



Karakteristik Kimia Tanah Sulfat Masam Pada Kedalaman Lapisan Sulfurik Yang Berbeda Serta Pengaruhnya Terhadap Perkembangan Akar Tanaman Kelapa Sawit

Chemical Characteristics of Acid Sulphate Soil at Various Depths of Sulfuric Layers and Their Impact on The Development of Oil Palm Plant Roots

Eko Noviandi Ginting* dan Edy Sigit Sutarta

Abstrak Salah satu faktor pembatas pemanfaatan tanah sulfat masam untuk usaha budidaya tanaman kelapa sawit adalah keberadaan lapisan sulfurik yang berpotensi teroksidasi. Teroksidasinya lapisan sulfurik tersebut dapat menyebabkan pH tanah menjadi sangat masam dan melepaskan sejumlah unsur logam beracun yang dapat menghambat perkembangan akar tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik kimia tanah pada blok tanaman kelapa sawit dengan beberapa kedalaman sulfurik dan pengaruhnya terhadap perkembangan akar kelapa sawit secara vertikal. Penelitian dilakukan di salah satu perkebunan kelapa sawit yang diusahakan pada lahan pasang surut di Kabupaten Aceh Tamiang, Propinsi Nanggroe Aceh Darussalam. Objek kajian penelitian ini adalah tiga blok tanaman yaitu Blok 27, blok 41, dan blok 42 masing-masing dengan kedalaman lapisan sulfurik 40-60 cm; 60-90 cm; dan > 90 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kemasaman, kandungan Al-dd dan Fe tanah pada blok 27 relatif lebih tinggi dibanding blok lainnya. Terdapat hubungan antara pH tanah dengan Al-ddd dan kandungan Fe tanah. Dimana semakin rendah pH maka semakin tinggi kandungan Al-dd dan Fe tanah. Perkembangan total akar kelapa sawit terbaik diperoleh pada blok 41 yaitu sebesar 188,26 g/dm³ dan yang terendah pada blok 27 sebesar 75,99 g/dm³. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa semakin dangkal lapisan sulfurik dari permukaan tanah maka semakin

terhambat perkembangan akar kelapa sawit. Perakaran kelapa sawit relatif berkembang baik jika kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm.

Kata Kunci: lahan pasang-surut, pirit, alluminium tertukarkan, sulfidik

Abstract One limitation of using acid sulfate soil for oil palm cultivation is the presence of a sulfuric layer that has the potential to oxidize. The sulfuric layer's oxidation can make the soil acidic and release harmful metals that might inhibit plant roots from growing. This study aims to investigate the chemical properties of soil in oil palm plantation blocks with varying sulfuric depths and their impact on the vertical growth of oil palm roots. The objects of this research study are three plant blocks, namely Block 27, Block 41, and Block 42, each with a sulfuric layer depth of 40-60 cm, 60-90cm, and > 90 cm, respectively. The research findings indicate that the acidity level, exchangeable Al, and Fe content in the soil of Block 27 are relatively higher compared to the other blocks. The amount of exchangeable Al and Fe in the soil is correlated with the pH of the soil, where lower pH values correspond to higher exchangeable Al and Fe content in the soil. The block with the highest total oil palm root development was Block 41, measuring 188.26 g/dm³, while the block with the lowest was Block 27, measuring 75.99 g/dm³. According to the study's findings, the shallower sulfidic layer, the more hampered the development of oil palm roots. Oil palm root development is optimal when the sulfuric layer depth exceeds 90 cm.

Keywords: tidal land, pyrite, exchangeable-Al, sulfidic

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Eko Noviandi Ginting* (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan 20158 Indonesia
Email: eko.novandy@gmail.com

PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan komoditi perkebunan yang memberikan dampak yang cukup signifikan terhadap perbaikan perekonomian masyarakat Indonesia. Hal tersebut dapat dilihat dari laju perkembangan luas perkebunan kelapa sawit yang cukup pesat, dimana sampai dengan tahun 2022 diperkirakan total luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai sekitar 15,3 juta hektar (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2021). Perluasan areal perkebunan kelapa sawit ke lahan-lahan marjinal tentu bukanlah suatu pilihan, namun merupakan suatu tuntutan yang disebabkan semakin terbatasnya lahan-lahan yang lebih sesuai. Salah satu lahan marjinal yang telah banyak dimanfaatkan untuk perkebunan kelapa sawit adalah lahan pasang surut dengan jenis tanah sulfat masam.

Tanah sulfat masam merupakan tanah yang berkembang dari bahan induk yang kaya dengan senyawa pirit (FeS_2) (Masulili, 2015; Primayuda *et al.*, 2022; Pusparani, 2018) yang terbentuk pada kondisi tergenang dan di atas lapisan pirit biasanya terdapat horizon sulfurik (Jayalath *et al.*, 2016; Shamshuddin *et al.*, 2017). Ketika bahan sulfidic pada horizon sulfurik terekspos oleh oksigen akibat drainase, maka bahan sulfidic tersebut dapat teroksidasi yang menyebabkan tanah menjadi sangat masam dan melepaskan sejumlah unsur logam yang beracun (Mosley *et al.*, 2014). Kombinasi antara pH tanah yang sangat rendah dan tingginya konsentrasi bahan-bahan beracun pada tanah sulfat masam tersebut dapat menghambat pertumbuhan tanaman (Dang *et al.*, 2016; Shamshuddin *et al.*, 2014)

Umumnya tanah sulfat masam terbentuk di daerah sekitar pantai dan di sepanjang sungai yang terpengaruh oleh pasang surut air laut, oleh karenanya tanah sulfat masam biasanya terdapat pada lahan pasang surut. Pada kondisi alami, lahan pasang-surut biasanya dalam kondisi tergenang, oleh karenanya untuk dapat dimanfaatkan sebagai perkebunan kelapa sawit maka muka air tanah harus diturunkan sampai sekitar 60 cm dari permukaan tanah. Penurunan muka air tanah ini berpotensi menyebabkan teroksidasinya lapisan sulfurik, terutama jika lapisan sulfurik dangkal (< 60 cm), yang dapat mengakibatkan menurunnya pH tanah yang tentu saja akan mengganggu perkembangan akar tanaman. Selain penurunan pH yang tajam, proses oksidasi bahan sulfidic tersebut

juga dapat menyebabkan konsentrasi logam-logam beracun seperti Al dan Fe menjadi sangat tinggi yang juga dapat mengganggu perkembangan akar tanaman. Shamshuddin *et al.*, (2014) melaporkan bahwa konsentrasi Al dan Fe yang tinggi didalam larutan tanah dapat meracuni tanaman kelapa sawit. Lebih lanjut Sujatha & Kumar Mehar, (2015) juga menyatakan bahwa konsentrasi Al yang tinggi pada tanah masam dapat menghambat perkembangan akar tanaman. Berdasarkan uraian tersebut maka penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik kimia tanah sulfat masam dengan kedalaman lapisan sulfurik yang berbeda serta melihat pengaruhnya terhadap perkembangan akar tanaman kelapa sawit yang diusahakan pada lahan pasang-surut.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di salah satu perkebunan kelapa sawit yang diusahakan pada lahan pasang surut di Kabupaten Aceh Tamiang, Propinsi Nanggroe Aceh Darussalam. Lokasi penelitian berada pada posisi $98^{\circ} 11' 56,995''$ - $98^{\circ} 14' 22,86''$ BT dan $4^{\circ} 17' 15,452''$ - $4^{\circ} 21' 1.959''$ LU. Pengamatan dilakukan pada 3 blok tanaman (umur tanaman 26 tahun) dengan kedalaman pirit yang berbeda yaitu: (1) Blok 27 dengan kedalaman pirit 40-60 cm; (2) Blok 41 dengan kedalaman pirit 60-90 cm, dan (3) Blok 42 dengan kedalaman pirit > 90 cm. Pengamatan dilakukan pada Mei 2018 dan analisis laboratorium dilakukan pada Mei - Juni 2018 di laboratorium Pusat Penelitian Kelapa Sawit Medan.

Identifikasi Kedalaman Lapisan Sulfurik

Objek yang digunakan dalam studi ini adalah blok tanaman kelapa sawit dengan 3 (tiga) kedalaman lapisan sulfurik yang berbeda yaitu: (1) kedalaman 40 - 60 cm pada blok 27; (2) kedalaman 60 - 90 cm pada blok 41; dan (3) kedalaman > 90 cm pada blok 42. Pemilihan blok-blok tanaman tersebut didasarkan pada peta kedalaman lapisan sulfurik yang diperoleh dari pihak kebun. Untuk

mengkonfirmasi kedalaman lapisan sulfurik pada masing-masing blok tanaman dilakukan peninjauan langsung di lapangan dengan cara membuat profil tanah dan memeriksa langsung lapisan sulfurik pada masing-masing blok tanaman yang diamati. Pengujian dilakukan menggunakan larutan H_2O_2 30% pada contoh tanah dari lapisan tanah yang berwarna kelabu gelap. Contoh tanah diambil lalu ditetesi dengan larutan H_2O_2 sekitar 20 ml, jika terjadi reaksi dimana tanah mengeluarkan gelembung dan asap putih maka tanah tersebut mengandung pirit. Reaksi tersebut terjadi karena pemberian H_2O_2 terhadap pirit menyebabkan terbentuknya asam sulfat, mineral Fe-sulfat dan panas (Fahmi & Nursyamsi, 2022).

Analisis Karakteristik Kimia Tanah

Analisis karakteristik kimia tanah dilakukan terhadap contoh tanah yang diambil secara komposit dari dalam piringan pohon dengan diameter 250 cm dengan kedalaman (horizontal) masing-masing 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; dan 80-100 cm dari permukaan tanah. Karakteristik

kimia yang diamati dalam penelitian ini meliputi pH tanah, C-organik tanah, kadar N, P, kation tertukarkan, Kapasitas Tukar Kation, Kejenuhan Basa, Kejenuhan Al, dan kandungan Fe tanah.

Pengamatan Perkembangan Akar dan Sifat Kimia Tanah (pH dan Al-dd)

Pengamatan perkembangan akar dilakukan di dalam piringan pohon pada kedalaman: 0-20; 20-40; 40-60; 60-80; dan 80-100 cm dari permukaan tanah. Pengambilan contoh akar dilakukan dengan cara menggali tanah berbentuk kubus dengan ukuran panjang x lebar x kedalaman: 15 x 15 x 20 cm. Pada penelitian ini akar dikategorikan menjadi 3 (tiga) kelompok yaitu: akar primer, sekunder, dan tersier. Akar primer adalah akar dengan diameter > 5 mm, akar sekunder memiliki diameter 2,5 - 5 mm, dan akar tersier dengan diameter 0,5-2,5 mm (Marwanto *et al.*, 2013) Perkembangan akar dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Pradiko *et al.*, (2016) seperti pada persamaan 1.

$$\text{Perkembangan Perakaran} = \frac{\text{Berat kering akar (g)}}{\text{volume tanah (dm}^3\text{)}} \dots\dots\dots(1)$$

Data perkembangan akar yang telah diperoleh selanjutnya diolah menggunakan *software* Microsoft excel 2016 dan data selanjutnya disajikan dalam bentuk diagram.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Kimia Tanah

Hasil analisis kimia tanah dari ketiga blok tanaman yang digunakan sebagai objek pengamatan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Secara umum tidak terdapat perbedaan nyata tingkat kesuburan antar ketiga blok yang diamati. Nilai kapasitas tukar kation pada blok 42, 41, dan 27 masing-masing berkisar antara 14,79 –31,57 me/100 g; 16,78 – 25,73 me/100 g dan 22,71 – 29,50 me/100 g.

Sementara itu nilai kejenuhan basa berkisar 20,87–38,40 % pada blok 42, 18,29 – 41,24% pada blok 41, dan sebesar 18,24 – 54,13% pada blok 27. Secara relatif nilai kejenuhan basa tanah lapisan atas (0-20 cm) pada blok tanaman dengan lapisan sulfurik yang dangkal (blok 27) lebih rendah dibanding blok tanaman dengan lapisan sulfurik yang lebih dalam. Terdapat hubungan antara pH tanah dengan kandungan kation-kation basa di dalam tanah, dimana semakin rendah pH maka semakin rendah juga kandungan kation-kation basa. Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa pH tanah pada lapisan 0-20 cm di blok 27 lebih rendah dibanding blok 41 dan 42 yang memiliki lapisan sulfurik lebih dalam. Hal tersebut berdampak pada rendahnya jumlah kation basa (JKB) pada blok 27 di lapisan 0-20 cm yaitu sebesar 6,70 me/100 g dimana nilai tersebut

lebih kecil dibanding blok 41 dan 42 yaitu sebesar 7,68 me/100 g dan 8,97 me/100 g. Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa semakin dangkal lapisan

sulfurik dari permukaan tanah maka semakin rendah kejenuhan basanya yang berarti semakin rendah juga tingkat kesuburan tanah tersebut.

Tabel 1. Sifat kimia tanah pada masing-masing blok pengamatan.
 Table 1. The chemical properties of the soil in each observation block.

Blok Pengamatan	Kedalaman Tanah (cm)	pH		Atas dasar berat kering pada suhu 105°C										
		C		N	P	K	Ca	Mg	JKB	KTK	KB	Al-dd	Fe	
		H ₂ O	KCl	(%)	(%)	(ppm)		(m.e/100 gram)			(%)	(me/100gr)	(ppm)	
Blok 42 (lapisan sulfurik > 90 cm)	0-20	3.97	3.65	4.10	0.34	230.28	0.89	4.22	3.72	8.97	23.86	38.40	1.03	26.96
	20-40	3.36	3.12	1.10	0.12	16.78	0.39	2.42	1.97	4.90	14.79	32.92	1.45	24.76
	40-60	3.33	3.21	3.08	0.16	50.14	0.47	1.97	2.17	4.77	24.46	20.87	3.69	23.77
	60-80	3.17	3.06	4.27	0.19	68.45	0.43	2.60	2.91	6.13	27.61	22.92	1.83	27.61
	80-100	2.43	2.33	6.24	0.19	71.32	0.12	2.57	5.01	7.83	31.57	26.56	6.16	34.90
Blok 41 (Lapisan sulfurik 60-90 cm)	0-20	4.46	3.97	4.43	0.22	194.99	0.73	3.82	3.04	7.68	25.73	29.57	0.69	20.36
	20-40	3.53	3.30	2.59	0.14	51.35	0.72	1.29	1.20	3.32	19.16	18.94	1.40	27.33
	40-60	3.28	3.12	2.26	0.13	57.53	0.51	1.23	1.53	3.40	16.78	21.15	1.25	28.05
	60-80	2.92	2.79	3.13	0.12	37.11	0.32	1.62	2.24	4.33	23.66	18.29	2.59	29.30
	80-100	2.43	2.27	4.58	0.14	55.44	0.18	2.40	4.66	7.34	20.74	41.24	6.38	34.68
Blok 27 (Lapisan sulfurik 40-60 cm)	0-20	3.78	3.55	6.95	0.42	329.85	0.58	2.92	3.04	6.70	29.50	21.50	0.82	68.34
	20-40	3.48	3.30	3.04	0.16	135.86	0.30	1.54	2.16	4.12	22.89	18.24	1.15	27.37
	40-60	2.70	2.67	4.43	0.15	85.58	0.30	1.74	3.34	5.50	22.71	26.73	2.99	34.32
	60-80	2.58	2.52	5.38	0.15	86.34	0.17	1.97	5.70	7.97	23.14	35.71	4.74	34.03
	80-100	2.86	2.78	4.61	0.13	107.68	0.31	3.42	8.83	12.69	23.46	54.13	2.22	33.33

Keterangan: KTK = Kapasitas Tukar Kation; KB = Kejenuhan Basa; Al-dd = Alluminium dapat ditukarkan
 Note: KTK (CEC) = cation exchange capacity; KB (BS) = Base Saturation; Al-dd = exchangeable Alluminium

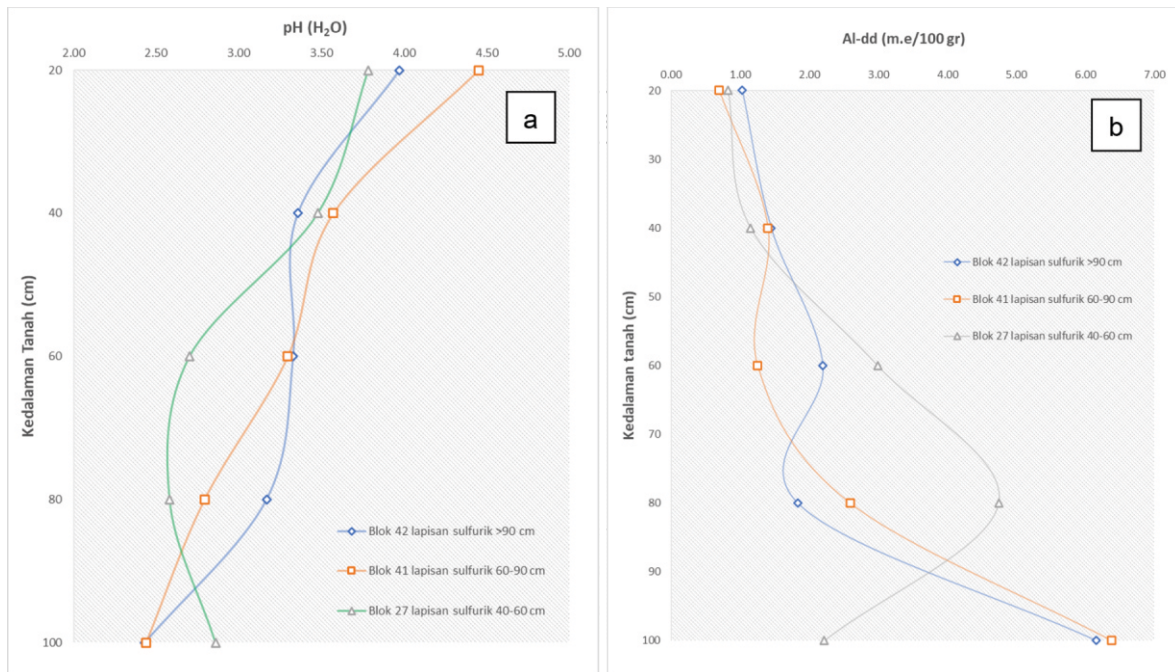
Beberapa karakteristik kimia tanah yang mempengaruhi perkembangan akar tanaman secara langsung adalah pH tanah, kandungan Al-dd dan Fe tanah. Tingkat kemasaman tanah di ketiga blok pengamatan tergolong tinggi dan ada kecenderungan tingkat kemasaman tanah semakin tinggi dengan semakin dalamnya lapisan tanah (Gambar 1a). Kemasaman yang tinggi (pH < 3) umumnya terdapat pada lapisan tanah dimana horizon sulfurik berada. Sebagai contoh, pada blok 42 dengan kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm, pH terendah diperoleh pada lapisan tanah dengan kedalaman 80-100 cm dengan pH 2,43. Demikian juga halnya dengan blok 41 (lapisan sulfurik 60-90 cm) dan blok 27 (lapisan sulfurik 40-60 cm), pH terendah masing-masing diperoleh pada lapisan tanah dengan kedalaman 80-100 cm dengan pH 2,43 dan pada kedalaman 60-80 cm dengan pH 2,58. Rendahnya pH tanah disekitaran lapisan sulfurik tersebut diduga akibat adanya fluktuasi muka air tanah yang menyebabkan teroksidasinya lapisan sulfurik tersebut. Jayalath *et al.*, (2016) menyatakan bahwa rendahnya pH tanah pada lapisan sulfurik dapat terjadi akibat proses oksidasi mineral

pirit yang menghasilkan ion H⁺ dan membentuk asam sulfat. Lebih lanjut, Mosley *et al.*, (2014) menyatakan bahwa ketika lapisan sulfurik terpapar oleh oksigen maka bahan sulfida termasuk mineral pirit dapat teroksidasi menghasilkan material sulfur yang dapat meningkatkan keasaman tanah disekitarnya.

Sejalan dengan kemasaman tanah, kandungan Al-dd tanah juga cenderung lebih tinggi pada lapisan tanah disekitaran lapisan sulfurik (Gambar 1b). Pada blok 42 dan 41, nilai Al-dd tertinggi pada kedalaman 100 cm masing-masing dengan nilai 6,16 me/100 g dan 6,38 me/100 g. Sementara pada blok 27 nilai Al-dd tertinggi pada kedalaman 80 cm dengan nilai 4,74 me/100 g. Kandungan Fe juga memiliki pola yang sama dengan pH dan kandungan Al-dd tanah dimana konsentrasi Fe tertinggi pada masing-masing blok pengamatan berada pada sekitar lapisan sulfurik. Pada blok 42 dan 41 dengan kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm dan 60-90 cm, kandungan Fe tertinggi berada pada kedalaman tanah 100 cm masing-masing dengan nilai 34,90 ppm dan 34,68 ppm. Pada blok 27 dengan kedalaman lapisan sulfurik 40-60 cm konsentrasi Fe tertinggi berada pada kedalaman 60

cm yaitu sebesar 34,32 ppm. Tingginya konsentrasi Fe pada tanah disekitar lapisan sulfurik tersebut kemungkinan diakibatkan oleh oksidasi mineral pirit yang terkandung pada lapisan sulfurik tersebut yang menyebabkan menurunnya pH tanah dan terlepasnya

Fe pada larutan tanah. Fahmi & Nursyamsi, (2022) menyatakan bahwa oksidasi pirit dapat menghasilkan Fe^{2+} dan SO_4 , dimana kedua ion tersebut secara cepat teroksidasi kembali membentuk beberapa mineral baru sesuai dengan kondisi lingkungan.



Gambar 1. Rerata pH tanah (a) dan Al-dd (b) pada setiap kedalaman tanah pada masing-masing blok pengamatan.

Figure 1. Average of soil pH (a) dan exchangeable Al (b) at each soil depth in every observation block.

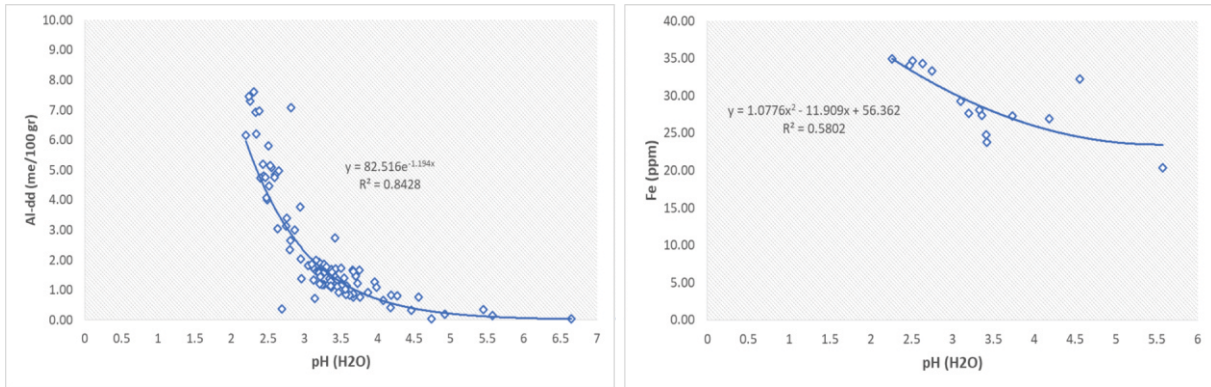
Terdapat hubungan yang cukup erat antara kandungan Al-dd tanah dan Fe tanah dengan pH tanah (Gambar 2). Hasil analisis korelasi menunjukkan bahwa terdapat hubungan secara eksponensial antara pH dengan Al-dd tanah yang dijelaskan dengan persamaan $y = 82,516e^{-1.194x}$ dengan nilai $R^2 = 0,84$ (Gambar 2). Sementara hubungan antara pH dengan kandungan Fe tanah adalah hubungan kuadratik yang dijelaskan dengan persamaan $y = 1,0776x^2 - 11,909x + 56,362$ dengan nilai $R^2 = 0,58$. Dari Gambar 2 terlihat bahwa kandungan Al-dd tanah mulai terlihat meningkat ketika pH tanah < 4,5. Sementara itu konsentrasi Fe tanah mulai meningkat ketika pH tanah berada pada nilai sekitar 3,5. Hartono *et al.*, (2022) melaporkan bahwa ada hubungan yang nyata antara pH tanah

dengan Al-dd tanah dimana ketika pH turun maka konsentrasi Al-dd tanah akan meningkat. Selanjutnya, Kusumaningtyas *et al.*, (2015) juga melaporkan bahwa terjadi penurunan konsentrasi Fe seiring dengan peningkatan pH tanah. Penn & Camberato, (2019) menambahkan bahwa penurunan pH tanah akan mendorong pelarutan oksida dan hidroksida Al dan Fe melalui hidrolisis Al dan Fe.

Penurunan pH dan peningkatan kadar Al-dd pada ketiga blok yang diamati diduga terkait dengan fluktuasi tinggi muka air tanah pada ketiga blok tersebut akibat manajemen ketinggian muka air tanah yang kurang baik. Ketika muka air tanah turun melebihi kedalaman lapisan sulfurik maka bahan-bahan sulfidik akan teroksidasi melepaskan ion H^+ dan Al pada larutan tanah. Fenomena tersebut disebabkan oleh

oksidasi mineral pirit dimana oksidasi setiap mol pirit akan menghasilkan asam sulfat selanjutnya asam sulfat tersebut akan mengalami disosiasi melepaskan

2 mol ion H^+ yang menyebabkan menurunnya pH tanah seperti dijelaskan pada reaksi berikut (Dos Santos *et al.*, 2016)



Gambar 2. Hubungan antara pH tanah dengan Al-dd tanah (kiri) dan kandungan Fe tanah (kanan).
 Figure 2. Correlation between soil pH and exchangeable-Al (left) and soil pH with soil Fe content (right).

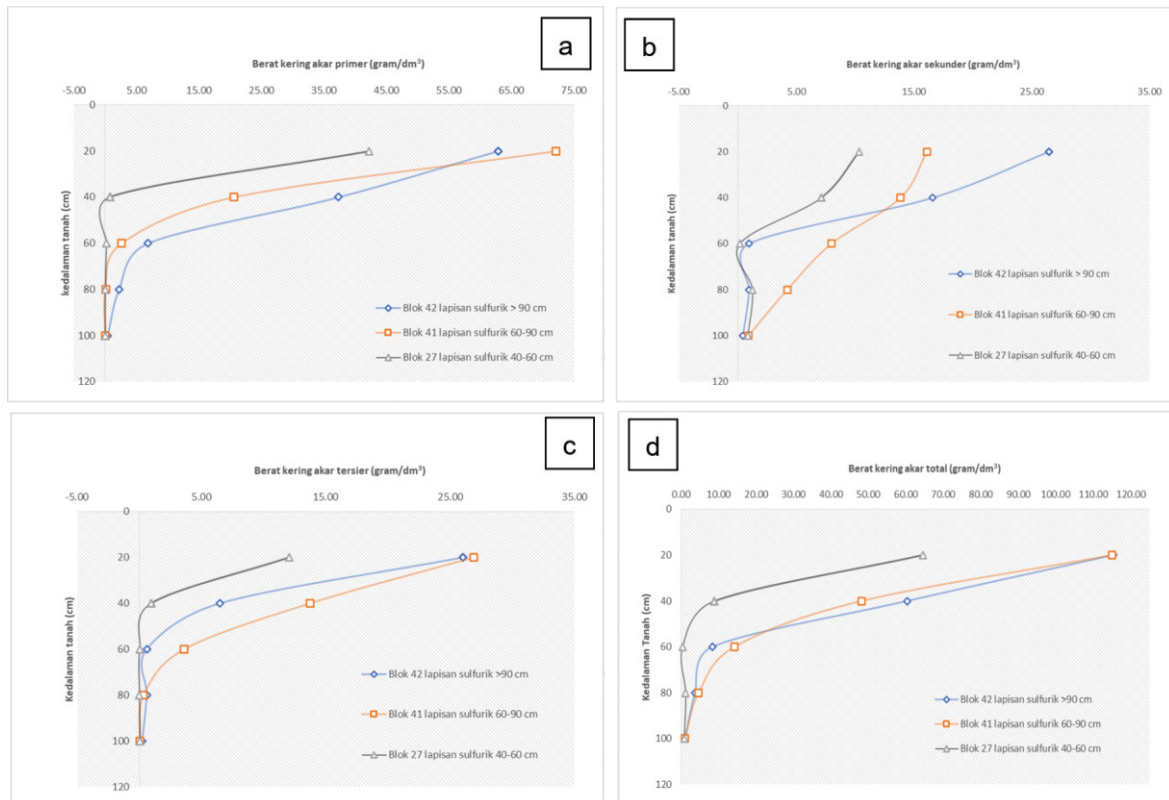
$FeS_2 + 7/2O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$ (3)
 Fitzpatrick *et al.*, (2017) menyatakan bahwa salah satu penciri tanah sulfat masam adalah keberadaan pirit yang terbentuk pada kondisi anaerob yang sangat reduktif sehingga adanya gangguan seperti drainase maupun fluktuasi muka air tanah dapat menyebabkan pirit teroksidasi yang secara langsung maupun tidak langsung mengakibatkan peningkatan kemasaman tanah. Lebih lanjut Karimian *et al.*, (2018) menambahkan bahwa kelarutan Al sangat bergantung pada pH dan kelarutan Al yang tinggi serta berpotensi beracun jika lahan sulfat masam dengan $pH < 5$ di drainase.

Perkembangan Akar Kelapa Sawit

Perkembangan akar primer, sekunder dan tersier tanaman kelapa sawit secara vertikal pada ketiga blok pengamatan disajikan pada Gambar 3. Secara umum pada ketiga blok pengamatan terdapat pola perkembangan akar yang sama yaitu perkembangan akar semakin menurun seiring dengan semakin dalam tanah. Hasil yang sama juga dikemukakan oleh Ginting *et al.*, (2020) dan Sutarta *et al.*, (2017) yang menyatakan bahwa distribusi akar tanaman kelapa sawit memiliki pola semakin menurun dengan semakin dalamnya tanah. Secara umum baik akar primer, sekunder, maupun tersier banyak terdistribusi pada

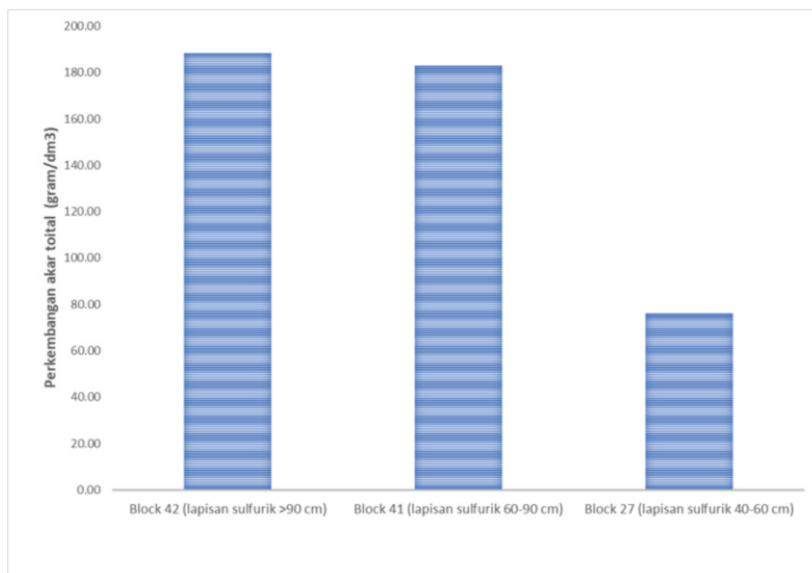
kedalaman sekitar 0–20 cm. Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa secara umum baik akar primer, sekunder, maupun tersier pada blok tanaman dengan kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm (blok 42) dan 60-90 cm (blok 41) terdistribusi hingga kedalaman sekitar 60 cm, namun pada kedalaman > 60 cm distribusi akar menurun drastis. Sementara itu pada blok tanaman dengan kedalaman lapisan sulfurik 40-60 cm (blok 27), akar tanaman kelapa sawit hanya terdistribusi sampai pada kedalaman sekitar 40 cm. Dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa kedalaman lapisan sulfurik mempengaruhi perkembangan akar kelapa sawit dimana semakin dangkal kedalaman lapisan sulfurik dari permukaan tanah semakin sedikit akar yang berkembang.

Gambar 4 memperlihatkan perbandingan perkembangan total akar (primer, sekunder, dan tersier) dari ketiga blok pengamatan. Dari grafik tersebut terlihat bahwa perkembangan total akar kelapa sawit pada blok 42 dengan kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm relatif lebih tinggi dibanding blok 41 dan 27 dengan lapisan sulfurik yang lebih dangkal. Perkembangan akar total tertinggi diperoleh pada blok tanaman dengan kedalaman lapisan sulfurik > 90 cm (blok 42) yaitu sebesar 188,26 g/dm³, disusul blok 41 dengan kedalaman lapisan sulfurik 60-90 cm sebesar 182,97 g/dm³, dan blok 27 dengan kedalaman lapisan sulfurik 40 - 60 cm sebesar 75,99 g/dm³.



Gambar 3. Distribusi akar primer (a), sekunder (b), tersier (c), dan total (d) kelapa sawit pada ketiga blok pengamatan.

Figure 3. Distribution of primary roots (a), secondary roots (b), tertiary roots (c), and total roots (d), in three observation block.



Gambar 4. Perbandingan perkembangan akar total kelapa sawit pada ketiga blok pengamatan.

Figure 4. The Comparison of total roots development in the observation block.

Rendahnya distribusi akar pada kedalaman tanah di sekitar lapisan sulfurik diduga terkait dengan adanya fluktuasi muka air tanah yang menyebabkan teroksidasinya bahan-bahan sulfidik yang menghasilkan pH yang sangat masam sehingga menghambat perkembangan akar tanaman. Sebagai contoh, pada blok 27, dimana lapisan sulfurik terdapat pada kedalaman 40-60 cm dari permukaan tanah, distribusi akar (baik primer, sekunder, maupun tersier) hanya terkonsentrasi sampai kedalaman 40 cm dan langsung menurun drastis pada kedalaman > 40 cm. Lapisan sulfurik yang dangkal pada blok 27 tersebut rentan teroksidasi akibat fluktuasi tinggi muka air tanah. Dengan teroksidasinya lapisan sulfurik tersebut maka pH tanah pada kedalaman sekitar 40-60 cm menjadi sangat masam dan menghambat perkembangan akar tanaman kelapa sawit. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa pada blok 27 pada kedalaman 20-40 cm, pH tanah sebesar 3,48 dan langsung menurun drastis pada kedalaman 40-60 cm menjadi 2,70. Kondisi tersebut menyebabkan perkembangan akar tanaman kelapa sawit pada blok 27 tersebut menjadi terhambat dan hanya terkonsentrasi pada kedalaman 0-40 cm. Singh *et al.*, (2014) menyatakan bahwa pada tanah dengan nilai pH yang rendah maka larutan tanah akan didominasi oleh ion H^+ dan Al^{3+} dimana kedua ion tersebut dapat meracuni akar tanaman. Selanjutnya Zu *et al.*, (2014) juga mengemukakan bahwa pH yang sangat rendah dapat menyebabkan menurunnya luas permukaan akar, sehingga mengakibatkan terhambatnya perkembangan akar. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa terdapat keterkaitan antara kedalaman lapisan sulfurik dengan perkembangan akar tanaman, dimana perkembangan akar tanaman kelapa sawit hanya terkonsentrasi sampai pada lapisan tanah di atas lapisan sulfurik saja. Dengan kata lain, semakin dangkal lapisan sulfurik maka akan semakin terhambat pula perkembangan akar tanaman kelapa sawit. Hal tersebut dapat menjadi dasar mengapa untuk memanfaatkan lahan pasang surut dengan jenis tanah sulfat masam sebagai perkebunan kelapa sawit kedalaman lapisan sulfurik yang disyaratkan harus lebih dari 90 cm. Dengan memenuhi persyaratan tersebut maka akar tanaman kelapa sawit dapat berkembang hingga lebih dari 60 cm dari permukaan tanah.

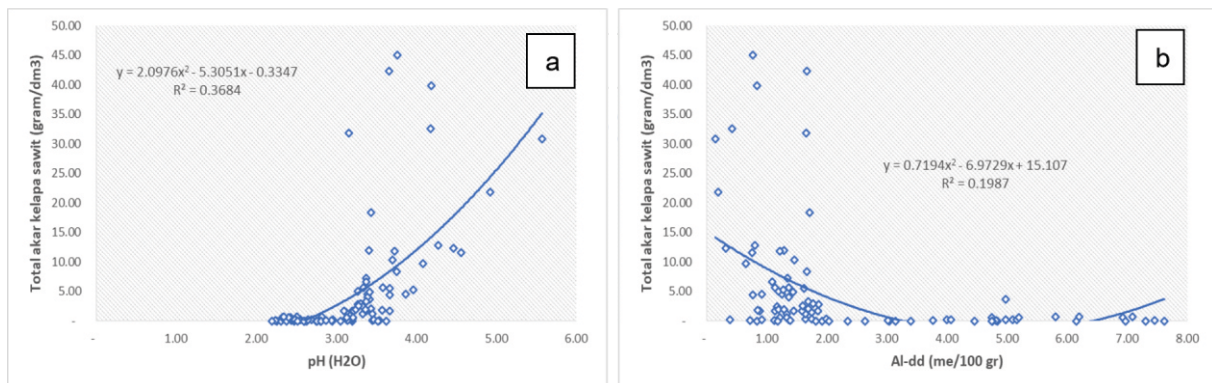
Hasil analisis korelasi dan regresi antara pH

tanah dengan distribusi total akar tanaman kelapa sawit memperlihatkan bahwa terdapat korelasi negatif antara pH tanah dengan perkembangan akar kelapa sawit, dimana perkembangan akar cenderung semakin kecil dengan semakin menurunnya pH tanah (Gambar 5a). Hubungan tersebut dijelaskan dengan persamaan $y = 2,0976x^2 - 5,3051x - 0,3347$ dengan nilai $R^2 = 0,36$. Dari grafik tersebut terlihat bahwa perkembangan akar kelapa sawit mulai terhambat ketika pH tanah < 3,5. Selain kemasaman tanah, kandungan Al-dd yang tinggi di dalam tanah juga dapat menyebabkan terhambatnya perkembangan akar tanaman. Pada Gambar 5b dijelaskan bagaimana hubungan antara kandungan Al-dd tanah dengan perkembangan akar tanaman kelapa sawit. Dari hasil analisis korelasi dan regresi, terdapat hubungan yang bersifat negatif antara kandungan Al-dd tanah dengan perkembangan total akar tanaman kelapa sawit. Walaupun tidak terdapat hubungan yang erat antara kandungan Al-dd tanah dengan perkembangan akar kelapa sawit, namun dari Gambar 5b dapat dilihat bahwa ada kecenderungan semakin rendahnya perkembangan akar tanaman dengan semakin tingginya kandungan Al-dd tanah. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa akar tanaman hanya berkembang pada kandungan Al-dd tanah di bawah 2,0 m.e/100 g dan mulai terhenti perkembangannya ketika kandungan Al-dd tanah di atas nilai tersebut. Beberapa penelitian memperlihatkan bahwa konsentrasi Aluminium yang tinggi di dalam tanah dapat menghambat pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman (Kopittke *et al.*, 2015; Sujatha & Mehar, 2015) dan gangguan morfologi akar (Buchanan *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2019). Ujung akar merupakan bagian paling sensitif dari sistem akar yang terpengaruh keracunan Al. Selain itu, ujung akar merupakan zona transisi distal antara meristem apical yang rentan terhadap keracunan Al (Wu *et al.*, 2022; Yang & Horst, 2015; J. Zhang *et al.*, 2019; X. F. Zhu *et al.*, 2017).

Dari nilai koefisien korelasi (R^2) yang hanya 0,19 dapat dikatakan bahwa kandungan Al-dd tanah tidak terlalu mempengaruhi perkembangan akar kelapa sawit. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya factor-faktor lain yang terlebih dahulu menghambat perkembangan akar sebelum akar terpapar oleh Al-dd tanah, salah satunya adalah konsentrasi ion H^+ yang tinggi akibat pH tanah yang sangat masam. Kidd & Proctor (2001) melaporkan bahwa pada

tanah dengan pH yang sangat masam, dimana konsentrasi ion H^+ sangat tinggi, akar tanaman akan terlebih dahulu mengalami keracunan ion H^+ sebelum tanaman berhadapan dengan faktor-faktor kurang menguntungkan lainnya seperti keracunan

Alumunium. Dengan demikian, toksisitas ion H^+ secara langsung menjadi penyebab terhambatnya pertumbuhan tanaman pada tanah yang sangat masam.



Gambar 5. Hubungan antara pH tanah (a) dan kandungan Al-dd tanah (b) dengan perkembangan total akar kelapa sawit.

Figure 5. Correlation between soil pH with oil palm total root (a) and exchangeable Al with oil palm total root (b).

Ada dua mekanisme bagaimana konsentrasi H^+ yang tinggi mempengaruhi pertumbuhan tanaman, yaitu: (1) ion H^+ dapat menyebabkan rusaknya jaringan akar, oleh karenanya proses perpanjangan akar, percabangan lateral, pertambahan luas permukaan, dan pertambahan volume akar menjadi terhambat (Alam *et al.*, 1999), dan (2) efek khusus pada aliran ion di dalam akar akibat kompetisi serapan yang terjadi antara ion H^+ dengan kation basa dimana ion H^+ dapat menyebabkan rusaknya selektivitas membran akar terhadap penyerapan ion (Zu *et al.*, 2014). Sebagai contoh ion H^+ dapat menyebabkan menurunnya fungsi membran plasma akar dan menyebabkan hilangnya K dari dalam akar atau menghambat penyerapan K oleh akar (Alam *et al.*, 1999). Selanjutnya, Foy (1992) juga menyatakan bahwa konsentrasi ion H^+ yang tinggi di dalam tanah akan menyebabkan terjadinya persaingan antara ion H^+ dengan kation lainnya pada sisi aktif akar sehingga dapat mengganggu penyerapan dan transportasi ion dimana hal tersebut dapat menyebabkan membran akar menjadi bocor. Dengan bocornya membran akar maka akar dapat kehilangan senyawa organik seperti asam amino dan kation yang telah diserap sebelumnya, dan jika

akar terekspos ion H^+ yang tinggi dalam jangka waktu yang terlalu lama maka dapat mengakibatkan menurunnya kapasitas penyerapan akar terhadap hara.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa kedalaman lapisan sulfurik pada tanah sulfat masam mempengaruhi perkembangan akar kelapa sawit, dimana semakin dangkal lapisan sulfurik dari permukaan tanah maka semakin terhambat perkembangan akar kelapa sawit. Hal tersebut disebabkan tingginya tingkat kerentanan lapisan sulfurik tersebut teroksidasi akibat fluktuasi muka air tanah. Terhambatnya perkembangan akar kelapa sawit tersebut disebabkan rendahnya pH tanah dan tingginya kandungan Al-dd serta Fe pada tanah disekitar lapisan sulfurik tersebut. Oleh karenanya pemanfaatan lahan sulfat masam untuk budidaya kelapa sawit harus memperhatikan kedalaman lapisan sulfurik, dimana lapisan sulfurik yang aman untuk perkembangan akar kelapa sawit adalah pada kedalaman > 90 cm dari permukaan tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, S. M., Naqvi, S. S. M., & Ansari, R. (1999). Impact of Soil pH on Nutrient Uptake by Crop Plants. In M. Pessarakli (Ed.), *Handbook of plant and crop stress* (2nd ed., pp. 51–60). Msrceel Dekker, Inc.
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *BIOCHEMISTRY & MOLECULAR BIOLOGY OF PLANTS* (B. B. Buchanan, W. Gruissem, & R. L. Jones, Eds.; 2nd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Dang, T., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R., & Marschner, P. (2016). Addition of Organic Material to Sulfuric Soil Can Reduce Leaching of Protons, Iron and Aluminium. *Geoderma*, 271, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.012>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2021). STATISTIK PERKEBUNAN UNGGULAN 2020-2022 (D. Gartina & L. L. Sukriya, Eds.). Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan. www.ditjenbun.pertanian.go.id
- Dos Santos, E. C., De Mendonça Silva, J. C., & Duarte, H. A. (2016). Pyrite Oxidation Mechanism by Oxygen in Aqueous Medium. *Journal of Physical Chemistry C*, 120(5), 2760–2768. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10949>
- Fahmi, A., & Nursyamsi, D. (2022). Tanah Sulfat Masam. In A. Fahmi & M. Noor (Eds.), *SIFAT DAN PENGELOLAAN TANAH SULFAT MASAM DAN GAMBUT* (1st ed., pp. 39–110). Rajawali Pers.
- Fitzpatrick, R. W., Shand, P., & Mosley, L. M. (2017). Acid Sulfate Soil Evolution Models and Pedogenic Pathways During Drought and Reflooding Cycles in Irrigated Areas and Adjacent Natural Wetlands. *Geoderma*, 308, 270–290. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.016>
- Foy, C. D. (1992). Soil chemical factors limiting plant root growth. In *Advances in Soil Science* (Vol. 19, pp. 97–131). Springer-Verlag New York Inc.
- Ginting, E. N., Pradiko, I., Farrasati, R., & Rahutomo, S. (2020). Pengaruh Rock Phosphate dan Dolomit Terhadap Distribusi Perakaran Tanaman Kelapa Sawit Pada Tanah Ultisols. *Agrikultura*, 31(1), 32. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v31i1.25390>
- Hartono, A., Nadalia, D., & Satria, P. H. (2022). Aluminium Dapat Dipertukarkan dan Fosfor Tersedia pada Tanah di Provinsi Bangka Belitung. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(1), 20–24. <https://doi.org/10.29244/jitl.24.1.20-24>
- Jayalath, N., Mosley, L. M., Fitzpatrick, R. W., & Marschner, P. (2016). Addition of Organic Matter Influences pH Changes in Reduced and Oxidised Acid Sulfate Soils. *Geoderma*, 262, 125–132. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.012>
- Karimian, N., Johnston, S. G., & Burton, E. D. (2018). Iron and Sulfur Cycling in Acid Sulfate Soil Wetlands Under Dynamic Redox Conditions: A review. *Chemosphere*, 197, 803–816. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.096>
- Kidd, P. S., & Proctor, J. (2001). Why Plants Grow Poorly on Very Acid Soils: are ecologists missing the obvious? *Journal of Experimental Botany*, 52(357), 791–799.
- Kopittke, P. M., Moore, K. L., Lombi, E., Gianoncelli, A., Ferguson, B. J., Blamey, F. P. C., Menzies, N. W., Nicholson, T. M., McKenna, B. A., Wang, P., Gresshoff, P. M., Kourousias, G., Webb, R. I., Green, K., & Tollenaere, A. (2015). Identification of The Primary Lesion of Toxic Aluminum in Plant Roots. *Plant Physiology*, 167(4), 1402–1411. <https://doi.org/10.1104/pp.114.253229>
- Kusumaningtyas, A. S., Cahyono, P., Sudarto, & Suntari, R. (2015). Pengaruh Tinggi Muka Air Tanah Terhadap pH, Eh, Fe, Al-dd , Mn dan P Terlarut Pada Tanaman Nanas Klon GP3 di Ultisol. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 2(1), 103–109. <http://jtsl.uib.ac.id>
- Marwanto, S., Sabiham, S., Sudadi, U., & Agus, F. (2013). Pengaruh Kerapatan Akar, Pupuk dan Kedalaman Muka Air Tanah terhadap Emisi CO2 dari Tanah Gambut pada Perkebunan Kelapa Sawit. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 37(1), 9–18. <https://doi.org/10.2017/jti.v37i1.6325>
- Masulili, A. (2015). Pengelolaan Lahan Sulfat Masam Untuk Pengembangan Pertanian. *Jurnal Agrosans*, 12(2), 1–13.

- Mosley, L. M., Fitzpatrick, R., & Groenenberg, B.-J. (2014). *Lower Murray Reclaimed Irrigation Area (LMRIA) Acidification Project: A biogeochemical model for assessing and managing acid sulfate soils in the Lower Murray region of South Australia*. www.epa.sa.gov.au
- Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A Critical Review on Soil Chemical Processes that Control How Soil pH Affects Phosphorus Availability to Plants. *Agriculture (Switzerland)*, 9(6). <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
- Pradiko, I., Hidayat, F., Darlan, N. H., Santoso, H., Winarna, W., Rahutomo, S., & Sutarta, E. S. (2016). Root Distribution of Oil Palm and Soil Physical Properties in Different Planting Hole and Empty Fruit Bunches Application. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 24(1), 23–38. <https://doi.org/10.22302/10.22302/iopri.jur.jpks.v24i1.4>
- Primayuda, A., Suriadikusumah, A., & Solihin, M. A. (2022). Identifikasi Kedalaman Pirit dan Kaitannya Terhadap Kesehatan dan Produktivitas Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) (Studi Kasus di Perkebunan PT Sawit Sumbermas Sarana Tbk). *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(1), 6–13. <https://doi.org/10.29244/jitl.24.1.6-13>
- Pusparani, S. (2018). Karakteristik Sifat Fisik dan Kimia Pada Tanah Sulfat Masam di Lahan Pasang Surut. *Jurnal Hexagro*, 2(1).
- Shamshuddin, J., Elisa Azura, A., Shazana, M. A. R. S., Fauziah, C. I., Panhwar, Q. A., & Naher, U. A. (2014). Properties and management of acid sulfate soils in Southeast Asia for sustainable cultivation of rice, oil palm, and cocoa. In *Advances in Agronomy* (Vol. 124, pp. 91–142). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800138-7.00003-6>
- Shamshuddin, J., Panhwar, Q. A., Jamaludin, A. F., Shazana, R. S., Shamshuddin, J., Panhwar, Q. A., Alia, F. J., Shazana, M. A. R. S., Radziah, O., & Fauziah, C. I. (2017). Formation and Utilisation of Acid Sulfate Soils in Southeast Asia for Sustainable Rice Cultivation. *Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science*, 40(2), 225–246. <http://www.pertanika.upm.edu.my/>
- Singh, B., Cattle, S. R., & Field, D. J. (2014). Edaphic Soil Science, Introduction to. In N. K. Van Alfen (Ed.), *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems* (Vol. 3, pp. 35–58). Academic Press Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52512-3.00092-9>
- Sujatha, K., & Kumar Mehar, S. (2015). Toxic Effects of Aluminium in Plants. *Indian Journal of Plant Sciences*, 4(1), 1–4. <http://www.cibtech.org/jps.htm>
- Sutarta, E. S., Winarna, & Arif Yusuf, M. (2017). Distribusi Hara Dalam Tanah dan Produksi Tanaman Kelapa Sawit Pada Metode Pemupukan yang Berbeda. *Jurnal Pertanian Tropik*, 4(1), 84–94.
- Wu, Q., Tao, Y., Huang, J., Liu, Y. S., Yang, X. Z., Jing, H. K., Shen, R. F., & Zhu, X. F. (2022). The MYB Transcription Factor MYB103 Acts Upstream of TRICHOME BIREFRINGENCE-LIKE27 in Regulating Aluminum Sensitivity by Modulating The O-acetylation Level of Cell Wall Xyloglucan in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Journal*, 111(2), 529–545. <https://doi.org/10.1111/tbj.15837>
- Yang, Z.-B., & Horst, W. J. (2015). Aluminum-Induced Inhibition of Root Growth: Roles of Cell Wall Assembly, Structure, and Function. In F. Baluska & S. K. Panda (Eds.), *Signaling and Communication in Plants: Aluminum Stress Adaptation in Plants* (Vol. 24, pp. 253–273). Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9>
- Zhang, F., Yan, X., Han, X., Tang, R., Chu, M., Yang, Y., Yang, Y. H., Zhao, F., Fu, A., Luan, S., & Lan, W. (2019). A Defective Vacuolar Proton Pump Enhances Aluminum Tolerance by Reducing Vacuole Sequestration of Organic Acids. *Plant Physiology*, 181(2), 743–761. <https://doi.org/10.1104/pp.19.00626>
- Zhang, J., Li, D., Wei, J., Ma, W., Kong, X., Rengel, Z., & Chen, Q. (2019). Melatonin alleviates aluminum-induced root growth inhibition by interfering with nitric oxide production in *Arabidopsis*. *Environmental and Experimental Botany*, 161, 157–165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.08.014>

- Zhu, C. Q., Cao, X. C., Zhu, L. F., Hu, W. J., Hu, A. Y., Abliz, B., Bai, Z. G., Huang, J., Liang, Q. D., Sajid, H., Li, Y. F., Wang, L. P., Jin, Q. Y., & Zhang, J. H. (2019). Boron Reduces Cell Wall Aluminum Content in Rice (*Oryza sativa*) Roots by Decreasing H₂O₂ Accumulation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 138, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.022>
- Zhu, X. F., Wan, J. X., Wu, Q., Zhao, X. S., Zheng, S. J., & Shen, R. F. (2017). PARVUS Affects Aluminium Sensitivity by Modulating The Structure of Glucuronoxylan in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell and Environment*, 40(9), 1916–1925. <https://doi.org/10.1111/pce.12999>
- Zu, C., Li, Z., Yang, J., Yu, H., Sun, Y., Tang, H., Yost, R., & Wu, H. (2014). Acid Soil is Associated with Reduced Yield, Root Growth and Nutrient Uptake in Black Pepper (*Piper nigrum* L.). *Agricultural Sciences*, 05(05), 466–473. <https://doi.org/10.4236/as.2014.55047>