

Pengaruh Pemberian Pestisida terhadap Transformasi Asam Fenolat serta Produksi CO₂ dan CH₄ pada Tanah Gambut

Effects of Pesticide Application on Phenolic Acid Transformations and CO₂ and CH₄ Productions from Peat Soil

Fuzi Suciati*¹, Syaiful Anwar², Dadang³, Dwindrata B. Aviantara⁴, Rahayu Widyastuti²

¹ Perakayasa di BTPAL-BPPT, Gedung Geostek No. 820, Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

² Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Jl. Meranti, Kampus IPB Dramaga, Bogor 16680, Jawa Barat, Indonesia

³ Departemen Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Jl. Kamper, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680, Jawa Barat, Indonesia

⁴ Balai Teknologi Lingkungan-Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Kantor Teknologi Lingkungan-TPSA BPPT, Gedung BPPT 2 Lantai 19, Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima: 3 Februari 2015

Direview: 3 Maret 2015

Disetujui: 14 Februari 2016

Kata kunci:

Pestisida

Asam fenolat

CO₂

CH₄

Paraquat

Buthylphenylmethylcarbamate
(BPMC)

Tanah gambut

Abstrak. Degradasi bahan organik dari tanah gambut menghasilkan berbagai asam fenolat, CO₂ dan CH₄. Asam fenolat bersifat toksik dan menyebabkan terhambatnya pertumbuhan tanaman. Sebagian pestisida yang diaplikasikan jatuh ke tanah dan bereaksi dengan bahan organik tanah. Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh penambahan pestisida terhadap ikatan asam fenolat pada tanah gambut serta menganalisis tingkat emisi CO₂ dan CH₄. Penelitian ini menggunakan 2 jenis pestisida yaitu herbisida paraquat diklorida dan insektisida Buthylphenylmethylcarbamate (BPMC). Dosis pestisida yang digunakan mengacu kepada dosis anjuran, yaitu 4 liter ha⁻¹ untuk paraquat dan 1 liter ha⁻¹ untuk BPMC. Perlakuan menggunakan 3 dosis (setengah, setara dan dua kali dosis anjuran: µg kg⁻¹): 1.104, 2.208, dan 4.416 untuk paraquat dan 485, 970, dan 1.940 untuk BPMC dengan satu kontrol. Setelah diinkubasi 1, 7, 14 dan 28 hari dilakukan analisis yang meliputi asam fenolat, residu pestisida, gugus fungsional, serta emisi CO₂ dan CH₄. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pestisida menurunkan jumlah asam fenolat di dalam tanah gambut. Penggunaan bahan aktif paraquat dan BPMC memperlihatkan pola yang sama terhadap perubahan konsentrasi asam fenolat dalam tanah. Dosis bahan aktif BPMC 485 µg kg⁻¹ menyebabkan penurunan residu pestisida lebih tinggi dibandingkan dosis yang lainnya yaitu sebesar 95% setelah 28 hari masa inkubasi. Secara umum penggunaan bahan aktif paraquat pada semua dosis yang diuji tidak meninggalkan residu setelah 28 hari masa inkubasi. Pemeriksaan gugus fungsional dengan FTIR tidak mendeteksi adanya penambahan gugus fungsional baru pada semua dosis dan jenis bahan aktif, namun perubahan intensitas puncak serapan dapat merupakan indikasi bahwa terjadi perubahan komposisi senyawa kimia dalam tanah gambut selama periode inkubasi. Penambahan pestisida tidak nyata mempengaruhi emisi CO₂ dan CH₄.

Keywords:

Pesticides

Phenolic acids

CO₂

CH₄

Paraquat

Buthylphenylmethylcarbamate
(BPMC)

Peat soil

Abstract. Degradation of organic matter from peat soil produces various phenolic acids, CO₂, and CH₄. The phenolic acid is known toxic and causes plant growth retardation. Some of pesticide is unintentionally drip on peat soil surface and reacts with organic matter. This study was aimed at evaluating the influence of pesticides on phenolic acid bondings as well as CO₂, and CH₄ emissions. Two types of pesticides were used: herbicide paraquat dichloride and insecticide Buthylphenylmethyl-carbamate (BPMC). The pesticide dosages were based on the recommended application, i.e. 4 liter ha⁻¹ for paraquat and 1 liter ha⁻¹ for BPMC. Treatments were consisted of 3 levels of dosage (half, equal and two-fold the recommended rates: µg kg⁻¹): 1,104; 2,208; and 4,416 for paraquat and 485, 970, and 1,940 for BPMC and a control treatment. After 1, 7, 14, and 28 days of incubation, soils in each treatment were analyzed for phenolic acids, pesticide residues, functional groups, and CO₂ and CH₄ emissions. The results showed that pesticide application reduced the total phenolic acid concentrations of peat soil. Paraquat and BPMC applications showed a similar pattern on soil phenolic acid concentrations. BPMC dosage of 485 µg kg⁻¹ reduced 95% of pesticide residues, which was the highest reduction compared to any other dosages. In general, paraquat application at the tested dosages left no pesticide residues after 28 days of incubation. The FTIR analysis did not detect appearance of any new functional groups under the tested rates and types of pesticides. However, altered intensity of the absorption peaks could be an indication of compositional changes of the chemical substances within peat soil during the incubation period. Pesticide application did not significantly affect CO₂ and CH₄ emissions.

* Corresponding author: fuzi.suciati@gmail.com

Pendahuluan

Lahan gambut merupakan lahan suboptimal untuk pertanian karena kesuburannya yang rendah, pH sangat masam, kapasitas tukar kation yang sangat tinggi, kejenuhan basa rendah, dan drainase yang buruk (BBSDLP 2011). Sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan keterbatasan lahan pertanian menyebabkan pilihan diarahkan kepada lahan gambut karena mempunyai beberapa kelebihan di antaranya ketersediaan air melimpah dan topografi relatif datar (Noor 2001). Tanah gambut di Indonesia biasanya terbentuk dari dekomposisi pepohonan yang mempunyai kandungan lignin tinggi. Dekomposisi lignin ini akan menghasilkan beberapa senyawa asam organik seperti: asetat, butirat dan fenolat (Stevenson 1994). Tanah gambut di Jambi dan Kalimantan Tengah mengandung derivat asam fenolat yang penting, yaitu: ferulat, sinapat, kumarat, vanilat, siringat, galat dan hidroksibenzoat (Mario & Sabiham 2002).

Asam fenolat bersifat toksik bagi tanaman karena menghambat pertumbuhan, pada konsentrasi 250 μM menurunkan secara nyata serapan kalium oleh tanaman barley (Hartley & Whitehead 1984). Menurut Tadano *et al.* (1992) asam salisilat dan asam ferulat menyebabkan terhambatnya serapan kalium dan fosfor pada gandum, asam ferulat pada konsentrasi 500-1.000 μM juga menurunkan serapan fosfor pada kedelai serta asam hidroksibenzoat yang diberikan dengan konsentrasi $> 0,1 \mu\text{M}$ menurunkan bobot kering tanaman. Hal tersebut sejalan dengan penelitian Wang *et al.* (1967) bahwa konsentrasi asam hidroksibenzoat sebesar 7-70 μM dapat menekan pertumbuhan tanaman jagung, gandum, dan kacang-kacangan, sedangkan pada konsentrasi 360 μM menyebabkan terhambatnya pertumbuhan akar tebu.

Pilihan pemanfaatan terhadap lahan gambut untuk pertanian sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan keterbatasan lahan pertanian. Pertanian di lahan gambut menghadapi berbagai kendala diantaranya gangguan organisme pengganggu tanaman (OPT). Gangguan OPT (hama-penyakit-gulma) dapat mengakibatkan penurunan dan ketidaktahanan produksi. Oleh karena itu, keberhasilan pengembangan lahan gambut menjadi lahan pertanian tidak lepas dari penggunaan pestisida. Pada saat pestisida diaplikasikan, kurang lebih hanya 20% yang mengenai sasaran, sedangkan 80% lainnya jatuh ke tanah atau terlindi ke perairan (Sa'id 1994).

Tingginya kandungan bahan organik pada lahan gambut memungkinkan terjadinya mekanisme pengikatan pestisida oleh bahan organik karena memiliki gugus fungsional kimia, seperti: karboksil, hidroksil dan amina

yang dapat berinteraksi dengan pestisida (Yong *et al.* 1992). Sebagian besar molekul pestisida bersifat non-polar sehingga keberadaan senyawa organik dalam gambut menjadi penting dalam hal pengikatan pestisida (Harrad 1996). Pedersen *et al.* (1995) mengungkapkan bahwa terikatnya pestisida pada senyawa organik gambut memengaruhi sifat dan mobilitasnya yang menyebabkan pestisida secara fisiologik menjadi tidak aktif dan sulit diurai oleh mikroba sehingga menurunkan pergerakan spasial pestisida. Selain itu Gerstler (1991) mengemukakan bahwa terikatnya pestisida dengan bahan organik mengurangi aktifitas asam fenolat.

Lahan gambut merupakan salah satu sumber emisi terbesar bila dirubah dari lingkungan hutan alam. Lahan gambut dikenal merupakan sumber emisi gas rumah kaca (GRK) terbesar dari sektor pertanian dan kehutanan karena menyimpan cadangan karbon sangat besar yaitu 550 Gt $\text{CO}_2\text{-e}$, setara dengan 75% karbon di atmosfer atau setara dengan dua kali simpanan karbon semua hutan di seluruh dunia (Joosten 2007). Lahan gambut terbentuk dari akumulasi bahan organik yang mudah mengalami dekomposisi apabila ada perubahan kondisi lingkungan menjadi aerob. Proses dekomposisi bahan organik akan menghasilkan berbagai asam fenolat, gas CO_2 dan gas metana.

Penelitian ini bertujuan untuk meng-evaluasi pengaruh penambahan pestisida terhadap interaksi dan ikatan asam-fenolat dan kaitannya terhadap emisi CO_2 dan CH_4 pada tanah gambut.

Bahan dan Metode

Tempat dan waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bioteknologi Tanah dan Lingkungan, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Sampel berasal dari lahan gambut yang telah disawahkan yang terletak di Desa Kanamit Jaya, Kecamatan Maluku, Kabupaten Pulang Pisau, Provinsi Kalimantan Tengah. Lokasi pengambilan sampel tanah terletak pada titik geografik $2^{\circ} 55' 46'' \text{ LU}$ and $114^{\circ} 10' 16'' \text{ BT}$.

Bahan penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah: sampel tanah gambut yang disawahkan, dua jenis pestisida yaitu herbisida dengan bahan aktif paraquat dan insektisida dengan bahan aktif buthylphenylmethyl carbamat (BMPC), tujuh jenis asam fenolat yaitu galat,

prokatekuat, hidroksibenzoat, vanilat, siringat, ferulat dan kumarat. Alat yang digunakan adalah *Gas Chromatography* (GC) 2014 Shimadzu, *High-Performance Liquid Chromatography* (HPLC) Shimadzu 20A, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) Shimadzu Prestige-21.

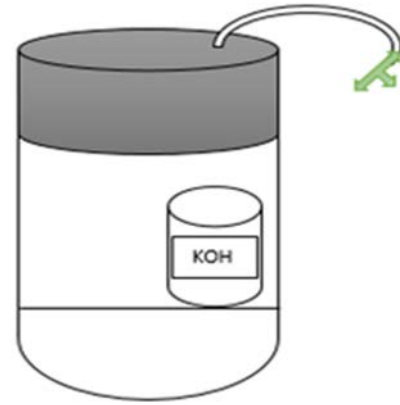
Metode penelitian

Pengambilan sampel tanah merujuk pada Elsas & Smalla (1997) yang menggunakan metode *random sampling* pada luas lahan sekitar satu hektar. Sampel tanah diambil secara komposit pada kedalaman 0-25 cm. Analisis fisik dan kimia tanah awal meliputi pH, kadar C-organik, N-total, kadar serat, warna dan tingkat dekomposisi.

Penelitian ini menggunakan 2 jenis pestisida yaitu herbisida paraquat dan insektisida BPMC. Pemilihan pestisida berdasarkan survey pada petani di desa Kanamit Jaya. Dosis pestisida yang digunakan mengacu pada dosis anjuran pemakaian, yaitu 4 liter ha⁻¹ untuk paraquat dan 1 liter ha⁻¹ untuk BPMC dengan *bulk density* gambut 0,25 g ml⁻¹ dan ketebalan gambut terkena pestisida setebal 10 cm yang setara dengan dosis bahan aktif 2.208 µg kg⁻¹ tanah gambut untuk paraquat dan 970 µg kg⁻¹ tanah gambut untuk BPMC. Perlakuan menggunakan 3 dosis pestisida (setengah, setara dan dua kali dosis anjuran) dan kontrol. Perlakuan untuk 500 g tanah adalah sebagai berikut: K/kontrol (gambut tanpa pestisida); A1(gambut + bahan aktif paraquat 552 µg); A2 (gambut + bahan aktif paraquat 1.104 µg); A3 (gambut + bahan aktif paraquat 2.208 µg); B1 (gambut + bahan aktif BPMC 242,5 µg); B2 (gambut + bahan aktif BPMC 485 µg) dan B3 (gambut + bahan aktif BPMC 970 µg). Analisis yang dilakukan meliputi asam fenolat, residu pestisida, gugus fungsional, serta emisi CO₂ dan CH₄.

Inkubasi dan pengambilan sampel

Inkubasi dilakukan pada suhu kamar dengan sampel tanah sebanyak 500 g, kemudian ditambahkan pestisida sesuai dosis yang telah ditentukan. Pengambilan sampel untuk pengukuran dilakukan setelah 1, 7, 14, dan 28 hari inkubasi. Waktu pengambilan sampel ditetapkan berdasarkan *half degradation time* (DT₅₀) pestisida yang merujuk kepada EPA (1998). Untuk pengambilan sampel CO₂ tabung inkubasi ditutup pada suhu ruangan (28-30°C) di tempat gelap selama 24 jam sebelum waktu pengambilan sampel yang telah ditentukan. Sebelum ditutup terlebih dahulu dimasukkan tabung kecil yang berisi 5 ml KOH 0,2 N dalam bejana inkubasi. Pada tutup bejana dilakukan modifikasi dengan menambahkan selang kecil pada ujungnya dan diberikan *stop cock* untuk pengambilan sampel gas CH₄.



Gambar 1. Diagram bejana inkubasi

Figure 1. Diagram of the incubation chamber

Analisis residu pestisida

Analisis residu pestisida dilakukan dengan menimbang 20 g sampel tanah gambut, kemudian ditambahkan aseton dan diklorometan sebanyak 50 ml. Sampel kemudian dikocok menggunakan *shaker* selama 8 jam kemudian dilewatkan ke dalam kolom yang berisi florisil dan natrium sulfat (1:1). Setelah itu, dievaporasi selama 15 menit dan dilarutkan kembali dengan metanol sebanyak 25 ml. Analisis residu paraquat ditetapkan dengan HPLC 20A pada suhu 30°C dengan detektor ultraviolet (UV), serta kecepatan alir 0,5 ml menit⁻¹ dengan fasa gerak campuran methanol-air (60:40). Analisis residu BPMC ditetapkan dengan GC yang dioperasikan pada suhu 60°C dengan fasa gerak gas helium serta kecepatan alir 1 ml menit⁻¹ (Deptan 2005).

Analisis asam fenolat

Sebanyak 5 gram sampel ditimbang kemudian ditambahkan metanol sebanyak 25 ml lalu dikocok menggunakan *shaker* selama 60 menit. Ekstrak disentrifusi dengan kecepatan 3.000 rpm, kemudian disaring menggunakan *milipore* 0,2 µm. Sampel dianalisis menggunakan HPLC yang dilengkapi dengan kolom fasa balik C18 dan detektor tipe ultraviolet (UV) dengan lampu D2 pada panjang gelombang 280 nm. Sistem HPLC dioperasikan pada suhu kolom 30°C, kecepatan aliran 0,7 ml menit⁻¹ dengan fasa gerak campuran TFA 0,1% dan metanol (75:25) (Deptan 2005).

Analisis gugus fungsional

Analisis gugus fungsional dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur kimia dari asam fenolat serta pestisida. Analisis dilakukan dengan FTIR. Sebanyak 2 mg sampel tanah ditambah 200 mg KBr dan ditabletkan.

Pengukuran produksi CO₂ dan CH₄

Menurut Anas (1989), konsentrasi CO₂ dapat diukur dengan menggunakan metode titrasi asam-basa. Setelah sampel diinkubasi, larutan KOH sebanyak 5 ml dalam erlenmeyer ditambahkan 2 tetes indikator fenolftalin (PP) kemudian dititrasi dengan HCl yang telah distandarisasi dengan natrium borat hingga warna merah seulas. Selanjutnya diberikan indikator sindur metil (SM) dan dititrasi kembali dengan HCl hingga berwarna sindur/jingga. Volume HCl yang digunakan kemudian dicatat.

Emisi CH₄ diukur menggunakan GC. Sampel gas diambil setelah waktu inkubasi bersama-sama pengukuran untuk sampel CO₂. Sampel gas dari dalam bejana inkubasi diambil dengan jarum suntik (*syringe*) volume 10 µl kemudian diinjeksikan kedalam GC. Penetapan dilakukan pada suhu kolom 48°C, suhu injektor dan detektor 140°C, kecepatan aliran gas 47 ml menit⁻¹, yang dilengkapi dengan *Flame Ionization Detector* (FID) dengan gas pembawa adalah helium. Perhitungan konsentrasi sampel yaitu dengan membandingkan area sampel yang di hasilkan dengan area standar dikalikan dengan konsentrasi standar.

Analisis data

Analisis data dilakukan secara deskriptif untuk menjelaskan pola perubahan asam-asam fenolat, CO₂ dan CH₄ pada perlakuan jenis dan dosis pestisida yang berbeda.

Hasil dan Pembahasan

Sifat fisik dan kimia sampel tanah gambut

Berdasarkan hasil analisis tanah awal didapatkan nilai pH sebesar 3,50 (Tabel 1). Dengan demikian, sampel tanah tersebut termasuk dalam kriteria sangat masam. Nilai pH ini sesuai dengan hasil penelitian Salampak (1999), di mana gambut Kalimantan Tengah umumnya memiliki pH pada kisaran 3,25-3,75. Tingkat kemasaman tanah gambut berhubungan dengan kandungan asam-asam organik, yaitu humat dan fulvat. Bahan organik yang telah mengalami dekomposisi mempunyai gugus reaktif karboksil dan fenol yang bersifat sebagai asam lemah. Gambut di Indonesia umumnya merupakan gambut ombrogen, terutama gambut pedalaman yang terdiri atas gambut tebal yang terbentuk dari timbunan bahan organik dan miskin hara.

Hal ini terlihat pada hasil analisis sampel tanah di mana kandungan C-organik sebesar 52,07% dan nilai N total sebesar 0,94%. Dari data tersebut diperoleh rasio C/N sebesar 55,3 yang sangat tinggi. Kadar serat menunjukkan

46% (v/v), warna munsell 10 YR 3/1 (*very dark grey*) dan kadar abu 0,24%. Kadar abu dan kadar bahan organik mempunyai hubungan dengan tingkat kematangan gambut (Noor 2001), sehingga berdasarkan kriteria tersebut menurut Agus & Subiksa (2008) adalah hemik. Gambut hemik merupakan gambut setengah matang atau tingkat dekomposisi sedang, di mana sebagian bahan asalnya masih bisa dikenali, bila diremas bahan seratnya 15-75%, berwarna coklat kemerahan sampai coklat tua.

Tabel 1. Sifat utama tanah gambut yang digunakan untuk penelitian. Contoh diambil pada kedalaman 0-25 cm

Table 1. The main properties of peat soil used in this experiment. Samples were taken from 0-25 cm depth

Parameter	Nilai
pH	3,50
C-organik (%)	52,07
N-total (%)	0,94
C/N ratio	55,39
Kadar abu (%)	10,24
Kadar air (%)	70,87
Volume serat (%)	46
Warna munsell	10 YR 3/1 (kelabu sangat gelap)
Tingkat dekomposisi	hemik

Asam fenolat

Hasil penelitian konsentrasi asam fenolat di dalam tanah sebelum perlakuan menunjukkan bahwa ferulat dan vanilat mendominasi asam fenolat, masing-masing dengan kadar sebesar 1,33 dan 1,29 mg kg⁻¹. Sedangkan asam fenolat lain seperti galat, protokatekuat, hidroksibenzoat, siringat, dan fumarat kadarnya berada dalam kisaran 0,4-0,6 mg kg⁻¹ (Tabel 2).

Tabel 2. Kosentrasi berbagai jenis asam fenolat di dalam tanah sebelum diberikan perlakuan pestisida

Table 2. Concentrations of various phenolic acids in the soil prior to pesticide application

Asam fenolat	Konsentrasi mg kg ⁻¹
Asam ferulat	1,32
Asam vanilat	1,29
Asam kumarat	0,57
Asam hidroksibenzoat	0,54
Asam siringat	0,54
Asam protokatekuat	0,47
Asam galat	0,43
Total asam fenolat	5,16

Asam fenolat setelah perlakuan

Hasil penelitian untuk A1 menunjukkan bahwa penurunan tertinggi dialami oleh asam protokatekuat 46,7%, sedangkan terendah adalah asam ferulat 20,04%. Hal ini menandakan bahwa pada penambahan bahan aktif paraquat 552 µg tidak berpengaruh secara nyata terhadap proses biodegradasi asam fenolat dalam tanah oleh mikroba. Berbeda dengan ferulat dan vanilat yang secara konsisten menunjukkan penurunan konsentrasi untuk seluruh periode masa inkubasi, asam fenolat yang lain justru menunjukkan sedikit peningkatan konsentrasi pada pengamatan hari ke-14. Namun, asam ferulat dan vanilat mendominasi komposisi dari asam fenolat yang ada untuk seluruh kisaran waktu masa inkubasi. Konsentrasi asam fenolat mengalami penurunan dibanding kontrol hingga hari ke-28 setelah masa inkubasi (Gambar 2).

Pola yang sama sebagaimana halnya A1 juga diperlihatkan oleh B1. Selama periode masa inkubasi seluruh asam fenolat secara konsisten memperlihatkan kecenderungan penurunan konsentrasi dalam kisaran 16,4-39,4%. Pada perlakuan bahan aktif BPMC 242,5 µg penurunan asam fenolat terbesar terjadi pada asam protokatekuat, sedangkan penurunan terendah terjadi pada asam ferulat. Dari seluruh pengamatan selama masa inkubasi dari minggu pertama hingga keempat total konsentrasi asam fenolat mengalami penurunan sebesar 21,4% untuk perlakuan penambahan pestisida paraquat, sedangkan perlakuan penambahan pestisida BPMC penurunan sebesar 26,4%.

Pada perlakuan A2 untuk hari ke-28 setelah masa inkubasi, konsentrasi asam fenolat menunjukkan kecenderungan naik kecuali untuk asam protokatekuat dan galat (Gambar 2). Bahkan kenaikan yang cukup signifikan terjadi pada asam ferulat, yakni sebesar 21%. Pada hari ke-28, hanya asam galat yang mengalami penurunan konsentrasi cukup nyata yakni sebesar 31%. Seperti halnya pada sampel A1 untuk seluruh masa inkubasi selama empat minggu konsentrasi asam vanilat dan ferulat mendominasi komposisi asam fenolat. Pada awal pengamatan jumlah konsentrasi keduanya menyusun komposisi sebesar 50,7%. Pada periode inkubasi sampai dengan hari ke-14, konsentrasi asam fenolat secara umum menurun dan mulai meningkat pada saat menuju periode inkubasi hari ke-28. Diduga bahwa setelah hari ke-14 dampak penerapan bahan aktif paraquat 1.104 µg menunjukkan daya toksik terhadap aktivitas enzimatik

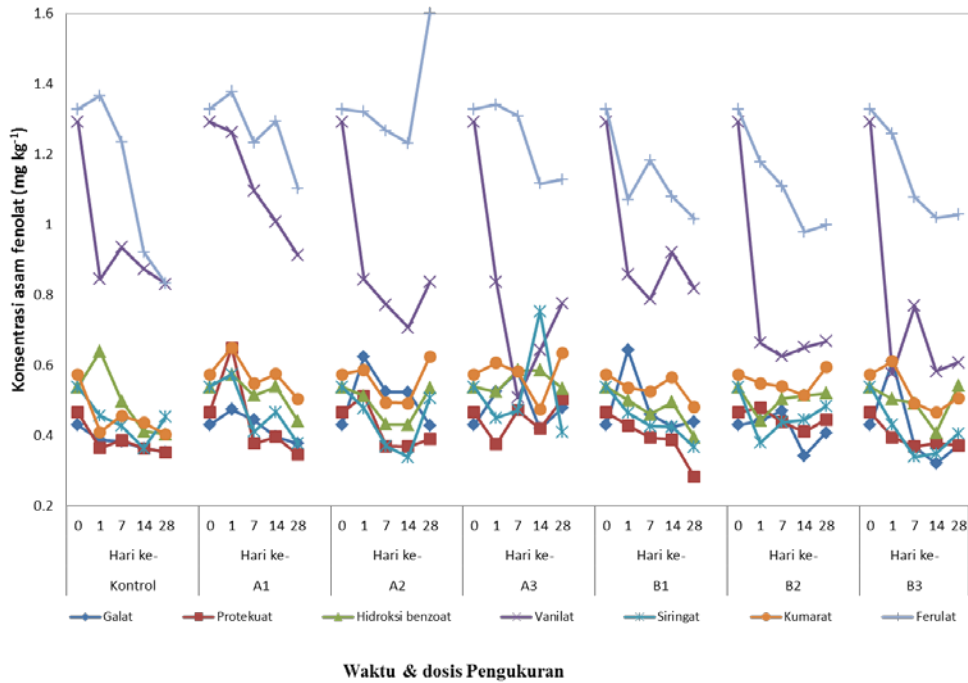
mikroba yang berperan dalam melakukan biodegradasi asam fenolat. Secara umum, hasil pada sampel B2 memperlihatkan pola perubahan konsentrasi asam fenolat yang fluktuatif selama periode inkubasi, kecuali asam ferulat yang menunjukkan penurunan secara konsisten. Berbeda dengan perlakuan A2, pada B2 penurunan tertinggi sebesar 15,2% terjadi pada asam ferulat.

Perlakuan A3 menunjukkan perubahan konsentrasi asam fenolat yang cukup fluktuatif sepanjang periode inkubasi 28 hari tersebut. Namun, hal yang berbeda diperlihatkan oleh perlakuan B3 yang memperlihatkan pola menurunnya konsentrasi asam fenolat. Penurunan tertinggi terjadi pada asam galat sebesar 39,1% dan terendah pada asam siringat sebesar 5,9%. Serupa dengan perlakuan penambahan pestisida paraquat untuk BPMC asam ferulat dan vanilat mendominasi komposisi dari asam fenolat yang ada untuk seluruh kisaran masa inkubasi (Gambar 2).

Walaupun penurunan derivat dari asam fenolat memperlihatkan hasil yang fluktuatif, tetapi hasil total konsentrasi asam fenolat selama masa inkubasi yang disajikan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa asam fenolat mengalami penurunan. Perlakuan dengan bahan aktif pestisida paraquat untuk A1, A2, dan A3 masing-masing sebesar 21,44; 20,77; dan 13,61%, sedangkan perlakuan dengan bahan aktif BPMC berturut-turut sebesar 26,47; 20,25; dan 25,77%.

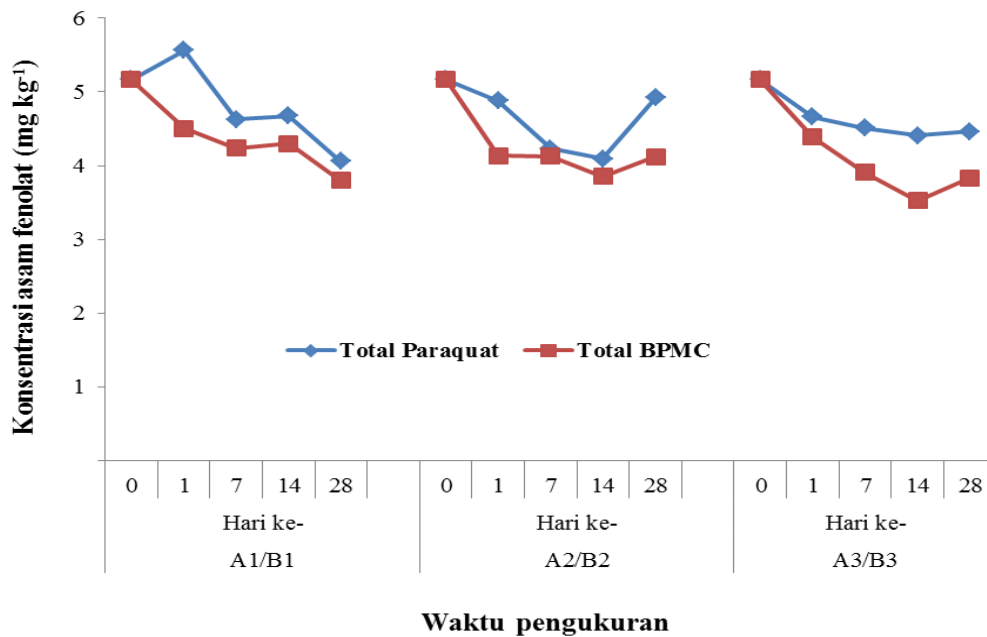
Menurunnya konsentrasi asam-asam fenolat menunjukkan bahwa terjadi interaksi antara pestisida dengan asam-asam fenolat melalui beberapa mekanisme seperti ikatan kovalen, gaya van der Waals, pertukaran ion, ikatan hidrogen, pertukaran ligan dan interaksi hidrofobik (Khan 1989). Selain itu, menurut Bollag (1992) penurunan konsentrasi asam-asam fenolat juga dapat disebabkan karena adanya reaksi kopling antara pestisida dengan asam fenolat. Kopling adalah reaksi penggabungan yang dapat terjadi secara spontan dengan adanya keberadaan oksigen. Selain itu, reaksi kopling dapat terjadi dengan bantuan enzim.

Enzim yang mengkatalisis reaksi kopling dapat dibagi menjadi dua kelas yaitu peroksidase dan monofenol mono-oksigenase. Monofenol monooksigenase masih terbagi menjadi tyrosinase dan lakase. Salah satu fungsi yang menghasilkan lakase adalah *Rhizoctonia praticola*, fungsi tersebut berperan dalam reaksi polimerasi antara 4-kloroanilin dengan asam-asam fenolat seperti ferulat, siringat, dan protokatekuat (Bollag *et al.* 1992).



Gambar 2. Komposisi asam fenolat hasil perlakuan pestisida paraquat dan BPMC pada berbagai dosis setelah periode inkubasi 1-28 hari

Figure 2. Composition of phenolic acids from various rates of paraquat and BPMC treatments on 1-28 days of incubation period



Gambar 3. Konsentrasi total asam fenolat hasil perlakuan pestisida paraquat dan BPMC pada berbagai dosis setelah periode inkubasi 1, 7, 14, dan 28 hari

Figure 3. Concentrations of total phenolic acid from various rates of paraquat and BPMC treatments on 1-28 days of incubation

Terjadinya fluktuasi pada derivat asam fenolat bisa juga dikarenakan terjadi transformasi melalui oksidasi C dari asam fenolat satu menjadi asam fenolat dalam bentuk lain. Penelitian Gosh *et al.* (2005) menyatakan degradasi asam ferulat oleh white rot fungi *schizophyllum commune* menghasilkan asam vanilat. Pada grafik terlihat tingginya ferulat dibarengi dengan tingginya vanilat (Tabel 2). Selain dari kelompok fungi, degradasi asam fenolat juga diperlihatkan oleh kelompok bakteri. Bakteri tanah genus *Azotobacter* strain SSB81 mampu memanfaatkan asam 2,4-diklorofenoksiasetat (2,4-D) dan asam p-kumarat dengan karbon dan nitrogen pada media bebas. Selain itu, strain SSB81 tersebut juga mampu menurunkan 2,4-D melalui asam 4-diklorofenoksiasetat, 4-klorofenol dan 4-klorokatekol pada orto/jalur oksidatif dan asam p-kumarat melalui asam p-hidroksibenzoat dan asam protokatekuat pada jalur non-oksidatif. Oleh karena itu, strain SSB81 berperan dalam proses biotransformasi asam kumarat baik jalur oksidatif maupun jalur non oksidatif untuk degradasi asam fenolat (Gauri *et al.* 2012). Penelitian tersebut sejalan dengan penelitian Misdjan (2015) bahwa terdapat populasi azotobacter sebesar $27,10 \times 10^3$ CFU g^{-1} pada tanah gambut.

Selain itu, faktor lain yang menyebabkan tingginya konsentrasi fenolat pada bentuk yang satu dan rendahnya asam fenolat pada bentuk yang lain, diduga terjadi akibat perbedaan jenis bahan aktif dari setiap pestisida dan penguraian pestisida menjadi senyawa fenol oleh mikroba. Menurut Marianna (2004) dalam Susanti (2015) melaporkan bahwa fenol di tanah dapat berasal dari transformasi pestisida seperti (2,4-D), 4-kloro-2-metilfenoksiasetat (MCPA), 2,4,5-triklorofenoksiasetat (2,4,5-T), 2-butil-4,6 dinitrofenol (Dinoseb) melalui proses hidroksilasi-C dan menghasilkan senyawa fenolat.

Residu pestisida

Residu pestisida dianalisis untuk mengetahui jumlah pestisida yang tersisa setelah mengalami adsorpsi atau degradasi. Degradasi pestisida dapat berjalan secara biologik maupun nonbiologik. Degradasi pestisida adalah proses terjadinya penguraian pestisida oleh mikroba, reaksi kimia, dan sinar matahari (Tarumingkeng 1992). Metabolisme dan kecepatan degradasi pestisida dipengaruhi oleh sifat tanah, temperatur, kelembaban tanah dan dosis pestisida. Setelah mengalami proses degradasi pestisida mengalami transformasi secara oksidasi, reduksi, hidrolisis dan konjugasi. Semua proses itu menentukan keberadaan bahan aktif pestisida di lingkungan.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan A1 yang diinkubasi selama 1 hari terdeteksi residu pestisida sebanyak $0,03 \text{ mg kg}^{-1}$ dan pada minggu selanjutnya menjadi tidak terdeteksi pada saat pengukuran dilakukan

(Tabel 3). Perlakuan A2 masih menyisakan residu paraquat sebanyak $0,02 \text{ mg kg}^{-1}$ pada pengamatan hari ke-28 setelah inkubasi. Pada perlakuan A3 residu paraquat yang tersisa adalah $0,13 \text{ mg}$ pada pengukuran hari ke-14 dan menjadi tidak terdeteksi pada hari ke -28 setelah inkubasi.

Penambahan bahan aktif BPMP menunjukkan bahwa pada hari ke-28 masa inkubasi untuk perlakuan B1 masih menyisakan residu sebanyak $0,043 \text{ mg kg}^{-1}$ (Tabel 3). Residu tersebut kira-kira setara dengan penurunan BPMP sebesar 95%, sehingga mengindikasikan hampir seluruh BPMP yang diaplikasikan mengalami degradasi atau sorpsi. Perlakuan B2 masih menyisakan residu BPMP sebanyak $0,111 \text{ mg kg}^{-1}$ pada hari ke-28 setelah inkubasi, sedangkan untuk perlakuan B3 tampaknya terjadi kejenuhan pada hari ke-14 yang menyebabkan proses degradasi menurun menjadi 86%.

Penelitian Zimdahl (1993) menyatakan bahwa pestisida dapat diadsorpsi sangat kuat, kuat, sedang dan lemah oleh koloid tanah. Penurunan konsentrasi paraquat lebih cepat dibandingkan BPMP dikarenakan paraquat dapat diserap dalam jumlah yang lebih banyak oleh humus, asam fulfat dan organo clay (Khan 1978). Pernyataan tersebut sejalan dengan penelitian Stevenson (1994) bahwa diquat dan paraquat yang merupakan divalen, memiliki potensi untuk bereaksi dengan lebih dari satu sisi muatan negatif pada koloid humus tanah, misalnya melalui dua ion COO^- . Bentuk ikatan antara diquat dan paraquat dengan senyawa humat ditunjukkan pada Gambar 4.

Menurut Roger *et al.* (1994), keberadaan pestisida pada lahan mineral sangat berbeda dengan pestisida pada lahan gambut. Kandungan bahan organik tanah gambut yang tinggi akan meningkatkan laju dekomposisi pestisida secara biotik atau abiotik. Adanya radikal-radikal bebas yang relatif stabil dalam asam humat dan fulfat, mendukung senyawa organik tanah meningkatkan transformasi abiotik berbagai pestisida dalam tanah (Khan 1978). Pernyataan tersebut didukung oleh Zimdahl (1993) yang menyebutkan bahwa tanah yang tinggi kandungan bahan organik dan liatnya mengadsorpsi pestisida lebih besar daripada tanah berpasir. Tingginya kandungan bahan organik pada tanah gambut juga meningkatkan proses dekomposisi pestisida karena bahan organik tanah bertindak sebagai ko-metabolit dan kemampuannya untuk mensuplai nutrisi bagi mikroba dan sebagai sumber energi (Morrill *et al.* 1982).

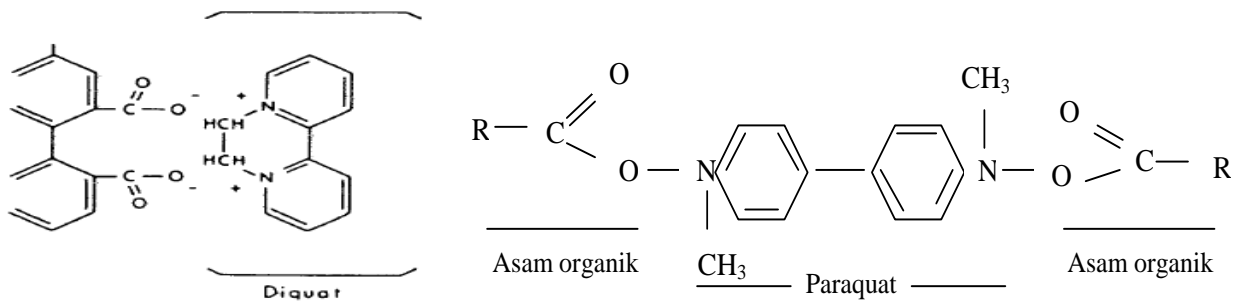
Emisi CO_2 dan CH_4

Ketebalan lapisan air di atas permukaan tanah menentukan laju dekomposisi karena berhubungan dengan suasana oksidasi dan reduksi yang berkaitan erat dalam menentukan produksi emisi gas CO_2 dan CH_4 (Susanti 2015). Dekomposisi gambut dalam kondisi reduktif (anaerob) dapat menghasilkan asam-asam organik, CO_2

Tabel 3. Hasil analisis residu pestisida
 Table 3. Results of analysis of pesticide residues

Waktu pengukuran (hari sesudah inkubasi)	Perlakuan	Konsentrasi paraquat mg kg ⁻¹	Perlakuan	Konsentrasi BPMC mg kg ⁻¹
1	A1	0,03	B1	0,400
7		Tu		0,201
14		Tu		0,192
28		Tu		0,043
1	A2	0,16	B2	0,931
7		0,12		0,350
14		Tu		0,202
28		0,02		0,111
1	A3	0,24	B3	0,850
7		0,17		0,239
14		0,13		0,127
28		Tu		0,123

Keterangan: tu = tidak terukur



Gambar 4. Ilustrasi bentuk ikatan antara bahan organik dengan herbisida diquat dan paraquat
 Figure 4. Illustration of bonding between organic material with diquat and paraquat herbicides

dan CH₄. Sedangkan bahan gambut dalam kondisi oksidatif (aerob) dapat menghasilkan CO₂.

Pemberian pestisida paraquat dan BPMC tidak menunjukkan adanya pengaruh terhadap rata-rata emisi CO₂ dan CH₄ yang dihasilkan. Waktu inkubasi hari ke-28 menunjukkan rata-rata emisi CO₂ tertinggi dan berbeda dengan waktu inkubasi hari ke-1, 7, dan 14. Sampel tanah yang diberi perlakuan penambahan pestisida setengah dosis dan dua kali dosis BPMC dengan waktu inkubasi selama 28 hari menunjukkan emisi CO₂ tertinggi. Hal tersebut berbeda dengan emisi CO₂ pada sampel tanah yang tidak diberi perlakuan penambahan pestisida maupun yang ditambahkan pestisida paraquat dan BPMC pada semua dosis perlakuan namun dengan waktu inkubasi kurang dari 28 hari (hari ke-1, 7, dan 14).

Waktu inkubasi hari ke-28 menunjukkan rata-rata emisi CH₄ tertinggi. Emisi tersebut tampaknya tidak

berbeda dengan waktu inkubasi hari ke-14, namun berbeda untuk waktu inkubasi hari ke-1 dan 7. Pemberian paraquat dua kali dosis rekomendasi kemudian diinkubasi selama 28 hari menunjukkan kadar emisi CH₄ tertinggi tetapi tidak berbeda dengan perlakuan lainnya (Tabel 4).

Aplikasi pestisida memang tidak memberikan pengaruh nyata terhadap peningkatan emisi CO₂ dan CH₄, tetapi terjadi kecenderungan peningkatan emisi CO₂ dan CH₄ seiring dengan bertambahnya waktu inkubasi. Peningkatan emisi CO₂ dan CH₄ diduga pada berasal dari degradasi dan dekomposisi asam fenolat, respirasi mikroorganisme, dan bahan aktif pestisida. Reaksi degradasi dan dekomposisi ini melalui reaksi demetoksilasi. Proses ini adalah ter-degradasinya grup metoksil pada cincin benzen dalam suasana aerobik dan menghasilkan reaksi oksidasi CO₂.

Penambahan pestisida kepada tanah gambut cenderung memperlihatkan pola produksi CH₄ yang lebih rendah

Tabel 4. Emisi CO₂ dan CH₄ hasil perlakuan pestisida paraquat dan BPMC pada berbagai dosis setelah periode inkubasi 1-28 hariTable 4. Emissions of CO₂ and CH₄ from various dosages of paraquat and BPMC treatmentson 1-28 days of incubation period

Kode sampel	Hari ke-				Rata-rata perlakuan
	1	7	14	28	
	Emisi CO ₂ (mg C-CO ₂ g ⁻¹)				
Kontrol	0,0219	0,0277	0,0368	0,0520	0,0346
A1	0,0223	0,0265	0,0355	0,0530	0,0344
A2	0,0223	0,0268	0,0362	0,0530	0,0347
A3	0,0226	0,0268	0,0366	0,0530	0,0348
B1	0,0230	0,0284	0,0363	0,0540	0,0354
B2	0,0258	0,0265	0,0363	0,0524	0,0353
B3	0,0234	0,0274	0,0355	0,0540	0,0351
Rata-rata waktu	0,0231	0,0272	0,0362	0,0531	
	Emisi CH ₄ (mg kg ⁻¹)				
Kontrol	1,81	2,12	2,24	2,26	2,11
A1	1,66	1,82	1,83	2,04	1,84
A2	1,67	1,75	1,84	1,71	1,74
A3	1,68	1,76	1,89	2,53	1,96
B1	2,07	1,53	2,49	2,37	2,12
B2	1,71	1,14	1,90	1,83	1,65
B3	1,90	2,03	1,99	1,97	1,98
Rata-rata waktu	1,79	1,73	2,03	2,10	

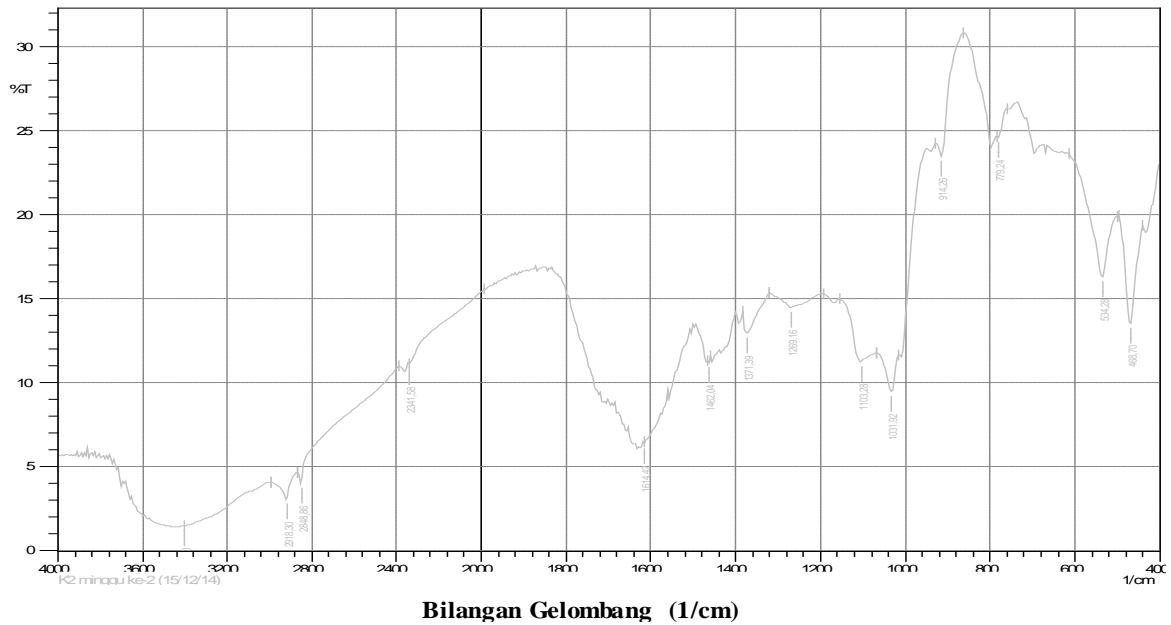
dibandingkan dengan kontrol pada periode inkubasi kurang dari 14 hari. Setelah periode tersebut perlakuan B1 (penambahan setengah dosis BPMC) dan A3 (penambahan paraquat dua kali dosis) menunjukkan emisi metana yang lebih tinggi dibandingkan kontrol. Herbisida paraquat diketahui dapat mengurangi emisi CH₄ sebesar 80% pada tanah inceptisol. Penambahan insektisida karbamat pada tanah inceptisol yang diberi biochar sekam menurunkan emisi CH₄ sebesar 33,2%. Pengurangan emisi dengan penambahan pestisida berhubungan dengan berkurangnya populasi mikrob metanogen dikarenakan sifat toksik dari pestisida. Dengan adanya pestisida pertumbuhan mikrob metanogen tersebut menjadi terhambat sehingga menurunkan laju emisi CH₄ (Cahayaningtyas dan Sumantri 2012). Tidak adanya penurunan emisi CH₄ dibandingkan dengan kontrol pada perlakuan B1 diduga karena dosis tersebut belum memiliki daya toksisitas yang dapat menghambat pertumbuhan mikrob metanogen, sehingga emisi CH₄ pada perlakuan tersebut cenderung tidak mengalami penurunan dibandingkan dengan kontrol. Selain pestisida, Kimura *et al.* (1992) melaporkan bahwa proses pembentukan CH₄ sangat dipengaruhi oleh kandungan bahan organik, suhu, pH, kelembaban dan Eh tanah.

Gugus fungsional

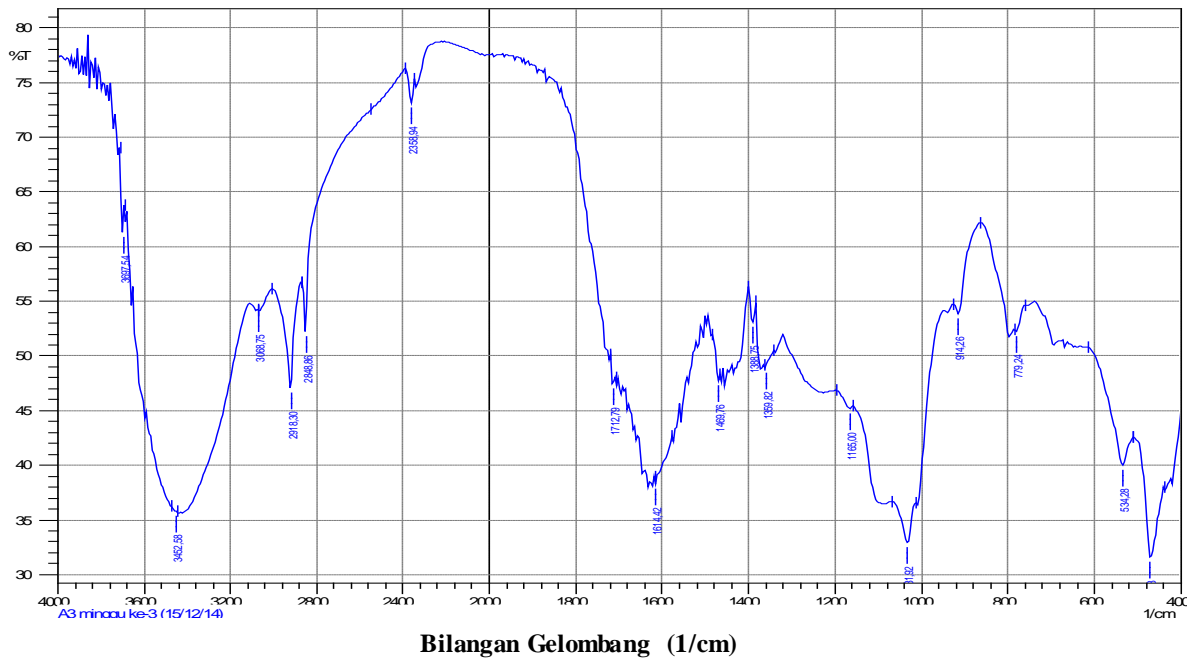
Menyimak spektra FTIR untuk kontrol (Gambar 5), serapan pada bilangan gelombang dalam kisaran 3.200-3.400 cm⁻¹ menunjukkan serapan yang berasal dari gugus fungsional OH. Dikarenakan bentuknya yang melebar dan

tidak setangkep memungkinkan gugus fungsional N-H juga ada bersama-sama. Serapan uluran C-H simetrik dan asimetrik juga muncul pada bilangan gelombang 2.850 cm⁻¹ dan 2.950 cm⁻¹. Puncak serapan pada 1.725 cm⁻¹ diperkirakan muncul karena ikatan C=O namun tampaknya berbaur dengan puncak serapan tekukan N-H yang terjadi pada kisaran bilangan gelombang 1640 – 1550 cm⁻¹. Serapan pada 550 cm⁻¹ dan 475 cm⁻¹ diperkirakan muncul dari ikatan halida C-X. Meskipun terdapat puncak serapan pada bilangan gelombang sekitar 1.100 cm⁻¹ yang merupakan karakteristik ikatan C-O namun resolusi spektra yang kurang baik menyebabkan puncak tersebut menjadi baur dengan puncak-puncak serapan lainnya.

Spektra FTIR untuk A1, A2 dan A3 tidak terdapat perbedaan secara signifikan. Dengan demikian, diambil sampel A3 yang mempunyai dosis paling tinggi dari penggunaan pestisida paraquat di pengukuran hari ke 28 digunakan sebagai contoh. Sampel tersebut menunjukkan karakteristik serapan untuk gugus fungsional hidroksida (Gambar 6). Serapan OH dicirikan dengan adanya serapan melebar yang muncul pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm⁻¹. Selain itu, terlihat juga adanya serapan uluran C-H simetrik dan asimetrik yang muncul pada bilangan gelombang sekitar 2.850-2.950 cm⁻¹. Pita uluran (*stretching*) C-H tersebut diduga berasal dari alkana karena kemunculannya berada di sebelah kanan bilangan gelombang 3000 cm⁻¹. Serapan pada bilangan gelombang sekitar 1.375 cm⁻¹ dan 1465 cm⁻¹ merupakan pita serapan tekukan (*bending*) untuk metil (CH₃) dan metilena (CH₂).



Gambar 5. Spektrum FTIR untuk perlakuan control
 Figure 5. FTIR spectra for the control treatment



Gambar 6. Spektrum FTIR untuk perlakuan A3 hari ke-28
 Figure 6. FTIR spectra for A3 treatment on day 28

Serapan dengan intensitas kuat yang muncul pada bilangan gelombang 1626 cm^{-1} merupakan petunjuk adanya gugus fungsional karbonil (C=O). Adanya serapan pada bilangan gelombang sekitar 1100 cm^{-1} merupakan karakteristik adanya gugus fungsional C–N dengan intensitas serapan *medium* (m) – kuat (s, *strong*). Keadaan intensitas serapan yang kuat tersebut ditimbulkan oleh adanya gugus fungsional C–O. Serapan dengan tingkat intensitas kuat di bawah bilangan gelombang 600 cm^{-1} mengindikasikan bahwa

terdapat ikatan halida. Puncak serapan pada bilangan gelombang 540 cm^{-1} dapat ditimbulkan oleh serapan bromida sedangkan puncak pada bilangan gelombang 471 cm^{-1} dapat ditimbulkan oleh serapan iodida. Dengan demikian, pada sampel A3 dapat diprediksikan bahwa senyawaan yang dominan adalah berupa karboksilat, ester, alkohol atau senyawaan mengandung nitrogen serta halida.

Hasil yang sama terjadi pada Spektra FTIR untuk B1, B2 dan B3. Oleh sebab itu, sampel B3 dijadikan sebagai

contoh. Menyimak spektra FTIR sampel B3 puncak-puncak utama jenis gugus fungsional yang teramati tidak banyak mengalami perubahan. Satu-satunya puncak tambahan yang muncul pada minggu keempat adalah serapan pada bilangan gelombang 3061 cm^{-1} yang merupakan puncak serapan dari ikatan ganda alkena. Oleh sebab itu, dalam periode empat minggu pengamatan tersebut diduga terjadi proses pembentukan senyawa dengan uluran C–H yang aktif dalam FTIR. Serapan lebar pada bilangan gelombang sekitar 3380 cm^{-1} merupakan puncak serapan yang ditimbulkan dari uluran O–H. Puncak tersebut biasanya bertumpang tindih dengan puncak serapan N–H. Keberadaan adanya serapan karakteristik N–H yang bertumpang tindih dengan puncak serapan O–H dapat diverifikasi dengan adanya puncak serapan dari getaran tekuk NH yang muncul pada bilangan gelombang 1.634 cm^{-1} . Dari spektra juga tampak bahwa terdapat serapan dari uluran C–H metilena pada bilangan gelombang 2.918 cm^{-1} serta uluran C–H metil pada bilangan gelombang 2849 cm^{-1} . Keberadaan metilena dan metil tersebut dapat juga diverifikasi pada daerah sidik jari yakni adanya puncak serapan pada bilangan gelombang 1.462 cm^{-1} yang merupakan tekukan C–H dari gugus CH_2 serta serapan pada 1371 cm^{-1} yang merupakan tekukan C–H dari gugus CH_3 .

Puncak serapan O–H yang muncul diduga merupakan senyawa alkohol atau fenol. Keberadaan serapan O–H yang merupakan bagian dari karboksilat tidak muncul dalam spektra karena tidak adanya serapan khas dari gugus fungsional C=O yang muncul sebagai serapan kuat pada kisaran bilangan gelombang 1630 – 1800 cm^{-1} . Dugaan bahwa senyawaan fenol adalah dominan dalam sampel B3 tampak dari adanya serapan pada bilangan gelombang

1.031 cm^{-1} yang merupakan puncak serapan dari ikatan C–O. Puncak serapan pada kisaran bilangan gelombang 650 – 1000 cm^{-1} yang merupakan karakteristik serapan keluar bidang dari gugus fungsional C–H dari alkena atau aromatic juga mendukung bahwa senyawaan non fenolat mendominasi sampel B3 (Gambar 7).

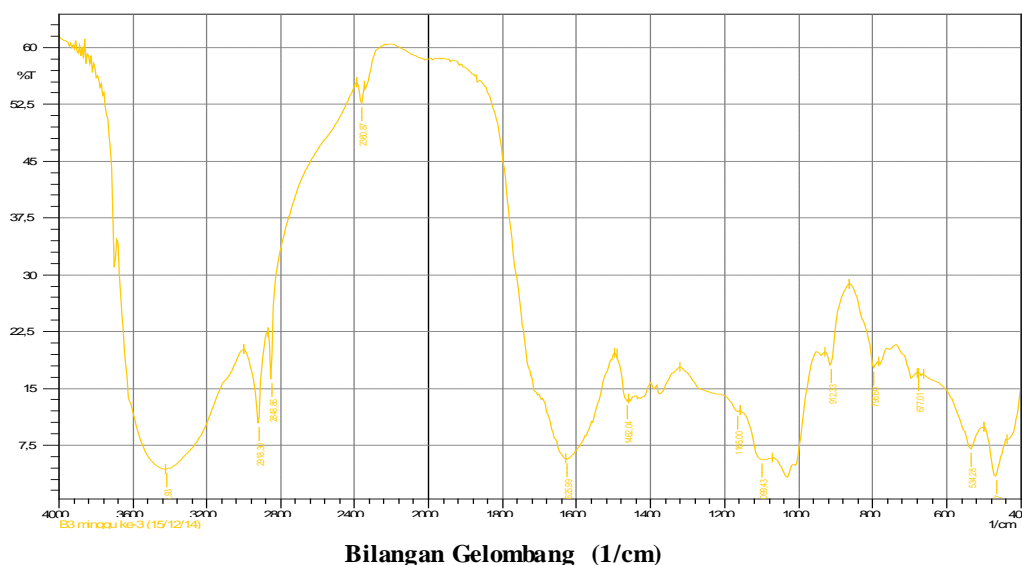
Puncak-puncak utama serapan antara kontrol, A3 dan B3 tidak banyak berubah akan tetapi adanya perubahan intensitas serapan pada bilangan gelombang 3200 – 3400 cm^{-1} menyatakan serapan yang berasal dari gugus fungsional OH. Perubahan intensitas serapan juga terjadi pada bilangan gelombang 1600-1000 cm^{-1} merupakan serapan dari alkena. Perubahan intensitas puncak serapan dapat merupakan indikasi bahwa terjadi perubahan komposisi senyawa kimia dalam tanah gambut selama periode inkubasi.

Kesimpulan

Pestisida BPMC dan paraquat dapat berinteraksi dengan asam fenolat melalui reaksi kondensasi atau *coupling*. Akibat adanya interaksi tersebut konsentrasi asam fenolat dan pestisida di dalam tanah gambut menjadi berkurang. Ini berimplikasi bahwa penambahan kedua pestisida ini mempunyai efek positif dalam menekan pengaruh negatif dari asam fenolat terhadap pertumbuhan tanaman. Perbedaan dosis pestisida BPMC ataupun paraquat tidak menunjukkan korelasi linier terhadap peningkatan produksi CO_2 maupun perubahan emisi CH_4 .

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari DIPA IPB (Penelitian Unggulan Strategis Nasional) tahun 2014.



Gambar 7. Spektrum FTIR untuk perlakuan B3 hari ke-28

Figure 7. FTIR spectra for B3 treatment on day 28

Daftar Pustaka

- Agus, F. dan I G.M. Subiksa. 2008. Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan. Balai Penelitian Tanah dan World Agroforestry Centre (ICRAF), Bogor.
- Anas, I. 1989. Petunjuk Laboratorium Biologi dalam Praktek. Departemen Pendidikan dan Kebudayaan. Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- BBSDLP (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian). 2011. Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor
- Bollag, J.M, C.J. Myers, dan R.D. Minard. 1992. Biological and chemical interactions of pesticides with soil organic matter. *The Science of the Total Environment*: 205-217.
- Cahyaningtyas, W.P. dan I. Sumantri. 2012. Pengaruh penambahan biochar limbah pertanian dan pestisida pada inkubasi tanah inceptisol untuk menekan emisi gas metana (CH₄) sebagai gas rumah kaca. *J. Teknologi kimia dan industri* 1(1):521-527.
- Deptan (Departemen Pertanian). 2005. Metode Pengujian Residu Pestisida dalam Hasil Pertanian. Departemen Pertanian. Jakarta.
- Dunn, C. 2009. 6 Ways Agriculture Impacts Global Warming. <http://www.treehugger.com/green-food/6-ways-agriculture-impacts-global-warming.html/november19, 2009> (diakses: 25 November 2015).
- Elsas, J.D. dan K. Smalla. 1996. Methods for sampling soil microbes. Pp 383-390. *In* Christon J.H., Knudsen G.R., Melnerney M.J., Stetzenbach L.D., Walter M.V. (Eds.). *Manual of Environmental Microbiologi*. ASM Press, Washington DC, USA.
- EPA (Environmental Protection Agency). 1998. Fate, Transport & Transformation Test Guidelines. OPPTS 835. 1220. Sedimen and Soil Adsorption/Desorption Isotherm. United State Environmental Protection Agency. Wasington DC, USA.
- Fitriyani, I.H. 2013. Uji Pemberian Paraquat, Difenolconazole & Buthylphenylmethyl Carbamat (BPMC) terhadap Emisi CO₂ dan CH₄ serta Perubahan Konsentrasi Asam-Asam Fenolat di Tanah Gambut (Thesis). Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Gauri, S.S., S.M. Mandal, S. Dey, dan B.R. Pati. 2012. Biotransformation of p-coumaric acid and 2,4-dichlorophenoxy acetic acid by *Azotobacter* sp. strain SSB81. *Biores Tech*. 126:350–353.
- Gerstler, Z. 1991. Behaviour of organic agrochemicals in irrigated soils. *In* Richardson M.L (ed.). *Chemistry, Agriculture and the Environment*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.
- Gosh, S., A. Sachan, dan A. Mitra. 2005. Degradation of ferulic acid by white root fungus *Schizophyllum commune*. *J. Microb and Biothec*. 21(3):385-388.
- Harrad, S.J. 1996. The environmental behaviour of toxic organic chemicals. *In* Harrison R.M. (ed.). *Pollution, Cause, Effects and Control*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, United Kingdom.
- Hartley, R.D. dan D.C. Whitehead. 1984. Phenolic acids in soil and their influence of plant growth and soil microbial processes. *In* Vaughan D., Malcolm R.E. (ed.). *Soil Organic Matter and Biological Activity*. Martinus Nijhoff, D.R.W. Junk Publisher, Lancaster, United Kingdom.
- Joosten, H. 2007. Peatland and carbon. Pp 99-117. *In* Paris, F, Siri, A. Chapman, Joosten, H. Minayeva, T. and Silvius M. (Eds.). *Assessment on Peatland, Biodiversity and Climat Change*. Global Environmental Centre, Wageningen.
- Khan, S.U. 1989. The Interaction of organic matter with pesticides. *In* Schnitzer M. dan Khan S.U. (Eds.). *Soil and Organic Matter*. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, USA.
- Kimura, M., K. Asai, A. Watanabe, J. Murase, dan S. Kuwatsuka. 1992. Suppression of methane fluxes from flooded paddy soil with rice plants by foliar spray of nitrogen fertilisers. *Soil Science and Plant Nutrition* 38: 735-740.
- Mario, M.D. dan S. Sabiham. 2002. Penggunaan tanah mineral yang diperkaya oleh bahan berkadar Fe tinggi sebagai amelioran dalam meningkatkan produksi dan stabilitas gambut. *J. Agroteksos*. 2(1):35-45.
- Morrill, L.G., B.C. Mahilum, dan S.H. Mohiuddin. 1982. *Organic Compounds in Soils: Sorption, Degradation and Persistent*. Ann Arbor Science Publishers, Inc. Michigan, USA. 326 pp.
- Misdjan, M.D. 2015. Populasi Mikrob Tanah pada Tanah Gambut Berkaitan dengan Penggunaan Pestisida (Thesis MS). Institut Pertanian Bogor, Bogor
- Noor, M. 2001. *Pertanian Lahan Gambut: Potensi dan Kendala*. Penerbit Kanisius, Jakarta.
- Pedersen, H.J., P. Kudsk, dan A. Helweg. 1995. Adsorption and ED50 values of five soils applied herbicides. *Pes Sci*. 44: 131-136.
- Roger, P.A, I. Simpson, R. Oficial, S. Ardales, dan R. Jimenez. 1994. Effect of pesticides on soil and water microflora and mesofauna in wetland ricefields: a summary of current knowledge and extrapolation to temperate environments. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 34:1057-1068.
- Sa'id, E.G. 1994. Dampak negatif pestisida, sebuah catatan bagi kita semua. *J Agrotek*. 2(1):71-72.
- Salampak. 1999. Peningkatan Produktivitas Tanah Gambut yang Disawahkan dengan Pemberian Bahan Amelioran Tanah Mineral Berkadar Besi Tinggi (Disertasi). Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. Ed ke-2. John Wiley & Sons Inc. New York.
- Susanti, M.A. 2015. Dampak Penggunaan Pestisida dan Pengelolaan Air Terhadap Kualitas Lingkungan dan Emisi Karbon di Lahan Gambut yang Disawahkan (Disertasi). Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Tadano, K. Yonebayashi, dan N. Saito. 1992. Effect of phenolic acids on the growth and occurrence of sterility in crop plant. *In* Kyuma K., Vjarsorn P., Zakaria A. (Eds.). *Coastal Lowland Ecosystems in Southern Thailand and Malaysia*. Showado-printing Co. Skyoku, Kyoto, Japan.
- Tarumingkeng, R.C. 1992. *Insektisida: Sifat, Mekanisme Kerja dan Dampak Penggunaannya*. Penerbit Ukrida, Jakarta.
- Yong, R.N., A.M.O. Mohamed, dan B.P Warkentin. 1992. *Principle of Contaminant Transport in Soils*. Elsevier Science Publisher, Amsterdam, Netherland.
- Wang, T.S.C., T.K. Yang, dan T.T. Chuang. 1967. Soil phenolic acids as plant growth inhibitors. *Soil Sci*. 103:239-246.
- Zimdahl, R.L. 1993. *Weed crop Competition*. I.P.P.C. Oregon, USA.