

## DINAMIKA pH TANAH BERPIRIT AKIBAT PERUBAHAN KONDISI AIR DAN APLIKASI AMELIORAN

Marsi<sup>a\*</sup>, Sabaruddin<sup>a</sup>, Warsito<sup>a</sup>, D. Jubaedah<sup>b</sup>, B. Triovani<sup>c</sup>, E. A. Fitria<sup>c</sup>, L. Anggraini<sup>c</sup> dan Nuranjani<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya

<sup>b</sup>Program Studi Budidaya Perairan Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya

<sup>c</sup>Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya

### Abstract

Naturally, during dry season, pyrite tend to be oxidized due to soil water content and groundwater level decrease. This paper aims to evaluate the influence of soil water condition and ameliorants on pyritic soil pH dynamics. Pyritic soil was taken from a depth of 70-90 cm below soil surface in the acid sulphate land located at Mulyasari Village, Tanjung Lago District, Banyuasin Regency, South Sumatra. The research was carried out in greenhouse with 2 treatment factors, namely: Water condition (K1 = water condition maintained at 5 cm above soil surface during incubation period and K2 = water condition at 5 cm above soil surface and allowed to decrease during incubation period) and ameliorant (T = Without Ameliorant, B = Organic Matter, D = Dolomite, P = Phosphate Fertilizer and S = Silicate Coal Ash). The results showed that pyritic soil pH tended to be stable during incubation period for K1 treatment, and pH of soil treated with dolomite > Silicate Coal Ash > Organic Matter > P Fertilizer > Without Ameliorant. Meanwhile for K2 treatment, soil pH tended to decrease with the highest rates are  $21.58 \times 10^{-2}$ ,  $19.33 \times 10^{-2}$ ,  $4.38 \times 10^{-2}$ ,  $7.50 \times 10^{-2}$ , and  $12.07 \times 10^{-2}$  pH unit per day, respectively for without ameliorant, organic matter, dolomite, phosphate fertilizer and silicate coal ash. The highest rate of decrease in pH of pyritic soil occurred in the range of decreasing water content from 66.31 to 41.73% for without ameliorant, organic matter and phosphate fertilizer, from 41.73 to 13.93% for silicate coal ash, and from 13.93 to 8.22 % for dolomite. These findings can be applied for managing pyritic soil by maintaining soil water content from falling under water content critical limit range and under uncontrolled dry conditions it is recommended to use lime to minimize pyrite oxidation.

**Key words** : Ameliorants, pH Dynamics, Pyritic Soil, Tidal Swamp, Water Conditions

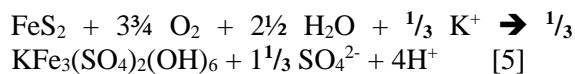
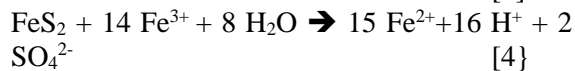
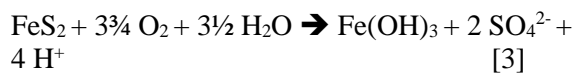
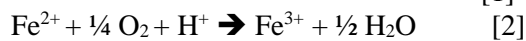
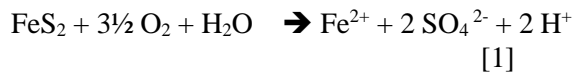
© 2024 Marsi, Sabaruddin, Warsito, Jubaedah, Triovani, Fitria, Anggraini, Nuranjani

### PENDAHULUAN

Luas lahan pasang surut di Indonesia sekitar 11,03 juta hektar (Mulyani dan Sarwani, 2013) diantaranya seluas lebih kurang 8,78 juta hektar berupa lahan mengandung pirit yang dikelompokkan menjadi lahan potensial seluas 2,07 juta hektar dan lahan sulfat masam seluas 6,71 juta hektar (Noor, 2004; Subagyo, 2006). Lahan potensial mengandung kadar pirit kurang dari 2 % dan ditemukan pada kedalaman

lebih dari 50 cm dari permukaan tanah, sedangkan lahan sulfat masam mengandung kadar pirit lebih dari 2 % dan ditemukan pada kedalaman kurang dari 50 cm dari permukaan tanah. Tanah sulfat masam mengandung lapisan pirit tidak berbahaya pada kondisi tereduksi namun berpotensi teroksidasi pada waktu musim kemarau, posisi lapisan pirit berada di atas permukaan air tanah atau lapisan pirit terpapar ke permukaan akibat pengolahan atau pembalikan tanah maupun karena terjadi

subsistensi permukaan tanah. Oksidasi pirit akan berdampak buruk terhadap kesuburan tanah dan tubuh perairan (Galhardi and Bonotto, 2016) sehingga akan mengganggu kehidupan tumbuhan atau tanaman dan ikan serta makhluk hidup lainnya yang berada pada lingkungan tersebut. Oksidasi pirit akan terjadi jika pirit kontak dengan agen pengoksidasi pirit yaitu oksigen seperti pada reaksi [1], [2], [3] dan [5]) dan ion Fe<sup>3+</sup> seperti pada reaksi [4]. Reaksi oksidasi pirit ditunjukkan oleh rangkaian reaksi berikut:



Reaksi oksidasi pirit pada persamaan [1] sampai [5] menghasilkan ion H<sup>+</sup>, Fe<sup>3+</sup> dan SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> yang menyebabkan tanah menjadi masam serta meningkatkan kadar ion Fe terlarut dan ion sulfat terlarut dalam tanah maupun air seperti yang dilaporkan oleh Parbhakar-Fox and Lottermoser (2015). Reaksi Oksidasi pirit dengan mekanisme reaksi [4] dapat dikendalikan dengan menurunkan kelarutan ion Fe<sup>3+</sup> melalui pengendapan dalam bentuk senyawa Fe(OH)<sub>3</sub> dengan cara meningkatkan pH (Gelyaman, 2018), pembentukan senyawa kompleks dengan bahan organik (Li et al, 2019; Zhang et al, 2023), fosfat (Ahmed et al., 2023) dan silikat (Cheng et al., 2021).

Oksidasi pirit dapat dikendalikan dengan cara mengendalikan keberadaan agen pengoksidasi (O<sub>2</sub> dan ion Fe<sup>3+</sup>) serta mengendalikan kontak antara pirit dan agen pengoksidasi. Keberadaan oksigen dalam tanah dapat dikendalikan dengan mengatur kondisi air tanah. Laju difusi oksigen ke dalam tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi air tanah. Hasil penelitian menunjukkan koefisien difusi oksigen melalui air murni pada suhu 20 OC

sangat rendah yaitu hanya sebesar 1,98 x 10<sup>-5</sup> cm<sup>2</sup> per detik (Jamnongwong et al., 2010) dibandingkan melalui udara pada suhu 20 OC yaitu sebesar 0,18 cm<sup>2</sup> per detik (Fredlund et al., 2012). Ini berarti laju difusi oksigen ke dalam tanah yang tergenang hampir 10.000 kali lebih lambat dibandingkan dengan laju difusi oksigen pada tanah kering. Sedangkan kadar ion Fe<sup>3+</sup> terlarut dalam tanah dapat dikendalikan dengan meningkatkan pH tanah sehingga memicu terbentuknya senyawa Fe(OH)<sub>3</sub> yang sukar larut (Gelyaman, 2018), membentuk senyawa kompleks dengan bahan organik (Li et al, 2019), fosfat (Ahmed et al., 2023) dan silikat (Cheng et al., 2021) maupun menyelimuti (coating) senyawa pirit dengan senyawa organik (Luo et al., 2016; Ouyang et al., 2015), fosfat (Kollias et al., 2015; Kollias et al., 2019), silikat (Yuniati et al., 2015; Kollias et al., 2014; Zeng et al., 2013; Bessho et al., 2011) maupun karbonat (Bidari and Aghazadeh, 2018; Chettibi et al., 2012).

Berdasarkan latar belakang di atas maka telah dilakukan penelitian skala rumah kaca untuk mempelajari pengaruh kondisi air dan bahan amelioran berupa bahan organik, dolomit, pupuk fosfat maupun abu silikat asal abu batu bara terhadap pH tanah sebagai indikator terjadinya oksidasi pirit pada tanah sulfat masam.

## BAHAN DAN METODA

Penelitian ini telah dilaksanakan di Rumah Kaca dan Laboratorium Biologi, Kimia dan Kesuburan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya pada bulan Oktober 2020 hingga Januari 2021. Tanah berpirit diambil dari kedalaman 70 – 90 cm di bawah permukaan tanah pada lahan sulfat masam di Desa Mulyasari Kecamatan Tanjung Lago Kabupaten Banyuasin, Sumatera Selatan. Kondisi sampel tanah dijaga agar tidak teroksidasi dan air tidak menguap dengan segera memasukkan tanah ke dalam kantong plastik berlapis dan kotak pendingin. Tanah berpirit yang digunakan mengandung 3,6 % pirit dengan pH 4,92 dan kadar air lapangan sebesar 76,93 % (Tabel 1).

Penelitian dilakukan dengan menggunakan Rancangan Acak Lengkap Faktorial dengan dua faktor perlakuan. Faktor pertama adalah jenis ameliorant yaitu: T = Tanpa Amelioran; B = Bahan Organik (Karakteristik tertera dalam Tabel 1) dengan dosis 50 g per kg tanah; D = Dolomit dengan dosis 18,75 g per kg tanah; P = Pupuk P dengan dosis 1,73 g per kg tanah, dan S = Abu Silikat asal abu batu bara (karakteristik tertera dalam Tabel 1) dengan dosis 62,36 g per kg tanah. Sedangkan faktor kedua adalah kondisi Air, yaitu: K1 = genangan air setinggi 5 cm di atas permukaan tanah dan dipertahankan hingga akhir penelitian; dan K2 = genangan air setinggi 5 cm di atas permukaan tanah dan air dibiarkan berkurang secara alami. Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali sehingga didapatkan total unit percobaan sebanyak 30 unit.

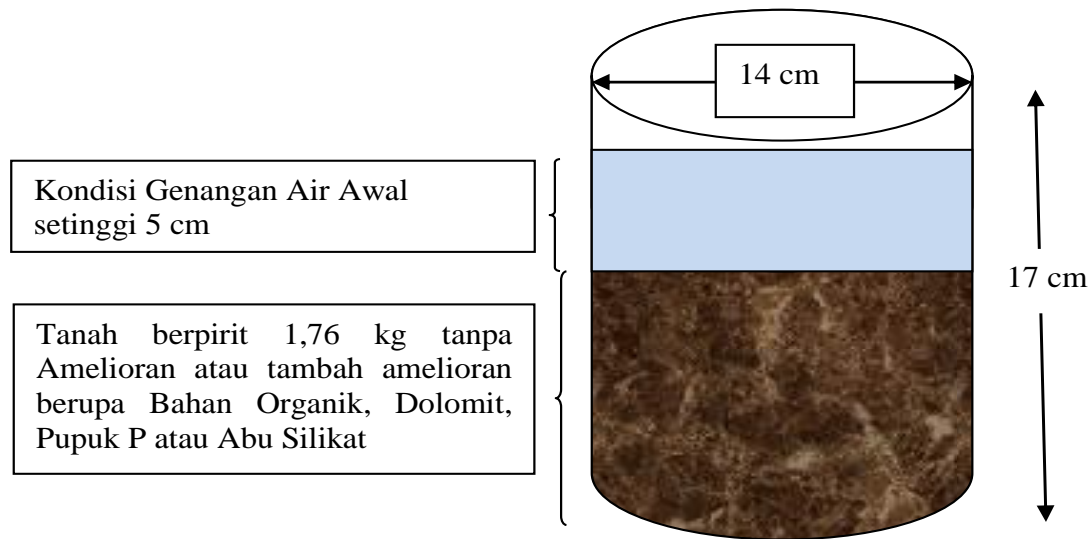
Penelitian dilakukan dengan menggunakan wadah toples plastik yang berukuran tinggi x diameter sekitar yaitu 17 cm

x 14 cm. Toples plastik ini diisi contoh tanah berpirit sebanyak 1 kg setara kering mutlak atau setara 1,77 kg tanah kondisi saat pengambilan tanah dengan kadar air 76,93 % (Tabel 1). Selanjutnya, tanah diberi perlakuan ameliorant dan digenangi sesuai perlakuan sambil diaduk agar perlakuan ameliorant yang diberikan tercampur secara merata. Selanjutnya, seluruh unit percobaan ditambah air sampai ketinggian 5 cm di atas permukaan tanah. Kemudian, toples yang telah berisi tanah berpirit, bahan ameliorant dan air diberi tanda garis batas permukaan air yang digunakan sebagai patokan untuk mengukur tinggi genangan dan menambah air untuk mempertahankan kondisi genangan air tanah setiap harinya. Inkubasi dilakukan di rumah kaca selama 39 hari. Perangkat penelitian untuk inkubasi tanah seperti tertera pada Gambar 1. Kondisi air selama penelitian untuk perlakuan K2 (Kondisi air dibiarkan berkurang) hasil pengukuran selama masa inkubasi disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik Tanah Sebelum Perlakuan dan Bahan Amelioran

Parameter	Satuan	Hasil Analisis
<b>Tanah</b>		
pH H <sub>2</sub> O		4,92
Kadar Air	%	76,93
Kadar Pirit	%	3,6
Sulfat Terlarut	ppm	149,7
Fe Terlarut	ppm	57,5
Tekstur Tanah		Lempung
Pasir	%	42,4
Debu	%	25,6
Liat	%	32,0
<b>Bahan Organik</b>		
C-Organik	%	24,75
KTK	cmol/kg	20,08
<b>Abu Batu Bara Silikat</b>		
SiO <sub>2</sub>	%	49,49
pH		8,43

Sumber : Data hasil analisis di Laboratorium Kimia, Biologi, dan Kesuburan Tanah Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya.



Gambar 1. Sketsa Pengangkat Penelitian untuk Inkubasi Tanah di Rumah Kaca

Peubah yang diamati berupa pH tanah setiap interval tertentu tergantung kondisi air selama masa inkubasi. Data pH tanah yang

dikumpulkan dianalisis statistik menggunakan uji keragaman F dan uji lanjut BNJ serta disajikan secara tabulasi dan grafik.

Tabel 2. Kondisi Air pada perlakuan K<sub>2</sub> yang dibiarkan berkurang secara alami

Perlakuan	Kondisi Tinggi Genangan (cm)					Kondisi Kadar Air (%)				
	Waktu Inkubasi (hari)									
	0	6	9	12	16	16	23	27	32	39
TK <sub>2</sub>	5,0	3,5	2,1	1,2	0	112,55	65,04	50,68	13,80	9,09
BK <sub>2</sub>	5,0	3,3	2,2	1,3	0	101,92	69,47	38,25	16,32	8,75
DK <sub>2</sub>	5,0	3,3	1,9	1,0	0	111,34	65,26	40,64	16,21	8,31
PK <sub>2</sub>	5,0	3,4	2,2	1,1	0	120,08	69,96	40,05	13,28	8,29
SK <sub>2</sub>	5,0	3,3	2,0	0,9	0	102,36	61,82	39,01	10,06	6,65
Rata-Rata	5,00	3,36	2,08	1,10	0,00	109,65	66,31	41,73	13,93	8,22

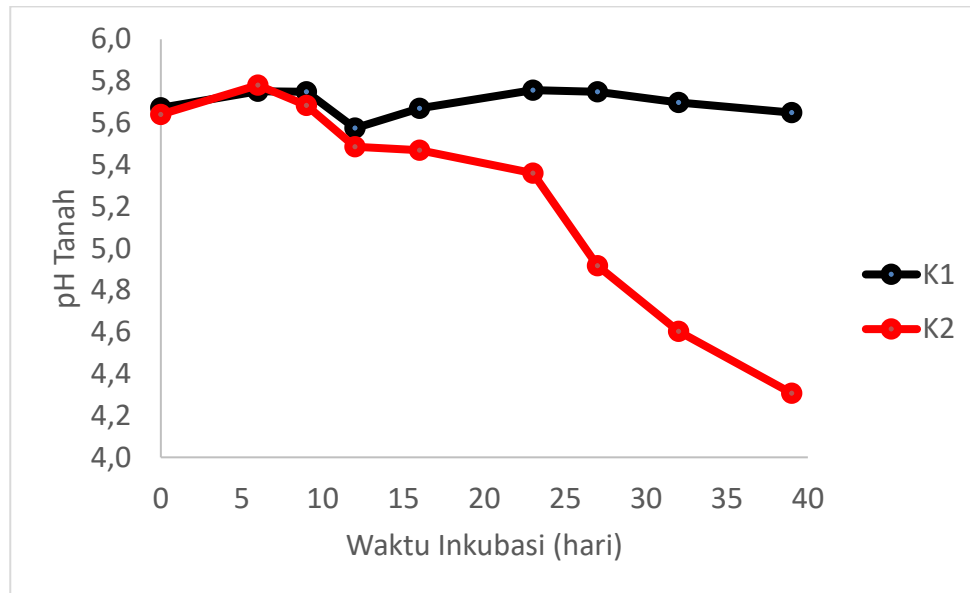
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dinamika pH tanah selama masa inkubasi pada 2 kondisi air tanah disajikan pada Gambar 2. Sampai hari ke-12 inkubasi, nilai pH tanah berpirit pada perlakuan K1 (genangan air dipertahankan setinggi 5 cm selama masa inkubasi) masih cenderung sama dengan nilai

pH tanah berpirit pada perlakuan K2 (tinggi genangan air dibiarkan berkurang). Pada hari ke-12 masa inkubasi, tinggi genangan pada perlakuan K2 berkurang menjadi 1,10 cm (Tabel 2). Setelah hari ke-12 masa inkubasi, pH tanah pada perlakuan K2 mulai menurun tetapi masih relatif landai pada hari ke-16 dan 23 masa

inkubasi karena kadar air tanah masih relatif tinggi yaitu 109,65 % dan 66,31 %, berturut-turut untuk hari ke-16 dan ke-23 masa inkubasi (Tabel 2). Setelah hari ke-23 hingga akhir masa inkubasi, nilai pH tanah pada perlakuan K2 semakin tajam penurunannya karena kadar air

tanah yang semakin rendah (Tabel 2). Semakin rendah kadar air tanah maka semakin banyak ruang pori tanah ditempati oleh udara sehingga semakin besar kemungkinan pirit teroksidasi yang menyebabkan pH tanah semakin rendah.



Gambar 2. Dinamika pH tanah selama waktu inkubasi pada berbagai kondisi air tanah

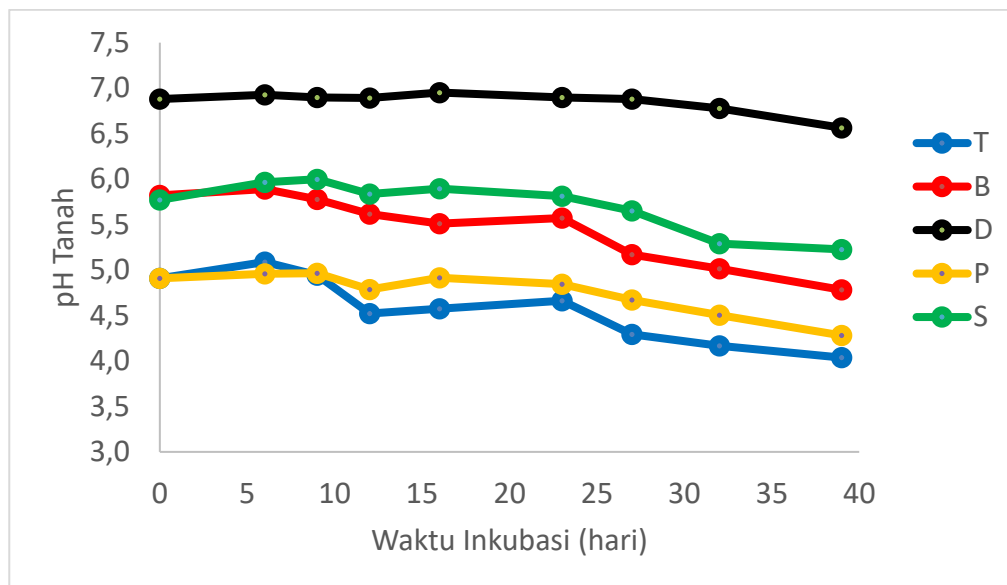
Kondisi air yang berbeda akan berdampak terhadap perbedaan nilai redoks potensial tanah yang mencerminkan kondisi oksidasi dan reduksi tanah. Semakin lama tanah tergenang maka potensial redoks akan semakin rendah yang terjadi pada perlakuan kondisi tinggi genangan air dipertahankan (perlakuan K<sub>1</sub>). Sedangkan pada perlakuan kondisi air dibiarkan berkurang (K<sub>2</sub>), potensial redok tanah akan meningkat (Rupngam et al., 2023). Kondisi tanah berpirit yang semakin reduktif seperti pada perlakuan K<sub>1</sub> akan berdampak terhadap pH tanah berpirit cenderung meningkat atau stabil. Sedangkan kondisi tanah berpirit yang semakin oksidatif seperti pada perlakuan K<sub>2</sub> akan berdampak terhadap pH tanah berpirit semakin rendah (Gambar 2). Pada kondisi reduktif, ion Fe berada dalam bentuk Fe<sup>2+</sup> sedangkan pada kondisi oksidatif berada dalam bentuk ion Fe<sup>3+</sup> (Gelyawan, 2018). Dengan demikian hanya pada kondisi oksidatif ion Fe

berfungsi sebagai agen pengoksidasi pirit. Hasil penelitian Rupngam et al. (2023) dan Gelyawan (2018) juga mengemukakan bahwa semakin rendah pH tanah maka kelarutan Ion Fe<sup>3+</sup> semakin tinggi. Dengan demikian patut diduga bahwa kelarutan ion Fe<sup>3+</sup> lebih tinggi pada tanah berpirit yang mendapat perlakuan K<sub>2</sub>. Dengan demikian, oksidasi pirit terjadi lebih banyak pada tanah berpirit yang mendapat perlakuan K<sub>2</sub>.

Pengaruh bahan amelioran terhadap dinamika pH tanah berpirit selama masa inkubasi disajikan pada Gambar 3. Nilai pH tanah berpirit terendah diperoleh pada perlakuan tanpa amelioran, diikuti pada perlakuan pupuk P, bahan organik, abu silikat asal abu batu bara dan nilai pH tanah berpirit tertinggi diperoleh pada perlakuan dolomit. Dolomit dan abu silikat merupakan bahan amelioran yang bereaksi basa atau alkali sehingga bisa menetralkan senyawa asam yang dihasilkan oleh oksidasi pirit.

Disamping itu, ion karbonat yang berasal dari dolomit dan ion silikat yang berasal dari abu silikat asal abu batu bara berfungsi sebagai penyangga kemasaman (Ng et al., 2022; Blodau, 2006). Lebih lanjut dolomit dan abu silikat yang bersifat alkalin akan meningkatkan pH tanah sehingga akan mengendapkan ion  $\text{Fe}^{3+}$  sebagai  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (Gelyaman, 2018) dan menjaga konsentrasi ion  $\text{Fe}^{3+}$  tetap rendah. Dengan demikian oksidasi pirit menggunakan agen pengoksidasi ion  $\text{Fe}^{3+}$  melalui mekanisme reaksi

[4] dapat diminimalkan. Reaksi oksidasi pirit melalui mekanisme reaksi [4] akan menyebabkan pH tanah berpirit turun lebih rendah dibandingkan dengan reaksi oksidasi pirit menggunakan agen pengoksidasi  $\text{O}_2$  seperti melalui mekanisme reaksi [1], [2], [3] maupun [5]. Setiap 1 molekul pirit yang teroksidasi oleh ion  $\text{Fe}^{3+}$  menghasilkan 16 ion  $\text{H}^+$  sedangkan dengan  $\text{O}_2$  maksimum hanya menghasilkan 4 ion  $\text{H}^+$ .



Gambar 3. Dinamika pH tanah selama waktu inkubasi pada berbagai bahan amelioran

Nilai pH tanah berpirit yang diberi perlakuan bahan organik lebih rendah dibandingkan pH tanah berpirit yang diberi perlakuan dolomit atau abu silikat, tetapi lebih tinggi dari pH tanah berpirit yang diberi perlakuan pupuk fosfat selama masa inkubasi (Gambar 3). Bahan organik dapat meningkatkan daya sangga tanah (Jiang et al., 2018) sehingga mencegah terjadi perubahan pH yang drastis. Bahan organik dalam tanah juga berfungsi sebagai donor elektron utama (Sutton-Grier et al., 2011; Gardiner and James, 2012; Dai et al., 2020) sehingga dapat mereduksi agen pengoksidasi pirit yaitu  $\text{O}_2$  maupun ion  $\text{Fe}^{3+}$  terutama kondisi reduktif seperti pada perlakuan kondisi air yang dipertahankan tergenang ( $K_1$ ). Bahan organik juga dapat mengkelat ion  $\text{Fe}^{3+}$  (Dey et al., 2020; Justi et al., 2021; Mornal et al.,

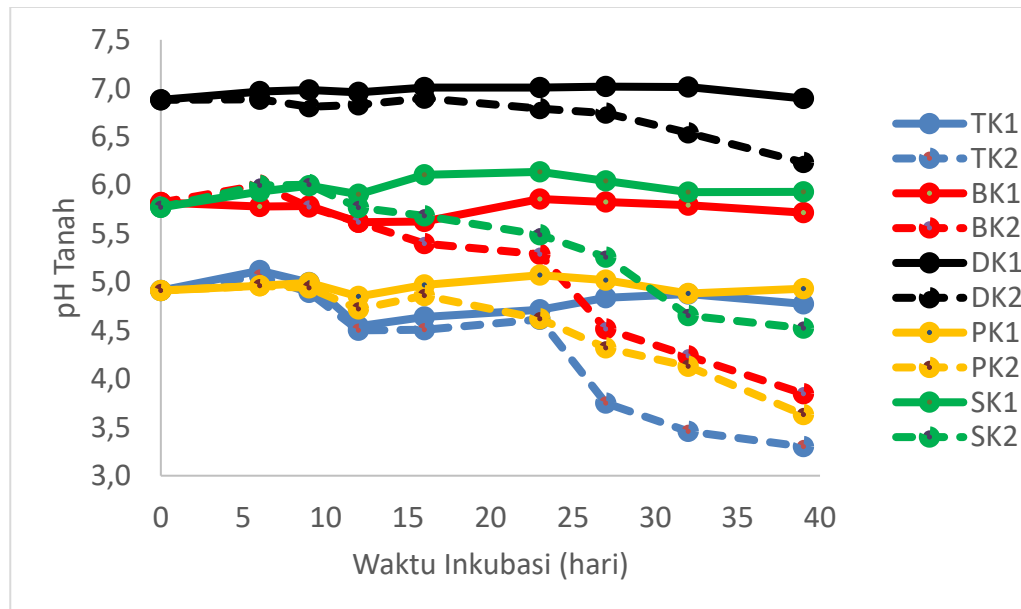
2023) menjadi senyawa kompleks Fe-Organik sehingga ion  $\text{Fe}^{3+}$  tidak dapat berfungsi sebagai agen pengoksidasi pirit.

Nilai pH tanah berpirit yang diameliorasi dengan pupuk fosfat hanya sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan pH tanah berpirit tanpa diberi bahan amelioran terutama setelah hari ke-9 masa inkubasi (Gambar 3). Kelarutan ion fosfat dari pupuk SP-36 dalam larutan tanah relatif lambat sehingga butuh waktu untuk bereaksi dengan ion  $\text{Fe}^{3+}$  maupun terjerap pada permukaan pirit. Pembentukan lapisan tipis oleh ion fosfat melalui mekanisme jerapan pada permukaan pirit telah diteliti dan dilaporkan oleh Kollias et al., (2019). Hasil penelitian Kollias et al., (2019) menunjukkan bahwa oksidasi sulfur asal pirit yang diselimiti oleh ion fosfat berkurang sebesar 66 %

dibandingkan dengan oksidasi sulfur asal pirit yang tidak diselimuti oleh ion fosfat. Jerapan ion fosfat pada senyawa Fe maupun Ion Fe juga diteliti oleh Kraal et al., (2022) dan Elsetinow et al. (2001). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa terbentuknya jerapan antara ion fosfat dan senyawa pirit maupun pembentukan senyawa kompleks antara ion fosfat dengan ion  $Fe^{3+}$  akan menurunkan potensi terjadinya oksidasi pirit. Lebih lanjut hasil penelitian Elsetinow et al. (2001) menunjukkan bahwa jerapan ion fosfat oleh Fe hanya efektif jika di atas pH 4. Pada penelitian ini berarti bahwa jerapan ion fosfat oleh Fe berjalan secara efektif sampai hari ke-32 masa inkubasi untuk tanah berpirit yang diberi perlakuan pupuk fosfat pada kondisi air yang dibiarkan berkurang ( $PK_2$ ) (Gambar 4).

Gambar 4 menunjukkan dinamika pH tanah selama masa inkubasi pada setiap kombinasi perlakuan bahan amelioran dan kondisi air tanah. Walaupun pemberian amelioran pada tanah berpirit cenderung meningkatkan pH tanah dibandingkan dengan pH tanah berpirit tanpa pemberian amelioran seperti telah dibahas sebelumnya, data menunjukkan bahwa pada kondisi air dibiarkan

berkurang (perlakuan  $K_2$ ) penurunan pH tanah terjadi lebih awal yaitu pada hari ke-12 masa inkubasi untuk tanah berpirit yang diberi amelioran bahan organik dan abu silikat asal abu batu bara, pada hari ke-16 masa inkubasi untuk tanah berpirit yang diberi amelioran dolomit dan pupuk fosfat dibandingkan dengan penurunan pH tanah berpirit tanpa penambahan bahan amelioran yang baru terjadi pada hari ke-23 masa inkubasi. Dengan mempertimbangkan data kondisi air pada Tabel 2, ini berarti bahwa penurunan pH tanah berpirit yang diberi amelioran bahan organik dan abu silikat asal abu batu bara mulai terjadi setelah kondisi tinggi genangan kurang dari 1,10 cm, untuk yang diberi amelioran dolomit dan pupuk fosfat mulai terjadi pada kondisi air macak-macam dengan kadar air kurang dari sekitar 110 % (b/b) serta untuk yang tidak diberi amelioran mulai terjadi jika kadar air di bawah 66 % (b/b). Ini berarti bahwa pemberian bahan amelioran (bahan organik, abu silikat asal abu batu bara, dolomit dan pupuk fosfat) cenderung mempercepat waktu penurunan pH tanah berpirit.



Gambar 4. Dinamika pH tanah selama waktu inkubasi akibat pengaruh kondisi air dan bahan amelioran

Dengan mempertimbangkan data kadar air pada Tabel 2 dan data pH pada Gambar 4 maka dapat diinterpretasikan bahwa tanah berpirit akan tetap aman jika kadar air tanah dijaga di atas 66 % (b/b), 66 % (b/b), 50 % (b/b), dan 25 % (b/b) secara berturut-turut untuk perlakuan tanpa amelioasi, pupuk fosfat, bahan organik dan abu silikat asal abu batu bara. Sedangkan untuk tanah berpirit yang diameliorasi dengan dolomit masih aman sampai kadar air tanah turun hingga 8,22 % (b/b). Dengan demikian, dolomit paling efektif dalam menurunkan oksidasi pirit pada kondisi tanah berpirit berada pada suasana oksidatif, diikuti oleh abu silikat asal batu bara dan bahan organik.

Hasil penelitian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa rata-rata laju penurunan pH tanah berpirit selama inkubasi lebih rendah yaitu  $1,66 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $3,20 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $3,28 \times 10^{-2}$  unit pH per hari berturut-turut untuk tanah berpirit yang diameliorasi dengan dolomit, abu silikat asal abu batu bara dan pupuk fosfat, kecuali tanah berpirit yang diameliorasi dengan bahan organik yang laju penurunan pH nya lebih tinggi yaitu sebesar  $5,06 \times 10^{-2}$  unit pH per hari dibandingkan dengan laju penurunan pH tanah berpirit tanpa diameliorasi yaitu sebesar  $4,13 \times 10^{-2}$  unit pH per hari selama masa inkubasi. Pada tanah berpirit yang kondisi airnya dibiarkan berkurang atau mengering maka penambahan bahan organik akan meningkatkan porositas tanah dan menurunkan bobot isi tanah (Crnobrna et al,

2022; Robinson et al, 2022) sehingga oksigen lebih tersedia untuk mengoksidasi pirit yang menyebabkan pH tanah berpirit lebih cepat turun. Sedangkan laju penurunan pH yang lebih rendah untuk tanah berpirit yang diberi amelioasi dolomit, abu silikat dan fosfat dar laju penurunan pH tanah berpirit tanpa amelioasi lebih disebabkan karena berkurangnya ketersediaan ion  $Fe^{3+}$  sebagai agen pengoksidasi pirit akibat peningkatan pH dan/atau jerapan oleh ion fosfat dan silikat.

Laju penurunan pH tanah berpirit tertinggi sebesar  $21,58 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $19,33 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $4,38 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $7,50 \times 10^{-2}$  unit pH per hari, dan  $12,07 \times 10^{-2}$  unit pH per hari berturut-turut untuk perlakuan tanpa amelioasi, bahan organik, dolomit, pupuk fosfat dan abu silikat asal abu batu bara. Laju penurunan pH tanah berpirit terjadi pada periode inkubasi hari ke 23 – 27 untuk perlakuan tanpa perlakuan, bahan organik dan pupuk fosfat, periode inkubasi hari ke 27 – 32 untuk perlakuan abu silikat asal abu batu bara, serta periode inkubasi hari ke 32 - 39 untuk perlakuan dolomit (Tabel 3). Dengan mempertimbangkan data kadar air tanah berpirit pada Tabel 2 maka laju penurunan pH tanah berpirit tertinggi terjadi pada penurunan kadar air kisaran 66,31 – 41,73 (%) untuk perlakuan tanpa amelioasi, bahan organik dan pupuk fosfat, 41,73 – 13,93 % untuk perlakuan abu silikat asal abu batu bara, serta 13,93 – 8,22 % untuk perlakuan dolomit.

Tabel 3. Laju Perubahan pH Tanah Berpirit pada Periode Inkubasi

Perlakuan	Laju Perubahan pH ( $\times 10^{-2}$ unit pH per hari) pada periode masa inkubasi*								Rerata Laju Perubahan pH ( $\times 10^{-2}$ unit per hari)*
	0 - 6	6 - 9	9 - 12	12 - 16	16 - 23	23 - 27	27 - 32	32 - 39	
TK <sub>1</sub>	3,44	-4,11	-15,00	2,42	1,05	3,08	0,80	-1,48	-0,35
TK <sub>2</sub>	2,50	-5,56	-13,11	0,17	1,52	-21,58	-5,87	-2,24	-4,13
BK <sub>1</sub>	-0,67	0,11	-5,56	0,17	3,33	-0,75	-0,67	-1,10	-0,26
BK <sub>2</sub>	3,00	-7,56	-5,22	-5,50	-1,57	-19,33	-5,53	-5,57	-5,06



DK <sub>1</sub>	1,44	0,56	-0,89	1,25	0,00	0,25	-0,07	-1,71	0,03
DK <sub>2</sub>	0,11	-2,56	0,56	1,75	-1,52	-1,17	-4,07	-4,38	-1,66
PK <sub>1</sub>	0,83	1,00	-4,67	3,00	1,43	-1,25	-2,80	0,71	0,05
PK <sub>2</sub>	0,83	-0,67	-7,33	3,50	-3,43	-7,50	-3,80	-7,14	-3,28
SK <sub>1</sub>	2,72	2,00	-2,89	5,00	0,43	-2,33	-2,33	0,05	0,41
SK <sub>2</sub>	3,78	0,22	-7,89	-2,08	-2,81	-5,75	-12,07	-1,86	-3,20

Keterangan: \*Nilai negatif menunjukkan laju penurunan pH dan nilai positif menunjukkan laju peningkatan pH

Tabel 4 menyajikan hasil uji lanjut BNJ pada taraf nyata 5 % terhadap data pH tanah berpirit akibat faktor utama perlakuan kondisi air dan bahan amelioran serta faktor interaksi bahan organik dan kondisi air pada akhir masa inkubasi. Hasil uji BNJ menunjukkan bahwa pH tanah berpirit pada kondisi air dipertahankan tergenang setinggi 5 cm (K<sub>1</sub>) berbeda nyata lebih tinggi dari pH tanah berpirit pada

perlakuan kondisi air dibiarkan berkurang (K<sub>2</sub>). Nilai pH tanah berpirit yang diberi perlakuan amelioran berbeda nyata lebih tinggi dari nilai pH tanah tanpa amelioran kecuali pH tanah berpirit yang diberi perlakuan pupuk fosfat. Nilai pH tanah berpirit tertinggi diperoleh pada perlakuan dolomit, diikuti oleh abu silikat asal abu batu bara dan bahan organik.

Tabel 4. pH tanah pada akhir masa inkubasi akibat pengaruh kondisi air dan bahan amelioran

Amelioran (A)	pH Tanah Pada Kondisi Air (K)		Rata-Rata pH	pH K <sub>1</sub> - pH K <sub>2</sub>
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>		
Tanpa Amelioran (T)	4,77 <sup>c</sup>	3,30 <sup>a</sup>	4,04 <sup>a</sup>	1,47
Bahan Organik (B)	5,72 <sup>d</sup>	3,85 <sup>ab</sup>	4,78 <sup>b</sup>	1,87
Dolomit (D)	6,89 <sup>e</sup>	6,23 <sup>de</sup>	6,56 <sup>c</sup>	0,66
Pupuk P (P)	4,93 <sup>c</sup>	3,63 <sup>a</sup>	4,28 <sup>a</sup>	1,30
Abu Silikat (S)	5,93 <sup>d</sup>	4,52 <sup>bc</sup>	5,23 <sup>b</sup>	1,42
Rata-Rata pH	5,35 <sup>b</sup>	3,91 <sup>a</sup>		
BNJ 5%	K = 0,20	A = 0,45	K x A = 0,75	

Keterangan : Angka yang diikuti dengan huruf yang berbeda pada baris maupun kolom yang sama menunjukkan berbeda nyata berdasarkan uji BNJ taraf 5%.

Nilai pH tanah berpirit terendah sebesar 3,30 dihasilkan pada perlakuan tanpa amelioran dan kondisi air yang dibiarkan berkurang (TK<sub>2</sub>) berbeda nyata lebih rendah dari nilai pH tanah berpirit pada perlakuan lainnya kecuali pH tanah berpirit pada perlakuan bahan organik kondisi air yang dibiarkan berkurang (BK<sub>2</sub>) serta pupuk

fosfat kondisi air yang dibiarkan berkurang (PK<sub>2</sub>). Pada kondisi kadar air tanah berpirit turun hingga 8 % (b/b), hanya perlakuan dolomit yang mampu menjaga pH tanah berpirit (pH 6,23) berada lebih tinggi dari pH tanah berpirit yang diberi amelioran lain pada kondisi

genangan air dipertahankan setinggi 5 cm selama masa inkubasi.

Penurunan nilai pH pada setiap perlakuan ameliorasi antara kondisi genangan air yang dipertahankan setinggi 5 cm selama masa inkubasi ( $K_1$ ) dan kondisi air yang dibiarkan berkurang ( $K_2$ ) tertinggi sebesar 1,87 unit pH terjadi pada tanah berpirit dengan perlakuan bahan organik, diikuti oleh perlakuan tanpa amelioran sebesar 1,47 unit pH, perlakuan abu silikat asal abu batu bara sebesar 1,42 unit pH, perlakuan pupuk P sebesar 1,30 unit dan terendah sebesar 0,66 unit pH terjadi pada tanah berpirit dengan perlakuan dolomit. Seperti telah dibahas sebelumnya bahwa tingginya penurunan pH tanah berpirit dengan perlakuan bahan organik disebabkan karena bahan organik dapat menurunkan bobot isi tanah serta meningkatkan ruang pori tanah atau porositas tanah (Crnobrna et al, 2022; Robinson et al, 2022) yang bisa ditempati oleh udara pada kondisi tanah kering. Dengan demikian oksidasi bahan berpirit akan meningkat.

## KESIMPULAN

Dari hasil penelitian maka dapat disimpulkan bahwa nilai pH tanah cenderung stabil selama masa inkubasi pada perlakuan kondisi air tanah dipertahankan tergenang setinggi 5 cm untuk semua perlakuan amelioran. Sedangkan pada perlakuan kondisi air yang dibiarkan berkurang selama masa inkubasi, nilai pH tanah cenderung menurun dengan laju penurunan pH tanah berpirit tertinggi sebesar  $21,58 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $19,33 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $4,38 \times 10^{-2}$  unit pH per hari,  $7,50 \times 10^{-2}$  unit pH per hari, dan  $12,07 \times 10^{-2}$  unit pH per hari berturut-turut untuk perlakuan tanpa amelioran, bahan organik, dolomit, pupuk fosfat dan abu silikat asal abu batu bara. Laju penurunan pH tanah berpirit tertinggi terjadi pada penurunan kadar air kisaran 66,31 – 41,73 % untuk perlakuan tanpa amelioran, bahan organik dan pupuk fosfat, 41,73 – 13,93 % untuk perlakuan abu silikat asal abu batu bara, serta 13,93 – 8,22 % untuk perlakuan dolomit. Nilai pH tanah yang diberi perlakuan dolomit > Abu Silikat > Bahan

Organik > Pupuk P > Tanpa Amelioran baik pada perlakuan kondisi air dipertahankan tergenang 5 cm maupun pada kondisi air yang dibiarkan berkurang selama masa inkubasi. Keterbaharuan penelitian ini berupa temuan kondisi kadar air tanah kritis yang menghasilkan laju penurunan pH tanah berpirit tertinggi untuk setiap bahan amelioran yang diaplikasikan. Temuan dari hasil penelitian ini dapat diaplikasikan dalam pengelolaan tanah berpirit dengan menjaga kadar air tanah agar tidak turun mencapai kisaran kadar air batas kritis terjadinya penurunan pH akibat oksidasi pirit, serta pada kondisi kemarau yang tidak terkendali maka dianjurkan untuk menggunakan amelioran berupa kapur untuk meminimalkan oksidasi pirit.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A. A., Leinweber, P., and Kühn, O., 2023. Advances in understanding the phosphate binding to soil constituents: A Computational Chemistry perspective. *Science of the Total Environment* 887. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163692>
- Bessho, M., Wajima, T., Ida, T., & Nishiyama, T. 2011. Experimental Study on Prevention of Acid Mine Drainage by Silica Coating of Pyrite Waste Rocks with Amorphous Silica Solution. *Environmental Earth Sciences*, 64, 311-318. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0848-0>.
- Bidari, E., and Aghazadeh, V. 2018. Pyrite oxidation in the presence of calcite and dolomite: Alkaline leaching, chemical modeling and surface characterization. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 28(2018) 1433–1443. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64782-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64782-X)
- Blodau, C. 2006. A review of acidity generation and consumption in acidic coal mine

- lakes and their watersheds. *Science and Total Environment*. 369; 307–332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.05.004>.
- Cheng, W., Marsac, R. Hanna, K. and Boily. 2021. Competitive Carboxylate–Silicate Binding at Iron Oxyhydroxide Surfaces. *Langmuir*: 37: 13107–13115 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02261>.
- Chettibi, M., Abramov A. A., Hadjadj A. E. 2012. Modelling of pyrite depression process by lime in copper and zinc flotation. *Int. Res. J. Geol. Min.* 155-160. <http://www.interestjournals.org/IRJGM>.
- Crnobrna, B.; Llanqui, I.B.; Cardenas, A.D.; Panduro Pisco, G. Relationships between Organic Matter and Bulk Density in Amazonian Peatland Soils. *Sustainability* 2022, 14, 12070. <https://doi.org/10.3390/su141912070>
- Dai, Y., Lu, Y., Li, J., Qin, H., Xia, F., and Zhang, J. 2020. Humic substances and its electron transfer capacity during composting: A review. *E3S Web of Conferences* 194. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019405034>.
- Dey, S., Regon, P., Kar, S., and Panda, S. K. 2020. Chelators of iron and their role in plant's iron management. *Physiol Mol Biol Plants* 26(8):1541–1549. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00841-y>.
- Elsetinow, A. R., Schoonen, M. A. A., and Strongin, D. R. 2001. Aqueous Geochemical and Surface Science Investigation of the Effect of Phosphate on Pyrite Oxidation. <https://doi.org/10.1021/es0016809>
- Fredlund, D.G., Rahardjo, R., and Fredlund, M. D. 2012. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York. <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- Galhardi, J. A., Bonotto, D. M., 2016. Hydrogeochemical features of surface water and groundwater contaminated with acid mine drainage (AMD) in coal mining areas: a case study in southern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*. 23(18), 18911-18927. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7077-3>.
- Gardiner, D. T. and James, S. 2012. Wet Soil Redox Chemistry as Affected by Organic Matter and Nitrate. *American Journal of Climate Change* 1: 205-209. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2012.14017>.
- Gelyaman, G. D. 2018. Faktor –Faktor yang mempengaruhi Bioavailabilitas Besi bagi Tumbuhan. *JSLK1(1)*: 14-16. <https://doi.org/10.32938/slk.v1i1.439>
- Jamnongwong, M., Loubiere, K., Dietrich, N., and Hebrard, G. 2010. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt, glucose or surfactant: Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients. *Chemical Engineering Journal*, vol. 165 (n°3). pp. 758-768. ISSN 1385-8947. DOI:10.1016/J.CEJ.2010.09.040. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.CEJ.2010.09.040>
- Jiang, J., Wang, Y. P., Yu, M., Cao, N., and Yan, J. 2018. Soil organic matter is important for acid buffering and reducing aluminum leaching from acidic forest soils. *Chemical Geology* 501: 86-94. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.10.009>.
- Justi, M., Silva, C. A., and Rosa, S. D. 2021. Organic acids as complexing agents for iron and their effects on the nutrition and growth of maize and soybean. *Archives of Agronomy and Soil Science*.

- <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1893308>.
- Kollias, K., Mylona, E., Adam, K., Papassiopi, N., and Xenidis, A. 2014. Suppression of Pyrite Oxidation by Surface Silica Coating. *Journal of Geoscience and Environment Protection* (2): 37-43. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2014.24006>.
- Kollias, K., Mylona, E., Papassiopi, N., and Xenidis, A. 2015. Conditions favoring the formation of iron phosphate coatings on the pyrite surface. *Desalination and Water Treatment*. 56(5): 1274-1281. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.958537>.
- Kollias, K., Mylona, E., Adam, K., Chrysochoou, M., Papassiopi, N., and Xenidis, A. 2019. Characterization of phosphate coating formed on pyrite surface to prevent oxidation. *Applied Geochemistry* 110. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104435>.
- Kraal, P., van Genuchten, C. M., and Behrends, T. 2022. Phosphate coprecipitation affects reactivity of iron (oxyhydr)oxides towards dissolved iron and sulfide. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 321: 311–328. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.12.032>.
- Li, Q., Hu, W., Li, L., and Li, Y 2023. Interactions between organic matter and Fe oxides at soil micro-interfaces: Quantification, associations, and influencing factors. *Science of the Total Environment* 855. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158710>
- Luo, Z., Liu, Y., Zhu, R., and Hu, X. 2016. Inhibition of Microbial Pyrite Oxidation by PropSSH for the Control of Acid Mine Drainage. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 11: 6501 – 6513, <https://doi.org/10.20964/2016.08.59>.
- Molnár, Z., Solomon, W., Mutum, L., and Janda, T. 2023. Understanding the Mechanisms of Fe Deficiency in the Rhizosphere to Promote Plant Resilience. *Plants* 2023, 12(10). <https://doi.org/10.3390/plants12101945>
- Mulyani A, Sarwani M. 2013. Karakteristik dan potensi lahan sub-optimal untuk pengembangan pertanian di Indonesia. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 7(1):47- 55. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v7i1.6429>
- Ng, J.F.; Ahmed, O.H.; Jalloh, M.B.; Omar, L.; Kwan, Y.M.; Musah, A.A.; Poong, K.H. 2022. Soil Nutrient Retention and pH Buffering Capacity Are Enhanced by Calciprill and Sodium Silicate. *Agronomy*: 12, 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010219>
- Noor, M. 2004. Lahan Rawa; Sifat dan Pengelolaan Tanah Bermasalah Sulfat Masam. PT Raja Grafindo Persada. Jakarta. 241 hlm.
- Ouyang, Y., Liu, Y., Zhu, R., Fei Ge, Xu, T., Luo, Z., and Liang, L. 2014. Pyrite oxidation inhibition by organosilane coatings for acid mine drainage control. *Minerals Engineering* 72: 57–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.12.020>.
- Parbhakar-Fox, A., Lottermoser, B. G., 2015. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering*. 82, 107-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.015>.
- Robinson, D.A., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C. J., Maskell, L. C., Wood, C. M., Seaton, F. M., Emmett, B.A., and Cosby, B. J. 2022. Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Nature* 12: 7085.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>

4531. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31831-1>

Rupngam, T., Messiga, A2. J., and Karam, A. 2023. Solubility of soil phosphorus in extended waterlogged conditions: An incubation study. *Heliyon* 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13502>.

Subagyo, H. 2006. Lahan Rawa Pasang Surut. Halaman 23-98 dalam Buku Karakteristik dan Pengelolaan Lahan Rawa. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor.

Sutton-Grier, A. E., Keller, J. K., Koch, R., Gilmour, C., and Megonigal, J. P. 2011. Electron donors and acceptors influence anaerobic soil organic matter mineralization in tidal marshes. *Soil Biology and Biochemistry* 43 (7): 1576 – 1583. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.008>.

Yuniati, M.D., Hirajima, T., Miki, H., and Sasaki, K. 2015. Silicate Covering Layer on Pyrite Surface in the Presence of Silicon-Catechol Complex for Acid Mine Drainage Prevention. *Materials Transactions*, Vol. 56 (10): 1733 - 1741. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M-M2015821>.

Zeng, S., Li, J., Schumann, R., and Smart, R. 2013. Effect of pH and Dissolved Silicate on the Formation of Surface Passivation Layers for Reducing Pyrite Oxidation. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, (2): 50-55. <https://doi.org/10.4236/cweee.2013.22B009>.

Zhang, J., Mostofa, K. M. G., Yang, X., Mohinuzzaman, M., Liu, C., Senesi, N., Senesi, G. S., Sparks, D. L., H. Teng, H. H., Li, L., Yuan, J., and Li, S. 2023. Isolation of dissolved organic matter from aqueous solution by precipitation with FeCl<sub>3</sub>: mechanisms and significance in environmental perspectives. *Nature* 13: