abdullah R, Karsani SA, Osman N, Panhwar QA, Ishak CF. 2018. Influence of soil amendments on the growth and yield of rice in acidic soil. *Agronomy*. 8(165). <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy8090165>
- Hervani A, Wiharjaka A. 2014. Effectiveness of sampling time and measurement of greenhouse gas on water management in rice field. *Widyariset*. 17(2): 227-232. <http://dx.doi.org/10.14203/widyariset.17.2.2014.227-232>
- Hidayati N, Triadiati, Anas I. 2016. Photosynthesis and transpiration rates of rice cultivated under the system of rice intensification and the effects on growth and yield. *Hayati. J. BioSci*. 23: 67-72. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hjb.2016.06.002>
- Hou AX, Chen GX, Wang ZP, Cleemput, OV, Patrick WH. 2000. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. *Soil Sci. Soc. American Journal*. 64(6): 2180-2186. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2000.6462180X>
- [IAEA] International Atomic Energy Agency. 1992. *Manual Measurement of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture*. International Atomic Energy Agency.
- Jiao Z, Hou A, Shi Y, Huang G, Wang Y, Chen X. 2006. Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 37(14): 1889-1903. <https://doi.org/10.1080/00103620600767124>
- Kementerian Pertanian. 2019. Inpara 3 - Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. <https://www.litbang.pertanian.go.id/varietas/678/> (2 Juli 2021)
- Khalil HPSA, Hossain S, Rosamah E, Azli, NA, Saddon N, Davoudpoura Y, Islam N, Dungani R. 2015. The role of soil properties and its interaction towards quality plant fiber: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 43(4): 1006-1015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.099>
- Kittikun AH, Cheirsilp B, Sohsomboon N, Binmarn D, Pathom-aree W, Srinuanpan, S. 2021. Palm oil decanter cake wastes as alternative nutrient sources and biomass support particles for production of fungal whole-cell lipase and application as low-cost biocatalyst for biodiesel production. *Processes*. 9(1365). <https://doi.org/10.3390/pr9081365>
- Koesrini, Saleh M, Nurzakiah S. 2017. Adaptabilitas varietas Inpara di lahan rawa pasang surut tipe luapan air B pada musim kemarau. *Jurnal Agronomi Indonesia*. 45(2): 117-123. <https://dx.doi.org/10.24831/jai.v45i2.13559>
- Koesrini, Sosiawan H, Darsani YR. 2020. Preferensi petani terhadap beberapa varietas padi Inpara di lahan rawa pasang surut Kalimantan Selatan. *Agros*. 22(1). 41-50. <http://e-journal.janabadra.ac.id/index.php/JA/article/view/1108/740>
- Kuzyakov YV, Larionova AA. 2006. Contribution of rhizomicrobial and root respiration to the CO₂ emission from soil: A review. *Eurasian Soil Sci*. 39:753-764. <https://doi.org/10.1134/S106422930607009X>
- Lestari EG. 2006. Review: Mekanisme toleransi dan metode sekesi tumbuhan yang tahan terhadap cekaman kekeringan. *Berita Biologi*. 8(3): 215-222.
- Liu Q, Li YH, Li Z, Wei XM, Zhu ZK, Wu JS, Ge TD. 2021. Characteristics of paddy soil organic carbon mineralization and influencing factors under different water conditions and microbial biomass levels. *J. Environ Sci*. 42(5): 2440-2448. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202010105>
- Maulidiya L, Sundahri, Hariyono K. 2015. Studi karekter pertumbuhan empat varietas padi (*Oriza sativa* L.) pada tiga ketinggian tempat berbeda. *Berkala Ilmiah Pertanian*. 5(2): 22-25. <http://repository.unej.ac.id/handle/123456789/69331>
- Mawardi, Sunarminto BH, Purwanto BH, Sudira P, Gunawan T. 2020. The influence of tidal on fe distribution at tidal swamp rice-farming in barito river area, South Kalimantan, Indonesia. *BIO Web of Conferences*. 2: 02002. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202002002>
- Meegoda JN, Li B, Patel K, Wang LB. 2018. A Review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion. *Int. J. Environ Res. Public Health*. 15(2224). <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph15102224>

- Mehmood F, Wang G, Gao Y, Liang Y, Zain M, Rahman SU, Duan A. 2021. Impacts of irrigation managements on soil CO₂ emission and soil CH₄ uptake of winter wheat field in the North China. *Water*. 13(2052): 1–28. <https://doi.org/10.3390/w13152052>
- Noor A, Lubis I, Ghulamahdi M, Chozin MA. 2012. Pengaruh konsentrasi besi dalam larutan hara terhadap gejala keracunan besi dan pertumbuhan tanaman padi. *Journal Agronomi Indonesia*. 40(2): 91–98. <https://doi.org/10.24831/jai.v40i2.14311>
- Panjaitan E, Indradewa D, Martono E, Sartohadi J. 2015. Sebuah dilema pertanian organik terkait emisi metan. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 22(1): 66–72. <https://doi.org/10.22146/jml.18726>
- Prianto J, Aziez AF, Harieni S. 2019. Karakter perakaran dan hasil berbagai varietas padi sawah (*Oriza sativa* L.) dengan aplikasi mikoriza pada lahan sawah tadah hujan. *Agrineca*. 19(2): 66–72. <https://doi.org/10.36728/afp.v19i2.902>
- Ramesh T, Selvaraj R. 2020. Evaluation of rice cultivation systems for greenhouse gases emission and productivity. *Int. J. Eco. Environ Sci*. 2(2): 49–54.
- Rumanti IA, Koesrini, Sosiawan H, Rina Y. 2020. Uji adaptasi dan seleksi varietas partisipatif terhadap galur-galur padi toleran rendaman dan kekeringan di lahan rawa lebak. *Jurnal Agronomi Indonesia*. 48(2): 118–126. <https://dx.doi.org/10.24831/jai.v48i2.31652>
- Saidy AR. 2018. Bahan Organik Tanah: Klasifikasi, Fungsi dan Metode Studi. Lambung Mangkurat University Press. [http://eprints.ulm.ac.id/4505/1/Buku - Bahan Organik Tanah.pdf](http://eprints.ulm.ac.id/4505/1/Buku-BahanOrganikTanah.pdf)
- Saputra DD, Putrantyo AR, Kusuma Z. 2018. Hubungan kandungan bahan organik tanah dengan berat isi, porositas dan laju infiltrasi pada perkebunan salak di Kecamatan Purwosari Kabupaten Pasuruan. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*. 5(1): 647–654.
- Sapkota A, Haghverdi A, Evila, CCE, Ying SC. 2020. Irrigation and greenhouse gas emissions: A review of field-based studies. *Soil Syst*. 4(2). <https://doi.org/10.3390/soilsystems4020020>
- Setyanto P, Abubakar R. 2006. Evaluation of methane emission and potential mitigation from flooded rice field. *Jurnal Litbang Pertanian*. 25(4). 139–148. <http://www.pustaka.litbang.deptan.go.id/publikasi/p3254064.pdf>
- Suastika IW, Hartatik W, Subiksa IGM. 2014. Karakter dan Teknologi Pengelolaan Lahan Sulfat Masam Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan. In Husnain, P. Wigena, W. Hartatik, Y. Sulaeman, I. W. Suastika, J. Purnomo (Eds.), *Pengelolaan Lahan Pada Berbagai Ekosistem Mendukung Pertanian Ramah Lingkungan* (ke-1, Nomor 1, hal. 97–120). IAARD Press. <https://balittanah.litbang.pertanian.go.id/ind/dokumentasi/buku/ekosistemramahlingkungan/05karakteristikswastika.pdf>
- Sumardi, Chozin MA, Sigit S. 2021. Penampilan agronomis dan produktivitas galur-galur padi rawa pada lahan lebak. *Jurnal Agronomi Indonesia*. 49(1): 1–6. <https://doi.org/10.24831/jai.v49i1.34143>
- Susilawati A, Fahmi A. 2013. Dinamika besi pada tanah sulfat masam yang ditanami padi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 7(2): 67–75.
- Sutrisna N, Surdianto Y, Marbun O. 2016. Pengaruh perlakuan jerami dan varietas padi inbrida terhadap emisi gas rumah kaca di lahan sawah irigasi. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 40(2): 79–85. <https://doi.org/10.2017/jti.v40i2.5517>
- Thangarajan R, Bolan NS, Tian G, Naidu R, Kunhikrishnan A. 2013. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Int. J. Sci. Environ*. 465(1): 72–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.031>
- Wang C, Amon B, Schulz K, Mehdi, B. 2021. Factors that influence nitrous oxide emissions from agriculture soil as well as their representation in simulation models: A Review. *Agronomy*. 11(770). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040770>
- Xu J, Lai DYF, Neogi S. 2020. Effects of land use types on CH₄ and CO₂ production potentials in subtropical wetland soils. *Water*. 12(1856): 1–19. <https://doi.org/10.3390/W12071856>
- Yuan J, Yi X, Cao L. 2019. Tree-source partitioning of methane emissions from paddy soil: Linkage to methanogenic community structure. *Int. J. Molec. Sci*. 1586(20): 539–556. <https://doi.org/10.3390/ijms20071586>
- Yuan Q, Pump J, Conrad R. 2014. Straw application in paddy soil enhances methane production also from other carbon sources. *Biogeosciences*. 11(2): 237–246. <https://doi.org/10.5194/bg-11-237-2014>
- Yuan-zhi Y. 2015. Effects of ridge tillage on photosynthesis and root characters of rice. *Chilean. J. Agr. Res*. 75(1): 35–41. <https://doi.org/10.4067/S0718-5839201500010000>
- Zaman M, Kleineidam K, Bakken L, Berendt J, Bracken C, Butterbach-Bahl K, Cai Z, Chang SX, Clough T, Dawar K, Ding WX, Dörsch P, dos Reis Martins M, Eckhardt C, Fiedler S, Frosch T, Goopy J, Görres C-M, Gupta A, Henjes S, Hofmann MEG, Horn MA, Jahangir MM. 2021. Measuring Emission of

Agricultural Greenhouse Gases and Developing Mitigation Options using Nuclear and Related Techniques. In *Springer*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55396-8>

Zhang H, Liu H, Hou D, Zhou Y, Liu M, Wang Z, Liu L, Gu J, Yang J. 2019. The effect of integrative crop management on root growth and methane emission of paddy rice. *The Crop Journal*. 7(4): 444–457. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2018.12.011>

Zhang Y, Sun R, Varrone C, Wei Y, Shyrin A, Zhou A, Zhang J. 2020. Enhanced acetogenesis of waste activated sludge by conditioning with processed organic wastes in co-fermentation: kinetics, performance and microbial response. *Energies*. 13(3630). <http://dx.doi.org/10.3390/en13143630>

Zheng S, Ye C, Lu J, Liufu J, Lin L, Dong Z, Li J, Zhuang C. 2021. Improving the rice photosynthetic efficiency and yield by editing OsHXX1 via CRISPR/Cas9 system. *Int. J. Mol. Sci.* 22(9554). <https://doi.org/10.3390/ijms22179554>